

Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos – transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil



Klaus Fricke, Christiane Pereira, Aguinaldo Leite, Marius Bagnati

**Klaus Fricke – Christiane Pereira
Aguinaldo Leite – Marius Bagnati
Coordenadores**

**GESTÃO SUSTENTÁVEL DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**
transferência de experiência
entre a Alemanha e o Brasil

Parte I

**Technische Universität Braunschweig
Braunschweig – 2015**

1ª Versão: Junho – 2015

Versão Atualizada: **Maio – 2017**

Publicado por: ANS e.V., Braunschweig

Apoio financeiro: Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF

Coordenadores: Klaus Fricke
Christiane Pereira
Aguinaldo Leite
Marius Bagnati

Capa: Wiese Foto + Film GmbH & Co.KG, Porta Westfalica, Germany

Tradução: Christiane Pereira
Sabine Robra
Simone Dealtry

Revisão textual: Luciane Pansolin

Projeto gráfico: Letras e Formas

Revisão técnica: Christiane Pereira

ISBN: 978-3-924618-46-9

Esse e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Maio – 2017.**

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos:** transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

Uso autorizado desde que citada a fonte e informado via e-mail: grrsu.br@gmail.com

Copyright: © TU Braunschweig, 2015

Beethovenstraße 51a – 38106 Braunschweig – Germany
www.lwi.tu-bs.de

COLABORADORES

Aguinaldo Leite

Alexander Gosten

Aline Cardoso Domingos

Anderson Luiz de Araújo

André Luiz da Conceição

Andreas Jaron

Anne-Sophie Fölster

Anton Zeiner

Antonio Marius Zuccarelli Bagnati

Axel Hüttner

Beate Vielhaber

Bertram Kehres

Bruno Mattheeuws

Burkart Schulte

Camila Barbi Campos

Carlo Vendrix

Carlos RV Silva Filho

Carsten Cuhls

Christiane Pereira

Christine Pereira-Glodek

Christof Heußner

Diana Piffer Gigliotti

Diego de Carvalho Frade

Eduardo Tomasevicius Filho

Erick Meira de Oliveira

Franz Vogel

Gabriel de Carvalho Gimenez

Gabriela Gomes Prol Otero

Helge Dorstewitz

Helge Wendenburg

Hélinah Cardoso Moreira

Herbert Beywinkler

Hubert Baier

Jens Giersdorf

José Luiz Crivelatti de Abreu

Kai Münnich

Karlgünter Eggersmann

Kátia Goldschmidt Beltrame

Klaus Fricke

Lauro Raphael Acorci Donadell

Luc A. De Baere

Lucas Aparecido Rodrigues

Luiz Gustavo Gallo Vilela

Lutz Hoffmann

Magnus Martins Caldeira

Marcelo de Paula Neves Lelis

Marcelo Foelkel Patrão

Maria Thelen-Jüngling

Markus Bux

Michael Balhar

Michael Ludden

Olga Kasper

Paulo Belli Filho

Roberta da Silva Leone

Rodrigo Miguel Pereira Batalha

Sabine Robra

Sebastian Wanka

Simone Neiva Rodella

Tacio Mauro Pereira de Campos

Theo Schneider

Thomas Schlien

Thomas Turk

Victor Bustani Valente

Vinicius Silva de Macedo

Wilhelm Winkelmann

APRESENTAÇÃO

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

A Política Nacional de Resíduos Sólidos desloca o tema resíduo sólido para outro patamar, extrapolando discussões voltadas exclusivamente para formas de disposição final em aterros. O novo arcabouço legal incorpora a consciência das riquezas e potencialidades possíveis no manejo dos resíduos, ao passo que também nos revela os erros e omissões que se acumularam nos últimos trinta anos.

Ao debatermos o tema “Gestão Sustentável dos Resíduos Sólidos Urbanos” teremos em pauta a extensão do nosso problema e da nossa responsabilidade frente à proteção ambiental. Neste momento, devemos afastar de nossa consciência qualquer ilusão de facilidade, qualquer desejo de soluções mágicas, qualquer tentação de fazer ações espetaculares.

Da mesma forma, devemos afastar o desânimo, o desespero de achar que os problemas não têm solução, que o mercado de resíduos não suportará a implantação da Política Nacional. É hora de sentarmos à mesa. É hora de estudarmos, avaliarmos e compararmos. É hora de questionarmos. É hora de juntos pensarmos em soluções dinâmicas e eficientes, que, com segurança técnica, possam responder aos anseios do mercado, do poder público e, sobretudo da sociedade.

O livro tem como objetivo abrir uma discussão multidisciplinar integrando vários segmentos do mercado a fim de permitir o delineamento de ferramentas para a implementação de uma gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Os debates abrangem desde as tecnologias na forma de fermentação, compostagem, secagem, reciclagem e recuperação energética até o fornecimento de informações, a assessoria na introdução de uma gestão sustentável de resíduos e, ainda, a engenharia e conteúdo científico, bem como os aspectos relevantes para implementação dos projetos, tais como tendências e desafios da gestão, entre outros aspectos do mercado.

Esta publicação técnica irá fornecer ainda conhecimento global deste novo mercado e também a construção de uma inter-relação com o setor dos resíduos no âmbito Brasil-Alemanha, estabelecendo um intercâmbio com instituições alemãs ícones em práticas que garantem a proteção climática e a preservação dos recursos naturais, oportunizando assim uma troca permanente de experiências, através da educação profissional e tecnológica.

A publicação é composta de três partes que abordam a gestão sustentável dos resíduos sólidos urbanos na Alemanha e no Brasil e ainda retratam o estado da arte das tecnologias para valorização desses resíduos.

É com imensa alegria que oportunizamos uma publicação que reforçará o modo de discutirmos as melhores práticas na gestão dos resíduos sólidos urbanos, reconhecendo que não

foram medidos esforços para sua realização tanto pelos autores quanto pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa (*Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF*) e pela Agência Alemã de Cooperação Internacional (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ*) através do programa PROBIOGÁS (Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil).

Os rumos que tomamos no presente definem nosso futuro.

*Jundiaí e Braunschweig,
Junho de 2015*

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Apresentação. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

SUMÁRIO

[Veja o sumário paginado no final]

Colaboradores

Apresentação

PARTE I

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA ALEMANHA

A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento
Socioambiental em Gestão de Resíduos

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

A Eficiência dos Recursos e Gestão da Reciclagem:
implementação na Alemanha

Resource Efficiency and Recycling Management: implementation in Germany

Doutor Helge Wendenburg

Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos

*Energy Efficiency of Material Recycling and Energy Recovery
of Selected Waste Fractions*

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Gestão Internacional de Resíduos: desafios, medidas e possibilidades

International Waste Management: challenges, measures and chances

Doutor Andreas Jaron

CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos

CReED – Centre for Research, Education and Demonstration in Waste Management

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Dipl.-Engenheiro Nuclear Burkart Schulte

Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Formação Profissional e Continuada:
instrumento fundamental para uma gestão sustentável dos resíduos

Continuously Capacity Building: a fundamental instrument for a sustainable waste management

Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann

Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do
Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha

State of the Art and Development Potential of Mechanical and Biological Treatment in Germany

Engenheiro Civil Michael Balhar

Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de
Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos

Treatment of Gaseous Emissions from Mechanical-Biological Treatment of Municipal Solid Waste

Doutor Engenheiro Civil e Químico Ambiental Carsten Cuhls

Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a
Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos

Lessons Learned on the Way to Realize Anaerobic Digestion Plants and Other Waste Treatment Plants

Engenheiro Civil Theo Schneider

Engenheiro Civil Herbert Beywinkler

Experiências Comprovadas com Combustíveis Alternativos em Fornos de Cimento

Proven Experiences with Alternative Fuels in Cement Kilns

Doutor Hubert Baier

Gestão de Qualidade: certificação de produtos para o emprego sustentável do composto orgânico

Quality Assurance: product certification for sustainable application of compost

Doutor Bertram Kehres

Engenheira Agrônoma Maria Thelen-Jüngling

A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

The Biodigestion of Solid Waste in Germany

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Engenheiro Civil Christof Heußner

Engenheiro Mecânico Axel Hüttner

Engenheiro Mecânico Thomas Turk

Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos: conceito, experiências operacionais e otimização

Recovery of Municipal Solid Waste: concept, operational experience and optimization

Doutora Geóloga Beate Vielhaber

Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na Planta de Fermentação da Cidade de Berlim

*Exploitation and Beneficiation of Biogas Derived from
Fermentation Plant of the City of Berlin*

Engenheiro Mecânico Wilhelm Winkelmann

Doutor Engenheiro de Minas Alexander Gosten

Aproveitamento Energético do Biogás

Biogas for Energy Production

Doutora Engenheira Agrônoma Sabine Robra

Tecnologias de Purificação de Biogás

Technologies for Clean up the Biogas

Engenheiro Civil Helge Dorstewitz

Engenheiro Mecânico Axel Hüttner

Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: *status quo* na Alemanha e no Brasil

*Energetic Use of Biogas in Wastewater treatment Plants:
status quo in Germany and Brazil*

Engenheira Hélinah Cardoso Moreira

Engenheiro Victor Bustani Valente

Comportamento dos Aterros quando da Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico

Landfill Behaviour when Disposal of Residues from Mechanical Biological Treatment

Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas

*Mining of Municipal Solid Waste Landfills:
reduction of masses to be landfilled by treatment of the fine fraction*

Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich

Administrador e Engenheiro Ambiental Anton Zeiner

Engenheiro Civil e Ambiental Sebastian Wanka

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Consulte, também, as Partes II e III:

PARTE II

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

A Realidade dos Municípios Brasileiros Frente à Nova Política Nacional de Resíduos Sólidos

Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite

Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: desafios e oportunidades

Engenheiro Civil Antonio Marius Zuccarelli Bagnati

Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil – PROBIOGÁS

Project Brazil Germany to Promoting Clean Biogas Technologies in Brazil – PROBIOGÁS

Engenheiro Civil Magnus Martins Caldeira

Engenheiro Civil Marcelo de Paula Neves Lelis

Tecnologias Sustentáveis para a Gestão de Resíduos da Agroindústria de Santa Catarina

Sustainable Technologies for the Agroindustry Waste Management in Santa Catarina

Doutor Engenheiro Professor Mestre Paulo Belli Filho

Iniciativas de Ensino e Pesquisa em Gestão de Resíduos em Jundiaí-SP, Brasil

Initiatives for Education and Research in Waste Management in Jundiaí-SP, Brazil

Doutor André Luiz da Conceição

Programa Beija-Flor de Tratamento Descentralizado de Resíduos em Florianópolis-SC, Brasil

Hummingbird Program of Waste Treatment Decentralized in Florianópolis-SC, Brazil

Engenheiro Civil Antonio Marius Zuccarelli Bagnati

Professor Doutor Psicólogo José Luiz Crivelatti de Abreu

Resíduos de Construção Civil – Sistema de Gerenciamento Integrado no Município de Jundiaí-SP, Brasil

Civil Construction Waste – Integrated Management System by Jundiaí Municipality-SP, Brazil

Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite
Engenheiro Agrícola e Civil Mestre Rodrigo Miguel Pereira Batalha

Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos em Cidades de Menor Porte: caso de Votuporanga-SP, Brasil

Sustainable Management of Municipal Solid Waste in Smaller Cities: case of Votuporanga-SP, Brazil

Geólogo Mestre Luiz Gustavo Gallo Vilela
Bióloga Simone Neiva Rodella

Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: benefícios × problemas

Composting of Municipal Solid Waste in Brazil: benefits × problems

Engenheira Agrônoma Mestre Kátia Goldschmidt Beltrame

Capacitação e Pesquisa Fundamental para Desenvolver e Implementar uma Instalação de Tratamento Mecânico-biológico, com Estágio de Fermentação Integrada em Jundiaí-SP, Brasil

Capacity Building and Fundamental Research to Develop and Implement a Mechanical Biological Treatment Facility with an Integrated Fermentation Stage in Jundiaí-SP, Brazil

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira
Especialista em Direito Aguinaldo Leite
Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos

Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Inovative Municipal Solid Waste Characterization

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira
Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos
Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite
Anne-Sophie Fölster

Engenheiro Agrícola e Civil Mestre Rodrigo Miguel Pereira Batalha
Tecnólogo em Meio Ambiente Anderson Luiz de Araújo
Gestor Empresarial Lucas Aparecido Rodrigues
Engenheiro Civil e Especialista em Engenharia Ambiental Marcelo Foelkel Patrão
Administrador e Especialista em Gestão de Negócios Lauro Raphael Acorci Donadell
Tecnóloga Aline Cardoso Domingos
Camila Barbi Campos
Tecnóloga Diana Piffer Gigliotti
Gabriel de Carvalho Gimenez
Tecnóloga Roberta da Silva Leone
Vinicius Silva de Macedo

**Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma
Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil**

*Methodology of Environmental Diagnosis in Large Generators for a Sustainable
Management of Solid Waste in Jundiaí Municipality-SP, Brazil*

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira
Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos
Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite
Anne-Sophie Fölster
Engenheiro Agrícola e Civil Mestre Rodrigo Miguel Pereira Batalha
Tecnólogo em Meio Ambiente Anderson Luiz de Araújo
Gestor Empresarial Lucas Aparecido Rodrigues
Engenheiro Civil e Especialista em Engenharia Ambiental Marcelo Foelkel Patrão
Administrador e Especialista em Gestão de Negócios Lauro Raphael Acorci Donadell
Tecnóloga Aline Cardoso Domingos
Camila Barbi Campos
Tecnóloga Diana Piffer Gigliotti
Gabriel de Carvalho Gimenez
Tecnóloga Roberta da Silva Leone
Vinicius Silva de Macedo

Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil: panorama, desafios e perspectivas

Solid Waste Management in Brazil: overview, challenges and perspectives

Advogado Carlos RV Silva Filho

Geógrafa e Mestre em Ciências Gabriela Gomes Prol Otero

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos no Funcionamento do Sistema Econômico

The National Solid Waste Policy Law for the Economic System

Professor Doutor Eduardo Tomasevicius Filho

Os Desafios da Educação Ambiental Formal em Matéria de Tratamento de Resíduos Sólidos no Brasil

The Challenges for a Formal Environmental Education about Solid Waste Treatment in Brazil

Pedagoga Christine Pereira-Glodek

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Professor Doutor Eduardo Tomasevicius Filho

Proteção Climática através de uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos

Climate Protection through Sustainable Waste Management

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Doutor Jens Giersdorf

Mestre em Geografia Olga Kasper

Projeto i-NoPa – Capacitação e pesquisa fundamental, a fim de gerar metodologia de análise para o desenvolvimento de projeto para uma instalação de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) com fermentação integrada na cidade de Jundiaí-SP

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Especialista em Direito Aguinaldo Leite

PARTE III

TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

Tecnologias Ambientais: ferramentas para a valorização de resíduos sólidos urbanos

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

FINEP e seu Papel na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

FINEP and its Role in Urban Solid Waste Management in Brazil

Engenheiro de Petróleo Erick Meira de Oliveira
Engenheiro Civil e Ambiental Diego de Carvalho Frade

Otimização de Sistemas de Tratamento de Resíduos através de Conceitos Modulares

Optimization of Waste Treatment Systems through Modular Concepts

Engenheiro Civil Karlgünter Eggersmann

A Tecnologia DRANCO

The DRANCO Technology

Engenheiro Bruno Mattheeuws
Engenheiro Luc A. De Baere

Biodigestão – Tecnologia Kompogas

Biodigestion – Kompogas Technology

Engenheiro Carlo Vendrix

Tratamento Biológico Aerado em Leiras Envelopadas com o Sistema GORE® Cover

Aerated Biological Treatment with Closure Windrows under GORE® Cover System

CEO Thomas Schlien
CEO Franz Vogel

Resíduos Sólidos Urbanos com Aproveitamento de Recicláveis em uma Planta de Tratamento Mecânico-Biológico

Municipal Solid Waste with Recycling Recovery at one Mechanical and Biological Plant

Químico Michael Ludden

Secagem do Lodo do Esgoto Comum e Industrial em Plantas de Tratamento de Águas Residuais: uma forma sustentável de administração do lodo

*Drying of Sewage Sludge form Communal and Industrial Waste Water Treatment Plants:
A sustainable way of sludge management*

PhD. Doutor Markus Bux

Análise de Risco: combustão em plantas de tratamento mecânico-biológico e em áreas de armazenagem e disposição final de resíduos

Risk Analysis: combustion in mechanical-biological plants and storage and final disposal areas of waste

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Maior – 2017.**

Parte I

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA ALEMANHA

A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento Socioambiental em Gestão de Resíduos

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

O crescimento populacional e alterações nos padrões de consumo provocam um aumento expressivo da extração de recursos. A limitada disponibilidade, por exemplo, de energias fósseis e de determinados minérios, mas também de recursos elementares como o fósforo e a água, representa um dos maiores desafios para a humanidade. A gestão dos resíduos é de importância fundamental para assegurar os recursos no futuro. Segundo o Banco Mundial, a futura demanda global de recursos só pode ser atendida com taxas de reciclagem acima de 90%. Estamos longe disso, especialmente quando olhamos para os países emergentes e em desenvolvimento os quais, como sabemos, não se restringem ao mundo fora da Europa.

As forças motoras na gestão de resíduos também representam problemas ambientais a serem resolvidos, como a proteção do clima, ou de forma mais precisa, a estratégia de como lidar com a mudança climática e o acúmulo de resíduos nos oceanos. O último, problema ambiental também descrito como “*Marine Litter*”, ainda não pode ser estimado em relação às suas dimensões – há vozes que colocam seus efeitos negativos em um nível parecido com a mudança do clima. A relação do “*Marine Litter*” com a gestão dos resíduos é óbvia. A importância da gestão dos resíduos sobre a mudança do clima e sua proteção não é tão conhecida. Segundo estimativas, 8% a 10% das emissões de gases de efeito estufa nos países em desenvolvimento e emergentes são oriundas de processos relacionados com a gestão de resíduos. Uma das principais causas são as emissões de metano geradas pela disposição de resíduos sólidos urbanos não tratados, as quais contêm altos teores de compostos orgânicos degradáveis. Mesmo em aterros sanitários de melhor padrão, com impermeabilização da superfície e sistemas de captação do biogás, ao máximo 50% das quantidades de gases gerados podem ser captados, aproveitados e eliminados, respectivamente.

A gestão de resíduos sólidos tem uma posição chave na solução dos problemas descritos anteriormente – representando ao mesmo tempo tanto desafio quanto oportunidade.

De forma global podemos observar uma mudança radical na gestão de resíduos, que extrapola o manejo simplório voltado apenas para coleta e disposição final, e incorpora a economia de ciclos fechados.

Esta tendência se aplica, sobretudo, para o Brasil quando da promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS – Lei Federal nº 12.305/2010, lei inovadora e de premissas modernas, em concordância com as leis europeias e da Alemanha, principalmente no que diz respeito à hierarquização de procedimentos, que promove a valorização, potencializando a proteção dos recursos.

Na lei em pauta, os requisitos organizacionais e técnicos são acompanhados por programas de investimento fornecidos pelo Governo Federal, para o amparo de municípios e empresas, no atendimento às exigências legais. A Lei é considerada como modelo para os países latino-americanos.

As grandes tendências globais oriundas da preocupação com a escassez e proteção dos recursos, bem como, a mudança do clima e sua proteção e as premissas de valorização, repercutem de forma absoluta na gestão de resíduos. A disposição em prover uma gestão ecoeficiente dos resíduos, evidencia o pioneirismo do compromisso e da sensibilidade ao tema.

Para a implementação da nova gestão, identifica-se como demanda latente o desenvolvimento de conceitos integrados e sustentáveis da gestão dos resíduos, e sua realização em nível organizacional e tecnológico.

Por serem inovadoras as premissas de valorização, absorvemos o ônus da imaturidade e nos deparamos com a insuficiência de conhecimento tanto no aspecto organizacional quanto tecnológico, especificamente nas áreas:

- Regulamentos, diretivas e normas bem como, licenciamento legal e supervisão (executiva);
- Características de qualidades para os subprodutos como combustível derivado de resíduos (CDR), biogás, biometano, compostos orgânicos, resíduos de biodigestão em forma líquida e sólida, eletricidade, calor/refrigeração etc. E dos mercados e estratégias econômicas dos subprodutos listados;
- Gestão de fluxos de materiais, conceitos de processos, engenharia de construção e de processos, planejamento industrial;
- Qualificação de funcionários em todos os níveis desde a elaboração de políticas e tomadas de decisões, licenciamento de plantas, planejamento, construção e operação das instalações, financiamento bem como, o aproveitamento dos produtos gerados e estratégias e métodos para a formação de capacidades (*Capacity Building*);
- Pesquisa e ensino. Capacidades para o desenvolvimento de conceitos, bem como para a adaptação e o desenvolvimento de tecnologias;
- Cooperação interdisciplinar especialmente dos setores agricultura, paisagismo e energético.

Observando o desenvolvimento da gestão de resíduos em outros países, temos que as políticas públicas são cruciais para a promoção e implementação de uma gestão sustentável de resíduos, por exemplo, a Lei das Energias Renováveis na Alemanha foi categórica para o desenvolvimento fulminante da tecnologia da biodigestão.

A Alemanha quando assumiu o papel pioneiro introduzindo a gestão sustentável dos resíduos não teve oportunidade de buscar além de suas fronteiras a capacidade desenvolvida em outros países. Desta forma, por um lado o mercado alemão se tornou a mola propulsora do desenvolvimento do

setor e por outro abarcou o ônus técnico e financeiro em decorrência de soluções errôneas que precisaram de retificação, tanto no âmbito da gestão quanto no âmbito tecnológico.

Com o passar dos anos, o cenário global se modificou bastante, intensificando o número de países que passaram a compartilhar a mesma linguagem de uma gestão mais eficiente, promovendo assim para o Brasil, oportunidade de compartilhamento de experiências, mitigando os riscos de gestão e tecnológicos e ainda aumentando a velocidade das mudanças.

Seria ingênuo e passível de erros, uma transferência direta de *know how* entre os países, fragilidades estas que vivenciamos no passado através das más experiências. Hoje, sabemos que a transferência de *know how* demanda uma adaptação à realidade local, fato este corroborado pelas diferenças climáticas, culturais e econômicas.

Portanto, apontamos áreas estratégicas para adaptação e desenvolvimento contínuo:

- Condições socioculturais, ecológicas e econômicas;
- Conhecimentos existentes e nível de formação;
- Integração das tecnologias existentes no país;
- Estado dos sistemas de coleta e de destinação;
- Infraestrutura existente e mercados de matérias-primas secundárias;
- Dimensões da gestão de resíduos, geográficas e climatológicas.

O objetivo desta publicação, resultado dos congressos técnicos realizados em Jundiaí e Florianópolis, é contribuir para desenvolver conhecimentos exequíveis e para a promoção de transferência de tecnologias. A publicação é concebida como fonte de informação para todos os atores envolvidos na implementação da gestão sustentável de resíduos sólidos no Brasil. Também contribuirá para a integração com a Alemanha no que se refere ao desenvolvimento da economia e das pesquisas básicas e aplicadas.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento Socioambiental em Gestão de Resíduos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Mai – 2017.**

A Eficiência dos Recursos e Gestão da Reciclagem: implementação na Alemanha

*Resource Efficiency and Recycling Management:
implementation in Germany*

Doutor Helge Wendenburg

RESUMO

A política de resíduos sólidos do Governo Federal alemão é particularmente marcada pelo entendimento de que os resíduos sólidos se constituam em recursos, e pela orientação das políticas públicas em direção ao fechamento de ciclos. Diferente do setor energético, as matérias-primas utilizadas na fabricação de produtos, mercadorias, infraestrutura e edificações são preservadas e não desaparecem, como no fim da cadeia de produção de energia por meio da combustão de combustíveis fósseis. A princípio, todas as matérias-primas cuja utilização ocorre de forma material, podem ser recuperadas e empregadas para a mesma ou outras finalidades, podendo ser utilizadas em ciclos. Elemento-chave da política de resíduos do Governo Federal Alemão consiste na realização da nova hierarquia de gestão resultando da diretiva sobre resíduos da União Europeia. Enquanto até agora a prevenção, o aproveitamento e a disposição final foram estabelecidos claramente nesta ordem, onde sempre foi discutido se existem preferências entre os aproveitamentos material ou térmico, a nova hierarquia determina sem dúvida que o reaproveitamento e a reciclagem tenham preferência sobre as outras rotas de aproveitamento, se referindo, por um lado, ao aproveitamento térmico e por outro, a destinação de resíduos de resíduos para fins de aterramento. A situação atual sobre o acesso a matérias-primas importantes indispensáveis para a produção de produtos modernos sempre aponta para o papel importante da reciclagem – se terras-raras e outros metais de importância estratégica não estão disponíveis na Europa, a dependência do mercado mundial pode ser reduzida consideravelmente pela reciclagem dos produtos existentes. Porém, também ficou claro que matérias-primas importantes apenas estão contidas em pequenas quantidades nos produtos modernos, portanto, é importante intensificar as pesquisas nesta área.

Palavras-chave: Resíduos. Política. Gestão. Reciclagem. Produtos.

ABSTRACT

The policy of solid waste from the German Federal Government is particularly marked by understanding that the solid waste constitute resources, and the orientation of public policies toward closing cycles. Different from the energy sector, the raw materials used in the manufacture of products, goods, infrastructure and buildings are preserved and not disappear, as at the end of the production chain of energy through the combustion of fossil fuels. In principle, all raw materials

whose use occurs in material form, can be retrieved and used for the same or other purposes, and may be used in cycles. Key Element of waste policy the Federal Government consists of the completion of the new hierarchy of actions resulting from waste policy in the European Union. Until now the prevention, recovery and disposal have been clearly established in this order, where it was discussed that there are preferences between the materials material or thermal, the new hierarchy determines without doubt that the reuse and recycling have preference over other routes of use, referring, on the one hand, the thermal efficiency and, on the other hand, the use of waste for the purposes of landfilling. The current situation on the access to important raw materials necessary for the production of modern products always points to the important role of recycling – if rare-earths and other metals of strategic importance are not available in Europe, the dependence on the world market can be considerably reduced by recycling of existing products. However, it was also clear that important raw materials are only contained in traces in modern products, therefore, it is important to intensify research in this area.

Keywords: Residues. Policy. Management. Recycling. Products.

1 INTRODUÇÃO

A política de resíduos sólidos do Governo Federal Alemão é particularmente marcada pelo entendimento de que os resíduos sólidos se constituam em recursos, e pela orientação das políticas públicas em direção ao fechamento de ciclos, incorporados pela nova Lei de Economia Circular^[1] bem como, o Programa Nacional de Eficiência de Recursos – ProgRess (DIE BUNDESREGIERUNG, 2012), aprovado pelo Governo alemão.

[1] Lei sobre a reestruturação dos procedimentos legais da economia circular e gestão de resíduos do 24 de fevereiro de 2012, BGBl. I, S.212, cujo art. 1º contém a lei sobre a economia circular – KrWG, que entrou em vigor em 01 de junho de 2012. Como introdução veja: Petersen, Doumet e Stöhr (2012).

As estreitas ligações são enfatizadas pela coincidência cronológica: no mesmo dia em que a Lei de Economia Circular (KrWG) foi publicada no Diário Oficial da União alemão, em 29 de fevereiro de 2012, o Gabinete também aprovou o ProgRess. Este conceito também se reflete no motivo “Resíduos são recursos” representado no selo postal do “Ambiente 2012”.

Mesmo com a crise econômico-financeira e de dívidas nacionais dominando todas as discussões, o desenvolvimento global em longo prazo depende de três megatendências que irão determinar o futuro do nosso planeta: o crescimento populacional global, para mais de nove bilhões até 2050, a ameaça da mudança climática e a demanda por recursos nos países em desenvolvimento e emergentes. Os efeitos das três tendências dependem um do outro e podem ser agravados caso não comecemos agora a direcionar nossos esforços para impedir que isso aconteça.

O crescimento econômico dos países emergentes na Ásia e na América do Sul, bem como, na África conduz ao aumento da demanda de infraestrutura, estradas, ferrovias e da construção civil assim como de instalações de comunicação e da produção de energia, mas também da mobilidade. Para atender essas demandas, os recursos e matérias-primas existentes não serão suficientes, se não desenvolvermos estratégias que possibilitem a produção de mais com menos. Não precisa necessariamente assumir cenários de escassez, mas é claro que os recursos existentes

em nível mundial não podem mais ser explorados tão facilmente quanto antes: as jazidas se encontram em profundidades maiores, em regiões distantes, e, portanto, a sua exploração exige esforços desproporcionais, que impactam o meio ambiente, em particular os ecossistemas. Também é claro que o consumo de recursos nos países desenvolvidos é quatro vezes maior que no resto do mundo, mas mesmo que os países industrializados se obrigassem a cortar pela metade o consumo dos recursos, e os outros prometessem aumentar seu consumo futuro apenas até um certo patamar, os recursos existentes e exploráveis ainda não seriam suficientes para atender a demanda^[2].

[2] Em relação a ProgRess veja: KAISER, ReSource 2012, Heft 2, S.8 ff.

Estes são motivos para a busca por alternativas que permitam enfrentar esse complexo desafio, e para tal desenvolvemos o Programa Nacional de Eficiência de Recursos. As estratégias para o abastecimento da população mundial com alimentos nem sequer estão no foco do ProgRess – este trata exclusivamente dos recursos não energéticos abióticos e a utilização material dos recursos bióticos. O Programa avalia todas as etapas ao longo da cadeia de agregação de valores, desde a extração das matérias-primas, a produção de produtos, sua etapa de utilização até a reutilização e a reciclagem, para apontar onde e com quais métodos e instrumentos a redução do consumo de recursos pode ser alcançada. Em relação a isso, dois entendimentos são importantes: a inclusão da produção de matérias-primas revela particularmente o quanto a reutilização e a reciclagem podem contribuir para a minimização da produção das matérias-primas primárias. Atualmente o setor de reciclagem na Alemanha produz mais de 14% da demanda de matérias-primas, em forma de materiais reciclados, e com valor de mais de 10 bilhões de Euros. Esta proporção pode e deve aumentar, muito mais em comparação com a escala europeia e global, pois neste momento, muitos recursos se perdem mundialmente por serem dispostos em aterros.

Portanto, o ProgRess não vai apenas atuar na Alemanha, mas também agir de forma exemplar na União Europeia e no contexto global. O Ministério do Meio Ambiente, representado, de 2012 a 2013, pelo ministro do meio ambiente Peter Altmaier, participou ativamente na plataforma de recursos do comissário da UE Potocnik e é representado, pelos Prof. Ernst-Ulrich von Weizsäcker como copresidente e pelo Prof. Stefan Brinzeu, no Painel Internacional de Recursos do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

A eficiência de recursos trata principalmente de questões de uso e aplicação. Diferente do setor energético, as matérias-primas utilizadas na fabricação de produtos, mercadorias, infraestrutura e edificações são preservadas e não desaparecem, como no fim da cadeia de produção de energia por meio da combustão de combustíveis fósseis. A princípio, todas as matérias-primas cuja utilização ocorre de forma material, podem ser recuperadas e empregadas para a mesma ou outras finalidades, podendo ser utilizadas em ciclos. Estas considerações formam a base do conceito “do berço ao berço” (“*cradle to cradle*”) aplicado na gestão de resíduos, propagado por Michael Braungart e William McDonough (2008), mesmo que neste tempo de alta tecnologia ainda se discuta sobre certos conceitos de reutilização. O importante neste momento é refletir sobre possíveis mudanças. Alguns acham^[3] que a ideia de uma sociedade sem resíduos se constitua em

uma visão impossível de se realizar, e que não a consideram, a não ser que as vinculações científicas desmintam, e são a favor da permanência da gestão convencional de resíduos.

[3] BERTRAM, ReSource 2012, Heft 2, S. 16 ff. – porém, a literatura citada deixou claro que a discussão ainda se encontra no nível do século passado.

Porém, não está sendo considerado que a ideia “do berço ao berço”, bem como os conceitos do parlamento e da comissão europeia, não se baseiam no estado atual, mas querem formular metas para que a completa condução de materiais em ciclo possa ser alcançada. A primeira abordagem que visa a uma verdadeira condução em ciclo é relacionada aos produtos: apenas as substâncias perigosas, que tenham impossibilitada sua reciclagem por apresentarem riscos à saúde dos humanos, não serão mais utilizadas; assim, uma condução permanente das matérias-primas em ciclo é possível.

A União Europeia adere a essa abordagem, por exemplo, em relação aos equipamentos elétricos e eletrônicos (Diretiva nº 2002/96/CE) – já na aprovação da Diretiva sobre os resíduos de aparelhos elétricos e eletrônicos, relacionada à Diretiva que proibiu completamente a utilização de determinadas substâncias perigosas na fabricação destes aparelhos (Diretiva RoHS nº 2002/95/CE), ou ao menos, limitou a quantidade dessas substâncias. Entretanto, a avaliação antecipada dos resultados não é sempre possível e a indústria tenta frequentemente apresentar a proibição de substâncias como se tratasse da proibição dos produtos, para evitar a reconfiguração dos processos de produção. Por exemplo, os plásticos utilizados na produção de aparelhos elétricos e eletrônicos continham, antes da aprovação da RohS, retardadores de chamas bromados, cuja aplicação foi banida pela RohS. Mesmo antes da determinação legal, a ocorrência de incêndios causados por este tipo de aparelho não aumentou desde então, pois afinal, a indústria desenvolveu alternativas. A limitação do uso de chumbo resultou em consequências semelhantes – aqui também a indústria argumentou que a proibição de soldas contendo chumbo iria encarecer substancialmente a produção de placas eletrônicas e circuitos elétricos, ou até impossibilitar. Entretanto, ninguém fala mais disso – contudo, as terras-raras agora utilizadas também não facilitam a reciclagem, por que são contidas nos aparelhos apenas em quantidades minúsculas, mesmo com a quantidade total utilizada parecendo ser suficiente para fazer a reciclagem viável.

Estes dois exemplos demonstram a importância de se preocupar com toda a cadeia de agregação de valores para identificar os pontos com possibilidade de redução da utilização de matérias-primas. ProgRess é concebido e intencionado para dar impulsos neste processo, mesmo que em muitas ocasiões ainda não exista clareza sobre os tipos de indicadores a serem empregados na medição dos efeitos. Portanto, a pesquisa crítica com possíveis indicadores é de suma importância, estando no foco especial do futuro trabalho com o ProgRess.

2 PREVENÇÃO DE RESÍDUOS

A nova hierarquia de resíduos europeia foi implementada pela Lei da Economia Circular, que entrou em vigor em 01 de junho de 2012. Mesmo não constando a palavra “resíduos” no título e o termo sendo utilizado mais para a eliminação de materiais do ciclo natural ou tecnológico, a

prevenção da geração de resíduos está na primeira posição na hierarquia bem como, na diretiva sobre resíduos.

Essa nova diretiva obriga os estados membros a construir programas para a prevenção de resíduos até o dia 31 de dezembro de 2013 e, em anexo, providencia a orientação e possíveis medidas e instrumentos para estes programas. O Ministério Federal do Meio Ambiente encarregou a Agência Nacional do Meio Ambiente de realizar a avaliação científica destes possíveis passos (DEHOUST *et al.*, 2010). As bases científicas para a construção de um programa nacional para a prevenção de resíduos agora são discutidas com os estados, municípios e associações, para a elaboração de um programa de prevenção de resíduos, padronizado no território nacional.

A Lei da Economia Circular prevê em seu § 33, que o Governo Federal construa o programa para a prevenção de resíduos e os Estados podem participar, apesar da origem desta Lei ser federal. Se os Estados não participam, estão obrigados, conforme o inciso 2, a lançar seus próprios programas para a prevenção de resíduos em nível estadual. Isso baseado na reflexão de que a prevenção dos resíduos realmente precisa de declarações programáticas, mas que contenha especificações menos rígidas no sentido de um plano, e todavia enfatize mais o lado econômico e social das opções, sem prescrever definidos estilos de vida obrigatórios.

As muitas facetas deste problema podem ser esclarecidas com três exemplos: em 2011, o filme *“Taste the Waste”* emocionou o público e incentivou uma discussão abrangente sobre o tratamento de alimentos. Ficou claro para muitos que o “prazo de validade” não constitui um regulamento legal para o uso ou não uso de alimentos, mas que são garantias da própria indústria que o produto mantenha, até o prazo dado na embalagem, as qualidades sabor, aparência, consistência e outras. A data não se refere às possibilidades do consumo, especialmente não informa a partir de que ponto a ingestão do produto apresente riscos para a saúde. As informações publicadas depois, pelo Ministério de Alimentação, Agricultura e Proteção do Consumidor^[4], mostraram certo efeito em relação à prevenção de resíduos, já que agora os consumidores avaliam em casa se o produto ainda pode ser consumido ou deve ser descartado.

[4] BMELV-Kampagne „Zu gut für die Tonne” [Bom demais para o contêiner], disponível em: <<http://www.zugutfuerdietonne.de>>; e também o estudo ISWA (Uni Stuttgart, Prof. Martin Kranert), Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland, Stuttgart, 2012 [ISWA (Universidade de Stuttgart, Prof. Martin Kranert), Determinação das quantidades de alimentos descartados e propostas para reduzir a taxa para destinação dos alimentos descartados na Alemanha, Stuttgart 2012], conduzido por encomenda do BLE.

Outro assunto importante que resultou em mudanças de comportamento dos cidadãos: O comércio de alimentos individualizados oferta possibilidades de descontos aos produtos cujo prazo de validade está por vencer, ou promove doações para as “mesas” onde os produtos podem ser consumidos por pessoas carentes. Entretanto muitas “mesas” reclamam que são utilizados como uma forma de destinação dos resíduos, por que recebem doações de alimentos estragados, especialmente de frutas e verduras, que acabam sendo descartadas. Nestes casos, o comércio economiza as taxas para a remoção dessas mercadorias estragadas, até porque o setor público responsável recebe os resíduos das “mesas” sem a respectiva cobrança das taxas. Estes exemplos

esclarecem que a prevenção dos resíduos muitas vezes requer, em primeiro plano, uma mudança do comportamento de todos os participantes: Quem compra menos em decorrência da adaptação dos hábitos de alimentação, produzirá menos resíduos – por outro lado, há um aumento do número de pessoas que moram sozinhas na Alemanha, e muitas vezes não é possível consumir completamente as quantidades oferecidas. E ainda, a venda de porções menores causa um aumento da presença de embalagens. Mesmo com separação posterior do conteúdo da embalagem, não há prevenção de resíduos no primeiro passo mas, sim a geração.

O filme “*Taste the Waste*” também apontou para um terceiro problema, em muitos pontos a nível global: a maneira de como estamos lidando com os alimentos, uma vez produzidos. Precisa-se diferenciar, inicialmente os alimentos que se constituem principalmente de biomassa, podendo ser utilizada para uma variedade de finalidades: na alimentação humana, ração de animais, ou para a geração de energia – portanto, a discussão “tanque ou prato” em alguns pontos não é honesta – enquanto se trata de biomassa (residual) para a produção de biogás ou biocombustíveis, nada contra, e até os resultados de análises de ciclo de vida geralmente são favoráveis (ZAH *et al.*, 2007). Porém, deve-se reconhecer que determinados produtos não correspondem às exigências do mercado e, portanto, não é possível comercializá-los. Uma maçã muito pequena, um pepino muito curvado ou uma batata desfigurada são comestíveis, porém, nas condições de mercado que prevalecem estes não podem ser vendidos e precisam entrar em mercados secundários, por exemplo, na produção de suco, de amido ou na biodigestão e compostagem, para a produção do biogás e composto orgânico. Este aspecto foi omitido no filme “*Taste the Waste*” – na Alemanha, os produtos não apropriados para o consumo não são jogados fora, mas são conduzidos para um aproveitamento racional, mesmo coprodutos da produção animal não apropriados para o consumo, como resíduos de matadouros. Para estes materiais existem leis europeias e alemãs^[5] com intuito de direcionar seu aproveitamento como recurso, mesmo que haja evasão destas diretivas, como mostram os casos de carne estragada comercializada criminosamente. Estes e outros aspectos serão tratados pelo programa de prevenção de resíduos, cujo esboço foi apresentado ao Ministério de Meio Ambiente no fim do ano 2012.

[5] TierNebG, Lei sobre a eliminação de coprodutos do aproveitamento de produtos animais de 25 de janeiro de 2004 (BGBl. I S. 82), modificada pelo artigo 2º, inciso 91, da Lei de 22 de dezembro de 2011 (BGBl. I S. 3044).

Em um primeiro passo, o *Öko-Institut* e o *Wuppertal Institut*, foram encarregados pela Agência Federal de Meio Ambiente da Alemanha, de criar uma base de dados abrangente sobre as medidas da administração pública existentes e sistemas aplicados em nível municipal, estadual e federal. Para tanto, as medidas para a prevenção dos resíduos existentes na administração pública, na Alemanha e no exterior, foram apresentadas em tabelas e descritas conforme seus objetivos, níveis bem como, com avaliação qualitativa dos seus efeitos de prevenção. Adicionalmente, uma pesquisa da literatura disponível sobre novas medidas foi conduzida. Um total de 296 medidas de pouco mais de 20 países foram registradas, permitindo conclusões sobre possíveis focos de um programa nacional de prevenção de resíduos (DEHOUST *et al.*, 2010).

3 A NOVA HIERARQUIA DE RESÍDUOS

Elemento-chave da política de resíduos do Governo Federal Alemão consiste na realização da nova hierarquia de gestão resultando da diretiva sobre resíduos da EU (Diretiva nº 2008/98/EG). Enquanto até agora a prevenção, o aproveitamento e a disposição final foram estabelecidos claramente nesta ordem, onde sempre foi discutido se existem preferências entre os aproveitamentos material ou térmico, a nova hierarquia determina sem dúvida que o reaproveitamento e a reciclagem tenham preferência sobre as outras rotas de aproveitamento, se referindo, por um lado, ao aproveitamento térmico e por outro, a destinação dos resíduos para fins de aterramento. Enquanto Petersen (2013) discute a aplicabilidade legal da hierarquia de resíduos na nova Lei da Economia Circular, devem ser assumidas as consequências políticas, especificamente o desenvolvimento de complementações legais (Veja também: PETERSEN, DOUMET, STÖHR, 2012, p. 523; e, FRENZ, 2012, p. 210).

É importante ressaltar que o Governo Federal Alemão sempre partiu da suposição de que a hierarquia é composta de cinco etapas, definida no § 6 KrWG, que precisavam ser concretizados particularmente em nível de diretivas, para melhorar a reciclagem e o beneficiamento para a reutilização. Em seguida serão detalhados os passos necessários para o futuro e os regulamentos que estarão em foco. Neste momento já está óbvio que existe uma ampla gama de ideias e iniciativas particulares para a reciclagem e a reutilização de determinados produtos e mercadorias, ou para materiais produzidos a partir dos resíduos, cujos iniciadores, sobretudo querem que apenas o processo de reciclagem deles seja reconhecido e que todos os outros tipos de aproveitamento sejam excluídos a partir deste momento. Sem entrar em detalhes, o Governo está convencido que os processos deste tipo devem possuir justificativa ambiental e por outro lado, que sejam competitivos no mercado. Uma preferência absoluta apenas pode ser dada para processos cujo valor ambiental agregado tenha destaque.

4 FORTALECIMENTO DA REUTILIZAÇÃO E DA RECICLAGEM

A Lei da Economia Circular enfoca, sobretudo, o fechamento de ciclos. Isso implica nas análises de fluxos de materiais e de resíduos para enxergar onde se encontram os potenciais e quais são. No caso dos resíduos orgânicos já ficou claro por análises existentes (KNAPPE *et al.*, 2012), que ainda existe um potencial de pouco menos de quatro milhões de toneladas nos resíduos domésticos que pode ser recuperado e conduzido para a compostagem, preferencialmente com produção de biogás por biodigestão. Portanto, já consta na KrWG, em seu § 11, a obrigação dos responsáveis pela administração pública, de efetuar a coleta seletiva dos resíduos orgânicos domésticos, a partir do dia 1º de janeiro de 2015. Embora a diretiva deixe flexibilidade suficiente para a adaptação dos sistemas de coleta, em nível regional caso os estudos demonstrem que não há respectivas ofertas, o sistema não se encontrará em conformidade com os objetivos de uma gestão de resíduos orientada na reciclagem (LAZAR *et al.*, 2011). Especialmente o meio rural oferece boas oportunidades para a produção de compostos orgânicos de elevada qualidade e valor de mercado (VHE, 2012).

Além disso, precisa-se reconhecer, independente da Lei de resíduos sólidos, o potencial considerável de determinados fluxos de resíduos orgânicos para a geração de diversos tipos de energia. Diferente da combustão de resíduos em plantas de incineração ou em termelétricas a lenha, subsidiadas até o dia 1º de janeiro de 2012 pela Lei de Energias Renováveis (EEG), a produção do biogás ou de biocombustíveis é considerado como reciclagem, por que é gerado um novo produto a partir dos resíduos. Particularmente o biogás se constitui em uma matéria-prima importante no âmbito das energias renováveis, por que seu armazenamento não é complicado, e o biogás pode ser empregado na produção de eletricidade, calor e como combustível veicular. Exemplos bem sucedidos são a utilização do biogás de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) para a operação de veículos de serviço na Emschergerossenschaft (Empresa de Água e Esgoto), de caminhões da coleta de resíduos da BSR (empresa de limpeza urbana da cidade de Berlim) ou a produção de biodiesel a partir de coprodutos de matadouros pela empresa Remondis e sua filial Saria, na cidade de Lünen.

Não há dúvidas da sustentabilidade da produção de bioenergia nos processos mencionados. O que não se aplica para os coprodutos de matadouros, onde sua utilização não é adequada para o consumo humano, onde apesar de também serem definidos como resíduos, são excluídos do âmbito da aplicação da KrWG, desde que não se trate de estrume para utilização em plantas de biogás (Veja: KROPP, 2012, p. 29 e segs., p. 35 § 2).

O tratamento de resíduos orgânicos é um outro passo para o aumento da eficiência de recursos e da reciclagem: o aproveitamento em cascata. É incontestável que a madeira possa ser usada para a produção de energia e que o reconhecimento de madeira residual como combustível renovável tem dado impulsos importantes. Entretanto ficou claro que a demanda por quantidades de madeira residual pelas termelétricas alemãs tem reflexos em outros Estados europeus – a Alemanha importa anualmente pouco menos de um milhão de toneladas de madeira residual^[6] de outros Estados europeus e, portanto, acarreta uma concorrência para a indústria de produtos de madeira. Este fato motivou o Governo Federal Alemão a suprimir a subvenção para a combustão de madeira residual, na última alteração da EEG a partir de 2012.

[6] Veja: em <www.umweltbundesamt.de> die Zeitreihe über Abfallimporte beim UBA, unter Abfallwirtschaft, Abfallstatistik, Zeitreihe Importe nach Abfallarten sonst. Holzabfälle. [Avaliação sazonal desenvolvida pelo Ministério de Meio Ambiente sobre as importações de resíduos, sua gestão, mercado, as importações de caráter sazonal por tipos de resíduos, em especial de madeira].

Uma estratégia eficiente de recursos deve dar preferência à utilização da madeira primeiramente, como material na produção de bens, no próximo passo, para a produção por exemplo, de compensados e móveis, e apenas no último passo, a madeira residual deve ser conduzida para a combustão. Para atingir estes objetivos, o Governo Federal Alemão vai avaliar a necessidade de alterar as diretivas para o tratamento de madeira usada e dos resíduos do comércio para tornar obrigatório seu aproveitamento em cascata. A diretiva sobre o aproveitamento de resíduos do comércio é relevante por que regulamenta também o tratamento de resíduos da construção civil e as exigências ao seu tratamento.

Além dos resíduos domésticos, os resíduos do comércio devem estar no foco do planejamento. O gerenciamento destes resíduos se encontra exclusivamente na mão de empresas privadas e é pouco regulamentado.

Finalmente a diretiva de madeira residual e a diretiva de resíduos do comércio são regulamentos limitantes que influenciam, e devem influenciar, a gestão de resíduos domésticos sob administração municipal. A diretiva de madeira usada determina, sobretudo, a proibição da disposição de madeira residual em aterros e influenciou a coleta de resíduos volumosos organizada pelos municípios, enquanto a diretiva sobre a disposição de resíduos ainda não entrou em vigor.

Por outro lado, a diretiva sobre os resíduos do comércio deveria determinar uma quantidade limitada de resíduos para disposição final proveniente da indústria e do comércio, através de exigências para o aproveitamento e a introdução da coleta obrigatória destes resíduos. A estratégia futura para o fortalecimento da reciclagem em ambas as diretivas precisa de desenvolvimento contínuo, mas isso pressupõe um conhecimento abrangente dos fluxos de materiais em questão. A promoção destes conhecimentos é tarefa da Agência Federal do Meio Ambiente e do Ministério Alemão do Meio Ambiente.

5 LOGÍSTICA REVERSA COMO INSTRUMENTO PARA A RECICLAGEM

A reciclagem de fluxos de resíduos na Alemanha é inseparavelmente conectada com o termo da responsabilidade de produtos. Já o primeiro regulamento legal sobre resíduos definiu obrigações para os produtores e os comerciantes: a diretiva sobre óleo de lubrificação usado^[7], que entrou em vigor ainda antes da lei sobre resíduos foi o primeiro regulamento direcionado a um determinado produto que virou resíduo. A diretiva sobre óleo usado possibilitou arrecadação para formar um fundo, oriundo de subvenções, para a criação de uma logística de reciclagem.

[7] AltölG vom 23.12.1968, BGBl. I, S 1419.

A criação de postos para a entrega gratuita de óleo usado foi possibilitada em decorrência da obrigação assumida pelos próprios produtores e comerciantes, para que disponibilizassem espaços onde os consumidores conseguissem destinar o óleo usado (AltölG)^[8]. Este regulamento foi mantido depois que a lei sobre o óleo usado foi incorporada na lei sobre resíduos. O próprio regulamento promoveu o desenvolvimento da reciclagem do óleo usado, dando preferência ao seu beneficiamento.

[8] A história do AltölG s. Bauernfeind, Rücknahme- und Rückgabepflichten im Umweltrecht, Berlin 1999, S. 347 ff.

Além da diretiva sobre óleos usados, foram criadas na Alemanha as diretivas sobre embalagens, carros velhos, baterias e pilhas, todas elas com regulamentos preliminares que depois foram incorporados em diretivas europeias obrigatórias para todos os países membros da UE.

Uma diretiva para regulamentar a obrigação de receber os aparelhos eletrônicos usados foi discutida entre a Federação e os Estados na Alemanha, porém não chegou a ser aprovada. De

qualquer forma, a Alemanha foi obrigada a atuar neste sentido, através da diretiva correspondente europeia *Waste Electrical and Electronic Equipment* (WEEE), que entrou em vigor no país.

O princípio da responsabilidade de produto, também identificada como logística reversa, que está por trás dos regulamentos, apenas foi adotado em todo o território da UE pela diretiva de resíduos sólidos em 2008, enquanto na Alemanha, já em 1994, o conceito entrou na Lei de Economia Circular e Resíduos, em seu § 22, onde não apenas foi fundamental para o desenvolvimento das respectivas diretivas, mas também foi expresso como dever fundamental dos produtores e do comércio.

No desenvolvimento da responsabilidade de produto (no que tange a gestão de resíduos), é fundamental o conceito do produtor de um produto ser o mais bem informado abordando a composição, componentes e consequências de certos tratamentos, e, portanto, o método de tratamento escolhido deve ser o mais bem capacitado para a destinação adequada dos produtos e não prejudicial para o ambiente. Este conceito constitui o bem comum de todos os regulamentos legais que exigem dos produtores a garantia de que seus produtos não representam um perigo, por exemplo, a lei sobre a segurança de produtos, a lei sobre farmacêuticos ou o regulamento europeu sobre substâncias químicas (REACH) bem como, a responsabilidade civil de produtos.

O conceito da responsabilidade de produto em relação à gestão de resíduos tenta motivar o produtor para que se responsabilize também para o cumprimento de objetivos gerais da gestão de resíduos, como a prevenção e o aproveitamento de resíduos, durante o desenvolvimento de seus produtos. Este conceito ganhou abrangência cada vez maior também em outras áreas por que ele implica por exemplo, na eficiência energética de aparelhos elétricos e eletrônicos, de modo que possam ser desligados e não contribuam para o desperdício de eletricidade através do seu estado de hibernação. O destinatário dessas obrigações deve ser o produtor e não o consumidor. A responsabilidade de produto deve ser distinguida da proteção ambiental integrada no produto que objetiva limitar ao mínimo os impactos ambientais durante a etapa de produção, podendo também se refletir ao próprio produto quando outros materiais são utilizados para evitar a geração de resíduos perigosos, ou aumentar o valor dos resíduos, para o seu aproveitamento (WENDENBURG, 2007).

De acordo com este princípio, ocorre hoje a organização da coleta e do aproveitamento de resíduos de embalagens, pilhas e baterias, carros velhos, óleo lubrificante usado e aparelhos elétricos e eletrônicos usados, em toda União Europeia. Os princípios comuns são colocados em prática individualizada nos 27 Estados Membros da UE, constatando, sobretudo, porque quanto maior a eficiência na separação dos diferentes materiais na coleta seletiva, maior será o sucesso na

reciclagem. Entretanto, estudos mostram que o pré-requisito de uma reciclagem bem sucedida consiste em fluxos de materiais, pouco contaminados e com o máximo grau de pureza, a serem beneficiados em plantas de reciclagem (BIFA, 2011; CYCLOS / HTP, 2011; IGES / CYCLOS, 2011; INK, 2011). Os estudos preparativos para um projeto de lei sobre recicláveis, encomendados pela Agência Alemã do Meio Ambiente, confirmam as vantagens da coleta de embalagens plásticas, metálicas e compostas, frente aos materiais considerados não embalagens, que podem aumentar as taxas de reciclagem, enquanto que a presença dos demais materiais, como madeira residual, farrapos e outros, como aparelhos elétricos e eletrônicos usados, exige um aumento considerável dos esforços necessários para a separação dos recicláveis, e resulta em uma relação custos/benefícios altamente desfavorável. Os estudos também comprovam que o retorno dos produtos usados não terá ônus para os cidadãos ou, mais especificamente, que a coleta dos recicláveis e seu tratamento, por separação e beneficiamento, não resulta em taxas de coleta adicionais, até porque os custos destas destinações são repassados aos responsáveis pelos produtos, por meio de *royalties*, através dos respectivos Sistemas Duais. Os responsáveis pelos produtos internalizam estes custos nos preços dos seus produtos – este sistema, afinal das contas, não é de graça para os cidadãos, mas, em particular, é de difícil percepção.

Isso não é diferente no caso das administrações públicas responsáveis pela gestão de resíduos – aqui também existe a atribuição de custos que não são definidos apenas pela quantidade e o tipo dos resíduos, mas são repassados para o cidadão de forma geral, todos os custos relacionados com a instituição pública “Coleta e aproveitamento dos resíduos domésticos”. Assim, o município raramente é capaz de reconhecer o que paga e quais são todos os serviços oferecidos.

O estabelecimento de cotas de reciclagem na atribuição da coleta e aproveitamento dos resíduos e seus custos, resulta em esforços por um lado das empresas de produção, para minimizar os custos e por outro lado, para alcançar os objetivos = cotas. Sendo assim, é o mérito da diretiva sobre embalagens e do Sistema Dual, fundado pelas empresas para sua realização, que a Alemanha conseguiu ingressar na reciclagem de plásticos com antecedência mesmo se alguns – também na indústria de plásticos – avaliam o aproveitamento térmico como o melhor caminho. Relacionado a esta questão também ocorreram erros graves, mas o resultado deste sistema como um todo está bem a vista e a separação totalmente automatizada, apresentada pela primeira vez na Exposição Mundial em Hannover no ano 2000, foi e continua a ser um marco importante para o ambiente e a segurança de trabalho, e não teria tido sucesso sem o engajamento financeiro do Sistema Dual Alemão (DSD). Mesmo assim parecia uma boa ideia a transformação do DSD em uma instituição de direito público, como sugerido por seu presidente Brück, na época. Em vez disso o caminho de competição foi escolhido, o que levou tanto à redução massiva de custos, quanto promoveu o parasitismo (*free rider*) e a intransparência. Em atribuir as cotas apenas para as embalagens licenciadas, entretanto, os dez sistemas atingiram cotas acima de 100%, porque através de “jogadas erradas” e embalagens não licenciadas, recolheram quantidades maiores do que as exigidas. Isso também resultou em uma redefinição dos contratos de tal maneira que apenas as quantidades definidas pelo número de embalagens licenciadas vendidas foram recebidas para o aproveitamento e o restante foi declarado como “rejeito” e incinerado. A incineração, que também apresenta uma

forma permitida de aproveitamento, é consideravelmente mais lucrativa quanto mais baixos os preços de incineração.

6 CONCLUSÕES

As intervenções atuais para atingir os objetivos elevados de reciclagem tendem em primeiro plano a aumentar as quantidades coletadas. Sabendo que os resíduos domésticos ainda possuem um potencial de recicláveis, que não pode ser recuperado pela incineração, o primeiro objetivo deve ser a coleta seletiva de quantidades maiores já nas casas, para depois conduzir estes fluxos para as plantas de reciclagem. Por trás dessas considerações há o entendimento que os fluxos de materiais bióticos – madeira, papel, resíduos orgânicos, mas também os plásticos como material orgânico – são destruídos pela incineração, enquanto as matérias-primas abióticas como metais, podem ser recuperadas das cinzas da incineração, por que apenas modifica-se a forma, composição e estado físico dos materiais, mas que, eventualmente, ainda estão existentes.

Portanto, o potencial energético, armazenado pela fotossíntese em materiais bióticos pode ser aproveitado energeticamente, porém, o componente material apenas está à disposição uma vez só, mas pode ser conduzido em ciclos pelos processos de reciclagem, ou pelo menos utilizado em cascata até sua combustão no final do processo.

Este conceito também constitui a base para as reflexões do Governo Federal Alemão, para o projeto de lei sobre recicláveis. Neste contexto o Membro do Parlamento alemão, Peter Altmaier, apresentou uma tese resumindo os resultados dos estudos do UBA, dos planejamentos e dando uma estrutura para as respectivas discussões (ALTMAYER, 2011). Mesmo com o tempo curto no fim do período legislativo, uma reconciliação entre todos os participantes não parece impossível. O diálogo *on-line* sobre o assunto, conduzido no *site* do Ministério do Meio Ambiente desde agosto, mostra claramente que a vasta maioria dos participantes preferiria um contêiner de coleta seletiva em casa. Este pode ser o reconhecimento mais importante: Os cidadãos e cidadãs demandam por um contêiner em vez dos sacos de plásticos frequentemente utilizados para tal fim – a decisão sobre a permanência dos pontos verdes instalados no meio rural pode ser colocada à disposição dos municípios responsáveis. Os resultados da coleta seletiva na Baviera (DESTATIS, 2009) mostram que ainda existe potencial, e que uma metrópole como Munique poderá aumentar consideravelmente as quantidades de metais e plásticos recolhidas nas casas, por meio de “contêineres amarelos”.

Além do aumento das quantidades coletadas – aqui também cabem as considerações quanto a simplificação da devolução de aparelhos elétricos e eletrônicos usados pelos cidadãos e também de obrigar seu recebimento, por exemplo, pelo comércio, tudo no âmbito da aplicação da diretiva europeia *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE-Revision)* – será decisivo orientar a determinação das cotas de reciclagem no estado da arte da tecnologia.

As considerações e análises dos peritos contratados pelo UBA apontam até para a introdução de cotas de “aprendizagem”, que se orientem segundo determinado avanço tecnológico. Outro fator importante consiste na imposição de sanções eficazes caso as cotas não forem

atingidas. A diretiva atual sobre embalagens apenas prevê o cancelamento do licenciamento do sistema como sanção, um instrumento vago, por que significaria a proibição de trabalhar, contrariando o artigo 12 da Constituição Alemã que garante o direito ao trabalho, e que não pode ser justificado pelo fato de não ter alcançado as cotas definidas. Deve-se esperar o desenvolvimento da discussão no parlamento e entre os estados e municípios, mas também com os responsáveis pelos produtos e as empresas encarregadas da coleta e tratamento dos resíduos.

A situação atual sobre o acesso a matérias-primas importantes indispensáveis para a produção de produtos modernos sempre aponta para o papel importante da reciclagem – se terras-raras e outros metais de importância estratégica^[9] não estão disponíveis na Europa, a dependência do mercado mundial pode ser reduzida consideravelmente pela reciclagem dos produtos existentes. Porém, também ficou claro que matérias-primas importantes apenas estão contidas em traços nos produtos modernos, portanto, é importante intensificar as pesquisas nesta área. Para tanto, o Ministério Federal para Educação e Pesquisa (BMBF) tem iniciado uma série de projetos de pesquisa para o desenvolvimento continuado da reciclagem destes materiais e produtos (BMBF, 2010). Neste contexto tem-se a fundação do Instituto Helmholtz de Tecnologia de Recursos em Freiberg (Saxônia) como Centro de Excelência nacional e europeu, na pesquisa de matérias-primas minerais e metálicas^[10].

[9] Para o termo técnico “*wirtschaftsstrategische Rohstoffe*” [“matérias-primas estratégicas para a economia”] veja: Wellmer, 2012.

[10] Veja: Gutzmer/Klossek, ReSource 2012, Heft 2, S. 24 ff.

Em relação à pesquisa de tecnologia de recursos veja os relatórios sobre o centro de excelência da Aachen de Friedrich/Gisbertz, ReSource 2012, Heft 2, S. 29 ff. bem como de Goldmann, Kruckow e Westphal (2012) para o ReWiMet na TU Clausthal-Zellerfeld.

REFERÊNCIAS

AACHEN DE FRIEDRICH/GISBERTZ, ReSource 2012, Heft 2, S. 29 ff.

ABFALLWIRTSCHAFT, Abfallstatistik, Zeitreihe Importe nach Abfallarten sonst. Holzabfälle.

ALTÖLG s. Bauernfeind, Rücknahme- und Rückgabepflichten im Umweltrecht, Berlin 1999, S. 347 ff.

ALTMAIER, Peter. **Thesenpapier zur Fortentwicklung der haushaltsnahen**

Wertstofffassung. 2011. Disponível em: <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/wertstofftonne_thesenpapier.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

ALTÖLG vom 23.12.1968, BGBl. I, S 1419.

BERTRAM, Heinz-Ulrich. GEFÄHRLICHE Illusion – Eine Vielzahl von Gründen spricht gegen die Vision von einer "Null-Abfall-Gesellschaft" (Teil 2), von Heinz-Ulrich Bertram in ReSource (früher Müllmagazin) 3. Quartal 2012 – Rhombos Verlag (erst jetzt wieder entdeckt) **Teil 1 in ReSource 2/2013**, S. 16-23.

BERTRAM, ReSource 2012, Heft 2, S. 16 ff.

- BGBI. I S. 3044. Disponível em: <<http://goo.gl/IcVEqE>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- BIFA Umweltinstitut GmbH. **Evaluierung der Verpackungsverordnung**. Texte 06/2011. Disponível em: <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4072.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- BMBF sobre diretivas para o fomento de “Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und Gesellschaft – MatRessource” [“Materiais para uma indústria e sociedade eficientes em recursos – MatRessource”]. 02.11.2010. Disponível em: <<http://www.bmbf.de/foerderungen/15420.php>>. Acesso em: 31 maio 2014.
- BMELV-Kampagne. **Zu gut für die Tonne** [Bom demais para o lixo]. Disponível em: <<http://www.zugutfuertietonne.de>>. Acesso em: 31 maio 2014.
- BRAUNGART, M., McDONOUGH, W. **Einfach intelligent produzieren**. Cradle to Cradle: Die Natur zeigt wie wir Dinge besser machen können. Berliner Taschenbuchverlag, 2008.
- CYCLOS GmbH, Osnabrück / HTP GmbH, Aachen. **Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung**: Bestimmung der Idealszusammensetzung der Wertstofftonne. Texte 08/2011. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4074.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- DEHOUST, G.; KÜPPERS, P.; BRINGEZU, S.; WILTS, H. **Development of scientific and technical foundations for a national waste prevention programme**. [Elaboração das bases científicas e técnicas para a criação de um programa nacional de prevenção de resíduos] UBA-Texte Nr. 59/2010. Dessau: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt). Disponível em: <<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4044.pdf/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- DESTATIS – Statistisches Bundesamt. Instituto Federal Alemão de Estatística. Fachserie 19, Reihe 1, 2009, S. 173 Abb. 2, **Eingesammelte Verkaufsverpackungen 2009**. Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de/tiernebg/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- DIE BUNDESREGIERUNG. **Eine arbeitet hier ineffizient**. Und es ist nicht Frau Meier. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012. Disponível em: <www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress_bf.pdf>. Acesso em: 31 maio 2014.
- DIRETIVA 2008/98/EG. [Portaria do Parlamento Europeu e do Conselho de 02 de novembro de 2008 sobre resíduos e sobre a anulação de determinadas diretivas] **Richtlinie 2008/98/EG DES Europäischen Parlaments und des Rates**. ABl. EG Nr. L 312 S. 3 ber. ABl. EG 2009 Nr. L 127, S. 24. vom 19 November 2008. über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:de:PDF>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

DIRETIVA n° 2002/95/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Janeiro de 2003, relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos. (RoHS). Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0095>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

DIRETIVA n° 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Janeiro de 2003, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) – Declaração comum do Parlamento Europeu, do Conselho e da Comissão relativa ao Artigo 9. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0096>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

DÜRKOOP, A.; GUTZMER, J.; FAULSTICH, M.; KLOSSEK, A. Das Begleitforschungsprojekt INTRA r3 + – Integration und Transfer der r3-Forschungsergebnisse zur nachhaltigen Sicherung strategischer Metalle und Mineralien. In: THOME-KOZMIENSKY, Karl J.; GOLDMANN, Daniel. (Hrsg.): **Recycling und Rohstoffe**, Band 5, Tagungsband der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012, TK-Verlag, Neuruppin 2012

FRENZ, Walter. **Die neue Abfallhierarchie**. UPR 2012, p. 210-216. 2012. Disponível em: <<https://www.juris.de/jportal/prev/SBLU000462912>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

GOLDMANN, D.; KRUCKOW, T.; WESTPHAL, R. **Der Recycling-Cluster wirtschaftsstrategische Metalle REWIMET e.V. Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz**, Berlin, 26.-27.03.2012., Veröffentlicht in: Recycling und Rohstoffe, Bd. 5, Hrsg. K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, S. 281-290.

GUTZMER/KLOSSEK, **ReSource 2012**, Heft 2, S. 24 ff.

IGES Institut GmbH, Berlin / CYCLOS GmbH, Osnabrück. **Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung**. Teilvorhaben 2: Finanzierungsmodelle der Wertstofftonne. Texte 10/2011. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4077.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2014.

ISWA (Uni Stuttgart, Prof. Martin Kranert), **Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln**, in Deutschland, Stuttgart, 2012. Disponível em: <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie_Lebensmittelabfuelle_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile>. Acesso em: 31 maio 2014.

IHK – Industrie- und Handelskammer Karlsruhe. Kreislaufwirtschaftsgesetz. **Kanzlei Redeker Sellner Dahs, EU- und verfassungsrechtliche Rahmenbedingungen der Einführung einer einheitlichen Wertstofftonne**. Dokument-NR. 83839. 2011. Disponível em: <http://m.karlsruhe.ihk.de/innovation/umwelt/Abfall/Kreislaufwirtschaftsgesetz/1499262/EU_und_verfassungsrechtliche_Rahmenbedingungen_der_Einfuehrung.html;jsessionid=4A4B0945CECF0FF44137D662A237AEA0.rep12?view=mobile>. Acesso em: 28 ago. 2014.

KAISER, **ReSource 2012**, Heft 2, S.8 ff.

KNAPPE, Florian; VOGT, Regine; LAZAR, Silvia; HÖKE, Silke. **Optimierung der Verwertung organischer Abfälle**, UBA-Texte Nr.31/2012. Dessau-Roßlau, Juli 2012. ISSN 1862-4804. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4310.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

KROPP, Olaf. In: LERSNER, Heinrich; WENDENBURG, Helge; VERSTEYL, Ludger-Anselm. **Recht der Abfallbeseitigung, des Bundes, der Länder und der Europäischen Union • Apartwerk**. Kommentierungen der Abfallrahmenrichtlinie, des KrWG und weiterer abfallrechtlicher Gesetze und Verordnungen. 2012.

LAZAR, S., HÖKE, S. (ahu), KNAPPE, F., VOGT, R. (IFEU). **Optimierung der Verwertung organischer Abfälle**. [Materialband „Wirkungsanalyse Boden“]. Teilbericht: Wirkungsanalyse Boden. Materialband zum Forschungsvorhaben FKZ 3709 33 340, im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Texte Nr. 32/2012. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4310.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

PETERSEN, Frank. **Die fünfstufige Abfallhierarchie – Funktionen und Probleme**. AbfallR – Zeitschrift für das Recht der Abfallwirtschaft – Ausgabe: 1/2013 – 11 Seiten. Disponível em: <<http://www.lexxion.de/de/verlagsprogramm-shop/details/2977/207/abfallr/abfallr-1/2013/die-f%C3%BCnfstufige-abfallhierarchie-%E2%80%93-funktionen-und-probleme>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

PETERSEN, Frank; DOUMET; Jean, STÖHR, Günter. Das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz. [Das neue KrWG] **NVwZ 9/2012**, p. 521-530 Disponível em: <http://www.sam-rlp.de/fileadmin/pdf/tagung_abfallrecht_2012/petersen_NVwZ.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

THOME-KOZMIENSKY, Elisabeth; VERSTEYL; Andrea, BECKMANN, Michael. **Produktverantwortung**, Neuruppin 2007, S. 3 ff. = Müllmagazin 2/2007, S.20 ff. Disponível em: <<http://www.rhombos.de/shop/mullmagazin-jahresarchiv-2007-4-hefte.html>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

TierNebG – **Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz**. Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de/tiernebg/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

UBA – Umweltbundesamt. **Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Erstellung eines bundesweiten Abfallvermeidungsprogramms**. Texte 59/2010. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4043.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

VHE – Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V., **Bio- und Grünguterfassung in Deutschland**, Aachen, 2012. Disponível em: <http://www.vhe.de/fileadmin/vhe/pdfs/Publikationen/Veroeffentlichungen/Handbuch_2012_12_12_komplett_48seitig_kleine_datei.pdf>. Acesso em: 31 maio 2014.

WELLMER, Friedrich-W. Was sind wirtschaftsstrategische Rohstoffe? In: KÜMPEL, Hans-Joachim; RÖHLING, Heinz-Gerd; STEINBACH, Volker. **GeoHannover 2012. GeoRohstoffe für das 21. Jahrhundert**. 2012. p. 120.

WENDENBURG, Helge. **Ziele und Chancen der Produktverantwortung**. Vortrag vom 13.Juni 2007 anlässlich der Abfallwirtschaftskonferenz „Produktverantwortung“ in Hannover; aktualisierte Fassung, s.a. Thome´-Kozmiensky/Versteyl/Beckmann, Produktverantwortung, Neuruppin 2007, S. 3 ff. = Müllmagazin 2/2007, S.20 ff. Hannover, 13.06.2007. Disponível em: <<http://goo.gl/4HfzoJ>>. Acesso em: 31 maio 2014.

ZAH, Rainer; BÖNI, Heinz; GAUCH, Marcel; HISCHIER, Roland; LEHMANN, Martin; WÄGER, Patrick. **Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen**, Bern: Empa, 2007. Disponível em: <<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/8514.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

ZEITREIHE über Abfallimporte beim UBA. **Umwelt Bundesamt**. Disponível em: <www.umweltbundesamt.de>. Acesso em: 28 ago. 2014.

* Foi mantida a forma da apresentação, mas complementada por informações adicionais.
O conteúdo reflete a opinião pessoal do autor.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

WENDENBURG, Helge. A Eficiência dos Recursos e Gestão da Reciclagem: implementação na Alemanha. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maió – 2017**.

Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos

Energy Efficiency of Material Recycling and Energy Recovery of Selected Waste Fractions

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

RESUMO

A fim de se reduzir os impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais, a União Europeia (UE) busca medidas sustentáveis para aumentar a eficiência e a produtividade da utilização de recursos naturais. Este objetivo só poderá ser atingido através do emprego da valorização dos resíduos. Entretanto, os sistemas de gestão de resíduos devem ser detalhadamente investigados e todos os aspectos envolvendo a reciclagem de materiais e a recuperação de energia devem ser cuidadosamente balanceados. O presente artigo compara os métodos de recuperação de frações seleccionadas dos resíduos, no que diz respeito à sua eficiência energética. A resposta para a questão sobre qual solução é mais eficiente em termos energéticos, se a reciclagem de materiais ou a recuperação de energia, está principalmente relacionada com as seguintes frações de resíduos: papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e, indiretamente, os metais. A reciclagem dos materiais destas categorias é vantajosa em relação à recuperação de energia. De acordo com a melhoria da eficiência energética, a reciclagem de materiais gera uma menor emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa, em relação ao processo de recuperação de energia. Para as frações na forma de papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e metais, torna-se evidente que com a intensificação dos sistemas de coleta seletiva em combinação com o uso mais intensivo de tecnologias de triagem, o grau de reciclagem desses materiais tenda a aumentar. Os sistemas de coleta seletiva e triagem dos resíduos devem ser coordenados. O objetivo geral da gestão é o de conseguir atingir um balanço ideal entre maiores taxas de recuperação de energia e uma boa qualidade dos produtos reciclados. A eficiência energética da reciclagem de materiais provenientes de resíduos orgânicos pode ser maior através da intensificação do uso de tecnologias de digestão anaeróbia. De modo a incrementar a eficiência energética da gestão como um todo, a eficiência energética nas plantas de recuperação de energia devem ser aumentadas, de forma que os resíduos impróprios para reciclagem de materiais sejam processados com o intuito de gerar uma maior produção de energia possível.

Palavras-chave: Eficiência energética. Reciclagem. Recuperação energética. Gestão de resíduos. Resíduos orgânicos.

ABSTRACT

In order to reduce the ecological impact of resource exploitation, the EU calls for sustainable options to increase the efficiency and productivity of the utilization of natural resources. This target can only be achieved by considering resource recovery from waste comprehensively. However, waste management measures have to be investigated critically and all aspects of material recycling and energy recovery have to be carefully balanced. This article compares recovery methods for selected waste fractions with regard to their energy efficiency. Whether material recycling or energy recovery is the most energy efficient solution, is a question of particular relevance with regard to the following waste fractions: paper and cardboard, plastics and biowaste and also indirectly metals. For the described material categories, material recycling has advantages compared to energy recovery. In accordance with the improved energy efficiency of substance opposed to energy recovery, material recycling causes lower emissions of green house gases. For the fractions paper and cardboard, plastics, biowaste and metals it becomes apparent, that intensification of the separate collection systems in combination with a more intensive use of sorting technologies can increase the extent of material recycling. Collection and sorting systems must be coordinated. The objective of the overall management must be to achieve an optimum of the highest possible recovery rates in combination with a high quality of recyclables. The energy efficiency of material recycling of biowaste can be increased by intensifying the use of anaerobic technologies. In order to increase the energy efficiency of the overall management, the energy efficiencies of energy recovery plants must be increased so that the waste unsuitable for material recycling is treated with the highest possible energy yield.

Keywords: Energy Efficiency. Recycling. Energy recovery. Waste management. Organic waste.

1 INTRODUÇÃO

A estratégia de utilização sustentável dos recursos naturais, de acordo com a Comissão Europeia, levará a uma melhor eficiência e produtividade dos recursos e, ao mesmo tempo, reduzirá os impactos ambientais (ANON, 2005). Dessa forma, as práticas de gestão de resíduos devem ser analisadas de forma crítica. Neste sentido, a avaliação dos processos de reciclagem de materiais e de recuperação energética são cruciais. Este artigo fornece uma avaliação comparativa entre os dois métodos de utilização de frações selecionadas de resíduos. A ênfase será dada na comparação em termos de economia de energia líquida quando da reciclagem de materiais e da recuperação energética, e ainda, emissão de carbono, utilização da água e presença de nutrientes em diferentes frações de resíduos. As frações de resíduos aqui avaliadas incluem papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e metais.

De acordo com a Portaria da União Europeia (UE) 2008/98/EG, a prioridade deverá ser dada para a reciclagem de materiais, quando esta garantir a melhor prática ambiental. Essa prioridade também está incorporada na emenda alemã “Lei de Reciclagem” de 2012, a qual já está incluída na nova hierarquia de gestão de resíduos em que a reciclagem de material tem preferência frente a recuperação de energia.

Figura 1 – A hierarquia dos resíduos (Emenda UE 2008/98/EG) e Lei de Reciclagem Alemã



Fonte: KrWG (2012).

2 MÉTODOS DE RECICLAGEM

Os processos de transformação e/ou substituição das matérias-primas primárias por secundárias recuperadas a partir dos resíduos podem ser definidos segundo quatro linhas principais de classificação, quais sejam, a reciclagem de materiais, reciclagem de matérias-primas, reciclagem biológica e recuperação energética, como seguem:

- **Reciclagem de materiais** – utilização de material não envolvendo mudanças químicas. Isto se aplica, por exemplo, para a utilização de resíduos oriundos de papel e papelão para a produção de papel e papelão reciclado, a utilização de resíduos de vidro para a produção de novos produtos de vidro ou a refusão de plásticos, por exemplo, extrusão, moldagem por injeção em grânulos onde neste tipo de intervenção é empregado o mínimo de energia, assim as cadeias poliméricas podem se mover em relação umas as outras, as ligações químicas são entretanto mantidas na sua maioria.
- **Reciclagem de matérias-primas** – métodos de exploração em que os materiais recicláveis estão sujeitos a alterações químicas adequadas para a utilização de materiais e/ou de energia, como por exemplo, unidades monoméricas para repolimerização ou óleo/gás de síntese.
- **Reciclagem biológica** – define-se através do processo de reestruturação e de degradação da matéria orgânica (particularmente das frações orgânicas coletadas

seletivamente e resíduos verdes) realizado por micro-organismos que convertem essas frações em adubo e, quando se utiliza processos anaeróbios em biogás.

- **Recuperação energética** – o principal objetivo da reciclagem/recuperação energética de resíduos deve ser a utilização dos resíduos, e não a eliminação do seu potencial de contaminação, conforme aplicável ao tratamento térmico. Aqui, como regra geral, e em contraste com o tratamento térmico, os resíduos são utilizados energeticamente a partir da melhoria de sua qualidade de combustão por tratamento mecânico prévio elevando seu poder calorífico e reduzindo o teor de contaminantes. Método e grau de tratamento podem variar consideravelmente. Nem o tratamento nem o produto “combustível derivado de resíduos” são definidos por lei.

No presente artigo, a matéria-prima e a reciclagem biológica são divididas entre categorias de material reciclável, tratamento térmico e de recuperação energética.

3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO

A sustentabilidade das estratégias de gestão de resíduos deve ser avaliada pela Comissão Europeia, e deve conduzir à utilização sustentável dos recursos naturais que resulte em uma melhor eficiência dos recursos e diminua os efeitos ambientais causados pela utilização desses recursos, o que deve ser considerado independentemente do crescimento econômico (ANON, 2005). Para avaliar a eficiência dos recursos, não apenas o consumo de recursos imediatos e os rendimentos dos diferentes métodos de reciclagem devem ser considerados, mas também a formação de banco de dados. Assim como a economia de recursos através da reciclagem de materiais e de energia.

Neste contexto, um importante parâmetro inicial é a demanda acumulada de energia (DAE) para os produtos relevantes derivados dos resíduos, diferenciados de acordo com a sua produção a partir de matérias-primas primárias ou secundárias. O baixo poder calorífico de resíduos em um fluxo de massa e a eficiência energética das usinas térmicas também são relevantes para as avaliações abordadas a seguir.

As eficiências energéticas atualmente alcançadas em instalações de incineração de resíduos na Alemanha variam entre um mínimo de 21% e um máximo de 76%, com média de 45% (DEHOUST; GEBHARDT; GÄRTNER, 2002; WALLMANN; FRITZ; FRICKE, 2009; WOLLNY; WEINEN; DEHOUST; FRITSCH, 2000). A eficiência energética da combustão da palha, relevante em relação aos resíduos orgânicos, atinge aproximadamente de 21 a 29% da capacidade de geração de energia elétrica. Valores de até 92% são obtidos com a finalidade de geração de calor.

A fim de se explorar de uma forma mais eficiente a energia contida nos resíduos, diferentes métodos de recuperação de energia devem ser detalhadamente analisados quanto ao seu respectivo rendimento energético e consumo de energia. O termo “eficiência energética”, como usado no presente artigo, define o balanço entre as duas formas de recuperação de energia a serem aqui avaliadas:

- A recuperação térmica da energia contida nos resíduos leva em consideração o grau de eficiência das respectivas plantas de recuperação.
- A reciclagem de material como matéria-prima secundária substitui o processo de produção de matérias-primas primárias.

Dessa forma, a maior eficiência de energia deve-se ao modo de reciclagem ou recuperação energética, ou seja, a que consuma a menor quantidade de energia ou produza a maior quantidade de energia final.

4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS FRAÇÕES SELECIONADAS DE RESÍDUOS

A resposta para a questão sobre qual solução é mais eficiente em termos energéticos, se a reciclagem de materiais ou a recuperação de energia, está principalmente relacionada com as seguintes frações de resíduos: papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e, indiretamente, aos metais.

A demanda acumulada de energia para a produção de, por exemplo, papéis para fotocópias produzidos a partir de fibras adquiridas de matéria-prima (polpa de celulose) da região norte equivale a aproximadamente 39 MJ/kg (IFEU, 2006). De acordo com os últimos dados fornecidos pela indústria de papel, a demanda de energia poderia ser reduzida para 35 MJ/kg (IFEU, 2009). A demanda acumulada de energia para a produção de papel equivalente, composto por fibras geradas a partir dos resíduos, foi aproximadamente de 15 MJ/kg. O valor calorífico líquido é aproximadamente de 13.2 MJ/Kg. O valor calorífico líquido para produtos reciclados de papel e papelão é um pouco menor devido à absorção de umidade durante o uso, em comparação com os “novos produtos” (FRICKE; BAHR; BIDLINGMAIER; SPRINGER, 2011).

A DAE necessária para a produção de grânulos de plástico mostra uma grande variação conforme os diferentes polímeros, o que também vale para o poder calorífico inferior (BUWAL, 1991; 1995; KINDLER; NIKLES, 1979; PATEL, 1999).

Quadro 1 – Comparação de valores caloríficos e demanda acumulada de energia (DAE)

	DAE	Valor calorífico
Polietileno	65–85 MJ/kg	aproximadamente 43 MJ/kg
Policloreto de Vinila	DAE 51–55 MJ/kg	18–20 MJ/kg
Poliestireno	DAE 72–89 MJ/kg	aproximadamente 40 MJ/kg

Fonte: Fricke *et al.* (2011).

Para a produção de, por exemplo, grânulos de polietileno a partir de matérias-primas secundárias, a DAE alcança cerca de 15 MJ/kg (FRICKE *et al.*, 2011; HTP & IFEU, 2001; IFEU, 2004).

Esta comparação demonstra que a reciclagem de materiais, em relação à recuperação de energia, oferece maior eficiência energética para as duas frações de resíduos em pauta, mesmo com as altas eficiências energéticas dos combustíveis (ver Tabela 1). Desta forma, mesmo que se aumente as diferenças entre a DAE, caso a produção seja baseada nas matérias-primas primárias ou secundárias, e o poder calorífico inferior identificado durante a reciclagem de material seja menor, a DAE ainda é positiva. Ao mesmo tempo são indicados os limites para a recuperação energética. Diversos estudos (HTP & IFEU, 2001; IFEU, 2006; 2010) apontam para a mesma conclusão de que, no que se diz respeito à eficiência energética, a reciclagem de materiais é o método mais apropriado.

Entretanto, para resíduos de papel e de plásticos não recicláveis, por exemplo, componentes muito pequenos ou muito sujos ou elementos compostos, a recuperação de energia apresenta-se como o meio mais razoável de destinação desses resíduos.

Tabela 1 – Demanda acumulada de energia (DAE) para a produção de papel composto de fibras virgens e polímeros com base nas matérias-primas primárias e secundárias, assim como a economia e o abastecimento de energia utilizada na reciclagem de materiais e na recuperação energética para diferentes eficiências de combustíveis

DAE Produção a partir de matérias-primas primárias	DAE Produção a partir de matérias-primas secundárias	Economia de energia. Uso de matérias-primas secundárias em relação a primárias
Papel	Papel	Papel
35 MJ/kg	15 MJ/kg	20 MJ/kg
PE-polímero^[1]	PE-polímero	PE-polímero
68 MJ/kg	até 15 MJ/kg	53 MJ/kg

^[1] Exceto demanda de energia para a transformação em produto final.

Valor calorífico líquido de frações de resíduos	Economia de energia. Eficiência do combustível 76%	Economia de energia. Eficiência do combustível 45%	Economia de energia. Eficiência do combustível 21%
Resíduos de papel	Resíduos de papel	Resíduos de papel	Resíduos de papel
13.2 MJ/kg	10.0 MJ/kg	5.9 MJ/kg	2.8 MJ/kg
PE-polímero	PE-polímero	PE-polímero	PE-polímero
43 MJ/kg	32.7 MJ/kg	19.4 MJ/kg	9.0 MJ/kg

Fonte: Fricke *et al.* (2011).

Os resultados de diversas avaliações do ciclo de vida (HTP & IFEU, 2001; IFEU, 2004; 2006; 2010) indicam que, assim como há uma melhoria da eficiência energética na reciclagem de materiais em relação à recuperação de energia, as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa também seriam menores, menos nocivas.

A fim de analisar o potencial de impacto nas mudanças climáticas, a avaliação das emissões de CO₂ relacionadas com a energia, por exemplo, para a categoria de produtos como papel e papelão são de extrema relevância. Se as fontes de energia regenerativas são utilizadas principalmente para a produção de fibras virgens, por exemplo, cascas e resíduos de soda cáustica (resíduos da produção) ou de outros combustíveis provenientes da biomassa, o efeito de redução de CO₂ é relativamente baixo, o que se deve, segundo o IFEU (2006), à economia de energia durante a reciclagem de materiais. Entretanto, supondo-se que as fontes de energia regenerativas utilizadas na produção de fibra virgem possam substituir as fontes de energia fósseis em outros setores de produção, os efeitos de redução de emissões de CO₂ seriam ainda mais significantes. Devido à reciclagem relacionada com menores demandas de fibras virgens, este efeito poderia ser ainda maior se fosse utilizada madeira no processo de substituição de fontes de energia fósseis como fonte de energia regenerativa. Uma das vantagens relacionadas ao impacto ambiental, da reciclagem de materiais como papel e papelão, é a significativa baixa demanda de água utilizada no processo (cerca de 20 m³/t de papel), quando comparada com a produção de papel de fibras virgens, a qual exige uma demanda de aproximadamente de 50 m³/t de papel. Conseqüentemente, ocorrerá uma redução das emissões líquidas e ocorrerá o favorecimento da acidificação devido a uma significativa redução do teor de enxofre nos lixiviados dos resíduos.

4.1 Resíduos Orgânicos

Devido ao alto teor de umidade, frequentemente acima de 60%, resíduos orgânicos possuem um baixo valor calorífico líquido, aproximadamente de 2 a 3.6 MJ/kg. A coleta seletiva de resíduos orgânicos apenas se justifica, se os produtos da reciclagem, como composto, forem utilizados na agricultura ou na horticultura, assim como acontece na Alemanha, e se a alta demanda para a obtenção de um produto final de qualidade é atingida. A recuperação de energia, neste caso, é realizada em conjunto com o rejeito. Para avaliar a eficiência energética, a eficiência nas plantas de incineração dos resíduos supramencionada deve ser considerada.

Na Alemanha, a palha é um dos principais componentes utilizados para equilibrar o húmus nos solos utilizados para a agricultura. Se o composto é utilizado para substituir a palha com o propósito da regeneração do húmus, a palha pode ser utilizada como uma fonte de energia regenerativa em plantas que utilizam biomassa. Com base nos teores de nutrientes fornecidos na Tabela 2 e considerando-se a perda de massa durante o processo de compostagem, um fator de substituição equivalente a 0,44 assegura que os resíduos orgânicos em comparação com a palha, ou seja, baseado no húmus-C, 1 t de resíduos orgânicos correspondem a 0,44 t de palha (matéria fresca).

Tabela 2 – Comparação de teor de nutrientes da palha e de composto

Nutriente / húmus-C	Composto fresco (kg/t matéria seca)	Composto maduro (kg/t matéria seca)	Palha (kg/t matéria seca)
Nitrogênio (N)	5.7	4.8	5.0
Fósforo (P ₂ O ₅)	8.0	6.4	1.3
Potássio (K ₂ O)	13.0	11.0	11.6
Cálcio (CaO)	50.0	50.0	3.0
Húmus-C	132	116	110 ^[1]
Húmus-C ^[2]	40.5	não especificado	92

^[1] Baseado em um potencial de geração médio de húmus de 95 kg Húmus-C/t com um teor de matéria seca de 86%.

^[2] Baseado no resíduo orgânico fresco com uma perda de massa durante a compostagem de 50% e teor de umidade de 38,6%. Baseado em material de palha fresca com um teor de umidade de 84%.

Fonte: BGK (2008).

A reciclagem de resíduos orgânicos para a obtenção de composto e a recuperação de energética a partir da substituição da palha, produz uma maior eficiência energética quando se compara a recuperação de energia diretamente dos resíduos orgânicos (Tabela 3). E ainda, a incorporação da digestão anaeróbia, aumenta ainda mais a eficiência energética.

Tabela 3 – Fornecimento de energia para a recuperação de energia de resíduos orgânicos e palha como equivalente palha-resíduos orgânicos com diferentes eficiências de combustível

Valores caloríficos	Fornecimento de energia	
	Eficiência do combustível 76%	Eficiência do combustível 45%
Resíduos orgânicos		
3,2 MJ/kg	2,43 MJ/kg	1,44 MJ/kg
Palha	Eficiência do combustível 92% ^[1]	Eficiência do combustível 45%
14,4 MJ/kg	13,25 MJ/kg	Não especificado
Equivalentes palha-resíduos orgânicos: 6,34 MJ/kg	5,83 MJ/kg	Não especificado
Provisão líquida^[2]	5,13 MJ/kg	Não especificado
Provisão líquida com utilização de biogás^[3]	5,63 MJ/kg	Não especificado

^[1] Eficiência de combustível em planta de força que emprega palha como biomassa.

^[2] Considerando-se a demanda de energia para o transporte de resíduos orgânicos e palha, e também para a compostagem com um total de 0.7 MJ/kg.

^[3] 100 m³-biogás/t de material fresco, teor de 60% de CH₄, 35%-80% de eficiência, 0.75-1.72 MJ/kg, menor demanda de energia adicional durante a fase anaeróbia.

Fonte: Elaboração própria dos autores com dados de diversos prestadores técnicos e operadores.

4.2 Metais

A fim de se avaliar qual o método mais apropriado para a reciclagem de metais, deve-se determinar a quantidade e a qualidade de resíduos provenientes de fluxos residuais específicos, ou seja, quais os metais coletados seletivamente, embalagens leves e resíduos brutos podem ser reciclados. Aqui são considerados os principais metais encontrados nos resíduos urbanos: aço, alumínio e cobre. Em relação aos resíduos domésticos e comerciais, a fração de resíduos de metais é a que demonstra um maior potencial específico para a economia de energia e proteção ambiental (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Comparação de DAEs para a produção de metais selecionados a partir de matérias-primas primárias e secundárias

Metal	Demanda de energia para a produção de aço		
	Matérias-primas primárias	Matérias-primas secundárias	Economia de energia através da reciclagem
Aço bruto	16.2 MJ/kg	6.1 MJ/kg (reciclagem de sucata de carro)	62%
Aciaria de oxigênio	20.4 MJ/kg	6.5 MJ/kg (embalagem)	68%
Alumínio	211.8 MJ/kg	15.3 MJ/kg (reciclagem de sucata de carro)	93%
		16.4 MJ/kg (embalagem)	94%
Cobre	Tubos 32.1 MJ/kg Arames 50.4 MJ/kg Folhas 31.8 MJ/kg	3.4–9.2 MJ/kg	80 – 92%

Fonte: Fricke *et al.* (2011).

Segundo HTP & IFEU (2001), a taxa de desempenho da triagem de metais ferrosos, nas plantas de separação de resíduos na Alemanha é de até 98%, enquanto que a separação de metais não ferrosos (Al) é de até 84,7%, onde de acordo com os autores, as taxas relatadas são exageradas.

Avaliações próprias de etapas do processo mecânico em plantas de tratamento mecânico e biológico (TMB) e plantas de produção de combustíveis secundários indicaram taxas de desempenho de triagem de metais ferrosos de até 86% (FRICKE *et al.*, 2011). Enquanto que para metais não ferrosos as taxas de performance de triagem alcançadas são de até 75%.

Dados significativos sobre a eficiência da separação de metais ferrosos e não ferrosos da escória, ainda são escassos, mais especificamente no que se diz respeito aos metais não ferrosos. Dentre outros motivos, a falta de dados sobre metais não ferrosos se deve particularmente ao fato de que o processamento de escória na Alemanha não acontece no mesmo local onde é realizada a incineração de resíduos, mas sim em plantas de reciclagem de escória onde não se têm a política de se fornecer muitas informações. De acordo com o conhecimento geral, placas de estanho e folhas de alumínio são trituradas durante o processo de incineração e, em seguida, sinterizados com a escória em forma de grãos finos. Além disso, é assumido que as proporções dos metais não ferrosos, dependendo da espessura da folha, são oxidadas durante o processo de incineração. Conseqüentemente, a separação pelo atual método de redemoinho tem uma limitação quanto ao seu uso. De acordo com IFEU (2007), as taxas de eficiência de separação de metais não ferrosos a partir de escórias em plantas de incineração de resíduos, é de aproximadamente de 66%.

Atualmente, a coleta seletiva de resíduos brutos gera taxas de recuperação maiores do que as do processamento de escórias. O desenvolvimento do mercado resultou na implementação da separação de metais e do tratamento de escórias. Pesquisas na Suíça indicaram que a separação de metais das cinzas da escória resulta em elevadas taxas de recuperação (MORF; TAVERNA; BUSER, 2007). As tecnologias baseadas em moagem e subsequente separação convencional de metais também são eficientes. Na verdade, os processos pirolíticos estão sendo investigados com foco na recuperação de metais a partir dos resíduos sólidos.

No geral, os autores concluíram que a eficiência de separação para metais ferrosos e em particular, de metais não ferrosos, possui um grande potencial de otimização.

5 CONSEQUÊNCIAS DA GESTÃO DE RESÍDUOS

No que diz respeito à eficiência energética da reciclagem de materiais de frações específicas de resíduos, como papel, papelão, plástico e de resíduos orgânicos, há uma clara vantagem em relação à recuperação de energia. Conseqüentemente, a reciclagem dos materiais pertencentes às categorias supracitadas, deverão ser intensificadas. A seguir retrataremos a hierarquização de procedimentos:

5.1 Etapa 1: Reciclagem de materiais

- Coleta seletiva com o emprego de contêineres e pontos de entrega voluntária;
- Triagem a partir de materiais misturados e dos resíduos totais;
- Intensificação das tecnologias anaeróbias para a reciclagem de resíduos orgânicos.

5.1.1 Justificativa: Intensificação da coleta seletiva em países emergentes e em desenvolvimento

Apesar das justificativas econômicas para a implementação da coleta seletiva e da disponibilidade de equipamentos, esse processo de coleta é ainda, apenas praticado em baixa escala seja de ordem formal seja através do setor informal, este último sem regularidade e mal organizado. Dessa forma, a taxa de coleta seletiva alcança taxas de desvio de apenas 5 a 10%.

Um sistema organizado de coleta seletiva público ou privado acontece em uma escala muito pequena. Entre outras justificativas, deve-se considerar a falta de informações específicas das partes interessadas e entre os especialistas técnicos em relação à:

- O mercado de recursos secundários, por exemplo, rendimentos, exigências de qualidade e de demanda;
- Quantidade e qualidade dos resíduos;
- Tecnologias apropriadas para coleta e transporte, e a eficiência de sistemas de coleta já existentes;
- Parâmetros para modelagem econômica dos vários instrumentos de gestão de resíduos disponíveis;
- Dados relacionados à aceitação da população em participar do sistema de coleta seletiva.

As seguintes medidas preparatórias são necessárias para otimizar a coleta seletiva de resíduos:

- Ações de capacitação;
- Disponibilizar os dados relevantes para o planejamento, entre outros itens, a quantidade e qualidade dos resíduos, exigência/rendimento da reciclagem;
- Sistemas de coleta exigidos e os já existentes;
- Extensão das medidas preparatórias, por exemplo, a avaliação da quantidade e dos tipos de locais de entrega voluntária e a publicidade disponível;
- Estudos econômicos, como, a comparação entre os diferentes sistemas de manejo de resíduos existentes, sensibilidade das análises com foco no rendimento de reciclagem de materiais específicos;
- Desenvolvimento de mercado para produtos reciclados, em especial adubo, fertilizante líquido e de combustíveis derivados de resíduos.

Segundo estudos e experiências vivenciadas por países em desenvolvimento, cujos dados disponíveis são principalmente relacionados às áreas urbanas, em condições economicamente favoráveis, altas taxas de coleta e de recuperação podem ser alcançadas a partir das seguintes medidas:

- Apoio ao setor informal, incluindo garantias de rendimentos em longo prazo, viabilizando equipamentos de coleta seletiva e treinamento;
- Integração do setor informal no sistema geral de manejo dos resíduos;
- Estabelecimento de pontos de entrega voluntária para papéis e papelão, vidros, metais e plásticos;
- Estabelecimento de sistemas de coleta em contêineres e/ou sacolas.

O estabelecimento de um sistema de coleta nas ruas a partir de contêineres diversificados segundo o tipo de resíduo encontra dificuldade de aplicação devido aos custos gerados. Em alguns municípios, a coleta de resíduos e de materiais recicláveis é realizada através do uso de um sistema de coleta de rua com contêineres específicos. Como regra geral, há dois tipos de acondicionadores, um para os resíduos úmidos (orgânicos e rejeitos) e outro para os secos (recicláveis). Uma planta de triagem é obrigatória quando se implementa o sistema de coleta diversificada, sendo que a separação prévia dos resíduos melhora a qualidade e a capacidade de triagem, e conseqüentemente, aumenta as taxas de utilização dos resíduos.

5.1.2 Justificativa: Estabelecimento de plantas de triagem em países desenvolvidos e emergentes

A triagem de materiais recicláveis presentes nos resíduos urbanos ocorre em instalações de triagem, as quais são introduzidas antes da disposição final dos resíduos, como as plantas de tratamento mecânico-biológico (TMB) e de tratamento térmico. As frações alvo a serem selecionadas são papel e papelão, plásticos, vidros, metais e madeiras.

As plantas de triagem e de processamento de resíduos são adaptadas de acordo com as condições locais, visando baixos custos de pessoal e a geração de empregos. Processos de separação manual são preferencialmente realizados aos processos automatizados, ambos devem estar adequados às exigências de segurança no trabalho. Como também se trata de triagem de recicláveis, o setor informal também deve ser integrado, por exemplo, com trabalhadores para a linha de triagem. Pátios planos são preferíveis para as áreas de descarga. Esta concepção de descarregamento oferece também a possibilidade de armazenamento temporário de alguns materiais específicos, a fim de que se possa adicionar esse material ao fluxo de resíduos de forma orientada, ou para permitir o seu fornecimento em setores especiais da planta de triagem.

A separação de impurezas, contaminantes e substâncias nocivas, assim como materiais volumosos é possível tanto manualmente como também através do emprego de maquinários. A alimentação da planta pode ser feita por meio de carregadeiras de rodas ou escavadeiras móveis com pólopo. Em instalações mais simples, com capacidades de processamento de pequeno porte, uma abordagem de processo manual (pá/garfo) também é praticável. Antes de o material ser encaminhado para a esteira de triagem, a abertura dos sacos deve ser realizada e o material processado por um equipamento de segregação bruta, na forma de peneiras, com malhas de 80 a 100 mm. Os grãos maiores são compostos de embalagens e podem ser separados manualmente.

Os grãos menores remanescentes do peneiramento são encaminhados para o tratamento de rejeitos.

5.2 Etapa 2: Recuperação Energética

- Incineração (queima de massa bruta) ou recuperação energética dos rejeitos não recicláveis, com ou sem pré-tratamento em plantas mecânicas ou mecânico-biológicas;
- Otimização da eficiência energética nas plantas de tratamento, a fim de se maximizar o ganho eficaz de energia.

Como consequência da intensificação da reciclagem de materiais que detêm poder calorífico elevado, temos que o poder calorífico líquido dos resíduos sobressalentes diminuirá significativamente em médio prazo. Na Alemanha, este processo já se iniciou quando da intensificação da coleta de papel e papelão. Com valores atuais de cerca de 7,500 kJ/kg, o valor calorífico nos rejeitos é significativamente menor do que era há cinco anos. Naquela época, o valor calorífico dos rejeitos estava entre 8,500-8,900 kJ/kg.

5.2.1 Justificativa: Estabelecimento de recuperação energética nas economias emergentes e nos países desenvolvidos

Altos teores de resíduos de cozinha e de jardim com baixos valores caloríficos, em combinação com as menores quantidades de resíduos com maior poder calorífico como o plástico, papel, papelão e têxteis, podem resultar em um valor calorífico total muito baixo.

Em relação à tecnologia aplicada, uma combustão autossustentável sem combustível adicional (carvão, petróleo etc.) não é possível com valores caloríficos abaixo de 4,500 kJ/kg e não podem ser garantidos abaixo de 6,000 kJ/kg. Além disso, como consequência da esperada intensificação da reciclagem de materiais presentes nos resíduos com alto valor calorífico, o poder calorífico dos resíduos restantes diminuirá significativamente em médio prazo.

5.3 Etapa 3: Tratamento dos Resíduos antes de sua Disposição em Aterros Sanitários

A disposição convencional de resíduos em aterros apresenta, em todo o mundo, limitações em decorrência do aumento da geração, da maior presença de embalagens e de componentes tóxicos nos resíduos sólidos urbanos (RSU). Aterramento de resíduos gera um aumento nas emissões de poluentes durante longos períodos, o que requer métodos sofisticados de controle e de tratamento de emissões. As consequências ainda perduram por um longo período (trinta anos na Alemanha), mesmo após a desativação do aterro sanitário. Além disso, em muitas regiões, está cada vez mais difícil se encontrar locais apropriados e o aceite da população para a construção de aterros sanitários. Consequentemente, novas estratégias de manejo de resíduos se fazem necessárias. Programas de conscientização para a minimização dos resíduos e de reciclagem

são importantes componentes das estratégias modernas de gestão de resíduos. No entanto, mesmo quando o potencial de reciclagem dos resíduos é explorado ao máximo, ainda assim, sempre há uma fração dos resíduos que precisa ser eliminada, identificada como rejeito. Os rejeitos dispostos nos aterros sanitários podem ser menores através de um pré-tratamento, limitando assim a emissão provocada quando do aterramento. Diferentes estratégias estão disponíveis para o tratamento dos resíduos:

- Pré-tratamento mecânico-biológico (TMB);
- Tratamento térmico (incineração ou queima da massa bruta).

As condições financeiras e a infraestrutura, assim como a quantidade e principalmente a composição dos resíduos, determinam a escolha de qual tratamento deve ser utilizado em cada caso. Devido aos custos relativamente baixos, a elevada flexibilidade do processo e a possibilidade de aplicação centralizada e descentralizada, os processos de TMB estão ganhando espaço nos países em desenvolvimento. Com o prévio tratamento dos RSU antes da sua disposição em aterros sanitários, os seguintes objetivos poderão ser alcançados:

- Minimização da massa e do volume de resíduos a serem depositados (proporcionando o prolongamento da vida útil do aterro);
- Inativação de processos biológicos e bioquímicos a fim de se evitar as emissões de biogás (Gases de Efeito Estufa – GEE), assim como as emissões de odores;
- Redução dos recalques nos aterros;
- Imobilização de poluentes, visando reduzir a contaminação do chorume;
- Investimentos em reciclagem, como na separação seletiva de frações recicláveis, de frações com alto poder calorífico ou utilizáveis na produção de materiais de construção do aterro devem ser integrados ao processo de tratamento, caso haja demanda para esses materiais.

6 DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE RECURSOS SECUNDÁRIOS E SUAS RECEITAS

Nos últimos anos foi registrado um claro aumento dos preços de recursos secundários, em especial para materiais metálicos. Tal situação é atribuída ao aumento da demanda por estes materiais no mercado asiático, juntamente com o aumento do custo de desenvolvimento de recursos e produção, causados pelo aumento do custo da energia.

As receitas decorrentes dos recursos secundários mostram grandes variações de valores entre diferentes países, o que resultou na variação de preços demonstrada nas Tabelas 5a e 5b.

Tabela 5a – Receitas a partir de recursos secundários selecionados decorrentes da valorização dos resíduos, nos anos de 2009 – 2013

Recursos secundários	Receitas
Papéis mistos	70 – 110 €/t
Papelão	80 – 130 €/t
PEBD, embalagens	160 – 350 €/t
PE folhas transparentes tingidas < 70 µm, embalagem	40 – 240 €/t
PE folhas transparentes < 70 µm, embalagem	380 – 440 €/t
PEAD vazio colorido, fardo	140 – 300 €/t
PVC, colorido, base de moinho	400 – 590 €/t
PET, azul claro, fardo	460 – 530 €/t.

Fonte: EUWID (2011-2013).

Tabela 5b – Receitas a partir de recursos secundários selecionados decorrentes da valorização dos resíduos, nos anos de 2009 – 2013

Recursos secundários	Receitas
PET, colorido, fardo	210 – 340 €/t
PP folhas, colorido, fardo	130 – 310 €/t
PS, colorido, base moída	500 – 690 €/t
Têxteis	100 – 160 €/t
Sucata de aço	200 – 400 €/t
Cobre	4,700 – 5,900 €/t
Alumínio	1,000 – 3,000 €/t

Fonte: EUWID (2011-2013).

A melhoria nas receitas obtidas pelos plásticos reciclados e de polímeros em particular, criou condições mais favoráveis para a reciclagem de materiais de maior valor. O aumento da

demanda por petróleo bruto, ao mesmo tempo em que tende levar a escassez em sua disponibilidade, também continuará a elevar o seu preço em médio e longo prazo.

A alta demanda energética para a produção de polímeros e de petróleo como principais fontes de energia, contribuirá ainda mais, em médio e longo prazo, nos esforços para se melhorar os rendimentos do uso de fontes secundárias de polímeros. Altas demandas de energia para a geração de fibras de papel e uma competição massiva para o uso de matéria-prima de madeira devido à sua propriedade de fonte de energia regenerativa, permitem obter resultados semelhantes para papel e papelão àqueles observados para os polímeros.

A média de rendimento de sucata de aço em 2013 foi de 340 €/t. Depois do aço, o alumínio é o metal mais frequentemente utilizado no mundo. Devido à sua qualidade, o consumo no setor de materiais para embalagem (filmes e fitas finas, pequenos recipientes e tampas de rosca; latas de bebidas e de alimentos, tubos e latas de aerossol) é relevante em relação aos resíduos domésticos e comerciais. O consumo de alumínio no setor de embalagens vem diminuindo significativamente, como é o caso do consumo de folha de flandres. Depois do ferro e do alumínio, o cobre é o metal utilizado com maior frequência.

O cobre é um dos materiais que pode ser reciclado sem nenhuma perda da sua qualidade original. A utilização de cobre reciclado nas indústrias está crescendo cada vez mais. Atualmente, em todo o mundo, cerca de 12 a 13% do cobre é produzido a partir da sucata de cobre, e em países industrializados essa porcentagem chega até mais de 50% (Alemanha 58% – dado de 2012). O cobre presente em construções, máquinas, equipamentos e diversos tipos de resíduos, e que podem ser utilizados para reciclagem e na recuperação, é a maior e mais econômica mina de cobre do mundo. Na Suíça, recentemente, através de métodos modernos de mineração, o cobre vem sendo captado nos antigos aterros. Esses locais de disposição de resíduos chegam a conter até duas vezes mais cobre em relação ao que é, em média, encontrado em depósitos naturais de cobre. Em particular, a escória proveniente de instalações de incineração de resíduos contém altos níveis de cobre. Devido à alta demanda de energia para a produção de cobre combinado as dificuldades devido a sua escassez na natureza, espera-se que, em médio e longo prazo, as receitas oriundas do cobre reciclado sejam muito maiores.

Em geral, o aumento da aplicação de aditivos para o refinamento dos metais tem impedido esta reciclagem.

7 CONCLUSÕES

Para as categorias dos materiais descritos, a reciclagem de materiais possui uma clara vantagem em relação à recuperação energética. De acordo com a melhoria da eficiência energética de reciclagem de materiais em relação a recuperação energética, a reciclagem de materiais também é considerada de menor impacto ambiental.

Para as frações recicláveis, de papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e metais, torna-se evidente que a intensificação dos sistemas de coleta seletiva em combinação com o maior

emprego das tecnologias de triagem aumentará o índice de reciclagem de materiais. O uso de tecnologias de triagem adequadas deve ser expandido para que também sejam incluídos os resíduos mistos. Coleta e sistemas de triagem devem ser implementados. O objetivo geral do sistema é o de conseguir atingir um balanço ideal entre maiores taxas de recuperação de energia e uma boa qualidade dos produtos reciclados.

Um aumento na eficiência da separação de metal nas plantas de triagem, nas plantas de tratamento mecânico-biológico e nas plantas de incineração, é ponto de crucial importância para que se atinjam maiores taxas de recuperação de metal.

A eficiência energética da reciclagem de resíduos orgânicos pode ser aumentada através da intensificação do uso de tecnologias de digestão anaeróbia. De modo a intensificar a eficiência energética do sistema como um todo, a eficiência energética do tratamento térmico e a recuperação de energia devem ser incrementadas, de forma que os resíduos impróprios para reciclagem sejam tratados com a maior produção de energia possível.

Em médio prazo, é esperado que os custos de matérias-primas primárias se elevem significativamente, o que irá estimular o emprego de matérias-primas secundárias. A atual escala de desenvolvimento do preço do petróleo e de vários metais está baseada nesta suposição. Papel e papelão, assim como os metais, serão, sem dúvida, as primeiras frações a alcançarem o *status* de gerenciamento de recursos autossustentável. Considerando o desenvolvimento de mercado esperado para polímeros secundários, a mesma suposição, em médio prazo, é aplicada para essa categoria de material.

Se a estrutura de preços entre o tratamento dos resíduos (TMB, plantas de incineração) e a reciclagem de resíduos orgânicos continuarem estáveis, a coleta seletiva de resíduos orgânicos também será intensificada, o que é incentivado pela notável melhora no mercado de compostos, que vêm sendo observada desde 2006 em todo o mundo. Uma elevação dos preços dos fertilizantes também poderá ser antecipada; para o nitrogênio, devido à enorme demanda de energia para sua produção; e do fósforo, devido ao crescente aumento na sua demanda e da sua limitada disponibilidade.

A conscientização em relação à importância de proteção dos recursos é necessária a fim de se obter um manejo de resíduos mais sustentável. Um dos maiores obstáculos ainda é a estigmatização da matéria-prima secundária – esta de baixa qualidade resultante de processos inadequados introduzidos no passado. Entretanto, esta questão será mitigada não apenas com a introdução de processos adequados de valorização mas também pela popularização de temas como a proteção climática, que em pouco tempo terá importância vital ancorada no problema da escassez de recursos naturais, se tornando reconhecida por todas as classes sociais como um dos maiores e mais importantes desafios dos próximos anos.

A situação de gestão de resíduos em países emergentes ou de baixa renda ainda se encontra em um nível muito precário. As principais razões para o pouco desenvolvimento nas últimas décadas devem-se principalmente às significativas exigências de conhecimento técnico e

das políticas públicas de baixo comprometimento, o que gera limitações financeiras para investimentos nas atividades de manejo dos resíduos.

No presente momento, nos mercados de países em desenvolvimentos e emergentes estão aumentando os esforços para lidar com as questões de gestão e da disposição de resíduos. Uma série de medidas está disponível, abrangendo desde a coleta seletiva na fonte até os métodos de disposição e de tratamentos de resíduos menos impactantes ao meio ambiente. As diversas opções de métodos possuem relevância e viabilidade distintas segundo as condições climáticas e geográficas de cada país. Atualmente, a recuperação de materiais recicláveis pode ser considerada a atividade mais razoável, devido à expansão dos mercados de recursos secundários. A recuperação de materiais pode ser realizada tanto pelo estabelecimento de plantas para reciclagem de materiais quanto pelos programas de coleta seletiva na fonte. Entretanto, deve-se notar que os mercados de materiais recicláveis são voláteis e podem estar sujeitos às rápidas alterações. As técnicas de reutilização dos materiais recicláveis são suscetíveis às futuras alterações, a fim de se aumentar a reutilização dos materiais, visando assim, uma significativa economia da energia primária. Este progresso tende a aumentar a atração de tecnologias de reciclagem mais avançadas.

Independentemente das melhoras a serem implementadas nas atividades de reciclagem, de qualquer forma, as frações não aproveitáveis dos resíduos, devem ser dispostas. Aterramento de resíduos *in natura* ainda continua sendo a prática mais comum em países emergentes e em desenvolvimento. Entretanto, os impactos resultantes da disposição em aterros de frações *in natura* podem ser minimizados através do pré-tratamento dos resíduos, limitando assim, o potencial de emissão e reduzindo seu volume. Diversas opções estão disponíveis para o tratamento de resíduos, como o tratamento mecânico-biológico (TMB) e o tratamento térmico (incineração, queima de massa bruta) de resíduos. A escolha do tratamento mais adequado para cada caso em específico, depende das condições financeiras e da infraestrutura, da quantidade de resíduos e acima de tudo de sua composição gravimétrica e granulométrica. Devido ao relativo baixo custo, a alta flexibilidade do processo e da possibilidade de aplicação centralizada ou descentralizada, os processos de TMB estão ganhando espaço em países emergentes ou em desenvolvimento.

A partir da priorização pela eficiência dos recursos, teremos uma mudança de paradigma onde o aterramento deixa de ser tomado como referência de procedimento e passar a prevalecer a valorização dos resíduos.

REFERÊNCIAS

ANON. **Communication from the Commission of 21 December 2005 – Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources** [COM (2005) 670 – not published in the Official Journal]. 16.12.2005. Disponível em: <http://europa.eu/legislation_summaries/environment/sustainable_development/l28167_en.htm>. Acesso em: 28 ago. 2014.

ANON. **Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen** (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012, BGBl. I S. 212.

- BGK. **Auswertung der RAL-Gütesicherung Komposte nach RAL-GZ 251 der Jahre 2006 und 2007 durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.**, Köln, unveröffentlicht. 2008.
- BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. **Ökobilanz von Packstoffen, Schriftenreihe Umwelt 132**, Abfälle, Bern (CH). 1991.
- BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Vergleichende ökologische Bewertung von Anstrichen im Baubereich, **Schriftenreihe Umwelt 232**, Band 2, Bern (CH). 1995.
- DEHOUST, Günter; GEBHARDT, Peter; GÄRTNER, Stefan. **Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung**. Studie im Auftrag der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen (TTAD) Darmstadt, April 2002. Disponível em: <<http://www.oeko.de/oekodoc/75/2002-013-de.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- EUWID (2011, 2012, 2013). **Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH – Recycling und Entsorgung**, Gernsbach (GER). Disponível em: <<http://www.euwid.de/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- FRICKE, Klaus; BAHR, Tobias; BIDLINGMAIER, Werner; SPRINGER, Christian. Energy efficiency of substance and energy recovery of selected waste fractions. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 644-648, april 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10005878>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- HTP & IFEU. **Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Verkaufsverpackungen**. UFOPLAN 298 33719. 2001. Disponível em: <www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2258.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. **Climate protection potential in the waste sector**, German Federal Environmental Agency, Berlin, 2010. Disponível em: <<http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4049.html>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. **Ökobilanz zur PET-Einwegflasche in Österreich**, im Auftrag der ARA AG, Wien, Heidelberg, Oktober, 2004. Disponível em: <[https://www.ifeu.de/oekobilanzen/pdf/LCA%20PET%20Einwegflasche%20in%20Oesterreich%20\(Okt%202004\).pdf](https://www.ifeu.de/oekobilanzen/pdf/LCA%20PET%20Einwegflasche%20in%20Oesterreich%20(Okt%202004).pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. **Ökologischer Vergleich von Büropapieren in Abhängigkeit vom Faserrohstoff**, im Auftrag der Initiative pro Recyclingpapier Berlin, Heidelberg, August, 2006. Disponível em: <http://www.papiernetz.de/docs/IFEU-Studie_Langfassung.002.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. **Exemplary assessment of an entire and high value recovery in a MSW with special regard on climate relevance**, UFOPLAN – Ref.-N° 205 33 311, German Federal Environmental Agency, Berlin, 2007.

KINDLER, Hubert; NIKLES, Albert. Energiebedarf bei der Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 51, n. 11, p. 1125-1127, Weinheim, November, 1979. doi: 10.1002/cite.330511121.

KrWG, 2012 – Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG). 2012. Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

MORF, Leo S.; TAVERNA, Ruedi; BUSER, Andreas M. **Schlackemonitoring in der KVA Thurgau im Jahr 2007**, GEO Partner AG, Zürich, 2008.

PATEL, Martin. **Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten**. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, UBA F&E-Vorhaben 10401123, Berlin, 1999.

PORTARIA DA UNIÃO EUROPEIA (UE) 2008/98/EG. **Richtlinie 2008/98/EG DES Europäischen Parlaments und des Rates**. vom 19 November 2008. über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:de:PDF>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

WALLMANN, Rainer; FRITZ, Thomas; FRICKE, Klaus. Energie aus Abfall – Potenziale und Nutzungsmöglichkeiten. **Müll und Abfall 5**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2009.

WOLLNY, Volrad; WEINEN, Peter; DEHOUST, Günter; FRITSCHKE, Tobias. Vergleich der rohstofflichen und energetische Verwertung von Verpackungsabfällen. **Müll und Abfall 10**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2000.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

Gestão Internacional de Resíduos: desafios, medidas e possibilidades

International Waste Management: measures and chances

Doutor Andreas Jaron

RESUMO

Ao mesmo tempo em que as medidas tecnológicas e organizacionais para criar uma adequada gestão dos resíduos são bem conhecidas e aplicadas em vários países, ainda a maioria dos resíduos gerados no mundo é apenas aterrada. Muitos países sofrem o impacto nos solos, em suas águas e no ar decorrente da disposição inadequada dos resíduos. Os encargos econômicos e sociais estão ligados a esse problema. A questão-chave para enfrentar estes desafios é a melhoria dos padrões por meio de melhores procedimentos de licenciamento, ações de sensibilização e financiamento sustentável. Enquanto os países permitirem os baixos padrões de reciclagem e aterramento, afastam-se as oportunidades oriundas de um moderno gerenciamento de resíduos. O exemplo da Alemanha mostra ser possível desenvolver uma próspera economia de resíduos, quando a legislação define as exigências e as penalidades e a administração executiva implementa e monitora as atividades econômicas. Taxas de reciclagem até 70% e a proibição da disposição em aterro de resíduos biodegradáveis ou resíduos recicláveis garantem a minimização dos impactos ao meio ambiente, maximizam a economia de recursos e contribuem positivamente para a proteção do clima. A abordagem correta refere-se também à inclusão constante dos setores informais, que na maioria dos países representam uma parcela importante para a promoção da reciclagem. Ações de sensibilização, legislativas e medidas de controle, financiamento sustentável e incentivos de elevados padrões técnicos precisam da visão e da vontade dos políticos tomadores de decisão. Há uma grande quantidade de benefícios para a colheita, a semente está disponível.

Palavras-chave: Gestão. Economia verde. Resíduos. Reciclagem. Normas.

ABSTRACT

While the technological and organisational measures to establish a proper waste management are well known and in practical use in several states already, still most of the generated waste worldwide is just dumped. Many countries suffer from damages to the soil, waters and air from wrong waste disposal. Economic and social burdens are connected to this problem. The key issue to tackle the challenges is the improvement of standards through better permitting procedures, awareness raising and sustainable financing. As long as states allow the lowest standards to dominate the recycling and disposal market, they will fail to take chance of the benefits of a modern waste management. The German example shows, that a prosperous economic sector is possible, if the legislation sets the right frame with duties and requirements and the executive administration implements and monitors the economic activities. Recycling rates up to 70 percent and a ban of

landfilling bio-degradable or recyclable waste guarantee a minimisation of impacts to the environment, a maximum of resource savings, and a positive contribution to climate protection. The right approach is also referring to the active inclusion of the informal sectors, which in most countries are an important part of the recycling efforts and results. Awareness raising, legislative and control measures, sustainable financing and incentives for high technical standards need the insight and willingness of the political decision-makers. There is a lot of benefit to harvest – the seed is available.

Keywords: Management. Green Economy. Residues. Recycling. Norms.

1 INTRODUÇÃO

Como a gestão de resíduos deve ser para ser considerada moderna, ambientalmente saudável e correta? Quais são os objetivos e o que é possível e viável? Em um mundo globalizado como o de hoje, que sofre uma rápida alteração, caracterizada pela mudança climática, escassez de recursos, pobreza e onde há um contínuo dano à saúde humana e ao meio ambiente, a gestão de resíduos tem um papel crucial no combate aos danos ambientais, sociais e problemas econômicos. O desafio é o de despertar a vontade e a capacidade política para impor e aplicar as ferramentas e os instrumentos necessários para promover tal sistema.

A gestão adequada dos resíduos é tecnicamente simples: se dá pela segregação de diferentes frações de resíduos diretamente na fonte, coleta seletiva e tratamento, incluindo o reuso, reciclagem e outras operações para recuperação, e, finalmente, a disposição de matérias não recuperáveis em aterros sanitários. Isto pode ser feito – dependendo do nível do desenvolvimento econômico, os custos de trabalho e os investimentos acessíveis – de uma forma simples, usando o setor informal de catadores ou de forma mais avançada, incluindo tecnologias automatizadas. Em muitos casos, a segregação e a gestão de separação das frações seca e úmida, já permitem taxas bastante elevadas de reciclagem de papel, plásticos, metais, madeiras, eletrônicos e agregados. Este fato também se reflete na valorização dos resíduos orgânicos, que é encontrado na maioria dos países em proporção superior a 60%. O uso de lodo de esgoto “limpo” e a realização da compostagem da fração biodegradável dos resíduos fazem sentido na maior parte das regiões, devido ao seu ambiente árido e a necessidade de solo que seja cultivável.

2 ECONOMIA VERDE NA GESTÃO DE RESÍDUOS

O exemplo da Economia Circular Alemã, com uma taxa de reciclagem de 70% para todos os tipos de resíduos e de 65% para os resíduos urbanos, demonstra que a utilização dos resíduos pode resultar na proteção de recursos naturais: 14% dos principais recursos necessários à produção alemã, são substituídos por materiais secundários produzidos a partir de resíduos. Como resultado da proibição, em 2005, da disposição de resíduos biodegradáveis em aterros, juntamente com a exigência de pré-tratamento dos resíduos por incineração com a recuperação de energia, a gestão de resíduos contribuiu para que as metas alemãs firmadas no Protocolo de Quioto fossem atingidas em 20%. Finalmente, o volume de negócios anual no setor de gestão de resíduos da Alemanha é de aproximadamente de 40 bilhões de euros, empregando 200 mil pessoas – uma situação de

exclusivo sucesso. Se uma Economia Verde significa simultaneamente benefícios ecológicos e econômicos em todo um setor, então, a gestão de resíduos é capaz de demonstrar como estes podem ser alcançados.

O número de países com padrões elevados de gestão é relativamente baixo. Geralmente, o nível de normas ou regulamentos do país parece correlacionar-se com os seus graus de consciência ambiental, padrões de vida, sistemas de tarifação e desafios ambientais. Mas, frequentemente, os requisitos legais não acompanham sua aplicação na prática, devido a diversos obstáculos, como a ausência de um bom governo e a falta de capacidade de aplicação em muitos países. Por outro lado, países com baixos salários, podem atingir taxas de reciclagem relativamente altas por meio do setor informal, através dos “catadores” de resíduos. Consequentemente, especialmente em países em desenvolvimento e emergentes, a inclusão do setor formal no sistema de gestão de resíduos é de alta importância – para o meio ambiente, bem como por razões sociais e políticas.

A economia verde, neste aspecto, possui três elementos: o estabelecimento de normas legais; aplicação – especialmente a proibição de atividades de baixo padrão ambiental; e, a organização e financiamento da infraestrutura necessária. Você não consegue um sem o outro!

Uma atenção especial também deve ser direcionada aos princípios de poluidor-pagador, a fim de se definir os incentivos necessários em relação às práticas realizadas. Mas: se a infraestrutura e as atividades de gestão de resíduos são movidos unicamente por restrições orçamentárias, com uma maior prioridade política direcionada à outras tarefas, tais como segurança, saúde e abastecimento de água *versus* resíduos, a obtenção de sucesso é pouco provável. Todos os três elementos devem se unir para que a gestão de resíduos possa prosperar dentro de uma economia verde.

3 AJUDANDO AS PESSOAS A AJUDAREM A SI MESMAS

O que pode ser feito para que se possa ajudar os países a direcionar seus esforços para melhorar a situação relacionada aos resíduos e para estabelecer uma estrutura de gestão de resíduos adequada? Em geral, existem três ferramentas:

- (a) Configuração padrão em nível internacional;
- (b) Assistência bilateral e multilateral;
- (c) Pressão unilateral.

Enquanto que (a) e (b) exigem o consentimento sobre as medidas selecionadas, a imposição de (c) pode, em casos raros, ser usado para mudar os padrões de produção em regiões estrangeiras. Um exemplo é a Portaria da UE 2002/95/EC sobre a “Restrição de (do uso de certas) substâncias perigosas”, a qual mostrou os seus efeitos principalmente nos países asiáticos produtores de equipamentos eletrônicos. A ferramenta mais importante usada atualmente para a assistência é a cooperação bilateral, em forma de assistência técnica e financeira – como os projetos

em conjunto com a UE. Um grande número de estudos-piloto, projetos, recomendações etc. têm sido realizados com maior ou menor sucesso em um caráter exemplar.

Finalmente, a fim de que os instrumentos e ferramentas voltadas para a promoção adequada de gestão dos resíduos seja sustentável e de sucesso, as necessidades ambientais precisam ser traduzidas para a demanda econômica. O interesse duradouro dos profissionais envolvidos só será garantido desde que haja um benefício econômico para eles próprios. Mas essa simples correlação possui algumas difíceis implicações: enquanto um baixo padrão de “tecnologias”, instalações ou padrões comportamentais estiverem definindo o valor de referência de um negócio, e consumidores/geradores de resíduos estiverem se beneficiando com esses baixos padrões, é impossível confiar e investir com sucesso em padrões mais elevados. É de responsabilidade dos países industrializados e do seu próprio interesse, ajudar os países em desenvolvimento e países com economias em transição a melhorarem os seus padrões ambientais, pois além de fatores ecológicos e sociais, os custos e a queda de preços em um mundo globalizado pode desestabilizar a base dos mercados nos países desenvolvidos.

4 A IMPORTANTE FUNÇÃO DAS NORMAS

Por que os baixos padrões ainda conduzem os mercados em muitos países? Em primeiro lugar, apenas um número limitado de países têm o conhecimento sobre os padrões existentes ou a sobre a utilização das MTD (melhores técnicas disponíveis) para a licenciamento ambiental e monitoramento das instalações. Mas, mais importante, a falta de instrumentos de regulamentação necessária e de sua aplicação refletem a falta de acessibilidade, consciência e confiança no sistema administrativo, o que pode ser atribuído a obstáculos culturais, corrupção e diferentes prioridades políticas. Consequentemente, contatos bilaterais e multilaterais são usados para aumentar a conscientização, para alavancar o setor privado, para a assistência no estabelecimento de programas e legislação e reforçar as capacidades e a aplicação.

A definição de diferentes tipos de padrões conforme cada tipo de resíduo, normas e diretrizes são promulgadas em nível internacional através de acordos ambientais multilaterais, incluindo a Convenção Basel da Organização das Nações Unidas (ONU) da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e – para países Europeus – a União Europeia. A 10ª Conferência das Partes (COP) da Convenção Basel, em outubro de 2011, abordou vários dos desafios supramencionados. Em particular, foi decidido, sob a BC-10/3, o estabelecimento de um grupo de peritos técnicos para elaborar normas globais sobre a Gestão Ambientalmente Correta (GAC) de Resíduos (ONU-UNEP, 2011).

As três reuniões realizadas pelo grupo de especialistas oriundos de cinco regiões da ONU, aconteceu desde 2012 no Japão, em Buenos Aires/Argentina e Jacarta/Indonésia onde foram elaborados além dos manuais ESM (*Environmentally Sound Management*) também uma série de artigos técnicos para emprego prático. A recomendação OECD e do guia manual relacionado de 2007 podem ser a base deste trabalho (OECD, 2007a; 2007b). De adicional relevância para o

desenvolvimento de uma estrutura de padrões ESM é o BRef-notas da UE, que está definindo um valor de referência para que seja de alguma forma incluída no âmbito da ESM-padrões.

5 CONCLUSÕES

Além dos desafios indicados, que vão além da definição de normas mais avançadas, o fechamento global de ciclos de matérias-primas é um dos problemas ainda não resolvidos na gestão internacional de resíduos. Muitos resíduos ainda estão sendo depositados em lixões sem qualquer pré-tratamento e em condições não seguras ao meio ambiente. De importância estratégica são resíduos perigosos e materiais críticos, como materiais raros em sucata eletrônica, no que diz respeito à sua disponibilidade para a produção de eletrônicos, fotovoltaica e dispositivos de energia eólica. As taxas de reciclagem dessas matérias-primas estratégicas são muito baixas devido aos baixos preços das matérias-primas no mercado global. A responsabilização internacional dos produtores ou outros tipos de instrumentos econômicos para promover a rentabilidade da coleta, transporte e reciclagem desses materiais são escassos. Novas pesquisas estão tentando ampliar o conhecimento sobre o assunto.

Seguindo o princípio da precaução, outra questão está se expandindo na agenda da política de resíduos internacional: Nanoresíduos. Cada vez mais os resíduos contêm nanomateriais, e o destino e o transporte destes materiais, muitas vezes, devido ao seu tamanho, e risco no contexto de gestão de resíduos, ainda não está claro na maior parte das vezes.

Devido ao tamanho muito pequeno dos nanomateriais, a sua detecção ainda é, tecnicamente, um desafio. Como as diferentes substâncias reagem em operações de disposição de resíduos, e as instalações são capazes de cumprir a sua função? O risco potencial da emissão desenfreada através do sistema de gestão de resíduos deve ser minimizado. Especificamente, os processos de incineração, recuperação de lodos de águas residuais, as operações de reciclagem e disposição em aterros sanitários são potenciais candidatos para futuras pesquisas mais detalhadas.

REFERÊNCIAS

- BC-10/3 – **Indonesian-Swiss country-led initiative to improve the effectiveness of the Basel Convention**. Disponível em: <<http://goo.gl/k7aYB7>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Guidance Manual for the Implementation of the OECD Recommendation C(2004)100 on Environmentally Sound Management (ESM) of Waste**. 2007a. Disponível em: <<http://www.oecd.org/dataoecd/23/31/39559085.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Recommendation of the Council on the Environmentally Sound Management of Waste**. 9 June 2004 – C(2004)100. Amended on 16 October 2007 – C(2007)97. 2007b. Disponível em: <<http://acts.oecd.org/Instruments/ShowInstrumentView.aspx?InstrumentID=51&InstrumentPID=48&Lang=en&Book=False>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

ONU-UNEP – **Report of the Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal on its tenth meeting. Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal Tenth meeting Cartagena**, Colombia, 17-21 October 2011. Disponível em: <<http://archive.basel.int/meetings/cop/cop10/documents/28e.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

PORTARIA DA UE 2002/95/EC. **Directiva 2002/95/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 27 de Janeiro de 2003, relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32002L0095>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

JARON, Andreas. Gestão Internacional de Resíduos: desafios, medidas e possibilidades. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Maió – 2017.**

CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos

CReED – Centre for Research, Education and Demonstration in Waste Management

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Dipl.-Engenheiro Nuclear Burkart Schulte

Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

RESUMO

As práticas de tratamento de resíduos tomaram força no mercado global a partir do entendimento de que os aterros têm um potencial elevado de influência nas emissões de gases de efeito estufa, as práticas de engenharia não conseguem afastar o potencial de contaminação a médio e longo prazo dos aterros, as ações de manutenção após o encerramento dos aterros são onerosas, os recursos naturais estão se tornando cada vez mais valorizados, portanto, o mercado de recursos secundários tem ganhado força devido a este fato, o valor dos recursos energéticos está cada vez mais caro, a demanda alimentícia está acentuada para o atendimento de uma população que cresce de forma desenfreada e a sociedade tem se tornado mais sensível às ações que determinam a proteção e preservação ambiental. Para atender as demandas decorrentes deste novo cenário, temos como nosso maior gargalo a insuficiência de capacidade técnica do mercado brasileiro e de outros mercados emergentes para o recebimento destes novos sistemas. Neste sentido, o CReED propõe formar câmaras de trabalho em todos os níveis, introduzir a educação ambiental de forma multidisciplinar e transversal seja na educação formal seja na informal, promover parcerias de pesquisa e capacitação, democratizar as informações, firmar acordos institucionais para compartilhamento das experiências, fomentar congressos, seminários e *workshops* técnicos facilitando o acesso e as discussões entre os técnicos do setor, permitir que a sociedade tenha acesso às atuais e novas plantas para que possa vivenciar a transformação dos resíduos, fazendo com que cada cidadão se torne um agente multiplicador.

Palavras-chave: Pesquisa. Educação. Multiplicação. Gestão de resíduos. Cooperação.

ABSTRACT

The practices of waste treatment took force in the global market from the understanding that the landfill has a high potential to influence in the emission of greenhouse gases, the practice of engineering cannot move away the potential for contamination in the medium and long term of

the landfill, maintenance actions after the landfill closure are costly, the natural resources are becoming increasingly valued so the market of secondary resources has gained due to this fact, the value of energy resources are becoming increasingly expensive, the food demand is increased for the care of a population that grows rampant and the society has become more sensitive in front of the actions that determine the protection and preservation of Environment. To meet the demands arising from this new scenario, we have as our biggest bottleneck the lack of technical capacity of the Brazilian market and other emerging markets to receive these new systems. In this sense, the CReEd is proposing to establish work chambers at all levels, to introduce environmental education in a multidisciplinary way and cross is in formal education is in the informal, promote partnerships for research and training, democratize information, promote institutional arrangements for sharing of experiences, development of congresses, seminars and technical workshops facilitating the access and the discussions between the technicians, allow that the society has access to the actual and new plants so can experience the transformation of waste, resulting each citizen becomes a multiplier agents.

Keywords: Research. Education. Multiplication. Waste Management. Cooperation.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e as mudanças de comportamento dos consumidores levam a um aumento maciço no consumo de recursos naturais. A disponibilidade, por exemplo, de fontes de energia fósseis e vários minérios, bem como de recursos fisiologicamente vitais como fósforo e água é limitada e, portanto, sua preservação apresenta-se à humanidade como um de seus maiores desafios. E ainda, os impactos ambientais estão intimamente ligados ao aumento do consumo de recursos.

A proteção do meio ambiente e dos recursos naturais e o desenvolvimento econômico já não estão mais em conflito. Muito pelo contrário, as sinergias entre ambos os setores já estão sendo reconhecidas. Na tentativa de minimizar os problemas descritos, o gerenciamento de resíduos assume uma posição chave, representando simultaneamente: desafio e oportunidade.

Padrões legais restritivos para as questões ambientais, bem como a infraestrutura ambiental desenvolvida remeteram o gerenciamento de resíduos da Alemanha a um patamar de referência global. Ainda assim, a transferência de *know-how* não é de todo satisfatória. Especialmente porque as pequenas e médias empresas, as principais operadoras do setor, não são suficientemente representadas internacionalmente.

As análises de mercado demonstram uma demanda no sentido de permitir a transferência de *know-how* a partir dos setores de resíduos e dos recursos naturais. Para tanto, os requisitos básicos para o sucesso sustentável em nível internacional são:

- Existência de conhecimentos específicos do mercado nos países selecionados;
- Disponibilidade de tecnologias e serviços adequados;
- Fornecimento de pessoal qualificado por meio da oferta de capacitações adequadas para o treinamento básico e avançado;

- Acesso a locais que sirvam de referência para demonstrações e apresentações de uma ampla e representativa gama de tecnologias para a gestão adequada de resíduos;
- Acesso às redes e estruturas cooperativas.

O Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos (CReED) é uma instituição não governamental fundada em 2009 na cidade de Pohlsche-Heide no distrito de Minden-Lübbecke (norte da Alemanha).

2 TERMOS DE REFERÊNCIA

O CReED é um centro internacional de pesquisa & desenvolvimento e treinamento tanto básico quanto avançado em matéria de resíduos e de gestão de recursos naturais com foco internacional. Ao mesmo tempo, o centro funciona como um local de demonstração para tecnologias ambientais do setor de gerenciamento de resíduos e de recursos da Alemanha. As principais áreas de atividade são:

- Pesquisa e desenvolvimento, principalmente por meio do uso dos recursos tecnológicos presentes em Pohlsche-Heide e da infraestrutura de gestão de resíduos nas proximidades;
- Treinamento básico, continuado e avançado na área de gestão de resíduos e de recursos e disciplinas adjacentes, como a gestão urbana de água e gestão de energia, bem como agricultura, firmando uma relação intensa entre teoria e prática;
- Apresentação e demonstração em escala de tecnologias para a gestão de resíduos e de recursos naturais.

3 OBJETIVO

O centro tem como objetivo a promoção do intercâmbio internacional de *know-how* e de tecnologias no setor de gerenciamento de resíduos e recursos naturais e, assim, garantir a preservação ambiental e dos recursos naturais a partir das seguintes premissas:

- O desenvolvimento de produtos ecologicamente corretos vão unir estratégias para o fortalecimento da economia com a redução de impactos ambientais;
- A adaptação de processos para fornecimento de produtos e serviços voltados para o mercado internacional e suas implementações devem ser ecologicamente efetivas, economicamente eficientes e socialmente aceitáveis. A preservação do ar, água e solo deve desempenhar um papel importante para a proteção dos recursos;
- A provisão de pessoal qualificado tanto na Alemanha, como dos países parceiros (países em desenvolvimento e economias em transição) é responsável pela criação de condições necessárias para o sucesso da implementação de procedimentos organizacionais e operacionais.

As premissas relatadas irão deflagrar melhoria da infraestrutura para pesquisa e desenvolvimento, bem como para a formação e educação continuada. Assim, por meio de uma melhor ligação em rede, os envolvidos podem contribuir para um uso mais eficiente dos novos conhecimentos existentes e podem servir como iniciadores para a inovação. O estabelecimento de sinergias pode melhorar significativamente as estruturas de pesquisa a partir da integração dos institutos em prol da promoção do desenvolvimento sustentável.

A disponibilidade de tecnologias, serviços adequados e pessoal qualificado é considerada como uma vantagem competitiva crucial para as empresas interessadas em abertura dos mercados internacionais e também para os parceiros de cooperação internacional.

4 ATIVIDADES

O foco das atividades reside no gerenciamento de resíduos e recursos com orientação para a aplicação internacional e *marketing* com ênfase em:

- Desenvolvimento de conceitos adaptados para a gestão dos resíduos;
- Logística e gerenciamento de coleta considerando o setor informal;
- Desenvolvimento de tecnologias apropriadas para as necessidades dos países-alvo, entre outros, processamento mecânico para geração de recicláveis e combustível derivado de resíduos (CDR), fermentação, compostagem, secagem, incineração, reabilitação e remediação de aterros;
- Desenvolvimento de produtos e mercados para matérias-primas secundárias, considerando os mercados locais e regionais;
- Estabelecimento de sistemas de garantia de qualidade, por exemplo, para compostagem, CDR e outros produtos de reciclagem;
- Estabelecimento de capacidades laboratoriais, especialmente para monitoramento da qualidade e desenvolvimento de produtos, observação e controle das emissões, mas também para fins de treinamento;
- Planejamento, construção e operação de plantas de tratamento;
- Licenças e fiscalização das plantas;
- Medidas de proteção do clima na gestão de resíduos;
- Desenvolvimento de conceitos de educação ambiental formal e informal e promoção de ações voltadas para o estabelecimento de relações públicas;
- Desenvolvimento e realização da educação e formação especializada;
- Capacidade construtiva bem como o desenvolvimento de métodos e critérios para a transferência internacional de *know-how*, e apoio na criação de estruturas de governança;

- Suporte para o projeto de leis e regulamentos;
- Ações de informação e visitas técnicas; e,
- Promoção de eventos e congressos técnicos.

Também poderão ser ministradas aulas para disciplinas adjacentes como gestão urbana de águas, energia, bem como agricultura valorizando intensamente a ligação entre teoria e prática.

5 LOCALIZAÇÃO

O CReED se encontra em Pohlsche-Heide no distrito de Minden-Lübbecke. O distrito de Minden-Lübbecke tem disponível uma série de tecnologias para a gestão de resíduos seja na unidade de Pohlsche-Heide seja nas imediações. A região abarca todas as principais tecnologias modernas de gerenciamento de resíduos e recursos – condição esta exclusiva na Alemanha:

- Tratamento aeróbio e anaeróbio de resíduos orgânicos coletados separadamente;
- Planta para processamento de biogás com alimentação na rede de gás local e uso em estações de transformação de calor e energia combinadas e descentralizadas;
- Tecnologia moderna de classificação de diferentes frações de resíduos como os vidros e embalagens leves;
- Planta para processamento de escórias de tratamento mecânico-biológico (TMB) com alta recuperação de metal;
- Tratamento mecânico-biológico de resíduos urbanos (TMB) – aeróbio e anaeróbio;
- Remediação de aterros a partir da valorização de resíduos;
- Planta para o processamento e aproveitamento energético de resíduos;
- Aterro de rejeitos do TMB e aterro de resíduos frescos na fase de pós-encerramento;
- Tratamento de emissões líquidas, entre outros para lixiviados altamente contaminados, incluindo todos os equipamentos de laboratório necessários;
- Planta piloto para tratamento de efluentes através da utilização de algas;
- Área de cultivo de matérias-primas renováveis, por exemplo, bosques de curta rotação.

Devido à integração das universidades envolvidas e instituições de pesquisa, as tecnologias existentes vêm sendo desenvolvidas com o apoio de laboratórios e plantas-piloto. Por exemplo:

- Várias tecnologias de fermentação e de combustão;
- Planta de secagem dos rejeitos e produção de biomassa;
- Planta para o processamento de escórias;
- Reator de compostagem e grandes lisímetros;

- Plantas em batelada para a despolimerização de resíduos plásticos;
- Instalações em grande escala para a determinação de parâmetros mecânicos dos resíduos;
- Mineração de aterros.

O local dispõe de áreas e infraestrutura para a instalação de plantas-piloto em grande escala. Além disso, há espaço suficiente para a instalação de laboratórios especializados, bem como salas de treinamento. Atualmente, extensos projetos de pesquisa e desenvolvimento estão sendo realizados com plantas-piloto associadas e equipamentos de pesquisas, entre outros para remediação de aterros, tratamento de águas residuais e ar de exaustão pelo uso de algas, medições e análises de processo de emissões de óxido nitroso de aterros de TMB, otimização do processo de fermentação dos resíduos orgânicos etc.

6 MEMBROS E PARCEIROS

O princípio do CReED é a concentração de membros que detêm competências diversas tais como nas áreas de economia e ciência, bem como empresas de direito público, através de redes de cooperação com outras associações profissionais especializadas em valorização de resíduos.

Atualmente, o instituto conta com uma rede de mais de setenta membros de diversas áreas do ramo:

- Fornecedores de tecnologias, processos e componentes de gestão de resíduos;
- Operadores de instalações de processamento de resíduos;
- Agentes do direito público;
- Universidades e outras instituições de pesquisa;
- Empresas e instituições de ensino e formação;
- Associações de classe;
- Empresas de engenharia.

A diretoria estatutária é composta por membros das seguintes áreas:

- P&D e treinamentos;
- Empresas públicas e privadas;
- Sindicatos e associações.

7 PORTFÓLIO DE INTERVENÇÃO

Em nível global, a demanda segue concentrada na busca por infraestrutura, tecnologia e sistemas eficazes de gestão, incluindo tanto os aspectos técnico-operacionais, quanto a

consolidação de tecnologias adequadas para a implementação e monitoramento das futuras centrais de tratamento.

Desta forma, o CReED tem atuado no desenvolvimento de atividades que atendam as demandas comentadas, mitigando erros e garantindo a eficiência e eficácia dos novos processos de gestão de resíduos.

7.1 Pesquisas aplicadas e projetos de desenvolvimento

As atividades de pesquisa concentram-se na aplicação de tecnologias em larga escala tanto a nível de planejamento quanto a nível operacional, gerando bando de dados com alta representatividade. Esta representatividade de resultados não seria possível em escala laboratorial ou em escala piloto realizadas normalmente em centros de pesquisa ou em empresas.

Há projetos de P&D contratados com um volume total de nove milhões de euros entre os anos de 2010 e 2013. Sem um *networking* próximo e conexões pessoais bem desenvolvidas, esses projetos não poderiam ser realizados.

Exemplos:

- Escavação de aterros (*Mineração*);
- Tratamento de águas residuais e de exaustão de ar através da utilização de algas;
- Análises e medições de processos de emissões de óxido nitroso em aterros de TMB;
- Otimização do processo de fermentação;
- Desenvolvimento de conceito de valorização de resíduos em navios para as ilhas e centros urbanos costeiros;
- Desenvolvimento de métodos físico-químicos de despolimerização de frações plásticas.

7.2 Apoio na Contratação de Tecnologias

Através da coordenação brasileira do CReED, uma empresa brasileira contratou duas plantas de tratamento mecânico e biológico de fornecedores alemães. Neste caso, foi essencial a participação do CReED na organização de várias visitas técnicas às plantas de fermentação e compostagem na Alemanha que contou com a participação de representantes de empresas brasileiras, agências ambientais e órgãos de financiamento.

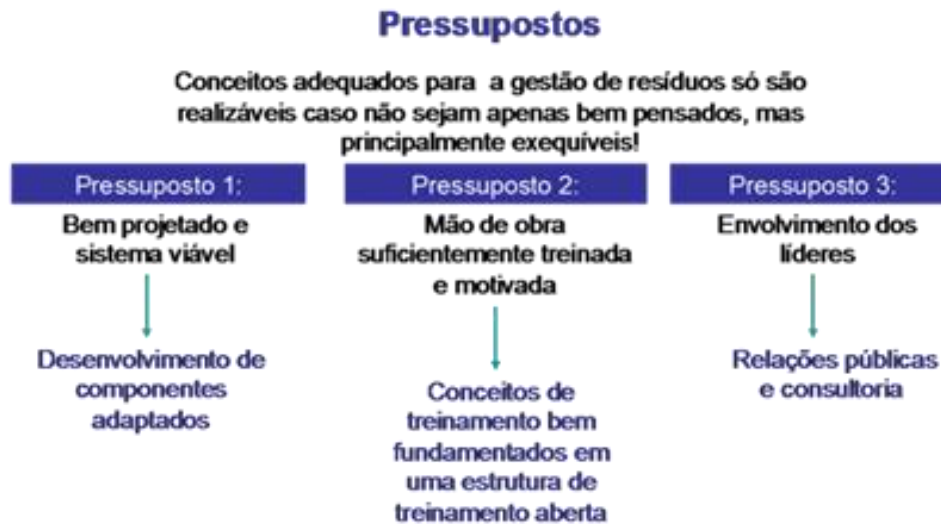
7.3 Assessoramento

O CReED tem assessorado diversas instituições internacionais, por exemplo, na Rússia, Filipinas, México, Malta etc. No Cazaquistão, na região de Karaganda, o CReED assessorou o

Ministério de Ambiente durante o desenvolvimento um conceito de gestão sustentável dos resíduos, que servirá como um modelo para este país.

É importante considerar três pressupostos essenciais, de modo a tornar eficiente a gestão de resíduos.

Figura 1 – Componentes das boas práticas em Gestão de Resíduos



Fonte: Fricke *et al.* (2014).

Além da infraestrutura técnica, o processo de qualificação deve dar ênfase também aos aspectos de relações públicas.

7.4 Formação profissional e ações de qualificação

Não há gerenciamento de resíduos adequado sem pessoal devidamente treinado. O CReED, portanto, concentra-se na formação de pessoal qualificado para a gestão sustentável dos resíduos ambientalmente equilibrada.

O sistema alemão de formação profissional inclui uma estreita cooperação entre as empresas e escolas de formação profissionais. Os locais de instrução escolar (teoria) e da empresa (prática) estão intimamente ligados, para que os conhecimentos teóricos adquiridos na escola possam ser transferidos para a prática no local de trabalho e inovações práticas possam ser integradas em instruções teóricas.

Com base neste sistema integrado de formação profissional, o “sistema dual”, os cursos de qualificação oferecem uma composição bem alinhada de instrução teórica e realização prática durante o dia a dia operacional do negócio. Com todas as tecnologias de tratamento aplicáveis *in loco* e disponíveis para treinamento, a planta de Pohlsche-Heide e as plantas presentes em suas imediações, fornecem ferramentas que embasarão atividades de formação ampla, tanto na prática quanto na teoria.

Especialmente para os países em desenvolvimento e com economia em transição, onde a gestão sustentável dos resíduos ainda não está amadurecida, é necessário que a programação de formação avançada seja ajustada às demandas locais.

Métodos de conteúdo e didáticos do programa de qualificação são construídos sob as experiências do “sistema dual”, na Alemanha. Medidas de qualificação estão sendo projetadas como conceitos “*Training on-the-job*”. Esta concepção didática aumenta a relevância prática, a fim de permitir a maior aplicação possível dos conhecimentos adquiridos no local de trabalho. Seguindo o modelo 4C/ID (Modelo Instrucional de Quatro Componentes), o foco encontra-se na instrução do conhecimento prático, a fim de promover a aquisição de tarefas cognitivas complexas em vez de habilidades isoladas.

Todo o conjunto de cursos tem um *design* modular e está estruturado por temas que cobrem a gama completa de ferramentas para a gestão de resíduos, por exemplo, coleta de resíduos, processamento e tratamento de resíduos, construção de aterros sanitários, monitoramento, organização e financiamento. Os conteúdos de ensino são desenvolvidos para pronto atendimento das demandas locais. O programa de treinamento é customizado para os grupos-alvo e os temas serão tratados de acordo com as necessidades destes grupos. A primeira classificação horizontal dos grupos-alvo permite estabelecer a distinção mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Cascata de Treinamento Funcional em Gerenciamento de Resíduos



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

7.4.1 Especialistas e pessoal de operação

Perfil de tarefas e foco do trabalho: compostagem, secagem, fermentação, especialista em reciclagem e CDR, operação de máquinas e equipamentos, coleta e transporte, análises.

Na área técnica executiva, o conteúdo sempre se relaciona com o contexto experiencial nos países-alvo. A aprendizagem experiencial desempenha um papel essencial dentro do conceito “*training on-the-job*”. Os conceitos de instrução são baseados no princípio de aprender fazendo, voltado principalmente para o manuseio seguro e competência técnica. Os currículos se concentrarão principalmente na experiência baseada na aquisição do conhecimento e da vontade para um desempenho adequado, completo e responsável.

7.4.2 Operadores e planejadores de plantas

Perfil de tarefas e foco do trabalho: organização de frotas e sistemas de coleta de resíduos, registro dos resíduos, operação de plantas de compostagem e de fermentação, CDR, TMB, plantas de incineração e aterros para rejeitos, plantas para o processamento e classificação, desenvolvimento de produtos, garantia da qualidade e comercialização de matérias-primas secundárias manufaturáveis.

As pessoas a serem treinadas serão instruídas no planejamento e operação de plantas. Elas recebem o conhecimento geral sobre os componentes das plantas, estruturas de custos e parâmetros operacionais. Os cursos de formação avançada são voltados para pessoas já pré-qualificadas (engenheiros, construtores de máquinas etc.) cujas competências específicas na gestão de resíduos e gestão do fluxo de resíduos devem ser estendidas.

7.4.3 Multiplicadores, administradores, agentes públicos e consultores

Perfil de tarefas e foco do trabalho: similar ao proposto para os operadores e planejadores de plantas, incluindo leis sobre meio ambiente e resíduos, aconselhamento de proprietários privados e comerciais de resíduos, competências para a formação e o monitoramento, *marketing*, publicidade, relações públicas.

Este grupo receberá um conhecimento amplo sobre os conceitos complexos de gestão de resíduos. Questões econômicas serão abrangidas, bem como os aspectos legais e de licenciamento, garantias de performance e conhecimentos em tecnologias de construção e operação. Além disso, serão desenvolvidas competências metodológicas pertinentes para consultorias internas e externas, o trabalho de grupos e relações públicas.

7.4.4 Políticos e empresários

Perfil de tarefas e foco do trabalho: as decisões fundamentais sistemáticas serão feitas ao nível da política municipal e regional, geralmente com o envolvimento de políticos responsáveis e representantes das partes interessadas. Ambas as partes envolvidas precisam de informações fundamentadas para a tomada de decisões. Isso requer profundo conhecimento dos aspectos

relevantes para os procedimentos de aprovação, bem como uma ampla gama de conhecimento geral de noções básicas de gestão de resíduos.

O setor de gestão de resíduos pode se transformar em um motor gerador de trabalho. Nos países subdesenvolvidos e emergentes o setor informal, especialmente na área de coleta e triagem, desempenha um papel importante. Geralmente mal treinados e apenas rudimentarmente preparados para as suas tarefas, a este grupo de pessoas deve ser oferecido o emprego com um *status* socialmente seguro no formato de empregos verdes. É um desafio político conduzir a integração social do setor informal como objetivo de sustentabilidade social.

7.4.5 Treinar o treinador

A longo prazo é necessário garantir a oferta local de pessoal qualificado, sendo esta apenas possível através da promoção de multiplicadores, ou seja, através da capacitação de instrutores.

Os cursos para formação de instrutores cada vez mais têm como foco as técnicas de operação em instruções didático-pedagógicas, tais como:

- Compilação de unidades de formação modulares com uma elevada percentagem de formação prática – “*Training on-the-job*”;
- Desenvolvimento de unidades de aprendizagem para todas as áreas relevantes da gestão moderna de resíduos;
- Inclusão de professores de pesquisa e prática;
- Consideração das particularidades e necessidades específicas de cada país, bem como tecnologias e conceitos adaptados;
- Implementação de cursos de formação de instrutor;
- Desenvolvimento de uma plataforma eletrônica de apoio preparatório e avançado via *e-learning* e semipresencial.

A estrutura modular dos cursos de qualificação permite eventos abrangentes para os grupos de aprendizagem, que geralmente são bilíngues. A organização, a estrutura didática-pedagógica e os objetivos geralmente incluem exigências práticas locais. Para este efeito, uma plataforma *e-learning* modularizada será desenvolvida, desta forma os participantes poderão ter acesso ao banco de dados, inclusive após a conclusão do curso.

Para todos os grupos-alvo, o material didático precisa ser adaptado. Dentro da rede de relacionamentos, vários especialistas de ciência, tecnologia, economia e administração estão disponíveis como professores e treinadores, onde esta estrutura poderá ser apoiada por unidades de *e-learning*, CBTs, videoconferências e seminários na *web*. Além disso, o sistema recentemente desenvolvido para a avaliação de competências informais *LEVEL5* pode ser usado.

A ferramenta, que foi desenvolvida, o BUPNET, dentro de uma cooperação transnacional europeia, permite registrar o incremento de competências nos contextos de aprendizagem informais.

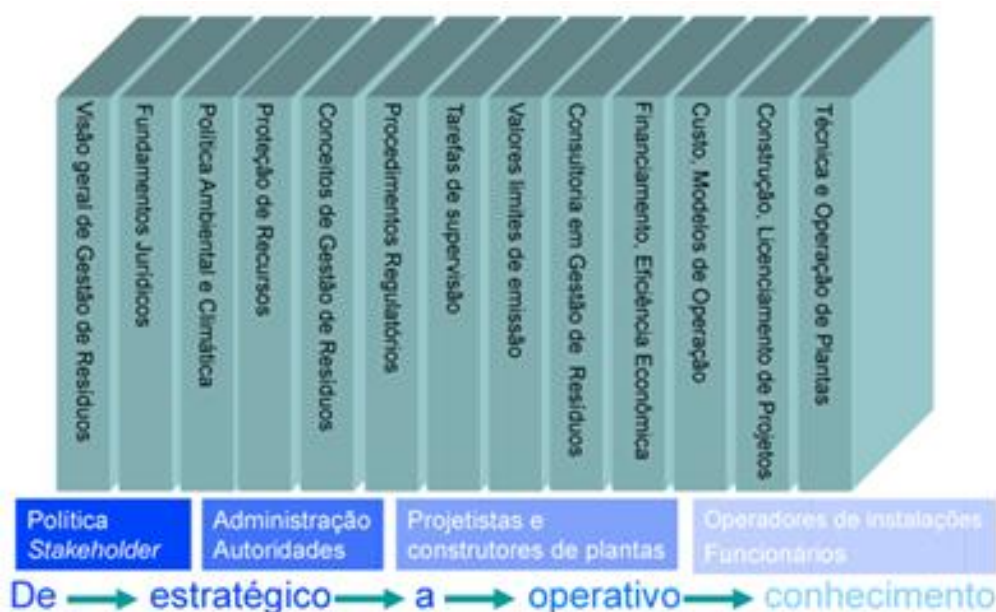
Nos últimos três anos, 23 grupos de 16 países participaram de medidas de qualificação específicas.

Figura 3 – Formas de Organização e Grupos-alvo



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Figura 4 – O *bookshelf*: inventário de conhecimento e seus usuários



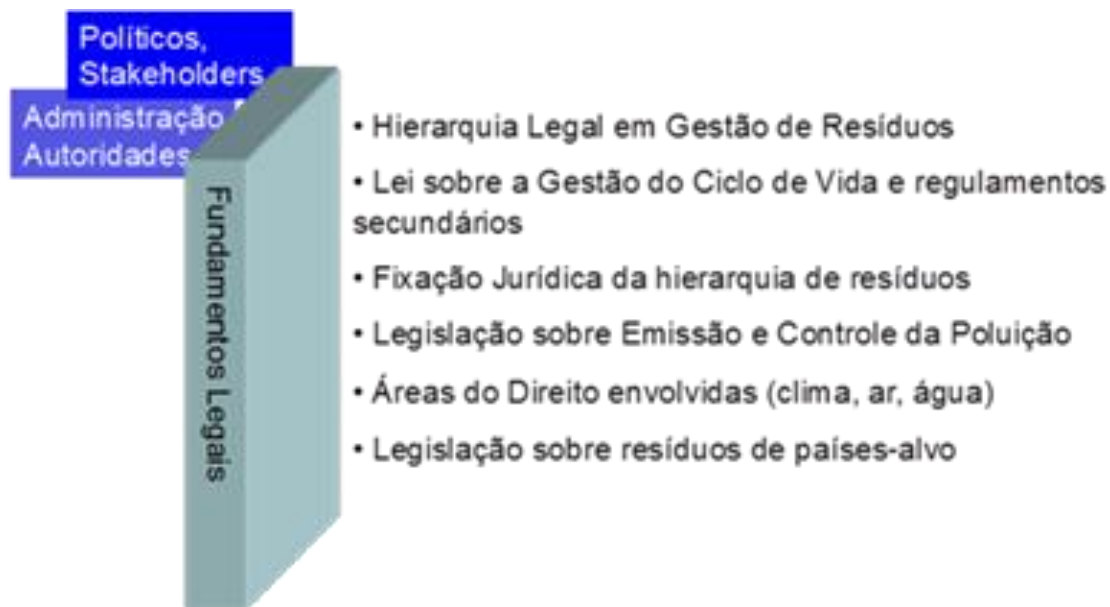
Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Figura 5 – Inventário do conhecimento: Unidade de Instrução, por exemplo, visão global



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Figura 6 – Unidade Instrucional Fundamentos Legais



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

8 ÁREAS DE DEMONSTRAÇÕES TECNOLÓGICAS

Nas instalações do centro de gestão de resíduos Pohlsche-Heide, bem como em vários outros locais na proximidade há plantas instaladas de gestão de resíduos, assim as visitas técnicas guiadas podem ser realizadas durante as operações em tempo real, aproximando o técnico do cotidiano das operações.

Neste local, fabricantes alemães e fornecedores do setor de gestão de resíduos têm a oportunidade de apresentar os seus equipamentos, processos e conceitos. A localização, os espaços verdes e salas podem ser usados individualmente para projetos de apresentação em operação em tempo real simulado, desta forma a mais moderna tecnologia pode ser observada durante a operação diária.

9 DISSEMINAÇÃO DE CONHECIMENTO

Independentemente das intervenções de capacitação formal abordadas anteriormente, abrangendo um público restrito, entendemos que devemos também concentrar nossos esforços em duas outras frentes:

- promoção de visitas técnicas para formação de massa crítica a partir da convivência durante a operação de plantas em larga escala para que se possa vivenciar a transformação dos resíduos; e,
- promoção de eventos públicos de grande magnitude como congressos, seminários e *workshops*, com abordagens multidisciplinar e transversal para disseminar e democratizar as informações, facilitando o acesso à informação e motivando as discussões entre os técnicos do setor e a sociedade, fazendo com que cada cidadão se torne um agente multiplicador.

9.1 Visitas Técnicas de Delegações

Nos últimos três anos, visitas de delegações e visitas guiadas têm aumentado maciçamente em Pohlsche-Heide, bem como no resto da Alemanha, isto tornou o CReED notório dentro do cenário mundial.

Durante este período, mais de 106 grupos de 22 países participaram de visitas guiadas e eventos de informação.

9.2 Conferências e Congressos

Entendemos ser de suma importância a promoção de conhecimento, através de conferências e congressos técnicos, que pode ser ofertado tanto na Alemanha quanto em outros países. Por exemplo, o CReED, juntamente com a Universidade Técnica de Braunschweig, organizou dois congressos técnicos internacionais no Brasil, em nome do Ministério Federal da Educação e Ciência (BMBF). O tema principal era a fermentação como um componente de uma

gestão sustentável dos resíduos para os municípios brasileiros. O primeiro congresso foi realizado em dezembro de 2013, em Jundiaí (SP), com 400 participantes; o segundo teve lugar em Florianópolis (SC), em maio de 2014, com 300 participantes; e o terceiro congresso, em junho de 2015, em Jundiaí (SP), teve mais de 600 inscritos.

Novos marcos legais no Brasil tem fomentado a implementação de sistemas de gestão de resíduos sustentáveis. No entanto, a falta de *know-how* abrange quase todos os envolvidos. Experiências captadas nos últimos anos refletem uma série de obstáculos que o Brasil precisará transpor, estes vivenciados na Alemanha a mais de uma década e que foram superados com a promoção da recuperação energética e da reciclagem de materiais.

Nas conferências onde participam diversos setores da sociedade, sejam pesquisadores e empresários sejam gestores públicos, são transferidos conhecimentos funcionais para o estabelecimento de sistemas de gestão de resíduos sustentável, integrando também a fermentação, a secagem e outros modelos de valorização de resíduos. Os eventos técnicos também servem para construir cooperações bilaterais de conhecimento para a implementação bem sucedida de projetos. Isto também inclui o desenvolvimento e a adaptação de tecnologias para as condições brasileiras.

Figura 7 – 1º Congresso Técnico Brasil-Alemanha em Jundiaí-SP, Brasil, 2013



Fonte: Foto, Wiese (2013).

10 CONCLUSÕES

Na responsabilidade pela perda da qualidade ambiental nas cidades evidencia-se como expoente maior de culpabilidade a falta de saneamento básico, tema necessariamente vinculado a políticas públicas e continuamente posto a margem dos programas governamentais. Inserido neste

contexto, o resíduo urbano apresenta-se como forte agente de degradação de recursos naturais, com atuação paralela não menos significativa sobre a saúde pública, a paisagem urbana e o clima.

A gestão de resíduos modificou-se brutalmente nos últimos anos, tornando-se o ícone do desenvolvimento sustentável, contribuindo sobremaneira para a proteção ambiental e ainda, através da reciclagem dos resíduos garante também a proteção do clima e a preservação dos recursos naturais.

Respalhando esse entendimento temos o CReED como protagonista no fomento do conhecimento e treinamento tanto básico quanto avançado em matéria de resíduos e de gestão de recursos naturais com foco internacional.

Através de uma cooperação técnica, em 2015, foi inaugurada a unidade latino-americana, com sede no Brasil. Denominado como CReED do Brasil, o Centro irá promover intervenções multidisciplinares para a customização conceitual e operacional para o tratamento e a valorização de resíduos. O CReED do Brasil desenvolverá suas atividades em uma Estação Tecnológica que contará com a demonstração de tecnologias em escala piloto e com o primeiro laboratório especializado em resíduos sólidos urbanos da América Latina. Além disso, estará preparado para receber perfis multidisciplinares como gestores, operadores, pesquisadores, estudantes, técnicos, sociedade civil organizada para atividades de imersão customizadas, modulares e multifinalitárias.

O perfil multidisciplinar dos associados do CReED permite promover transferência internacional de *know how* e tecnologias para a gestão de resíduos sólidos urbanos, desenvolvendo e adaptando conceitos, promovendo a competitividade e formando massa crítica a partir dos cursos de capacitação teórica e prática, bem como das linhas de pesquisas a serem desenvolvidas para fins de adequação tecnológica às nossas demandas técnicas como gravimétricas e climáticas, bem como nossas demandas econômicas e gerenciais.

O foco principal de atuação está na transferência e adaptação de tecnologias de ponta e respectivos procedimentos para sua implementação, operação e controle para garantir uma gestão de resíduos eficiente e eficaz. Neste viés para fins de desenvolvimento e nacionalização de tecnologias, acredita-se que a promoção do conhecimento técnico é fator mais importante de atuação auxiliando o segmento de Saneamento Ambiental a alcançar novos patamares de competitividade no mercado, face a grande demanda de projetos verificada recentemente e promovendo o desenvolvimento sustentável.

A preservação do meio ambiente e dos recursos naturais são os maiores desafios globais dos nossos tempos, corroborando para o entendimento de que o meio ambiente e o desenvolvimento econômico não precisam caminhar separadamente, na verdade são complementares.

REFERÊNCIAS

FRICKE, Klaus; SCHULTE, Burkart; HOFFMANN, Lutz; KRÜGER, Michael; PEREIRA, Christiane. Centre for Research, Education and Demonstration in Waste Management (CReED). **Müll und Abfall 4**, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin (GER), 2014. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.04.2014.198>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

PEREIRA, Christiane Dias. **Rota tecnológica para a gestão sustentável de resíduos sólidos domiciliares**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Curso de Pós-Graduação em Direito Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

FRICKE, Klaus; SCHULTE, Burkart; HOFFMANN, Lutz; PEREIRA, Christiane. CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maior – 2017**.

Formação Profissional e Continuada: instrumento fundamental para uma gestão sustentável dos resíduos

*Continuously Capacity Building:
a fundamental instrument for a sustainable waste management*

Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann

RESUMO

A gestão dos resíduos sólidos no Brasil enfrenta um grande desafio para atendimento das premissas avançadas propostas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Há de se buscar a formação de política pública que garanta a dissociação entre o desenvolvimento econômico e a geração de RSU, através da promoção do emprego dos recursos secundários como fonte de matéria-prima, também com a promoção de um consumo sustentável onde prevaleça um sistema de embalagens inteligente, o comprometimento dos fabricantes e fornecedores através do cumprimento da logística reversa, entre outras ferramentas que promovam uma gestão diferenciada e mais adequada dos RSU. Vivenciar a aplicação de novas tecnologias, principalmente em larga escala, demanda uma capacidade técnica avançada que pode ser desenvolvida através de cursos de capacitação que abordem conhecimentos na ordem do planejamento, execução, operação, monitoramento, otimização das tecnologias e aplicabilidade e escoamento dos subprodutos, permitindo formar um senso crítico e sensibilizar os agentes, seja público, seja privado, quanto às fragilidades e entraves relacionados com a aplicação das tecnologias.

Palavras-chave: Gestão. Resíduos. Formação profissional. Reciclagem. Política pública.

ABSTRACT

The solid waste management in Brazil faces a great challenge to assumptions proposals by Solid Waste National Policy. There is a need to search for the formation of public policy that ensures the decoupling between economic development and the generation of MSW, through the promotion of employment of secondary resources as a source of raw material, also with the promotion of a sustainable consumption where prevail a system of intelligent packaging, the involvement of manufacturers and suppliers through the fulfilment of reverse logistics, among other tools to promote a differentiated management and more suitable for MSW. Experience the application of new technologies, especially on a large scale, demand an advanced technique capacity that can be developed through training courses that address knowledge in order for planning, implementation, operation, monitoring, optimization of technologies and applicability and commercialization os secondary resources, to form a critical sense and raise awareness among the

agents, either public or private, based on the weaknesses and barriers related to the implementation of these technologies.

Keywords: Management. Residues. Capacity building. Recycling. Public policy.

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos no Brasil enfrenta um grande desafio para atendimento das premissas avançadas propostas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta afirmação surge a partir dos seguintes pressupostos:

- Entre 2002 e 2012, a produção dos resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou em 21%, com um crescimento populacional de 9,75%. Em outras palavras: Uma população em forte estágio de crescimento está produzindo um montante de resíduos em desproporcional incremento.
- Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2002 apenas 40% dos RSU foram eliminados adequadamente, 60% dos resíduos foram depositados em lixões (ilegais). Desde o ano 2012, essa relação se inverteu, porém 40% dos resíduos ainda são depositados de forma inadequada.
- De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os municípios são obrigados a destinar todos os seus resíduos para aterros com base impermeabilizada (aterro sanitário), ou, eliminar os resíduos no âmbito de programas de separação dos RSU. No ano 2012, apenas 58% dos 56,6 milhões de toneladas de resíduos coletados foram dispostos devidamente, e pouco menos de 60% dos municípios tiveram lançada uma iniciativa para a separação dos RSU. As taxas de reciclagem de vidro, papel, alumínio e plástico, com valores entre 21,7% (plásticos) e 47,0% (vidro) são baixos na comparação internacional. A separação dos recicláveis é realizada principalmente por intermédio do setor informal.
- A gestão de resíduos é afetada pela crescente urbanização e pela disparidade econômica e cultural encontrada entre as regiões geográficas.
- A consciência ambiental ainda pouco desenvolvida contribui para retardar novos avanços na gestão de resíduos.

Figura 1 – A gestão de resíduos e seus fatores de influência

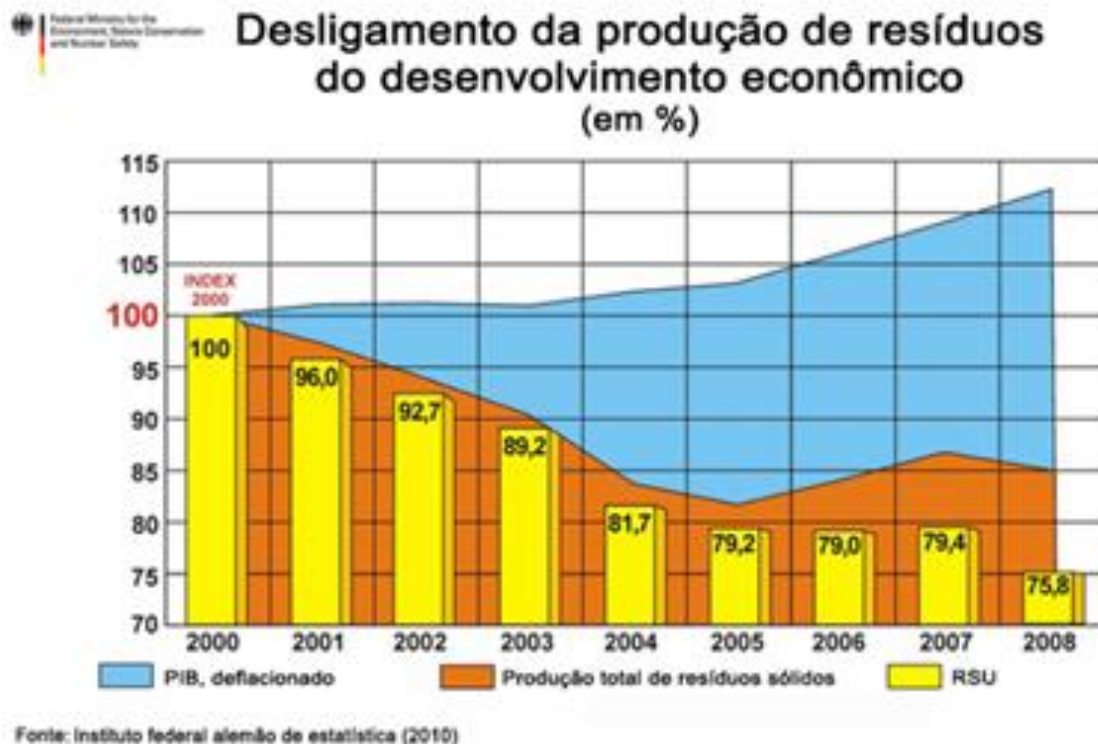


Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Brasil Econômico (08.01.2014, 27.01.2014).

Há de se buscar a formação de política pública que garanta a dissociação entre o desenvolvimento econômico e a geração de RSU, através da promoção do emprego dos recursos secundários como fonte de matéria-prima, também com a promoção de um consumo sustentável onde prevaleça um sistema de embalagens inteligente, o comprometimento dos fabricantes e fornecedores através do cumprimento da logística reversa, entre outras ferramentas que promovam uma gestão diferenciada e mais adequada dos RSU.

A Alemanha se empenhou avidamente para mudar o cenário da gestão tradicional dos resíduos, por reconhecer as implicações do caráter finito dos recursos naturais e analisar os impactos ambientais e as suas implicações quando do mero aterramento das frações *in natura*.

Figura 2 – Desligamento da produção de resíduos do desenvolvimento econômico (em %)



Fonte: Instituto Federal Alemão de Estatística (2010).

Para enfrentar os desafios relacionados com as reformas legais, esforços expressivos da administração pública em nível local e regional são necessários.

A PNRS determina, entre outras medidas, que:

- Os municípios estabeleçam planos de gestão dos RSU (até agora apenas realizado em escala limitada, onde segundo o Ministério de Meio Ambiente, em 2013, apenas 30% dos municípios haviam elaborado seus planos);
- O desenvolvimento de sistemas de coleta seletiva e de tratamento dos RSU seja promovido;
- Medidas para a conscientização ambiental da população sejam iniciadas;
- E, que sejam desenvolvidos sistemas de qualificação para todos os atores participantes no processo.

Figura 3 – Novas práticas de destinação de resíduos



Fonte: 2º Congresso Brasil Alemanha, Florianópolis – 2014.

Neste processo, os municípios têm a tarefa de:

- Aumentar consideravelmente a construção e operação de instalações para o tratamento de RSU;
- Adaptar a logística da coleta e do tratamento dos RSU às condições em transformação;
- Instalar e otimizar sistemas da coleta seletiva e de separação dos RSU;
- Adaptar as estruturas municipais a essas tarefas alteradas;
- Disponibilizar funcionários de formação adequada capacitados para a operação dos sistemas técnicos nas instalações de tratamento dos RSU;
- Incluir os catadores nos planos da gestão dos RSU;
- Despertar o apoio da população para participação ativa no sistema de gestão local dos RSU.

Somente a instalação de sistemas para o tratamento adequado dos RSU é uma tarefa enorme, como mostra o mapa na Figura 4. Além disso, também os funcionários devem estar

preparados devidamente para essas tarefas, ou seja, não basta implementar, é necessário garantir acima de tudo a continuidade do processo.

Figura 4 – Distribuição geográfica da coleta seletiva



Fonte: Cempre (2014).

2 FORMAÇÃO PROFISSIONAL CONTINUADA

Por experiência própria, nem sempre boa, na construção de conceitos de gestão de RSU ambientalmente adequados, e desta forma preservando os recursos, sabemos que muitas vezes o foco do projeto está demasiadamente ancorado – e no início da fase de planejamento, quase exclusivamente –, nos aspectos tecnológicos das plantas de tratamento. A qualificação da equipe interna e a implementação do conceito do tratamento dos RSU no dia a dia da comunidade são tratados apenas no segundo plano. Porém, sem cidadãos motivados e funcionários adequadamente qualificados não há como obter os resultados almejados – nem na quantidade nem na qualidade.

Um exemplo da importância de uma tomada de decisão fundada no processo da gestão sustentável de RSU pode ser identificado na definição do conceito de coleta e transporte:

Figura 5 – Gestão adequada da coleta e transporte

**Exemplo
Coleta e Transporte**

O sistema a ser implantado depende do tomador de decisão.

Ele precisa saber sobre

- sistemas de coleta seletiva
- os mercados de matérias-primas reciclados
- planejamento de rotas
- os custos de coleta e transporte
- os custos de separação e tratamento
- as demandas e custos de funcionários
- critérios de qualidade de matérias-primas secundárias
- todas as inferências da organização

Ele é o responsável para o sucesso ou a falha





BUPNET Bildung und Projekt Netzwerk GmbH info@bupnet.de Florianópolis 28.05.2014



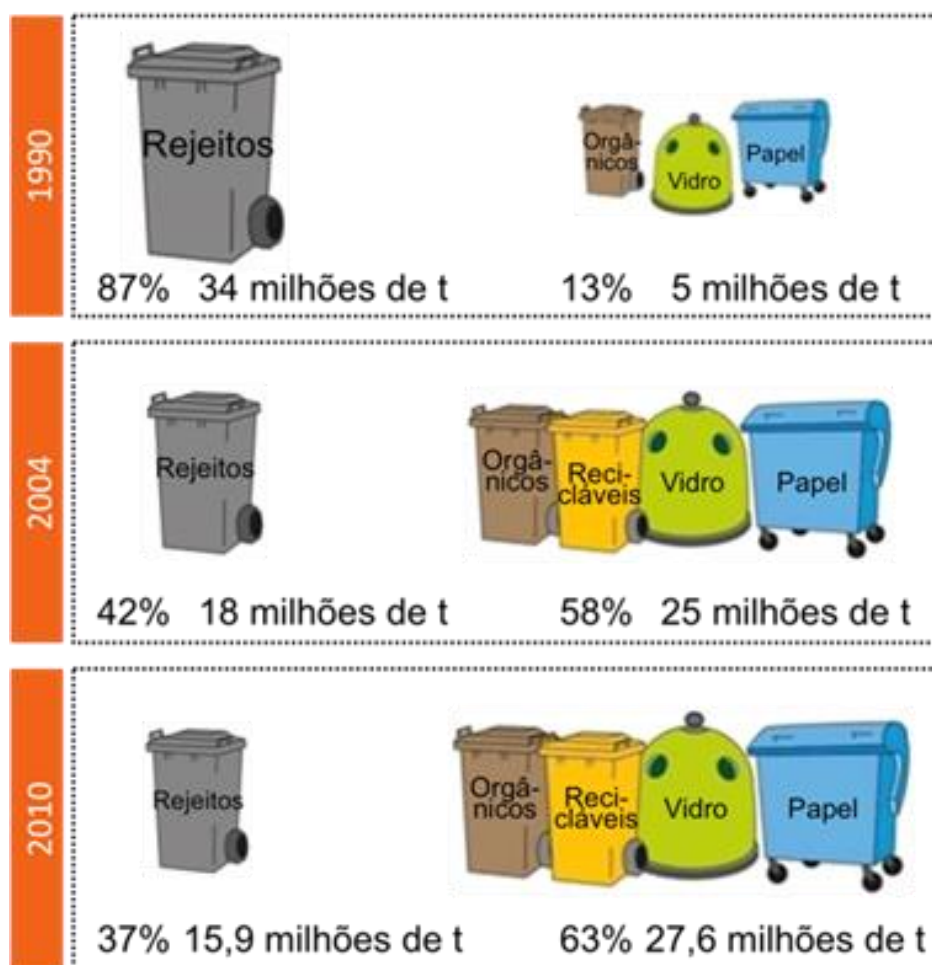
Fonte: 2º Congresso Brasil Alemanha, Florianópolis – 2014.

A coleta dos resíduos tem entrado como aspecto central na consciência cotidiana da população. O cidadão está confrontado diariamente com o sistema da coleta, colocando o lixo na rua ou ao caminho para o trabalho – em contraste ao tratamento dos resíduos a jusante.

A coleta dos resíduos representa o primeiro elo entre o gerador e o poder público, podendo ser uma ferramenta importante para a promoção da conscientização da comunidade, até porque o cidadão é confrontado diariamente com o sistema da coleta, dispondo seus resíduos nas ruas ou utilizando os pontos de entrega voluntária. Este cenário não se reitera quando pensamos na gestão pós-coleta onde o munícipe acaba não tendo acesso à informação sobre a gestão complementar ou não se interessa em buscar informações, entendendo que sua responsabilidade se esgotou quando sua sacola foi para a rua.

Escrevem Thürmer e Resch (2008) no seu artigo “Coleta de lixo em grandes cidades – desafio especial para empresas municipais de gestão de resíduos”: “A coleta e o tratamento de resíduos de todos os tipos estão entre os fatores considerados os mais importantes para a qualidade de vida e o grau de satisfação em uma cidade”.

Figura 6 – Balanço de reciclagem – Mais recicláveis do que rejeitos em 2010



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Instituto Federal Alemão de Estatística (2012).

A competência do tomador de decisão, portanto, é de imensa importância para todo o processo, para as opções de tratamento a jusante bem como, para o próprio tomador de decisão, pois ELE é o responsável para o sucesso ou fracasso do projeto como um todo. Portanto ELE deve possuir as respectivas competências para ponderação e decisão sobre os melhores componentes de sistemas. Só a consideração dos fatos aqui colocados pode resultar em uma decisão competente, transparente, inteligível e fundada.

A gestão de resíduos alemã é bem sucedida devido a esforços constantes de tentar conquistar a aprovação do consumidor. Em 2004, as taxas de reciclagem de todos os resíduos coletados superou pela primeira vez a quantidade dos rejeitos gerados.

Com isto, na Alemanha, os objetivos de uma gestão sustentável de resíduos e da coleta seletiva bem sucedida podem ser considerados como incorporados pela população. O caminho foi árduo mas em consequência serviu também para a promoção de novo ramo econômico, este bastante lucrativo e com alto potencial de criação de postos de trabalho – a economia circular ou de ciclo fechado.

3 GESTÃO DA QUALIFICAÇÃO

A Alemanha dispõe de um sistema educacional bastante estável. A formação não acadêmica ocorre em conjunto com as empresas e as escolas profissionalizantes. Este sistema dual representa a formação profissional clássica do profissional. O aprendiz adquire as bases teóricas da sua futura atuação na escola profissionalizante. Na empresa, ele aplica os conhecimentos adquiridos na prática. Essa forma de ensino profissionalizante geralmente leva de dois a três anos de duração, podendo ser completada através de diversas formas de formação continuada.

Quando arriscamos, nos anos 1980, o caminho partindo do movimento ambiental para a profissionalização e uma gestão ambiental sustentável, enfrentamos o problema da não existência de grade curricular voltada para o atendimento das novas demandas em decorrência das profissões nas áreas de meio ambiente e de resíduos. Mesmo no contexto acadêmico, a tecnologia e a gestão de resíduos estavam subordinadas aos departamentos de saneamento básico. Por consequência, vários novos campos de atuação profissional surgiram, possibilitando uma carreira profissional e perspectivas de renda na área da gestão de resíduos.

Entretanto, a gestão ambiental, de energia e de resíduos se desenvolveu como força motriz de empregos na Alemanha. Por exemplo, a área de energias renováveis hoje emprega mais pessoas que a indústria automotiva.

Procura-se, sobretudo, profissionais das áreas proteção do clima e energias renováveis bem como, da proteção ambiental técnica, inclusive das áreas resíduos, áreas contaminadas, água, esgoto, energia, proteção à imissões e ruídos. Cada vez mais empregos são oferecidos para profissionais da gestão ambiental, direito e política ambiental. (Berufe in Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz, Hrsg.: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, S. 11)

Precisava-se de currículos e cursos profissionalizantes para todas essas áreas de atuação, e em todos os níveis profissionais. Precisamos de pessoal para a gestão adequada de plantas, a construção e a operação, mas também para sua inserção administrativa e conceitual.

Não se pode imaginar a gestão de resíduos adequada e de alta qualidade, sem profissionais qualificados nas áreas de coleta, separação, operação, controle de processos (por exemplo, na compostagem) e na administração.

Decorrente disso, os seguintes perfis profissionais foram desenvolvidos:

- O profissional atuando na reciclagem precisa de conhecimentos e competências específicos diante do amplo campo de atuação nessa área, podendo ser adquiridos geralmente em cursos de curta duração e por treinamento no trabalho;

- Os assistentes técnicos químicos e profissionais de laboratório recebem orientações relevantes à condução adequada das respectivas análises;
- Construtoras, gerentes e operários das instalações devem possuir conhecimentos fundamentais sobre as respectivas tecnologias e especificações;
- A comercialização de matérias-primas recicladas deve ser efetuada por pessoal qualificado consciente da qualidade e dos valores dos bens, bem como, das vias de comercialização;
- A imagem da proteção do ambiente e da gestão de resíduos precisa ser valorizada pela sociedade. Para tanto se precisa de profissionais atuando em assessorias de comunicação, para apresentar adequadamente os objetivos da política ambiental e de economia em campanhas de propaganda;
- A administração pública, os órgãos competentes de licenciamento e de controle deve dispor de conhecimentos específicos sobre instalações de tratamento e conceitos complexos de gestão de resíduos, para que o sistema de coleta e tratamento adequado possa ser instalado.

Como consequência, surgem vários pontos de partida para a profissionalização dos campos de atuação na área da gestão de resíduos que continua se diversificando constantemente.

4 UNIVERSALIZAÇÃO DA QUALIFICAÇÃO

Na Alemanha, o grau de adesão dos geradores de resíduos a sistemas de coleta seletiva é de quase 100%. A introdução da coleta seletiva foi motivada pela intenção de reduzir os impactos ambientais por meio do aumento das taxas de reciclagem, bem como, atingir um maior grau de pureza das matérias-primas recicladas. Entre os efeitos secundários temos: melhor comercialização, resíduos como fonte de matérias-primas, a longo prazo as receitas extraordinárias ajudam a amortizar os elevados investimentos nas plantas.

Para se atingir estes ambiciosos objetivos foi investido fortemente no desenvolvimento técnico. Porém, inicialmente a qualificação da equipe interna foi negligenciada de forma imperdoável, resultando em produtos reciclados altamente contaminados e conseqüentemente, de difícil comercialização nos mercados.

Estes problemas muitas vezes não foram decorrentes de comprometimento da tecnologia de tratamento, mas sim do comportamento inadequado dos funcionários ou dos cidadãos que não conseguiram se identificar com a coleta seletiva dos resíduos sólidos. Até porque, a boa prática na gestão dos resíduos sólidos baseia-se em três elementos: tecnologia, funcionários e participação dos cidadãos; deixando bem claro que a boa intenção não resulta necessariamente em algo bem feito.

Estas experiências dolorosas oriundas da negligência nos fatores de qualificação dos funcionários e na informação do público resultaram em vários novos campos de atuação e profissões que embasam a gestão de resíduos.

5 GESTÃO AMBIENTAL E DE RESÍDUOS COMO PROMOTORA DE EMPREGOS

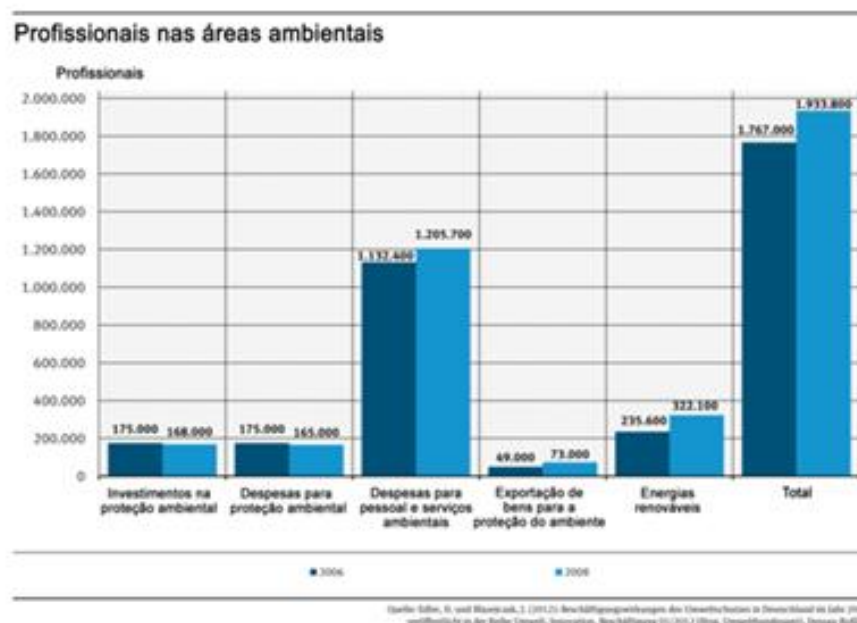
Na Alemanha, a economia ambiental se desenvolveu como uma verdadeira fábrica de empregos. A Agência Federal do Meio Ambiente escreveu, no seu balanço anual de 2013:

Os empregos na área de proteção ambiental apresentaram um crescimento contínuo nos últimos anos. No ano de 2008, pouco menos que dois milhões de pessoas trabalharam no ramo. Cerca de cada vigésimo posto de trabalho (4,8%) foi localizado nessa área.

Os setores econômicos da proteção do ambiente e do clima continuarão a crescer acima da média, e conseqüentemente, também a economia de ciclo fechado e a gestão de resíduos como componente importante da gestão ambiental. Um pré-requisito disso é uma formação profissional orientada à evolução contínua da demanda. Em relação às exigências da formação profissional, o Relatório de Gestão Ambiental do UBA, em 2012, chega à conclusão:

A gama de profissões e qualificações é tão ampla quanto a própria gestão ambiental. Observa-se a tendência em muitos setores econômicos, de enfatizar cada vez mais a proteção do ambiente, na formação profissional e formação continuada. Para profissões na área ambiental, muitas vezes são necessárias habilidades “macias” (“*soft skills*”), como as habilidades de se trabalhar interdisciplinarmente e em time, bem como, estar aberto para novos assuntos. (EDLER; BLAZEJCZAK, 2012)

Figura 7 – Levantamento de profissionais nas áreas ambientais



Fonte: Adaptado de Edler e Blazejczak (2012, p. 4).

Este desenvolvimento repercute em toda a Comunidade Europeia como consequência dos elevados custos de investimento e a expectativa da boa comercialização das matérias-primas recicladas.

Precisa-se de investimentos abrangentes para construir instalações adequadas para o tratamento dos resíduos. A gestão eficiente dos resíduos também oferece novas possibilidades “não apenas na geração de empregos, mas também com o aumento da renda”, a-citenquanto ao mesmo tempo, a sustentabilidade ambiental é promovida através de reutilização, reciclagem e recuperação energética. A indústria de reciclagem tem o potencial de gerar cerca de um meio milhão de postos de trabalho. (Informação para a imprensa do parlamento Europeu de 01/02/2012, Número de referência: 20120201 IPR36951)

Este depoimento é baseado na resolução do parlamento da Comunidade Europeia do ano 2010, que demanda, entre outras:

[...] que os estados membros orientem seus sistemas da formação profissional para abrirem a chance de novos postos de trabalho, ecológicos e sustentáveis. (Resolução do Parlamento da Comunidade Europeia P7_TA 2010/0299: Exploração do potencial de emprego de uma nova gestão sustentável)

Com isso, refere-se explicitamente ao potencial de emprego de uma gestão de resíduos ambientalmente adequada e anota-se que o efeito *spill-over* desejado só pode ser realizado baseado em conceitos de formação orientados no desenvolvimento de competências.

A chance para o desenvolvimento de novos empregos na gestão ambiental e de resíduos é também reconhecida em nível internacional. Sendo assim, a recomendação da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) para a economia brasileira é: “aumentar as oportunidades da educação técnica e treinamento no trabalho. Desenvolver oportunidades em programas de infraestrutura relacionados com o ambiente” (OECD Economic Survey Brazil, 2011, S. 149).

Nossas experiências mostraram que, para a gestão sustentável de resíduos, precisa-se de todo um pacote de conhecimentos específicos.

Nas áreas de operação e técnicas, por exemplo, são exigidos, além de conhecimentos sobre a composição e fluxos de resíduos e uma visão geral da agregação de valor nas matérias-primas recicladas, também conhecimentos específicos conforme cada planta. Até porque a operação de uma planta de compostagem municipal tem outras demandas de capacitação do que a operação de uma planta de triagem de resíduos

Nos setores de planejamento e de gestão operacional precisa-se de amplos conhecimentos técnicos. Por outro lado, conhecimentos detalhados, porém mais ainda, conhecimentos gerais, são os requisitos das áreas de representação política, de sociedade e do setor de consultoria.

Mas, quais as qualificações são necessárias para implementar os primeiros passos? Em seguida, a ampla variação desses requisitos de qualificação será demonstrada com dois exemplos.

5.1 Consultor de Gestão de Resíduos

A capacitação profissional para consultores de gestão de resíduos em maneira de formação continuada foi conduzida pela primeira vez em meados dos anos 1980, na Alemanha, como consequência da redução expressiva da quantidade e qualidade dos materiais reciclados. A introdução de novos sistemas da coleta seletiva não foi aceita pela população que não conseguiu se familiarizar com a nova gestão de resíduos.

No estado federal de Hesse, foi lançado o primeiro instrumento legal que obrigava os municípios a assumirem sua competência de gestão dos resíduos e a orientar os produtores de resíduos, abrindo espaço para consultoria especializada.

Posteriormente, a consultoria da gestão dos resíduos foi instalada por lei e está estabelecida em todo o território da Alemanha.

As tarefas da consultoria de gestão dos resíduos têm ganhado mais competências desde a sua introdução, além de prestar consultoria ao setor privado e comercial. Essas novas competências se encontram na área da consultoria em políticas públicas e na expertise de planejamento.

A consultoria de gestão dos resíduos e publicidade são componentes inseparáveis de uma economia de ciclo fechado sustentável conforme a hierarquia “evitar – reduzir – aproveitar – eliminar”.

O objetivo de evitar a produção de resíduos em nível municipal, pelo cidadão e pelas empresas, não pode ser alcançado sem uma consultoria intensiva e intervenções publicitárias. Onde antes os assuntos ligados à gestão de resíduos foram de natureza técnica, organizatória e contábil, agora é importante que prevaleçam as tarefas relacionadas ao planejamento, a comunicação e a manutenção do contato estreito com a sociedade.

Segundo a Agência Federal de Trabalho Alemã, o perfil do consultor de gestão de resíduos é o seguinte:

Os consultores/as aconselham os cidadãos e empresas sobre prevenção de lixo e aproveitamento e eliminação de resíduos. Por meio de jornadas de informação e palestras os consultores tratam de questões como a gestão de resíduos, como a compostagem, separação do lixo e reutilização, bem como, produtos menos nocivos, ou a eliminação de produtos contendo amianto. Na sua função como assessoria de comunicação, os consultores/as de gestão de resíduos se direcionam aos diversos grupos

alvo como escolas, participantes de cursos na formação de adultos ou a funcionários de uma empresa.

Os consultores/as examinam e avaliam as propostas e soluções para o tratamento de resíduos sobre a ótica ambiental e desenvolvem conceitos de tratamento de resíduos, levando em consideração dados básicos sobre resíduos domésticos, resíduos do comércio e resíduos perigosos e elaboram orientações para um comportamento ambientalmente adequado dos consumidores.

Os consultores/as também são membros em conselhos relacionados à área, visitam instalações de tratamento como plantas de incineração de resíduos, mantêm sítios na internet sobre a gestão de resíduos, ou elaboram balanços de resíduos e outras estatísticas. Como funcionários da administração pública, os consultores/as também cuidam do cadastro dos produtores de resíduos comerciais.

Para poder preencher essas exigências adequadamente, os candidatos a este cargo devem possuir as seguintes competências em relação aos resíduos:

Quadro 1 – Competências da consultoria

Competências essenciais	Outras competências importantes
<ul style="list-style-type: none"> • Consultoria • Separação • Eliminação • Orientação de clientes • Orientação de empresas • Reciclagem • Direito ambiental • Resíduos especiais • Orientação ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Declaração de resíduos • Direito de resíduos sólidos • Proteção da água • Resíduos do comércio e da indústria • Resíduos domésticos • Compostagem • Assessoria de comunicação, publicidade • Pesquisa e fornecimento de informações • Proteção e tecnologia ambiental • Ensino, treinamento (fora das escolas) • Palestras

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.2 Técnico de Economia em Ciclo Fechado e da Gestão de Resíduos

A formação é ministrada nas áreas de logística, coleta, vendas, tratamento, aproveitamento e eliminação de resíduos.

5.2.1 Áreas de trabalho

- Empresas de coleta de resíduos;
- Plantas de aproveitamento e eliminação, por exemplo, para a reciclagem de vidro e de papel;
- Aterros;
- Plantas de compostagem;
- Plantas de tratamento mecânico-biológico.

5.2.2 Habilidades profissionais

Os técnicos de economia de ciclo fechado e de gestão de resíduos conduzem seus trabalhos de forma autônoma baseado em documentos técnicos e regras bem como, nas leis específicas. Eles buscam informações, planejam e coordenam medidas para o controle de qualidade, segurança de trabalho, e para a proteção da saúde e do ambiente na área.

5.2.3 Atuação profissional

Os técnicos de economia de ciclo fechado e de gestão de resíduos (BIBB, 2002):

- Recebem os resíduos;
- Identificam, analisam e declaram os resíduos;
- Direcionam os resíduos para os diversos sistemas de tratamento;
- Organizam acondicionadores e veículos obedecendo aos regulamentos da segurança de trabalho;
- Coordenam e controlam procedimentos técnicos;
- Operam, supervisionam, inspecionam, fazem manutenção e conduzem consertos nas instalações de tratamento, de aproveitamento e de eliminação de resíduos;
- Reconhecem avarias mecânicas e reagem adequadamente;
- Conduzem a documentação e avaliação de processos de trabalho;
- Atuam orientando o cliente e aplicam as tecnologias de informação e comunicação adequadas;
- Atuam conscientes dos custos, do ambiente e da higiene;
- Aplicam as normas legais, regras técnicas e normas da segurança no trabalho, no âmbito da gestão de qualidade.

O CReED possui grande experiência também neste segmento da capacitação profissional. Conhecimentos específicos, por exemplo, sobre a gestão de resíduos em hospitais na Europa, têm sido transmitidos em diversos projetos transnacionais.

6 CONCLUSÕES

As práticas de tratamento tomaram força no mercado global a partir do entendimento de que os aterros tem um potencial de influência nas emissões de gases de efeito estufa elevado, as práticas de engenharia não conseguem afastar o potencial de contaminação a médio e longo prazo, as ações de manutenção após o encerramento são onerosas, os recursos naturais estão se tornando cada vez mais valorizados, portanto, o mercado de recursos secundários tem ganhado força devido a este fato, o valor dos recursos energéticos estão cada vez mais caros, a demanda alimentícia está acentuada para o atendimento de uma população que cresce de forma desenfreada e a sociedade tem se tornado mais sensível às ações que determinam a proteção e preservação ambiental.

Vivenciar a aplicação de novas tecnologias, principalmente em larga escala, demanda uma capacidade técnica avançada que pode ser desenvolvida através de cursos de capacitação que abordem conhecimentos na ordem do planejamento, execução, operação, monitoramento, otimização das tecnologias e aplicabilidade e escoamento dos subprodutos, permitindo formar um senso crítico e sensibilizar os agentes, seja público, seja privado, quanto às fragilidades e entraves relacionados com a aplicação das tecnologias.

Considerando que será a própria comunidade que sofrerá as consequências de uma operação exitosa ou não, devendo o poder público prover cursos de capacitação e de aculturação com a nova realidade da gestão sustentável dos resíduos. A administração pública deve entender este novo sistema como condição única dentro da realidade brasileira e ferramenta concreta de educação ambiental. O comprometimento da população irá garantir melhores níveis de segregação a partir da coleta seletiva e ainda o convívio através de visitas monitoradas à planta de tratamento ratificará os conceitos desenvolvidos em intervenções de educação ambiental, afastando a teoria e aproximando a comunidade para a realidade desses sistemas, suas complexidades e vantagens quando da transformação dos resíduos em recursos secundários. Ações midiáticas são justificadas para sensibilização de um número maior de membros da sociedade.

Portanto, avaliando o pioneirismo do programa e o compromisso com o bem comum, temos que as novas plantas de tratamento devem ser disponibilizadas para linhas de pesquisa e promoção de programas acadêmicos de especialização, contribuindo para a formação de massa crítica e capacitada, apta a multiplicar os resultados e garantir a continuidade dos processos implementados.

REFERÊNCIAS

ALEMANHA. Agência Federal do Meio Ambiente. **Balanco anual de 2013**. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.at/en/>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

ALEMANHA. **Berufe in Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz**. hrsg.: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, S. 11.

BIBB – Bundesinstitut für Berufsbildung. **Ausbildungsprofil Fachkraft für Kreislauf- und Abfallwirtschaft**, s. 2002. Disponível em: <http://www.bibb.de/de/ausbildungsprofil_1847.htm>. Acesso em: 12 jan. 2015.

BRASIL ECONÔMICO. 08.01.2014, 27.01.2014.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Ciclosoft 2014**. Pesquisa anual sobre coleta seletiva. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclosoft/id/2>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

DESTATIS – Statistisches Bundesamt. **Instituto Federal Alemão de Estatística**. 2010. Disponível em: <<https://www.destatis.de/DE/Startseite.html>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

INFORMAÇÃO para a Imprensa do Parlamento Europeu de 01/02/2012, Número de referência: 20120201 IPR36951: **Abfall verwerten, um Investoren anzulocken und Arbeitsplätze zu schaffen**. Disponível em: <<http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20120201IPR36951/html/Abfall-verwerten-um-Investoren-anzulocken-und-Arbeitspl%C3%A4tze-zu-schaffen>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

EDLER, Dietmar; BLAZEJCZAK, Jürgen. **Beschäftigungswirkungen des Umweltschutzes in Deutschland im Jahr 2008**, veröffentlicht in der Reihe Umwelt, Innovation, Beschäftigung 01/2012. (Hrsg. Umweltbundesamt), Dessau-Roßlau. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4308.html>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. **OECD Economic Surveys: Brazil 2011**. OECD Publishing, 2011. DOI: [10.1787/eco_surveys-bra-2011-en](https://doi.org/10.1787/eco_surveys-bra-2011-en). Acesso em: 12 jan. 2015.

PEREIRA, Christiane Dias. **Rota tecnológica para a gestão sustentável de resíduos sólidos domiciliares**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Curso de Pós-Graduação em Direito Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RESOLUÇÃO do Parlamento da Comunidade Europeia P7_TA 2010/0299: **Exploração do potencial de emprego de uma nova gestão sustentável**. Disponível em: <<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P7-TA-2010-0299+0+DOC+XML+V0//En>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

THÜRMER, Andreas; RESCH, Michael. Abfallsammlung in Großstädten – Besondere Herausforderung für kommunale Entsorgungsunternehmen. **Müll und Abfall**. 11/2008. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MUA.11.2008.568>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

HOFFMANN, Lutz. Formação Profissional e Continuada: instrumento fundamental para uma gestão sustentável dos resíduos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha

*State of the Art and Development Potential
of Mechanical and Biological Treatment in Germany*

Engenheiro Civil Michael Balhar

RESUMO

Na Alemanha, atualmente 44 plantas com tecnologia de tratamento mecânico-biológico (TMB) estão operando no tratamento de resíduos sólidos urbanos e rejeitos. A tecnologia TMB na Alemanha se encontra em um estado de desenvolvimento alto, mas também há forte demanda na Europa e no mundo. Os processos específicos de valorização em plantas com tecnologia TMB produzem variados fluxos de materiais destinados ao aproveitamento ou à reciclagem, portanto economizando recursos naturais. O setor da gestão de resíduos deve se orientar cada vez mais nas metas definidas pelos objetivos da proteção dos recursos e do clima. A otimização da tecnologia de tratamento e do aproveitamento material e energético possibilita a exploração de outros potenciais para a redução da emissão de gases efeito estufa. A tecnologia TMB deve e vai entrar na concorrência pelos materiais e qualidades. Os pré-requisitos tecnológicos e os potenciais para o desenvolvimento já existem.

Palavras-chave: Resíduo. Tecnologia. Tratamento mecânico-biológico. Energias renováveis. Combustíveis secundários.

ABSTRACT

In Germany, currently 44 plants with mechanical and biological treatment (MBT) technology are operating in the treatment of municipal solid waste and rejects. The MBT technology in Germany is in a state of high development, but there is also strong demand in Europe and in the world. The specific processes of waste valorization in plants with technology MBT produce varied flows of materials intended for use or recycling, therefore saving natural resources. The sector of waste management should be increasingly orient in goals defined by protection of resources and the climate. The optimization of the treatment technology and production of materials and energy enables the exploration of other potential for the reduction of the emission of greenhouse gases. The MBT technology should and will enter the competition by materials and qualities. The pre-technological requirements and the potential for the development already exist.

Keywords: Residue. Technology. Mechanical-biological treatment. Renewable energies. Secondary fuels.

1 INTRODUÇÃO

A associação “Tratamento específico dos grupos de resíduos” (*Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung – ASA e.V.*) é uma iniciativa de gestores de plantas de tratamento de resíduos que promovem a valorização dos resíduos a partir de critérios econômicos e ambientais, por processos específicos de tratamento em conformidade com os tipos de materiais, sendo esta abordagem a mais adequada em longo prazo.

A identificação do tipo de tratamento conforme a natureza dos resíduos se reflete nas diversas tipologias de plantas com tecnologia de TMB, resumidas em três conceitos de processos diferentes:

- Tratamento Mecânico-Biológico (**aeróbio/anaeróbio, TMB**)
- Estabilização Mecânica-Biológica (**secagem, EMB**)
- Estabilização Mecânica-Física (**secagem, EMF**)

Os processos específicos de beneficiamento em plantas com tecnologia TMB produzem variados fluxos de materiais destinados ao aproveitamento ou à reciclagem, portanto economizando recursos naturais.

A produção de combustíveis alternativos a partir dos componentes com elevado poder calorífico, bem como, o biogás da biodigestão anaeróbia é concebida para o melhor aproveitamento possível da energia contida nos resíduos. A substituição de energias fósseis se constitui em mais uma contribuição para a proteção dos recursos.

2 ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA DE TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO

Na Alemanha, atualmente 44 plantas com tecnologia TMB estão operando no tratamento de resíduos sólidos urbanos e rejeitos. A tecnologia TMB na Alemanha se encontra em um estado de desenvolvimento alto, mas também há forte demanda na Europa e no mundo.

A maior parte das plantas em funcionamento na Alemanha foi construída nos anos de 2001 a 2005, devido à proibição da disposição de resíduos não tratados em aterros, a partir de 1º de junho 2005 (data firmada na “TASi”).

A capacidade total de tratamento das 44 plantas é de, aproximadamente, 5,5 milhões Mg/a. Além disso, 2-3 milhões de resíduos são tratados apenas por processos mecânicos para a produção de combustíveis alternativos, em mais vinte plantas. A fração fina resultado deste tratamento é submetida a um tratamento biológico em uma planta TMB, para estabilização e disposição em aterro, ou seca por processos biológicos para o aproveitamento energético.

Os conceitos e a operação das plantas existentes hoje na Alemanha, foram, e ainda são, marcadas pelas exigências legais de operação, estipuladas na diretiva sobre a disposição de resíduos (hoje: diretiva de aterros) e na trigésima diretiva para a execução da lei federal relativa à proteção

de emissões (30. BImSchV; diretiva para plantas de tratamento biológico de resíduos). As plantas mostram grande variedade em relação à capacidade, equipamento técnico e orientação conceitual. Todas as plantas têm em comum a separação dos resíduos em diferentes fluxos os quais são submetidos aos demais tratamentos, ou dentro da própria planta, ou externamente. O combustível alternativo é produzido a partir da separação da fração de elevado poder calorífico, ou após secagem biológica ou térmica, de todos os resíduos.

Em todas as plantas, o objetivo é a separação e o beneficiamento dos resíduos apropriados para a reciclagem ou para o aproveitamento. A operação das plantas é sujeita a constantes mudanças das condições legais, conforme a legislação sobre resíduos, e econômicas, exigindo altos padrões de qualidade, economicidade e flexibilidade em sua gestão.

A Figura 1 mostra a localização das plantas construídas na Alemanha, com tecnologia TMB, EMB e EMF. Informações detalhadas sobre cada planta se encontram no “relatório de TMB” (MBA-Steckbriefe), publicado pela ASA.

Figura 1 – Plantas de TMB, EMB e EMF na Alemanha



Fonte: ASA, 2011.

O processo mais aplicado para o tratamento de materiais específicos é o **tratamento mecânico-biológico (TMB)**, instalado em 29 plantas. A primeira etapa deste tratamento consiste

na separação de materiais apropriados para a reciclagem ou para o aproveitamento energético. Em seguida, o material restante, de granulometria menor, é submetido a um tratamento biológico.

O tratamento biológico pode consistir em uma etapa de compostagem (túnel, leiras, trapezoidais), ou em uma etapa de biodigestão anaeróbia (a seco ou a úmido). O produto final do tratamento biológico é um material apropriado para a disposição. Um desenvolvimento recente, praticado em algumas plantas, consiste na secagem do material de granulometria menor para o aproveitamento energético.

O tratamento por estabilização mecânica-biológica (EMB), aplicado em 12 plantas, se constitui em um processo alternativo. O objetivo da EMB é a secagem biológica de todos os resíduos, ou, segundo conceito da planta, apenas da fração de alto poder separada para produção de combustíveis alternativos, e a redução expressiva da quantidade de resíduos destinados à disposição. A primeira etapa do tratamento consiste no acondicionamento dos resíduos para a secagem a jusante. Os resíduos são conduzidos para a etapa da secagem biológica, principalmente para redução da umidade, sem maior degradação dos compostos orgânicos. O calor liberado pelo autoaquecimento dos compostos orgânicos dos resíduos é utilizado para a evaporação da umidade dos resíduos. Em seguida, os resíduos secos são submetidos a um tratamento mecânico para a separação de metais, minerais e corpos estranhos, para a produção de uma ou várias frações de alto poder calorífico, de qualidades diferenciadas.

A estabilização mecânica-física (EMP), aplicada em três plantas, se constitui em mais uma alternativa de tratamento de resíduos. Os componentes de alto poder calorífico contidos nos resíduos sólidos urbanos são separados por processos mecânicos e físicos e processados em várias etapas, para produção de um combustível alternativo. O processo compreende a separação dos componentes de baixo poder calorífico e dos metais (ferrosos e não ferrosos), e várias etapas de trituração. Se necessário, a fração rica em contaminantes pode ser separada e a fração de alto poder calorífico pode ser submetida a secagem em secador rotativo, por exemplo.

Além dos materiais destinados à reciclagem ou ao aproveitamento material, o tratamento de resíduos fornece combustíveis alternativos na ordem de até 3 milhões de Mg/a. O poder calorífico deste material pode ser comparado ao da lenha ou da lignite. Geralmente, este tipo de combustível alternativo tem em sua composição mais de 50% de componentes biogênicos, desta forma neutros em CO₂. Os gestores das plantas de TMB, portanto, contribuem para atingir os objetivos relacionados à proteção do clima.

Em uma parte das plantas associadas na ASA, a fração biogênica dos resíduos é submetida a um tratamento anaeróbio (biodigestão). O biogás produzido por estes processos é transformado em eletricidade e calor, em sistemas de cogeração.

Os materiais residuais produzidos pelos tratamentos mecânico-biológicos são dispostos em aterros de tal maneira que não constituam perigo para as futuras gerações, possibilitando a utilização da infraestrutura existente por um tempo prolongado, devido a redução de massa e a otimização de sua densidade.

3 CONTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO PARA A PROTEÇÃO DOS RECURSOS E DO CLIMA

Atualmente, a gestão dos resíduos na Alemanha já contribui consideravelmente para a proteção dos recursos e do clima, decorrente da impossibilidade de aterrar resíduos *in natura* e pelo fornecimento de materiais para a reciclagem ou para o aproveitamento material e térmico. Diante das discussões sobre a proteção dos recursos e do clima, a eficiência energética e os efeitos para o clima no tratamento de resíduos são cada vez mais importantes.

A eficiência energética de processos combinados (plantas com tecnologia TMB e aproveitamento energético da fração de alto poder calorífico) hoje é determinada expressivamente pela eficiência energética dos processos de aproveitamento energético a jusante, enquanto a demanda energética para o tratamento dos resíduos é de importância secundária. A separação quase completa dos compostos de alto poder calorífico dos resíduos e seu aproveitamento em termelétricas a carvão ou na produção de cimento resulta em altas eficiências líquidas.

Mesmo assim a demanda energética de uma planta de TMB, principalmente em forma de combustíveis fósseis nocivos para o clima, pode ser reduzida e a eficiência energética aumentada por meio das medidas a seguir:

- Separação de frações para o aproveitamento material;
- Otimização da separação de metais ferrosos e não ferrosos;
- Aumento do rendimento e da qualidade dos componentes de alto poder calorífico;
- Integração de um sistema de biodigestão e utilização do biogás produzido para a operação do sistema de purificação dos gases de combustão, por oxidação térmica regenerativa (OTR), e para a produção de eletricidade através do biogás sobressalente, em um sistema de cogeração e seu uso para a operação do TMB (Substituição do gás natural e eletricidade a partir de combustíveis fósseis).
- Otimização do consumo energético da planta de TMB.

3.1 Plantas de Tecnologia de Tratamento Mecânico-Biológico como Fornecedoras de Matérias-Primas

Conforme seu objetivo de promover a reciclagem e o aproveitamento de materiais, as plantas de TMB produzem fluxos de materiais com valor agregado, por exemplo, os metais, os quais são disponibilizados na cadeia econômica e contribuem para a proteção de valiosos recursos. Diante do caráter finito dos recursos naturais, a separação de recicláveis dos resíduos sólidos ganha cada vez mais relevância.

Uma das vantagens da tecnologia TMB consiste na possibilidade da instalação posterior de tecnologias específicas de separação. Por exemplo, podem ser instalados equipamentos de tecnologia da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para a separação de determinados

plásticos do fluxo de resíduos. A tecnologia NIR já tem sua aplicação há vários anos em algumas plantas de TMB, com a finalidade de aumentar a qualidade dos combustíveis alternativos produzidos, por meio da separação de PVC. A separação de outros recicláveis (diversos tipos de plásticos, madeira) é tecnologicamente possível.

A aplicação eficiente de tecnologias de separação seletiva, baseada em sensores, nas plantas de TMB, depende também das tendências no desenvolvimento da composição dos resíduos e das exigências em relação à qualidade dos materiais separados. Especialmente essas exigências ainda se constituem em determinados fatores limitantes para a reciclagem e o aproveitamento material dos componentes separados dos resíduos. Além disso, deve-se considerar a redução do poder calorífico da fração restante, depois da separação.

A importância da reciclagem, exigida por lei europeia e alemã, sofre limitação na prática. Enquanto a reciclagem de frações de alto valor não puder ser justificada econômica e ambientalmente, o aproveitamento energético ganha evidência, constituindo-se em uma alternativa interessante.

3.2 Plantas com Tecnologia de Tratamento Mecânico-Biológico como Fornecedoras de Combustível

A utilização de combustíveis alternativos reduz o consumo de combustíveis fósseis como o carvão, gás natural ou petróleo. Além de contribuir para a segurança de abastecimento energético também contribui para a economia de recursos valiosos.

3.2.1 Termos técnicos empregados

O uso do termo “combustível alternativo” segue as orientações da “Associação alemã para a qualidade de combustíveis secundários e madeira reciclada” [*Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (BGS) e.V.*], que faz a distinção dos combustíveis alternativos em frações de alto poder calorífico e em combustíveis secundários [*Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (BGS) e.V.*].

3.2.1.1 Frações de alto poder calorífico

A caracterização de frações de alto poder calorífico pela BGS e.V. segue os seguintes requisitos:

- Componentes separados de resíduos e frações, respectivamente, os quais apresentam poder calorífico expressivamente maior, baseado na sua composição e propriedades, do que o restante da mistura de resíduos;
- Dimensões inferiores de processamento, por exemplo, granulometria mais grossa.

Por exemplo, frações de alto poder calorífico provenientes de plantas de TMB ou de triagem de resíduos do comércio.

Figura 2 – Exemplo de uma fração de alto poder calorífico (> 150 mm, proveniente de uma estação de triagem de resíduos do comércio) [INFA]



Fonte: Grundmann e Balhar (2013, p. 828).

3.2.1.2 Combustíveis secundários

Figura 3 – Exemplo de combustível secundário (< 20 mm)



Fonte: Grundmann e Balhar (2013, p. 829).

Entende-se por combustíveis secundários os materiais oriundos de atividades de produção ou de RSU, após tratamento extenso, podendo a separação dos componentes ser efetuada por tecnologia NIR ou separação balística adicional, com a finalidade de produzir um combustível com qualidade definida, apropriado para a cocombustão na produção de cimento e cal, ou em termelétricas.

Os combustíveis secundários geralmente apresentam granulometria < 20 mm, com poder calorífico entre 20 MJ/kg e 25 MJ/kg e com teor de umidade entre 10% a 15%.

Os combustíveis secundários para a cocombustão são produzidos em forma de chumaço “*fluff*” para injeção na câmara de combustão, possibilitando sua incineração ainda na fase flutuante.

Para assegurar um nível de qualidade equilibrado, a produção de combustíveis secundários é submetida a um controle de qualidade. Na Alemanha são aplicados os procedimentos e exigências previstas pelo selo de qualidade RAL-GZ 724 “Combustíveis secundários”, como padrão amplamente difundido. Deste modo, os produtores de combustíveis secundários certificados podem comprovar a qualidade constante e confiável dos combustíveis por eles produzidos. As vantagens do consumidor dos combustíveis secundários de qualidade comprovada estão no melhor controle e planejamento.

3.2.2 Aspectos da eficiência energética da tecnologia de tratamento mecânico-biológico

A ASA desenvolveu um modelo para a determinação da eficiência energética de plantas com tecnologia TMB, baseado na metodologia da diretiva VDI 3460, folha 2 (Redução das emissões, transformação de energia no tratamento térmico de resíduos), cujas as limitações do sistema foram ampliadas de tal forma que atendessem a um processo combinado.

As limitações do sistema de modelagem se estendem ao tratamento de resíduos em plantas de TMB, aos transportes relacionados e à eliminação dos fluxos de materiais gerados na planta. O modelo calcula o ganho líquido gerado pelo tratamento de resíduos, depois da subtração da energia investida no tratamento. Foi constatado, de modo geral, que a realização de um elevado bônus de CO₂ apenas foi possível em plantas com alto grau de eficiência em seus processos térmicos. Os resultados mostraram que em todas as plantas de TMB foram realizados efeitos mitigatórios para o ambiente. A economia de CO₂ por tonelada de resíduos tratados se somam em até – 530 kg CO₂-eq./Mg (mitigação).

4 PERSPECTIVAS

O cumprimento de futuras tarefas e a ampliação do mercado de tecnologias de TMB precisam de um aumento de disponibilidade e segurança operacional, além de esforços no desenvolvimento:

- Aumento da eficiência energética através da redução do consumo próprio, aumento do aproveitamento energético de componentes de alto poder calorífico e da fração orgânica úmida, com redução das emissões;
- Desenvolvimento contínuo da tecnologia de separação como componente na produção de produtos apropriados para o aproveitamento material e energético;
- Desenvolvimento de conceitos integrados de tratamento de resíduos;
- Reorganização e reutilização da tecnologia de tratamento existente.

4.1 Aumento da Eficiência Energética e Redução das Emissões

A solução para o aumento da eficiência energética está no aumento do aproveitamento energético dos componentes dos resíduos de alto poder calorífico, seguido pela biodigestão do material orgânico úmido. Entretanto, o potencial de economia obtido pela redução do consumo próprio é comparativamente pequeno. A redução das emissões é resultado, principalmente, de eficiências energéticas melhoradas, por parte também possível pela implementação de tecnologias novas ou modificadas no tratamento e aproveitamento dos resíduos.

4.1.1 Aumento do aproveitamento energético dos componentes de alto poder calorífico em processos de tratamento mecânico-biológico

Serão apresentados, a seguir, duas abordagens para a transformação de processos de TMB, atualmente com foco na produção de materiais apropriados para a disposição e para a produção de combustíveis alternativos.

- **Abordagem 1** é direcionada para a separação de uma maior proporção da fração de alto poder calorífico. Neste caso, deverá ocorrer alteração da granulometria na etapa de peneiramento. A redução da granulometria durante o primeiro peneiramento faz com que as frações de alto poder calorífico, bem como as frações biologicamente degradáveis, como papel/papelão, embalagens longa vida/cartonadas e fraldas sejam conduzidas para a fração de combustível. A redução da granulometria depois da estabilização biológica pode se constituir em uma medida complementar.
- **Abordagem 2** prevê, em complementação à modificação da tecnologia de preparo mecânico e condicionamento, uma modificação do tratamento biológico na forma de secagem.

De modo geral, todas as tecnologias de tratamento aeróbio utilizadas em plantas de TMB (processos de túnel, garagem, leiras) são apropriadas para a secagem e produção de combustíveis alternativos. Os resíduos devem conter uma proporção suficiente de compostos biologicamente degradáveis. A modificação do sistema de aeração possibilita a fácil secagem de resíduos não tratados e de percolação com a tecnologia existente (não se aplica a todos os casos de resíduos sólidos da biodigestão).

Em função da redução do tempo de tratamento, o espaço necessário para a compostagem é reduzido, liberando área adicional a ser utilizada para o tratamento (secagem) de partes da fração de alto poder calorífico. Uma outra opção da utilização do volume adicional consiste no tratamento de resíduos orgânicos, separados dos outros resíduos, para a produção de composto orgânico, combustível alternativo ou como matéria-prima para a produção de um combustível líquido. As duas últimas opções têm a secagem como base de tratamento. Além de resíduos orgânicos, outros tipos de biomassa também podem ser tratados.

Em casos onde teores de umidade $< 15\%$ precisam ser atingidos, secadores físicos são necessários, e se for o caso, complementando a secagem biológica existente. Estes processos são particularmente vantajosos em locais com produção de calor residual, por exemplo, plantas de biodigestão, estações de tratamento de esgotos, aterros sanitários bem como, plantas termelétricas e de incineração de resíduos sólidos sem aproveitamento do calor.

Sempre que a situação de mercado de combustíveis alternativos e a disponibilidade de capacidades de aproveitamento justifiquem intervenções, as plantas de TMB podem ser reconfiguradas para atenderem a esses novos objetivos, demonstrando a alta flexibilidade deste tratamento.

4.1.2 Desenvolvimento da Tecnologia de Tratamento Anaeróbio

Por meio de atividades no desenvolvimento e na otimização, como:

- Implementação posterior de etapas de tratamento anaeróbio;
- Acondicionamento dos resíduos sólidos gerados no tratamento anaeróbio gerando produtos para o aproveitamento energético e material;
- Tecnologias para o aproveitamento do biogás;
- Segurança operacional e disponibilidade.

O desempenho da tecnologia de tratamento anaeróbio pode ser aumentado, os dados operacionais melhorados e, portanto, a significância do tratamento anaeróbio como processo com alto desempenho, aumentada.

4.2 Desenvolvimento Contínuo de Tecnologia para uma Separação Eficiente

As possibilidades tecnológicas das plantas de TMB já foram abordadas. Cabe ressaltar que essa tecnologia, devido a sua infraestrutura operacional e de construção, oferece os pré-requisitos para a integração da separação de recicláveis, por exemplo, de embalagens, ou outros materiais.

4.3 Desenvolvimento de Conceitos Gerais Integrados – Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico como Centros de Produção de Energias Renováveis

Na Alemanha, as plantas de TMB estão localizadas com preferência em aterros ou nas suas proximidades imediatas. Estes locais possuem uma infraestrutura de abastecimento,

descarregamento e de trânsito bastante elaborada, oferecendo, portanto, os pré-requisitos para o processamento de bens em massa como a biomassa e produtos derivados dela. A operação de plantas de tratamento de resíduos orgânicos da coleta seletiva, ou por compostagem ou por biodigestão anaeróbia, nos locais das plantas de TMB, resulta em sinergias adicionais, particularmente para o aproveitamento da biomassa e a instalação de centros de produção de energias renováveis derivadas da biomassa:

- A infraestrutura já existente no local, para o aproveitamento e tratamento do gás e do chorume, respectivamente, oferece condições ideais para a instalação adicional de um sistema de biodigestão para os resíduos orgânicos. Dessa maneira, instalações de aproveitamento do gás de aterro existentes podem compensar as quantidades cada vez menores de gás produzidas pelo aterro, com o biogás produzido pela biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes da agricultura e de plantas energéticas.
- Por demandas econômicas, futuramente terão preferência plantas de grande escala para o aproveitamento de resíduos orgânicos e plantas energéticas (plantas de biogás e termelétricas a biomassa). Em cooperação com o setor agroindustrial, unidades de respectiva escala podem ser construídas nos locais de plantas de TMB e de aterros.
- A fabricação de pellets também pode fazer parte destes centros de energia. Agricultura, silvicultura e o comércio relacionado podem fornecer a biomassa para a fabricação de pellets apropriados como combustível em sistemas de incineração em pequena escala e em escala domiciliar, podendo ser armazenados e comercializados para o consumidor final (comércio, sistemas de calefação particulares), de forma centralizada ou descentralizada.
- A produção de combustíveis líquidos, os combustíveis biomassa em líquidos (BTL – *Biomass to Liquid*) exige plantas com maiores capacidades de beneficiamento. O recebimento descentralizado com integração de processos de beneficiamento e de secagem de biomassas, nos locais das plantas de TMB pode se constituir em uma solução apropriada para a redução dos transportes necessários e para compensar as variações sazonais de quantidades fornecidas.

4.4 Reconfiguração e Reutilização de Tecnologias de Beneficiamento Existentes

As plantas de TMB de resíduos sólidos podem ser reconfiguradas para o tratamento de resíduos orgânicos provenientes da coleta seletiva. Na Alemanha, a reconfiguração de uma planta de TMB com compostagem de RSU em tratamento de resíduos orgânicos, foi realizada duas vezes, até hoje.

Todas as modificações de processos descritos podem ser integradas aos processos de TMB, ou podem ser adicionadas, gerando efeitos sinérgicos. A ampliação de capacidades, melhor utilização e os benefícios dos efeitos sinérgicos contribuem para o aumento da eficiência e o

melhoramento da avaliação ambiental da tecnologia de TMB como um todo. Além do mais, as condições econômicas podem ser melhoradas em longo prazo.

5 CONCLUSÕES

O setor da gestão de resíduos deve se orientar cada vez mais nas metas definidas pelos objetivos da proteção dos recursos e do clima. A otimização da tecnologia de tratamento e do aproveitamento material e energético possibilita a exploração de outros potenciais para a redução da emissão de gases efeito estufa. A tecnologia TMB deve e vai entrar na concorrência pelos materiais e qualidades. Os pré-requisitos tecnológicos e os potenciais para o desenvolvimento já existem.

O tratamento específico de resíduos em uma planta TMB como ponto de separação de fluxos de materiais com tratamento eficiente em energia e aproveitamento de fluxos separados oferece uma boa base, não apenas na Europa, mas globalmente. A realização técnica de uma planta de TMB pode ser adaptada com flexibilidade às respectivas condições e exigências.

REFERÊNCIAS

- ASA. MBA-Steckbriefe der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) e.V. 2011.
- GRUNDMANN, Thomas; BALHAR, Michael. **Entwicklungspotenzial der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung**. 2013. Disponível em: <http://www.vivis.de/phocadownload/2013_eaa/2013_EaA_823_834_Grundmann.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- GÜTEGEMEINSCHAFT Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (BGS) e.V. 2008. **Güte- und Prüfbestimmungen für Sekundärbrennstoffe**, RAL-GZ 724.
- INFA – Institut für Abfall, Abwasser und Infrastrukturmanagement GmbH. 2003. **Bilanzierung des Verbleibs von ausgewählten Schwermetallen (insbesondere Quecksilber) bei der Sekundärbrennstoffherstellung aus Siedlungsabfällen**, im Auftrag der ASA e.V. (nicht veröffentlicht).

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

BALHAR, Michael. Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maió – 2017**.

Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos

Treatment of Gaseous Emissions from Mechanical-Biological Treatment of Municipal Solid Waste

Doutor Engenheiro Civil e Químico Ambiental Carsten Cuhls

RESUMO

Várias medições de emissões gasosas em diferentes tipos de plantas de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) em larga escala têm sido realizadas na Alemanha: abertura de leiras, em sistemas de revolvimento e em plantas com digestão aeróbia com etapa anaeróbia integrada. Os parâmetros de medição para o controle de emissões são: voláteis, CH₄, NH₃ e N₂O; fatores de emissão e CO₂-equivalentes também foram estimados. Dependendo do estágio de decomposição biológico há formação de CH₄ (anaeróbio) e N₂O (aeróbios). Trata-se de um princípio segundo o qual a minimização do CH₄ e N₂O nas emissões para a atmosfera como resultado de uma adequada condição operacional durante todo o período de tratamento aeróbio. Como não há tecnologias de ponta para reduzir CH₄ e N₂O durante o tratamento dos gases exauridos, devem ser previstas medidas para minimizar as emissões. Neste artigo apresentaremos ainda técnicas de tratamento como lavagem de ácidos e filtro biológico. O CH₄, as emissões de N₂O e NH₃ a partir da digestão anaeróbia pode ser maior do que durante a decomposição aeróbia. Particulados e emissões de odores não comprometem a funcionalidade das plantas de tratamento em galpões fechados desde o momento em que se emprega os lavadores de ácido e biofiltro, isto também vale para a etapa de digestão anaeróbia.

Palavras-chave: Controle de emissões. Gases de efeito estufa (GEE). RSU. TMB. Tratamento.

ABSTRACT

Several measurements of gaseous emissions from different types of large scale treatment plants for Municipal Solid Waste (MSW) have been carried out in Germany: open windrows, in-vessel systems and active aerobic plants with integrated anaerobic digestion step. Measurement data of emission control are VOC, CH₄, NH₃ and N₂O; emission factors and CO₂-Equivalents have been calculated as well. Depending on the rotting milieu there is an opposed formation of CH₄ (*anaerobic*) and N₂O (*aerobic*) within the biological process. It is a principle that minimisation of the CH₄ and N₂O emissions to air is the result of the right operation conditions for the entire time of aerobic treatment. Because there is no end-of-pipe technology to reduce CH₄ and N₂O in exhaust gas treatment, arrangements to minimise process emissions have to be preventive. At this article we will present arrangements for the emission control with acid scrubber and biofilter are shown to

the components. Emissions of CH₄, N₂O and NH₃ from anaerobic digestion could be higher than from aerobic rotting. Dust and odor are not a problem in enclosed treatment plants with scrubber and biofilter technology, as well anaerobic process step.

Keywords: Emission Control. Greenhouse Gases (GHG). MSW. MBT. Treatment.

1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Este texto se refere a plantas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos e outros, por meio de processos mecânicos ou mecânico-biológicos, objetivando a separação das frações de alto poder calorífico e sua transformação para combustíveis alternativos. A etapa de tratamento biológico é conduzida para a estabilização anaeróbia ou aeróbia, ou para a secagem aeróbia de resíduos contendo componentes orgânicos, biologicamente degradáveis. Na secagem, aproveita-se do calor liberado pelas reações biológicas para a evaporação da água, para aumentar a eficiência do tratamento mecânico a jusante, para a transformação dos resíduos tratados em combustíveis alternativos. Outra finalidade é a interrupção dos processos da degradação biológica, através da redução da umidade.

Os processos de tratamento podem ser distinguidos da seguinte maneira:

- TM = Tratamento Mecânico (sem etapa biológica)

Separação mecânica e preparação dos RSU para CDR (combustível derivado de resíduos)

Emissão → ODORES, PARTICULADOS

- TMB = Tratamento Mecânico-Biológico

- ✧ TMB: Compostagem aeróbia antes da deposição em aterro

Emissão → ODORES, PARTICULADOS, compostos orgânicos voláteis (COV) e gás amoníaco (NH₃)

- ✧ TMB: Biodigestão anaeróbia (BA) e estabilização aeróbia antes da deposição em aterros

Emissão → ODORES, PARTICULADOS, COV, NH₃ metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O)

- EMB = Estabilização Mecânica-Biológica

Tratamento Mecânico-Biológico (TMB): Secagem

Emissão → ODORES, PARTICULADOS e COV

Baseado na diretiva sobre emissões da União Europeia (UE) (IED, Diretiva 2010/75/EU do Parlamento Europeu e do Conselho) e na revisão dos documentos sobre as melhores técnicas disponíveis (*Best Available Technique Reference*, BREF) são definidas as conclusões obrigatórias e os valores de emissão, derivados delas. Na Alemanha, o Governo converteu essas conclusões das melhores técnicas disponíveis em lei nacional, de forma que na realização conforme a lei nacional,

o licenciamento de plantas também está de acordo com as exigências das melhores técnicas disponíveis.

A diretiva descreve o estado da arte da tecnologia, com consideração específica das emissões ao ar produzidas. O objetivo de medidas para a redução das emissões nestas instalações é a prevenção contra efeitos nocivos para o ambiente. Para atingir este objetivo, são descritos:

- Medidas de planejamento, como a escolha do local;
- Medidas organizacionais no transporte, recepção e tratamento do material e na operação da instalação;
- Manipulações direcionadas no processo de tratamento de resíduos;
- Medidas construtivas na área da tecnologia de máquinas, construção e ventilação;
- A instalação e operação de instalações para o tratamento dos gases emitidos;
- Conceitos para o gerenciamento de fluxos de ar e de emissão de gases.

O documento BREF tratamento de resíduos sólidos apresenta o estado atual, vigente na data da sua publicação (2015/16), de instalações para o tratamento mecânico e, ou biológico de alto valor (melhores técnicas disponíveis).

A construção e a operação de uma planta de TMB é sujeita ao licenciamento de acordo com os regulamentos legais referentes à proteção contra emissões. Durante o processo de licenciamento, a adequação do local para a construção e operação da planta deve ser comprovada. Emissões relevantes da planta podem ser:

- Substâncias odoríferas;
- Particulados e dispersão de componentes leves pelo vento;
- Aerosóis e bio-aerosóis (micro-organismos);
- Compostos orgânicos voláteis (COV);
- Substâncias inorgânicas gasosas (NH_3 , NO , H_2S);
- Gases efeito estufa (CH_4 , N_2O);
- Ruído;
- Efluentes.

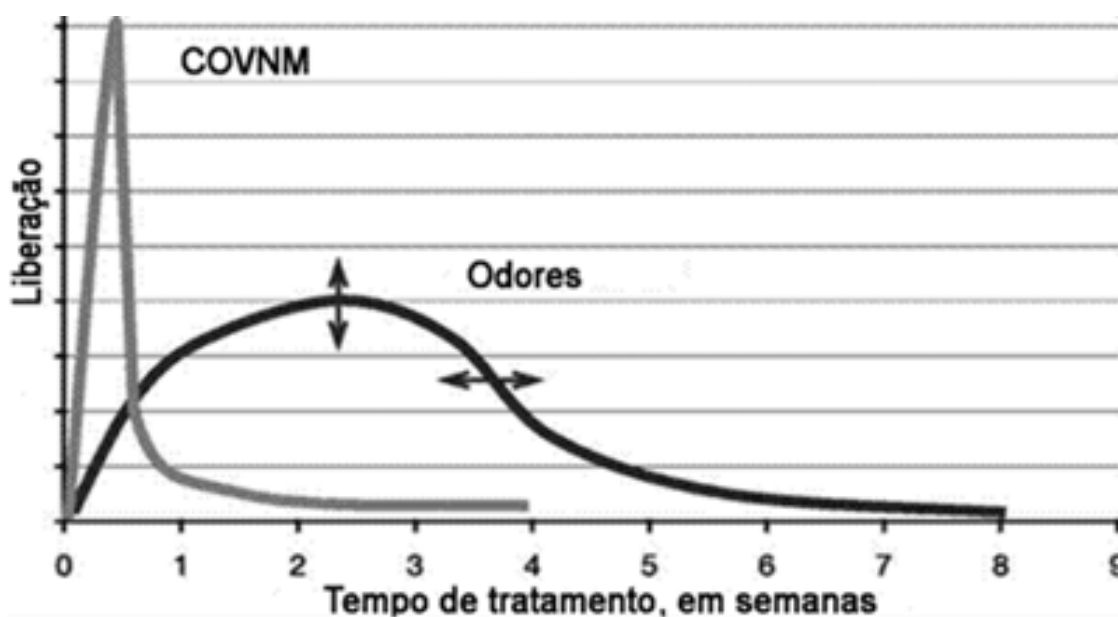
Valores limites e exigências para a proteção contra efeitos nocivos para o ambiente, no contexto internacional, resultam das diretivas do Governo Federal (Lei sobre a proteção contra emissões, BimSchG), e dos regulamentos federais e dos Estados, como as orientações técnicas (OT) OT Ruído, OT Ar, OT Emissão de odores (**TA Lärm**, **TA Luft**, **GIRL**, respectivamente). O licenciamento para o projeto só pode ser concedido se a proteção e a prevenção contra efeitos nocivos ao ambiente, resultando da operação da instalação, estão garantidas. O conceito integrado

da prevenção e redução da poluição deve ser obedecido (Lei sobre a Avaliação de Impactos Ambientais, UVP, Diretiva Europeia sobre Emissões Industriais, IED).

2 QUALIDADE DE EMISSÕES DO TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO

É de amplo conhecimento que os resíduos podem emitir odores desagradáveis. Os compostos causadores destes odores podem já estar presentes (por exemplo restos de solventes, líquidos, gorduras e óleos), ou são produzidos através de reações naturais de decomposição biológica por micro-organismos, como bactérias e fungos. Sobretudo os componentes orgânicos de fácil degradação são as substâncias mais afetadas. As substâncias odoríferas na sua maioria são COV, com limiares olfativos baixos, com ligações orgânicas de carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), com enxofre (S) ou nitrogênio (N), além de substâncias odoríferas inorgânicas, como a **amônia (NH₃)** e o **gás sulfídrico (H₂S)**.

Figura 1 – Comportamento de emissão de substâncias odoríferas e Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano (COVNM) de uma etapa aeróbia de uma planta de TMB



Fonte: VDI-Richtlinie 3475 Blatt 3.

O tratamento biológico de RSU é um processo biológico relacionado obrigatoriamente com a formação de compostos orgânicos voláteis e substâncias odoríferas. Na degradação da matéria orgânica, substâncias de alto peso molecular, como os carboidratos e proteínas, são degradadas em componentes de baixo peso molecular, os quais apresentam uma volatilidade elevada, podendo ser liberados facilmente na atmosfera. Exemplos para a formação de COV através da degradação microbiológica, são etanol, acetaldeído, butanol e acetona, entre outros.

A liberação destes COV pelo material em decomposição é promovida pelas altas temperaturas de processo (50 °C a 70 °C) e uma troca intensiva de gases (*stripping*), nos tratamentos aeróbios.

Os compostos orgânicos voláteis (COV) formam o parâmetro somatório para as substâncias orgânicas e, portanto, contendo carbono, de fácil evaporação ou já estão presentes na forma gasosa em temperaturas baixas, com exceção do metano (CH₄). Portanto, usa-se a denominação Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano (COVNM). Tratando-se de metabólitos biológicos, estes também são denominados de COV biogênicos (COVB).

O parâmetro COVNM é calculado pela diferença de carbono total (C_{tot}) e da proporção do C contida no metano (CH₄-C). Tal diferenciação é pertinente, pois o metano se constitui no maior componente individual orgânico, nas emissões de todos os tratamentos biológicos e tipos de processos. Os COVNM compreendem os componentes principais tipicamente encontrados no tratamento biológico de resíduos, e que refletem a carga de COVNM emitida em mais de 90%, devido à característica expressiva de concentrações:

- Compostos de enxofre: dissulfeto de carbono, dimetil sulfeto, dimetil dissulfeto;
- Compostos de nitrogênio: aminos básicos;
- Aldeídos: aldeído acético, penatanal;
- Cetonas: Acetona, 2-butanona, 2-pentanona;
- Alcoóis: Etanol, 2-Propanol, 2-Butanol, 2-Metilpropanol;
- Ácidos carbônicos: ácido fórmico, ácido acético, ácido propiônico, ácido valeriano;
- Ésteres: acetato metílico, acetato etílico;
- Terpenos: micreno, α -pineno, β -pineno, limoneno, α -tujono

Os COVNM são emitidos no decorrer do autoaquecimento no início da compostagem intensiva. O máximo das emissões se encontra geralmente na primeira semana de tratamento. Os COVNM mais odorosos, por exemplo, os componentes contendo enxofre podem se formar também depois, portanto, para atender as exigências da proteção contra as emissões, as primeiras duas a quatro semanas do tratamento devem ocorrer com aeração ativa e em sistema fechado, para o tratamento do ar exaurido.

Além das substâncias gasosas inorgânicas e orgânicas, o particulado também pode ter um papel importante, pois em todos os lugares de tratamento de resíduos secos, há formação de particulado, provocado por trituração, peneiramento ou qualquer tipo de transporte. Já a formação de particulado deve ser evitado.

Tabela 1 – Visão geral dos tipos de TMB com as referentes emissões relevantes

Tipo de planta	1	2	3	4	5	6
TM, separação mecânica, produção de CDR	x	x				
TMB, anaeróbio, secagem, produção de CDR	x	x	x			
TMB, aeróbio, compostagem, deposição em aterro	x	x	x	x	(x) pouco, operação deficiente	(x) pouco, operação deficiente
TMB, digestão anaeróbia, pós-tratamento aeróbio / secagem deposição em aterro / CDR	x	x	x	x	x	(x) pouco, operação deficiente

1 - Odores e particulados
2 - Micro-organismos

3 - COV microbiológico
4 - NH₃

5 - CH₄
6 - N₂O

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Uma visão geral das tecnologias e tipos de processo, com as respectivas emissões relevantes, se encontra na Tabela 1. Emissões de odores, particulados e micro-organismos são relevantes em todos os tipos de tecnologia. No caso da secagem biológica com aeração intensiva, uma certa carga de COVNM pode ser esperada no ar exaurido. Em uma planta típica de TMB com estabilização aeróbia, observa-se também a emissão de NH₃. A formação de metano em plantas de TMB com etapa de tratamento anaeróbio também é de relevância, mesmo na fase do pós-tratamento aeróbio para a estabilização dos resíduos.

A emissão de gases efeito estufa (GEE), como o CH₄ e N₂O é relacionada com o processo combinado anaeróbio / aeróbio. Dependendo das condições de tratamento, a formação ou de um ou do outro gás é favorecida. Portanto, a otimização do processo em relação à inibição da emissão destes gases é difícil.

A proteção integrada do ambiente diferencia entre medidas primárias e medidas secundárias para a redução das emissões. As medidas primárias são destinadas à prevenção e redução da emissão de poluentes para o ar. As medidas primárias são:

- Tecnologia de processo escolhida, agregados, relações entre as diversas funções;
- Medidas organizatórias e de operação no transporte, recepção e tratamento mecânico do material bem como, no tratamento biológico;
- Manipulação direcionada do processo de tratamento dos resíduos (por exemplo tecnologia de medição, controle e regulação, TMR);
- Medidas construcionais na área técnica de máquinas e na tecnologia de construção, aeração e irrigação;

- Medidas secundárias para a mitigação de emissões constituem em tecnologias a jusante, que consistem na captação e no tratamento das emissões gasosas. As tecnologias de tratamento destes fluxos são destinadas a tratar os fluxos residuais que ainda permanecem, após instalação de medidas para a prevenção e redução, de tal maneira que os valores limites são cumpridos seguramente, para não prejudicar o bem-estar público.

3 QUANTIDADE DE EMISSÕES DO TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO

Decomposição é um processo aeróbio, ou seja, depende de um suprimento suficiente de oxigênio para que os micro-organismos quebrem as fontes de carbono, resultando em dióxido de carbono e água. O estabelecimento do processo de decomposição caracteriza-se por um rápido autoaquecimento da fração orgânica. A alta disponibilidade de fontes de carbono facilmente degradáveis resulta em intensa atividade microbiana liberando grandes quantidades de calor que levam ao aquecimento da massa. Por conseguinte, micro-organismos termofílicos predominam durante a fase inicial da decomposição.

3.1 Aspectos Relevantes

Em sistemas dinâmicos de compostagem, a decomposição da maior parte dos componentes orgânicos contidos nos resíduos ocorre durante as primeiras quatro semanas do processo. Durante este tempo, necessita-se as taxas mais altas de aeração, com consumo de até 60% a 70% de todo o ar de aeração utilizado no processo. Em caso de distúrbios nesta primeira fase intensiva do processo, a degradação biológica passa para as fases de compostagem e áreas de aeração a jusante. O que também se aplica a sistemas estáticos, sem processos de reviramento. Na presença de uma etapa de biodigestão anaeróbia, instalada antes do tratamento aeróbio, a degradação intensiva dos compostos de fácil decomposição ocorre dentro de um reator fechado. Consequentemente, as quantidades de emissões gasosas produzidas no pós-tratamento aeróbio são expressivamente reduzidas.

Os conceitos básicos de um sistema de gerenciamento de emissões gasosas consistem nas seguintes etapas:

- Captação separada de fluxos parciais de ar exaurido;
- Redução das quantidades do ar exaurido pela utilização múltipla ou em cascata, recirculação do ar;
- Minimização dos fluxos de emissões gasosas através da degradação anaeróbia (Biodigestão com uso energético do biogás em vez da compostagem);
- Tratamento de fluxos parciais das emissões gasosas através de uma combinação de processos biológicos, químicos e físicos.

O gerenciamento de fluxos de emissões gasosas tem consequências em relação à construção bem como, à tecnologia de processos implantada. Estes fatores têm um papel importante:

- Minimização do volume dos galpões;
- Segmentação das unidades de processos;
- Medidas para a mitigação ativa e passiva das emissões, localizadas perto das fontes.

A faixa das quantidades específicas de emissões gasosas produzidas em uma planta de TMB fechada da primeira geração, na Alemanha, foi de 10.000 m³/t a 30.000 m³/t de material submetido ao tratamento aeróbio. A otimização da condução do ar, nessas plantas de TMB, através da utilização múltipla, resultou na redução das quantidades de emissões gasosas específicas para 7.000 m³/t a 8.000 m³/t.

As emissões de substâncias gasosas nocivas e odores, emitidas pelo TMB são relacionadas:

- aos resíduos (tipo, composição, idade);
- ao processo (compostagem, biodigestão);
- ao sistema implantado (tipo de aeração);
- ao tipo de operação (gerenciamento operacional);
- à construção (volume de ar nos galpões para tratamento);
- às condições meteorológicas.

Além da liberação de odores durante a entrega e o pré-tratamento mecânico, as seguintes etapas do tratamento são relevantes fontes de emissão:

- compostagem (decomposição aeróbia);
- biodigestão anaeróbia (instalações a jusante);
- tratamento das emissões gasosas.

O ar exaurido de baixo nível de contaminação deve ser tratado apropriadamente. O ar removido do pátio de descarregamento e dos reservatórios fundos ou rasos, com ou sem integração do tratamento mecânico dos resíduos entregues, deve ser conduzido para o tratamento de gases de escape, ou pode ser utilizado como ar de processo, na etapa de compostagem. A geração de particulado e de bio-aerosóis é consequência de impactos mecânicos, transportes e outros tipos de movimentação de resíduos, especialmente secos, e frações de resíduos, ao ar aberto, por exemplo durante o transporte e no pré-tratamento e eventualmente, no pós-tratamento do produto do tratamento aeróbio. As fontes pontuais de geração de particulado, como agregados, locais de transferência ou de lançamento de material nas esteiras, podem ser encapsulados e o ar sugado, para a prevenção direcionada de particulado. Outra fonte de emissões de particulado consiste nas vias de trânsito e pátios pavimentados, onde a circulação de veículos bem como, a limpeza, provoca levantamentos de particulados. No caso de particulado e bio-aerosóis, as exigências gerais da

segurança de trabalho devem ser consideradas. No ar exaurido, o valor limite geral permitido para emissões de particulados de 10 mg/m^3 , em médias diárias, não deve ser ultrapassado.

Pré-requisito para a escolha do sistema mais apropriado para o tratamento das emissões gasosas, ou de um conjunto de sistemas, é a avaliação físico-química da composição destes fluxos gasosos.

- Os fluxos gasosos emitidos por uma planta de TMB são gerados:
- Principalmente particulado, na etapa de tratamento mecânico, com poucas emissões de umidade e calor;
- Quantidades substanciais, de umidade, calor, metano, substâncias orgânicas (COV), NH_3 e N_2O , na etapa de tratamento biológico.

De acordo com a condução do processo aeróbio, as temperaturas na compostagem intensiva podem atingir $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, provocando a emissão de boa parte da umidade contida no material, além de calor. A temperatura do ar exaurido na etapa mecânica (entrega e pré-tratamento) depende, principalmente, das temperaturas ambiente e exteriores e, portanto, das condições meteorológicas (verão/inverno).

Segundo essas condições quadro, as emissões gasosas de uma planta de TMB contêm, no mínimo, os seguintes grupos de substâncias:

- Particulado;
- Bio-aerosóis;
- Água (condensada) contida no ar de processo exaurido, saturado de vapor d'água, que pode ser mantido abaixo do limite de saturação apenas através da adição de ar seco, sugado dos galpões;
- Produtos da decomposição orgânica, principalmente o CO_2 , mas também o metano e traços de substâncias orgânicas (COV), como, acetona, aldeído acético, etanol, butanol e outros compostos de cadeia curta, tais como, solventes, principalmente toluol, xilol e terpenos de odor intenso, como limoneno, além de compostos orgânicos contendo enxofre;
- Gás amoníaco e traços de outros compostos orgânicos nitrogenados, alcalinos;
- Gases efeito estufa: metano e óxido nítrico.

Devido à condução de processo e da alta umidade do ar de processo exaurido, os teores de substâncias nocivas inorgânicas e de metais pesados presentes nos particulados, são consideravelmente baixos. Substâncias nocivas como o mercúrio bem como os xenobióticas (clorofluorcarbonetos, CFC) podem se constituir em um problema se contidas nos resíduos.

3.2 Particulados

Todos os passos mecânicos no tratamento de resíduos ou frações de resíduos secos resultam inevitavelmente em emissões de particulados. Nestes casos, o encapsulamento dos respectivos agregados é necessário, e o ar exaurido destes agregados deve ser conduzido para um sistema de remoção de particulado. Devido à heterogeneidade dos resíduos, o tipo e a quantidade da particulado variam consideravelmente, provocando, temporariamente, teores de particulados no ar de $> 1 \text{ g/m}^3$. Fluxos parciais altamente carregados, por exemplo, provenientes de certos agregados ou de outras fontes pontuais, sistemas de remoção de particulados individuais podem ser instalados. No tratamento biológico, as emissões de particulados são geradas especialmente durante o reviramento, no peneiramento e no carregamento. Na condução dessas atividades ao ar livre, medidas organizacionais e operacionais devem ser tomadas, a fim de reduzir essas emissões de particulados ao mínimo.

No pós-tratamento aeróbio aberto, não é possível captar as emissões provenientes deste passo. Portanto, aqui também as emissões devem ser reduzidas tanto quanto possível, por medidas organizacionais e operacionais. O carregamento do ar exaurido por particulados pode resultar em depósitos não desejados nas tubulações de ventilação.

Nos biofiltros, o particulado provoca uma gama de problemas, e, portanto, é necessária a instalação de um sistema de remoção de particulado adequado, antes dessa etapa de tratamento. Baixos teores de particulados no ar exaurido podem ser removidos pela umidificação necessária do ar antes de entrar no biofiltro. Na presença de altos teores de particulados no ar exaurido, a instalação de filtros de particulados separados é necessária. Os fluxos de ar exaurido, tratados por meio das tecnologias comprovadas na prática, com separação do particulado como medida única ou em combinação com outros tratamentos, geralmente apresentam teores de particulados $< 2 \text{ mg/m}^3$.

3.3 Substâncias Odoríferas

As emissões de odores de uma planta de TMB podem ser atribuídas a um número de substâncias, produzidas na decomposição da matéria orgânica. Embora os gases amoníaco e sulfídrico inorgânicos sejam as substâncias mais conhecidos, estes gases não constituem a porção mais significativa das substâncias odoríferas emitidas. As demais substâncias odoríferas contidas nas emissões gasosas são orgânicas, por exemplo, as contendo enxofre.

Ao contrário da evolução das emissões de COV, que começam com o autoaquecimento, atingem rapidamente o máximo e terminam depois de, aproximadamente, 14 dias, os compostos de enxofre de odor intenso (por exemplo o dimetil sulfeto) apresentam um comportamento diferente, pois aparecem no ar exaurido apenas depois do pico de emissões dos COV (por exemplo álcoois), onde permanecem por um tempo prolongado. Este comportamento foi observado em laboratório, em uma variedade de micro-organismos, tais como, em *Penicillium* e em *Aspergillus*,

explicando o fenômeno particular da emissão de substâncias odoríferas, além do pico de emissão dos COV a, aproximadamente, duas semanas.

O teor de unidades de odor (UO) no ar de processo pode atingir até $> 10.000 \text{ UE/m}^3$, dependendo do sistema de tratamento, gerenciamento do ar exaurido e propriedades dos resíduos tratados, com destaque do pós-tratamento aeróbio de resíduos da biodigestão anaeróbia, o qual apresenta emissões de odores muito desagradáveis, devido à presença de gás amoníaco em altas concentrações e de compostos contendo enxofre.

Os biofiltros, quando dimensionados corretamente e devidamente operados, são muito bem apropriados para a eliminação de substâncias odoríferas, e teores de $< 500 \text{ UO/m}^3$ no ar purificado podem ser atingidos seguramente. O ar pode ser purificado de tal maneira que a sua origem, de ar exaurido, não é mais perceptível. Porém, de acordo com experiências feitas em plantas de TMB, para alcançar ambos os objetivos, a separação do gás amoníaco do ar exaurido, antes do biofiltro, é necessária.

Na presença de elevados teores de gás amoníaco no ar exaurido (a partir de 10 mg/m^3), recomenda-se a instalação de um sistema de lavagem ácida para a separação deste gás. Altos teores de compostos contendo enxofre (por exemplo: o H_2S) podem ser removidos por meio da lavagem oxidativa, alcalina (por exemplo com H_2O_2 e NaOH , antes do fluxo de ar entrar no biofiltro ou o tratamento térmico, respectivamente. Estas medidas complementares resultam em uma vida útil prolongada bem como, na minimização das emissões de substâncias odoríferas.

3.4 Compostos Orgânicos Voláteis (COV)

Os fluxos brutos de emissões gasosas de uma planta de TMB contêm uma variedade de compostos químicos orgânicos encontrados em concentrações variadas, às vezes altas. A princípio, todos os compostos voláteis contidos nos RSU entregues para a planta de TMB, podem estar presentes.

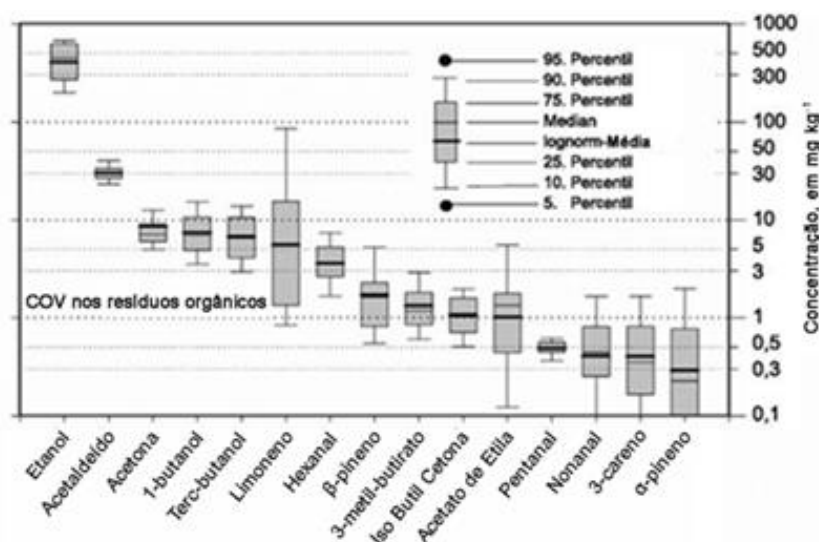
As substâncias odoríferas, respectivamente, os COV, podem ser agrupadas segundo sua geração ou origem, da seguinte maneira:

- Xenobiótica: os COV contidos nos resíduos por exemplo solventes, produtos de limpeza, produtos químicos (CFC, HCFC, BTEX);
- COV biogênicos: metabolitos voláteis de compostagem, como, álcoois, aldeídos, cetonas, terpenos;
- COV abiogênicos: produtos de reações químicas durante a compostagem (reações de pirólise, Maillard, e de auto-oxidação).

Exemplos de COVs já contidos nos resíduos são soluções orgânicas, mas também plásticos, dos quais ocorre a evaporação de monômeros ou aditivos como substâncias em traços, por exemplo fenol, 1,2,4-trimetilbenzol, n-decano, n-undecano, mas também os xenobióticos voláteis como os CFCs e HCFCs, quando contidos nos resíduos.

Exemplos de COVs biogênicos são álcoois, cetonas, ácidos de carbono ou aldeídos, formados durante a decomposição biológica. Estas substâncias compõem a maior parte dos compostos orgânicos nos fluxos gasosos brutos oriundos do tratamento biológico, e a sua degradação bem-sucedida pode ser efetuada por meio de biofiltros (Figura 2).

Figura 2 – Geração de diferentes COVs no tratamento biológico de RSU



Fonte: VDI-diretiva 3475 folha 3.

A reação de Maillard é um exemplo para a formação abiogênica de substâncias odoríferas em temperaturas altas, observadas durante o processo de compostagem, especialmente na faixa de 80 °C a 90 °C. Essa reação também é responsável para a produção de substâncias aromáticas para alimentos, por exemplo, por processos de torragem, defumação ou em alimentos assados. Esta reação entre açúcares e compostos de aminas, também conhecida como escurecimento não-enzimático, produz números compostos, parcialmente voláteis e com limiares olfativos baixos. Um grupo importante destes compostos constitui nos heterocíclicos nitrogenados, como os piridinos e os pirazinos.

Teores típicos de COVs biogênicos são apresentados na Figura 2, para o processo de compostagem. Os dois componentes principais, o aldeído acetato e o etanol, atingiram concentrações de 30 mg/kg e 400 mg/kg, respectivamente. Os demais componentes foram álcoois, terpenos, aldeídos e ácidos de carbono. Em temperaturas de processo durante a compostagem, de 50 °C a 70 °C, e com aeração ativa é pertinente a transição de grande parte dos COVs formados nos resíduos, para os fluxos de ar, por arrastamento e, ou, evaporação.

A composição de diversos balanços de COVNM em diferentes plantas de TMB reflete claramente a liberação quase total destes compostos, medidos com carbono (C), nas primeiras duas semanas de tratamento, em quantidades de C de 600 g/t a 800 g/t de material. Com tempo de tratamento prolongado, a carga de C aumenta para 800 g/t a 1.000 g/t de material. Em relação aos COVNM pode-se partir da suposição que a maior parte destes compostos emitidos pelo tratamento

biológico por via gasosa, na ordem de (em C) 1000 g/t de material, foi formada através da degradação microbiana durante o processo de compostagem e é arrastada ativamente pelo fluxo de ar e, ou, evapora.

3.5 Metano (CH₄)

A formação de metano em quantidades consideráveis foi observada em várias plantas de TMB, como consequência do abastecimento insuficiente de oxigênio. A formação de metano pode ocorrer em toda a faixa de temperaturas observadas no tratamento biológico, especialmente também na fase termofílica do processo de compostagem. Outra fonte se constitui nos resíduos da biodigestão, quando são submetidos à aeração, ou na etapa de oxidação no início do processo da biodigestão, ou no pós-tratamento, resultando na alteração do metabolismo dos micro-organismos, para a respiração de oxigênio. As causas para a formação de metano muitas vezes são a má aerabilidade das leiras de compostagem (adensamento) e teores de umidade muito altos (excesso de água).

Semelhante à compostagem, supõe-se para as plantas TMB com sistemas de compostagem intensivos, otimizados, a formação de metano em concentrações de 10 mg/m³ a 100 mg/m³, o que corresponde a quantidades de metano de 50 g/t a 500 g/t de material fresco. Em alguns casos de modificação de etapas de tratamento biológico, a aeração otimizada das leiras resultou na redução expressiva da formação de metano. Nos biofiltros não há degradação considerável do metano (remoção: 0% a 20%). Portanto, os fluxos de ar exaurido conduzidos para os biofiltros devem estar pobres em metano. Fluxos parciais, por exemplo, do pós-tratamento aeróbio ou do galpão de entrega e pré-tratamento mecânico podem ser adequados. Os fluxos de ar captados na área de entrega/pré-tratamento mecânico geralmente tem baixa carga de metano, com < 3 mg/m³ e 2 g/t de material fresco, com concentração de fundo de 0,6 mg/m³.

3.6 Gás Amoníaco (NH₃)

As concentrações do gás amoníaco nas emissões gasosas brutas de uma planta de TMB dependem dos processos instalados, das quantidades de ar exaurido e das propriedades dos resíduos tratados e podem estar entre 10 mg/m³ a 200 mg/m³. Fluxos parciais do ar exaurido de processos aeróbios, especialmente com uma etapa de tratamento anaeróbio instalada antes, podem apresentar valores de até 1.000 mg/m³, correspondendo a cargas presentes no gás amoníaco de entre 400 g/t e 1600 g/t de material destinado ao tratamento aeróbio. O ar exaurido das áreas de entrega e do pré-tratamento apresentam valores de gás amoníaco insignificantes. Além da ação do gás amoniacal como poluente inorgânico gasoso (Nº 5.2.4 TA Luft, Valor limite de emissão 30 mg/m³), altas concentrações do gás amoníaco nos fluxos gasosos brutos podem prejudicar dos biofiltros frequentemente instalados nas plantas de TMB. Outro efeito é a formação de NO e N₂O no biofiltro. Portanto, os teores do gás amoníaco no ar exaurido devem ser ajustados para um nível favorável antes do biofiltro (relação 100 C:5 N:1 P). Uma relação de C:N baixa favorece um aumento das emissões de NH₃ especialmente em temperaturas de compostagem e taxas de aeração

altas. Em relações de C:N de > 25 , as emissões de NH_3 e de N_2O são consideravelmente reduzidas, e em relações de > 35 , a adição de amônia como nutriente pode se tornar necessário para promover a continuação do processo de compostagem.

As taxas de separação do NH_3 em biofiltros podem variar bastante, tanto mais que as dependências e os efeitos colaterais com a degradação de compostos de carbono ainda não foram completamente esclarecidos. Porém, os processos de transformação de NH_3 resultam em consideráveis emissões secundárias de NO e N_2O . A instalação de um processo de lavagem ácida em contracorrente, por exemplo com ácido sulfúrico como solução de lavagem, pode regular seguramente as concentrações de NH_3 no gás para valores de $< 5 \text{ mg/m}^3$.

3.7 Óxido Nitroso (N_2O)

Também como na compostagem de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, o ar de processo do TMB, com processos de compostagem intensiva, contem concentrações de N_2O de entre 10 g/t e 50 g/t de material. No ar exaurido tratado, as cargas de N_2O são geralmente mais altas, dependendo das concentrações de gás amoníaco e de N orgânico nas instalações de tratamento do ar exaurido (biofiltros); porém, dados confiáveis da prática não são disponíveis. Como a maior formação de N_2O ocorre no final do processo de compostagem, supõe-se que as cargas de N_2O aumentem de acordo com o tempo de compostagem em sistema fechado. A formação de N_2O pode ser prevenida através da remoção mais completa possível do NH_3 no início do processo de compostagem. A separação do gás amoníaco antes dos biofiltros resulta na minimização de emissões adicionais de N_2O . O ar exaurido da área de entrega e do pré-tratamento dos resíduos geralmente apresenta baixas concentrações de N_2O ($< 3 \text{ mg/m}^3$, $< 2 \text{ g/t}$ de resíduos entregues, concentração de fundo: $0,6 \text{ mg/m}^3$).

Na compostagem exclusivamente de materiais biogênicos, o nexa entre a relação C:N e as emissões de N_2O observadas ficou aparente. Em relações C:N amplas (> 25), o nitrogênio liberado pela degradação microbiana da biomassa, presente em forma de amônia (NH_4^+), é consumido pelos micro-organismos para seu crescimento. Portanto, a fuga de nitrogênio em forma gasosa é pequena. O nitrato que se formou mesmo assim nas leiras, e reduzido quase completamente para a forma elementar de nitrogênio, devido à baixa disponibilidade de oxigênio a alta concentração de carbono de fácil disponibilidade durante a fase intensiva do processo de compostagem.

Com a redução das quantidades de carbono de fácil disponibilidade, por exemplo depois da fase intensiva do processo de compostagem, a atividade microbiana também é reduzida. A biomassa microbiana não pode mais absorver as quantidades de nitrogênio mineral ainda presentes e o nitrogênio liberado adicionalmente, resultando em emissões gasosas na forma de gás amoníaco (NH_3) ou de óxido nitroso (N_2O), na nitrificação da amônia através do nitrito para o nitrato. As relações de C:N < 17 resultaram em emissões elevadas de N_2O , dependendo do material tratado.

As emissões de N_2O ocorrem na faixa de temperaturas $< 45 \text{ }^\circ\text{C}$, as maiores concentrações de N_2O são observadas nas leiras, a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Maiores emissões de N_2O ocorrem na segunda fase

mesofílica, depois da degradação da maior parte dos compostos de carbono. Portanto, a formação de N_2O na fase de maturação, e com isso, os efeitos ambientais negativos podem ser prevenidos apenas através do ajuste da relação C:N ou por outras medidas operacionais. A possibilidade de ajustar a relação C:N é limitada devido à composição dos resíduos entregues. A remoção antecipada do gás amoníaco na fase termofílica da compostagem aumenta a relação C:N e resulta na mitigação eficiente das emissões de N_2O no pós-tratamento/maturação.

3.8 Tendências e Resultados de Medições de Emissões

As Tabelas 2a e 2b apresentam as influências dos parâmetros de processo nas emissões de uma planta de TMB. Os efeitos da alteração de parâmetros de processo relevantes são apresentados qualitativamente (maior / menor), como tendências. As emissões são expressas como concentrações e fatores de emissão, e agrupadas, por meio de dados empíricos, em faixas de emissão baixas, médias e altas. O valor geral para a demanda de ar de processo, considerado para os cálculos de concentrações e fatores de emissão, foi determinado em $10.000 \text{ m}^3/\text{Mg}$.

Tabela 2a – Influência de parâmetros de processo para a quantidade de emissões de uma planta de tratamento mecânico-biológico (↑: maior; ↓: menor)

Componente	Emissão causada por	Quantidades baixas – fator de concentração*
Particulados	secagem ↑, umidade ↓	< $1 \text{ mg}/\text{m}^3$
Odores	maturação ↑, resíduos biodegradáveis ↑, umidade ↑	< $300 \text{ UO}/\text{m}^3$
Micro-organismos	atividade microbiana ↑, movimentação ↑, agitação ↑	< $10^4 \text{ UFC}/\text{m}^3$
COV micro-biológico	atividade microbiana ↑, temperatura ↑, fluxo de ar ↑	< $50 \text{ mg}/\text{m}^3$, < $500 \text{ mg}/\text{Mg}_{\text{in}}$
NH_3	relação C:N ↓, pH ↑, temperatura ↑	< $50 \text{ mg}/\text{m}^3$, < $500 \text{ g}/\text{Mg}_{\text{in}}$
CH_4	BA, disponibilidade de O_2 ↓, porosidade do gás ↓, estrutura ↓, umidade ↑	< $50 \text{ mg}/\text{m}^3$, < $500 \text{ g}/\text{Mg}_{\text{in}}$ BA: < $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ BA: < $2.000 \text{ g}/\text{Mg}_{\text{in}}$
N_2O	relação C:N ↓, temperatura < $45 \text{ }^\circ\text{C}$	< $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, < $20 \text{ g}/\text{Mg}_{\text{in}}$

* Volume de ar assumido para os cálculos: $10.000 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{in}}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Tabela 2b – Influência de parâmetros de processo para a quantidade de emissões de uma planta de tratamento mecânico-biológico (↑: maior; ↓: menor)

Componente	Quantidades médias – fator de concentração*	Quantidades altas – fator de concentração*
Particulados	10 mg/m ³	> 20 mg/m ³
Odores	500 UO/m ³ (= valor limite para o ar exaurido)	> 1.000 UO/m ³
Micro-organismos	10 ⁵ UFC /m ³ (fungos, por exemplo <i>aspergillus!</i>)	> 10 ⁶ UFC /m ³
COV micro-biológico	100 mg/m ³ , 1.000 g/Mg _{in}	> 200 mg/m ³ , > 2.000 g/Mg _{in}
NH ₃	100 mg/m ³ , 1.000 g/Mg _{in}	> 200 mg/m ³ , > 2.000 g/Mg _{in}
CH ₄	50-100 mg/m ³ , 500-1.000 g/Mg _{in} BA: 200 mg/m ³ BA: 2.000 g/Mg _{in}	> 100 mg/m ³ , > 1.000 g/Mg _{in} BA: > 200 mg/m ³ , BA: > 2.000 g/Mg _{in}
N ₂ O	5 mg/m ³ , 50 g/Mg _{in}	> 10 mg/m ³ , > 100 g/Mg _{in}

* Volume de ar assumido para os cálculos: 10.000 m³/Mg_{in}

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

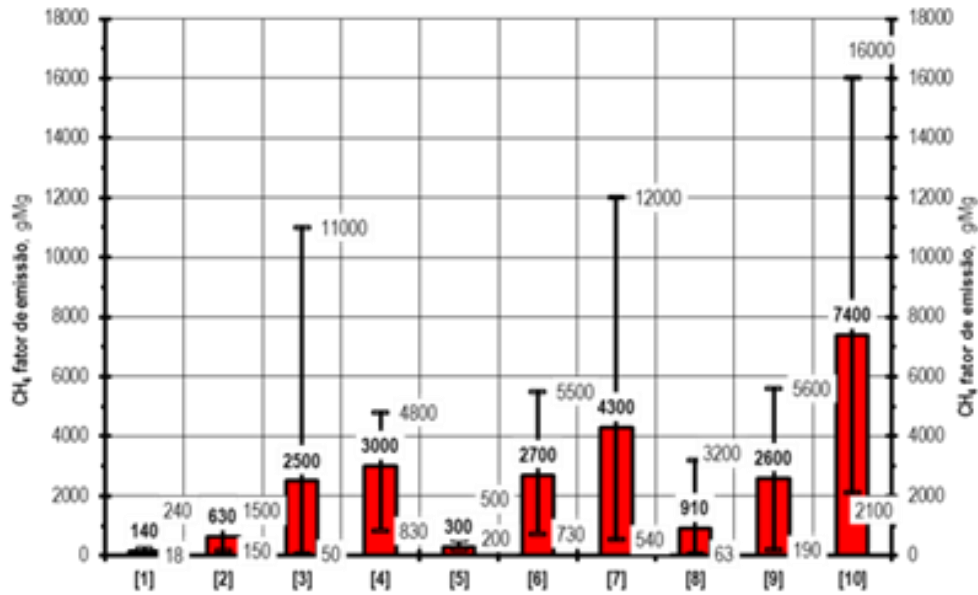
O parâmetro mais importante de cada componente é mostrado nas Tabelas 2a e 2b. A emissão do componente relevante aumenta se o parâmetro aumenta ↑ ou diminui ↓. Estas observações podem ser utilizadas como tendências, derivadas de experiências feitas na Alemanha.

Em seguida são apresentados os resultados dos componentes relevantes de uma variedade de análises de emissões, realizadas em plantas de tratamento biológico. Foram escolhidas para participar plantas representativas em escala industrial com instalação das seguintes tecnologias / tipos de processo e operação:

- **Tipo [1]:** apenas tratamento mecânico (TM);
- **Tipos [2], [3], [4]:** TM, tratamento aeróbio (TA) com aeração forçada, por diferentes tempos (de 2 a 8 semanas),
- **Tipo [5]:** TA coberto, com aeração forçada;
- **Tipos [6], [7]:** TA (compostagem em leiras abertas, resíduos orgânicos e de paisagismo);
- **Tipo [8]:** apenas TM e BA (biodigestão anaeróbia);
- **Tipo [9]:** TM e BA + pós-TA;
- **Tipo [10]:** TM e BA + pós-TA em leiras abertas.

A Figura 3 apresenta os resultados das medições de emissões de metano de dez diferentes tipos de plantas de tratamento biológico.

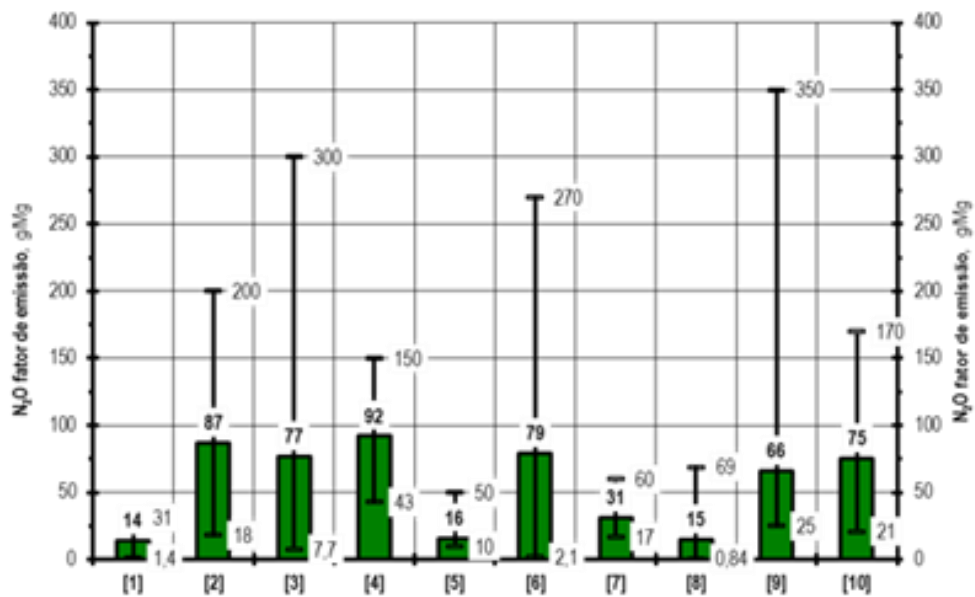
Figura 3 – Emissões de metano de diferentes plantas de tratamento mecânico-biológico



Fonte: Cuhls, Mähl e Clemens (2014).

A Figura 4 mostra os resultados das medições de emissões de N₂O em dez tipos diferentes de plantas de tratamento biológico.

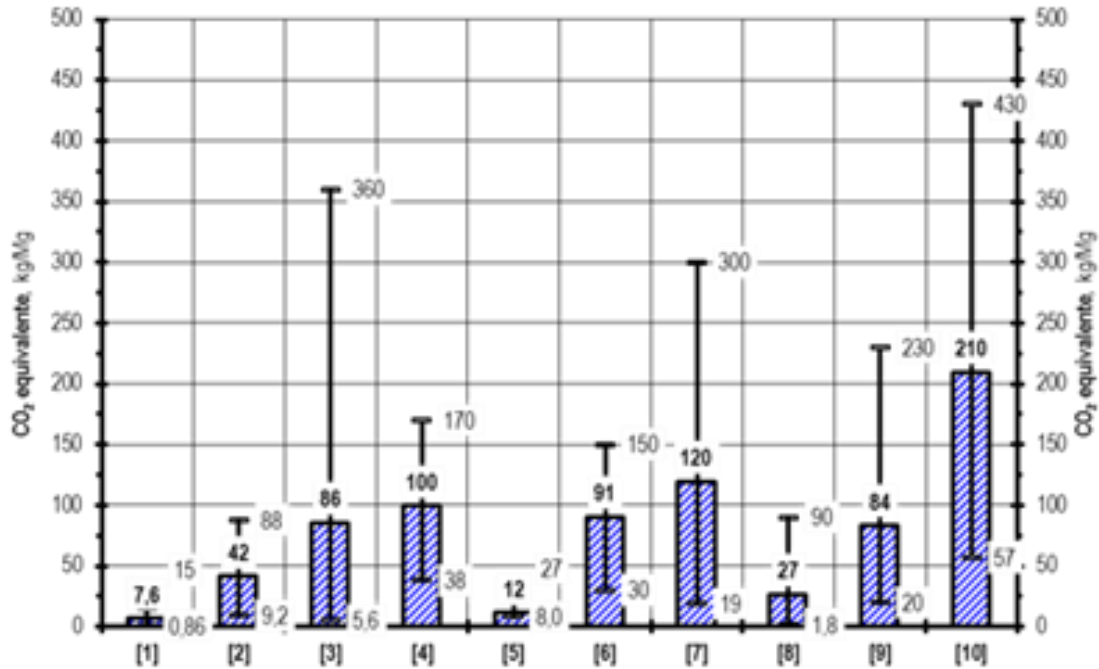
Figura 4 – Emissões de N₂O de diferentes plantas de tratamento mecânico-biológico



Fonte: Cuhls, Mähl e Clemens (2014).

A Figura 5 mostra os resultados das medições para CO₂-eq (calculado com base nas emissões de CH₄ e N₂O), em dez tipos diferentes de plantas de tratamento biológico.

Figura 5 – Emissões de CO₂-eq de diferentes plantas de tratamento mecânico-biológico



Fonte: Cuhls, Mähl e Clemens (2014).

Cabe ressaltar que, em todos os tipos de plantas de TMB, grandes amplitudes entre os valores de emissão mais baixos e mais altos foram encontradas (fator 10). Existem emissões baixas em todos os tipos de processos, com exceção do tipo 10, biodigestão anaeróbia com pós-tratamento em leiras abertas. Portanto, em plantas com tratamento anaeróbio, as etapas de pós-tratamento aeróbio devem ser equipadas com um sistema de aeração forçada (“aerobização”) e captação do ar exaurido, para que a alteração do metabolismo dos micro-organismos no pós-tratamento, para a respiração de oxigênio, ocorra rapidamente e a formação contínua de metano seja inibida.

Existem, porém, também emissões altas nos tipos aeróbios bem como, nos anaeróbios. Estes casos demonstram a necessidade de otimização operacional: melhorias das propriedades do material (estrutura, porosidade, umidade), de geometria das leiras (triangular, trapezoide, medas planas), relação superfície/volume, manejo da aeração forçada, intensidade de reviramento.

A instalação de tecnologia de ponta não é garantia para emissões baixas. A existência de um sistema de aeração forçada por exemplo ajuda no tratamento de materiais difíceis. Os estudos mostraram que, com aplicação das boas práticas, os tratamentos mais simples também podem resultar em emissões baixas.

4 REDUÇÃO, CONTROLE E VALORES-LIMITES DE EMISSÕES

Além da quantidade de emissão prevista no processo de licenciamento da planta TMB, é necessário prever a situação da emissão de odor e ruído em relação à comunidade do entorno, devendo estes serem calculados segundo o modelo de propagação. Após início da operação da planta, estes impactos devem ser medidos e certificados.

4.1 Tratamento Químico do Ar Exaurido / Lavagem Ácida

Os sistemas de tratamento do ar exaurido por lavagem ácida são implantados para a remoção de gás amoníaco (NH_3) e para assegurar o cumprimento da concentração permissível de substâncias odoríferas no fluxo de ar exaurido. Além disso, o sistema de lavagem química protege os processos de tratamento a jusante, como os biofiltros. Um excesso de gás amoníaco ou de gás sulfúrico no ar exaurido resulta na acidificação do material no biofiltro e na inibição do seu funcionamento. A minimização das emissões de N_2O depende da remoção tanto quanto possível, do gás amoníaco, pois a nitrificação no biofiltro resulta na formação de N_2O (Figura 6).

Figura 6 – Lavagem ácida (primeiro: pequeno / segundo: grande, com armazenamento para o sulfato de amônia e para o ácido sulfúrico)



Fonte: Arquivo do autor [foto: Carsten Cuhls].

O tratamento químico do ar exaurido consiste na absorção em uma ou mais fases com lavadores químicos, em colunas contendo material inerte operadas em contracorrente (Figura 7).

Em plantas de TMB, dois processos diferentes são aplicados como pré-tratamento antes do tratamento biológico ou térmico:

- Lavagem ácida para a remoção do gás amoníaco;
- Lavagem alcalina-oxidativa para a absorção do gás sulfúrico.

Figura 7 – Biofiltro aberto utilizado no tratamento mecânico-biológico



Fonte: Arquivo do autor [foto: Carsten Cuhls].

A lavagem alcalina para a remoção de H_2S , em combinação com a lavagem oxidativa, geralmente H_2O_2 é utilizado. Em processos de lavagem por absorção com ácidos ou soluções alcalinas, a dosagem das substâncias químicas ocorre através do controle do pH em cada fase. O grau de remoção pode ser controlado através do ajuste do pH. Segundo as experiências disponíveis, a eficiência de remoção do gás amoníaco, em sistema contracorrente e valores de pH entre 3 a 5, é de $> 90\%$. O ajuste do pH se orienta nas concentrações do gás amoníaco de fato presentes. As concentrações de gás amoníaco, depois da lavagem ácida não devem ultrapassar valores de 5 mg/m^3 a 10 mg/m^3 .

O objetivo da remoção do gás amoníaco por meio de um sistema de lavagem, além da obtenção de altas eficiências na remoção, é a obtenção de um produto líquido que pode ser comercializado. O produto químico empregado geralmente é ácido sulfúrico. A reação química com o gás amoníaco resulta na produção de sulfato de amônia, que pode ser utilizado como fertilizante.

A produção de um fertilizante com teores de $8\% \text{ N}$ e 9% exige pré-requisitos mecânicos e de medição e controle os quais devem ser instalados antes respectivamente no próprio sistema de lavagem. A entrada de condensado para os lavadores deve ser inibida ou reduzida por

separadores mecânicos instalados antes do lavador, se necessário. A retirada do produto dos lavadores, com concentração mais alta possível, é monitorada e controlada por sistemas de medição adequados (medição da densidade e da condutividade). Em certos casos, a neutralização pode ser necessária.

A realimentação da água de lavagem rica em nitrogênio, para a irrigação na compostagem, é contrária ao objetivo do tratamento, da obtenção de uma ampla relação C:N e deve ser recusada. Além disso, a utilização dessa água para a compostagem resulta no aumento da concentração de sais minerais, e o material destinado à deposição em aterro contém componentes de fácil lixiviação, contendo nitrogênio e enxofre, que são nocivos para o ambiente. Como consequência, o chorume do aterro pode ser contaminado a longo prazo com estes componentes.

4.2 Tratamento Biológico do Ar Exaurido

Figura 8 – Biofiltro fechado (contêineres) para o tratamento mecânico-biológico



Fonte: Arquivo do autor [foto: Carsten Cuhls].

O estado da arte nas plantas de TMB compreende instalações para o tratamento biológico do ar exaurido, ou seja, biofiltros ou a lavagem biológica. Os biofiltros em combinação com umidificadores instalados antes deles, são utilizados para o tratamento de fluxos de ar exaurido pobres em metano e gás amoníaco, originando das áreas de entrega, do pré-tratamento mecânico e do pós-tratamento. O tratamento de fluxos de ar de processo originando da compostagem intensiva e do pós-tratamento de resíduos da biodigestão anaeróbia precisa ser conduzido por meio de um sistema de lavagem ácida instalado antes do biofiltro, para a remoção do gás amoníaco. Os biofiltros são eficientes na remoção de substâncias odoríferas bem como, nocivas.

Os biofiltros podem ser construídos de forma aberta (Figura 7) ou em forma de contêiner (Figura 8).

4.3 Dimensionamento dos Biofiltros

Na Alemanha, o dimensionamento, operação e manutenção de instalações para o tratamento de fluxos de ar e gases é regulamentado por diretivas. O dimensionamento de biofiltros se orienta com o fluxo de volume, a concentração esperada de substâncias odoríferas e nocivas nos fluxos brutos e das possíveis amplitudes de variação. Outro fator determinante para o dimensionamento da área de filtro e seu volume é o tipo e a composição do material filtrante.

Tabela 3 – Eficiência de sistemas biológicos de tratamento de fluxos gasosos na remoção de diferentes classes de substâncias

Classes de substâncias	Eficiência do biofiltro em %
Álcoois (Etanol)	100
Aldeídos (Aldeído acético)	100
Alcenos	100
Ácidos carboxílicos	100
Cetonas (2-Butanon, Acetona)	98
Terpenes, terpenoídes (Limoneno)	85
Alcanos (C6 – C13)	81
Compostos orgânicos de enxofre	81
Furanos	70
Aromáticos (BTEX)	67
CFC, HCFC	< 40
Metano	< 20
Σ COV	89

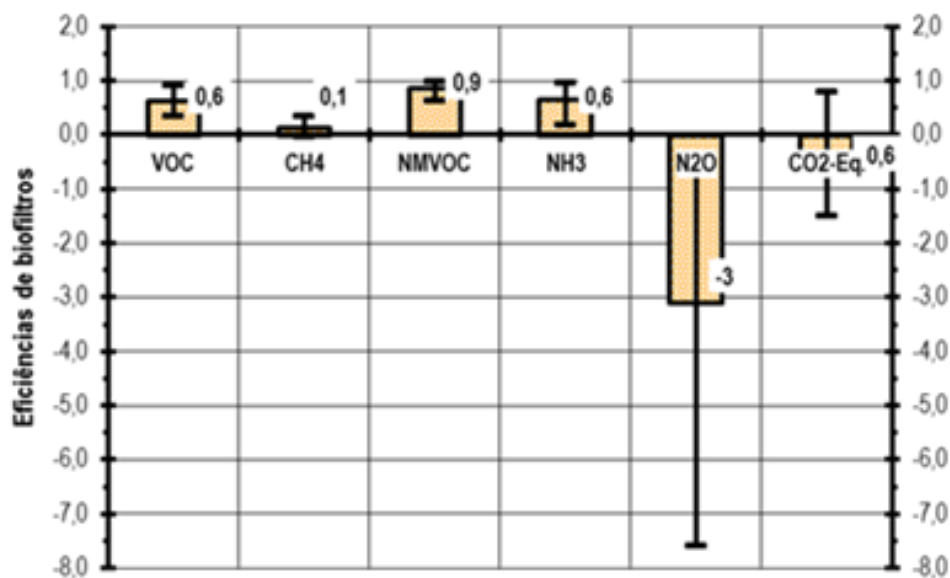
Fonte: VDI-Richtlinie 3475 Blatt 3.

A carga de fluxo gasoso por volume de filtro e hora realizada em biofiltros instalados foi de 50 m³ a 70 m³ por m³ de filtro e hora [m³/(m³ × h)]. Essas cargas comparativamente baixas se devem ao fato que, além de substâncias odoríferas, também substâncias nocivas devem ser removidas, as quais precisam de tempos de reação mais prolongados. O volume do filtro deve ser adaptado correspondentemente.

Os processos biológicos de tratamento podem reduzir as substâncias contidas nos fluxos gasosos parcialmente e de várias maneiras, porém, a aplicabilidade universal dos biofiltros não pode

ser derivada. A Tabela 3 mostra os resultados de medições conduzidas em biofiltros instalados em plantas de compostagem, com apresentação das substâncias orgânicas representativas (COV) para o ar exaurido do TMB.

Figura 9 – Biofiltro – eficiência, $n > 40$ plantas



Fonte: Cuhls, Mähl e Clemens (2014).

As taxas de degradação dos COVNM analisados (carbono orgânico sem metano) se encontram em aproximadamente 90%; para o metano foram observadas taxas de remoção entre 0% a 20%, na média, apenas 10%. A eficiência dos biofiltros na remoção de certas substâncias contidas nos fluxos gasosos é alta, especialmente para substâncias de fácil decomposição biológica como por exemplo 2-butanon, acetona, aldeído acético e etanol. Estas substâncias constituem a maior parte da carga de COVNM. Taxas de decomposição moderadas foram observadas para os BTEX (benzol, toluol, etilbenzol, xilol) e reduções insignificantes para os CFC (clorofluorcarbonos de alta volatilidade) e HCFC (Hidroclorofluorcarbonos). A concentração somada de todos os hidrocarbonetos observados (COT = COV + metano) foi reduzida pelos biofiltros com eficiências de, em média, 60% (Figura 9). Com relação à formação de N₂O nos biofiltros, enfatiza-se a importância da remoção preventiva do gás amoníaco por lavagem ácida, antes do biofiltro.

Conforme a diretiva europeia sobre emissões industriais (IED) e os documentos de referência (BREF) associados, o ar de processo de reatores e leiras aeradas de compostagem no TMB deve ser enviado para uma instalação de tratamento destes fluxos gasosos. Os valores para as unidades de odor (UO) no ar tratado não podem ultrapassar 500 UO/m³. Os biofiltros são instrumentos apropriados para o controle de emissões e se constituem em um dos métodos mais aplicados para o tratamento e fluxos gasosos do tratamento biológico de resíduos. O valor de < 500 UO/m³ pode ser mantido seguramente em biofiltros devidamente operados.

5 CONCLUSÕES

A aceitação do tratamento biológico de resíduos, a proteção da vizinhança e a proteção do clima dependem de medidas apropriadas para a prevenção de emissões. As emissões típicas mais impactantes de plantas de TMB são:

- Particulados,
- Odores,
- COV,
- NH₃,
- GEE (CH₄ e N₂O).

Sistemas fechados e a captação das emissões das etapas de tratamento intensivo (pré-tratamento mecânico e o processo biológico intensivo) bem como, o tratamento do ar exaurido são componentes importantes de uma instalação sujeita ao licenciamento. As emissões relevantes para o clima de CO₂-eq se somam em aproximadamente 70 kg a 80 kg por tonelada de resíduos, e emissões de CO₂-eq > 100 kg/t apontam para um potencial de otimização na operação da planta. O equipamento técnico por si só não é uma garantia para emissões baixas. Plantas com baixo nível tecnológico também são capazes de manter as emissões em um nível baixo. As propriedades dos resíduos, a mistura correta e a operação apropriada, de acordo com as boas práticas, têm um papel decisivo.

Nas etapas de processo mais intensivas, especialmente com integração de etapas anaeróbias, são empregados a lavagem ácida, para a remoção do gás amoníaco, em combinação com biofiltros. O produto da lavagem ácida (solução de sulfato de amônia) tem aplicação como fertilizante na agricultura. Em etapas biológicas extensivas, o biofiltro pode ser suficiente para o tratamento do ar exaurido, ou a captação e o tratamento do ar exaurido é dispensado totalmente. Isso depende do local da planta de TMB e a probabilidade da propagação de odores desagradáveis.

Os biofiltros têm uma boa ação contra odores e COVNM. O valor limite legal, de < 500 UO/m³ é mantido com segurança. A taxa de degradação de COVNM é de até 90%. Infelizmente, os biofiltros não são eficientes na remoção de metano contido no ar exaurido e na remoção do N₂O. Este último, aliás, é gerado nos próprios biofiltros como coproduto da nitrificação. Portanto, a prevenção destes dois gases deve ser efetuada por medidas apropriadas no tratamento biológico.

REFERÊNCIAS

ALEMANHA. Lei sobre a proteção contra emissões. **BImSchG German Federal Immission Control Act** (BImSchG) (BundesImmissionschutzGesetz). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, German Federal Immission Control Act (BImSchG) vom 15.03.1974, letzte Änderung 11.2014.

BREF (2015/16). Disponível em: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ofc_bref_0806.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2015.

CUHLS, Carsten; MÄHL, Birte; CLEMENS, Joachim. **Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen**. Forschungsbericht Umweltbundesamt, 2014.

IED – Industry Emission Directive (IED) of the European parliament and council (Diretiva nº 2010/75/EC do Parlamento Europeu e do Conselho). Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC, 2008/1/EC) and Industry Emission Directive (IED, 2010/75/EC) of the European parliament and council. **Lei sobre a Avaliação de Impactos Ambientais**, UVP, Diretiva Europeia sobre Emissões Industriais, IED. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:en:PDF>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

VDI-Richtlinie 3475 Blatt 3. **Emissionsminderung – Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen**. Emission Control, MBT facilities for MSW, December 2006 (Verein Deutscher Ingenieure), Düsseldorf, 2006. Disponível em: <<http://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3475-blatt-3/90369310>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

CUHLS, Carsten. Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maior – 2017**.

Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos

*Lessons Learned on the Way to Realize Anaerobic
Digestion Plants and Other Waste Treatment Plants*

Engenheiro Civil Theo Schneider

Engenheiro Civil Herbert Beywinkler

RESUMO

No presente trabalho nós apresentamos um pequeno resumo relacionado à experiência de mais de vinte anos em planejamento, construção e operação de plantas de tratamento de resíduos, como as de tratamento mecânico-biológico (TMB), digestão anaeróbia (DA) e de plantas de compostagem, que vão desde um pequeno contêiner de DA com 14.000 t/a até grandes plantas de DA de fermentação à seco com capacidade de 120.000 t/a como parte de planta de TMB com 200.000 t/a até várias plantas de compostagem com diferentes capacidades e tecnologias como a de 600.000 t/a para planta de tratamento mecânico em Istambul. A digestão anaeróbia, tanto de resíduos sólidos urbanos como da fração orgânica proveniente da coleta seletiva de orgânicos, é um tratamento que, com ou sem a separação da fração orgânica coletada do município, oferece a possibilidade de redução de impactos ambientais devido às emissões provenientes dos aterros sanitários, além de ser uma valiosa fonte de produção de energia a partir de frações úmidas dos resíduos. A digestão anaeróbia requer a integração de conceitos de gestão dos resíduos locais e uma clara ideia de onde se quer chegar e qual o procedimento a ser seguido para que se atinjam os objetivos. Plantas de DA e outras plantas de tratamento de resíduos requerem uma adequada preparação de projetos, assim como cuidados na construção e na operação das plantas. Os erros que ocorrem principalmente durante a fase conceitual, podem levar à ineficiência da planta, problemas técnicos e a custos altíssimos. Integração estrutural em um conceito de gestão de resíduos regional é a primeira meta básica. Uma visão clara e um conceito realista em relação às operações da futura planta é a segunda meta a ser alcançada. A experiência e o conhecimento prático durante todas as fases de preparação e construção de uma planta de DA é a terceira meta. Normalmente, há diversos tipos de diferentes tecnologias e inúmeros fornecedores disponíveis no mercado, cada qual oferecendo suas soluções. Mas as plantas com melhores desempenhos são àquelas baseadas em soluções inteligentes e planejadas sob medida. Como nem tudo pode ser previsto durante a execução de um contrato, uma alta flexibilidade e comprometimento são exigidos. Quanto mais um contrato direcionar a responsabilidade dos riscos aos fornecedores, maiores serão os custos esperados dentro da proposta em questão. Profissionais bem treinados,

dispostos a aprender constantemente e capazes de otimizar as operações da planta, devem estar presentes, a fim de manter a rentabilidade da planta e uma performance eficiente.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Proteção Ambiental. Operação da planta. Conceitos realistas. Eficiência energética.

ABSTRACT

Within this paper we present a short summary based on more than 20 years' experience in planning and follow up of decision-making processes, approval procedures, construction and operation of waste treatment plants, such as MBT, anaerobic digestion (AD) and composting plants, from small 14.000 Mg/y container AD-plant to large 120.000 Mg/y dry fermentation AD-plant, as part of 200.000 Mg/y MBT, from composting plants with different capacities and technologies up to a 600.000 Mg/y Mechanical Treatment plant in Istanbul and operation experience with interfaces to incineration and waste-to-energy (WTE) plants. Anaerobic digestion (AD) of either municipal solid waste or separately collected organic fraction from municipal is a treatment, which offers its share to reduce climate threats from landfill emissions as well as valuable source of energy production from wet waste fractions. Anaerobic digestion requires integration into local waste management concepts and a clear vision of where to go and how to reach the goals. Anaerobic digestion of waste fractions requires proper project-preparation, project-construction and operation of the facility. Mainly the mistakes done during the conceptual phase could lead into inefficiency, technical problems and towering costs. Structural integration into a regional waste management concept is the first baseline. A clear view and realistic concept of later plant operations is the second baseline to reach. The presence of experience and know-how during all phases of preparation and realisation of an AD-plant is the third baseline. Usually there are a lot of different technologies and numbers of possible suppliers available on the market and offering their solutions. But it can be seen that best performing facilities are based on smart and tailormade solutions. As not everything can be foreseen during execution of a contract, high flexibility and compromises are requested. The more a contract is shifting all the risk to suppliers side the higher costs within the proposals must be expected. For smart plant performance and keeping the value of an installation, professional and well educated, trained staff must be present which is willing to learn permanently and able to optimise the facility.

Keywords: Anaerobic digestion. Climate protection. Plant operation. Realistic concepts. Energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO: MOTIVAÇÃO

A digestão anaeróbia (DA), tanto de resíduos sólidos urbanos como da fração orgânica proveniente da coleta seletiva urbana, é um tratamento que, com ou sem a separação da fração orgânica coletada do município, tem atraído muita atenção durante os últimos anos.

Três fatores principais podem ser citados:

1. Proteção Ambiental;
2. Cumprimentos dos objetivos e diretrizes da UE relacionados com o manejo de resíduos (ver Figura 1); e,

3. Fluxos de resíduos com maiores teores de umidade.

Sob o aspecto de proteção ambiental, os processos de fermentação em plantas de DA são favorecidos pela separação da fração orgânica (úmida), especialmente se o biogás recuperado for posteriormente utilizado. As plantas que apresentam as melhores performances, não produzem apenas eletricidade, mas também utilizam o calor gerado nos circuitos de refrigeração da água e aquecimento dos gases de exaustão. Os motores com melhores desempenhos podem atingir mais de 40% de eficiência elétrica (coeficiente: entrada total de energia / eletricidade). Caso, se adicionalmente, o calor possa ser utilizado, a eficiência pode chegar a 80%! Com o adicional de equipamentos especiais, como o processo Ciclo Orgânico de Rankine (COR), a geração de eletricidade também pode aumentar em torno de mais de 45%.

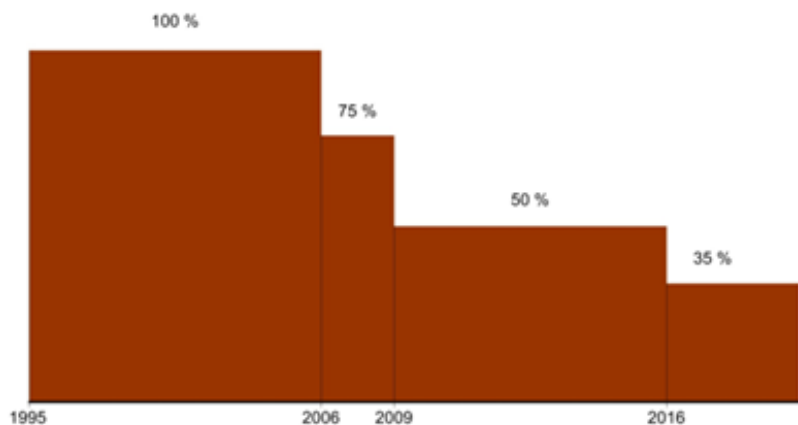
Entretanto, as exigências da tecnologia do processo, assim como as exigências subsequentes de operação da planta de DA, são maiores no que se diz respeito à proteção ambiental. Dessa forma, caso se deseje evitar o impacto ambiental, o tratamento de ar com “lavadores” de ácidos e biofiltros devem fazer parte da planta de DA.

Como a proteção ambiental é prioridade em quase todos os governos do mundo, as plantas de DA, quando bem construídas e bem operadas e quando usam equipamentos do estado-da-arte para a redução da emissão de gases, são consideradas como uma solução adequada para se reduzir as emissões de metano provenientes dos aterros sanitários. Alguns projetos de plantas de DA de diferentes países têm demonstrado que apenas possuir uma tecnologia promissora não é suficiente por si só para garantir a operação da planta. Para se implementar e operar uma planta de DA com a capacidade de mais de dez mil toneladas por ano é necessário muito mais que conhecimento técnico, um financiamento adequado e recursos humanos, exigências estas maiores do que as identificadas durante a simples operação de um aterro ou de um lixão.

Figura 1 – Limitações para o aterramento de fração biodegradável conforme Portaria da UE de Aterro

Limitações para aterramento em aterros

Redução da biodegradabilidade dos resíduos conforme Diretiva 1999/31/EC, art. 5 para os aterros de resíduos



Fonte: Directiva 1999/31/CE.

2 REQUISITOS PARA IMPLANTAÇÃO EXITOSA DE UMA PLANTA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA E OUTRAS PLANTAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS

O planejamento, a construção e operação de plantas de tratamento de resíduos, como as de tratamento mecânico-biológico (TMB), digestão anaeróbia (DA) e de plantas de compostagem, requer a integração de conceitos de gestão dos resíduos locais e uma clara ideia de onde se quer chegar e qual o procedimento a ser seguido para que se atinjam os objetivos firmados. Plantas de DA e outras plantas de tratamento de resíduos requerem um adequado planejamento, assim como cuidados na construção e na operação das plantas.

2.1 Integração Estrutural

Uma integração entre as estruturas regionais e os conceitos de gestão de resíduos é obrigatória. Isto exige a identificação da quantidade de resíduos relevantes, assim como um bom processo para a escolha do local de instalação da planta de DA. Um dos principais erros que podem ocorrer no início, antes de qualquer consideração, é o de não se realizar repetidas campanhas de gravimetria para medição das quantidades e qualidade dos resíduos. Se não forem fornecidas informações suficientes para os engenheiros, a planta poderá ser dimensionada de forma errônea e certamente irão surgir problemas.

Normalmente, plantas de DA produzem mais energia do que consomem. A venda de energia é um dos fatores chave para a rentabilidade econômica e ambiental. Os requisitos técnicos, financeiros e contratuais também devem ser totalmente preenchidos.

Na Figura 2 é ilustrada uma representação simplificada desses requisitos. Apenas se o conceito e a implementação respeitarem as exigências requeridas para a operação de uma planta de DA, então uma contribuição razoável e sustentável para o sistema global de gestão de resíduos será atingida.

Figura 2 – Requisitos relevantes no planejamento e na construção de plantas de DA



Fonte: Schneider e Beywinkler (2013, p. 104).

2.1.1 Política Geral e Integração Estrutural

A gestão de resíduos tem como objetivo minimizar o potencial de impactos negativos dessas atividades, no meio ambiente e na saúde humana. A gestão de resíduos visa o uso de materiais de forma mais eficiente. No nível municipal, o objetivo é certamente o de dissociar a atividade econômica da quantidade de resíduos. Com uma gestão de resíduos sem medidas de mitigação, sem a separação de diferentes frações e sem a reciclagem, os resíduos biológicos e a reciclagem de resíduos verdes não são considerados sustentáveis. Entretanto, nem tudo que hoje em dia é chamado de recuperação, é realmente sustentável. Portanto, plantas de DA e qualquer outro tratamento / planta de reciclagem de resíduos, devem ser integradas nos vários níveis de um sistema estruturado.

A gestão de resíduos é (uma parte da) proteção ambiental e requer, também – um conceito de gestão de resíduos devidamente organizado. O desenvolvimento dos preços no mercado mundial é:

[...] por um lado o aumento dos preços de matéria-prima, da energia e da disposição de resíduos (tecnologia relacionada), e por outro lado o fomento para uma economia circular moderna, por exemplo, o aumento da produtividade econômica dos recursos. (JARON, 2006; TAKAG 1, p. 24, tradução livre dos autores)

A definição e o estabelecimento de um sistema de trabalho para o financiamento de medidas de gestão de resíduos é uma tarefa política. Transparência e justiça no cálculo dos futuros custos são necessárias para que se alcance um melhor entendimento e o aceite da população e de outros clientes. Pró-atividade, prévia comunicação e disponibilidade de informações para todos os níveis sociais envolvidos ajudam a manter a população (e os vizinhos) a sentirem-se bem e evita-se assim, ações públicas de rejeição do projeto.

A implementação da Portaria da UE relacionada aos resíduos será uma pré-condição em todos os países da UE e também daqueles que estão buscando a sua adesão dentro dessa União. Para outros países será uma oportunidade e um marco de orientação para o desenvolvimento de incentivos transparentes, incluindo os incentivos financeiros para a prevenção e reciclagem dos resíduos.

Tese I: O quadro político geral determina quais as possibilidades de projetos existentes para a gestão de resíduos (como parte da proteção ambiental). Isso inclui a orientação dos incentivos financeiros para as ações alvo de gestão dos resíduos.

2.1.2 Conceito de gestão de resíduos

Conceitos regionais de gestão de resíduos estão situados em outro nível. Como elementos essenciais de tais conceitos, são considerados:

- Banco de dados sobre a quantidade e composição dos resíduos;

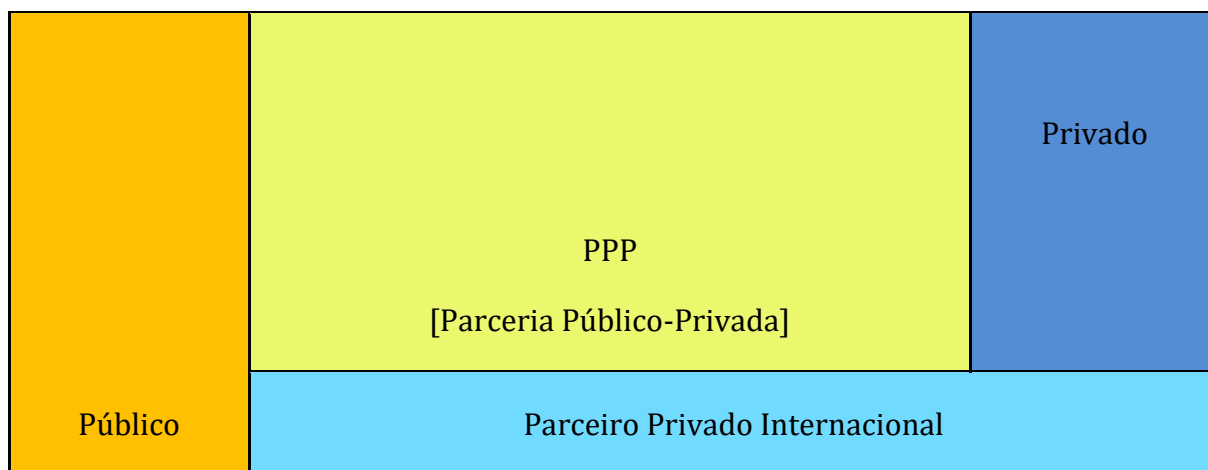
- Metas a serem alcançadas nos próximos cinco anos;
 - (individual) As avaliações podem incluir, por exemplo, a construção ou o desenvolvimento dos seguintes elementos:
 - O estabelecimento de um sistema eficaz de coleta de resíduos de materiais recicláveis e dos rejeitos;
 - Uma estimativa da quantidade de resíduos a serem evitados, reciclados e tratados;
 - Um programa de comunicação e de relações públicas para os próximos anos.
 - Para um programa de trabalho e um compromisso das partes interessadas, etapas intermediárias ou elementos individuais são recomendados para estruturar toda a ação dentro do tempo programado.
- Tese II:** Sem um conceito de gestão de resíduos para cada área de atuação (cidade, região ou distrito) ocorrerá a falta de definição de contexto e de orientação para medidas individuais de gestão de resíduos.

2.1.3 Conceito Operacional e Financeiro

Para um investimento sustentável é necessário esclarecer o modelo de operação e também a antecipação do refinanciamento.

- Quem irá operar a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?
- Quem será o responsável pela construção da planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos?

Figura 3 – Possíveis grupos de operadores



Fonte: Schneider (2008).

A Figura 3 mostra modelos de operação que vão do puramente privado às operações de capitalização puramente públicas. Dentro da Parceria Público-Privada (PPP) existem muitos

modelos de colaboração estruturados de diferentes formas. Questões sobre investimento e modelos operacionais de plantas de DA ou outras plantas de tratamento de resíduos, podem levar em consideração empresas internacionais como parte de tais modelos. As vantagens e desvantagens de tais modelos são encontradas em um grande número de publicações sobre esse assunto (e.g. BMWi, 2004).

Na fase inicial, deve-se esclarecer se a instalação será refinanciada através de taxas (ou outros sistemas similares) ou se o refinanciamento será feito através de preços “de mercado”.

O órgão responsável pela decisão, assim como outros responsáveis, precisará fazer um levantamento sobre as condições nacionais e regionais relacionadas com os requisitos do conhecimento de “como-fazer”, de investimento e dos riscos da gestão de uma planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos. Isto conduzirá a definições para o caso individual de conceito operacional e do financiamento e refinanciamento de plantas. Para todos os modelos operacionais atuais existem riscos de cálculos preliminares de custos de investimento, não apenas devido ao alto dinamismo de preços no mercado mundial, mas esses riscos também existem para produtos siderúrgicos.

A partilha de riscos entre o cliente e o empreiteiro não são idênticas, mesmo no caso em que seja a mesma planta, mas com diferentes conceitos operacionais. Existem diferenças substanciais:

- planejamento, construção, comissionamento e operação de uma planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos que devem ser concedidos por um período mínimo de vários anos para um terceiro parceiro externo (por exemplo, com base no Contrato FIDIC BOT); ou,
- planejamento, construção e comissionamento de uma planta tipo “*turnkey*” baseada no Contrato FIDIC EPC (no Livro de Prata ou no Livro Amarelo, que também são semelhantes). Trata-se, em especial, dos riscos operacionais que são transferidos para o contratante com um Contrato BOT.

Tese III: Sem uma expectativa clara e realista do conceito operacional e de financiamento, uma planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos dificilmente obterão sucesso.

2.2 Construção de Plantas

O objetivo geral do conceito operacional e do processo de planejamento técnico de construção e operação de qualquer planta de tratamento pode ser descrito da seguinte forma:

A planta será construída e executada baseada no custo-eficiência e com um processo de operação mais seguro possível.

2.2.1 Gestão de riscos como parte integrante de todas as considerações e ações

Conceito operacional, processo de desenho técnico, construção e comissionamento de qualquer planta de tratamento de resíduos sempre terá que lidar com os riscos de cada área. Estes riscos estão divididos em cinco grupos:

- Quais os riscos técnicos que estão relacionados com a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?
- Quais os riscos operacionais que estão relacionados com a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?
- Quais os riscos para a saúde e a segurança dos colaboradores que estão relacionados com a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?
- Quais os riscos para o meio ambiente que estão relacionados com a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?
- Quais os riscos econômicos que estão relacionados com a planta de DA ou outra planta de tratamento de resíduos?

Para todos estes riscos, as principais questões, são:

- Quais os limites de aceitação?
- Quais as opções de redução estão disponíveis?

A avaliação do risco e as perguntas complementares não estão relacionadas, em um primeiro momento, com o responsável por minimizar os riscos. Entretanto, na prática, a divisão de papéis entre o cliente e o empreiteiro possui um impacto muito mais significativo sobre a extensão da avaliação dos diversos riscos e quais as medidas de mitigação serão desenvolvidas e implementadas.

O conceito de operações e da alocação de riscos entre clientes e prestadores de serviços para a construção e comissionamento de uma planta de tratamento de resíduos depende de vários fatores, incluindo:

- A capacidade do cliente de ignorar os riscos.
- A capacidade do cliente de averiguar e solucionar os riscos segundo suas práticas diárias.
- A intenção do cliente de correr riscos, e até certo grau, o próprio risco.
- A capacidade do cliente para controlar, por si próprio, a construção e comissionamento da planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos – ou com a ajuda de terceiros que possuam notória experiência (Consultores).

2.2.2 Processo de planejamento técnico – preparação da documentação para contratação

Novas dificuldades surgem em relação aos tópicos:

- De onde vem o conhecimento de “como fazer” o planejamento técnico de plantas de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos?
- Qual o sistema tecnológico que se adapta melhor à situação regional / local?
- Qual das propostas apresentadas levará aos melhores resultados?

A fração enriquecida com matéria orgânica e umidade – proveniente tanto da coleta seletiva como da separação mecânica dos resíduos domésticos mistos – pode ser processada por diferentes métodos e sistemas licenciados. Não existe “a planta de DA”. Existem diferentes tipos de plantas de tratamento de resíduos. Devido ao fato de existirem diferenças nas opções técnicas e nos procedimentos de tratamento em relação às plantas de DA, as seguintes questões são destacadas:

a) Quais os passos, como separação, trituração, peneiramento, separação entre materiais ferrosos ou não ferrosos e inertes, são necessários na fase mecânica de uma planta de DA antes do fornecimento do material aos digestores?

O modo de pré-tratamento depende do tipo de resíduo e de sua qualidade. Os resíduos domésticos mistos necessitam de outros procedimentos em relação às massas homogêneas apenas de frações de resíduos orgânicos.

b) Quais vantagens a digestão parcial terá em relação à digestão completa?

A digestão completa requer, em quase todos os casos, não só a desidratação do material após a digestão, mas também o tratamento dos líquidos excedentes devido ao excesso de água na massa digerida. Esse tratamento necessita de investimento e custos operacionais extras.

No caso da entrada de resíduos orgânicos coletados separadamente nas plantas de DA, regularmente, as emissões líquidas provenientes da desidratação são utilizadas na agricultura como fertilizante. Devido ao problema relacionado à contaminação, a produção de fertilizantes da fase líquida da digestão de resíduos domésticos mistos não é possível.

c) Como é possível construir uma planta de DA em fases de expansão modular?

Com base em um plano de desenvolvimento regional, expansões posteriores podem ser antecipadas. Alguns elementos como os reatores podem ser construídos de forma modular. As conexões e os espaços devem ser reservados. Outras áreas já deverão ser dimensionadas para capacidades futuras (como: áreas de descarga, pré-tratamento mecânico, desidratação etc.) a fim de se diminuir os custos e minimizar as dificuldades durante a ampliação da capacidade operacional da planta.

d) Dos locais disponíveis, qual é considerado o melhor?

A busca por um local adequado, muitas vezes, tem como condição prévia certa distância, a maior possível, de áreas residenciais. Outros pré-requisitos estão relacionados com a disponibilidade de infraestrutura técnica e futuros consumidores de biogás ou de calor. As regras nacionais e as exigências culturais irão fornecer critérios adicionais para a seleção do local.

e) Quais as implicações do processo de aprovação?

Os procedimentos de aprovação, na maioria das plantas, podem exigir requisitos e exigências adicionais. Estes devem ser integrados ao planejamento técnico e, dependendo da situação individual, também podem ter implicações de custos de diferentes graus.

2.2.3 Garantias

Exigências sobre a vida útil de uma planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos (por exemplo, para proteção contra a corrosão, a qualidade das máquinas e unidades...) são sempre decisivas quando da avaliação de fornecedores. É claro que requisitos devem ser definidos como parte dos documentos de proposta. Mas:

- Você não pode reparar tudo.
- Você não sabe tudo com antecedência.
- Você não pode pagar por tudo.

Portanto, compromissos equilibrados são necessários antes de se publicar os documentos necessários para a proposta e do fechamento do contrato. Também é necessária uma ação muito coordenada durante a construção e o comissionamento de uma planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos.

2.2.4 Fases de apresentação da proposta

Como resultado dos procedimentos de licenciamento, o conceito operacional escolhido e alguns planejamentos técnicos mais detalhados da planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos, podem ser apresentados (pelo FIDIC Books, por exemplo).

Dependendo da natureza do conceito operacional proposto e do processo de apresentação da proposta, os custos e planos de pagamento serão esclarecidos durante as discussões da oferta e do conteúdo do contrato. Eles devem sempre ser esclarecidos da melhor forma, pois as partes contratuais precisam saber o mais cedo possível onde estão, quais e quando devem receber os pagamentos.

2.3 Principais Tópicos após a Construção de Qualquer Planta de Tratamento de Resíduos: Equipe e Resíduos

Na maioria dos casos, existem dois principais tópicos envolvendo as futuras diferenças entre o contratante e o cliente:

a) Os debates sobre os resíduos fornecidos.

Os resíduos a serem processados sempre variam em relação à textura, composição, umidade etc. Mesmo com as condições firmadas em contrato, pode ser assumido que o fornecedor apresentará a variação da condição gravimétrica dos resíduos como uma das principais causas das futuras dificuldades a serem encontradas em uma planta de DA ou em outra planta de tratamento de resíduos.

b) Os debates sobre a equipe de operação.

Independentemente do operador de uma planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos: há necessidade de equipe capacitada e dedicada! E isso por longo prazo. Experiência adquirida em trabalhos com sistemas semelhantes ou, pelo menos, treinamentos mais curtos em outros sistemas similares, irão aumentar o rendimento da instalação.

A equipe precisa crescer junto com o sistema! Isto também significa que o pessoal de operação não será fornecido apenas a partir da data de recebimento das chaves. De qualquer forma: A noção de “*Turnkey*” deve ser totalmente dispensada em plantas de DA ou em outras plantas de tratamento de resíduos – assim como acontece em outras instalações de tratamento de resíduos. O início do funcionamento de uma planta de DA ou de outras plantas similares, pode levar muitos meses devido às características do processo.

Tais debates geralmente afetam tanto o número como a qualidade do pessoal. Dificilmente uma grande planta de tratamento de resíduos será operada continuamente com o mesmo número de funcionários conforme previsto pelo fornecedor em sua oferta. Além da desconsideração durante a estimativa da carga horária de trabalho de horas fundamentais tais como férias e afastamento por doenças, haverá outras discrepâncias no cálculo da composição da equipe.

Em resumo, podemos afirmar que será tema principal de divergências, no caso de contrato EPC, a qualidade dos resíduos a serem processados.

2.4 Prazo

Os itens anteriores mostraram que se leva algum tempo para a construção de uma planta de DA ou de outra planta de tratamento de resíduos. Os preparativos para as etapas individuais mostram, no Quadro 1, que estes podem ocorrer parcialmente em paralelo com o trabalho em outros níveis. Entretanto, como resultado, deve ser observado: o período de construção de plantas é raramente mais rápido do que o cronograma firmado, e muitas vezes necessitam passar por reajustes que geram novas ampliações de prazo.

Quadro 1 – Estimativas da demanda de tempo

Tarefa	A experiência na Alemanha e em outros países
Tempo para estruturas gerais	> 1 ano
Tempo para o conceito de gestão de resíduos	Aprox. 0,5 – 1 ano
Tempo para a seleção de conceito operacional	Aprox. 0,5 – 1 ano
Tempo para o planejamento técnico	Aprox. 0,5 – 1 ano
Tempo para o procedimento de licenciamento	Aprox. 0,5 – 1 ano
Tempo para a construção e comissionamento	Aprox. 0,8 – 1,5 anos
Tempo até que a planta esteja em um nível de operação “muito bom”	Aprox. 0,5 – 2 anos

Fonte: Schneider e Beywinkler (2013, p. 108).

3 EXEMPLOS

As fotos apresentadas na Figura 4 mostram a planta de tratamento mecânico-biológico (TMB) de resíduos domésticos mistos em Hannover, na Alemanha, com um tratamento mecânico de 200.000 t/a e uma digestão anaeróbia (DA) de fluxo integral e estabilização aeróbia com 120.000 t/a. Esta planta foi planejada e construída em duas fases, de 1995 – 2000 e de 2001 – 2005, está em operação desde então.

Figura 4 – TMB em Hannover



Fonte: Acervo pessoal do autor (SCHNEIDER, 2006).

A Figura 5 mostra a planta de tratamento mecânico-biológico (TMB-CVO) em Seixal, Portugal, com um tratamento mecânico de resíduos domésticos mistos de 100.000 t/a, uma digestão anaeróbia (DA) e estabilização aeróbia de 40.000 t/a de resíduos orgânicos domésticos e 20.000 t/a de verdes. Esta planta foi planejada e construída entre 2006 – 2015 (ainda em construção).

Figura 5 – TMB CVO-Seixal, Portugal



Fonte: Acervo pessoal dos autores (SCHNEIDER; BEYWINKLER, 2012, 2013).

As fotos da Figura 6 mostram a planta de tratamento de resíduos orgânicos de Dörpen na província de Emsland com digestão anaeróbia (DA) de 14.000 t/a em contêiner de digestão de fluxo, estabilização em túnel e compostagem aberta. Esta planta foi planejada e construída em 2010 – 2012, em operação desde então.

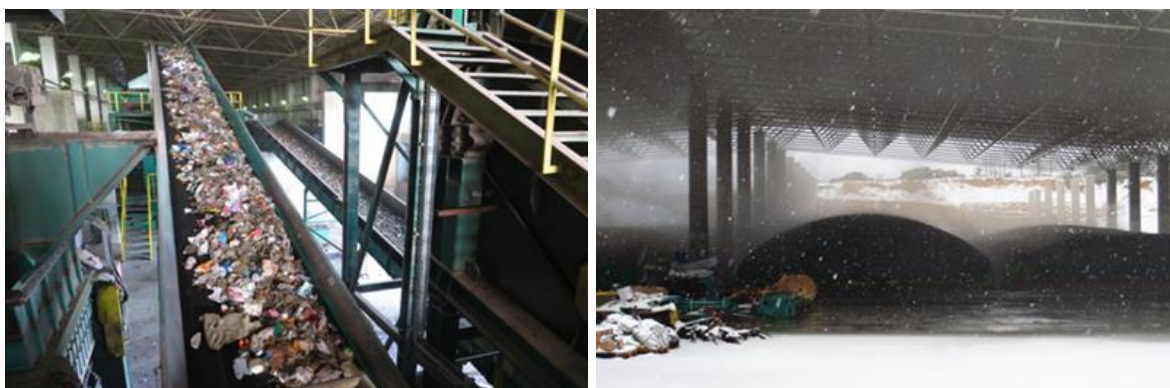
Figura 6 – Planta de DA Dörpen



Fonte: Acervo pessoal do autor (SCHNEIDER, 2012).

A Figura 7 mostra a planta de tratamento mecânico-biológico (TMB) em K m c oda, Istanbul, Turquia, com um tratamento mecânico de resíduos domésticos mistos de 600.000 t/a, um secador biológico de 500.000 t/a com produção de CDR e lavagem e reciclagem de plásticos. Esta planta foi renovada em 2013, em operação desde então.

Figura 7 – TMB K m rc oda: 600.000 t/a



Fonte: Acervo pessoal do autor (SCHNEIDER, 2013, 2014).

4 CONCLUSÕES

Respeitando-se as linhas de base gerais, as plantas de DA se tornaram uma op o interessante para muitos países com algum desenvolvimento no setor da gestão de resíduos durante a última década ou nos últimos anos.

Para todas as plantas de tratamento de resíduos, incluindo as plantas de DA, um conceito claro e realista quanto a futura opera o da planta   o primeiro fator para a obten o de sucesso. Isso requer identifica o inicial sobre possíveis empresas fornecedoras, bem como a defini o de critérios para a escolha do local para execu o da planta. A escolha do local e do tipo de tecnologia, certamente dependerá das exigências da legisla o nacional que regulamente tanto o tratamento de resíduos quanto a energia renovável. Diferentes concep es e tecnologias de tratamento de resíduos em plantas de DA ou de outras plantas, desde sistemas menos complexos até solu es de superior sofistica o – com ou sem maior recupera o energética – oferecem a op o por um conceito realista de opera o.

Conceitos operacionais e processos de planejamento técnico, a constru o e o comiss onamento de uma planta de tratamento de resíduos, dependem muito dos aspectos de gestão de riscos. Estes aspectos definem o escopo das tarefas durante a constru o e do comiss onamento das plantas.

As diferentes abordagens tecnológicas já mencionadas exigem diferentes requisitos do saber “como fazer” e da equipe de opera o da planta. Em todos os casos há uma enorme, ou pelo menos uma diferença muito significativa entre o funcionamento de uma planta de DA e a opera o de um lixão ou de um simples aterro. Para manter os dispositivos de segurança – até porque em uma planta de DA estamos lidando com biogás, que, dentro de determinados limites, pode explodir – as exigências em uma planta de DA são muito maiores do que àquelas exigidas em quase todos os aterros. Para outras tecnologias de tratamento mecânico de resíduos ou de algumas tecnologias de compostagem, as diferenças podem ser ligeiramente reduzidas. Mas os procedimentos de manuten o regulares, com uma maior precisão e disponibilidade de peças que sofrem desgaste, devem ser introduzidos para todas as plantas de valoriza o de resíduos, representando uma mudança significativa da opera o quando comparamos às práticas de opera o de um aterro sanitário.

Pode-se considerar que contratos onde os fornecedores assumam de forma desproporcional os riscos, implicarão em maiores custos.

Com equipe bem treinada e educada, será possível superar problemas inesperados e imprevistos durante a operação de uma planta de DA ou de outras plantas de tratamento de resíduos. O processo entre o planejamento até a operação regular da maior parte das plantas de tratamento de resíduos, com ou sem a construção de uma planta de DA, dura em média, mais de três anos.

Plantas de DA e outras plantas de tratamento de resíduos exigem muito mais que “apenas um aterro com uma pequena tecnologia agregada”! As contribuições de diferentes atores são necessárias para que se obtenha uma planta sustentável e bem operada. Há muito para ser feito em relação às plantas de DA e outras plantas de tratamento de resíduos:

Vamos começar!

REFERÊNCIAS

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft. **Public Private Partnership International, Ein Unternehmerleitfaden für PPP-Engagements im Ausland**, BMWi, Berlin 2004.

Disponível em: <http://www.csr-weltweit.de/uploads/tx_jpdwnloads/BmWi_ppp-international_property.pdf>. Acesso em: 12 out. 2014.

DIRETIVA 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>>. Acesso em: 12 out. 2014.

JARON, Andreas. The European waste framework Directive and international aspects of waste management. In: **Turkish – German Solid Waste Days 2006**, p. 21-28. Izmir, 2006.

SCHNEIDER, Theo. Was muss man bei Planung und Bau von MBA berücksichtigen? In: **Türkisch – Deutsche Abfalltage 2008 İZMİR. “Zukunftsfähige Abfallwirtschaft und Abfalltechnik”**. Izmir, 2008.

SCHNEIDER, Theo; BEYWINKLER, Herbert. **Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress 2013**. Disponível em: <[Istanbul 3W Congress Proceedings 2013.pdf](http://www.istanbul3wc.org/Proceedings_2013.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2014.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

SCHNEIDER, Theo; BEYWINKLER, Herbert. Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

Experiências Comprovadas com Combustíveis Alternativos em Fornos de Cimento

Proven Experiences with Alternative Fuels in Cement Kilns

Doutor Hubert Baier

RESUMO

Este trabalho aborda os principais aspectos de pré-tratamento de resíduos e coprocessamento de combustível alternativos em fornos de cimento, por sofisticadas técnicas de pré-tratamento. De grande importância neste contexto são piroprocessamento bem como combustão no seu ponto de entrada, o impacto sobre o produto e emissão. Serão ainda apresentadas algumas técnicas específicas para a utilização de combustível alternativo em fornos via úmida, fornos com pré-calcinadores e queimadores em geral.

Palavras-chave: Resíduos. Pré-processamento. Forno de cimento. Combustível alternativo. Qualidade. Combustão. Ambiente.

ABSTRACT

This paper focus on the main aspects of pre-processing of waste and co-processing of alternative fuels in cement kilns, by sophisticated pre-processing techniques. Of major importance in this context are pyroprocessing as well as combustion at its point of entrance, impact on product and emission. Some particular techniques for the AF use in wet-kiln and pre-calcliner kiln as well as in main burners will be presented.

Keywords: Waste. Pre-processing. Cement kiln. Production of alternative fuel. Quality. Combustion. Environment.

1 INTRODUÇÃO

Devido a constante flutuação dos custos e das discussões sobre a proteção sustentável dos recursos, a indústria de cimento alemã atingiu uma redução contínua da energia total requerida, mudando de processo via úmida para processo via seca, incluindo um preaquecedor de ciclones.

Após a primeira crise de petróleo no início da década de 70, do século XX, para cortar os custos, primeiro mudou-se de gás e óleo para carvão e lignita, e devido a elevado poder energético e manuseio relativamente simples também foram aplicados óleo usado e pneus.

Mais tarde, seguiu-se com solventes, borra de óleo, embalagens, recortes e outros provindos de processos industriais identificados e pré-analisados.

Combustíveis sólidos alternativos pré-selecionados, similares a lignita, de produção específica, do assim chamado “cereja picada”, de resíduos comerciais e biomassa, além dos líquidos já mencionados, são considerados de fluxo simples e são processados para serem utilizados no queimador principal, na entrada do forno, ou se existir, no calcinador.

Adicionalmente resíduos de base mineral, tais como tortas residuais de filtros, areia de fundição, resíduos de óxido de ferro laminado (películas de ferro), ou solo contaminado, são usados para serem misturados com materiais alternativos crus, substituindo compostos minerais naturais.

Desde que foi provado que o uso individual de resíduos no processo não tem efeito no teor de emissões de uma planta, ou mesmo no processo de queima do clínquer, e na qualidade do produto, os resíduos então são preparados como misturas, com seu poder energético, teor de cinzas para a formação de clínquer, logo, coprocessados.

A produção de combustíveis alternativos e sua aplicação foram estabelecidas de tal maneira que existem países extremamente dependentes de recursos energéticos externos e que levam cada vez mais em conta a integração da gestão de resíduos como um conceito de energia. A fim de implementar tais conceitos, naturalmente, também as fábricas de cimento entram em foco. Frequentemente, no entanto, isso faz com que nos esqueçamos de que o cimento é um produto de massa padronizada de um processo de produção altamente eficiente em termos energéticos.

Quando se pensa em “Combustível Alternativo”, subentende-se material barato disponível. Até a legislação fala sobre “cocombustão”. Mas atualmente há processos de conversão físico-químicos de alta complexidade, que não foram até agora totalmente esclarecidos, até mesmo na combustão do carvão.

Simplificando uma combustão, como um processo de controle da combustão por difusão (Figura 1), ela pode ser descrita com secagem, pirólise, ignição e queima de coque numa atmosfera reduzida de oxigênio. Com um aumento da taxa de substituição térmica, esta sequência domina a combustão e conseqüentemente todo o processo clínquer de cimento.

Figura 1 – Sequência operacional simplificada concernente à conversão de combustíveis com a subsequente queima do coque. Dependendo da qualidade, é possível reduzir à zero, a combustão do coque durante a conversão de combustíveis líquidos



Fonte: Baier (2009).

Usualmente resíduos comerciais e frações de alto valor calorífico são processados separadamente ou em conjunto, para remover do combustível: metais, vidros, cinzas ou outros componentes prejudiciais.

Para injetar combustíveis alternativos sólidos de dimensões maiores, diâmetro máximo 300, pela entrada de um forno ou, de um calcinador, é necessária uma preparação e o manuseio de amostras diferentes, que então precisam ser injetadas pelo queimador principal. Para uma melhor queima total, estes compostos têm que ser moídos para atingirem diâmetro máximo de 25 mm ou menores e peneirados, evitando uma redução das condições de queima na zona de sinterização do forno e ainda assim pode gerar influências no processo quando comparadas ao pó de carvão.

Se o processamento tem que ser com materiais de granulometria ainda mais finas, o processo atinge os limites técnicos e econômicos.

Normalmente numa planta de cimento os combustíveis prontos para queimar são transportados pneumaticamente para o respectivo ponto de queima, especialmente quando são alimentados no queimador principal. As misturas heterogêneas de combustíveis alternativos passam por um novo processo de preparação onde as partículas são separadas pelo seu tamanho em frações individuais para queima em diferentes níveis.

Enquanto que as partículas finas com grandes áreas específicas (por exemplo, filme de PVC para embalagens com dimensão de 2 a 500 micros de espessura) são consumidas pela chama flutuante, as partículas tridimensionais (plástico duro, borracha, madeira etc.) formam a ponta da chama, e seus resíduos finais flutuam sendo absorvidos pelo clínquer, formando uma zona redutora para as condições de queima, temperatura de entrada elevada e formação de ciclo sulfuroso.

Por esta razão as misturas de combustíveis com partículas entre 25 e 80 mm podem ser processadas mecanicamente, enquanto que as maiores de até 250 mm podem ser processadas termicamente.

2 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE COMBUSTÃO NA ZONA DE CLINQUERIZAÇÃO EM FORNOS ROTATIVOS

Se o combustível alternativo será alimentado via, do assim chamado queimador da zona do clínquer, ele deve ser moído para diâmetro máximo de 25 mm em média, removendo-se os maiores, para melhorar a queima total.

O queimador deve ser projetado de acordo com requisitos físicos para operar apropriadamente a partir das diferentes propriedades do combustível.

Um queimador da zona de clinquerização é projetado para queimar combustíveis primários, como também combustíveis sólidos recuperados, com uma produção térmica entre 10 e 300 MW e tem sido projetado especialmente para o uso de combustíveis alternativos sólidos e líquidos (Figura 2). Com uma mistura de combustíveis alternativos sólidos e líquidos com média

de grãos de diâmetro máximo < 20 mm, já foi possível alcançar taxas de substituição próximas de 100%.

Figura 2 – Vista frontal de um queimador adaptado para a zona de clínquerização



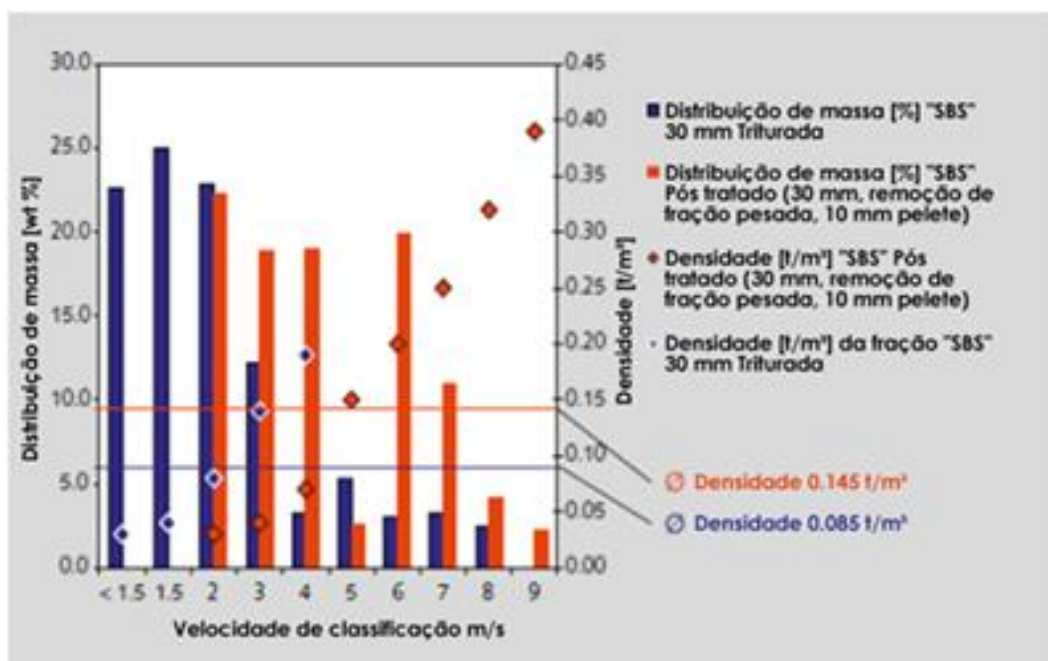
Fonte: Polflame/Thyssen Krupp Industrial Solutions (REZNICHENKO, 2009).

Durante a operação, os bicos de injeção de ar primário são ajustados seletivamente tendo em vista que qualquer movimento aleatório e divergências são possíveis, e podem ser ajustadas à trajetória das partículas do fluxo.

Uma dimensão de partícula adaptada e uma mistura intensa do combustível com o ar de combustão garantem uma conversão rápida e completa e reduz significativamente o tempo de conversão na zona de reação. Este procedimento é especialmente importante para combustíveis de difícil queima, por exemplo, coque de petróleo e misturas de combustíveis pouco caloríficos.

Para poder projetar um queimador otimizado, as misturas multicomponentes, do combustível alternativo sólido, devem ser primeiramente analisadas quanto à sua classificação granulométrica e química. Neste processo as partículas do combustível são separadas em frações (Figura 3), nas quais resultam as mesmas propriedades dos sólidos equivalentes em perfil de movimento, densidade ou formato dos grãos, isto é, as partículas se movem em trajetórias idênticas.

Figura 3 – Classificação por ar de combustíveis alternativos (Combustíveis secundários) a partir da segregação de frações de partículas idênticas de alto poder calorífico dos combustíveis secundários produzidos em planta de tratamento mecânico-biológico



Fonte: Baier (2006; 2010).

Todos estes procedimentos de análise dos combustíveis alternativos, em função da granulometria e perfil de movimento, resultam em conclusões relativas ao comportamento de movimento ou a qualidade do pré-processamento. A composição original, bem como seu comportamento, fica claramente perceptível e facilita a determinação do ponto de injeção no sistema do forno. Assim, a determinação das frações de partículas individuais é relevante e recomendável. Em frações de partículas também é possível determinar a necessidade de oxigênio ou o comportamento na ignição.

3 PROCESSAMENTO MECÂNICO PARA USO NUM QUEIMADOR DA ZONA DE CLINQUERIZAÇÃO

A velocidade de combustão é influenciada por vários efeitos tais como o isolamento, a geometria e as superfícies, onde a difusão das partículas do combustível causam diferentes velocidades de combustão.

Por esta razão são recomendadas certas tecnologias de separação por ar durante o processo de pré-tratamento dos resíduos, desta forma a integração dos combustíveis secundários será otimizada devido ao tempo de retenção no corpo individual das chamas quando saem da boca do queimador.

Este processo é perfeitamente aplicável a partículas tridimensionais, duras ou frágeis que até aqui têm levado a formação de zonas redutoras no forno. Elas são efetivamente e rapidamente

separadas quando grandes, mas geralmente são obtidas partículas finas e achatadas de duas dimensões, que não afetam a combustão quanto à queima total.

Enquanto a porção de partículas pesadas tridimensionais que contém água são reduzidas, as propriedades químicas dos componentes do combustível alternativo permanecem inalteradas.

4 O USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO CALCINADOR

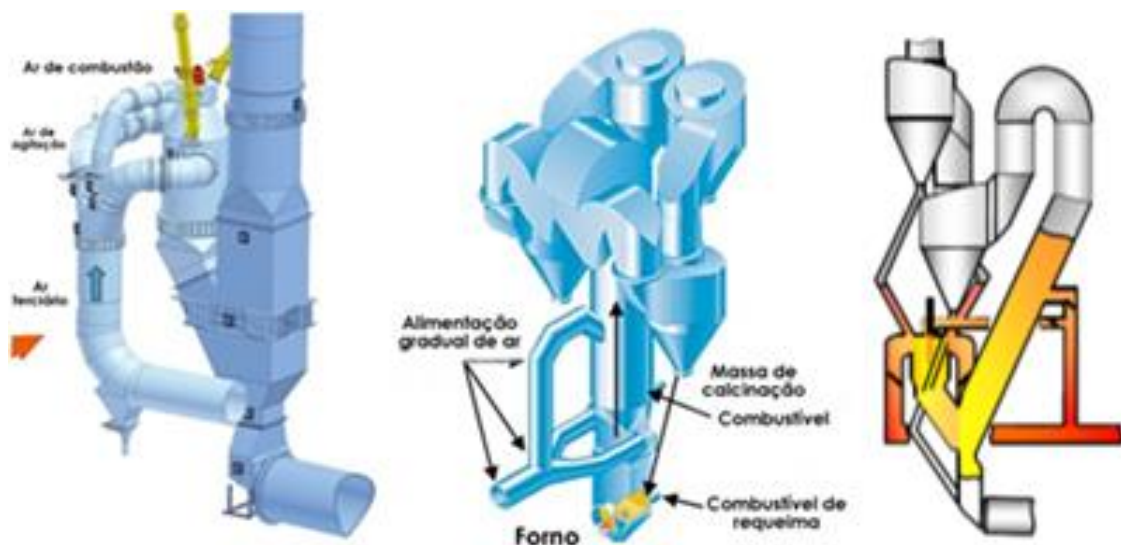
Em plantas modernas com calcinadores, somente 40% do consumo térmico é dado pelo queimador da zona de clínquerização, enquanto 60% da demanda de calor é requerida por um ou mais pontos de queima do calcinador. Neste processo, o ar de combustão necessário é injetado pelo duto de ar terciário tomado da seção de recuperação do resfriador do clínquer, para os pontos de queima dentro do calcinador.

Com relação à reação, o calcinador requer somente uma temperatura de 850 a 900 °C para calcinar a fração de calcário.

Dentro do calcinador os gases que se encontram em temperaturas em torno de 1000 a 1200 °C do forno rotativo, se misturam com ar terciário de 800 a 1000 °C, o que garante uma ignição e uma queima segura mesmo para combustíveis alternativos de dimensões grandes e reações lentas.

No entanto, especialmente a queima de vários combustíveis de reação lenta, tomam um tempo consideravelmente mais longo do que o preaquecimento e a calcinação de materiais crus, sendo este o fator determinante para o dimensionamento dos calcinadores. Por esta razão existem disponíveis várias soluções técnicas para calcinadores, as quais também permitem o controle da temperatura de combustão e a atmosfera, bem como a redução das emissões de NO_x.

Figura 4 – Diferentes tipos de calcinadores (esquerda) KHD, FLS (intermediário) e (direita) TK-Industrial Solutions



Fonte: Adaptado pelo autor de KHD, FLS e ThyssenKrupp-Resource Technologies.

Para garantir a queima total de combustíveis alternativos de reação lenta, ou combustíveis primários, em alguns casos são empregadas as câmaras de combustão para combustão complementar ao calcinador.

Para combustíveis com um tempo de residência muito longo, tais como biomassa, coque de petróleo ou antracita é usada a câmara de pré-combustão. Nela é formado um vórtex no fluxo junto com a injeção de ar terciário puro, aumentando a reatividade sob altas temperaturas auxiliando o processo de secagem e a queima do combustível.

Para o uso de combustíveis alternativos de baixo poder calorífico e de grandes dimensões o tempo de residência na pequena zona quente é insuficiente. Para isto foi especialmente desenvolvida uma câmara de pré-combustão para uma taxa elevada de carga de combustíveis alternativos de baixo poder calorífico.

O tempo de retenção típico de um calcinador, de 4 a 8 segundos, é, às vezes, insuficiente para a queima completa dos combustíveis alternativos de reação lenta como alto poder calorífico com um diâmetro aproximado de < 300 mm.

Com base nisso a FLSmidth desenvolveu uma mesa de reciclagem integrada com os sistemas de preaquecimento e calcinação. Foi provada sua exequibilidade para combustíveis alternativos “grosseiros” de uso individual como pneus de caminhões ou biomassa com dimensões 1,2 metro de diâmetro.

A TK-Industrial Solutions desenvolveu seu “*Step Combustor*” também incorporado ao calcinador, mas capaz de queimar diferentes qualidades de combustíveis alternativos, porque o transporte e a taxa de descarga são controlados separadamente por rajadas de ar por bicos de injeção. E dentro da câmara de reação não são necessários acessórios mecânicos ou partes móveis.

5 CONCLUSÕES

A fim de cortar custos energéticos na produção de clínquer após a crise do petróleo no início da década de 1970, a Indústria de Cimentos Alemã iniciou a substituição de combustíveis primários por combustíveis alternativos (CA) tais como, óleos e pneus usados. Atualmente estes combustíveis representam mais de 2 Euro/GJ do custo da energia.

Após o estabelecimento de uma gestão confiável dos combustíveis alternativos e da matéria-prima, temos a inclusão na cadeia de alternativos de uma ampla gama de resíduos perigosos e não perigosos, bem como líquidos e sólidos, orgânicos e resíduos minerais, que devem ser pré-processados, ter sua qualidade monitorada, feitos sob medida para fornos existentes ou recém-instalados segundo sua composição química, pesquisas geológicas e produtos.

Por exemplo, na Alemanha a proibição de aterros em 2005, acelerou o desenvolvimento de tecnologias de coprocessamento nas indústrias de eletricidade e cimento. Baseado numa experiência comprovada de trinta anos o coprocessamento está assumindo uma função importante no conceito de energia e resíduos, sobretudo no objetivo da redução de emissões de gases de efeito estufa.

Para tanto foram instaladas quase 50 plantas públicas de tratamento mecânico-biológico com uma capacidade operacional anual de aproximadamente de 6 milhões de toneladas de resíduos sólidos municipais e centenas de pequenas plantas particulares que pré-selecionam o material reciclável oriundo do comércio e da indústria que, subsequentemente devem ser processados, formando um combustível derivado de resíduos feito “sob medida” (CDR < 80 mm) para calcinadores, e combustível sólido recuperado com qualidade monitorada para queimadores em geral < 25 mm.

Em 2012, quando a demanda térmica da Alemanha estava por volta de 92 mGJ, aproximadamente 62% desta demanda foi substituída por combustíveis alternativos sólidos e líquidos, o que corresponde a aproximadamente 2 milhões de toneladas de pneus, resíduos animais, óleos ou solventes e diferentes tipos de combustíveis sólidos e biomassa, os quais foram preparados de maneira a atender aos requerimentos mínimos de manuseio, alimentação, combustão, processo, controle de emissões e performance do produto.

O processo de queima do clínquer deve ser avaliado considerando-se as opções técnicas e suas falhas. O pré-processamento e respectivos conceitos de manuseio em uma planta de cimento bem como, o impacto dos combustíveis alternativos no processo de produção, deverão ser enfatizados. São de suma importância, neste contexto, o piro-processamento, bem como a combustão no seu ponto de entrada, o impacto sobre o produto e as emissões.

REFERÊNCIAS

- BAIER, H. Ersatzbrennstoffe für den Einsatz in Mitverbrennungsanlagen (Alternative fuels to be used in co-combustion plants), in Zement-Kalk-Gips International, **Bauverlag BV Springer BauMedien Gütersloh**, n. 3-2006, v. 59, p. 78-85, 2006.
- BAIER, H. **Erzeugung von Ersatzbrennstoffen für die deutsche Zementindustrie – Rahmenbedingungen, Herkunft, Aufwand und Realisierung-** (Production of secondary fuels for the German cement industry – Basic conditions, origin, expense and implementation), Berliner Energiekonferenz Erneuerbare Energien (Energy Conference Renewable Energy in Berlin) 10 and 11 November 2009 in Berlin, TK Publishing House Neuruppin 2009, 75-88, 2009.
- BAIER, H. Disruptive substances and the burning behaviour of solid alternative fuels, in Zement-Kalk-Gips International, **Bauverlag BV Springer BauMedien Gütersloh**, n. 6-2010, v. 63, p. 58-67, 2010.
- BRANDT, F. **Brennstoffe und Verbrennungsrechnung** (Fuels and combustion calculation), FDBR, Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V., 3rd Edition. ISBN 3-8027-5801-3. Essen: Vulkan Publishing House, 1999.
- LARSEN, Morten Boberg. **Alternative Fuels in Cement Production, Technical University of Denmark**. Department of Chemical Engineering, Ph.D. Thesis, DTU, 2007.
- MENZEL, K., MAAS, U., LAMPE, K. **Technologies for Alternative Fuel Enhancement in Clinker Production Lines**. IEEE Cement Industry Technical Conference Record, 2009.

- REZNICHENKO, A. Welcome to a new dimension, Burner Technology. **International Cement Review, Tradeship Publications Ltd. Dorking**, p. 96-98, June 2009.
- TAM, C.; VAN THE MEER, R. **IEA/CSI Technology Roadmap for the Cement Industry**. International Energy Agency, Paris France, Heidelberg Cement Group, Brussels, Belgium, 6th International VDZ Congress 2009, Sustainability and Use of Energy, Process Technology of Cement Manufacturing, Düsseldorf, Published by Bau + Technik, 155-157. 2009.
- ZELKOWSKI, J. *et al.* **Kohlecharakterisierung im Hinblick auf die Verbrennung-Mahlbarkeit, Zündwilligkeit, Reaktivität, Verschlackung** (Coal characterisation with regard to the combustion grindability, ignition quality, reactivity, slagging), VGB-TB 240, Essen, 1992.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

BAIER, Hubert. Experiências Comprovadas com Combustíveis Alternativos em Fornos de Cimento. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maió – 2017**.

Gestão de Qualidade: certificação de produtos para o emprego sustentável do composto orgânico

Quality Assurance: product certification for sustainable application of compost

Doutor Bertram Kehres

Engenheira Agrônoma Maria Thelen-Jüngling

RESUMO

No final do último século a Alemanha iniciou a compostagem dos resíduos orgânicos coletados separadamente nos domicílios. Para a comercialização deste composto foi necessário firmar especificações, normas e diretrizes de qualidade. Os produtores e os consumidores exigem normas de qualidade definidas e prevêm garantias de qualidade e controle independente de qualidade. Para alcançar este objetivo, os produtores de compostos fundaram uma comunidade (chamada BGK) em 1989, como uma instituição autodisciplinar do setor. Eles definiram um padrão de qualidade para a compostagem e, em 1991, deu início um sistema de garantia de qualidade para a compostagem. A Garantia de Qualidade firmada pela BGK padroniza e garante a alta qualidade. Atualmente a produção anual de composto de alta qualidade já alcança 3 milhões de toneladas. O composto é empregado na agricultura como fertilizante orgânico (cerca de 61%), na forma de mistura para a produção de solos, substratos, horticultura e paisagismo.

Palavras-chave: Composto. Resíduos Orgânicos. Coleta Seletiva. Fertilizante Orgânico. Garantia de Qualidade.

ABSTRACT

In the end of the last century Germany started with composting separate collected biowaste from private households. For marketing of this compost specifications, standards and quality guidelines were needed. Producers and consumers demanded defined quality standards and expected quality guarantees and independent quality control. To achieve this, the manufacturer of compost founded a community (called BGK) in 1989 as a self-disciplinary action of the economy. They defined a quality standard for compost and in 1991 they started with a quality assurance system for compost. Quality assurance by BGK standardize and ensure high quality. Meanwhile, the annual production of quality assured compost in Germany amounts to approximately 3 million tons. The compost is used in agriculture as an organic fertilizer (about 61%), as blending component for the production of soils and substrates and for horticulture and landscaping.

Keywords: Compost. Biowaste. Separate collection. Organic fertilizer. Quality assurance.

1 INTRODUÇÃO

Até o início dos anos 1990, na Alemanha, não havia especificação para os compostos produzidos a partir de resíduos orgânicos da coleta seletiva. Porém especificações, normas ou diretrizes de qualidade são atributos indispensáveis para a comercialização. Os produtores e os consumidores exigem normas de qualidade definidas que servem como orientadoras para a oferta e a demanda. Além disso, o comércio e os consumidores exigem garantias e um controle de qualidade independente.

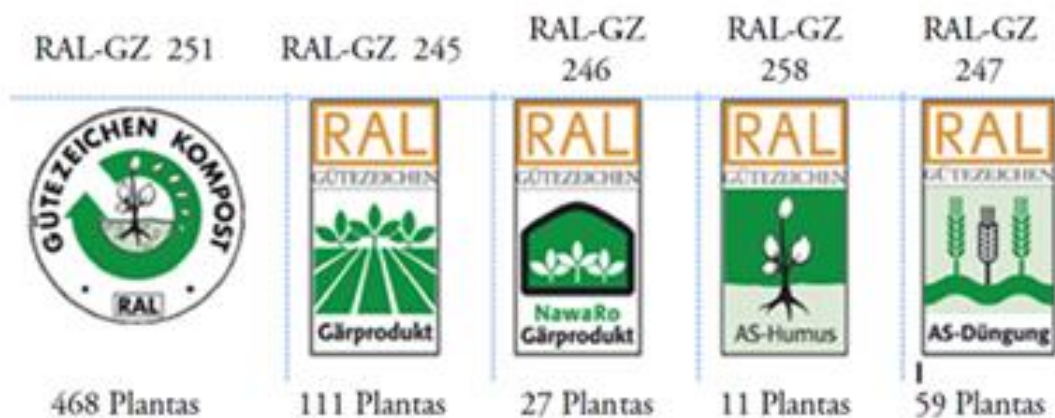
Com essa finalidade, os produtores de compostos orgânicos fundaram, no ano 1989, a Associação Alemã para o Controle de Qualidade de Compostos Orgânicos (*Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. – BGK*) como medida de autocontrole da economia e desenvolveram, junto a consumidores e pesquisadores, um padrão de qualidade de compostos orgânicos uniforme em todo o território alemão. A gestão de qualidade de compostos orgânicos começou no ano 1991 com a introdução de um selo de qualidade comprovada para compostos orgânicos (RAL-GZ 251).

Na Alemanha, o termo “selo de qualidade controlada” é protegido por lei. Todos os selos de qualidade controlada atendem aos fundamentos gerais emitidos pelo RAL (Instituto alemão para o controle de qualidade e rotulação). Hoje, 70% de toda a produção de compostos orgânicos na Alemanha aderem ao sistema RAL para o controle de qualidade. A otimização contínua de processos resultou em uma oferta de diversos tipos de compostos orgânicos com propriedades definidas de alta e constante qualidade.

No ano 2000, a BKG ampliou o controle de qualidade para os produtos oriundos da biodigestão anaeróbia. No ano 2003, outros grupos de produtos surgiram, entre eles o RAL controle de qualidade para compostos derivados de lodos de ETE (AS-húmus), e em 2009, o controle de qualidade para lodo de ETE (AS-fertilizante).

A Figura 1 mostra o panorama dos diversos selos de qualidade e os participantes em cada categoria.

Figura 1 – Diferentes padrões de qualidade pela BGK e número de participantes



Fonte: BGK (2014).

A produção de compostos orgânicos constitui uma abordagem estratégica para a implementação de uma economia de ciclo fechado e sustentável. O controle de qualidade contribuiu, na Alemanha, consideravelmente para a construção do mercado de compostos orgânicos e produtos derivados de compostos. O controle de qualidade pode representar uma contribuição valiosa para a economia de ciclo fechado também no Brasil.

Este artigo explica o funcionamento e as metodologias para o controle de qualidade tomando como exemplo o controle de qualidade do composto orgânico, e fornece informações sobre os efeitos e a aplicação do composto orgânico e seus produtos.

A Associação Alemã para o Controle de Qualidade de Compostos Orgânicos (BGK) é a organização reconhecida pela RAL, para a condução do controle de qualidade para os grupos de produtos na forma de composto orgânico e produtos derivados da biodigestão anaeróbia bem como, para o aproveitamento de lodos de ETE na agricultura. A BKG tem como objetivo assegurar um controle eficiente, contínuo e sempre transparente dos padrões de qualidade definidos. A BKG é independente e neutra, e tem como objetivo apenas o controle de qualidade, sem outra finalidade ou interesse sequer.

Além das competências principais do controle de qualidade RAL e atividades de comunicação, a BGK atua ainda nas seguintes linhas temáticas:

- Avaliação da aptidão de resíduos como componente de adubos e substratos para o melhoramento de solos;
- Acompanhamento do desenvolvimento de diretrizes legais relacionadas à área de fertilizantes e de resíduos e sua consideração no controle de qualidade;
- Intermediação de fatos e exceções frente aos órgãos administrativos;
- Acordos com determinados participantes de mercado sobre a aplicação adequada de fertilizantes reciclados (por exemplo, em zonas de proteção da água, na agricultura orgânica, entre outras);
- Acordos com sistemas de gestão de qualidade da produção vegetal e da cadeia de produção de alimentos;
- Fundamentação e avaliação de processos materiais ou de processos combinados energético-materiais, no aproveitamento de resíduos orgânicos;
- Sensibilização para uma gestão de húmus sustentável diante do aumento das exigências aos solos.

2 PROCESSO DO CONTROLE DE QUALIDADE

O controle de qualidade consiste em um processo de reconhecimento e o processo de controle. O processo de reconhecimento é conduzido a fim da obtenção do selo, e o processo de controle, para verificar periodicamente o cumprimento das exigências.

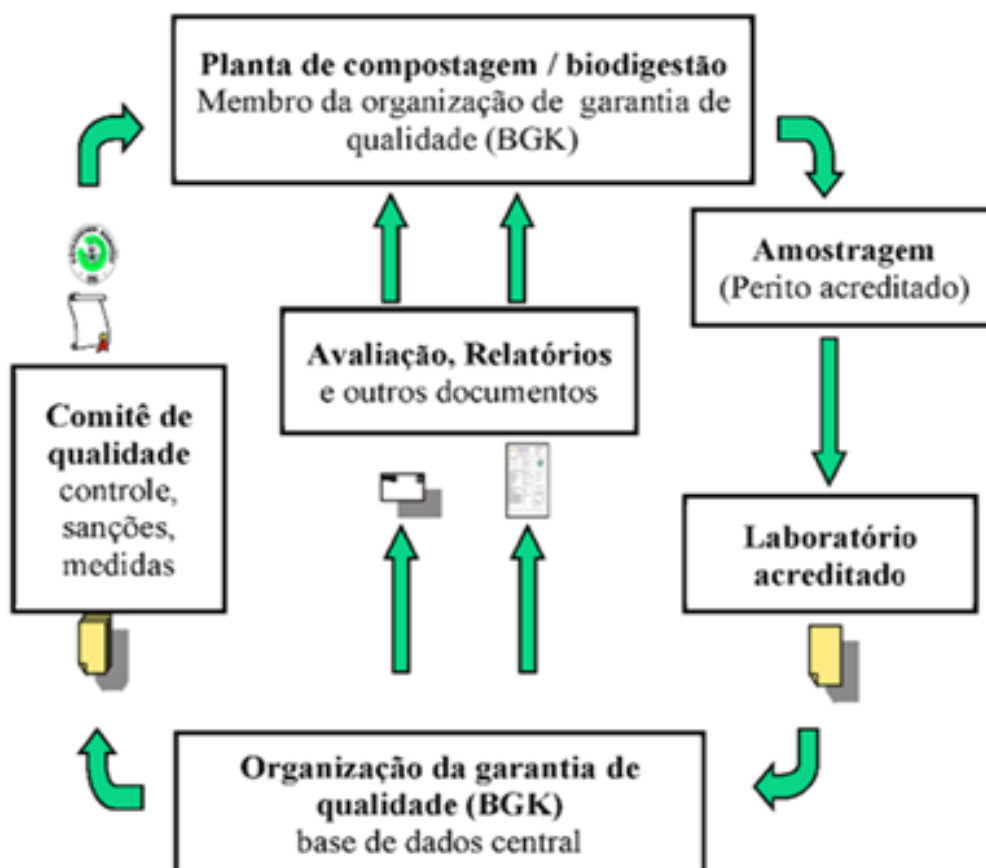
Os controles de qualidade da RAL definem exigências relacionadas a:

- Matérias-primas apropriadas;
- O processo de produção;
- A qualidade dos produtos finais;
- A aplicação da boa prática.

O controle de qualidade compreende os deveres do controle próprio e os deveres do controle externo. As exigências constam detalhadamente nas respectivas diretrizes de qualidade e controle.

Os membros e os produtores podem contar com a assistência técnica por consultores regionais de qualidade. A consultoria consiste de visitas regulares com avaliação das instalações de produção. Além disso, os consultores ajudam em questões legais ou técnicas e dão apoio na disponibilização de comprovantes eventualmente necessários frente aos órgãos públicos competentes. Além dos consultores de qualidade, os membros podem direcionar suas perguntas também aos escritórios da BGK bem como, às associações de controle de qualidade, associadas à BGK.

Figura 2 – Procedimentos de garantia de qualidade



Fonte: BGK (2014).

O comitê nacional de controle de qualidade (BGA) constitui o órgão de controle de qualidade. Ele é independente e neutro. O BGA avalia os resultados e decide sobre a emissão do selo de qualidade e eventualmente sobre medidas de punição, por exemplo, a retirada do selo de qualidade.

A BGK emite documentos relacionados aos adubos e produtos para o melhoramento de solos com o selo de qualidade RAL comprovando a qualidade destes produtos.

3 EXEMPLO: CONTROLE DE QUALIDADE RAL PARA COMPOSTO ORGÂNICO

A avaliação da qualidade do composto orgânico consiste na análise de uma série de parâmetros químicos, físicos e biológicos. Os critérios de qualidade de um composto orgânico pronto se encontram listados nos Quadros 1a e 1b:

Quadro 1a – Critério de qualidade do composto

Critério de qualidade	Exigências de qualidade
Higiene	<ul style="list-style-type: none"> • Comprovante da eficácia do tratamento em relação à proteção contra doenças contagiosas. • Avaliação do processo ou da conformidade segundo o sistema de exame de tipo, de foco na higiene. • Comprovante de manutenção das temperaturas e tempos de atuação necessárias para a higienização dos produtos (controle de processo). • Ao máximo, duas sementes e partes de plantas germináveis por litro. • Salmonelas não detectáveis.
Corpos estranhos	<ul style="list-style-type: none"> • Ao máximo, 0,5% do peso da matéria seca (MS) de corpos estranhos retiráveis acima de 2 mm de diâmetro. • Materiais estranhos > 0,1% do peso: Soma máxima dos materiais retirados por área 25 cm²/L de matéria fresca (MF)
Compatibilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidade com os vegetais na área de aplicação pretendida. • Livre de substâncias fitotóxicas. • Não fixador de nitrogênio (ensaio de germinação).
Grau da decomposição	<ul style="list-style-type: none"> • Grau da decomposição IV ou V.

Fonte: BGK (2014).

Quadro 1b – Critério de qualidade do composto

Critério de qualidade	Exigências de qualidade
Teor de umidade	<ul style="list-style-type: none"> • A granel ao máximo 45% do peso. • Ensacado, ao máximo 35% do peso. • Os compostos com mais de 40% de matéria orgânica se aplicam os teores de umidade máximos segundo o Anexo 2 das especificações de qualidade e de controle.
Matéria orgânica	<ul style="list-style-type: none"> • Ao mínimo 15% da MS determinado por incineração em mufla.
Teores de metais pesados	<ul style="list-style-type: none"> • Valores de referência (mg/kg MS): Chumbo 150, Cádmio 1,5, Cromo 100, Mercúrio 1,0, Níquel 50, Cobre 100, Zinco 400.
Detalhes da declaração	<ul style="list-style-type: none"> • Composto orgânico pronto (granulometria), fabricante, densidade (peso por volume), valor do pH, teor de sais, nutrientes vegetais totais (N, P₂O₅, K₂O, MgO), nutrientes vegetais solúveis (N, P₂O₅, K₂O), nutrientes em traços (segundo as disposições legais sobre fertilizantes), substâncias de efeito alcalino (como CaO), matéria orgânica, peso líquido ou volume. • Recomendações para a aplicação adequada.

Fonte: BGK (2014).

Dentro do controle de qualidade, os produtos derivados de compostos orgânicos são definidos como composto orgânico fresco, composto orgânico pronto, e composto orgânico para substratos.

Composto fresco (41% da produção) é um material higienizado, em decomposição intensa ou apto para decomposição intensa, para fins de adubação e melhoramento de solos. Composto fresco contém elevados teores de matéria orgânica de fácil decomposição. Na agricultura, o composto orgânico fresco também é denominado “húmus nutriente”, ou seja, alimento para a biota do solo. O composto orgânico fresco corresponde aos graus de decomposição II ou III.

O composto pronto (57% da produção) é composto orgânico maduro, higienizado e completamente compatível com as plantas. O produto contém altas proporções de substâncias húmicas, os quais, em forma de húmus estável, contribuem para o melhoramento do solo. Este produto tem sua aplicação no melhoramento do solo e como adubo, sendo disponibilizado com grau de decomposição IV ou V.

O composto orgânico para substratos (2% da produção) é um composto orgânico pronto especial com teores limitados de nutrientes vegetais solúveis e sais. O produto é comercializado em granulometria fina e tem sua aplicação como componente de mistura na produção de substratos e terras para o plantio.

Todos os tipos de compostos orgânicos descritos são disponibilizados em diversas granulometrias. A diversificação dos produtos contribui para a ampliação do potencial de mercado e possibilita atender as necessidades de determinados mercados ou consumidores.

3.1 Controle de qualidade, rotulagem e recomendações de aplicação

Os controles de qualidade são realizados continuamente no âmbito da garantia de qualidade da BGK. Para tal, de acordo com a capacidade de produção da planta, quatro a doze amostras são tomadas anualmente, por um perito independente e reconhecido pela BGK e enviadas para análise, para um laboratório certificado. Os resultados são encaminhados para a BGK e armazenados em um banco de dados central.

Os resultados dessas análises regulares no âmbito da garantia de qualidade são documentados em laudos e disponibilizados aos fabricantes dos compostos orgânicos.

Os laudos apresentam os seguintes itens:

- O selo de qualidade conforme o cumprimento dos critérios de qualidade (como certificado da qualidade comprovada e controle independente);
- A conformidade com diretivas e regulamentos;
- A rotulagem específica de acordo com as disposições legais de fertilizantes;
- A declaração do produto pela organização de controle de qualidade;
- Os resultados das análises;
- Recomendações para a aplicação na agricultura ou para aplicação na horticultura e no paisagismo (de acordo com o produto);
- O valor monetário dos nutrientes e reprodução do húmus por tonelada e hectare;
- Informações sobre o cálculo da demanda de fertilizantes (teores de nutrientes em kg/t e kg/m³);
- Recomendações para a adubação segundo a boa prática (para o respectivo produto).

Além dos laudos emitidos para cada lote, também são emitidos laudos anuais constando as médias das análises do ano passado.

3.2 Aplicação dos compostos orgânicos

As principais finalidades da aplicação de compostos orgânicos são:

- Adubação (devido aos nutrientes vegetais contidos no composto);
- Melhoramento de solos (devido à matéria orgânica e as substâncias de ação alcalina contidos no composto orgânico);

- Componente de mistura (na produção de terras e substratos), também como substituto de turfa.

3.2.1 Adubação

Devido aos teores em nutrientes vegetais (nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio e nutrientes em traços) o composto orgânico tem efeito fertilizante. As quantidades recomendadas de aplicação se orientam conforme a demanda de nutrientes dos cultivos. De modo geral, a aplicação de fertilizantes sintéticos, com exceção de nitrogênio, não é necessária.

Grande parte (95%) do nitrogênio (N) está presente ligado à matéria orgânica, portanto, não há efeito fertilizante do nitrogênio no ano da aplicação. O risco de lixiviação para o lençol freático é, portanto, inexistente, dada a aplicação apropriada.

3.2.2 Melhoramento do solo

Matéria orgânica

Além dos nutrientes, os compostos apresentam quantidades consideráveis de matéria orgânica e a adição deste material húmico contribui expressivamente para o melhoramento de solos.

Os compostos exercem efeitos positivos para as propriedades físicas dos solos, especialmente nos parâmetros relacionados ao volume de poros, capacidade de água, proporção de poros aerosos e aquosos, estabilidade de agregados bem como, os efeitos dos melhoramentos para a inclinação, a degradação e erosão dos solos. Os efeitos positivos para a resistência e funcionalidade como, também, para o aquecimento dos solos, podem ser atribuídos ao efeito das substâncias húmicas.

Os compostos orgânicos consistem de matéria orgânica em proporções de 30% a 50%, a qual se encontra, em compostos orgânicos maduros, amplamente humificada e estabilizada. Estes compostos orgânicos com altos teores de matéria orgânica estabilizada são particularmente apropriados para o melhoramento duradouro e sustentável de solos.

Efeito alcalino

Os compostos contêm relevantes quantidades de cálcio (substâncias de ação alcalina). Estas substâncias contribuem para a estabilização do pH e previnem a acidificação do solo. A ação do cálcio se deve principalmente aos carbonatos de cálcio e de magnésio de efeito alcalino que corresponde ao carbonato de cálcio precipitado finamente disperso de ótima eficácia.

As quantidades de substâncias de efeito alcalino contidas nos respectivos produtos de compostos orgânicos constam nos laudos emitidos pela organização de garantia de qualidade.

3.2.3 Componentes de mistura

Pesquisas e experiências práticas têm mostrado a aptidão dos compostos orgânicos como componentes de mistura, na produção de terras e substratos. A utilização de compostos orgânicos em substratos tem ganhado mais atenção também devido a suas propriedades fitossanitárias e a possibilidade da substituição da turfa. Os compostos orgânicos de substratos são utilizados como componente na produção de substratos e terras, porém não podem ser utilizados diretamente para o plantio.

Para a produção de terras e substratos, os compostos orgânicos de substrato com qualidade comprovada estão disponíveis, com teores limitados de sais e de nutrientes. Paralelamente, compostos orgânicos prontos comuns podem ser utilizados como componente de mistura, sendo aplicado principalmente na produção de terras de cobertura (camada superficial do solo). Os compostos orgânicos utilizados são de granulometria fina e média, de grau de decomposição V.

3.3 Áreas de aplicação dos compostos orgânicos

Os compostos podem ser empregados como fertilizante orgânico ou condicionador de solo.

3.3.1 Agricultura

Os compostos orgânicos utilizados na agricultura podem ser frescos ou maduros, de granulometria variada.

Devido à maior mineralização do húmus contido nos solos das lavouras, em função da maior intensidade de cultivo, a fertilidade do solo deve ser conservada e fortalecida pela substituição direcionada do húmus.

Um balanço de húmus cada vez mais equilibrado constitui uma parte relevante da boa prática da agricultura. Os compostos orgânicos produzidos a partir de resíduos orgânicos da coleta seletiva apresentam uma taxa de reprodução de húmus comparativamente alta. Isso se deve principalmente às formas estáveis não degradáveis do húmus nos compostos prontos.

Além disso, via de regra, toda a demanda básica de nutrientes, com exceção de nitrogênio, pode ser providenciado pelo composto orgânico.

3.3.2 Viticultura e fruticultura

Na viticultura e fruticultura predominam culturas permanentes, de longa duração. Os compostos orgânicos de granulometria fina e média podem ser espalhados antes da semeadura de coberturas verdes.

Solos virgens podem ser melhorados com compostos orgânicos de teor limitado de nutrientes e granulometria média. De acordo com a utilização pretendida, compostos orgânicos prontos bem como, compostos orgânicos frescos, podem ser aplicados.

3.3.3 Horticultura, paisagismo e parques públicos

O paisagismo e parques públicos frequentemente são encontrados em locais que necessitam de regeneração de solos degradados, antes que o plantio e uso seja possível. A ampla gama de tarefas de paisagismo compreende também, como pré-requisito para a criação de espaços livres de todos os tipos, medidas extensas para a produção de solos com teores de húmus suficientes.

A alta demanda de matéria orgânica torna o paisagismo o candidato ideal para a aplicação de compostos orgânicos, utilizados particularmente no melhoramento de solos.

As áreas verdes públicas exigem medidas de cultivo e técnicas semelhantes aos de paisagismo, e geralmente compostos orgânicos prontos de qualidade comprovada, de granulometria fina e média, são aplicados.

3.3.4 Aplicação ao céu aberto na horticultura profissional e privada

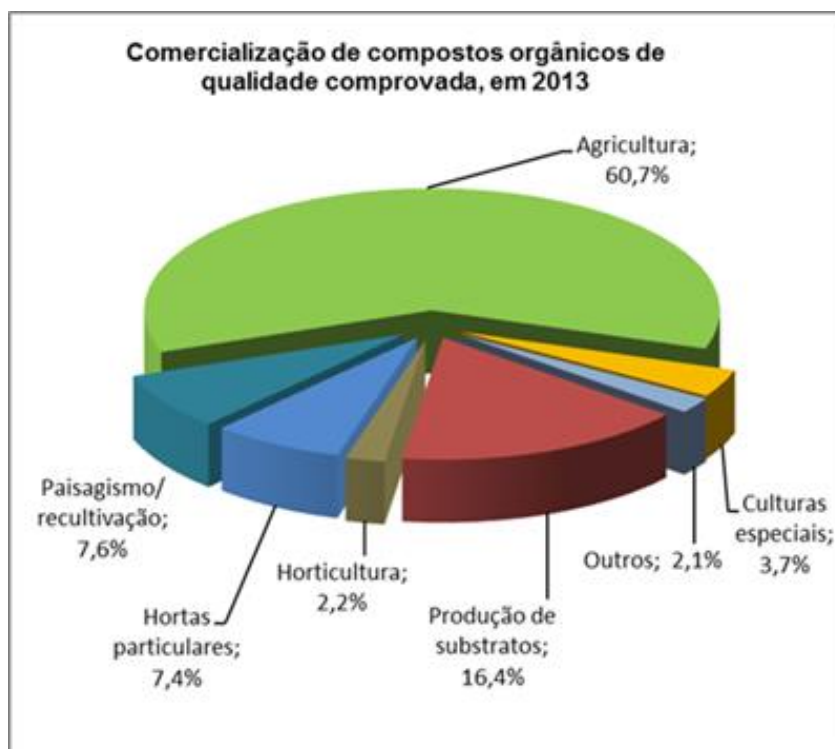
Na maioria dos setores da horticultura (verduras, floricultura, arbustos, viveiros, hortas em quintais) observa-se a intensa aplicação de produtos destinados ao melhoramento dos solos. Os produtores dos compostos orgânicos têm se adaptado às exigências elevadas de cada um dos setores e oferecem uma ampla gama de qualidades diferenciadas, com preferência de compostos orgânicos prontos.

A aplicação de compostos orgânicos em hortas particulares é tradicional e amplamente difundida. A aplicação de compostos orgânicos comercialmente disponíveis em hortas particulares é adequada em locais onde não há compostagem própria. A condução de análises de teores de nutrientes nos solos é recomendada, para evitar a eutrofização dos solos.

4 CONCLUSÕES

A coleta seletiva e a compostagem de resíduos orgânicos possibilitaram a exploração de novos recursos para a produção de adubos e substratos apropriados para o melhoramento de solos. Na Alemanha, a demanda de compostos orgânicos de boa qualidade hoje supera a oferta destes produtos. A instalação de qualidades controladas tem contribuído consideravelmente para a padronização e garantia de altas qualidades. Entretanto, a produção anual de compostos orgânicos de qualidade comprovada na Alemanha é de três milhões de toneladas. Grande parte (61%) dessa produção é aplicada na agricultura como adubo orgânico. Os diferentes setores de paisagismo e da horticultura consomem 17% dos compostos orgânicos produzidos, e 16% são utilizados como componente na produção de terras e substratos.

Figura 3 – Comercialização de compostos com certificação, em 2013



Fonte: BGK (2014).

REFERÊNCIAS

BKG – **Bundsgütegemeinschaft Kompost e.V.** 2014. Disponível em: <www.kompost.de>. Acesso em: 28 ago. 2014.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

KEHRES, Bertram; THELEN-JÜNGLING, Maria. Gestão de Qualidade: certificação de produtos para o emprego sustentável do composto orgânico. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil.** Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Maió – 2017.**

A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

The Biodigestion of Solid Waste in Germany

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Engenheiro Civil Christof Heußner

Engenheiro Mecânico Axel Hüttner

Engenheiro Mecânico Thomas Turk

RESUMO

No ano de 2013 foi concluído o projeto de pesquisa financiado pelo Ministério Federal Alemão para o meio ambiente “Aumentar a eficiência energética durante o aproveitamento biogênico dos resíduos”. O *status quo* e a evolução esperada em termos de tecnologias para a fermentação dos resíduos biodegradáveis pode ser descrito como segue: Na Alemanha 63 plantas estão em operação, 46 com tecnologias secas e 17 com úmidas. Os processos secos estão divididos em 23 contínuos e 23 descontínuos (em batelada). A posição dominante da tecnologia seca reflete-se necessariamente em uma e duas fases porque processos com duas fases são limitados para processo úmidos. Apenas nove plantas estão operando com duas fases. As tecnologias de fermentação empregadas passaram por um desenvolvimento significativo. Nos anos 1990, dominavam as tecnologias por via úmida. Nos anos 2000, quase que exclusivamente foram implementados processos a seco. Esta evolução reflete-se também nas plantas em construção. A eletricidade líquida é gerada em maior intensidade nos processos secos contínuos. Apesar dos processos secos descontínuos terem menor consumo, ainda não conseguem alcançar os mesmos rendimentos que o contínuo. Os processos termofílicos garantem uma geração de metano mais elevada. O potencial total para produção de energia renovável a partir da fermentação está na ordem de 1.772 GWh de eletricidade e calor 1.556 GWh. O maior potencial de geração de energia está na ampliação da capacidade de fermentação para os resíduos orgânicos já coletados seletivamente, bem como para àqueles que serão coletados durante a ampliação da coleta seletiva de orgânicos. Abordagens de otimização em engenharia e na operação da planta resultam no incremento do nível de eficiência de 1.4 e de 1.2 no rendimento de calor.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Eficiência energética. Otimização de processo. Emprego de biogás. Energia renovável.

ABSTRACT

In the year 2013, the German Federal Ministry for the environment funded the research project “Increasing energy efficiency in the utilization of biogenic residues” was completed. The *status quo* and the expected development in terms of technologies for the fermentation of biowaste can be

outlined as follows: In Germany 63 plants are in operation, 46 with dry and 17 with wet technologies. The 46 dry plants are divided into 23 continuously and 23 discontinuously (batchwise) procedures. The dominance of the dry processes is reflected necessarily in one and two-step procedures because two-step processes are limited to wet processes. Only nine plants are operating with two stages technologies. In the used fermentation technologies, there has been a significant development. In the 90 years wet methods dominated. In the 2000s, almost exclusively dry processes have been installed. This development is also reflected in the plants under construction. The highest net electricity yield is generated by dry continuous processes. Despite the lower own energy requirement dry discontinuous method does not achieve these benefits. The thermophilic process results in all methods to significantly higher methane yields. The total potential addition of recoverable amounts of energy (net yield) by the fermentation of biowaste is forecast to 1,772 GWh of electricity and 1,556 GWh of heat yield. The greatest potential of energy generation lies in the increase of fermentation capacity for already collected biowaste as well as the fermentation of biowaste also detectable by the widespread implementation of biowaste containers. From the determined optimization approaches to engineering and plant operation results in a rate of increase in the current efficiency of about 1.4, and in the heat yield of 1.2.

Keywords: Anaerobic digestion. Energy efficiency. Process optimizing. Biogas use. Renewable energy.

1 INTRODUÇÃO

A biodigestão voltada para os resíduos orgânicos é praticada, há muito tempo, em tratamento de efluentes (lodos) e na agricultura (dejetos de animais). As tecnologias de tratamento anaeróbio para aplicação em resíduos sólidos, como resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, apenas foram introduzidas no início da década de 1990. Na fase intensiva da implementação do programa “Coleta seletiva e aproveitamento de resíduos orgânicos”, respectivamente durante os anos de 1988-1995, a tecnologia de tratamento anaeróbio ainda não possuía o estado de desenvolvimento necessário. A tecnologia ganhou mais importância apenas nos últimos anos. No início, a relutância à introdução da tecnologia se devia a problemas técnicos e econômicos. Foram observadas falhas técnicas devido a distúrbios funcionais em todo o processo (mecânicos e biológicos), bem como, a um desgaste excepcionalmente alto. Desta forma, custos elevados de investimento e operação inibiram inicialmente seu estabelecimento, apesar das múltiplas vantagens ecológicas atribuídas à tecnologia anaeróbia.

Entretanto, a tecnologia de biodigestão anaeróbia tem sido desenvolvida e otimizada, e os problemas técnicos foram reduzidos a um nível aceitável.

A Lei das Energias Renováveis promoveu condições financeiras favoráveis para as tecnologias anaeróbias, na Alemanha. Embora os custos de investimento de plantas de tratamento anaeróbio ainda sejam elevados, atualmente a diferença dos custos em relação às plantas aeróbias é expressivamente reduzida, comparado com os custos praticados nos meados dos anos 1990. Devido às receitas com a energia que podem ser obtidas como consequência dos regulamentos para os processos anaeróbios definidos pela Lei de Energias Renováveis, os custos de operação das

tecnologias anaeróbia e aeróbia agora se encontram no mesmo nível. Em condições específicas, os processos de biodigestão anaeróbia podem até apresentar mais vantagens econômicas.

A cota de reciclagem de 65% e a obrigação da coleta seletiva de resíduos orgânicos a partir de janeiro de 2015, definida pela Lei Alemã da Economia Circular (ALEMANHA, 2012) terão uma função chave para a expansão do aproveitamento dos resíduos orgânicos e conseqüentemente, das tecnologias anaeróbias.

No início do ano de 2013, foi concluído o projeto de pesquisa “Aumento da eficiência energética no aproveitamento de resíduos orgânicos” (FKZ-Nr. 03KB022) fomentado pelo Ministério do Ambiente, Natureza, Construção e Segurança Nuclear (BMU). No âmbito deste projeto de pesquisa e desenvolvimento foi pesquisado o estado da arte e o potencial de desenvolvimento e otimização no tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos. O foco estava no gerenciamento de fluxos de massa bem como, conceitos e tecnologia.

2 METODOLOGIA DO LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados incluiu plantas de tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo bem como, plantas para o tratamento de rejeitos. Plantas que valorizam matérias-primas renováveis não foram consideradas. O levantamento de dados foi conduzido nos anos 2011 e 2012, por meio de questionários, entrevistas e visitas. Depois da conclusão do levantamento, os dados foram verificados por telefone com a vasta maioria dos operadores das plantas. Adicionalmente, os documentos foram enviados para os fabricantes e fornecedores mais relevantes, também com o objetivo de cruzar os dados levantados.

3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL NA ALEMANHA

Na Alemanha as tecnologias de biodigestão alcançaram desenvolvimento expressivo nas últimas décadas devido às políticas públicas implementadas para a valorização da energia renovável. O estabelecimento de norma legal, em âmbito federal, que torna obrigatória a implementação da coleta seletiva de orgânicos, potencializa o emprego das técnicas de valorização das frações orgânicas, entre elas a própria biodigestão. Para um melhor planejamento e adequação das práticas ao novo cenário, tem-se a necessidade de formação de banco de dados. Para tal, este item retratará o *status quo* e as potencialidades da biodigestão de resíduos sólidos urbanos na Alemanha.

3.1 Estado Atual e Estimativa de Potencial no Aproveitamento de Resíduos Orgânicos Domésticos e de Paisagismo

Na Alemanha, a coleta seletiva de resíduos orgânicos tem atingido um alto nível de aplicação. Entretanto, a proporção de energia gerada por estes resíduos ainda é comparativamente baixa. O aproveitamento dos resíduos orgânicos, na sua maioria, ocorre por meio da compostagem. Segundo o Instituto de Estatística Alemão, 8,73 milhões de Mg de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo foram coletados no ano 2010 (DESTATIS, 2012).

Estes resíduos são tratados em cerca de 990 plantas de compostagem e 63 plantas de tratamento anaeróbio (Tabela 1). A quantidade de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo atualmente processada em plantas de tratamento anaeróbio é de 1,15 milhões de Mg por ano. A quantidade adicional destes resíduos que pode ser tratado pela biodigestão anaeróbia é avaliada em 6,6 milhões de Mg por ano. Essa quantidade resulta da ampliação do sistema de coleta seletiva de resíduos orgânicos em todo o território e dos resíduos orgânicos já coletados, mas ainda submetidos à compostagem.

Tabela 1 – Estado atual das plantas de tratamento para o aproveitamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo (2012) e do tratamento de rejeitos (2011)

Aproveitamento dos resíduos orgânicos	
Capacidade de tratamento instalada	12,0 milhões Mg/a
Quantidade de plantas de compostagem	990
Quantidades tratadas	9,6 milhões Mg/a
Quantidade de plantas de tratamento anaeróbio	63
Capacidade de processamento (biodigestão e compostagem)	1,84 milhões Mg/a
Quantidade de resíduos orgânicos conduzida para o tratamento anaeróbio	1,15 milhões Mg/a

Tratamento de rejeitos (TMB¹, EMB², EMF³)	
Capacidade instalada (total)	5,76 milhões Mg/a
Quantidade de plantas (total)	44
Plantas de biodigestão	12
Capacidades de processamento relativo às quantidades totais (TMB, compostagem e biodigestão)	3,24 milhões Mg/a
Capacidades de processamento da etapa biodigestão anaeróbia	0,68 milhões Mg/a

¹ TMB: tratamento mecânico-biológico com integração do aterro sanitário

² EMB: Estabilização mecânico-biológica (Secagem)

³ EMF: Estabilização mecânico-física (Secagem)

Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Tabela 2 – Prognóstico das quantidades totais de resíduos orgânicos adicionalmente tratáveis por biodigestão anaeróbia, na Alemanha

	Resíduos orgânicos domésticos	Resíduos orgânicos de paisagismo	Total
	(Mg/a)	(Mg/a)	(Mg/a)
Quantidade de resíduos orgânicos adicionalmente tratáveis, proveniente de resíduos já inclusos na coleta seletiva (existente)	2.099.000	2.433.000	4.531.000
Quantidade de resíduos orgânicos adicionalmente tratáveis, proveniente da coleta seletiva de resíduos orgânicos, ampliada para todo o território	2.056.000	-	2.056.000
Quantidade total	4.155.000	2.433.000	6.587.000

Fonte: Fricke *et al.* (2013).

Deve ser considerado nas quantidades adicionalmente coletadas, que os resíduos domésticos, contendo restos de cozinha, podem produzir quantidades de biogás de até 100% a mais, comparado com resíduos de paisagismo.

3.2 Estado Atual e Estimativa de Potencial no Tratamento de Rejeitos

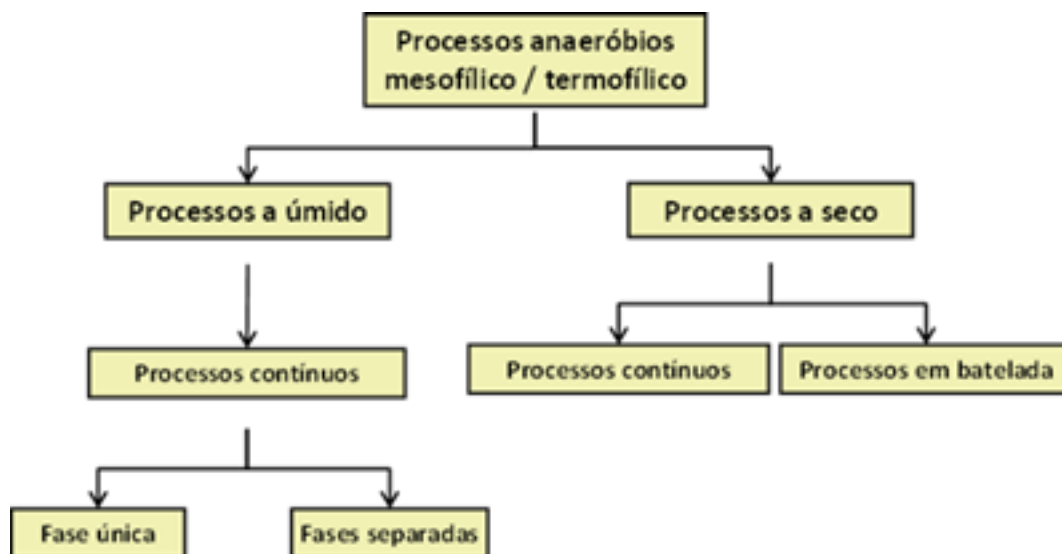
Na Alemanha, atualmente 44 plantas de TMB estão em funcionamento, onde os resíduos sólidos urbanos (RSU) são submetidos a um tratamento mecânico e separados em diversos fluxos de materiais, os quais depois são tratados especificamente. A quantidade total de RSU tratada foi de 5,76 milhões Mg/a (ASA, 2011). Deste montante, 59% foram tratados em plantas de TMB convencionais, com integração de aterro sanitário, correspondendo a 3,24 milhões Mg/a. A metade destes resíduos (50%), a fração fina (< 60 mm a < 40 mm) foi tratada por processos biológicos (1,64 milhões Mg/a), onde 69% (0,96 Mio. Mg/a) foram submetidos ao tratamento aeróbio e 31% (0,68 milhões Mg/a) foram tratados por biodigestão anaeróbia.

Atualmente doze plantas de TMB com etapa de biodigestão anaeróbia estão em funcionamento (Tabela 1). Da fração fina submetida a um tratamento biológico, apenas 50 a 60% são conduzidos para a biodigestão, conforme o princípio da biodigestão de fluxos parciais. Dos processos aplicados, cinco pertencem ao processo a úmido e sete, a seco.

Devido ao superávit em capacidades de tratamento de resíduos, especialmente de incineração, provavelmente não haverá a construção de novas plantas de TMB. A demanda de capacidades para o tratamento anaeróbio existe em locais que ainda não possuem etapas de tratamento anaeróbio.

4 PROCESSOS DE TRATAMENTO POR BIODIGESTÃO

Figura 1 – Classificação dos tipos de processos da biodigestão



Fonte: Fricke *et al.* (2014).

As tecnologias de biodigestão de resíduos sólidos são diferentes das tecnologias aplicadas para a biodigestão de resíduos do tratamento de efluentes, de resíduos da agricultura e indústria bem como, das matérias-primas renováveis. As diferenças podem ser apontadas desde as tecnologias anaeróbias empregadas até as técnicas de preparo mecânico anterior à biodigestão até os processos de beneficiamento da massa digerida.

A classificação ocorre conforme o tipo do processo anaeróbio e de acordo com o tipo de alimentação da massa a ser digerida e não é determinada pelo tipo de pré-tratamento das matérias-primas da biodigestão. A percolação em condições anaeróbias é classificada como pré-tratamento a úmido, a própria biodigestão é classificada como processo úmido. Processos de prensagem são classificados como tratamento a seco, e dependendo da qualidade dos materiais produzidos (*output*), processos a seco ou a úmido são aplicados.

Os métodos e processos aplicados na biodigestão podem ser classificados segundo a Figura 1. Esta classificação fornece a base para a apresentação do estado atual da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, na Alemanha.

4.1 Processos Mesofílicos e Termofílicos

Nos processos anaeróbios, diversos organismos são responsáveis pela decomposição, cujo tipo e capacidade depende das temperaturas de processo. Duas estreitas faixas de temperatura são relevantes, onde os respectivos organismos apresentam seu desempenho ótimo. Na prática, as temperaturas relevantes se encontram nas faixas mesofílica (34 °C a 42 °C) e termofílica (50 °C a 60 °C). Todos os processos podem ser conduzidos nas faixas termofílicas e mesofílicas.

4.2 Processos a Seco e a Úmido

Os processos de biodigestão são diferenciados de acordo com o teor de umidade no material alimentado, em processos a seco e a úmido. Outra distinção advém do tipo de operação, em sistema contínuo ou em batelada. Os processos a seco operam com teores de matéria seca (MS) de 25% a 45%. Os processos em batelada operam com teores de MS acima de 30%, onde neste caso não existe a limitação dos teores de MS para cima, ela se determina pelo respectivo material de alimentação. Os teores de MS de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo se encontram, via de regra, entre 35% a 50%. Os processos úmidos apresentam valores de MS menores de 12% a 15%, e os teores inferiores de MS, por exemplo, na aplicação de reatores com leito fixo, estão abaixo de 1%.

4.3 Processos a Seco Contínuos e em Batelada

Os processos contínuos são caracterizados pela alimentação do reator em intervalos regulares, e retirada de material digerido, em quantidades correspondentes. Com isso, biogás com pouca variação de quantidade e qualidade é produzido.

Por outro lado, nos processos em batelada, os reatores (túneis) são carregados com material fresco, em alguns processos misturado com uma proporção de material já digerido, e em seguida, fechados. Por um prazo de três a quatro semanas, o material é irrigado com água de processo e percolado, respectivamente, promovendo a degradação anaeróbia e a formação de biogás nos túneis anaeróbios e nos tanques de armazenagem de percolado. Independente da integração de um processo de biodigestão a úmido do percolado, estes processos em batelada são classificados como processos a seco, consciente que certa ambiguidade não pode ser evitada.

4.4 Processos de Fase Única e de Fases Separadas

A degradação anaeróbia ocorre em quatro etapas consecutivas, com participação de diversos tipos de micro-organismos: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Em processos de fase única, todos os passos de degradação ocorrem dentro de um reator, portanto as condições do meio não podem ser adaptadas às específicas exigências dos vários grupos de micro-organismos que participam na decomposição do substrato. Nos processos de fases separadas a etapa de hidrólise e a formação de ácidos de baixo peso molecular ocorre em um ambiente separado da etapa metanogênica. A separação das fases possibilita a melhor adaptação das condições específicas de meio às exigências dos micro-organismos, mas resulta em um esforço maior em relação aos equipamentos, construção e operação. Os processos clássicos de fases separadas são restritos a processos a úmido.

Os processos de fases quase-separadas consistem em combinações de processos com uma primeira fase aeróbia, seguida por uma fase anaeróbia. A maior parte dos micro-organismos acidificantes são anaeróbios facultativos podendo existir na presença ou ausência de oxigênio. A fase aeróbia instalada antes do processo anaeróbio supostamente resulta em uma hidrólise e

acidificação mais eficiente. O aquecimento do meio para as temperaturas desejadas mesofílicas ou termofílicas pode ser efetuado pela etapa aeróbia anterior, porém, estes processos são classificados como processos de fase única.

5 ESTADO E DESENVOLVIMENTO DA BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DOMÉSTICOS E DE PAISAGISMO

Avaliando a linha do tempo, temos que o processo de desenvolvimento das tecnologias de biodigestão estava diretamente relacionado ao tipo de substrato empregado, desta forma tecnologias de biodigestão à úmido representaram as primeiras formas de processo em decorrência de seu emprego em resíduos homogêneos seja da agricultura seja de estação de tratamento de esgoto. Com a ampliação da aplicação para outras formas de resíduos orgânicos, tivemos o avanço no sentido dos processos a seco, tanto contínuos quanto descontínuos. Este item abordará as individualidades de cada tipo de tecnologia de biodigestão, comparará seus resultados bem como avaliará as tendências tecnológicas.

5.1 Estado das Instalações e da Engenharia de Processo da Biodigestão de Resíduos Orgânicos Domésticos e de Paisagismo

No ano 2012 funcionavam, na Alemanha, 63 plantas para o tratamento de resíduos domésticos e de paisagismo, segundo o estudo desenvolvido para o BMU (Tabela 3).

Tabela 3 – Estado das plantas de aproveitamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, na Alemanha

Estado	Quantidade	Capacidade
Plantas em funcionamento (02/2012)	63	1.359.000 Mg/a
Entraram em funcionamento até o fim de 2013	18	580.000 Mg/a
Plantas desativadas (10/2012)	5	143.000 Mg/a
Encerrou o tratamento de resíduos orgânicos (10/2012)	2	65.000 Mg/a

Fonte: Fricke *et al.* (2013; 2014).

Ao menos cinco plantas, com capacidade de cerca 143.000 Mg/a, foram desativadas principalmente na década de 1990. Os motivos para a desativação foram:

- Duas por falhas no funcionamento;
- Uma por custos de tratamento não aceitáveis;
- Uma por desativação de uma instalação experimental e de demonstração;
- Uma por falta de resíduos apropriados.

Até o fim do ano 2013, mais 18 plantas entraram em funcionamento, com capacidade de processar 580.000 Mg/a, aumentando a capacidade total de tratamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo para 1,94 milhões Mg.

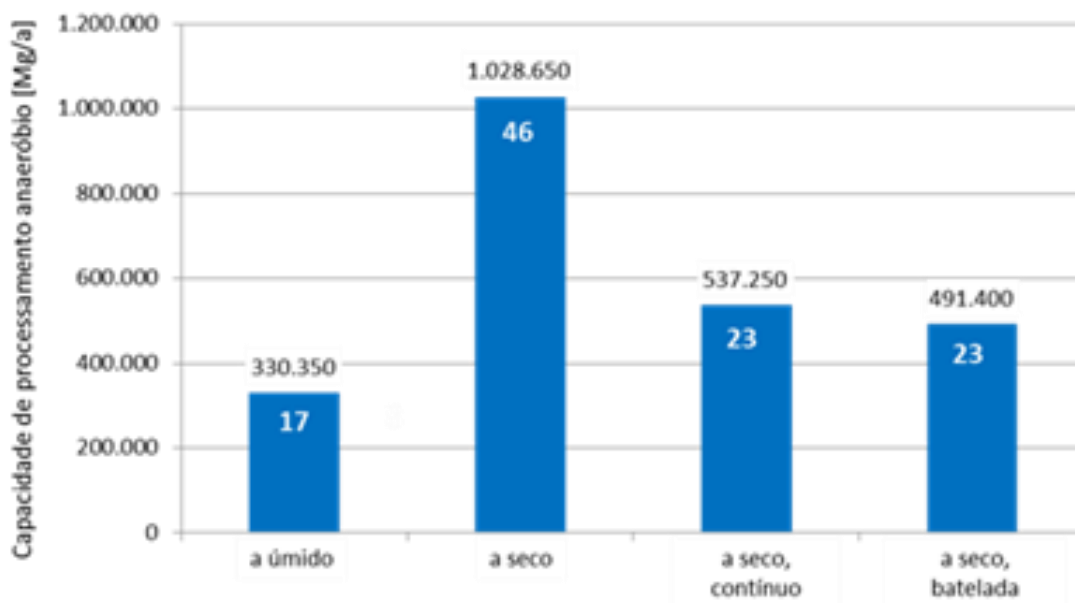
5.2 Sistemas e Processos de Biodigestão

Na Alemanha, dezessete plantas são operadas em processo a úmido, com capacidade de cerca de 0,33 milhões Mg/a, e 46 plantas operam em processo a seco, com capacidade de cerca 1,03 Mg/a. As plantas com operação a seco podem ser agrupadas em 23 processos contínuos, com capacidade de aproximadamente 0,54 milhões Mg/a e 23 plantas operadas em batelada, com capacidade de 0,49 milhões Mg (Figura 2). As dezoito plantas que entraram em operação até o fim do ano 2013 são todas operadas em processo a seco.

A prevalência dos processos a seco se reflete, conseqüentemente, também nos processos de fases únicas ou separadas, pois, os processos clássicos de fases separadas são limitados a processos a seco. Das 63 plantas, apenas nove plantas, com capacidade de 0,17 milhões Mg/a, são operadas em fases separadas (Figura 3).

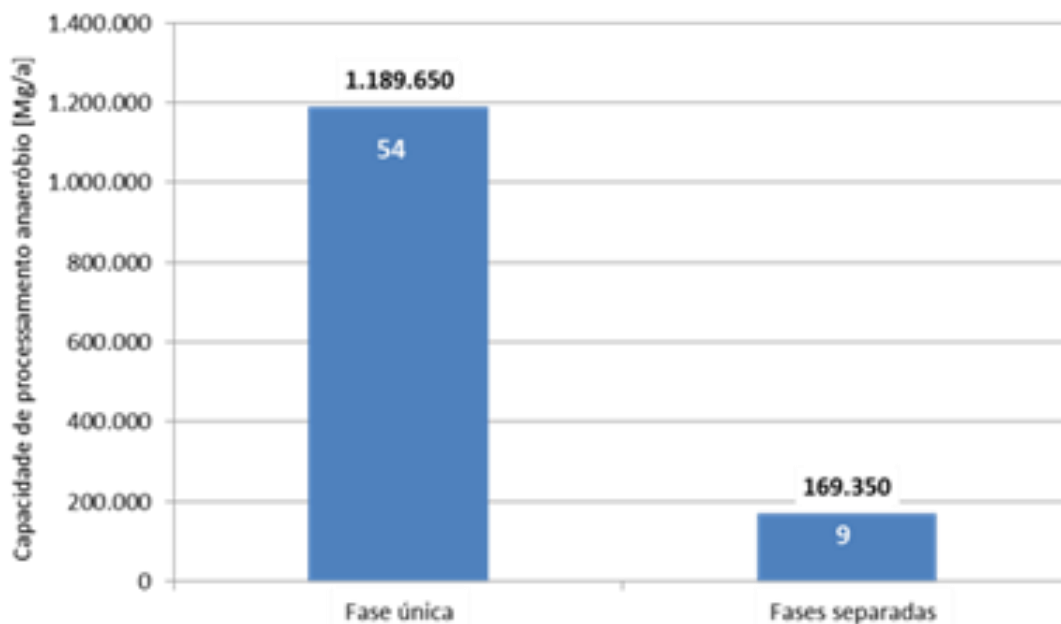
São 36 as plantas operadas na faixa mesofílica (0,75 milhões Mg/a) e 27, na faixa termofílica (0,60 Mg/a). Nos processos contínuos a seco, a operação na faixa termofílica é predominante, enquanto os processos em batelada a seco, na sua maioria, são operados na faixa mesofílica.

Figura 2 – Quantidade e capacidades dos processos a seco e a úmido, utilizados no tratamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo na Alemanha



Fonte: Fricke *et al.* (2013; 2014).

Figura 3 – Quantidade e capacidades dos processos em fase única e fases separadas utilizados no tratamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, na Alemanha



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

5.3 Evolução Temporal da Construção de Plantas para o Tratamento Anaeróbio de Resíduos Orgânicos Domésticos e de Paisagismo

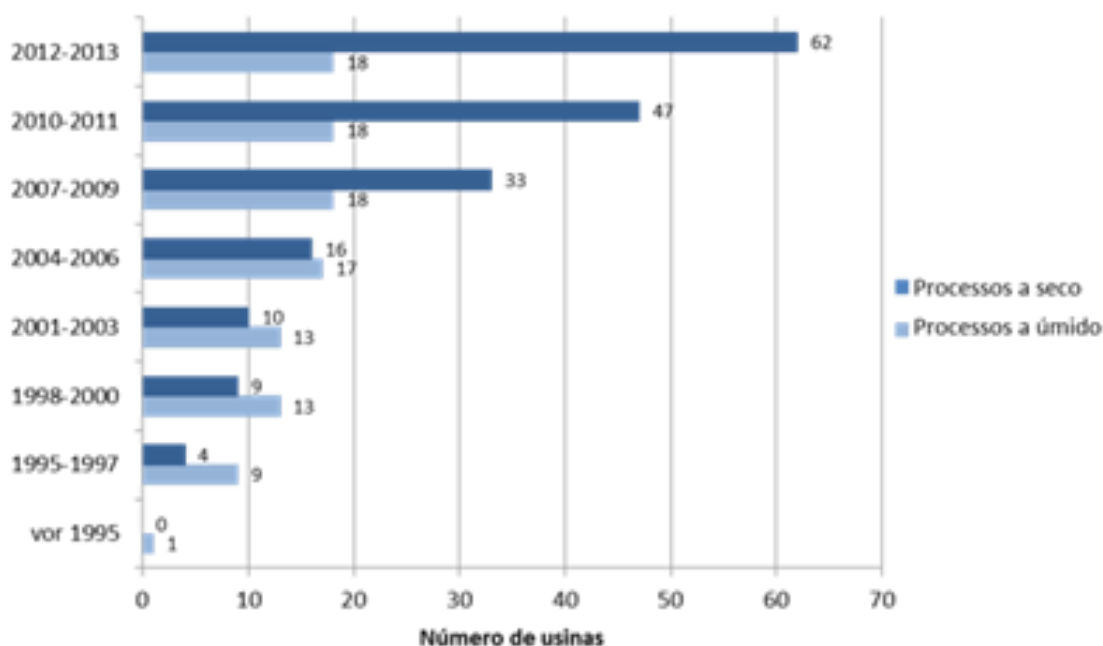
O tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, em escala industrial, teve início nos meados da década de 1990, antes apenas existiam plantas pilotos e de demonstração (Figura 4). A maior parte das plantas novas foi construída após 2003.

A tecnologia de processos e a operação apresentou uma forte evolução nos anos passados. Enquanto a construção de processos a úmido dominou na década de 1990, igualmente operados em fase única ou com fases separadas, a partir de 2000, praticamente todas as novas instalações construídas foram concebidas para a operação a seco. Este desenvolvimento continua nas instalações ainda em construção: todas as plantas em construção são processos a seco. O desenvolvimento das tecnologias a seco, em batelada também contribuiu para a prevalência dos processos a seco, na Alemanha. O “boom” dos processos a seco, em batelada, se iniciou em 2006. Das 36 plantas de tratamento anaeróbio a seco, instaladas na Alemanha desde 2006, 23 funcionam em sistema batelada. Das plantas atualmente construídas, a metade é concebida em sistema contínuo, a outra, em batelada.

Inicialmente, essa evolução também foi promovida pela Lei das Energias Renováveis (EEG), que garante subsídios às energias renováveis, e que promoveu especificamente os processos a seco. Consequentemente, este fomento específico dos processos a seco foi excluído quando da alteração da EEG no ano 2012.

Em relação aos sistemas e processos de fase única ou de fases separadas, o desenvolvimento aponta para a preferência de processos de fase única. Nos seis anos passados, nenhuma nova planta de fases separadas para o tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo entrou em funcionamento. Das plantas atualmente construídas, também nenhuma foi concebida para a operação em fases separadas. Alguns dos fabricantes mais renomados relataram oferecer processos de fases separadas apenas se o cliente manifestasse esta vontade.

Figura 4 – Ano do início de funcionamento de plantas de tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, inclusive as plantas em construção, com distinção dos processos a seco e a úmido – Situação em 12/2013, inclusive as plantas em construção

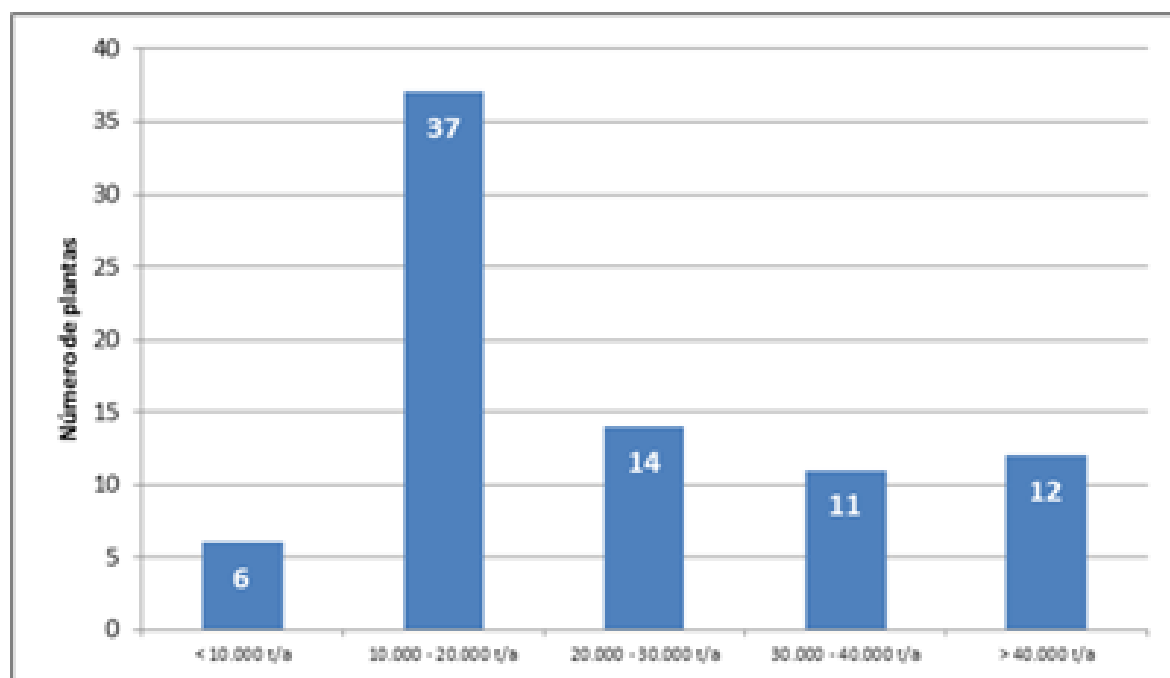


Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Observa-se a tendência no aumento de sistemas com processos termofílicos. Em vários locais com processos a seco em batelada, a modificação do sistema para o processo termofílico é prevista. Como verificado com os fabricantes e fornecedores das plantas em construção, optou-se também, na maioria dos casos, para o processo termofílico. Além do efeito de higienização, espera-se obter um maior rendimento de biogás.

As capacidades de processamento das plantas de tratamento de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo se encontram todas abaixo de 50.000 Mg/a. A capacidade de tratamento instalada com mais frequência está na faixa de 10.000 Mg/a a 30.000 Mg/a. Comparado com plantas de incineração de rejeito ou plantas de compostagem, essas capacidades são pequenas. As plantas atualmente construídas apresentam maiores capacidades de tratamento, situadas principalmente na faixa de 30.000 Mg/a a 70.000 Mg/a (Figura 5).

Figura 5 – Capacidades de processamento das plantas de tratamento anaeróbico para resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo – Situação em 02/2013. Inclusive as plantas em construção e imediatamente antes do início da construção



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

5.4 Disponibilização de Energia na Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos Domésticos e de Paisagismo

O objetivo geral da valorização dos resíduos é o de conseguir atingir um balanço ideal entre maiores taxas de recuperação de energia e uma boa qualidade dos produtos reciclados. A eficiência energética da reciclagem de materiais provenientes de resíduos orgânicos pode ser maior através da intensificação do uso de tecnologias anaeróbias.

5.4.1 Produção do biogás e do metano

Para o aproveitamento do biogás na forma de biometano é necessário implementar diversos sistemas de limpeza e purificação visando seu emprego como fonte de energia substituta ao gás natural.

Processos anaeróbios a seco e a úmido

A Tabela 4 mostra as quantidades médias de biogás e de teores de metano dos diversos sistemas e processos. O rendimento de biogás dos processos a seco é ligeiramente elevado comparado com o rendimento dos processos a úmido. O rendimento alto registrado nos processos termofílicos a úmido é um valor isolado. Os processos a seco em batelada apresentam rendimentos de biogás menores. Os dados de desempenho na Tabela 4 se referem ao material de alimentação

(*input*) dos reatores, onde a relação do *input* para a planta fornece dados mais pertinentes, pois possibilita discriminar a quantidade de energia de fato produzida por tonelada de resíduos orgânicos. Nos processos contínuos a úmido e a seco, em média 20% (12% a 30%) do material descarregado é separado na etapa de tratamento inicial, antes da etapa de biodigestão, e conduzido diretamente para a compostagem. Devido à remoção de componentes pesados e de areia, os processos a úmido tendem apresentar valores elevados para estes componentes, comparado com os processos a seco em batelada que apresentam apenas 7% em média (0% a 10%). Conforme as taxas médias de separação, aplicam-se os fatores 0,8 e 0,93, para o cálculo relativo ao *input* da planta. Essa relação para o *input* das plantas resulta em uma redução das quantidades específicas de biogás e metano produzidas. Devido à separação de menores quantidades de resíduos antes da etapa de biodigestão, nos processos em batelada, a redução do rendimento específico de biogás também é pequena.

Do ponto de vista energético, o teor de metano tem maior relevância para a avaliação do desempenho dos processos. Os teores de metano determinados foram entre 51% v/v a 66% v/v (BMU, 2013). Os processos a úmido apresentaram concentrações de metano elevadas, com 63% v/v comparado com os processos a seco, os quais obtiveram valores médios de 58% v/v para os processos contínuos e de 57% v/v, para os processos em batelada. Os processos a úmido apresentam teores de metano mais altos comparados com os processos a seco contínuos, portanto os rendimentos específicos destes dois tipos de processo se encontram praticamente ao mesmo nível. As quantidades específicas de metano dos processos a seco em batelada se encontram aproximadamente 20% abaixo das respectivas quantidades dos processos contínuos.

Processos anaeróbios mesofílicos e termofílicos

O processo termofílico – nos tempos de retenção praticados – resulta em teores de biogás e correspondentemente, de metano, expressivamente elevados em todos os sistemas e processos (Tabela 2). O acréscimo na produção de metano é resultado do aumento da quantidade específica de biogás. Nos processos contínuos, a diferença está entre 21% a pouco menos de 30%. Nos processos a seco em batelada, a diferença está menor. A média do acréscimo no rendimento de metano observada nestes processos é de cerca 9%.

A demanda de calor dos processos termofílicos, comparado com os processos mesofílicos, é suprido em várias vezes pela produção adicional de energia térmica que resulta deste processo.

Os processos a seco em batelada, bem como os processos a úmido são, na sua maioria, operados na faixa mesofílica, enquanto a operação na faixa termofílica é mais encontrada nos processos contínuos a seco. Os processos primeiramente mencionados apresentam, portanto, um determinado potencial de otimização.

Processos anaeróbios de fase única e de fases separadas

Os processos de fases separadas foram avaliados para verificar se, na prática, os elevados rendimentos de metano esperados realmente são produzidos e, portanto, os maiores esforços na construção e na operação são justificados. Segundo a literatura, os processos de fases separadas resultam em rendimentos de metano maiores comparados com os processos de fase única. Porém, na prática, no tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, não foi possível confirmar os resultados.

Tabela 4a – Quantidades de biogás e teores de metano médios específicos dos diferentes sistemas e tecnologias de processos para o tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo – relativo ao *input* para os reatores e para as plantas

Processo		Quantidade de biogás (m ³ /Mg <i>input</i> para o reator)	Quantidade de biogás (m ³ /Mg <i>input</i> para a planta)	Teor de metano (%)	Quantidade de metano (m ³ /Mg <i>input</i> para a planta)
a úmido	total	111	89	63	56
	Fase única	106	85	62	53
	- mesofílico	100	80	62	50
	- termofílico	130	104	63	66
	Fases separadas	115	92	63	58
	- mesofílico	115	92	63	58
	- termofílico	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.

Fonte: Fricke *et al.* (2013; 2014).

Tabela 4b – Quantidades de biogás e teores de metano médios específicos dos diferentes sistemas e tecnologias de processos para o tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo – relativo ao *input* para os reatores e para as plantas

Processo		Quantidade de biogás (m ³ /Mg <i>input</i> para o reator)	Quantidade de biogás (m ³ /Mg <i>input</i> para a planta)	Teor de metano (%)	Quantidade de metano (m ³ /Mg <i>input</i> para a planta)
a seco	contínuo	122	98	58	57
	- mesofílico	109	87	59	51
	- termofílico	123	99	58	57
	batelada	87	81	56	46
	- mesofílico	87	81	56	45
	- termofílico	91	85	56	48

Fonte: Fricke *et al.* (2013; 2014).

5.4.2 Disponibilização de energia líquida

A disponibilização de energia através do aproveitamento do biogás e a demanda de energia para o processo da biodigestão é de importância decisiva para a avaliação da eficiência energética dos diversos processos. Afinal, este fato deve ser visto no contexto geral, com outros fatores como a disponibilidade das instalações, a vida útil dos equipamentos e os desgastes relacionados à construção civil e às máquinas (demanda acumulada de energia).

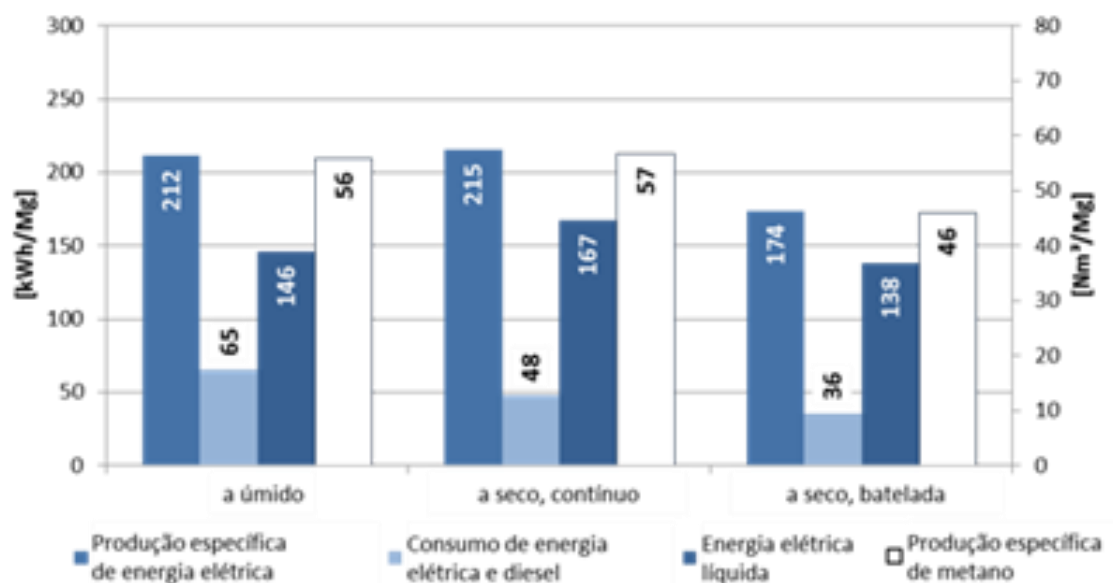
Disponibilização de energia elétrica líquida

Em 60 das 63 plantas, sistemas de cogeração são instalados. Ao menos três dessas plantas também injetam gás para uma microrrede de biogás, abastecendo outros sistemas de cogeração em vilarejos vizinhos com rede de calor existente e consumidores de calor, respectivamente.

Para melhor comparação, o estudo baseia o desempenho das determinadas fases de biodigestão no aproveitamento do biogás em sistemas de cogeração com eficiências unificadas. As eficiências elétricas relatadas no âmbito do levantamento se encontram na faixa de 32% a 42%. Para os cálculos foram usados os valores de 38% para a eficiência elétrica, e 46%, para a eficiência térmica.

A produção de energia elétrica e os rendimentos líquidos de eletricidade encontram-se na Figura 6.

Figura 6 – Comparação da produção e do consumo de energia elétrica bem como, rendimentos líquidos de eletricidade recuperáveis dos tratamentos anaeróbios a úmido e a seco, de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo – relativos ao *input* para as plantas



Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Na avaliação do consumo próprio de energia de plantas de tratamento anaeróbio deve-se considerar, além do consumo de eletricidade, também o consumo de óleo diesel das máquinas móveis tais como, pás carregadeiras, peneiras móveis e agregados de trituração. Em relação ao consumo do óleo diesel, comparativamente poucas informações foram repassadas. Para os processos contínuos a úmido e a seco, a demanda de combustível tipo diesel foi de 1 L/Mg, para os processos a seco em batelada, de 1,5 L/Mg de *input* para a planta. O maior consumo de óleo diesel nos processos a seco em batelada se deve ao fato que nestes processos, o carregamento e a retirada do material dos reatores ocorre, via de regra, por meio de pás carregadeiras. O teor de energia do combustível consumido é transformado em kWh e acrescentado à demanda em energia elétrica.

Os consumos de eletricidade e de diesel, baseados nos dados levantados, são mais altos nos processos a úmido, com aproximadamente 65 kWh/Mg, do que nos processos a seco contínuos, com valores de 48 kWh/Mg. Os processos a seco em batelada apresentaram a demanda mais baixa, com apenas 36 kWh/Mg.

A baixa demanda própria de energia nos processos em batelada a seco comparado com os processos contínuos a úmido e a seco se baseia, principalmente, no baixo esforço na preparação do material e mistura antes da biodigestão, na ausência de um sistema de mistura nos reatores e na dispensa da prensagem depois da biodigestão. Nos processos a úmido, o transporte dos grandes volumes de suspensão e sua prensagem resultam em consumos de energia adicionais, comparados com os processos a seco.

Os resultados da produção líquida de energia elétrica mostram que a análise dos consumos de eletricidade e de combustível resulta em melhores valores dos processos a seco, e particularmente dos processos em batelada. Em média, a biodigestão contínua a seco apresenta o rendimento líquido mais alto. Apesar dos consumos próprios baixos, os processos a seco em batelada não atingem os rendimentos líquidos de eletricidade, dos processos contínuos, devido aos rendimentos baixos de metano. Os valores levantados no estudo não são compatíveis com os valores informados pelo Instituto Witzenhausen (2008, *apud* KERN *et al.*, 2010), que relatou valores médios para o rendimento líquido de eletricidade, de 230 kWh/Mg (a seco, em batelada) e 250 kWh/Mg (a seco, contínuo). Porém, deve-se considerar que os valores informados pelo Instituto Witzenhausen se referem ao *input* para os reatores. Além disso, o rendimento específico de biogás produzido por processos a seco em batelada é considerado mais alto, com pouco menos de 100 Nm³/Mg *input* para os reatores.

Em média, a proporção da própria demanda energética, inclusive o combustível, na quantidade de eletricidade produzida nos processos a úmido, está em 31%. Os processos a seco contínuos e em batelada se encontram praticamente no mesmo nível, com 22% e 24%, respectivamente.

Um dos estudos do DBFZ (2010) aponta para a proporção da demanda elétrica própria de 7,9%, em plantas baseadas principalmente em dejetos de animais e plantas energéticas. Proporções acima de 20% raramente são encontradas. Este fato deve-se à ausência de etapas de processo exigentes em consumo energético, tais como, a preparação mecânica e a prensagem. A proporção pouco maior de consumo próprio energético, nos processos a seco em batelada, comparado com os processos a seco contínuos, é explicada pela menor produção de energia elétrica.

Disponibilização líquida de calor

Na avaliação da demanda interna de calor pelos sistemas, a manutenção das temperaturas de processo mesofílicas e termofílicas é observada e considerada adequadamente nos cálculos da disponibilização líquida de calor. Os diversos sistemas e processos possuem demandas de calor bastante diferenciadas. Como esperado, os processos a úmido apresentam demandas de calor comparativamente grandes, devido ao aquecimento necessário de grandes volumes de água e correspondentes perdas de calor. Portanto, a demanda de calor nos processos a seco é relativamente reduzida. Nos processos em batelada, não há demanda de calor para o aquecimento do material fresco adicionado aos reatores, pois devido ao sistema de tratamento, o calor é fornecido pela degradação aeróbia na fase inicial do processo. Alguns dos processos a seco contínuos utilizam o autoaquecimento do material por meio de uma fase curta de pré-tratamento aeróbio, de dois a três dias.

Em relação ao *input* para as plantas, os processos a seco em batelada e contínuos apresentam valores da disponibilização de calor quase idênticos, de 188 a 191 kWh/Mg, e 173 a

189 kWh/Mg, respectivamente. A disponibilização de calor dos processos a úmido é de 153 a 204 kWh/Mg.

Disponibilização de energia líquida total

A comparação da disponibilização da energia líquida total dos processos não é apresentada, devido à valorização diferente das formas de energia elétrica e térmica, e a alta insegurança em relação aos dados referentes à demanda de calor.

6 MEDIDAS PARA O MELHORAMENTO DA FUNCIONALIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO TRATAMENTO ANAERÓBIO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DOMÉSTICOS E DE PAISAGISMO

As medidas relevantes se referem aos segmentos:

- Gerenciamento de fluxos de massas;
- Tecnologia e operação;
- Aproveitamento do biogás;
- Pontos fracos.

As abordagens para o melhoramento se aplicam igualmente aos rejeitos dos resíduos sólidos urbanos.

6.1 Gerenciamento de Fluxos de Massas

A composição dos resíduos orgânicos está sujeita à variações sazonais em relação à quantidade bem como à qualidade.

Na Alemanha, os resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo apresentam picos de geração, especialmente no verão e no outono, estes em discrepância com o dimensionamento das plantas para uma capacidade de processamento equilibrada. Além da utilização reduzida da capacidade dos reatores, os desempenhos reduzidos na produção do biogás resultam em uma utilização reduzida da capacidade do sistema de cogeração e conseqüentemente, na diminuição das eficiências elétricas. O processo biológico nos reatores também é comprometido pela variação das quantidades e qualidades do *input*, conduzindo à produção reduzida de biogás e instabilidade do processo. No Brasil, este problema existe em dimensões bastante reduzidas ou está completamente ausente. Portanto, não serão apresentadas abordagens para a solução desta questão.

Na Alemanha, as variações sazonais na quantidade e composição de resíduos advindos de paisagismo também são bastante expressivas. A disponibilidade também de resíduos de paisagismo apropriados para o tratamento anaeróbio, agrava os problemas relacionados com a utilização da capacidade dos reatores e a produção do biogás, descritos. O fim da primavera e o verão são as estações com produção de maiores quantidades de resíduos orgânicos de paisagismo apropriados para a biodigestão, com potencial de biogás comparativamente alto. No outono, altas quantidades

de folhas são produzidas, porém, com pouco potencial de biogás. No inverno, a produção de resíduos orgânicos de paisagismo apropriados para a biodigestão é insignificante.

A eficiência da biodigestão dos resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, portanto, depende, na Alemanha, de medidas que visam equilibrar as quantidades processadas durante o ano.

6.2 Tecnologia e Operação

As tecnologias de biodigestão possuem características próprias que influenciam tanto a fase de planejamento quanto a fase de operação. Os itens a seguir irão exaurir estas diversidades e apontar melhores práticas conforme a tecnologia em estudo.

6.2.1 *Pré-tratamento antes da biodigestão*

O objetivo do pré-tratamento dos resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo é a adequação dos materiais para a decomposição anaeróbia, bem como, a separação dos componentes prejudiciais ao processo e aos produtos. Nos primórdios do desenvolvimento do tratamento anaeróbio dos resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, os resíduos foram triturados em uma dimensão < 40 mm. Com isso, esperava-se aumentar a disponibilidade da matéria orgânica para os micro-organismos e, portanto, a decomposição mais rápida e eficiente, dos substratos. Este tipo de pré-tratamento sofreu modificação nos anos passados, de forma que agora os resíduos são triturados de acordo com o respectivo processo anaeróbio utilizado, atingindo granulometrias < 60 mm a 80 mm. Desde então, várias plantas existentes foram reconfiguradas dessa forma.

De modo geral, o pré-tratamento dos resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo é dispensado nos processos em batelada, economizando, portanto, custos de investimento e de operação relacionados aos equipamentos necessários. Além disso, a trituração extensa do material, em partículas muito pequenas, pode resultar em menor permeabilidade do material dentro dos reatores para o percolado, reduzindo assim a produção do biogás.

A mistura dos resíduos orgânicos com resíduos da biodigestão e o carregamento dos reatores nos processos a seco em batelada ocorrem preferencialmente por meio de pás carregadoras. Este procedimento resulta em substratos comparativamente pouco homogêneos e pode reduzir a eficiência do processo da percolação. No âmbito de medidas para a otimização de uma planta de biodigestão a seco em batelada foram conduzidos ensaios de homogeneização dos substratos, por meio de um sistema móvel de reviramento de leiras, normalmente utilizado na compostagem. Já a ação homogeneizante de um reviramento resultou em um aumento expressivo da produção de biogás, de 10% a 15%. Os mesmos efeitos podem resultar de peneiramentos antecedentes, de granulometrias de 100 mm a 120 mm. As peneiras rotativas apresentam os melhores efeitos de homogeneização comparado com peneiras planas, além de submeter o material à força de cisalhamento.

A biodigestão de resíduos orgânicos de paisagismo requer a instalação de coleta seletiva, entrega e armazenamento do material em lotes, de acordo com sua aptidão para a biodigestão,

compostagem ou para o aproveitamento energético. Resíduos orgânicos de paisagismo entregues mistos, como cortes de árvores e de arbustos precisam de um pré-tratamento específico, antes da etapa da biodigestão. Neste caso recomenda-se a trituração e o peneiramento, onde o material apropriado para a compostagem e o aproveitamento térmico é aquele com granulometria > 80 mm, enquanto o material < 80 mm fornece a fração apropriada para a biodigestão.

6.2.2 Alimentação dos reatores

O aumento da eficiência na biodigestão pode ser promovido por uma alimentação constante e equilibrada dos reatores, resultando em uma produção de biogás contínua, com qualidade constante. A alimentação dos reatores apenas durante o dia, e apenas nos dias úteis da semana, provoca variações na produção do biogás devido à alimentação esporádica. Isso se manifesta, sobretudo nas noites e nos fins de semana, com a queda expressiva da produção do biogás. Além disso, a qualidade do biogás é alterada logo após o início da alimentação (queda do teor de metano) e depois de um tempo prolongado sem alimentação (aumento do teor de metano).

6.2.3 Temperatura de processo

A operação na faixa termofílica resulta em um aumento expressivo do rendimento de biogás e correspondentemente, de metano, em todos os tipos de processos e com os tempos de retenção utilizados na prática. Os processos em batelada a seco, bem como, os a úmido na sua maioria são operados na faixa mesofílica, enquanto a maior parte dos processos contínuos a seco são operados na faixa termofílica.

Diante disso, os primeiros processos oferecem certo potencial de otimização. No mercado observa-se a tendência para um aumento do número de instalações de operação termofílica. Assim, em vários locais com processos a seco em batelada, a reconfiguração do processo para a operação termofílica é planejada. Como conferido com alguns dos fornecedores destes processos, a instalação de processos termofílicos também é prevista na maioria das plantas em construção. Além da higienização dos resíduos tratados espera-se também maiores rendimentos de biogás.

6.2.4 Prensagem

Os processos para o tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo geram quantidades relevantes de água de processo e efluentes, respectivamente, comparados com os processos estritamente aeróbios. O aproveitamento da massa digerida proveniente da biodigestão de resíduos orgânicos e de paisagismo consiste no uso como biofertilizante nas lavouras agrícolas e, ou, no pós-tratamento aeróbio para a produção de compostos orgânicos.

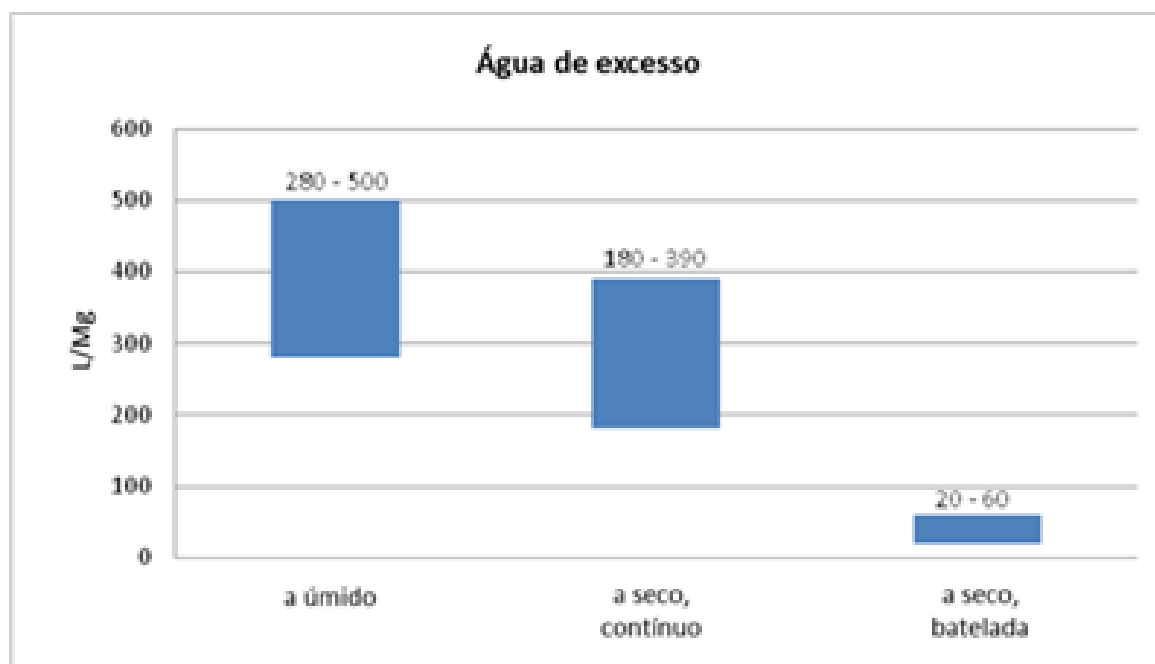
O pós-tratamento aeróbio da massa digerida exige a sua prensagem. Esta etapa de tratamento demanda bastante energia e deve ser aplicada em todos os processos contínuos. Nos processos a seco em batelada, a prensagem antes do pós-tratamento por compostagem geralmente

pode ser dispensada. O pós-tratamento aeróbio dos resíduos da biodigestão exige a prensagem do material para teores em torno de 60%, sendo aceitáveis também teores de umidade ligeiramente mais altos, quando há adição de materiais estruturantes. Os excedentes de efluentes estão entre 200 L/Mg e 500 L/Mg de material de *input*. O processo anaeróbio a seco em batelada gera excedentes de efluentes na ordem de 20 L/Mg a 60 L/Mg de material de *input* (Figura 7).

Os potenciais para a otimização na etapa de prensagem são:

- Redução da intensidade de prensagem necessária por meio do uso de calor excedente durante a compostagem visando promover a secagem;
- Uso intensivo de material estruturante, caso não haja outra forma de aproveitamento mais vantajoso;
- Higienização dos resíduos da biodigestão sem pós-tratamento aeróbio e aproveitamento direto como biofertilizante em lavouras agrícolas.

Figura 7 – Excedentes de efluentes no tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos domésticos e de paisagismo, segundo os diferentes processos de operação



Fonte: Fricke *et al.* (2014).

6.2.5 Disponibilidade de dados da demanda energética

Nenhuma das plantas dispõe de dados detalhados das demandas energéticas de subáreas ou agregados selecionados. Portanto, não foi possível a identificação de potenciais de economia de energia, a fim de aumentar a eficiência destes segmentos de processo. Porém, essas informações são consideradas como requisitos essenciais para medidas destinadas a aumentar a eficiência energética.

6.3 Aproveitamento do biogás

Em 72 das plantas, sistemas de cogeração são instalados, e pelo menos três dessas plantas injetam biogás para uma microrrede de biogás para o abastecimento de outros sistemas de cogeração em vilarejos vizinhos com rede de calefação e consumidores de calor, respectivamente (Tabela 5).

No mínimo, seis operadores purificam o biogás para atender a qualidade do gás natural e o injetam para os gasodutos do gás natural.

As eficiências elétricas atingidas estão na faixa de 32% a 42%, com a média de 38%, e as eficiências térmicas médias foram de 46%. Além das seis plantas com instalação para a purificação do biogás e injeção aos gasodutos, uma planta opera uma instalação piloto de célula de combustível abastecida com biogás, e uma planta está produzindo um combustível para abastecer a frota de veículos de coleta de resíduos.

Em 78 plantas, uma parte do calor residual está sendo utilizada para o aquecimento dos reatores e substratos e para manter as temperaturas necessárias dos processos mesofílicos e termofílicos, respectivamente. Em ao mínimo, dezessete das plantas, o calor residual é usado para a secagem dos resíduos da biodigestão, ou para o aquecimento do ar para o controle do processo da compostagem.

A eficiência elétrica dos sistemas de cogeração melhorou constantemente durante os anos passados (SCHNATTMANN, 2011). Na faixa de potência de 500 kWh, eficiências elétricas de 42% podem ser realizadas. O potencial para a otimização está na troca de sistemas para agregados mais modernos. Neste contexto, precisa-se considerar a redução das eficiências térmicas dos agregados mais modernos em favor das eficiências elétricas, portanto as consequências da troca do sistema de cogeração precisam ser avaliadas, especialmente quando já existe um plano de uso do calor. As eficiências térmicas são aproximadamente de 44%. O aumento da eficiência dos sistemas de cogeração resulta em maiores exigências à qualidade do biogás; neste contexto, a dessulfurização ganhou cada vez mais importância.

Tabela 5a – Tipo de aproveitamento do biogás e utilização do calor (várias respostas possíveis) – Situação de 12/2013

Utilização do biogás	Número de plantas
Cogeração eficiência elétrica média: 38% (32% a 42%)	72
Cogeração com microrrede de biogás	3
Injeção para a rede de gás natural	6
Célula de combustível	1
Combustível veicular	1

Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

Tabela 5b – Tipo de aproveitamento do biogás e utilização do calor (várias respostas possíveis) – Situação de 12/2013

Utilização do calor	Número de plantas
Aquecimento de reatores e substratos	78
Secagem de resíduos da biodigestão, aquecimento do ar de processo para o controle do processo de compostagem	17
Aquecimento dos edifícios da planta	10
Injeção à rede de calefação	5
Secagem de produtos externos (lodos de ETEs, lenha, milho)	3
Aquecimento de estufas	1
Aquecimento de água para a limpeza de caçambas	1

Fonte: Elaborada pelos autores (2014).

6.4 Pontos fracos

No âmbito dos questionários e visitas das plantas, os pontos fracos de cada uma das etapas e dos equipamentos bem como, do sistema como um todo, estavam atrelados a importância dada ao estudo promovido. Como esperado, a vontade dos entrevistados de responder, foi bastante variada. Alguns dos entrevistados responderam à vontade e compartilharam livremente informações sobre os problemas técnicos das instalações bem como, sobre as dificuldades econômicas resultantes disso, porém, a maioria dos entrevistados se manteve reservada.

Os dados levantados nas entrevistas e nas visitas foram complementados com questionamentos para fornecedores de equipamentos e empresas de engenharia bem como, por análise de diversos processos jurídicos. Em relação à tecnologia de agregados, todos os entrevistados veem os potenciais para otimização principalmente nas áreas de desgaste e esforços de manutenção bem como, na otimização da capacidade de processamento respectivamente, no aumento da eficiência da planta. Em relação à redução de desgaste e esforços de manutenção, foram frequentemente indicadas a influência da formação de sedimentos e incrustações, especificamente nos fermentadores e na prensagem. O complexo temático de abrasão e corrosão também foi mencionado muitas vezes.

6.4.1 Formação de sedimentos e incrustações

Problemas com a formação de sedimentos ocorrem igualmente nos processos a úmido e a seco. A sedimentação muitas vezes é acompanhada com incrustações, conduzindo a uma solidificação intensa do sedimento. As consequências para a operação podem ser resumidas a seguir:

6.4.1.1 Sedimentação / Incrustação

- Depósitos de sedimentos nos reatores resultam em uma redução do volume disponível para a biodigestão. Na prática, foram registradas reduções de até 25% do volume inicial.
- Depósitos em combinação com incrustações podem afetar negativamente os agregados mecânicos no reator, por exemplo, os sistemas de agitação e de remoção, que podem ser danificados por forças mecânicas excessivas ou até desativados, pelos bloqueios.
- Em reatores horizontais com tecnologia de *plug-flow*, o transporte do material pode ser inibido promovendo, portanto, curtos-circuitos no fluxo do material. Em reatores verticais, incrustações e entupimentos podem ocorrer na saída do efluente.
- Entupimentos de tubulações, diversas saídas, torneiras, válvulas.
- O bloqueio de leitos fixos inibe o fluxo do efluente pelos reatores, prejudicando seu bom funcionamento.

6.4.1.2 Desgaste

- Desgaste excessivo e até destruição, causados por abrasão, são observados principalmente em trituradores, bombas e instalações de prensagem.
- Os processos de corrosão são promovidos por abrasões.

Os problemas mencionados podem resultar em graves consequências operacionais e econômicas, tais como, insuficiência no desempenho dos reatores e até avarias de processos. Nestes casos, os reatores precisam ser desativados. Depois de abertos, o material deve ser retirado para poder efetuar os consertos necessários. Em seguida, o processo de biodigestão precisa ser iniciado de novo. Na falta de capacidade de *backup*, o equipamento pode ficar inoperante por vários meses. Outros efeitos são a redução da vida útil nos agregados e componentes, com as respectivas consequências para os tempos de amortização e bases de cálculo para a manutenção, consertos e disponibilidade da planta, sendo que a eficiência energética é também prejudicada pelas restrições na disponibilidade funcional da planta.

6.4.1.3 Propostas de otimização

A exclusão tanto quanto possível, das frações minerais e de metais, antes da entrada nos reatores se constitui na medida mais importante para a solução dos problemas descritos acima, para todos os processos a úmido e a seco.

Processos a seco

- Separação eficiente dos metais ferrosos e não ferrosos bem como, dos componentes pesados, antes da entrada do substrato (material orgânico) no reator.

- Assegurar uma faixa estreita de viscosidade no substrato. Para a redução ao mínimo dos processos de sedimentação, deve ser ajustada uma faixa estreita de viscosidade do substrato, a qual não prejudique os processos de transporte e mistura, mas também iniba a rápida sedimentação dos componentes mais pesados. Essa faixa de viscosidade deve ser determinada especificamente para cada planta e de acordo com os respectivos materiais a serem tratados.
- A ocorrência de zonas potenciais de sedimentação pode ser reduzida já na escolha da geometria dos reatores, observando e evitando possíveis zonas mortas e – especialmente em reatores verticais – escolher a angulação de tal maneira que favoreça a descarga de sedimentos. Especialmente na saída, a passagem livre do substrato deve ser promovida para a retirada também dos sedimentos, e para prevenir a ocorrência de entupimentos.
- Dependendo da geometria do reator, a possível instalação de sistemas apropriados de purga e de remoção deve ser prevista. Sistemas de remoção, como transportadores de arraste, devem possuir fundos apropriados, especificamente resistentes a abrasão, devidamente afixados e com condução estável. Entretanto, um dos fornecedores dispensou completamente a instalação de sistemas de remoção (transportadores de arraste). Para a remoção de sedimentos, sistemas de injeção pressurizada de gás ou líquidos pressurizados podem ser instalados.
- Diante da necessidade de aberturas de reatores e a remoção de sedimentos recomenda-se o planejamento dessas instalações com capacidade de *backup*, para evitar a falha total da etapa de biodigestão. A capacidade de *backup* também fornece o inóculo já adaptado, para a rápida reinicialização do reator em revisão. Porém, aspectos econômicos podem contrariar essa solução, notadamente em plantas menores.
- A manutenção dos sistemas instalados dentro dos reatores normalmente é acompanhada pela sua abertura, portanto, sistemas com acionamentos instalados do lado externo dos reatores são mais vantajosos.
- Recomenda-se a instalação de sistemas de controle apropriados para a medição da formação de sedimentos e incrustações, porém, os métodos acústicos e os baseados na espectrografia vermelha ainda não têm sua utilidade comprovada.
- O tempo de utilização dos reatores sem necessidade de revisão ou abertura deve ser determinado na garantia de performance. No caso da necessidade de intervenção antes do vencimento deste prazo, um acordo sobre a responsabilidade destas despesas deve ser firmado.

Processos a úmido

Os autores possuem conhecimentos detalhados sobre a operação de processos anaeróbios a úmido, com e sem leito fixo. Os conhecimentos sobre os processos anaeróbios são derivados do tratamento de rejeitos de RSU, desta forma muitas das abordagens de soluções, detalhadas acima, também se aplicam, da mesma forma ou de forma modificada, para os processos a úmido e, portanto, não serão repetidas aqui.

- O teor de sólidos no efluente deve ser limitado para $< 1\%$, em reatores de leito fixo, para evitar os problemas de entupimentos. Não é possível inibir completamente a ocorrência de incrustações, porém, uma proporção considerável da matriz é retirada, e o pequeno teor de sólidos também resulta na redução dos esforços necessários para a remoção e eliminação de lodo.
- A instalação de apenas um sistema para a remoção de componentes pesados, localizado no misturador / triturador, não é considerado como suficiente para prevenir os problemas relacionados com a formação de sedimentos. Bons resultados na separação de componentes pesados podem ser atingidos, via de regra, com a utilização de centrífugas de decantação. A princípio, a separação de componentes granulares pode ser efetuada com separadores de areia (lavadores de areia), porém, estes não são apropriados para a separação de areia muito fina e de fibras, como é necessário para reatores anaeróbios de leito fixo. Em reatores anaeróbios a úmido sem leito fixo, um separador de areia frequentemente é colocado depois do misturador. Praticamente todos os materiais fibrosos podem ser eliminados por meio de peneiras vibratórias revestidas com telas de granulometria fina. A avaliação do desempenho destes sistemas na eliminação de areias finas é difícil.

6.4.2 Corrosão e abrasão

Danos por corrosão, especificamente em materiais metálicos, são observados frequentemente em agregados periféricos de sistemas de tratamento anaeróbio, principalmente na etapa de pós-tratamento aeróbio dos resíduos da biodigestão. Como consequência, observa-se maiores esforços de manutenção e custos de reparação, tempo de vida útil reduzido bem como, inibição do processo de tratamento, com as respectivas consequências para os custos de operação e desempenho de processamento (FRICKE *et al.*, 2009). As plantas de compostagem e de biodigestão anaeróbia apresentam o ambiente ideal para os processos de corrosão.

Propostas de otimização

- Utilização de materiais adequados de construção e de equipamentos, de elevado valor, como os vários tipos de aços inoxidáveis em componentes expostos a forças mecânicas, especialmente a corrosão por erosão e fricção, entretanto também foram observados sinais de corrosão em aços do tipo V2A e V4A, por exemplo, corrosão por pite.

- Substituição de tubulações metálicas por produtos de plástico ou de matérias minerais, em um caso, a tubulação de alumínio de liga AlMg₃, instalada no sistema de aeração por sucção, foi substituída por uma tubulação de plástico, devido à grave manifestação de corrosão.
- Proteção da corrosão por revestimentos adequados. Experiências positivas foram feitas com revestimentos em três camadas após jateamento abrasivo com 80 µm: base com resina epóxi bicomponente e pó de zinco; camada intermediária: resina epóxi com óxido de ferro micáceo; acabamento: verniz a base de poliuretano.
- Melhor separação das áreas de processo mais corrosivas, das outras áreas, por exemplo, por contenção de umidade, particulados e atmosfera contendo partículas de materiais orgânicos, por meio de medidas construtivas e de engenharia de processos, tais como, a instalação de unidades funcionais mais sensíveis, em áreas menos susceptíveis à corrosão.
- Uma parte dos danos ocorreu em componentes danificados durante a montagem, e cujo revestimento não foi consertado em seguida. Estes pontos fracos são difíceis de evitar, e, portanto, inspeções devem ser conduzidas para localizar estes danos, e os consertos devem ser feitos o quanto antes.
- Remoção frequente e diligente de camadas de biofilmes, das superfícies dos agregados e instalações.
- As taxas de troca de ar devem ser adequadamente dimensionadas para assegurar a remoção suficiente de calor e umidade nos galpões.
- Isolamento e operação em sobrepressão, das caixas de controle elétrico.
- Monitoramento diligente dos materiais, e tomada de medidas imediatas para a proteção contra a corrosão em lugares afetados, ou com o revestimento danificado.
- Utilização de componentes de desgaste em componentes sujeitos a uso intenso.

As propostas de otimização devem ser desenvolvidas bem como, métodos de consertos concebidos para a redução da corrosão em materiais de construção e de instalações devido aos mecanismos de ação prevalentes, com vistas à ampliação das capacidades das plantas de tratamento anaeróbio e de compostagem, e à demanda de manutenção e consertos em plantas existentes. Sobretudo, ainda faltam medidas preventivas de proteção a serem aplicadas na reforma em instalações existentes, mas também em instalações novas.

7 CONCLUSÕES

O tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos está longe de ter a importância que deveria ser atribuída a essa tecnologia devido às vantagens ecológicas, resultando assim em potencial ainda alto de expansão e desenvolvimento deste setor, nos segmentos gerenciamento de fluxos de materiais, tecnologia e operação.

Na Alemanha existem 63 plantas em funcionamento, 46 delas operadas com o processo a seco, e dezessete, com o processo a úmido. As 46 plantas de processo a seco se dividem em 23 de operação contínua, e 23, de operação em batelada. A prevalência dos processos a seco se reflete também nos processos de fase única e de fases separadas, pois, os processos com separação de fases são limitados a processos a úmido. Das 63 plantas, apenas nove são operadas com separação das fases.

As tecnologias de biodigestão apresentaram desenvolvimento expressivo nos anos passados. Na década de 1990, a construção de plantas com processos a úmido prevaleceu. A partir de 2000, em quase todos os casos, processos a seco de fase única foram construídos. Este desenvolvimento continua nas plantas atualmente em construção. Como justificativas para este desenvolvimento foram indicados os baixos custos de investimento, alta segurança de funcionamento e a operação comparativamente simples. Também temos questões que influenciaram a mudança tecnológica tais como falta de qualificação dos operários e operações de curto prazo, privilegiando a aplicação de processos menos complexos.

O rendimento líquido de eletricidade em média mais alto foi produzido pelos processos contínuos a seco. Apesar dos consumos próprios baixos, os processos a seco em batelada não alcançam este desempenho. Os processos a úmido, comparados com os processos a seco contínuos não apresentam rendimentos de biogás e metano mais altos. Portanto, deve-se questionar a justificativa dos esforços de máquinas e de tecnologia comparativamente altos para processos a úmido para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos e de paisagismo, ou rejeitos de RSU.

As opções para a otimização tecnológica são múltiplas. Nos processos contínuos a seco a necessidade da instalação da trituração intensiva precisa ser avaliada. Disso pode surgir certo potencial para a redução do consumo energético. A melhor homogeneização do material em processos de batelada pode resultar no aumento do rendimento de biogás. A separação dos componentes sedimentáveis reduz o risco da formação de sedimentos no reator e diminui as abrasões e o desgaste nos agregados a jusante, de maior importância no tratamento de rejeitos de RSU.

A operação em temperaturas da faixa termofílica leva ao aumento no rendimento de biogás e de metano em todos os processos. Os processos em batelada a seco são na maioria operados na faixa mesofílica e, portanto, oferecem potenciais para a otimização comparativamente altos.

O desenvolvimento da tecnologia da cogeração tem resultado na melhoria das eficiências elétricas. Esta tecnologia está disponível para instalações novas e quando a troca de equipamentos é necessária. A utilização das opções disponíveis para o aproveitamento do biogás ainda está limitada. Um grande potencial de otimização existe especialmente na utilização do calor.

A prensagem se constitui em uma etapa de maior consumo de energia. A utilização de excessos de calor residual, para o controle do processo no pós-tratamento aeróbio, a compostagem pode ser conduzida com maiores teores de umidade, resultando em volumes menores de água processual. Efeitos positivos podem ser esperados também em relação ao desgaste dos equipamentos de prensagem e no consumo de energia. A higienização dos resíduos da biodigestão antes ou durante o processo anaeróbio oferece a possibilidade do seu uso direto como

biofertilizante. Essa opção de aproveitamento apresenta um alto potencial de otimização, para o aumento da eficiência energética.

Potenciais para a otimização da operação estão na alimentação equilibrada dos reatores, também durante a noite e nos fins de semana. Neste contexto, maior atenção deve ser dada à gestão do armazenamento. Além disso, a manutenção apropriada dos agregados instalados resulta em uma vida útil mais longa, e em economias no consumo de energia. A manutenção periódica dos motores resulta na redução de perdas mecânicas e possibilita uma economia no consumo de eletricidade, entre 3% e 10%. Para assegurar a alta disponibilidade de funcionamento da planta, as medidas apresentadas para a inibição da formação de sedimentos nos reatores devem ser consideradas, e sistemas de medição e controle, instalados.

As opções para a otimização do rendimento energético descritas formam a base para a sua quantificação. Como base de cálculo foram utilizados dados de desempenho do terço superior dos dados levantados. A derivação detalhada dos dados de desempenho prognosticados está disponível no relatório final (BMU, 2013). O conjunto das abordagens de otimização resulta em um fator de crescimento para o rendimento de eletricidade de, ao mínimo, 1,4 e para o rendimento de calor de, ao mínimo, 1,2.

A utilização do potencial de otimização é de fundamental importância para o aumento da eficiência. Os processos a seco em batelada tem sua aplicação em escala industrial apenas a partir de 2006. Portanto, o potencial de desenvolvimento nos processos em batelada é avaliado como comparativamente alto, quando comparado com os processos contínuos operados em escala industrial desde os meados da década de 1990.

O projeto de pesquisa e desenvolvimento, base desta publicação, foi financiado pelo Ministério Alemão do Meio Ambiente, Proteção da Natureza, Construção e Segurança Nuclear (BMU).

REFERÊNCIAS

- ALEMANHA. **Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG)**. vom 24 Februar 2012, BGBl. I S. 212. Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- ALEMANHA. **Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen in landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. (Bioabfallverordnung – BioAbfV)**. BGBl. S. 2955. 21 september 1998. Disponível em: <http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/zentrale_analytik/dateien/bioabfallverordnung.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- ALEMANHA. **Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen – 30. BimSchV**. BGBl. I S. 317. 2001. Disponível em: <<http://www.lanuv.nrw.de/abfall/30bimschv.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

- ALEMANHA. **Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz TA Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, GMBI**. Nr. 25-29 S. 511. 24 Juli 2002. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/taluft_stand_200207241.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- ALEMANHA. **Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen**. Anregungen für kommunale Entscheidungsträger Verwertung, Hrsg: Bundes Umweltministerium, Berlin. 2009. Disponível em: <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3888.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- ANS. Status quo der Bioabfallsammlung und Verwertung. In: **Schriftenreihe des ANS 44**, Orbit-Verlag, Weimar. 2003.
- ASA. **MBA-Steckbriefe der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA)** e.V. 2011.
- BAUER, Werner. Kosten der getrennten Sammlung von Bioabfällen. **Handlungsoptionen Bioabfall** – 11/12 Juni 2012, ForumZ-Fachtagung, Schwandorf. 2012. Disponível em: <<http://www.forumz.de/default.asp?Menue=20&Jahrgang=61&Ausgabe=2255&ArtikelPPV=22371&AnbieterID=6>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- BMU. „**Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen – Anregungen für kommunale Entscheidungsträger**“. BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn. 2009. Disponível em: <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3888.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- BMU. **Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011**. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn. 2012.
- BMU. „**Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe**“. Förderprojekt des BMU. 03KB022, TU Braunschweig, Bauhaus Universität Weimar und Fraunhofer UMSICHT, Berlin. 2013. Disponível em: <https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/user_upload/Steckbriefe/dokumente/03KB022_Abschlussbericht_web.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- BUCHHEIT, Michael. **Handlungsoptionen Bioabfall -Verwertungsorientierter Betrieb von Vergärungsanlagen am Beispiel der Bioabfallverwertungsanlage (BAVA)**. Passau ForumZ-Fachtagung, Schwandorf. 2012.
- DBFZ. **Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse**. Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH in Kooperation mit Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Leipzig/Jena (GER), 2010, 2012.
- DE BAERE, Luc; MATTHEEUWS, Bruno. **Anaerobic digestion in Europe, state of the Art 2010**, Proceedings of the Conference ORBIT 2010. Heraklion, Greece. 2010.
- DESTATIS. **Abfallstatistik für 2010**. Statistisches Bundesamt, Deutschland. 2012.

EEG. **Erneuerbare-Energien-Gesetz**. Regierung Bundesrepublik Deutschland. 2012.

FKZ-Nr.: 03KB022A **Steigerung der Energieeffizienz bei der Vergärung fester biogener Reststoffe 2**, gefördert vom BMU, Berlin. 2013.

FRICKE, Klaus; BAHR, Thomas; BIDLINGMAIER, Werner; TURK, Thomas.
Energieeffizienz der stofflichen und energetische Verwertung ausgewählter Abfallfraktionen. **Müll und Abfall 02**, Erich –Schmidt-Verlag, Berlin, 2010. Disponível em:
<<http://www.MUELLundABFALL.de/MUA.02.2010.063>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

FRICKE, Klaus; GOEDECKE, Helge; EINZMANN, Ursula. Die Getrenntsammlung und Verwertung von Bioabfällen – Bestandsaufnahme 2003. In: **Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen**. Schriftenreihe des ANS 44, Orbitverlag, Weimar, 11-64, 2003. Disponível em: <<http://www.wtert.eu/default.asp?Menu=11&ArtikelPPV=3743>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

FRICKE, Klaus; HEUSSNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas; BIDLINGMAIER, Werner. Steigerung der Energieeffizienz bei der Vergärung fester biogener Reststoffe. Vorhaben: Steigerung der Energieeffizienz bei der Verwertung biogener Reststoffe In: THRÄN, Daniela; PFEIFFER, Diana. **Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 11: Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen**. Abgeschlossene Vorhaben im BMU-Förderprogramm. Teil 1. 2014. [p. 25-47]. Disponível em: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/11_Abschluss_BGA_1.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

FRICKE, Klaus; HÜTTNER, Axel; W. BIDLINGMAIER, Werner. Vergärung von Bio- und Restabfällen. **Anaerobtechnik**, Springer Verlag, Hamburg, 2004.

FRICKE, Klaus; VOGTMANN, Hartmut; HAHN, G. Eigenkompostierung und Biotonne in ländlichen Gebieten – ein Widerspruch? In: FRICKE, Klaus; THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; NEUMÜLLER, Gerard; STECKER, Frank. (Hrsg.), **Integrierte Abfallwirtschaft im ländlichen Raum**. EF-Verlag, Berlin. 143-154. 1993.

FRICKE, Klaus; HEUßNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas; BAUER, Werner; BIDLINGMAIER, Werner. Vergärung von Bio- und Grünabfällen, Teil 1: Ausbaupotenzial bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen. **Müll und Abfall 12**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2013. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.12.2013.636>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

FRICKE, Klaus; HEUßNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas; PEREIRA, Christiane; BAUER, Werner; BIDLINGMAIER, Werner. Vergärung von Bio- und Grünabfällen, Teil 2: Ausbaupotenzial bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen. **Müll und Abfall 01**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2014. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.01.2014.021>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

- FRICKE, Klaus; HEUßNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas; PEREIRA, Christiane; BAUER, Werner; BIDLINGMAIER, Werner. Vergärung von Bio- und Grünabfällen, Teil 3: Ausbaupotenzial bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen. **Müll und Abfall 03**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2014. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.03.2014.116>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- FRICKE, Klaus; THIEL, Timo; KETELSEN, Ketel; BAHR, Tobias; WALLMANN, Rainer; TURK, Thomas. Korrosion bei biologischen Abfallbehandlungsanlagen. **Müll und Abfall 11**, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin (GER), 2009. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MUA.11.2009.556>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- GERLACH. Ländliche und Städtische Biotonne – Strategien zur optimalen Gasausbeute (6/2012). In: **Kosten der getrennten Sammlung von Bioabfällen in Handlungsoptionen Bioabfall – 2012**, ForumZ-Fachtagung, Schwandorf, 2012.
- JAUCH, M. Chancen und Grenzen der Eigenkompostierung. **Handlungsoptionen Bioenergie** – Tagung Bayreuth, 2013.
- KERN, M. Biotonne versus Eigenkompostierung – Stand und Perspektiven. **6. Bad Hersfelder Biomasseforum**, 2012.
- KERN, M.; RAUSSEN, T. **Biogas-Atlas 2011 – Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland**. Witzenhausen. 283 S, 2011.
- KERN, M.; RAUSSEN, T.; FUNDA, K.; LOOTSMA, A.; HOFMANN, H. **Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz**. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. Auftrag des Umweltbundesamtes, 2010.
- KÜHLE-WEIDEMEIER, M., CUHLS, C. **Ermittlung der besten verfügbaren Techniken bei abfallbehandlungsanlagen im Rahmen des Sevilla Prozesses zur Novellierung des BVT-Merkblätter Abfallbehandlung – Behandlung von organischen Abfällen aus getrennter Sammlung (Kompostierung und Vergärung)**. BMU-Forschungsvorhaben FKZ: 3709 44 305/2, 2011.
- KRANERT, Martin; GRAUL, Susanne; HILLEBRECHT, Kai. Untersuchungen zur Bestimmung von Mineralgehalten in Bioabfällen und Gärrückständen. **Müll und Abfall 11**, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, S. 612-617, 2002. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MUA.11.2002.612>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- OECHTERING, A. Potenzial zur Optimierung und zum Ausbau der Kompostierung. In: WIEMER, Klaus; KERN, Michael. (Hrsg.): **Weiterentwicklung der biologischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund von TA Luft und EEG**, S. 85-100, 2007.
- PRESTELE, G. **Einführung der BioEnergieTonne im Landkreis Augsburg zum 01.01.2013** – Bericht aus der Praxis in Bioenergie – Handlungsoptionen im Umgang mit Grüngut und Bioabfall, ForumZ-Fachtagung Bayreuth, 2013.

- RETTENBERGER, Gerhard; URBAN-KISS, S.; SCHNEIDER, R.; MÜSKEN, J.; KRUSE, G. **Handbuch Bioabfallbehandlung – Erfassung des Anlagenbestandes Bioabfallbehandlung**. UBA, FKZ 370933343, 2012.
- SCHNATTMANN, Christian. **Wirkungsgrade von BHKW – Kritische Anmerkungen aus Sicht eines Betreibers von Kläranlagen**. DWA – Energietage Kassel. 2011. Disponível em: <http://de.dwa.de/tl_files/media/content/PDFs/Abteilung_BiZ/Energietage2011/Tag_3/pp-Schnatmann.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- SCHULTE, B. **Schriftliche Mitteilung von Daten der Bioabfallvergärungsanlage im Entsorgungszentrum Pohlsche-Heide**, Hille, 2012.
- THIEL, T. **Intermediäre Belüftung zur Optimierung der Biogasqualität und –quantität**. Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 2013.
- UBA. **Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz**, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2010. Disponível em: <<http://www.uba.de/uba-info-medien/4010.html>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; HEUSSNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas. A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maior – 2017**.

Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos: conceito, experiências operacionais e otimização

Recovery of Municipal Solid Waste: experience and optimization

Doutora Geóloga Beate Vielhaber

RESUMO

A legislação nacional da Alemanha e Europeia tem como foco a reciclagem de resíduos, tanto quanto possível. Também resíduos mistos serão reciclados e recuperados energeticamente. O tratamento destes resíduos com a tecnologia de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) permite a separação de materiais valiosos e reduz a quantidade de resíduos a ser encaminhada para o aterro. A operação nas plantas TMB, como a própria denominação sugere, é geralmente realizada em duas etapas principais: em primeiro lugar, os rejeitos são tratados mecanicamente, e em segundo, tratados biologicamente. A etapa de fermentação integrada durante o tratamento biológico tem a vantagem de converter em biogás as frações orgânicas facilmente biodegradáveis. Energia elétrica e calor podem ser gerados a partir do biogás e processados para comercialização. Nesse artigo são descritos vários métodos de fermentação. Em seguida, é apresentada a planta TMB de Hannover na Alemanha. Também são descritas experiências adquiridas durante a fase de projeto, do fabricante, da operação e as medidas de otimização que foram necessárias. As recomendações são interessantes para serem avaliadas por novos investidores ou operadores. Plantas tipo TMB ajudam a preservar o meio ambiente devido aos seus efeitos positivos sobre as alterações climáticas. Por último, foi avaliada a possibilidade de transferência de conhecimento sobre plantas TMB com tecnologia de fermentação integrada para o Brasil, onde esta avaliação abordou desde a simplificação até a adaptação das técnicas disponíveis às condições específicas de cada país. Na Alemanha, uma vez que já acumulamos dez a quinze anos de experiência em operação de plantas TMB, podemos oferecer suporte para o Brasil durante a sua implementação, simplificando seu funcionamento e os conceitos de um sistema de tratamento de resíduos mistos.

Palavras-chave: Rejeitos. Fermentação. Tratamento mecânico-biológico. Otimização. Recuperação energética.

ABSTRACT

The European and German national legislation the target is to recycle waste as much as possible. Also residual waste will be recycled and recovered energetically. The residual waste treatment with MBT technology allows the separation of valuable materials and to reduce the amount of material going to landfill. Mechanical-biological waste treatment plants (MBT) are usually realized with two main steps: first, the waste is processed mechanically, and second, treated biologically. A fermentation step integrated into the biological treatment stage has the advantage that the easily degradable organic substances within the waste are converted to biogas. Electricity and heat can be

generated from biogas and processed for marketing. In the following text, various methods of fermentation concepts are described. Then, the system design of the MBT Hanover (Germany) is exemplarily presented. The experience gained during the design, from the manufacturer and from the operation and necessary optimization measures are described. The resulting recommendations are interesting for new investment plans or operators of MBT plants. MBT help relieve the environment due to their positive effects on climate change. Finally, the transferability of the MBT technology with fermentation stage in Brazil is checked. This includes primarily the simplification and adaptation of the techniques available to country-specific conditions. In Germany, the since now 10 – 15 years experience gained working with MBT can support for Brazil to establish meaningful, simplified and functioning system concepts for treatment of residual waste.

Keywords: Municipal solid waste. Digestion. Mechanical-Biological Treatment Plant. Optimization. Waste-to-energy.

1 INTRODUÇÃO

A base legal da gestão de resíduos sólidos urbanos na Alemanha é a lei sobre a economia de ciclo fechado (KrwG, 2012), revisada em 2012. O objetivo da lei é promover a economia de ciclo fechado para assegurar a preservação dos recursos naturais e a proteção do homem e do ambiente na produção e na gestão de resíduos, e especificamente, promover a reciclagem e as demais formas de aproveitamento material dos resíduos. Conforme previsto em diretiva da comunidade europeia de 2010, uma hierarquia de gestão de resíduos, composta por cinco níveis, foi implementada em forma de lei nacional:

- Evitar;
- Reutilizar;
- Reciclar;
- Outras formas de aproveitamento, especificamente, aproveitamento energético;
- Eliminar.

Os níveis relatados vêm de encontro com a proposta de reduzir ao máximo o encaminhamento de resíduos valorizáveis para o aterramento.

Desde o ano 2005, os resíduos destinados para a disposição em aterros precisam passar por um pré-tratamento. Para tanto, duas tecnologias estão à disposição: a incineração e o tratamento mecânico-biológico (TMB).

As vantagens do tratamento mecânico-biológico dos rejeitos, de forma geral, consistem em:

- Alta flexibilidade frente a alterações das quantidades e da composição dos resíduos;
- Flexibilidade na gestão dos fluxos de massas;
- Menores custos de investimento comparado com uma planta de incineração de resíduos;

- Aproveitamento material: Separação de fluxos de resíduos para posterior aproveitamento, por exemplo metais ferrosos e não ferrosos, combustíveis alternativos;
- Aproveitamento energético: uma etapa da biodigestão anaeróbia possibilita o uso do biogás para a geração conjunta de calor e energia;
- Prolongamento da vida útil do aterro.

Na Alemanha, as plantas de TMB são operadas principalmente por entidades públicas de alcance local e regional, ao contrário das plantas de incineração que são operadas por empresas privadas ou em cooperação entre entidades públicas e empresas privadas.

As plantas operadas com tecnologia TMB são exclusivamente reservadas para o tratamento de rejeitos. Como rejeitos definem-se os resíduos que sobram depois da coleta seletiva de recicláveis como papel, vidro, ferro velho, lixo eletrônico, embalagens leves (plásticos) e resíduos orgânicos domésticos. Os rejeitos ainda contêm determinadas quantidades de recicláveis e orgânicos, devido à impossibilidade da separação completa dos resíduos pela coleta seletiva.

Na maioria dos municípios alemães, os resíduos orgânicos, por se tratar de material declarado como “resíduos para aproveitamento”, são coletados separadamente, e compostados. As mais novas alterações da legislação da gestão dos resíduos demandam a introdução da coleta seletiva de resíduos orgânicos em todo o território nacional, até 2015. A biodigestão de resíduos orgânicos consiste em uma tecnologia promissora (Fricke, 2014). Além disso, é prevista a consolidação em lei, da separação de “recicláveis”.

Em consequência supõe-se que quantidades adicionais e outros tipos de resíduos serão retirados dos rejeitos. As quantidades e proporções podem variar dependendo do local (proximidade a centros urbanos, plantas de triagem, plantas de compostagem) e de variações devido às estações (por exemplo, a proporção dos orgânicos). O tratamento de resíduos especiais em plantas de TMB não é permitido. Existem sistemas de coleta e tratamentos especificamente para estes resíduos.

Uma planta de TMB é apropriada para o tratamento de resíduos de comércio, rejeitos das plantas de compostagem e de triagem, resíduos da construção civil e resíduos industriais (sem os resíduos especiais), lodos e resíduos de estações de tratamento de esgotos (ETEs). Devido à seletividade da tecnologia de beneficiamento, as plantas de TMB são capazes de prover uma gestão flexível dos fluxos de massas, podendo também operar com resíduos destinados à reciclagem.

Para poder funcionar eficientemente, as plantas de biodigestão anaeróbia necessitam quantidades suficientes de matéria orgânica de fácil decomposição, para a produção de biogás. Isso pode ser garantido por meio da adição de substratos disponíveis localmente, por exemplo, lodo de ETE, resíduos alimentícios, bem como, resíduos da produção de papel.

O tratamento dos rejeitos por meio da tecnologia TMB possibilita a recuperação de recicláveis e a quantidade de material a ser disposto é reduzida consideravelmente. Via de regra, a

tecnologia é implementada com dois passos de tratamento distintos: no primeiro momento, os rejeitos são beneficiados mecanicamente, e depois submetidos ao tratamento biológico (mais informações em DWA-M388, 2014).

2 TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO COM BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Neste capítulo serão descritas as etapas processuais do tratamento mecânico e biológico com fermentação integrada, tendo como ponto principal a origem mista do substrato, oriundo da coleta tradicional de rejeitos.

2.1 Tratamento Mecânico

Na etapa do beneficiamento mecânico, os rejeitos são preparados e acondicionados para as etapas de tratamento a jusante, e o fluxo de massas é segregado em corpos estranhos, materiais pesados e frações passíveis de aproveitamento material ou energético (por exemplo, metais, combustíveis alternativos).

Os rejeitos entregues são controlados para fins de detecção de corpos estranhos. Corpos estranhos volumosos são removidos manualmente ou por meio de uma pá-carregadeira. O material depois é triturado e peneirado com granulometria de 40 mm a 80 mm, com a finalidade de otimizar a fração com alto valor calorífico. A separação automática dos metais ferrosos e/ou, não ferrosos é empregada, ou antes, ou depois desta etapa. Em princípio, a tecnologia TMB permite a separação de outras frações de recicláveis (por exemplo, tipos de plásticos de alta pureza).

Em média, 50% do *input* é separado em forma de fração fina. A fração grossa é enviada diretamente, ou após mais um passo de beneficiamento, para a reciclagem ou para o aproveitamento material ou energético. A produção de combustíveis alternativos é efetuada por meio da separação de componentes com alto valor calorífico, em peneiras, por corrente de ar e/ou por separação balística. De acordo com a configuração da planta, a integração de etapas adicionais de beneficiamento é possível, tais como a secagem de determinadas frações.

Os combustíveis alternativos podem ser distinguidos em frações de alto poder calorífico e combustíveis secundários. A fração de alto poder calorífico consiste de materiais provenientes dos resíduos mistos, cujo valor calorífico, devido a sua composição e suas propriedades, é mais alto quando comparado ao respectivo valor da massa bruta descarregada. Frações de alto poder calorífico podem ser captadas a partir da primeira etapa de peneiramento, geralmente em malha > 60 mm. Estas frações detêm materiais de alto poder calorífico tais como papéis, plástico filme e madeiras. O teor energético dessa fração geralmente é acima de 11.000 kJ/kg. As frações de alto poder calorífico, comparadas ao combustível secundário, apresentam pouca complexidade de processamento, resultando em frações de maior granulometria. Tipicamente, essa fração provém do TMB bem como, de plantas de triagem de resíduos domésticos e do comércio, e é utilizado como combustível único em termelétricas a combustíveis alternativos, ou como matéria-prima na produção de combustíveis secundários. Estes podem ser interessantes para indústrias com alta

demanda de energia, como na fabricação de cimento ou de papel, pois pode se constituir em uma opção economicamente viável para a substituição de combustíveis fósseis mais caros.

Provavelmente deve-se fornecer informações sobre determinadas propriedades do combustível alternativo, como, valor calorífico, granulometria, teor de corpos estranhos, de acordo com a tecnologia de processamento térmico instalada. As exigências do cliente podem tornar necessário que o material seja pelletizado ou briquetado.

2.2 Tratamento Biológico

A fração enriquecida com material orgânico, oriundo do material de granulometria menor que passou pela peneira, no beneficiamento mecânico, é conduzido para o tratamento biológico, onde o material orgânico é degradado e transformado em húmus. O tratamento biológico pode ser distinguido em tratamento aeróbio (compostagem intensiva e pós-compostagem), tratamento anaeróbio (biodigestão), e combinação dos dois tratamentos. A combinação dos dois tratamentos consiste de uma etapa anaeróbia, de biodigestão, antes da etapa aeróbia, de compostagem. Os processos disponíveis no mercado compreendem a biodigestão de todo o fluxo de material ou de fluxos parciais, bem como, processos de biodigestão a seco e a úmido.

Na Alemanha, doze plantas de TMB com etapa de biodigestão, em complementação ao tratamento aeróbio, estavam em operação no ano 2012 (DWA-M388, 2014). Além da estabilização biológica da matéria orgânica, biogás com elevado valor calorífico é produzido pelo processo anaeróbio. Na etapa de pós-compostagem, os resíduos da biodigestão são transformados em material apropriado para aterramento, ou, após secagem, para utilização como combustível secundário.

Uma visão mais ampla dos processos de tratamento anaeróbio disponíveis no mercado, para rejeitos e para resíduos orgânicos, pode ser obtido em Technische Universität Braunschweig (TU, 2012).

2.2.1 Biodigestão Anaeróbia

A etapa da biodigestão permite a utilização da maior parte da energia contida nos resíduos, através da produção do biogás. O tempo de tratamento é, aproximadamente, três semanas, seguido por desidratação mecânica e uma estabilização aeróbia ou secagem térmica. Posteriormente o material é tratado na etapa da pós-compostagem até estar pronto para uso como combustível secundário ou adequado para a disposição.

Podem-se distinguir os seguintes processos para o tratamento anaeróbio de rejeitos:

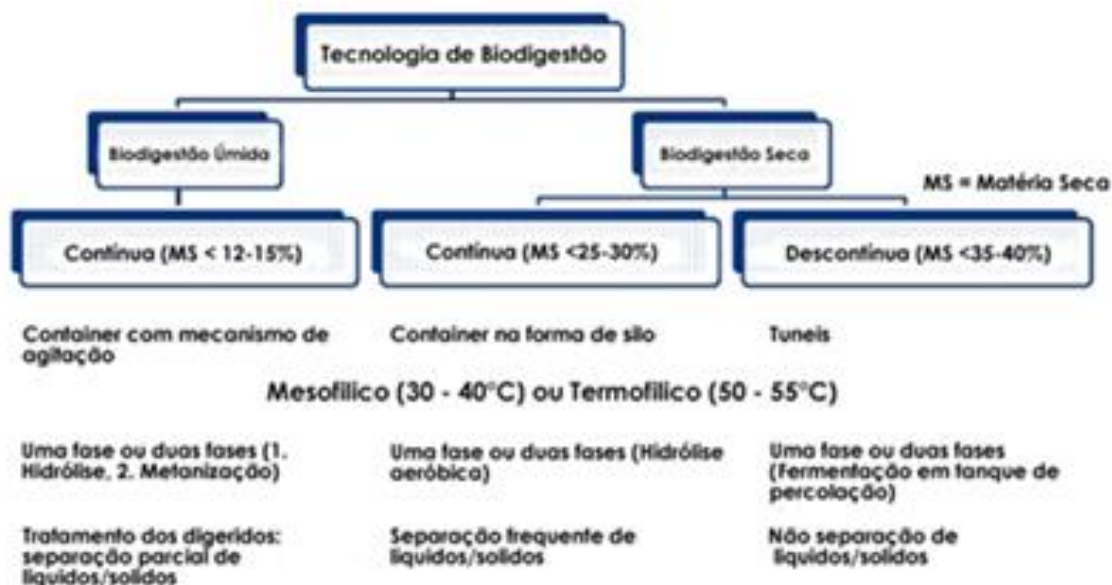
- Biodigestão a seco, de fluxo parcial ou de fluxo integral;
- Biodigestão a úmido, de fluxo integral (processos de TMB com biodigestão de fluxos parciais a úmido não são realizados na Alemanha).

Os processos da biodigestão a seco e a úmido diferem entre si pelo teor de matéria seca (MS) do material, no reator. O teor de MS no processo a úmido corresponde de 4% a 15%, enquanto o teor de MS no processo a seco é de, aproximadamente, 30%. Devido ao teor de umidade dos resíduos frescos, de aproximadamente 50%, a adição de água é necessária em ambos os processos. Essa água é retirada, de preferência, através da desidratação dos resíduos da biodigestão, considerando variações sazonais do teor de umidade nos resíduos frescos.

O processo da biodigestão a seco frequentemente é concebido em fase única. Neste processo, todas as fases da biodigestão acontecem paralelamente no reator. Devido às exigências dos micro-organismos em relação a seu ambiente, os processos de fase única se constituem em um compromisso. Na Alemanha, os processos de biodigestão em plantas de TMB são concebidos, exclusivamente, em sistema contínuo, o que significa que a alimentação com resíduos frescos e a retirada dos resíduos biodigeridos acontece de forma contínua e ao mesmo tempo. O tempo de retenção, no reator, para resíduos sólidos domésticos, é de, aproximadamente, 20 dias.

A maioria das plantas de TMB na Alemanha, equipadas com o processo da biodigestão a úmido, utilizam o processo de fases separadas: onde a hidrólise e a metanogênese decorrem consecutivamente. Em todos os processos da biodigestão, a etapa de hidrólise, em pH ácido, vem antes da metanogênese, sob a formação de H_2 e CO_2 . Os processos da biodigestão anaeróbia disponíveis estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Processos de biodigestão anaeróbia disponíveis



Fonte: Abfallwirtschaft Region Hannover, Stand 2012 /TU Braunschweig 2012, verändert.

A biodigestão pode ocorrer em temperaturas nas faixas mesofílica bem como, termofílica. O processo de biodigestão a úmido é conduzido, com preferência, na faixa mesofílica, devido à adição necessária de elevados volumes de água, que precisam ser aquecidos.

Os resíduos confeccionados em fração fina são misturados com água de processo e, se for o caso, também com resíduos biodigeridos recirculados, para produzir uma mistura bombeável, cuja temperatura pode ser regulada por meio de fontes externas de energia. No processo a seco, resíduos biodigeridos são adicionados aos resíduos frescos para melhorar o contato com a biomassa anaeróbia e a adaptação rápida dos micro-organismos ao substrato.

Depois de biodigeridos a seco, a desidratação e o adensamento, respectivamente, dos resíduos, podem ser efetuados por meio de prensas de rosca, vibro-prensas, filtro prensas de esteira ou por centrífugas. Antes da última etapa de desidratação, um flocculante deve ser adicionado. O teor de umidade ideal dos resíduos desidratados é de 45%. Para que a aeração no processo a jusante possa acontecer da melhor maneira possível, o teor de umidade não deve ultrapassar 50%.

No processo da biodigestão a úmido, o substrato encaminhado para a unidade de desidratação recebe um flocculante, para promover uma melhor separação das fases líquida e sólida, por exemplo, por meio de centrífugas. Um passo de secagem pode ser introduzido, caso necessário. A fase líquida separada recebe tratamento para exclusão de corpos estranhos, por exemplo, partículas de plástico > 2 mm, e em seguida, é disponível como água de processo.

O processo termofílico resulta, em todos os sistemas, em quantidades maiores de biogás e de metano. A maior parte dos processos em batelada, a seco bem como, a úmido, são operados em regime mesofílico.

2.2.2 Processo de biodigestão a seco, em sistema batelada

Na Alemanha, os processos de biodigestão a seco, em batelada, apenas tem aplicação para resíduos orgânicos da coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos (RSU). Porém, devido à sua simplicidade, comparada com outros processos, estes processos podem se constituir em uma alternativa para o tratamento de RSUs no Brasil. Segue uma descrição do processo, tomando o processo Kompoferm como exemplo (TU Braunschweig, 2012):

Os RSUs a serem biodigeridos são colocados sem tratamento, ou depois de triagem por peneira de > 100 mm, nos reatores em forma de túnel, por meio de uma pá-carregadeira, em sistema de batelada. Os resíduos são umedecidos com água de processo acondicionada (percolado), que é conduzida em ciclo fechado entre os fermentadores a seco e o fermentador de percolado, com adaptação às diferentes fases do processo. O percolador tem a função de ajustar os fluxos de percolado no ciclo fechado, além de misturar os diversos fluxos de percolados provenientes dos túneis de fermentação, cada um dos quais se encontra em fase diferente do processo de biodigestão. No fermentador de percolado existe uma biocenose metanogênica estável, que é utilizada como inóculo do material fresco recentemente colocado nos túneis de fermentação. Além disso, o fermentador de percolado serve como tampão para os teores de ácidos orgânicos temporariamente elevados, provindos da fase de *start-up* de cada um dos fermentadores, e os transforma em metano, contribuindo consideravelmente para a produção de biogás.

Os elevados volumes de percolado circulando pelo sistema resultam em uma troca e transporte eficiente de produtos metabolizados, parecido com as condições em reatores de tanque de agitação contínua. A manutenção da temperatura de processo de 38 °C nos túneis de fermentação é promovida por meio da recirculação de percolado presente no fermentador de percolado, que é aquecido. Algumas das novas instalações também são operadas em sistema termofílico. O fermentador de percolado contém defletores internos que provocam um fluxo forçado do tipo pistão (*plug-flow*), resultando em tempo de retenção ótimo para todo o volume de percolado.

Depois de abastecido o túnel de fermentação, a porta hermética é fechada. Uma vedação a ar pressurizado com pressão controlada, em toda a extremidade da porta, garante a impermeabilidade ao gás. Dentro das primeiras 6 a 24 horas o material é submetido a um pré-tratamento aeróbio, por meio de aeração ativa, presente no piso do fermentador. O rápido aquecimento para temperatura mesofílica do processo, de 38 °C a 40 °C, bem como, a hidrólise da biomassa, é promovido pela fermentação aeróbia. O ar exaurido da aeração é conduzido para um biofiltro para a redução de odores desagradáveis.

A fase anaeróbia do processo começa depois de encerrar a aeração e inocular o substrato com percolado aquecido. No primeiro momento, a hidrólise continua, formando CO₂. Os ácidos orgânicos formados na hidrólise são metabolizados em produtos intermediários e por final, em CO₂ e CH₄, por micro-organismos anaeróbios. A biocenose anaeróbia se instala no túnel de fermentação depois de alguns dias. A partir deste momento, biogás de valor, com teor elevado de metano, é produzido. Mesmo assim, o biogás produzido na fase inicial, com baixo teor de metano, também pode ser aproveitado, por que todos os fermentadores estão funcionando alternadamente, em sistema de batelada. A qualidade do biogás é ajustada através da mistura nas tubulações e no fermentador de percolado. O biogás produzido é armazenado em gasômetros instalados em cima dos túneis fermentadores, até o seu aproveitamento.

2.2.3 Estabilização aeróbia

Depois do tempo de retenção de três semanas, o processo de biodigestão anaeróbia é encerrado; o material é retirado do fermentador e estabilizado aerobiamente. A estabilização aeróbia pode ser feita encerrando o umedecimento da massa digerida com percolado e, ou por aeração intensiva com ar fresco (oxigênio). O tempo de tratamento necessário para a ampla estabilização aeróbia do material é de três a cinco dias.

O tratamento aeróbio intensivo do resíduo da biodigestão anaeróbia provoca a morte dos micro-organismos anaeróbios. Na transição do ambiente anaeróbio para o ambiente aeróbio, amoníaco pode ser liberado em concentrações relativamente altas. O ar exaurido nessa fase ainda contém uma concentração pequena de metano, tornando necessário o tratamento separado deste fluxo de ar exaurido.

As exigências muito elevadas quanto a qualidade de emissões para o ar, de plantas de TMB, não devem ser transferidas para outros países, portanto o tema “tratamento de ar exaurido”

não será abordado aqui. Porém, as emissões de odores desagradáveis e de metano e de N_2O , sendo gases de efeito estufa, devem ser consideradas. Os odores e o metano podem ser degradados por meio de biofiltros, e a formação do N_2O pode ser limitada através do controle cuidadoso do processo.

2.4 Compostagem Intensiva e Maturação

Os processos de compostagem são processos aeróbios, ou seja, os resíduos são submetidos a um tratamento aeróbio. Os processos empregados compreendem:

- Compostagem em túneis;
- Compostagem em contêineres;
- Compostagem em leiras;
- Compostagem em leiras trapezoidais.

As plantas de TMB que trabalham com processo exclusivamente aeróbio, empregam uma fase de compostagem intensiva (4 a 6 semanas) seguida por uma fase de maturação (8 a 10 semanas). Nas plantas com etapa anaeróbia, a biodigestão é seguida por uma etapa de maturação aeróbia, reduzindo o tempo de compostagem necessário para aproximadamente, seis semanas.

Na compostagem intensiva, sobretudo os compostos orgânicos de fácil decomposição são metabolizados pelos micro-organismos. Um ambiente equilibrado é essencial para obter altas taxas de processamento. O material compostado deve atingir uma temperatura de 55 °C. O abastecimento com água e ar deve ser equilibrado, podendo o último ser efetuado por aeração bem como, por reviramento do material.

Na maturação, os compostos de carbono de difícil decomposição são degradados. A temperatura deve ser ajustada para 35 °C. Comparados com a compostagem intensiva, os processos de degradação na maturação são mais lentos.

2.5 Aproveitamento do Gás

O biogás produzido em uma planta de TMB é utilizado para a produção de eletricidade e de calor, por meio de sistemas de cogeração, ou utilizado diretamente na operação da planta de TMB. Os sistemas de cogeração podem ser instalados em módulos o que possibilita a melhor adaptação à capacidade desejada. Os sistemas de cogeração obtêm eficiências comparativamente altas, por que 80% a 90% da energia contida no combustível podem ser transformada em eletricidade e calor. A eficiência é resultado da adição de eficiência elétrica (transformação em eletricidade) e eficiência térmica (transformação em calor). Dependendo do tipo de motor e sua potência, a eficiência elétrica média de um sistema de cogeração é entre 30% e 40%, e a eficiência térmica, entre 50% e 60%.

Os rendimentos de biogás das diversas plantas de TMB dependem dos substratos disponíveis, da tecnologia instalada, do tempo de retenção e da carga volumétrica. O rendimento

de biogás calculado para algumas plantas de TMB foi entre 90 Nm³/Mg e 200 Nm³/Mg de material fresco. Em relação ao *input* da planta, estes resultados correspondem a um rendimento médio de 45 Nm³/Mg (calculado para um teor de CH₄ de 60%).

Via de regra, o biogás contém o sulfeto de hidrogênio, que deve ser reduzido o máximo possível, por várias causas: o H₂S como formador de ácidos aumenta o risco de corrosão dos componentes da planta. No reator, o H₂S tem ação inibitória para a biocenose metanogênica. Além disso, teores elevados de enxofre no biogás provocam a danificação dos motores nos sistemas de cogeração. As tecnologias disponíveis se encontram descritas em Robra e Raussen (2014).

3 GESTÃO DE RESÍDUOS EM HANNOVER

A região de Hannover é localizada no norte da Alemanha. A região é composta por uma quantidade elevada de municípios sendo a maior da Alemanha, com 1,1 milhão de habitantes em 21 municípios, e conta com uma área de 2.300 km². A metade dos habitantes da região, aproximadamente 550.000, vive na cidade de Hannover. O entorno de predominância rural, abriga a outra metade dos habitantes da região distribuída em 20 cidades e vilas.

O Consórcio de Gestão de Resíduos da Região de Hannover (AHA) é um organismo de direito público responsável pela realização de serviços como, a coleta e o tratamento dos resíduos como RSU e recicláveis, bem como, a operação de vários pontos de entrega e plantas de compostagem, além de uma planta de TMB e três aterros sanitários.

A AHA tem como objetivo a redução ao mínimo, das quantidades de resíduos para disposição em aterros, segundo previsto pela gestão moderna de resíduos, exigida por lei.

Na região de Hannover, cerca de 760.000 Mg de resíduos são produzidos anualmente. Depois da coleta seletiva feita pelos habitantes, que separam os RSU em domicílio segundo as frações de recicláveis (vidro, papel, resíduos orgânicos, embalagens leves, madeira usada, resíduos da construção civil e solo, resíduos eletrônicos e outras) ainda sobram cerca de 300.000 Mg de rejeitos para disposição final (veja Figuras 2 e 3). Essa quantidade compreende os RSU domésticos bem como do comércio, além dos resíduos volumosos.

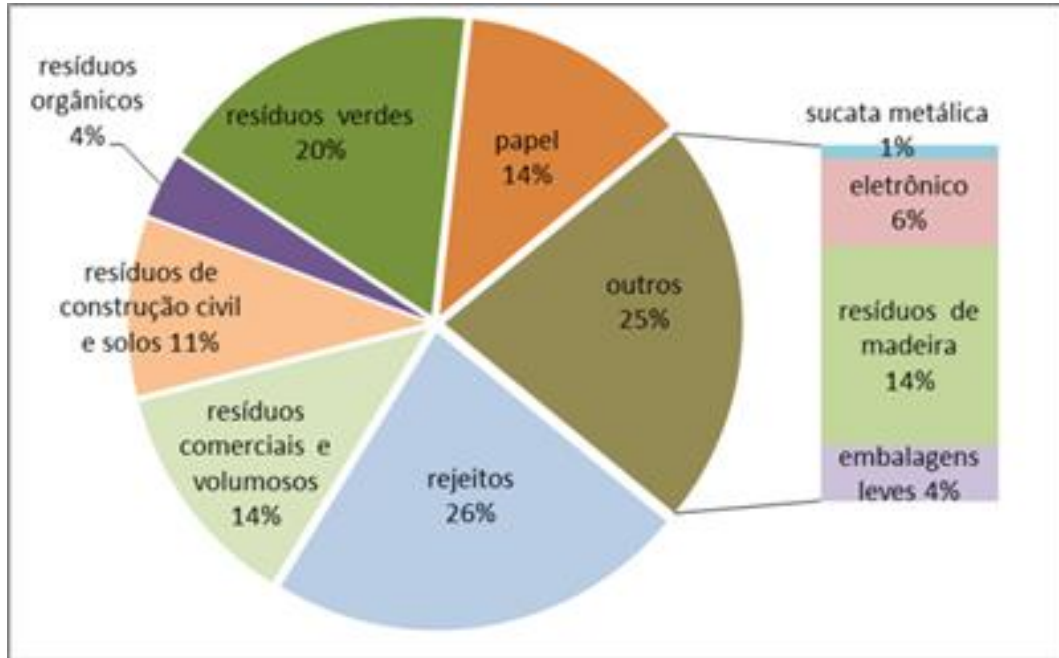
Os resíduos orgânicos domésticos e verdes, da coleta seletiva, são tratados em plantas de compostagem e comercializados como composto orgânico (Figura 3).

Os resíduos da região de Hannover são conduzidos para as diversas plantas de tratamento, processados segundo a origem, o valor calorífico e a distância. Para tanto, diversos contingentes de tratamento na forma de plantas de incineração externas estão disponíveis, além das próprias instalações da AHA, como a planta de TMB para rejeitos, em Hannover.

A planta de TMB de Hannover tem licença para o tratamento de 200.000 Mg anuais. A instalação para o tratamento mecânico (TM) está em operação desde o ano 2000, a instalação a jusante para o tratamento biológico (TB), desde o ano 2005. A TB é constituída com processo de biodigestão a seco, segundo o sistema VALORGA, com tratamento aeróbio posterior e maturação em sistema fechado (mais informações sobre este sistema podem ser obtidos em Vielhaber &

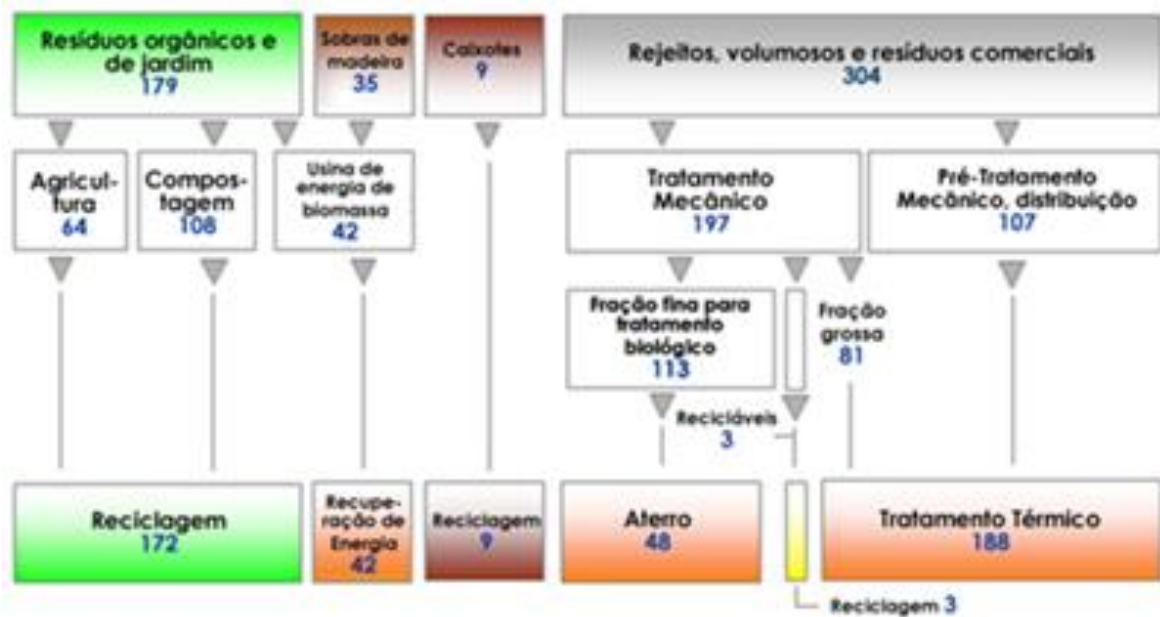
Middendorf, 2011). Os rejeitos após o tratamento pelo TMB, cerca de 48.000 Mg de resíduos, são dispostos em aterro (Figura 3).

Figura 2 – Composição dos resíduos na região de Hannover (Volume total: 766.000 Mg, em 2012)



Fonte: Adaptado de Gestão de Resíduos Hannover, 2012.

Figura 3 – Quantidades de resíduos sólidos urbanos e de rejeitos, e rotas de tratamento, na região de Hannover (em 2012)



Fonte: Adaptado de Gestão de Resíduos Hannover, 2012.

4 PLANTA TMB DE HANNOVER

A planta de TMB de Hannover (Figura 4) recebe RSU e resíduos similares.

A planta de tratamento mecânico e biológico de Hannover é maior planta da Alemanha para processamento de resíduos mistos, desta forma seu conceito tecnológico pode servir de modelo em outras experiências. Uma transferência de conhecimento para o Brasil deve tomar em consideração as diferenças legais entre os países remontando em flexibilizações técnicas, por exemplo, em relação ao tratamento das emissões gasosas.

Figura 4 – Central de tratamento de RSU em Hannover: TMB (no fundo), planta de compostagem dos orgânicos (no centro) e planta de incineração da EEW Hannover Ltda (na frente)

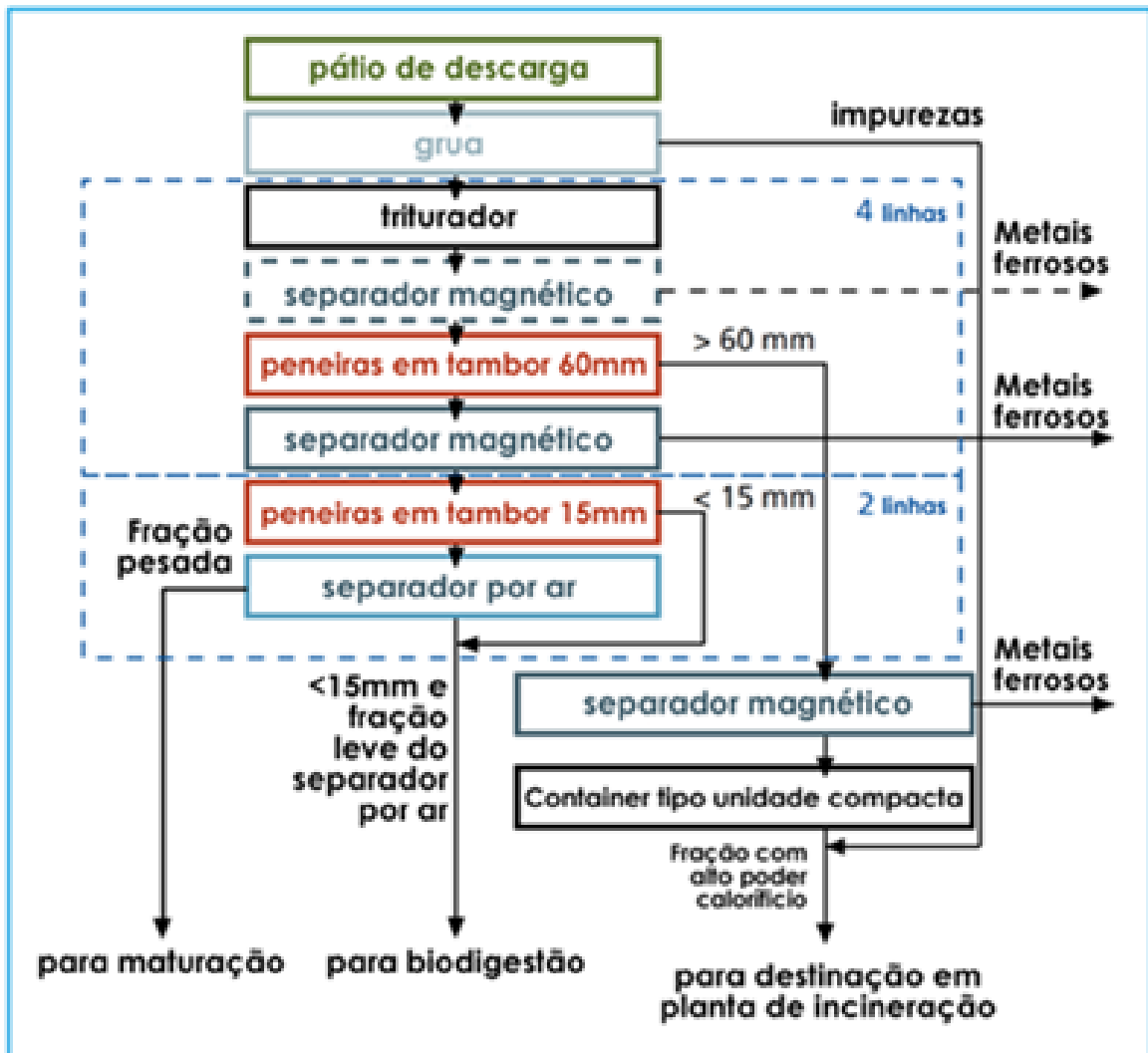


Fonte: Vielhaber e Middendorf (2011).

4.1 Tratamento Mecânico

O esquema na Figura 5 mostra o fluxo de processo: os caminhões da coleta descarregam os resíduos no reservatório de armazenamento. Por meio de uma garra, os resíduos são colocados em trituradores.

Figura 5 – Fluxograma do tratamento mecânico (TM)



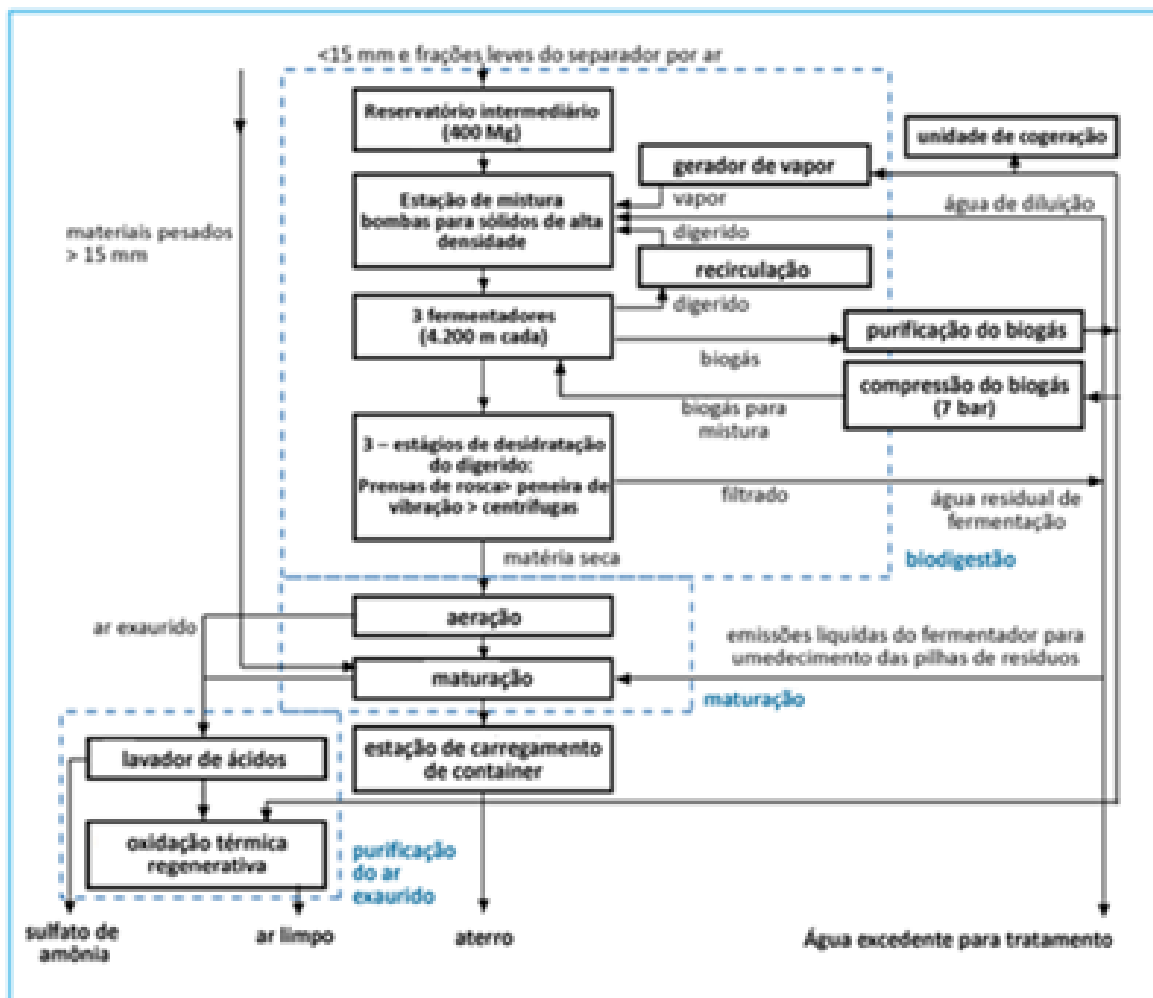
Fonte: Adaptado de Vielhaber e Middendorf (2011).

Os corpos estranhos são removidos, os metais ferrosos são retirados por magnetos, e por meio de peneiras, as proporções residuais de papel, madeira e plásticos contidas na fração grossa são separadas da fração fina, que contém a maior parte do material orgânico apropriado para a biodigestão. A granulometria é de 60 mm. Quatro linhas de tratamento quase idênticas são operadas em paralelo, na planta de TMB.

A fração grossa de alto valor calorífico é conduzida para o aproveitamento térmico, na planta de incineração, localizada na proximidade imediata. O tratamento fino antes da biodigestão consiste em uma etapa de peneiramento ($</> 15$ mm) seguido por uma separação por corrente de ar da fração > 15 mm, objetivando a eliminação dos corpos pesados inertes (pedras, vidro, minerais) da fração < 60 mm, os quais não são apropriados para a biodigestão e portanto, são conduzidos diretamente para a etapa de maturação do tratamento aeróbio (Figura 5).

4.2 Tratamento Biológico

Figura 6 – Fluxograma do tratamento biológico (TB)



Fonte: Adaptado de Vielhaber e Middendorf (2011).

O tratamento biológico compreende as etapas de biodigestão, de compostagem aeróbia e de maturação. O fluxograma do processo se encontra na Figura 6. A fração “leve” produzida pela separação por corrente de ar é conduzida para a biodigestão. Nos casos em que o TM e, ou o TB não podem receber resíduos, devido à manutenção agendada ou por causa de um defeito, uma

esteira e um reservatório instalado no meio das etapas têm capacidade de armazenamento de uma carga diária da fração fina (400 Mg).

A biodigestão anaeróbia segundo o processo “VALORGA” ocorre na faixa mesofílica (35 °C a 42 °C). O tempo de retenção nominal nos reatores é de 20 dias. Em seguida, os resíduos da biodigestão são submetidos a uma desidratação em três etapas e conduzidos para o tratamento aeróbio. Nesta etapa, os resíduos são aerados intensivamente por 48 horas, com o intuito de retirar o amoníaco. Depois disso, os resíduos são colocados em leiras e maturados por mais seis semanas, aerados por sucção e revirados automaticamente, uma vez por semana, e finalmente transportados em caminhões para o aterro (Figura 6).

A planta de TMB de Hannover funciona de segunda a sexta, em três turnos. O descarregamento de resíduos acontece durante o dia entre 6h e 22h, o funcionamento das máquinas é de 12 h/dia a 14 h/dia. O turno noturno é reservado para a manutenção dos equipamentos.

4.3 Purificação e Aproveitamento do Biogás

Na área de processamento de Hannover, o biogás produzido no tratamento biológico da planta de TMB é misturado com o gás de um aterro desativado e conduzido para um sistema de purificação e aproveitamento do biogás. O gás de aterro é disponível de forma equilibrada, com cerca de 1.000 m³/h. Devido à falta de material fresco no aterro de Hannover, desativado no ano 2005, o teor de metano, com 40% a 45%, é comparativamente baixo. O volume de gás disponível diminui em 10%, a cada ano.

A mistura dos gases é conduzida para um compressor e depois é desumidificada por meio de secagem por refrigeração, com vazão de 3.600 m³/h. Dois filtros de carvão ativado colocados em série retiram os siloxanos e o sulfeto de hidrogênio, por adsorção. E, em seguida, o gás é conduzido por um gasômetro com capacidade de 1.500 m³, cuja função é mais de misturador do que para o armazenamento (capacidade tampão de 30 min).

O gasômetro foi instalado porque o biogás e o gás de aterro não se misturam no gasoduto mesmo com seus 500 m de comprimento, causando problemas nos motores do sistema de cogeração. Estes motores possuem gerenciamento eletrônico regulado pelo poder calorífico do gás, e tendo surgido problemas nos motores com a adaptação aos pulsos do poder calorífico alternado, dos dois tipos de gás. As variações de pressão e de poder calorífico na rede de gás local foram neutralizadas pelo gasômetro, melhorando a segurança de funcionamento do sistema de cogeração.

Após passagem pelo gasômetro, um volume de 500 m³/h do gás purificado é utilizado como combustível no tratamento do ar exaurido da planta TMB. O restante (12,5 milhões de Nm³, em 2010) é convertido em energia elétrica, em sistemas de cogeração. Estes sistemas têm potência elétrica e térmica, de 3,8 MW, respectivamente. A eletricidade é injetada para a rede própria (cerca de 15 milhões de kWh/a) e para a rede pública (cerca de 22 milhões de kWh/a), e o calor residual

é utilizado para suprir a demanda de água quente e calefação na área de processamento em Hannover.

5 EXPERIÊNCIAS ACUMULADAS DURANTE A GESTÃO DE UMA PLANTA DE TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO

O sistema de tratamento mecânico da planta de TMB de Hannover entrou em operação no ano 2000. Desde então, está funcionando quase sem falhas de processo. Contribuíram para isto a segurança de *back-up* e o dimensionamento confortável das duas linhas de tratamento, que possibilitam a continuação da operação com, no mínimo, 60% da capacidade, no caso em que uma das linhas seja parada.

O fornecedor da instalação de tratamento biológico (TB) iniciou a operação em meados de 2005 e não conseguiu estabelecer um funcionamento bem sucedido até o fim de 2006. Os vários problemas que surgiram foram motivo para a AHA desistir do contrato de construção com o fornecedor e operar a planta por conta própria.

O potencial de otimização da planta de TMB de Hannover foi analisado e avaliado sistematicamente. As medidas de otimização tiveram os seguintes objetivos:

- Operação conforme a licença de operação concedida (Respeitando o Regulamento 30. BImSchV, DepV);
- Aumentar o desempenho e a disponibilidade;
- Economicidade.

As recomendações para o planejamento de instalações novas, por exemplo, no Brasil, derivadas das experiências da colocação em operação da planta de TMB de Hannover, encontram-se descritas nos próximos itens.

5.1 Planejamento

Na fase de planejamento, o conceito tecnológico sugerido pelo fornecedor deve ser revisado por um especialista da área. Apenas após a opinião do especialista, os planos para a colocação em prática e para a continuação mais detalhada do planejamento serão liberados.

Os diversos passos do planejamento devem ser bem coordenados. Componentes em cadeia, como máquinas e esteiras, devem ser dimensionados em relação às quantidades processadas bem como, aos intervalos de manutenção necessários. Deve-se evitar que um equipamento subdimensionado se constitua em um gargalo que cause transtorno para todos os equipamentos à jusante.

Os resíduos a serem tratados levam substâncias consigo que causam desgaste considerável do material dos equipamentos. A abrasão por partículas minerais ou materiais pesados como vidro, areia e pedras em tubulações, bombas e outros equipamentos pode provocar a degradação expressiva do material, com o passar do tempo.

Além disso, a areia pode se acumular nos diversos fermentadores envolvidos no tratamento biológico. Para sistemas contínuos de biodigestão recomenda-se, portanto, avaliar a instalação de um tratamento específico para a eliminação das frações pesadas.

Os resíduos contêm materiais de ação corrosiva, em conjunto com a umidade presente. A corrosão química (ácidos) ou a biocorrosão (excreções das bactérias) provocada por certas condições ambientais podem agir de forma agressiva nos componentes das instalações. A parte da construção deve também ser considerada. Como proteção contra a corrosão, materiais mais nobres (aço inox) ou revestimentos podem ser utilizados, entretanto, estas medidas resultam em custos maiores de investimentos. Uma alternativa é o uso de materiais mais simples e baratos, como peças de desgaste, que podem ser trocadas em determinados intervalos, porém, essa opção exige uma boa acessibilidade aos equipamentos. Para evitar a biocorrosão nos fermentadores, revestimentos apropriados das partes em contato com o biogás e das paredes interiores dos fermentadores devem ser previstos desde o início.

A segurança de trabalho e a boa disponibilidade dos sistemas dependem de uma boa acessibilidade aos componentes das instalações, especialmente nas partes que necessitam manutenção regular ou frequente troca de peças de desgaste.

Já na fase de planejamento, o espaço necessário para possibilitar o acesso para o serviço de manutenção, bem como, para os meios de transporte (plataformas elevadoras etc.), deve ser considerado e identificado nas plantas.

Para plantas de biodigestão, o fornecedor deve apresentar um balanço hídrico coerente. A água de processo deve ser conduzida em ciclo interno fechado, sempre que possível, evitando a produção de excessos de água de processo, a qual contém substâncias provenientes dos resíduos e precisa de um tratamento, muitas vezes bastante oneroso, devido às cargas consideráveis de demanda química de oxigênio (DQO). A poluição por traços de metais pesados, advindos dos rejeitos, tornam a água de processo imprópria para o lançamento em corpos receptores ou para o uso como biofertilizante, na agricultura, sendo que uma ETE municipal, via de regra, não é equipada para fornecer um tratamento adequado a este tipo de contaminante. Um tratamento externo em ETEs especiais é oneroso. Por outro lado, a água de processo produzida por plantas restritas à biodigestão de resíduos orgânicos como único substrato, pode ser utilizada de forma vantajosa, como biofertilizante na agricultura, substituindo fertilizantes sintéticos.

O clima quente e úmido dentro de uma planta de TMB, e mais ainda no clima predominantemente tropical brasileiro, provoca corrosão e falhas em componentes eletrônicos, portanto, um grau de automação muito complexa deve ser evitado. Os funcionários precisam ter um elevado grau de treinamento não apenas para a operação da planta, mas também para identificar eventuais falhas e para poder realizar os consertos necessários. Caso ainda não haja disponibilidade de funcionários devidamente treinados, a opção de instalar sistemas mais simples e robustos deve ser discutida junto ao fornecedor. Em locais com muito espaço disponível, os processos de carregamento ou de transportes internos podem ser realizados por equipamento móvel, como pás-carregadeiras.

Porém, por medidas de segurança, sistemas de controle automatizados são necessários em áreas de contato com o biogás, para o monitoramento da pressão atmosférica e dos teores de oxigênio e de metano. Salas fechadas com instalações técnicas conduzindo biogás necessitam de um monitoramento do ar, por meio de um detector conectado a um sistema de controle remoto, possibilitando o monitoramento 24 horas e a transmissão de alarmes por mensagem de texto ou algo parecido. Além disso, funcionários treinados para a análise de problemas e seu conserto são indispensáveis (Item 5.3).

Partes essenciais da instalação devem possuir um sistema de reserva *back-up*, que se constitui na instalação de duas ou até três linhas ou equipamentos iguais, para possibilitar o funcionamento do sistema em caso de manutenção ou de reparos.

O aproveitamento do gás no sistema de cogeração representa uma tecnologia robusta que pode ser bem adaptada às condições dos respectivos locais devido à sua concepção modular. Mesmo assim, dependendo da qualidade do biogás, a necessidade da instalação de um sistema de tratamento (filtração, secagem) deve ser avaliada. Um sistema de purificação representa uma tecnologia complexa e onerosa, e, portanto, uma avaliação da economicidade deve fazer parte do planejamento.

Muitas vezes não existe o aproveitamento de todo o calor residual produzido pelos motores e gases de escape do sistema de cogeração. O aproveitamento do calor deve ser incluído no conceito, ou pela própria planta de TMB, por exemplo, para o aquecimento dos fermentadores, ou de forma descentralizada, em uma rede de calefação, desde que haja relevância devido a condições climáticas no Brasil.

5.2 Operação

Uma cláusula sobre o treinamento dos futuros funcionários sob supervisão do fornecedor, antes da entrega da planta, deve fazer parte da documentação de obrigações e das contratações. Um acordo deve ser fechado sobre a condução de uma fase de operação em teste, por tempo suficiente para avaliar o funcionamento contínuo do processo, até que 100% da capacidade seja atingida, na fase final. Em plantas de tratamento mecânico, este prazo geralmente é de quatro a seis semanas, enquanto para plantas de tratamento biológico, um prazo de três a seis meses é necessário. Neste tempo, a planta deve ser operada com 100% da capacidade por duas e seis semanas, respectivamente, e até, por curtos intervalos, com 110% da capacidade. Para tanto, o fornecedor deve disponibilizar um gerente, que também é responsável pelo treinamento dos futuros funcionários, durante a fase inicial do funcionamento.

Documentos e manuais devem ser disponibilizados na língua do respectivo país, não devendo aceitar uma documentação em inglês, no caso do Brasil. Ao contrário, tudo deve ser descrito e intitulado em português.

As “propriedades garantidas” pelos contratos se referem a dados, ou técnicos de capacidade, ou de qualidade dos produtos. As garantias dadas pelos fornecedores geralmente se

estendem à vida útil de instalações, durabilidade do material, disponibilidade, propriedades do produto, entre outras. Estas garantias devem constar no contrato ou devem ser abertas à negociação. Durante o teste de operação, as propriedades da instalação, como a disponibilidade ou as qualidades de materiais dos diversos fluxos, serão avaliadas. A garantia sobre as funções dos equipamentos deve se estender para um prazo negociável, até depois de iniciar a operação regular. Em caso de celebrar contrato de manutenção, os prazos de garantia podem ser estendidos.

Além disso, a devida manutenção das instalações resulta em uma vida útil prolongada e em economias no consumo de energia. Os funcionários devem ser treinados pelo fornecedor e alertados sobre essas circunstâncias.

As plantas de biodigestão que produzem o biogás estão submetidas a medidas de seguranças especiais contra o risco de explosões, tornando indispensável a instalação de um detector automático de gás e um sistema de monitoramento da pressão. Caso ocorra um problema, o envio automático de alarmes para os celulares dos funcionários possibilita rápida ação. Os conhecimentos relacionados à manutenção do sistema computacional necessário devem ser ensinados aos funcionários em forma de prestação contínua de serviços, ou por meio de contratação de especialistas da área.

Dentro dessa linha, a proteção contra incêndios deve ser prevista. A acumulação de sujeiras secas, como a poeira gerada no sistema de TM, as incrustações nas esteiras e pedaços de plásticos leves caídos no chão representam uma carga de incêndio perigosa.

No processamento de resíduos úmidos formam-se camadas viscosas bem como, esconderijos para bichos nocivos, tornando necessária a limpeza do piso nos galpões e das outras superfícies, em intervalos regulares.

A produção do biogás é diretamente relacionada com as quantidades e os horários de alimentação. A instalação de um regime equilibrado de alimentação, também durante a noite e nos fins de semana, reflete expressivamente em um aumento da quantidade e da qualidade do biogás produzido. Neste contexto, o gerenciamento dos estoques também deve estar no foco da atenção.

O trabalho em rede, com outros gerentes, se constitui em uma ferramenta importante para a operação da planta. A troca de experiências e de informações sobre os resultados de medidas de otimização são essenciais para monitoramento e melhorias da própria planta. Sugere-se encontros regulares dos gerentes, além da criação de oportunidades para o treinamento mútuo dos funcionários e o estabelecimento de análises comparativas (*benchmarkings*).

6 BALANÇO CLIMÁTICO

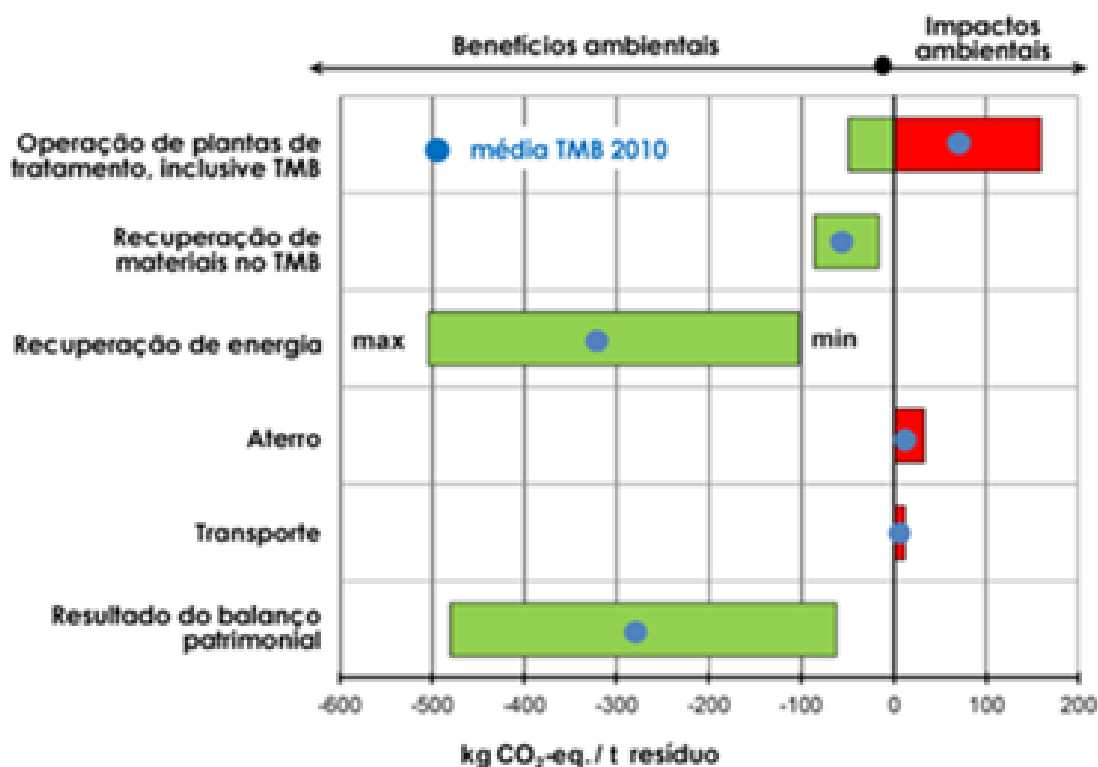
O potencial do tratamento dos resíduos para a mudança climática é avaliado por meio de fatores específicos de emissão de CO₂. Estes fatores são considerados no balanço como negativos (por exemplo, injeção de eletricidade, metais recuperados) ou positivos (emissões, importação de energia fóssil). O potencial de CO₂ emitido pelo aproveitamento material, por exemplo, de metais, é comparado com aquele emitido pela produção dos respectivos materiais a partir de recursos

naturais. No balanço climático, as emissões dos gases metano, gás hilariante e CO₂ provenientes de carbono fóssil são consideradas. O balanço de CO₂ é dividido em partes ambientalmente positivas e negativas.

A maior contribuição negativa no balanço climático de uma planta de TMB é atribuída ao aproveitamento energético de combustíveis alternativos, na geração de energia em plantas termelétricas específicas, seguida pela contribuição do aproveitamento material de metais e de madeira. O balanço de dados negativos e positivos resulta em um “bônus” climático, em média de -280 kg CO₂-eq/Mg de resíduos (Figura 7). Devido ao aproveitamento material e à geração de energia a partir do biogás produzido, e com a inclusão da parte das emissões do aterro, a operação de uma planta de TMB apresenta-se como neutra em relação ao clima.

As plantas de TMB contribuem para a proteção do clima também através da produção do biogás, oriundo da decomposição dos resíduos em sistema fechado e controlado, ao contrário do que ocorre durante a disposição de resíduos em aterros, cuja decomposição descontrolada resulta em emissões de gases de efeito estufa, para a atmosfera. Em aterros geridos de acordo com os regulamentos europeus, as emissões de metano e de chorume são expressivamente reduzidas.

Figura 7 – Balanço de CO₂ e contribuições líquidas dos respectivos componentes do processo



Fonte: Ketelsen (2013).

7 PERSPECTIVAS DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS COM ETAPA DE BIODIGESTÃO, NO BRASIL

No Brasil, a coleta seletiva de RSU ainda não é muito difundida e 40% dos RSU são conduzidos para os aterros sem qualquer tratamento, dados de 2012 (Bvse, 2013). A separação de plásticos, metais ou de papel muitas vezes é feita manualmente, por catadores, ou nas estações de transbordo ou nos aterros. Não há separação de resíduos orgânicos, portanto, os RSU restantes, após retirada dos recicláveis, apresentam uma elevada carga orgânica, elevados teores de umidade e, resultando disso, um valor calorífico baixo.

O clima tropical e subtropical do Brasil é favorável para a decomposição anaeróbia da carga orgânica em aterros. As emissões não controladas de gás de aterro, nocivo para o clima, são altas. Portanto, o tratamento biológico por biodigestão anaeróbia em sistemas fechados e controlados, é de elevada importância para a proteção do clima. A biodigestão anaeróbia se constitui em uma alternativa interessante para o tratamento de resíduos, produzindo o biogás, um recurso energético valioso (“*waste-to-energy*”). A produção de energia em sistemas de cogeração exige uma tecnologia comparativamente simples e pode ser facilmente adaptada às condições dos respectivos locais.

Antes de serem conduzidos para o sistema de biodigestão, os componentes de elevado poder calorífico (papel, plásticos, madeira) devem ser extraídos dos resíduos. Para tanto, processos mecânicos simples e robustos, como, a trituração e o peneiramento, estão disponíveis. A indústria de cimento no Brasil apresenta altas taxas de crescimento e conseqüentemente, também uma alta demanda energética. A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos deve ser objeto de análise econômica. Portanto, as sinergias com indústrias com alta demanda energética, como as de papel e de cimento, deveriam ser consideradas na escolha do local para a construção de uma planta de tratamento de resíduos, para manter o transporte dos combustíveis alternativos economicamente viável.

Nas partes do país com clima quente, a utilização do calor residual pode ser restrito a processos dentro da própria planta, por falta de demanda de calefação. Um passo importante e de grande utilidade pode ser a secagem de fluxos de resíduos.

Na Alemanha, a injeção de energia elétrica na rede é subvencionada por lei. Os gestores das redes são obrigados a receber a eletricidade produzida por fontes renováveis. No Brasil, essa obrigação precisa ser instaurada e, ou a injeção à rede deve ser resolvida junto aos gestores da rede. A viabilidade econômica do aproveitamento do biogás também deve ser avaliada com antecedência.

Recomenda-se que os contratantes municipais no Brasil busquem a consultoria de especialista independente da área, desde a fase de planejamento até, ao mínimo, a fase de início da operação, para que a garantia de qualidade seja suficiente para a futura operação da planta.

8 CONCLUSÕES

O tratamento de RSU no Brasil com a tecnologia TMB com etapa integrada de biodigestão anaeróbia apresenta uma contribuição importante para a proteção do clima e dos recursos naturais, e para o aumento da eficiência energética. Entre os objetivos do tratamento estão a separação dos recicláveis e sua comercialização (aproveitamento material) e a produção de energia a partir do biogás (aproveitamento energético).

Um conceito bem sucedido de *waste-to-energy* (recuperação energética) pode resultar na autossuficiência da planta TMB com energia elétrica e calor.

A tecnologia de TMB apresenta fácil adaptação às condições climáticas e a composição de resíduos específicos bem como, às condições dos respectivos locais. Recomenda-se a instalação de uma tecnologia comprovada e robusta, e a escolha de processos de produção simples, quando aplicável.

REFERÊNCIAS

BImSchV. **Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-**

Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen – 30. BImSchV), vom 20. Februar 2001 BGBl. I S. 317, zuletzt geändert durch Art. 3 der Verordnung vom 27. April 2009 BGBl. I S. 900. Disponível em: <www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_30/gesamt.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

BVSE – Bundesverband Sekundärerrohstoffe und Entsorgung e.V. **Entwicklung der brasilianischen Abfallwirtschaft ist zweigeteilt**. Große Industrieunternehmen mit interessanten Projekten / Öffentlicher Sektor bleibt schwach / Von Florian Steinmeyer. 12.07.2013. Disponível em: <<http://www.bvse.de/2/6659/Entwicklung-der-brasilianischen-Abfallwirtschaft-ist-zweigeteilt>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

DepV (2009). **Verordnung über Deponien und Langzeitlager** (DepV – Deponieverordnung), Deponieverordnung vom 27. April 2009 BGBl. I S. 900, zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 BGBl. I S. 2012. Disponível em: <www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

FRICKE, Klaus. Vergärung von Bio- und Grünabfällen in Deutschland – Ausbau und Optimierungspotential. In: WIEMER, Klaus; KERN, Michael; RAUSSEN, Thomas. Bio- und Sekundärerrohstoffverwertung IX, stofflich – energetisch, Fachtagungsband des 26. **Kasseler Abfall- und Bioenergieforums 2014**: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 151-182. Disponível em: <<http://archiv.fbk-ev.de/vergaerung-von-bio-und-gruenabfaellen-in-deutschland-ausbau-und-optimierungspotential/>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

KETELSEN, Ketel. MBT's Contribution to Climate Protection and Resource Conservation. In: KÜHLE-WEIDEMEIER, Matthias; BALHAR, Michael. **Waste-to-resources 2013**: mechanical biological waste treatment, material recovery facilities and Recycling. Proceedings. 11th – 13th of June 2013, S. 152-174. Disponível em: <<http://goo.gl/35byN9>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

- KrWG, 2012 – **Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen** (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG). 2012. Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- DWA-M 388. **Mechanisch-Biologische (Rest-)Abfallbehandlung (MBA)**. Merkblatt. DWA-Regelwerk, Band M 388, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. -DWA-, Hennef; April, 2014, 46 S., Selbstverlag. ISBN 978-3-944328-52-2.
- REGULAMENTO 30. BImSchV, DepV. **Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes** (Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen – 30. BImSchV), vom 20. Februar 2001 BGBl. I S. 317, zuletzt geändert durch Art. 3 der Verordnung vom 27. April 2009 BGBl. I S. 900. Disponível em: <www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_30/gesamt.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- ROBRA, Sabine; RAUSSEN, Thomas. **Aproveitamento energético do biogás**. 2º Congresso Técnico Brasil-Alemanha, Florianópolis, Santa Catarina, 28.05.2014. Disponível em: <http://www.congresso-brasil-alemanha.com.br/temas/default/arquivos/palestras/27/11-SABINE_ROBRA.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- TU – Technische Universität Braunschweig. **Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe**. Endbericht zu Förderprojekt 03KB022. Gefördert durch: Technische Universität Braunschweig, Bauhaus-Universität Weimar, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, 334 S. 2012. Disponível em: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Steckbriefe/dokumente/03KB022_Abschlussbericht_web.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- VIELHABER, Beate; MIDDENDORF, Roland. Experience in the Operation of Mechanical-Biological Waste Treatment Plants – Report by the Operator of a German MBT plant (Hannover). In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl; PELLONI, Luciano. (Eds.). **Waste Management**, Volume 2. TK-Verlag, Neuruppin. S. 431-442, 2011.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

VIELHABER, Beate. Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos: conceito, experiências operacionais e otimização. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na Planta de Fermentação da Cidade de Berlim

*Exploitation and Beneficiation Biogas Derived
Fermentation Plant the City of Berlin*

Engenheiro Mecânico Wilhelm Winkelmann

Doutor Engenheiro de Minas Alexander Gosten

RESUMO

Berliner Stadtreinigung (BSR) Berlim é uma empresa municipal, que vem oferecendo, há quase 20 anos, para os munícipes de Berlim, a possibilidade de destinação dos resíduos orgânicos – conhecido como “bio-produtos” – coletados separadamente em contêineres próprios. A maioria dos moradores de Berlim já participa da coleta seletiva. O composto orgânico a partir dos resíduos é certificado pela Associação Federal da Qualidade dos Compostos (*Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.*) e é empregado na agricultura, bem como em atividades de jardinagem. A fim de recuperar o alto potencial energético desses “bio-produtos” a BSR tem destinado os resíduos fermentáveis para a planta de biodigestão em Berlin Spandau desde 2013. O biogás purificado é introduzido na rede local de gás e usado em três postos da BSR para abastecer cerca de 150 caminhões de coleta de resíduos, estes em funcionamento com gás natural renovável. Isso corresponde a mais de metade da frota de caminhões de coleta BSR. Cerca de 2,5 milhões de litros de diesel podem, assim, serem substituídos por ano. Aproximadamente 580.000 t de resíduos – representando 60% de todos os resíduos domésticos e orgânicos – podem ser coletados e transportados sem afetar o clima. Através da reutilização dos resíduos orgânicos em uma planta de biodigestão e, após o tratamento da massa sólida digerida, a BSR utiliza os “bio-produtos” de forma adequada. Os resíduos orgânicos servem tanto para equilibrar as mudanças climáticas através de sua recuperação energética quanto para fornecer nutrientes para a agricultura, sendo um importante gerador de húmus para os nossos solos. Desta forma, os produtos gerados a partir de bio-produtos substituem as fontes fósseis de energia, bem como os fertilizantes sintéticos.

Palavras-chave: Resíduos. Biogás. Composto. Gestão. Produtos.

ABSTRACT

Berliner Stadtreinigung (BSR) is a municipal Berlin company, which has been offering Berlin households for almost 20 years the possibility the dispose of organic waste – known as “bio-goods” – separately from household waste in an organic bin. Most of Berlins households use this organic bin by now. The compost made of the organic household waste has a certificate issued by the Federal Association of Compost Quality (*Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.*) and is used in agriculture as well as in landscape gardening. In order to recover the high energetic potential in

these “bio-goods” BSR has been using these fermentable wastes in a bio-fermentation-plant in Berlin Spandau since 2013. The purified biogas is fed into the local gas grid and used on three BSR compounds to refuel some 150 waste collection trucks running on CNG. This corresponds to more than half of BSR’s waste collection fleet. Some 2.5 million liters of diesel can thus be substituted per year. Approximately 580,000 Mg of waste – that is 60% of all domestic and organic waste – can be collected and transported climate neutrally. By reusing organic waste in a fermentation plant and by after treating the solid fermentation residues, BSR puts “bio-goods” to an optimum use. Organic waste serves in the same way as a climate neutral source of energy as well as – like before – a supplier of nutrients for the agriculture and it is an important generator of humus for our soils. The products made out of bio-goods thus substitute fossil sources of energy as well as synthetic fertilizers.

Keywords: Waste. Biogas. Compost. Management. Product.

1 INTRODUÇÃO

O governo federal definiu a meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa na Alemanha em 40%, comparado ao nível de 1990, o mais tardar até 2020. Esta meta só poderá ser alcançada por meio de uma economia ou gestão sustentável, ou seja, economia de energia, geração de energia renovável e uso eficiente da energia. No futuro, a gestão de resíduos poderá continuar a dar uma contribuição significativa, especialmente com relação ao tema resíduos orgânicos, para que sejam atingidas as metas em matéria de recursos naturais, energia e clima.

Nas últimas décadas muitas coisas mudaram na gestão de resíduos da Alemanha. Empresas antes apenas preocupadas com a disposição final dos resíduos passaram a ser especialistas em reciclagem e reutilização. Com um balanço de CO₂ excelente, a indústria de gestão de resíduos alemã é pioneira na implementação das metas de proteção do clima. O estudo “Potenciais de proteção do clima da indústria de gestão de resíduos” (IFEU / ÖKO-INSTITUT E.V., 2010) comprova estes dados. O estudo examina os potenciais de aproveitamento / reutilização material e energético das frações relevantes de resíduos. Os resultados já confirmam hoje em dia a enorme contribuição prestada pela indústria de gestão de resíduos alemã para a redução das emissões de gases de efeito estufa no país. Paralelamente, apresenta outras possibilidades de diminuir ainda mais as emissões na Alemanha.

Diante do pano de fundo de um aumento contínuo dos preços das energias fósseis, a pressão socioambiental é tão decisiva quanto a avaliação ambiental do uso de resíduos na geração de energia que se torna cada vez mais relevante. O uso energético de resíduos em centrais termelétricas (alimentadas com resíduos) é praticado há muitos anos e oferece uma contribuição considerável para a conservação de recursos.

Uma outra via é o uso de resíduos biodegradáveis oriundas da coleta seletiva, não apenas para fins de compostagem ou preparação de húmus para melhorar o solo, mas também para a produção do biogás. Neste caso a fermentação de resíduos biodegradáveis coletados separadamente é mais complicada do ponto de vista tecnológico e biológico e por isso, também, mais cara do que a mera compostagem. Observa-se, no entanto, cada vez mais nos últimos anos

uma aproximação econômica entre compostagem e fermentação. Além dos custos operacionais, a receita gerada pelo rendimento energético líquido em fermentadores conquista uma importância cada vez maior. Isto fica tanto mais claro quanto mais intensivo for o uso da energia total contida no biogás e quanto melhor a economia obtida com a estratégia energética do biodigestor acoplado puder ser retratada.

Se apostarmos de forma consequente na tecnologia (o desenvolvimento tecnológico continuou nos últimos anos e esta tecnologia já pode ser considerada madura atualmente) usada nas plantas na forma de fermentação seca de resíduos biodegradáveis e se considerarmos o aumento futuro esperado dos preços das energias fósseis, fica óbvia a necessidade de combinar o aproveitamento material e energético de resíduos biológicos. Trata-se de um caminho que aproxima cada vez mais a economia do fator ambiental. Resumindo, os potenciais dos resíduos biodegradáveis já dão uma contribuição significativa à redução dos gases de efeito estufa na Alemanha atualmente.

2 SITUAÇÃO INICIAL EM BERLIM

A BSR como instituição estatal de direito público é responsável pelos serviços de limpeza urbana em área de 890 km² na qual há 3,4 milhões de habitantes. No âmbito da coleta (400.000 contêineres de resíduos estão instalados) são realizados cerca de 19 milhões de esvaziamentos por ano. Como serviço adicional oferecido aos cidadãos (são aproximadamente 2,8 milhões de visitas de clientes por ano) temos em Berlim quinze empresas de reciclagem e seis pontos de coleta para resíduos perigosos, nos quais são entregues em torno de 150.000 t de resíduos. Nas empresas de reciclagem distingue-se entre aproximadamente 20 materiais diferentes e 35 substâncias nocivas, entre estas também se encontram três frações de resíduos de natureza biogênica. Trata-se das seguintes frações – material lenhoso descartado, resíduos de poda de árvores e arbustos, folhagem seca. Somente no início do ano, são coletadas cerca de 400.000 árvores de natal em Berlim. Um serviço especial é a coleta de resíduos sólidos volumosos diretamente em casa a pedido do cidadão. A varrição e limpeza de ruas e calçadas abrange cerca de 1,5 milhão de km, aproximadamente 4,9 milhões de esvaziamentos de contêineres de resíduos bem como 260.000 limpezas de bueiros. As folhagens recolhidas durante o ano todo resultam em um volume de aproximadamente 100.000 m³. Além disso, temos a eliminação de depósitos ilegais e trabalhos de remoção de neve e gelo durante o inverno.

No passado, as diferentes frações de resíduos não eram primordialmente consideradas pelos seus potenciais de fermentação de resíduos biodegradáveis e o aproveitamento do gás gerado, mas isto mudou neste ínterim. Devido à decisão do parlamento de 06 de dezembro de 2007 (Abgeordnetenhaus von Berlin, Drucksachen 16/1033 und 16/1038 [Câmara de Deputados de Berlim, impressos 16/1033 e 16/1038]), a BSR recebeu a obrigação de elevar significativamente o potencial ambiental dos resíduos oriundos da coleta seletiva através da sua reutilização energética. No dia 20 de agosto de 2010 esta obrigação de construir uma planta de fermentação foi

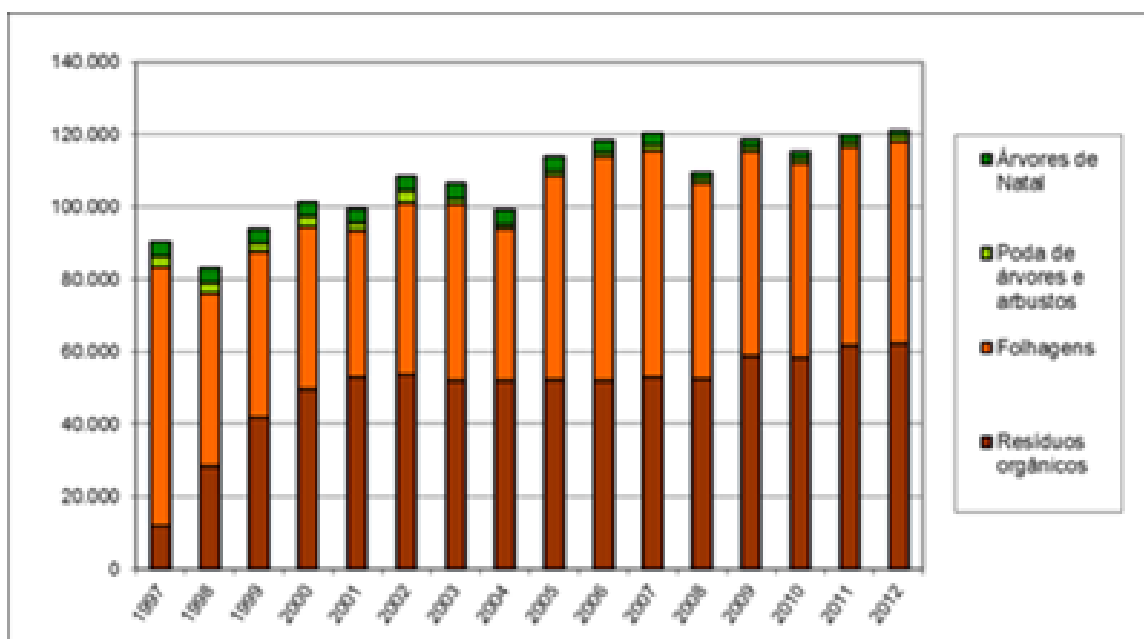
concretizada com o plano de gestão de resíduos da cidade-estado Berlim (ABGEORDNETENHAUSES VON BERLIN, 2010).

A BSR é financiada com taxas cobradas diretamente dos cidadãos, ou mais especificamente do proprietário do terreno, na forma de tarifas. Em princípio, a BSR tem a responsabilidade de assegurar a segurança da disposição dos resíduos e limpeza da capital da Alemanha. A BSR é submetida periodicamente a um processo de *benchmarking* (análise comparativa), no qual o aspecto mais importante é uma comparação com as taxas cobradas em outras grandes cidades alemãs. Nos últimos anos, conseguiu-se chegar a taxas mais favoráveis para resíduos específicos.

3 RESÍDUOS BIOGÊNICOS

A BSR pode aproveitar os potenciais de resíduos biogênicos de diferentes frações. No total, a BSR conseguiu juntar 121.000 t de resíduos biogênicos na coleta seletiva em 2012, dos quais aproximadamente 117.000 t eram folhas secas e resíduos biológicos. Considerando os 121.000 t, isto corresponde a 35 kg/habitante.

Figura 1 – Evolução dos volumes de resíduos biogênicos provenientes da coleta seletiva da BSR sem varrição (Mg/a)



Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

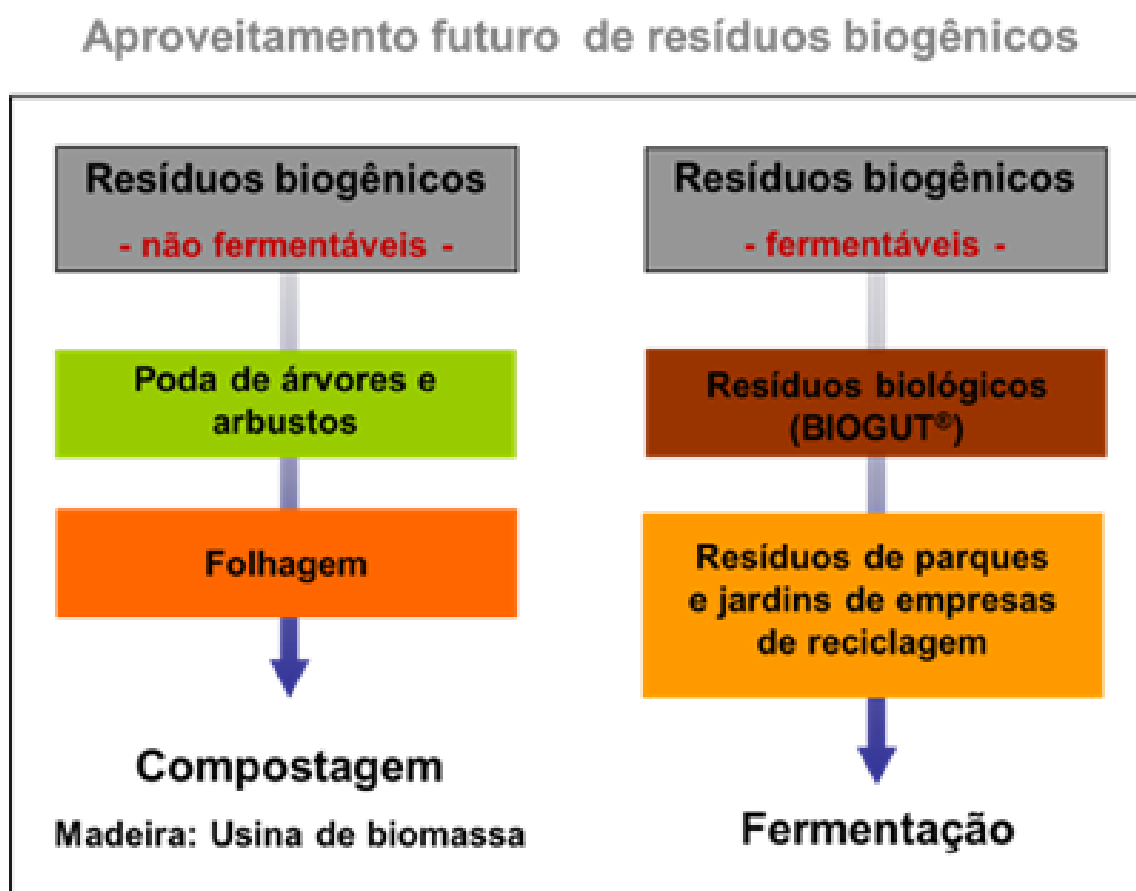
4 RESÍDUOS ORGÂNICOS DA COLETA SELETIVA

Desde 1996, a BSR pratica a coleta seletiva para os resíduos orgânicos domiciliares. A adesão e o uso do assim chamado “contêiner marrom” são obrigatórios. Em 2013, foi registrado

outro aumento na coleta seletiva que chegou então a 63.000 toneladas. Cerca de 83% dos domicílios fazem parte do sistema de coleta seletiva.

Atualmente está sendo testado se é possível aumentar ainda mais esta quantidade. Na discussão política sobre o futuro incremento da coleta seletiva foi exigida a introdução da fermentação e o abandono total da compostagem. Nesta discussão, a BSR fez uma distinção entre resíduos “fermentáveis” e “não fermentáveis”. Definimos que resíduos fermentáveis devem produzir no mínimo 80 m³ de biogás bruto na fermentação, caso contrário, a fermentação não faz sentido nem do ponto de vista energético nem do ponto de vista econômico.

Figura 2 – Aproveitamento futuro de resíduos biogênicos



Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

Diante destas considerações foi extrapolado que a primeira instalação de fermentação em Berlim deveria ser projetada para 60.000 t de resíduos a serem processados e capacidade de geração de um volume médio de gás bruto de no mínimo 100 m³/t.

Enquanto a contratação e implementação da maior das duas plantas urbanas planejadas estiver em curso, serão implementadas diversas atividades paralelas visando aumentar as quantidades de resíduos coletados seletivamente em Berlim. A segunda planta instalação será construída quando houver o volume suficiente.

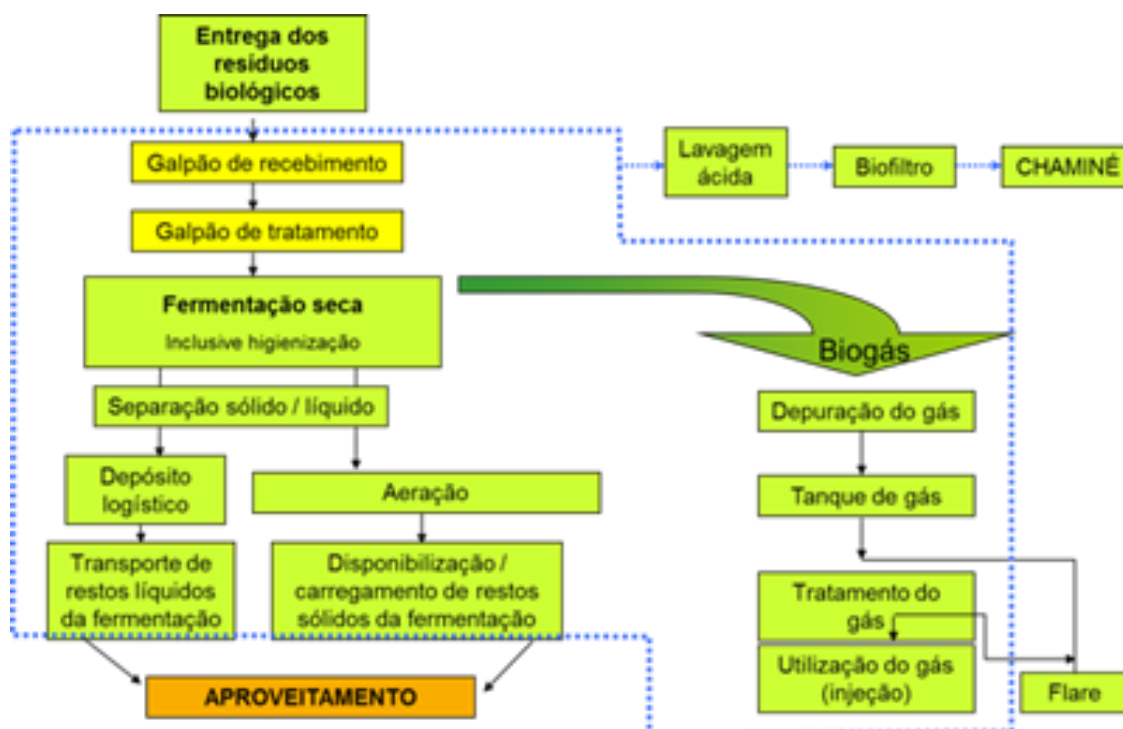
5 TECNOLOGIA DE INSTALAÇÃO E DE PROCESSO DA PLANTA DE BIOGÁS “WEST”

Após um amplo processo de licitação, de âmbito europeu, realizado em 2009, a adjudicação do contrato para a primeira planta foi para o consórcio STRABAG Umwelthanlagen GmbH, em Dresden (Alemanha) e STRABAG AG, em Berlin.

O projeto abrangia a construção de uma planta de fermentação seca em Berlim – Spandau composta dos seguintes elementos:

- Balança veicular;
- Recebimento e preparação de resíduos;
- Planta de fermentação com desidratação em fluxo total e tratamento da fase líquida;
- Aeração dos restos de fermentação higienizados e desidratados;
- Coleta, armazenamento e tratamento do biogás para alcançar a qualidade de gás natural;
- Coleta e depuração do ar de exaustão através de um sistema de filtros biológicos em linha dupla.

Figura 3 – Esquema do processo da planta de biogás

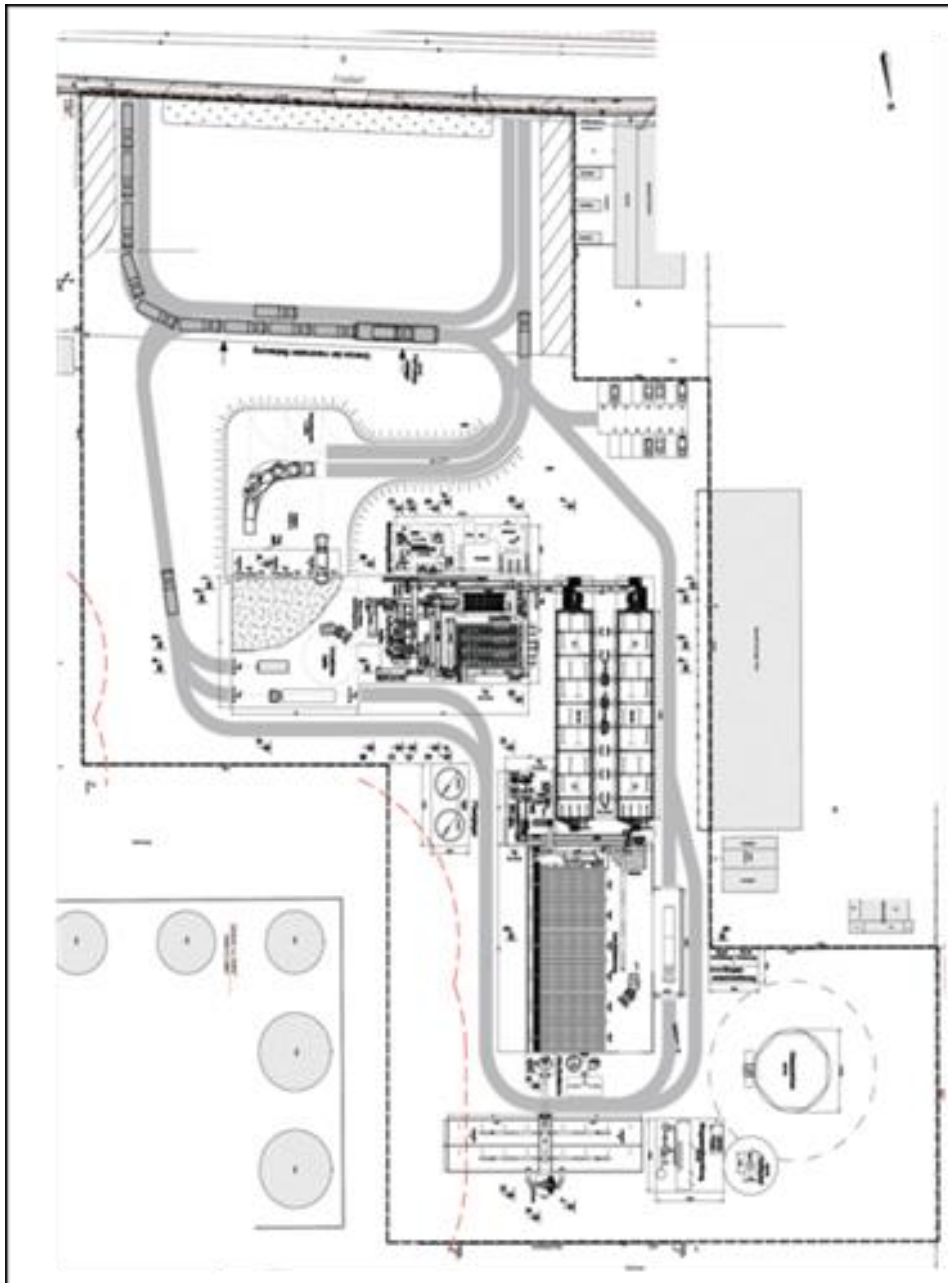


Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

O acesso à planta é pelo lado sul, mais concretamente pela rua “Freiheit”, passando pela rampa de acesso para a área das balanças.

Após a pesagem e registro dos volumes de resíduos na plataforma da balança, os resíduos seguem e são armazenados temporariamente em área de descarga.

Figura 4 – Esquema de instalação da *Strabag Umweltsanlagen GmbH*



Fonte: Adaptado pelos autores de *Strabag Umweltsanlagen*.

A área de descarga está subdividida por três portões equipados com tecnologia de pressão negativa através de cortina de ar para gerar uma separação atmosférica. Os portões podem ser acessados por uma rampa com várias vias. Os veículos de transporte entram de ré na abertura do

portão liberado, depois de terem manobrado em uma plataforma suficientemente ampla. O galpão para acondicionar os resíduos, chamado de *bunker*, foi rebaixado e possui uma profundidade de 2 m em relação à altura da rampa e encontra-se assim no mesmo nível do galpão de recebimento e tratamento. A gestão do *bunker* é feita por tecnologia móvel (carregadeira de rodas). O material é encaminhado ao processo de tratamento por carregadeiras de rodas. Foi projetado um sistema de galpão rebaixado (silo tipo *bunker*) para o recebimento dos resíduos, pois oferece uma tecnologia de armazenamento simples com manutenção fácil e boa acessibilidade. Durante a entrega, o motorista da carregadeira de rodas já pode cuidar da gestão do *bunker* sem haver colisões: ordenamento, triagem, alimentação. A possibilidade de entrar com semirreboque para fins de carga/descarga ou transporte para fora da área do *bunker* se dá pela entrada e saída no nível do chão em uma zona específica do galpão de recebimento.

A linha de tratamento segundo o princípio da desintegração por peneiras é alimentada pela carregadeira de rodas através de um dosador integrado ao rompedor de sacolas. Os resíduos orgânicos são transportados por correias para o peneiramento. Devido ao projeto de construção em polígono do tambor de peneiramento, tanto o acesso às malhas de peneiramento como à sua substituição é fácil. De acordo com nossa experiência, o formato em polígono também garante um peneiramento eficiente por causa da recirculação reforçada do material a ser peneirado. O tambor de peneiramento está conectado ao sistema de exaustão do galpão. O fluxo de material é separado em duas frações pelo peneiramento (o tamanho das malhas é igual a 55 mm). Os grãos com tamanho superior são conduzidos por um sistema de transporte e separação de materiais ferrosos, e então submetidos a uma pós-trituração em triturador de dois eixos. É possível tornar opcional esta segunda trituração, desta forma a rota também pode ser reestruturada segundo o fluxo de material, onde o material será reconduzido para o galpão *bunker*. A quantidade de resíduos a ser retirada do ciclo de peneiramento e trituração depende das propriedades do material alimentado (por exemplo, substâncias perturbadoras, plásticos aderentes ao material úmido). A seguir, o material excedente do peneiramento (geralmente material lenhoso) é reconduzido para o ciclo, voltando ao tambor de peneiramento. Este ciclo de peneiramento passa igualmente por uma separação de material ferroso e depois vai para um armazenamento intermediário antes da fermentação.

A área de armazenagem intermediária antes da fermentação possui sistema de ventilação que opera segundo o princípio da pré-decomposição. Esta área serve basicamente para desatrelar a parte de tratamento da parte de fermentação na planta e equalizar o fluxo horário de material, tornando possível a dosagem, no decorrer do dia, do biodigestor (princípio seco) conforme a quantidade de resíduos gerada diariamente.

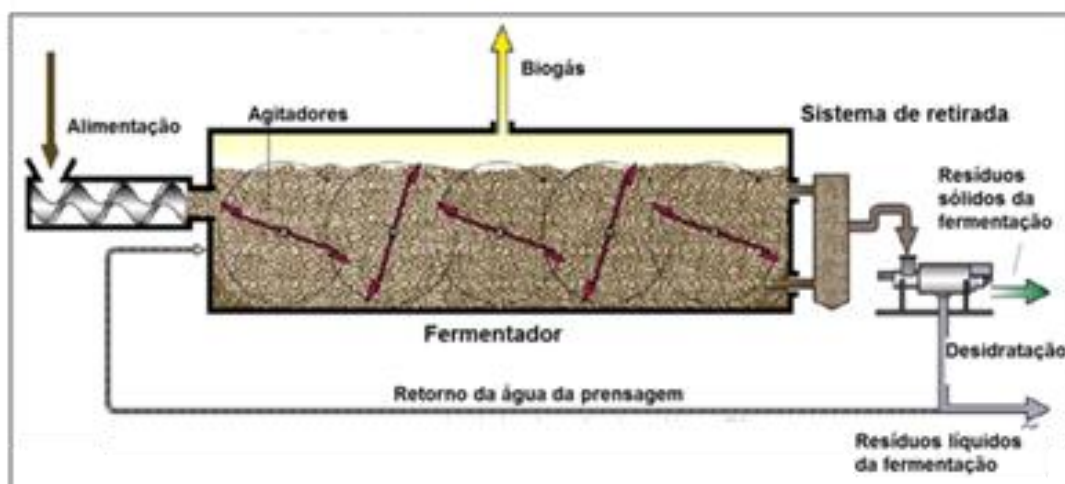
Além disso, existe a possibilidade de programar a alimentação automática dos fermentadores nos fins de semana ou feriados. Cada um dos três silos tipo *bunker* possui uma capacidade de aproximadamente 110 m³ e vem equipado com um sistema de piso móvel acionado hidráulicamente, permitindo uma descarga automática e conseqüentemente também uma alimentação automática do reator. Este depósito também auxilia no preaquecimento da carga do

reator, reduzindo a demanda térmica na parte anaeróbia. Nas épocas mais frias, este recurso constitui uma vantagem na produção de biogás por contribuir para a homogeneização. A área de armazenagem intermediária é encapsulada e conectada ao sistema de exaustão. Sendo necessário, ela pode ser esvaziada usando a tecnologia de transporte por esteiras para o setor de recebimento.

São utilizados dois reatores de digestão seca TF 2200 LARAN® com um volume bruto de 2.399 m³. Neste caso trata-se de um processo de fermentação seca termofílica consistindo em uma etapa. Os fermentadores operam de forma quase contínua no regime de fluxo pistão (*plug flow*).

Modelo construtivo: são duas câmaras de concreto especial em formato horizontal. Os agitadores curtos instalados de forma transversal impedem a formação de camadas flutuantes e/ou camadas de sedimentos e promovem a liberação de gás. Os fermentadores também estão equipados com todos os componentes relevantes para a segurança e conforme requisitos relacionados à tecnologia de gás previstos na legislação vigente. Depois da retirada do silo *bunker* intermediário, o conteúdo do fermentador é pesado na esteira transportadora equipada com sistema de balança antes de ser transferido por uma esteira distribuidora para uma das duas roscas helicoidais e pressionado para dentro do reator a ser alimentado. O material na rosca helicoidal veda o reator, impedindo a entrada de ar no fermentador.

Figura 5 – Representação esquemática do processo de fermentação seca



Fonte: Adaptado pelos autores de *Strabag Umwelthanlagen*.

O material passa pelo reator em regime de fluxo pistão em modo quase contínuo e – dependendo do teor de substância sólida (TS) – assegura um longo tempo de residência (pré)definido. Visando cumprir os requisitos de higienização do regulamento relativo a resíduos biológicos, o fermentador é operado em regime termofílico (temperatura entre 53 e 55 °C). Devido à operação da planta na faixa termofílica em combinação com as características do fluxo pistão, a higienização do sistema de reatores pode ser certificada com o selo da Associação Alemã para a Qualidade de Compostagem (*Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.*). O tempo de residência hidráulico médio perfaz cerca de 23 dias. O que significa que a carga volumétrica no fermentador é de

aproximadamente 9 kg oTS/m³/d. O fermentador possui nove agitadores posicionados transversalmente. Os agitadores dotados de pás compactas mergulham muito lentamente e em intervalos na suspensão fermentada. Desta maneira, evitam a formação de camadas flutuantes, rompem camadas em formação ou as puxam para baixo, melhorando a liberação de gás. O acionamento dos agitadores é controlado por computador em ciclo escalonado ou defasado. A rotação em sentido horário/anti-horário dos agitadores evita que o fluxo pistão seja influenciado. O substrato fermentado é descarregado na saída do fermentador por um sistema de vácuo através de tubos de sucção de diâmetro generoso (sistema sem contato), ou seja, praticamente sem desgaste e sem interferências. Nos tanques de retirada do material fermentado gera-se vácuo por meio de uma bomba de vácuo. O material fermentado é aspirado para o tanque ao abrir a porta corredeira do reator. No próximo passo, um dos dois recipientes é pressurizado com a ajuda do compressor e o material pressionado pela tubulação para os recipientes intermediários das prensas de rosca.

O material fermentado escoar dos recipientes intermediários, posicionados acima das prensas de rosca, para as prensas de rosca – sendo que cada recipiente está atribuído diretamente a uma das prensas de rosca. A fase sólida desidratada, com um teor de substância seca de aproximadamente 35 a 40% na massa, cai sobre um transportador localizado embaixo dos mecanismos de desidratação. Todo o material desidratado é transportado para um galpão próximo para a aeração subsequente, onde é lançado em uma caixa por uma carregadeira de rodas para as próximas etapas de manipulação. A fase líquida da primeira etapa de desidratação é conduzida para o tanque de água de prensagem. O tanque de água de prensagem está equipado com agitadores para evitar uma separação da mistura sólidos/água na área de sucção das bombas. A bomba que abastece os decantadores aspira a água de prensagem dos tanques e alimenta os decantadores para o tratamento da fase líquida. A qualidade da fase líquida da água de processo é otimizada sem dosagem de floculante para um valor de escoamento da substância sólida < 15%.

Para tal, faz-se apenas uma desidratação do fluxo parcial na forma de tratamento da fase líquida para obter as quantidades de água de processo suficientes para o ciclo de retorno ao fermentador e o ajuste do teor de substância sólida nos tanques de logística. Desta maneira apenas será decantada a parte da água de prensagem para a água de retorno necessária à fermentação e obtenção da qualidade de água de processo para uso na agricultura. O excedente da água de processo é armazenado em dois tanques, com capacidade para dois dias, esvaziados por meio de uma estação de bombeamento para um caminhão cisterna. Por causa do tempo de armazenamento e das propriedades do fluido, os tanques foram conectados à rede de biogás interna com os dispositivos de segurança necessários e uma isolamento térmica.

Como os resíduos sólidos da fermentação apresentam pouco material estrutural, tendo por conseguinte um volume de poros inferior ao necessário para uma ventilação “normal” como é usual na compostagem, a aeração é realizada apenas com uma carga volumétrica máxima de 1 t/m², o que corresponde a uma altura da camada de aproximadamente 1 m para a densidade esperada de quase 1 t/m³. O tempo de residência deverá ser, no mínimo, de sete dias para alcançar uma aerobização segura. O objetivo da aeração é assegurar um tratamento direcionado do ar de exaustão

e garantir um transporte dos restos sólidos da fermentação com um mínimo de emissão de odor. As seis caixas de decomposição são alimentadas pela carregadeira de rodas. A aeração é assegurada por grandes quantidades de ar e alimentação de calor. O ar de exaustão saturado de umidade é conduzido para o sistema de exaustão com a ajuda de uma ventoinha.

O biogás que escapa das grandes superfícies de substrato nos reatores de digestão seca e do depósito de produtos fermentados passa, por causa da autocompactação (gravidade), pelo acumulador de gás no topo do fermentador e pela depuração grosseira subsequente com separação de condensado integrada. A seguir, o biogás é transportado por tubos de aço inoxidável para um tanque de membranas duplas com capacidade aproximada de 2.150 m³ localizado ao ar livre. Este tamanho permite um armazenamento intermediário do biogás bruto por cerca de duas horas. Após uma dessulfurização, o biogás é refrigerado e/ou secado. Esta etapa é necessária para o uso posterior do biogás, seja no processamento para atingir a qualidade de gás natural, seja no uso interno para geração de calor de processo por meio de caldeira. Para a utilização do gás, o biogás é disponibilizado aos demais consumidores, tratamento do biogás e caldeira, a partir do tanque de gás equipado com ventoinha para elevar a pressão. O biogás bruto depois de purificado é tratado em uma instalação de tratamento de gás para atingir um teor de metano de no mínimo 96% de CH₄, sendo a seguir, transmitido para a operadora da rede a “*Netzbetriebsgesellschaft Berlin-Brandenburg (NBB)*” para aumento da pressão, adaptação do valor energético e odorização.

A planta de fermentação possui um abrangente sistema de tratamento de ar de exaustão equipado com biofiltros e uma lavagem ácida à montante. A versão fechada do filtro biológico é disposta em duas linhas. A seguir, o ar de exaustão é eliminado pela chaminé. O sistema foi projetado de forma a atender os requisitos legais e, além disso, ainda cumprir os critérios de irrelevância da diretiva de emissão de odor (sigla em alemão GIRL).

6 USO ENERGÉTICO DA PLANTA DE BIOGÁS WEST

O conflito que eclodiu entre a Rússia e a Ucrânia, bem como o inverno rigoroso em 2009/2010, mostrou mais uma vez em que medida a Alemanha depende das importações de energia. *Last but not least* [“Por último, mas não menos importante”], isto constitui mais um motivo para o governo alemão apoiar há anos as energias renováveis.

Em princípio, existem diversas possibilidades para aproveitar o biogás gerado.

Após um esforço de purificação relativamente pequeno, o biogás pode, por exemplo, ser queimado em uma planta de cogeração (calor e força motriz). A planta de cogeração, também designada de CHP, é via de regra composta por um motor a gás acoplado a um gerador e na rota de exaustão a trocadores de calor para produzir calor ou energia elétrica. Normalmente, a eletricidade gerada é injetada na rede pública.

Outra opção é tratar o biogás produzido e operar um posto de abastecimento de biogás junto à planta de biogás, conforme mostrado na terceira coluna da Figura 6. Neste caso, o biogás é usado como biocombustível.

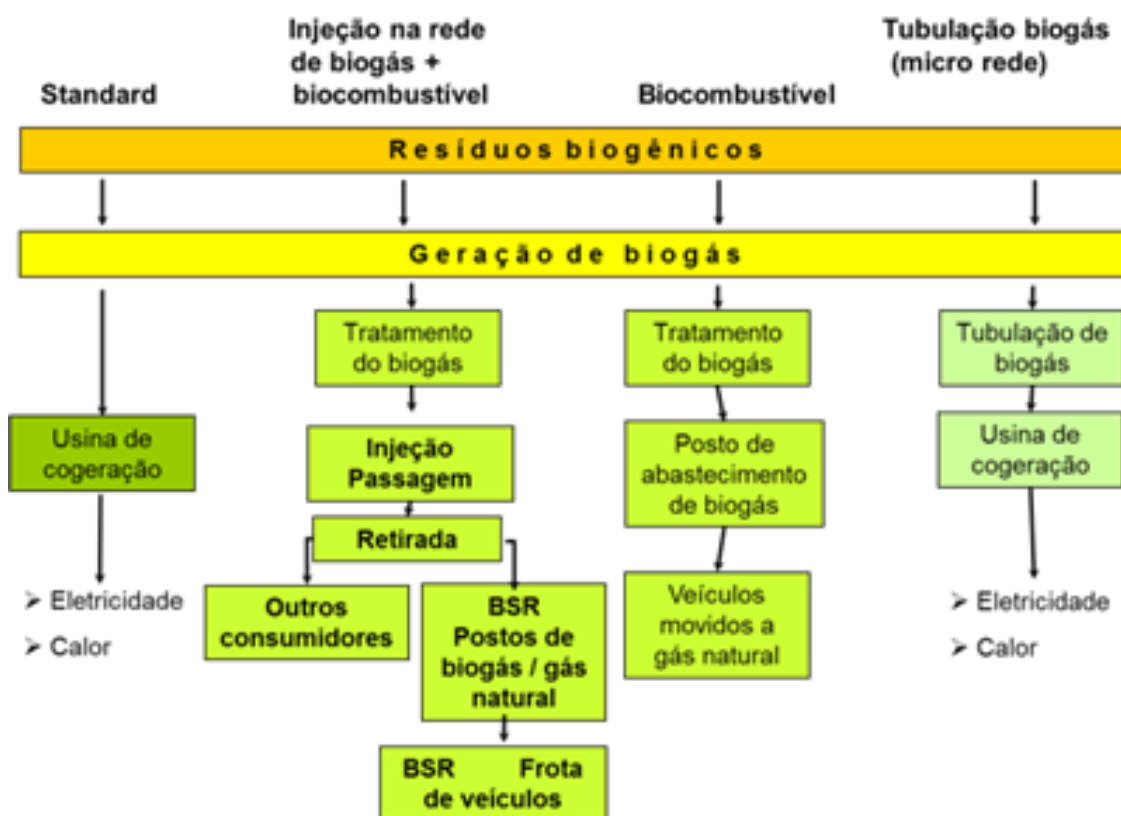
Alternativamente, também poderá ser instalada uma microrrede de gás, por exemplo, para transportar o biogás de uma fazenda ou produtor independente para a planta de cogeração na cidade vizinha, onde será aproveitado para gerar energia elétrica ou calor.

Municípios autossuficientes em matéria de energia usam este recurso para ficar livres dos custos de luz e rede das grandes concessionárias elétricas e empresas de gás.

A quarta opção é a injeção de biogás na rede pública de gás natural. Esta possibilidade é retratada na Figura 6 com pontilhado azul em volta e usada no âmbito do projeto BSR. As BSR injetam o biogás tratado na forma de biometano na rede pública de gás natural e o retiram em diversos pontos para usá-lo como biocombustível.

As condições gerais para a injeção de biogás foram redefinidas com a implementação do programa integrado de energia e clima do governo federal. A alteração do regulamento sobre o acesso à rede de gás (sigla em alemão, GasNZV, revisão em setembro de 2010), que entrou em vigor no dia 12 de abril de 2008, define o desenvolvimento de um potencial de cerca de 6 bilhões de m³ de biometano até 2020 e cerca de 10 bilhões de m³ para injeção na rede de gás até 2030 como meta da ampliação.

Figura 6 – Opções de utilização do gás

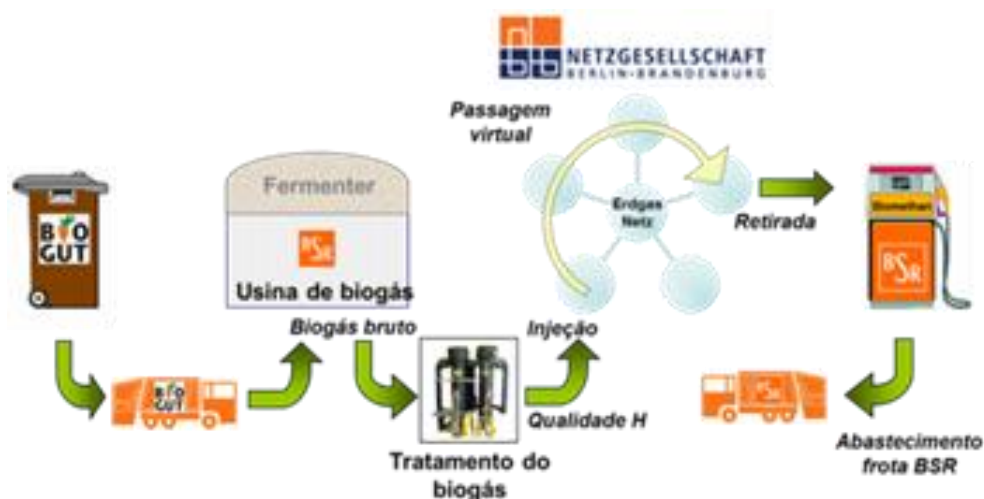


Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

O parceiro da BSR na injeção de biometano é a distribuidora e operadora da rede NBB (*Netzgesellschaft Berlin-Brandenburg*), uma *spin-off* (subsidiária) das operadoras de rede GASAG (*Berliner Gaswerke Aktiengesellschaft*) e EMB (*Erdgas Mark Brandenburg GmbH*) que iniciou suas atividades em 1º de janeiro de 2006. Sendo uma das maiores empresas de distribuição e operação da rede com atuação em toda a Alemanha. Faz parte das atribuições da NBB assegurar a operação técnica do abastecimento de gás na região Berlim-Brandenburgo. Entre as tarefas centrais está a manutenção e ampliação da infraestrutura técnica necessária bem como providenciar uma operação técnica segura.

O regulamento sobre o acesso à rede, regulamenta as responsabilidades e a repartição dos custos entre as empresas que injetam e operam a rede, e define pela primeira vez a primazia do acesso de biometano na rede de gás. Segundo o parágrafo 41c do regulamento GasNZV, os operadores da rede têm a obrigação de dar prioridade à conexão das plantas de biogás em todos os níveis de pressão.

Figura 7 – Utilização de biogás na BSR



Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

Os custos de conexão à rede são compartilhados entre operadoras da rede (75%) e injetores de biogás (25%). O limite financeiro da comparticipação dos injetores de biogás é igual a 250.000,00 Euros. De acordo com o parágrafo 41b GasNZV, a conexão à rede é composta por linha de conexão (até 10 km), medidor-regulador da pressão do gás, dispositivo de concentração e equipamento aferido para medição do biometano a ser injetado. A operadora da rede é proprietária da conexão à rede e assume os custos de manutenção e operação. Nos termos do parágrafo 41d GasNZV, as operadoras da rede devem dar preferência à celebração de contratos de injeção e retirada de energia com clientes de transporte (atacadistas, fornecedores e consumidores finais) de biometano.

Simultaneamente, a operadora da rede tem a obrigação de efetuar todos os gastos aceitáveis do ponto de vista econômico para otimizar a receptividade técnica da rede. Para os clientes de transporte de biogás, o regulamento GasNZV prevê disposições específicas visando

mecanismos de compensação do balanço em caso de lançamento do biogás. Para conseguir esta compensação do balanço, os clientes de transporte são atribuídos a um grupo contábil separado para biogás. Neste grupo contábil, as diferenças precisam ser compensadas, o que é feito por uma assim chamada conta de balanço. A operadora da rede deve oferecer uma margem de flexibilidade de 25% (em relação à quantidade de gás injetada) a grupos contábeis contendo apenas biogás. A margem de flexibilidade é calculada por um período contábil de doze meses. No cálculo, o desvio acumulado da quantidade de energia proveniente de biometano é saldado com os equivalentes de energia retirados da rede. Saldos finais positivos podem ser transferidos para o próximo exercício contábil pelos injetores de biogás. Para o uso da margem de flexibilidade de fato utilizada paga-se um montante fixo de 0,1 ct/kWh (ct = centavos de euros) à operadora da rede.

Além disso, a operadora da rede tem direito ao reembolso dos custos dos serviços de transporte na rede segundo o regulamento relativo à remuneração das redes de gás (sigla em alemão, GasNEV). Por outro lado, as redes à montante não devem ser usadas na injeção distribuída de biogás para não gerar taxas de uso da rede. As taxas evitadas são reembolsadas com um montante fixo de 0,7 ct/kWh (ct = centavos de euros) aos injetores de biogás pelo operador em cuja rede o biogás foi injetado.

Na soma, a posição do cliente de transporte de biogás fica melhor com as regras descritas acima do que a de um cliente de transporte de gás natural para que a injeção de biogás possa ocorrer em condições econômicas. Estas regras também levam em consideração que o biogás é produzido de forma contínua (24 horas por dia) a partir de um processo microbiano, mas que o uso da energia ocorre geralmente de forma descontinuada e sujeito a consideráveis oscilações sazonais. Por causa da redução dos custos da injeção de biogás, considerando custo de conexão, remuneração para taxas de uso evitadas, qualidade do gás e compensação ampla do balanço, há um aumento dos custos para as operadoras da rede. Estes custos adicionais são, no entanto, compensados por serem fixados como custos de rede elegíveis, podendo ser repassados ao consumidor final do gás.

Nas fichas técnicas da Associação Alemã para Gás e Água (*Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. – DVGW*) foram definidas as principais exigências relativas à qualidade dos gases na rede de abastecimento público. O regulamento GasNZV remete para as fichas técnicas G 260 (Características do gás) e G 262 (Uso de gases de fontes regenerativas no abastecimento público de gás). Enquanto os injetores de gás têm o dever de assegurar que o gás tenha as características citadas nas fichas técnicas, as operadoras da rede têm a responsabilidade de cuidar da odorização, dos valores energéticos e da taxa de compressão.

A energia também é utilizada como substituto do combustível fóssil na frota de veículos. Assim, a BSR usará os equivalentes de energia conseguidos com o biometano abastecendo os tanques dos seus veículos, ampliando para tal a sua frota. Para isso, serão comprados mais 100 caminhões de coleta de resíduos movidos a gás natural no âmbito do investimento para fins de substituição dos veículos antigos movidos a diesel. Desta maneira, o número total de caminhões CNG chegará a aproximadamente 150 caminhões, além disso, serão instaladas mais duas bombas de gás de alta performance nas empresas da BSR para facilitar o abastecimento.

A quantidade de biogás disponibilizada anualmente pela planta de biogás da BSR corresponde a cerca de 2.000 t/h de gás natural ou 2,5 milhões de litros de equivalente de diesel por ano, segundo uma estimativa conservadora considerando a energia operacional. A BSR avaliou as diferentes opções de utilização do biogás gerado a partir de amplas análises ambientais e econômicas, nas quais foram incorporadas condições naturais e específicas do local. Como resultados das avaliações temos a preferência ao uso na forma de combustível nos veículos de coleta.

Principais aspectos que remontaram à decisão tomada:

- O nível de ruído significativamente inferior dos motores a gás junto com uma melhoria das emissões (ver norma Euro VI) o que é altamente benéfico para o meio ambiente no centro da cidade de Berlim.
- O aumento contínuo dos preços do diesel e gás natural cuja substituição por biogás resulta em uma diminuição notável dos custos indiretos.

Se o biogás for usado como combustível, o consumo de diesel da frota poderá ser reduzido em torno de $\frac{2}{3}$ e as emissões de CO₂ da frota em mais de 6.000 t CO₂/ano. A quantidade de biocombustível gerada é tão elevada que não cobre apenas o consumo de combustível dos caminhões de coleta de resíduos orgânicos, mas até poderão, futuramente, abastecer mais caminhões de coleta dos resíduos domésticos com biocombustível. Além disso, os veículos movidos a gás são bem mais silenciosos, dado que a redução de aproximadamente 2 dB percebidos representa cerca da metade do nível de ruído. As emissões de particulado fino também são extremamente baixas, de modo que haverá melhorias significativas em comparação aos veículos existentes.

No caso da conversão em eletricidade na própria planta, como é praticada nas outras instalações, o biogás gerado é consumido na planta de cogeração integrada. Porém, em muitas destas plantas o rendimento é baixo e apenas uma parte da energia armazenada no biogás acaba sendo aproveitada. Esta ineficiência nas plantas de cogeração de eletricidade e calor acontece devido à falta de dissipadores de calor, por isso a energia térmica gerada frequentemente não pode ser usada, sendo liberada para o ambiente depois de passar pela refrigeração. Se uma planta não tiver uma estratégia para aproveitar a energia térmica, pode-se elevar o rendimento para aproximadamente 80% com um tratamento do biogás bruto para injeção na rede de gás.

É exatamente esta a proposta do tratamento do biogás bruto para torná-lo um produto comparável ao gás natural visando sua injeção na rede de gás. Os equivalentes de energia do biometano podem substituir toda a gama de aplicações do gás natural fóssil em outros pontos. As vantagens de usar a rede de gás são óbvias: por um lado, a produção de biometano pode ser desatrelada do momento de utilização (aspecto temporal) e a função de armazenamento da rede aproveitada, por outro, a rede representa uma função de crédito devido às regras da margem de flexibilidade para o grupo contábil biogás.

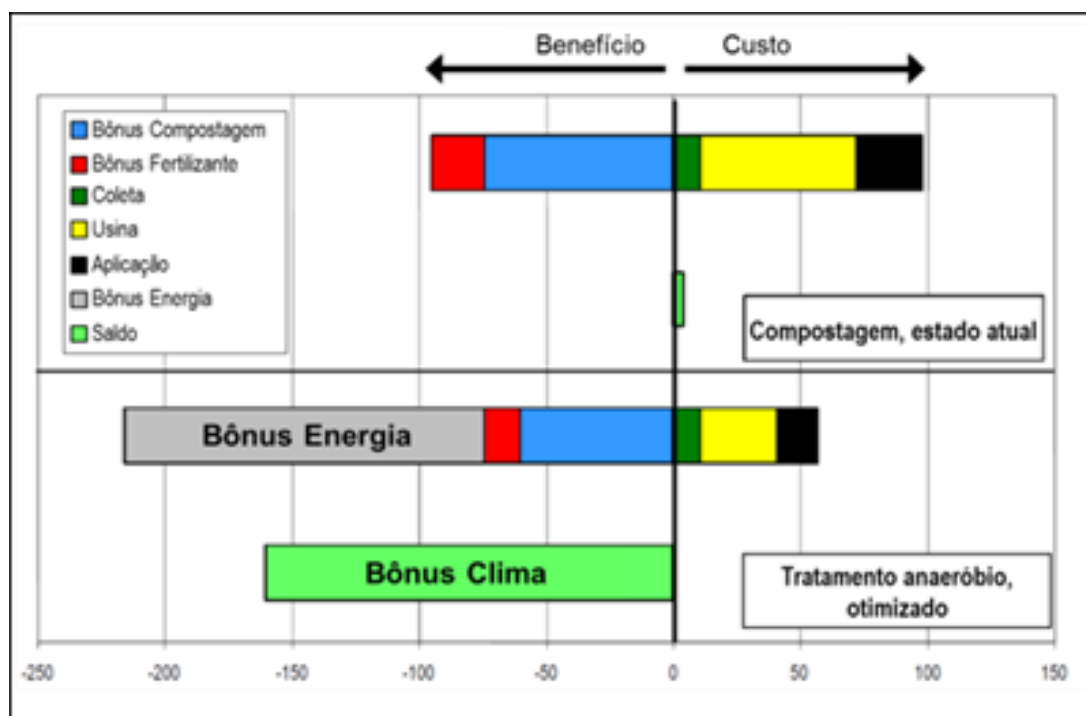
7 PROTEÇÃO DO CLIMA

A BSR foi a primeira empresa a celebrar um acordo de cooperação com a cidade-estado Berlim para a redução da emissão de gases de efeito estufa. No âmbito deste acordo, a BSR comprometeu-se a continuar reduzindo as emissões de gases nocivos ao clima, isto é, obter e usar energias renováveis para alcançar esta meta. Os principais instrumentos para atingir a meta são as plantas de tratamento de resíduos e a cobertura de aterros. Por isso, a BSR atualizou o seu plano de utilização da fração orgânica dos resíduos domésticos e planejou a construção de mais duas plantas de biogás. Paralelamente, ainda está sendo implementado o potencial de proteção do clima na frota de veículos e na carteira de imóveis.

Uma publicação atual do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) feita em cooperação com a Agência Federal de Meio Ambiente (UBA) aponta para as vantagens e os efeitos positivos da fermentação para o clima: “O aproveitamento energético de resíduos orgânicos em combinação com o uso material dos nutrientes vegetais contidos nos resíduos orgânicos pode ser classificado como ‘aproveitamento valioso’” (BMU/UBA, 2012). Nesta publicação também foi incluída uma figura pioneira que aponta uma tendência ao fazer uma comparação entre as vantagens e desvantagens da compostagem e da fermentação com relação ao equivalente de CO₂.

Na Figura 8, a vantagem e o grande efeito positivo da fermentação em relação à compostagem ficam bem visíveis.

Figura 8 – Balanço climático comparativo: compostagem × fermentação



Fonte: Ifeu e Partner, 2008.

Mesmo assim não devem ser negligenciados os outros efeitos sobre o meio ambiente. Algumas frações presentes nos resíduos prestam uma contribuição importante para outros impactos ambientais, tais como, os resíduos orgânicos ou resíduos verdes de parques, praças e jardins, cuja coleta seletiva para reaproveitamento ajuda a poupar, sobretudo, o recurso mineral fósforo. Na discussão atual sobre a mudança climática muitas vezes são apenas destacados os potenciais energéticos, enquanto os valores específicos da produção obtidos com a aplicação de resíduos orgânicos tratados no solo, geralmente não são debatidos ou apenas mencionados rapidamente. Isto se deve à dificuldade de retratar objetivamente fatos e circunstâncias diferentes, como a substituição de fontes de energia fósseis por um lado e os efeitos, por exemplo, da compostagem sobre a fertilidade do solo por outro em um diagrama comum de avaliação do balanço ambiental. Porém, foi exatamente esta a tarefa proposta à Agência de Incentivo à Proteção Ambiental (EPEA) pela Associação dos produtores de húmus e terra (*Verband der Humus- und Erdenwirtschaft – VHE*).

O estudo igualmente comprova as vantagens ambientais da compostagem e da fermentação de resíduos orgânicos, e fundamenta a importância da coleta seletiva e reciclagem dos materiais, sobretudo produtos gerados a partir do efeito do adubo e do húmus. Assim, por exemplo, a recirculação dos resíduos da fermentação no solo resulta em um crédito de carbono por causa do sequestro de carbono de aproximadamente 6.000 t CO₂ Eq./a (bruto).

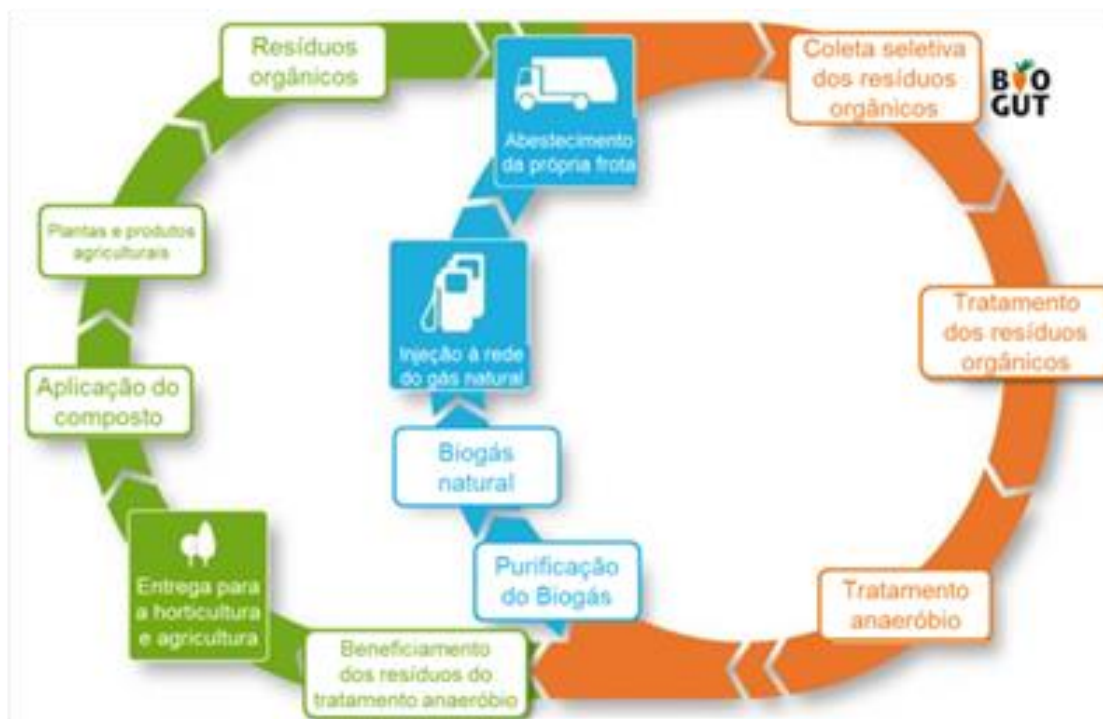
8 CONCLUSÕES

Hoje em dia, os prestadores de serviços de coleta seletiva e reciclagem municipais têm de fazer jus à exigência socioambiental de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a necessidade da gestão sustentável dos recursos. Para tal, é essencial que haja transparência, continuidade e confiabilidade no que toca às condições macro políticas, econômicas, ambientais e técnicas necessárias para a ampliação futura da injeção de biogás.

Neste contexto, o uso de resíduos na geração de energia torna-se cada vez mais importante para a estratégia da BRS. Com o projeto de plantas atualizado da BSR para resíduos orgânicos, em especial, o material biológico da coleta seletiva (BIOGUT), será possível minimizar os aumentos de tarifas e, ao mesmo tempo, incrementar a produção de energia verde da BSR através do prolongamento da cadeia de valor agregado – e isto tudo a custos aceitáveis para a fermentação e redução dos custos de transporte e compra de diesel.

Além disso, o aproveitamento das possibilidades de reduzir as emissões de dióxido de carbono e metano conseguido como a reutilização dos resíduos da fermentação dará mais uma contribuição à economia de ciclo fechado (economia circular) e proteção do clima. Com esta estratégia para as suas plantas, tornou-se possível uma combinação ambiental do ciclo logístico com o ciclo de materiais orgânicos.

Figura 9 – Ciclos fechados no reaproveitamento dos resíduos orgânicos



Fonte: Adaptado pelos autores de BSR (*Berliner Stadtreinigung*).

REFERÊNCIAS

- ABGEORDNETENHAUSES VON BERLIN. 22. **Sitzung des Abgeordnetenhauses von Berlin**, vom 6.12.2007, Drucksachen 16/1033 und 16/1038 [22ª Reunião da Câmara de Deputados de Berlim de 06.12.2007, impressos 16/1033 e 16/1038]. Disponível em: <<http://www.parlament-berlin.de/ados/16/IIIPlen/vorgang/d16-1425.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- ABGEORDNETENHAUSES VON BERLIN. **Vorlage – zur Beschlussfassung – Abfallwirtschaftskonzept 2020 für das Land Berlin**. Drucksache 16/3403. 20.08.2010. [Estratégia de gestão de resíduos, impresso 16/3403, Câmara de deputados de Berlim, 20.08.2010]. Disponível em: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/konzept_berlin/download/AWK2010_Endfassung.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- BMU/UBA – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit / Umweltbundesamt. **Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen – Anregungen für kommunale Entscheidungsträger**. 2012. <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3888.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2014.
- BSR – Berliner Stadtreinigung. Ringbahnstraße 96, 12103 Berlin. Disponível em: <<http://www.bsr.de/>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

EPEA/VHE – Internationale Umweltforschung GmbH / Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V. **Ökologisches Leistungsprofil von Verfahren zur Behandlung von biogenen Reststoffen – Kompass für die Entscheidungsfindung vor dem Hintergrund der geplanten Überarbeitung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes**. April 2008.

Disponível em: <http://www.bde-berlin.org/wp-content/uploads/2008/04/epea_kompass.pdf>. Acesso em: 31 maio 2014.

IFEU / ÖKO-INSTITUT E.V. **Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft – am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz**. [Potenciais de proteção climática na gestão de resíduos tomando como exemplo o lixo urbano e a madeira usada], janeiro de 2010, Bundesverband der deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. – BDE [elaborado a pedido do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) / Associação Federal de Gerenciamento de Aterros Sanitários, Água e Recursos Naturais]. 2010. Disponível em: <<http://www.bde-berlin.org/wp-content/pdf/2010/klimaschutzpotenziale.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

KERN, M.; RAUSSEN, T.; FUNDA, K.; LOOTSMA, A.; HOFMANN, H. **Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz**. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. Auftrag des Umweltbundesamtes, 2010.

STRABAG Umwelthanlagen GmbH, Lingnerallee 3, 01069 Dresden. Disponível em: <<http://www.strabag-umwelttechnik.com/>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

VHE – Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V., **Bio- und Grünguterfassung in Deutschland**, Aachen, 2012. Disponível em: <http://www.vhe.de/fileadmin/vhe/pdfs/Publicationen/Veroeffentlichungen/Handbuch_2012_12_12_komplett_48seitig_kleine_datei.pdf>. Acesso em: 31 maio 2014.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

WINKELMANN, Wilhelm; GOSTEN, Alexander. Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na Planta de Fermentação da Cidade de Berlim. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maior – 2017**.

Aproveitamento Energético do Biogás

Biogas for Energy Production

Doutora Engenheira Agrônoma Sabine Robra

RESUMO

O biogás é uma fonte de energia renovável com alta versatilidade e flexibilidade. Para o seu aproveitamento energético, o biogás precisa ser purificado de acordo com as exigências das respectivas aplicações. O uso como combustível na cogeração de eletricidade e calor exige, no mínimo, a remoção do H₂S, enquanto, para atingir a qualidade equivalente de gás natural, o CO₂ e outros componentes devem ser removidos do biogás, requerendo esforços tecnológicos mais sofisticados. O aproveitamento energético do biogás compreende a geração de eletricidade, de calor, de refrigeração e de combustível veicular, em escala local e regional, podendo ainda substituir o gás natural fóssil quando injetado na rede de gasodutos.

Palavras-chave: Biometano. Purificação. Energia renovável. Cogeração. Matriz energética.

ABSTRACT

Biogas is a highly versatile and flexible source of renewable energy. Before it can be used for energy production, the gas needs to be purified to meet the requirements of the intended applications. When used for cogeneration of electricity and heat, the biogas needs at least to be free of H₂S, while for its upgrading to the quality of natural gas, CO₂ and other compounds have to be removed, implying more sophisticated technological efforts. Biogas can be used locally and regionally for the production of electricity, heat, refrigeration and as automotive fuel, and can also be injected into the national gas pipelines as a substitute for fossil natural gas.

Keywords: Biomethane. Purification. Renewable energy. Cogeneration. Energy matrix.

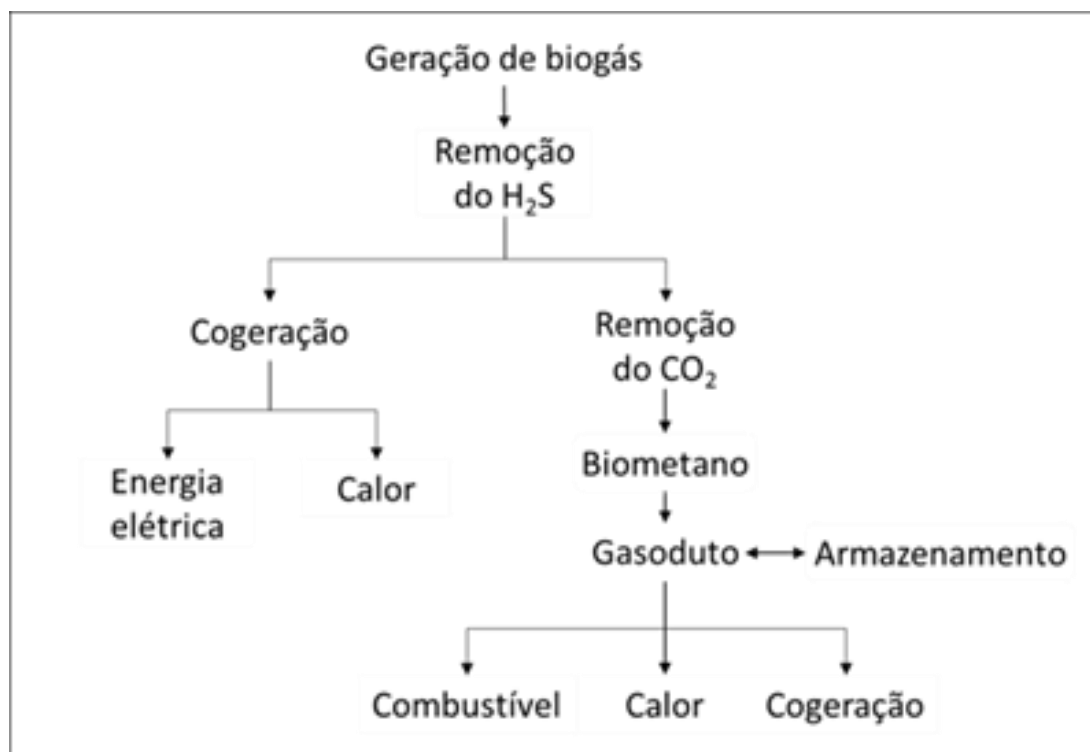
1 UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

A produção de energia renovável a partir do biogás hoje é uma realidade em muitos países. Na Alemanha, tornou-se um dos pilares da virada energética, e constitui-se em uma fonte de renda de muitos produtores rurais.

Devido ao seu teor de metano, o biogás tem valor como combustível para uma grande variedade de aplicações, desde a combustão direta para a geração de calor até, na sua forma purificada, o biometano, como combustível em motores de carros, caminhões e outros. A sua flexibilidade na geração de energia permite a inserção dessa fonte renovável em sistemas integrados locais e regionais de abastecimento com energia elétrica e térmica (CHAUHAN; SAINI, 2014; FNR, 2014; HAHN *et al.*, 2014).

Neste artigo serão apresentadas as tecnologias de purificação e do aproveitamento energético do biogás mais utilizadas na prática, que podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 – Opções para a utilização energética do biogás



Fonte: Robra e Raussen (2014).

2 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Os componentes principais do biogás são o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2) e o vapor d'água, além de traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e de outros componentes. A composição média do biogás é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás

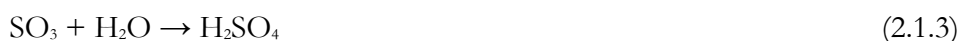
Componente		Concentração volumétrica
Metano	(CH_4)	45% – 75%
Dióxido de carbono	(CO_2)	25% – 50%
Água (vapor)	(H_2O)	2% – 7%
Sulfeto de hidrogênio	(H_2S)	0,05 – 1%
Traços de outros componentes	($\text{N}_2, \text{H}_2, \text{O}_2, \text{NH}_3$)	< 5%

Fonte: K'TBL (2007).

Os processos de purificação do biogás dependem da sua utilização. De modo geral, para o uso do biogás como combustível na cogeração, a redução, ou melhor, eliminação do H₂S e do teor de água pode ser suficiente, enquanto a utilização como biometano, para substituição do gás natural, exige um alto grau de pureza, tornando a remoção quase completa do CO₂ e das impurezas em traços necessária.

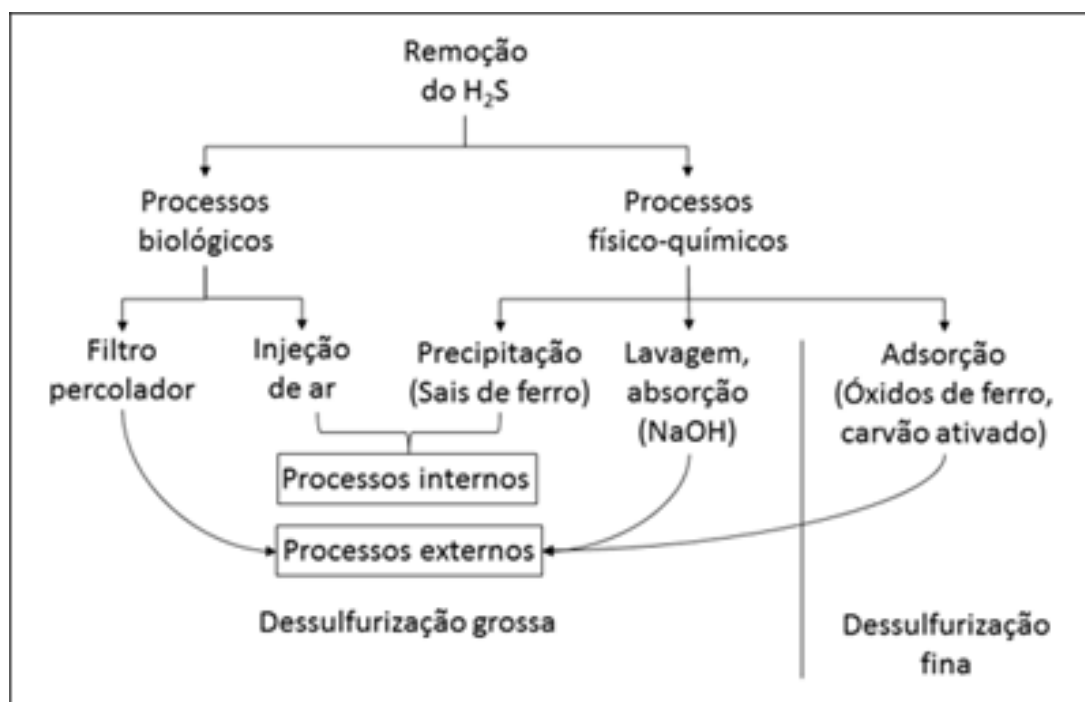
2.1 Remoção do H₂S

O H₂S, também conhecido por gás sulfídrico, é muito reativo e altamente tóxico. A sua presença no biogás resulta da decomposição anaeróbia de proteínas contidas nos substratos utilizados como matérias-primas, e se revela pelo odor desagradável de ovos estragados. Durante a combustão, o H₂S reage com oxigênio (O₂) e água (H₂O) originando o ácido sulfúrico (H₂SO₄), pelas seguintes reações:



O H₂SO₄, um ácido forte, causa corrosão em todas as partes de motores de combustão interna que entram em contato com o ácido, além de reduzir consideravelmente a vida útil do óleo lubrificante e dos catalisadores de gases de escape. Na combustão do H₂S formam-se compostos de enxofre (SO_x), tóxicos para o ambiente.

Figura 2 – Processos biológicos e físico-químicos da dessulfurização, utilizados na prática



Fonte: Adaptado de Schneider (2007) e Mielke *et al.* (2013).

Entre os vários processos biológicos e físico-químicos disponíveis para a dessulfurização do biogás, podem se distinguir os processos internos, dentro do reator e os processos externos, bem como, aqueles que inibem a formação do H_2S durante a biodigestão, e os processos de remoção do H_2S no biogás gerado. A maioria dos processos resulta em uma dessulfurização grossa, suficiente para as aplicações de cogeração. Porém, os processos de purificação para o biometano exigem valores de H_2S no biogás muito mais baixos. Nestes casos, a dessulfurização fina é necessária. Entretanto, os processos biológicos, que envolvem a adição de ar ao biogás, podem ser inadequados para a produção de biometano. A Figura 2 mostra os processos da dessulfurização mais encontrados na prática.

2.1.1 Dessulfurização interna por precipitação química

Um método comparativamente simples consiste na inibição da formação de H_2S por meio da adição de sais de ferro em forma líquida ou sólida, como o cloreto férrico, cloreto ferroso e sulfato ferroso, ao substrato utilizado na biodigestão.

Para evitar a precipitação e inativação precoce do ferro, ele deve ser adicionado diretamente ao reator (URBAN *et al.*, 2008).

Os íons ferro II e III dos sais de ferro reagem com os íons sulfeto, contidos no substrato dentro do reator, e numa reação rápida, dão origem ao sulfeto de ferro (FeS) de baixa solubilidade, que precipita ao fundo do reator. A redução de compostos de S tóxicos no substrato tem efeitos positivos aos micro-organismos, podendo resultar em um aumento da produção de metano (TU WIEN, 2012).

O sulfeto de ferro (FeS) é eliminado do reator junto com o efluente, como biofertilizante para as lavouras. Após aplicação no solo, o FeS é oxidado em sulfato solúvel, com boa disponibilidade para as plantas.

Este método pode ser aplicado como primeiro passo de dessulfurização em reatores com elevada concentração de H_2S no biogás de ETEs. O teor de H_2S no biogás define as quantidades do produto a serem adicionadas, porém, recomenda-se a adição dos compostos de ferro em quantidades hiperestequiométricas, de 1,7 a 5 vezes (SCHNEIDER, 2007). Para a redução de teores de 2.000 ppm para 20 ppmv, a adição de 120 g a 160 g m^{-3} de biogás, ou a adição de 33 g de $Fe m^{-3}$ de substrato é relatado (URBAN *et al.*, 2008).

Embora exigir certos custos de processo, pela necessidade da adição contínua dos compostos de ferro, este método de dessulfurização é simples e eficiente, podendo resultar na redução para teores de < 100 ppmv de H_2S no biogás.

2.1.2 Dessulfurização por oxidação biológica

A oxidação do H_2S contido no biogás para enxofre elementar (S), é promovida por bactérias das espécies *thiomonas* sp., *thiobacillus* sp., entre outras, que ocorrem naturalmente nos substratos utilizados na biodigestão anaeróbia.

Uma das formas mais simples, baratas e amplamente utilizadas da redução do teor de H_2S no biogás consiste na injeção de ar ao volume do biogás dentro do reator, por meio de uma pequena bomba. O S produzido pelos micro-organismos afixados nas superfícies providenciadas para este fim, volta para o substrato, onde uma parte é eliminada junto com o efluente (Figura 3).

Figura 3 – Formação de estalactites de enxofre elementar, dentro de um biodigestor



Fonte: Corell (2008).

Dependendo da composição do substrato e conseqüentemente, dos teores de H_2S encontrados no biogás, e devido às dificuldades de controle deste processo, quantidades hiperestequiométricas de ar, de 3% – 10% (v/v) são necessárias.

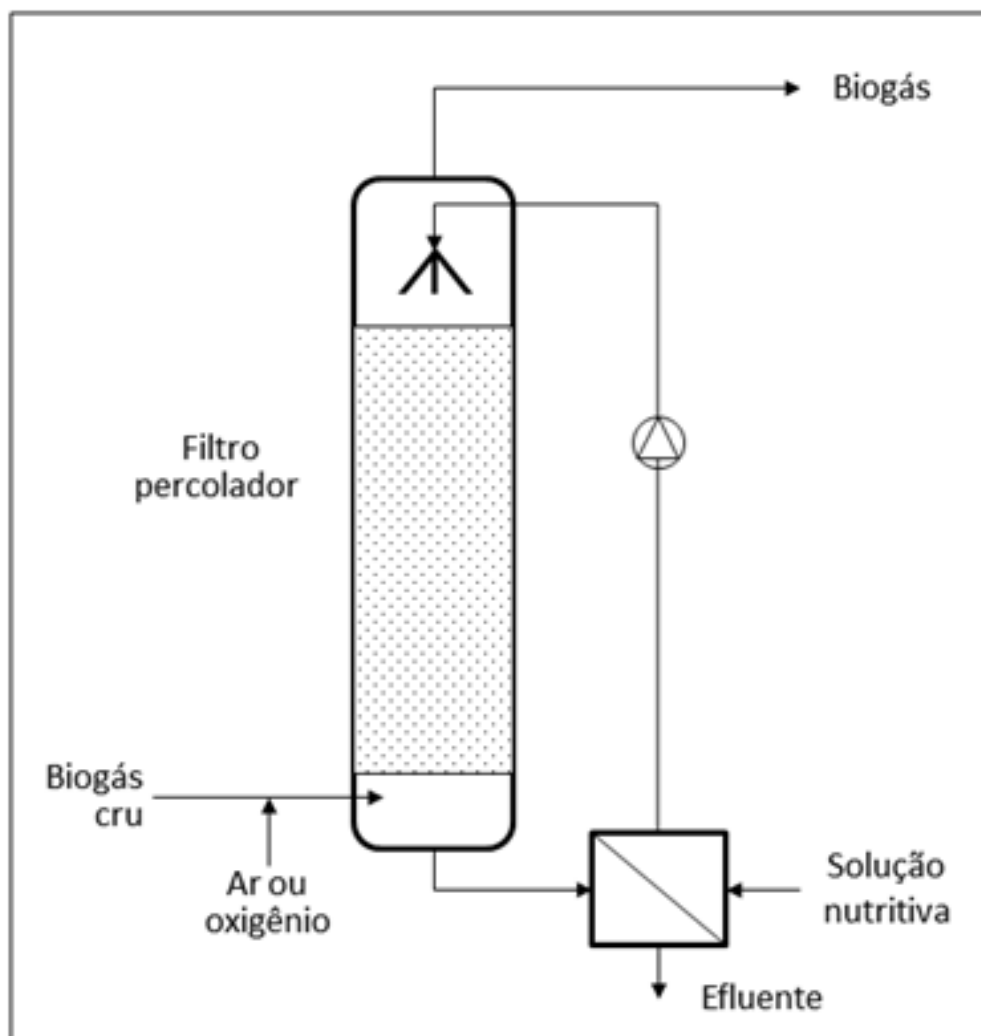
Em condições ideais, taxas de remoção de H_2S de até 95% podem ser alcançadas, porém, o processo não é flexível em relação a variações no teor de H_2S no biogás, e os teores máximos de H_2S no biogás exigidos pelos processos posteriores de utilização do biogás, não são alcançados.

Entre as desvantagens da injeção de ar aos digestores estão a formação de H_2SO_4 dentro dos reatores, causando corrosão nas partes internas expostas, é a possível acumulação lenta do S no substrato, o que afeta negativamente os micro-organismos metanogênicos.

Como alternativa, a remoção biológica por filtros percoladores, instalados fora do reator, permite estabelecer condições de processo mais favoráveis para os micro-organismos fixados em forma de biofilme ao meio de suporte nos filtros. O controle dos parâmetros de processo, bem como a remoção do enxofre e do sulfato produzidos, torna-se mais fácil.

O ar é adicionado à linha de biogás por meio de um compressor. Em seguida o biogás passa pelo filtro em contracorrente a uma solução nutritiva, que remove o enxofre elementar e os sulfatos formados pelas bactérias. Parte da solução enriquecida com enxofre é reciclada, e parte é removida do sistema e substituída por uma quantidade de solução fresca. A solução descartada pode ser utilizada junto com o biofertilizante. O fluxograma simplificado do filtro percolador para a eliminação biológica do H_2S encontra-se na Figura 4.

Figura 4 – Filtro percolador para a dessulfurização biológica do biogás



Fonte: Adaptado de Schneider (2007) e Tu Wien (2012).

Este processo alcança a melhor viabilidade econômica em plantas de biodigestão de maior porte, a partir de 200 kW_{el} (ADLER *et al.*, 2014).

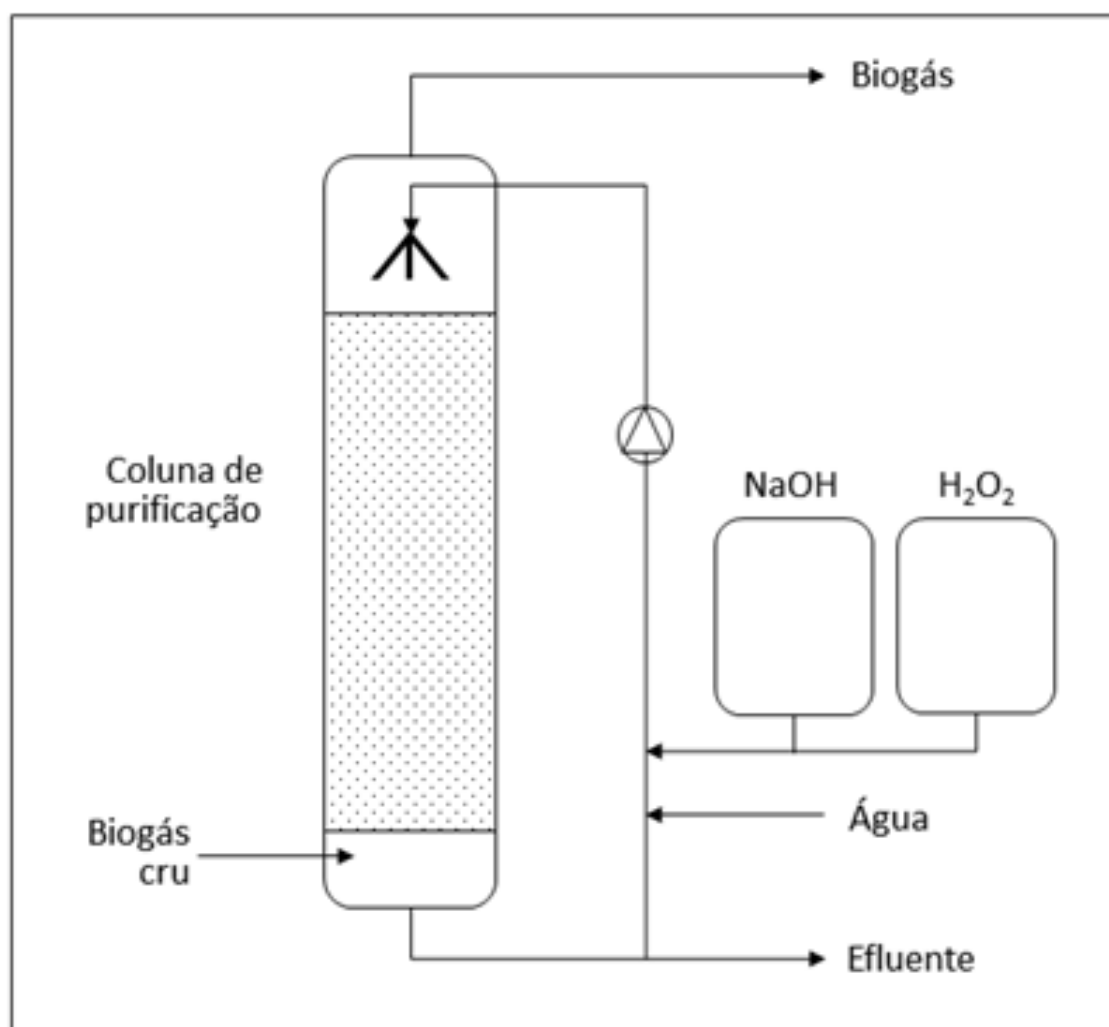
A adição de quantidades de ar ao reator resulta na diluição do biogás, e conseqüentemente, na redução da eficiência energética do processo como um todo. Além disso, estes processos não são recomendados para a produção de biometano devido aos altos custos relacionados à remoção do nitrogênio (N_2) e do oxigênio (O_2) do biogás.

2.1.3 Dessulfurização por lavagem química-oxidativa

O processo de remoção do gás ácido H_2S por lavagem em soluções alcalinas é um dos métodos mais antigos para a dessulfurização e pode ser utilizado para o tratamento de médios a grandes volumes de biogás. A tecnologia possibilita elevado grau de automatização e de controle, viabilizando a dessulfurização de biogás com teores elevados a altos ou flutuantes, de H_2S . Como não está usando ar, o processo é adequado como primeira etapa da produção de biometano.

O equipamento utilizado geralmente consiste de uma coluna de purificação do tipo filtro percolador, recheada de um meio de suporte inerte. O biogás adicionado no fundo passa em contracorrente com a solução alcalina, geralmente soda cáustica ($NaOH$) diluída, adicionada na parte superior da coluna. O H_2S do biogás é absorvido pela solução e removido junto com ela (Figura 5).

Figura 5 – Fluxograma simplificado do processo de dessulfurização por lavagem química-oxidativa



Fonte: Adaptado de Tu Wien (2012).

Além do H_2S , o biogás contém entre 25% – 50% de CO_2 , que reage com o NaOH formando carbonato que degrada a solução. Para que isso seja evitado, o pH deve ser ajustado para 8-9, conforme as quantidades de H_2S contidas no biogás. Desse modo, a solução pode ser utilizada de forma mais eficiente, com altas taxas de remoção de H_2S , e sem remoção de quantidades significativas de CO_2 .

A seletividade para H_2S do processo e, portanto, sua eficiência, pode ser elevada por meio da adição de um oxidante, por exemplo, água oxigenada (H_2O_2), que transforma o H_2SO_4 absorvido em S e em sulfatos (SO_4^{2-}). Deste modo, o biogás purificado pode atingir teores de H_2S em torno de 50 ppmv – 100 ppmv (HARASEK *et al.*, 2012).

A capacidade da solução de NaOH de absorver o H_2S , diminui com o passar do tempo e deve ser substituída regularmente. Entretanto, a solução pode ser regenerada por meio de um biorreator, onde bactérias oxidadoras de enxofre, por exemplo, *thiobacillus* sp., eliminam os compostos de S da solução, possibilitando a economia em NaOH de 75% (SCHNEIDER, 2007).

2.1.4 Dessulfurização por adsorção e oxidação em massas de ferro

Este processo é muito utilizado em estações de tratamento de esgotos (ETEs), onde alcançou um elevado grau de desenvolvimento. O processo consiste na eliminação do H_2S contido no biogás por adsorção na superfície de óxidos de ferro [$\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou Fe_2O_3], e pode ser utilizado para biogás com concentração de até 6000 ppmv de H_2S , e concentrações de H_2S no gás tratado de < 20 ppmv foram relatadas (ADLER *et al.*, 2014).

O equipamento utilizado para a dessulfurização de quantidades de biogás menores consiste em uma torre recheada de óxido de ferro. Nestes casos, o ar necessário para a regeneração é adicionado junto com o biogás. Em plantas maiores com vazão > 250 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, duas torres são instaladas, carregadas e regeneradas alternadamente.

A reação ocorre em ciclos: O sistema é carregado com o biogás, e o H_2S reage com o óxido de ferro, formando sulfeto de ferro. Ao mesmo tempo ocorre uma regeneração parcial por meio da oxidação do sulfeto de ferro com oxigênio e água formando S elementar e, de novo, óxido de ferro. A reação de regeneração (oxidação) é fortemente exotérmica e precisa ser monitorada, para evitar a combustão espontânea.

O S elementar é depositado na superfície do óxido de ferro, reduzindo a área disponível para a eliminação do H_2S com cada ciclo. O sistema mostra boa eficiência mesmo com cargas de até 25% (m/m) de S elementar depositadas no óxido de ferro. O material carregado deve ser substituído por material fresco sempre que haja diminuição considerável da eficiência de remoção do H_2S . A substituição do material pode ser efetuada automaticamente. O material carregado é depositado em aterros ou devolvido ao fabricante.

2.1.5 Dessulfurização por adsorção e oxidação em carvão ativado

O equipamento utilizado na remoção de H₂S por adsorção em carvão ativado é parecido com aquele utilizando óxidos de ferro. Entretanto, este processo trabalha com a adição de pequenas quantidades de O₂, necessárias para a oxidação catalítica do H₂S em S elementar, depositado na superfície do carvão ativado.

O carvão ativado preparado especificamente, por impregnação ou dotação, permite reações mais rápidas por possuir propriedades catalíticas, e, no caso do carvão dotado, de maiores capacidades de carregamento de S, de até 80% (m/m). O processo atinge um alto grau de remoção de H₂S, de < 1 ppmv.

Embora se trate de um processo com baixos custos de investimento, os custos específicos variados desta tecnologia são comparativamente altos. Isso se deve ao fato de que a regeneração do carvão ativado, uma vez carregado, não é economicamente viável e o carvão precisa ser substituído. Portanto, este processo é mais indicado para a dessulfurização fina de um biogás com a maior parte do H₂S já removido por processos de dessulfurização grossa, apresentando teores de H₂S < 500 ppmv a 150 ppmv (ADLER *et al.*, 2014; HARASEK *et al.*, 2012).

2.2 Remoção da Umidade

O biogás sai do reator, carregado de partículas de sujeira e saturado com vapor d'água. O teor de água depende da pressão, temperatura e composição do biogás, sendo a concentração maior com temperaturas elevadas e menor pressão.

A remoção da umidade do biogás, ou a secagem, é importante para evitar danos por corrosão, pela natureza corrosiva de CO₂, H₂S e O₂ em presença de água, e também para não prejudicar os processos de purificação a jusante. O teor de água permissível para o biogás purificado em biometano, para a injeção aos gasodutos, é definido como temperatura de ponto de orvalho, nas respectivas especificações.

Os processos disponíveis para a secagem de biogás são os por condensação ou por adsorção em sílica-gel, alumina ativada, peneiras moleculares ou carvão ativado. A lavagem com glicóis como processo de adsorção, muito utilizado na indústria do gás natural (PANTOJA, 2009), requer comparativamente altos custos de investimento, porém, não apresenta vantagens sobre os outros processos de secagem.

2.2.1 Secagem por filtros

O filtro de biogás é um dispositivo comparativamente simples e consiste de um cilindro de aço inox recheado de brita de granulometria variada: mais fina, melhor a eficiência na retenção de água, porém, maior a perda de pressão. Os filtros podem ser revestidos de cerâmica ou de plástico (filtro fino), também disponíveis em forma de cartuchos.

Este tipo de filtro é adequado para a remoção de partículas de sujeira, espuma e de gotas d'água e de lubrificante, transportadas pelo biogás, e geralmente é montado antes de equipamentos sensíveis, como compressores ou medidores, para sua proteção. A limpeza pode ser feita por meio da lavagem com água.

2.2.2 Secagem por condensação

A remoção da água do biogás pode ser feita por meio de refrigeração do biogás para temperaturas abaixo do ponto de orvalho. Quanto menor a temperatura, mais água pode ser eliminada do biogás.

A medida mais simples consiste na passagem do biogás por uma tubulação enterrada de > 50 m de comprimento, com > 1% de declive, suficiente em muitos casos. É indispensável a instalação de uma armadilha de água e sua manutenção, respeitando as normas de segurança.

A secagem por refrigeração do biogás para temperaturas de 5 °C pode resultar em pontos de orvalho de 0,5 °C a -4 °C. A demanda energética é, aproximadamente, de 3,5 kW_{el} para a vazão de 500 m³ h⁻¹ (WETTER, 2008).

O processo de secagem por condensação hoje corresponde ao estado da arte, e é um dos processos economicamente mais viáveis. A secagem por condensação é suficiente para o uso do biogás em motores de cogeração.

Na purificação do biogás para produção de biometano, a secagem por condensação é suficiente para os processos de adsorção por modulação de pressão (*Pressure Swing Adsorption* – PSA), considerando que a compressão do biogás antes da sua refrigeração resulta em pontos de orvalho ainda mais baixos. Mesmo assim, mais um passo de secagem antes da injeção do biometano aos gasodutos pode ser necessário (ADLER *et al.*, 2014).

2.2.3 Secagem por adsorção

O princípio da secagem por adsorção baseia-se no fato de que moléculas de uma substância gasosa, líquida ou sólida, fiquem presas fisicamente à superfície de um sólido, por forças de Van-der-Waals.

Na prática, a secagem por adsorção em sílica-gel (SiO₂) em colunas de adsorção por leito sólido é bastante difundida. Trata-se de uma substância inorgânica com ação higroscópica, disponível em forma de granulado. A sílica-gel é vantajosa pela eficiência e o menor custo de processo, em relação aos adsorventes alumina (hidrato de óxido de alumínio, “argila ativada”) e as peneiras moleculares (ADLER *et al.*, 2014; PANTOJA, 2009).

O processo é utilizado para a secagem de biogás com vazões entre 100 m³ h⁻¹ a 100.000 m³ h⁻¹, e com pressão entre 6 bar a 10 bar. O ponto de orvalho que pode ser atingido por este método é abaixo de - 60 °C.

O processo é operado em batelada. A sílica-gel vem sendo saturada ao longo do tempo, e precisa ser regenerada. Na operação descontínua, uma coluna é suficiente, carregada e regenerada alternadamente. A operação contínua exige pelo menos duas colunas, uma sendo carregada, outra regenerada. Na prática, dois processos diferentes de regeneração são utilizados.

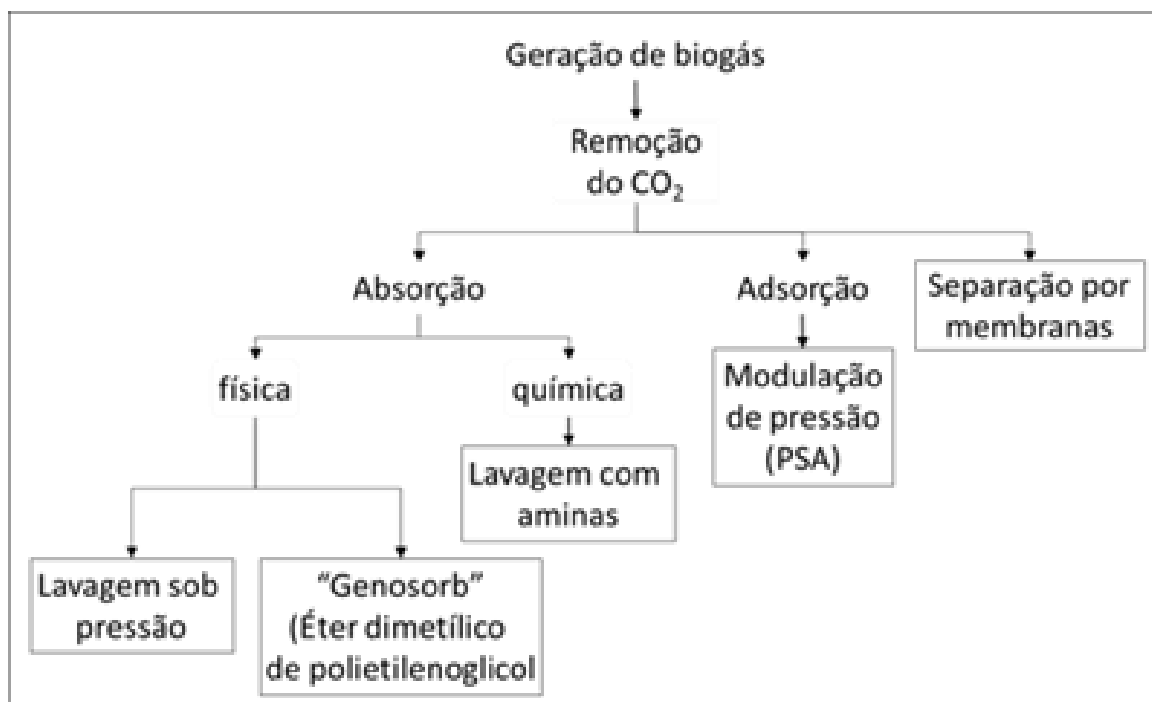
No processo quente, uma pequena parte do biogás já seco é desviado e depois de aquecido para temperaturas entre 120 °C a 150 °C, é alimentado pelo fundo da coluna saturada de água, em contra corrente, vaporizando e arrastando essa água. O biogás carregado de água, depois de resfriado e com a água removida por condensação, é reciclado para o processo. O ciclo completo de adsorção-desorção é entre quatro e oito horas. Este processo é economicamente viável para a secagem de grandes quantidades de biogás, devido à elevada demanda energética.

O processo frio (*beatless dryer*) trabalha com baixa pressão/evacuação de uma parte do biogás seco (10% a 25%), também em contra corrente. Neste processo, o ciclo completo é de 2 a 10 minutos. Apesar das vantagens: processo mais simples, pontos de orvalho mais baixos, demanda energética menor e vida útil maior do adsorvente, este processo é economicamente viável apenas para a secagem de menores quantidades de biogás.

2.3 Remoção do CO₂

As principais tecnologias utilizadas para a remoção do CO₂ do biogás são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Principais tecnologias utilizadas para a remoção do CO₂ do biogás



Fonte: Adaptado de Adler *et al.* (2014).

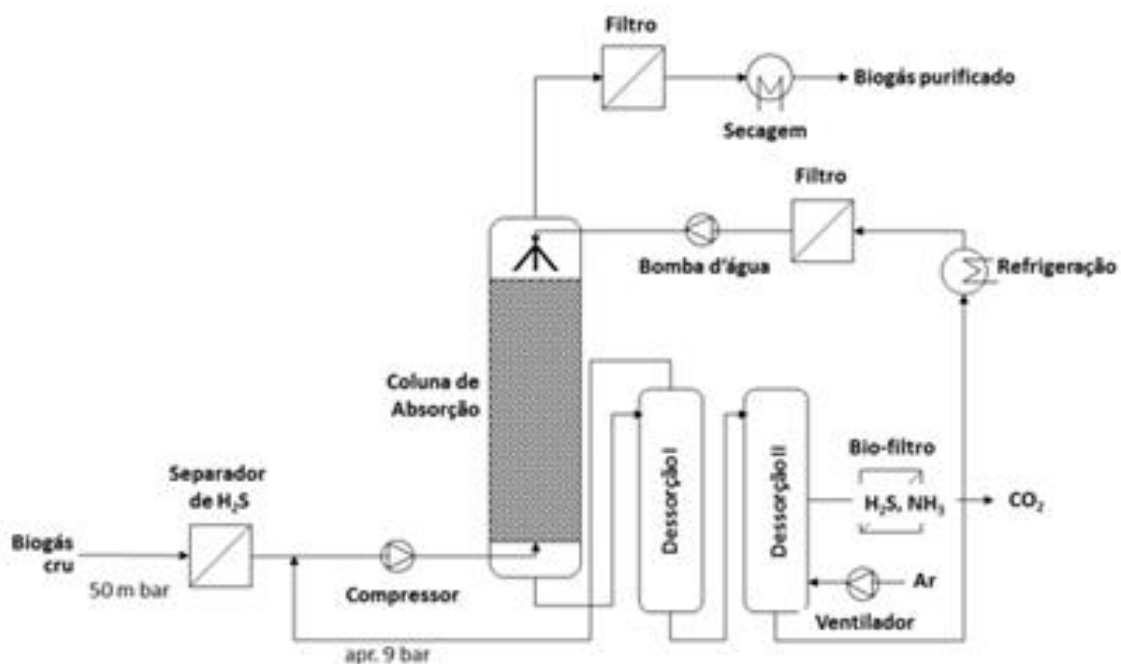
A purificação do biogás, para atingir qualidades e teores de metano que correspondam aos do gás natural (Índice de Wobbe, poder calorífico), exige, além da remoção do H_2S e da água, a remoção do CO_2 . Os processos utilizados para tal finalidade também são conhecidos como enriquecimento de metano. Nas áreas de gás de aterro e de ETEs, existem experiências com essas tecnologias há mais de 40 anos.

Além do biometano, todos os processos produzem, dependendo da composição original do biogás cru, uma proporção de CO_2 , contaminada com pequenas quantidades de CH_4 , cuja proporção é determinada pela eficiência de separação dos respectivos processos. Este fluxo de gás precisa ser tratado, para eliminar e neutralizar o CH_4 , um gás de efeito estufa de alto impacto.

2.3.1 Lavagem (absorção) com água sob pressão

A lavagem com água sob pressão constitui um dos processos mais utilizados para a separação do CO_2 , na Europa. A utilização da água como solvente é vantajosa devido a sua disponibilidade, manuseio simples e inofensividade. Porém, a pressão necessária para o processo resulta em uma elevada demanda de energia elétrica.

Figura 7 – Fluxograma simplificado do processo por lavagem com água sob pressão



Fonte: Adaptado de BMVIT (2014).

O processo utiliza a absorção física dos gases CO_2 , H_2S e NH_3 pela água, que, com temperaturas entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, é conduzida em contracorrente por colunas de absorção do tipo filtro percolador, recheadas de material sólido de granulometria variada, objetivando a maior superfície possível com a menor perda de pressão. O biogás, pressurizado para 5 bar a 10 bar, é introduzido às colunas. No processo, também pequenas quantidades de CH_4 são arrastadas pela

água, que depois é conduzida para a regeneração por colunas *flash*. Aqui, com a redução parcial da pressão, boa parte do CH₄ arrastado é liberado e volta para o fluxo de gás a ser tratado, evitando perdas maiores de CH₄. A redução da pressão para pressão ambiente libera o restante do CO₂ e as pequenas quantidades de CH₄, de aproximadamente 1% ainda contidas neste fluxo, tornando o pós-tratamento, por exemplo, por oxidação regenerativa-térmica, necessário (Figura 7).

A água regenerada volta para o processo, porém, parte precisa ser substituída parcialmente durante a operação, devido a perdas e descarte necessário por acúmulo de impurezas e de traços de gases. A água eliminada não é considerada problemática em relação a seu poder poluidor e é conduzida para o reservatório de efluente do biodigestor para posterior aplicação às lavouras como biofertilizante.

2.3.2 Lavagem (absorção) física com solventes orgânicos

Como na lavagem com água sob pressão, neste processo também o CO₂ é ligado ao meio de lavagem, por absorção física, e com pressão do biogás de aproximadamente, 8 bar, e também usa colunas de regeneração para o meio de lavagem.

Diferente do processo descrito acima, neste processo, solventes orgânicos são empregados no lugar da água, sendo o éter dimetílico de polietilenoglicol o mais utilizado, conhecido como Genosorb® ou Seloxol®. Este tipo de solvente não é corrosivo e apresenta uma solubilidade maior para CO₂ e H₂S, o que possibilita o uso de equipamentos menores. Por outro lado, o processo é mais exigente na parte da regeneração do solvente, que precisa ser aquecido. O calor necessário pode ser derivado do pós-tratamento dos gases de escape.

Este processo é adequado para a remoção da água do biogás, atingindo pontos de orvalho de -20 °C. Embora o teor de água não seja baixo o suficiente para a injeção do biometano nos gasodutos do gás natural, o processo reduz consideravelmente os esforços necessários para a secagem final.

2.3.3 Lavagem (absorção) química com aminas

O processo, semelhante aos de absorção física, também utiliza colunas de absorção. Porém, em lugar da água ou do solvente orgânico, emprega-se uma solução aquosa de MEA (Monoetanolamina) ou DEA (Dietanolamina) para a absorção do CO₂. Ocorre uma reação química reversível e ligação forte do CO₂ com os componentes da solução, sem remoção de quantidades significativas de metano. Devido à alta reatividade e seletividade do solvente, o processo pode operar sem pressurização adicional do biogás.

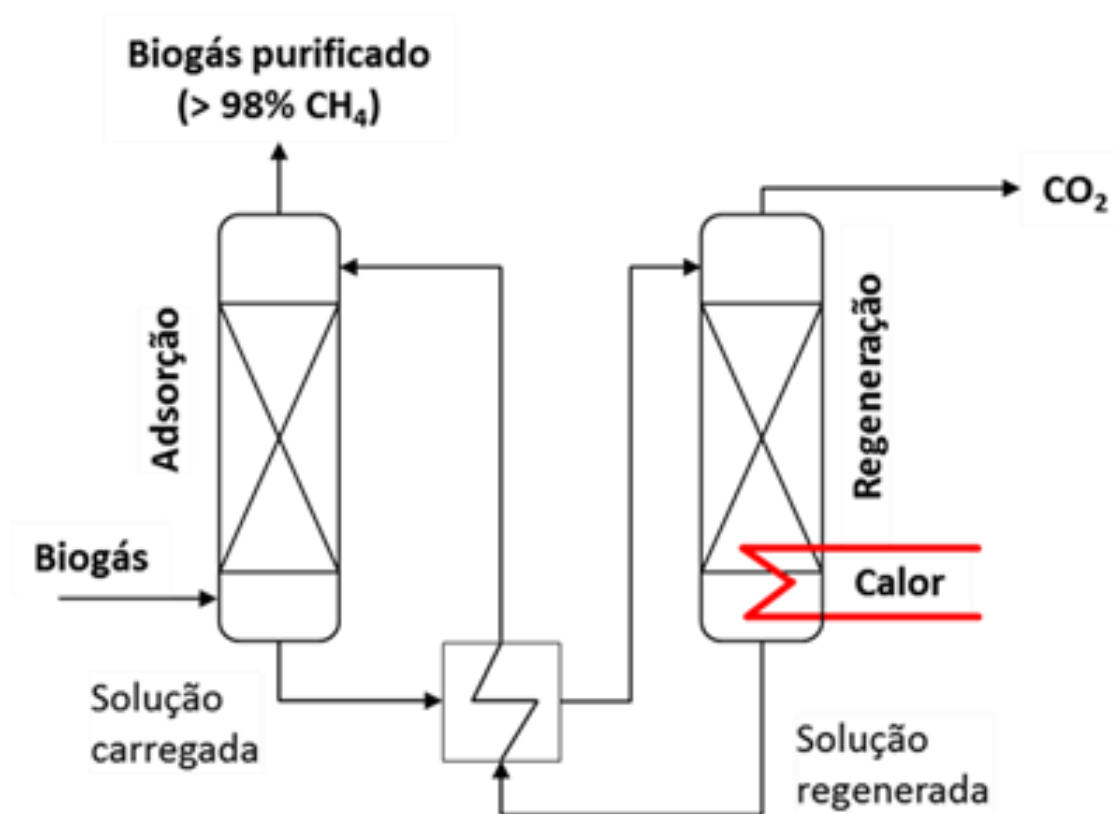
O solvente é regenerado em temperaturas elevadas de 120 °C a 140 °C. Antes da sua devolução para o processo, a solução precisa ser refrigerada para 40 °C. O calor recuperado pode ser utilizado para outros processos, por exemplo, de calefação dos biodigestores, tornando importante a elaboração de um conceito para a produção e o uso do calor, na planta.

A solução de aminas é nociva para a saúde, corrosiva e perigosa para a água, e seu manuseio requer medidas de segurança específicas e pessoal treinado.

A lavagem química com solução de aminas resulta na maior pureza do biometano produzido, com as menores perdas, comparado com os demais métodos, eliminando a necessidade do tratamento do gás de escape.

Embora os processos de fisissorção e quimissorção aqui descritos sejam eficientes na remoção do H_2S , recomenda-se que a maior proporção possível do H_2S no biogás seja eliminada anteriormente, para evitar corrosão do equipamento, e gastos elevados relacionados ao solvente, bem como, com o tratamento dos gases de escape devido à presença do SO_2 formado durante os processos.

Figura 8 – Fluxograma simplificado do processo de lavagem (absorção) química com aminas



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2010).

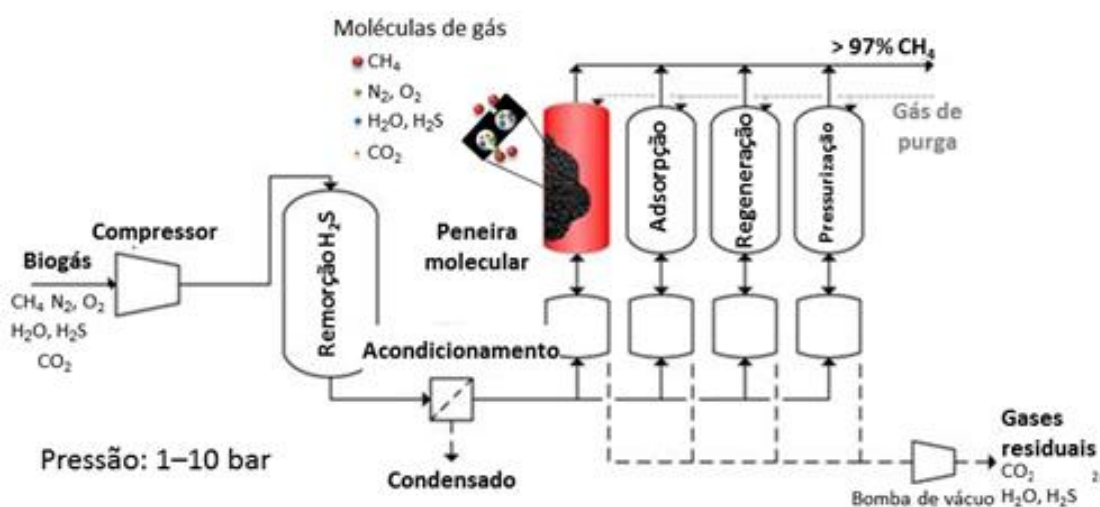
2.3.4 Adsorção com modulação de pressão (Pressure Swing Adsorption – PSA)

O processo de adsorção por modulação de pressão para a purificação do metano é tecnicamente maduro e amplamente difundido, e é viável para todas as vazões de biogás, de $400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $2.800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, porém, é economicamente mais viável para plantas de biogás de pequeno e médio porte, em casos onde teores de 95,0% (v/v) a 99,0% (v/v) de CH_4 no gás purificado sejam

suficientes, se o biometano produzido possa ser utilizado sem compressão adicional, e se a demanda térmica da planta de biogás possa ser suprida mesmo parcialmente, pelo calor produzido no pós-tratamento dos gases de escape.

A separação de gases é baseada no comportamento diferenciado de adsorção dos componentes do biogás em relação ao adsorvente, sob pressão elevada. Como material de adsorção utiliza-se de carvão ativado ou de peneiras moleculares a partir de zeolitas ou de carbono, com capacidade de ligar seletivamente o CO_2 , N_2 , O_2 e CH_4 , sendo o tamanho das moléculas o principal critério de seleção. A maior adsorção de CO_2 é atingida em pressão alta, com temperaturas baixas.

Figura 9 – Fluxograma simplificado do processo PSA



Fonte: Adaptado de Tu Eindhoven (2008).

Portanto, o biogás depois de ter passado pela dessulfurização grossa, é comprimido para 2 bar a 7 bar, resultando no seu aquecimento, o qual depois é conduzido para a dessulfurização fina. A seguir, o biogás é refrigerado para 5°C . Neste passo, a água ainda contida no biogás condensa e torna obsoleta outra secagem antes da injeção no gasoduto do gás natural. O biogás seco e dessulfurizado é enviado para as colunas de adsorção. Antes que a peneira molecular da coluna seja saturada completamente, o fluxo de biogás é direcionado para a próxima coluna, recentemente regenerada, e assim adiante.

Depois de carregado, o adsorvente é regenerado através da redução gradativa da pressão, e por meio de uma lavagem com biometano ou biogás cru. O gás resultante dessa fase sai da coluna ainda rico em metano e volta para o fluxo do biogás cru. A regeneração da coluna é completada por sucção a vácuo de aproximadamente, 100 bar. Em seguida, a coluna está pronta para o próximo ciclo de carregamento.

O gás rico em CO_2 desta fase ainda contém pequenas quantidades de metano e, portanto, precisa de um pós-tratamento, para cumprir as exigências legais de emissão de $< 0,2\%$ de CH_4 .

Instalações de purificação de biometano por meio do processo PSA consistem de quatro, seis ou nove colunas, operadas em fases diferentes de ciclo, permitindo o processamento contínuo.

A vida útil do adsorvente pode atingir vinte anos quando operado conforme as especificações, especialmente em relação à ausência de H₂S, gotinhas de lubrificante e hidrocarbonetos. Este processo pode atingir um teor de CH₄ de 99%, dependendo da quantidade de colunas e do tempo de retenção. Quanto maior a pureza do CH₄, maior o consumo de energia.

2.3.5 Separação por membranas

Utilizado nos anos 1980 para o tratamento de gás natural, a aplicação da tecnologia de separação por membranas para o tratamento do biogás é recente.

As membranas mais utilizadas consistem de polímero em forma de fibras ocas. Para atingir as vazões exigidas é necessário que as membranas sejam muito finas, com espessuras de 0,1 µm a 1 µm. A aplicação de uma camada de suporte confere à membrana a estabilidade necessária frente a pressões elevadas. As fibras, são agrupadas em feixes dentro de tubos ou em cartuchos. A instalação do equipamento de separação por membranas conta com um número considerável destes tubos, ou módulos, de acordo com a quantidade de biogás a ser tratado e o grau de purificação desejado.

O biogás dessulfurizado e seco é injetado com pressão de 25 bar a 40 bar para o dentro dos tubos. A permeabilidade dos gases CO₂, H₂S, NH₃ e vapor d'água é mais alta comparado com a permeabilidade do CH₄, portanto, estes gases migrem mais rapidamente pela membrana para o lado de baixa pressão, formando o permeado, enquanto o CH₄, o retentado, acumula ao lado da alta pressão. Embora a seletividade da membrana seja boa, pequenas quantidades de CH₄ passam pela membrana para o permeado, enquanto restos de CO₂ permanecem no retentado. Portanto, os dois fluxos de gases precisam ser reciclados e tratados, respectivamente, até que o grau de pureza desejado do biometano e do CO₂ seja atingido.

O grau de pureza do biometano aumenta com a área de membrana disponível. A construção modular permite a instalação de várias configurações do processo, inclusive com realimentação dos diversos fluxos de gás, o que pode resultar em purezas de biometano de > 96%.

3 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

O calor de processo gerado pela queima do biogás em fornalhas pode ser uma opção onde o processo de cogeração não é viável, e utilizado na secagem, no aquecimento de estufas, galpões de animais, piscinas, na produção de vapor de processo, entre outros.

Na Europa, a maior parte do biogás é gerado a partir de plantas energéticas, como milho, capim e beterrabas açucareiras e de rejeitos de animais, como gado, suínos e aves, e em nível de fazenda. Desde os anos 1990, a produção do biogás para a geração de energia elétrica cresceu de, inicialmente, 120 instalações em 1991, para 7.960 instalações, em 2014. A maior parte dessas plantas

produz energia elétrica para a injeção na rede, enquanto o calor gerado pelo processo de cogeração é aproveitado na própria fazenda, e em alguns casos, também na vizinhança.

Em plantas de processamento de alimentos, tais como, matadouros, cervejarias, laticínios, fábricas de processamento de amido etc., o biogás gerado através do tratamento anaeróbico dos resíduos orgânicos da própria fábrica pode ser utilizado para o suprimento parcial ou completo de energia de processo necessária, seja ela elétrica e, ou térmica.

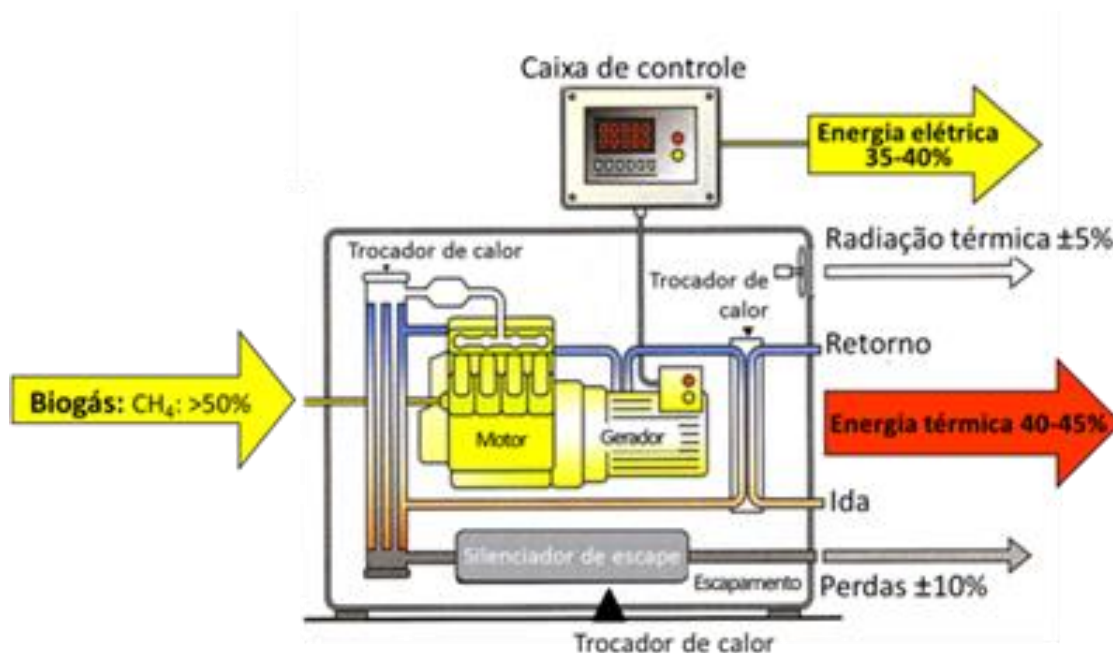
Em 2011, 83 das plantas europeias produziram biometano para a injeção nos gasodutos do gás natural, e aproximadamente 60 plantas se encontraram em fase de planejamento ou construção.

3.1 Cogeração

A cogeração compreende a geração simultânea de eletricidade e calor, por meio da queima de um combustível líquido ou gasoso em um motor, acoplado a um gerador.

Uma parte da energia química contida no combustível é transformada em energia mecânica e em eletricidade, porém, devido a limitações tecnológicas, a maior parte é transformada em energia térmica, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Sistema de cogeração de eletricidade e calor



Fonte: Robra e Raussen (2014).

A energia térmica pode ser recuperada do sistema de arrefecimento do motor, do lubrificante e dos gases de escape, e utilizada em sistemas de calefação, de secagem e de refrigeração.

Na Europa, os sistemas de cogeração convencionais instalados em plantas de biogás, para o tratamento de resíduos ou em nível de fazenda, com potências entre 300 kW_{el} a 3000 kW_{el}, são os maiores desse gênero. Os sistemas apresentam eficiências elétricas de 28% a 47% e eficiências térmicas de 34% a 55%, somando-se a uma eficiência total de 85% a 90%. A vida útil desses sistemas é de, aproximadamente, 60.000 horas, correspondendo a, aproximadamente, sete anos de operação contínua (FNR, 2014; KUJAWSKI, 2009).

Os sistemas de cogeração na faixa de 20 kW_{el} a 50 kW_{el} são conhecidos como miniplantas de cogeração e utilizados para o abastecimento de bairros ou vilas com energia elétrica e calor, enquanto os sistemas na faixa de 2,5 bis 20 kW, as microplantas de cogeração, são apropriados para o abastecimento energético de hospitais, escolas, hotéis, edifícios administrativos, e outros.

Os nanossistemas de cogeração, na faixa de até 2,5 kW_{el}, concebidos para casas de família ou para pequenos prédios, são projetados principalmente para a calefação, porém, com geração de energia elétrica. Diferente dos sistemas maiores, a tecnologia utilizada nesta faixa de potência inclui conceitos inovadores como os motores *Stirling* e as células de combustão. Embora ainda caros, estes sistemas podem se constituir em uma alternativa diante o aumento dos preços de energia elétrica.

Os motores a gás, os do ciclo Diesel e os motores Sterling podem ser operados com biogás dessulfurizado, enquanto as microturbinas e as células de combustível dependem de um biogás purificado para biometano.

3.1.1 Motores a gás

Os motores mais utilizados na cogeração são do tipo Otto, de quatro tempos com velas de ignição, desenvolvidos para a combustão do biogás a partir de uma concentração de metano, de 45%. Embora mais utilizado em sistemas de cogeração acima de 250 kW_{el}, motores com potência menor estão disponíveis. Essa tecnologia apresenta altas eficiências totais e tem uma vida útil comparativamente longa.

3.1.2 Motores ciclo Diesel

Os motores de ignição por compressão, do tipo Diesel, também de quatro tempos, é disponível a partir de 40 kW_{el} a 340 kW_{el}. Este tipo de motor necessita de um jato piloto de combustível injetado à câmara de combustão para a ignição do biogás. Porém, na Alemanha, o uso de diesel fóssil em plantas de biogás foi proibido em 2007. Desde então, alguns fabricantes oferecem motores modificados para o uso de óleos vegetais, na ignição.

Embora o motor tipo Diesel apresente elevada eficiência elétrica, a necessidade de armazenar e abastecer os motores com um segundo combustível pode ser visto como desvantagem. O consumo do combustível piloto em motores mais modernos é de 2% a 5%, relativo a m³ de biogás.

3.1.3 Microturbina a biogás

A tecnologia de microturbinas é baseada no princípio das turbinas a gás para a geração de energia elétrica instaladas em termelétricas. Na cogeração a partir do biogás, essa tecnologia é recente. As diferenças principais entre as microturbinas a biogás e as turbinas a gás consiste no tamanho, na potência disponível de 20 kWel a 200 kWel, no menor nível de temperaturas, de < 1000 °C, e na menor relação entre o ar comprimido e não comprimido, de < 5.

Entre as vantagens dessa tecnologia estão os baixos valores de emissão, longos intervalos de manutenção, bem como, a construção compacta, pronta para a ser conectada.

3.1.4 Motores Stirling

Embora o motor Stirling seja mais pesado em relação à sua potência, e bastante inerte em relação aos motores de combustão interna, ele está ganhando importância no novo mercado de geração descentralizada de energia. Este tipo de motor pode usar uma fonte de calor externa qualquer, portanto, uma das maiores vantagens desta tecnologia consiste na sua flexibilidade frente aos combustíveis.

3.1.5 Células de combustível

As células de combustível transformam a energia contida no combustível diretamente em energia elétrica e calor. Sua eficiência elétrica é, portanto, maior comparado com as outras formas de geração de energia aqui apresentadas, e pode atingir > 50%.

Atualmente existem duas tecnologias: As células de combustível do tipo PEM (membrana eletrolítica polimérica) operam com baixa temperatura de processo, de < 100 °C. Essa tecnologia funciona apenas com hidrogênio puro, portanto, o sistema contém uma unidade para a reforma do gás metano a vapor d'água.

A tecnologia SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell* – célula de combustível do tipo óxido sólido) trabalha com temperaturas na faixa de 650 °C a 1.000 °C e permite a transformação direta do metano, sem a etapa de reforma.

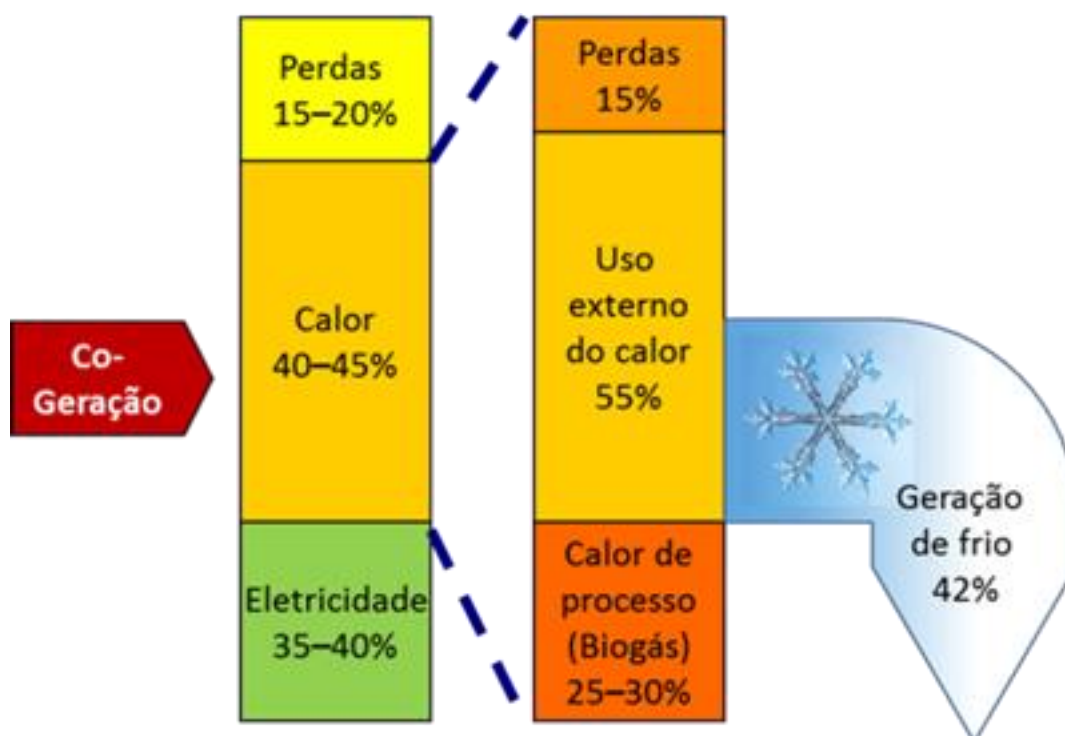
Cabe ressaltar que as células de combustível são projetadas para o uso de metano e, portanto, só podem ser operados com biogás purificado, com qualidade equivalente de gás natural.

3.2 Utilização de Calor e Refrigeração

Devido aos processos físico-químicos envolvidos com a transformação do biogás em energia elétrica, em torno de 40% a 45% da energia total é transformada em energia térmica residual. A eficiência do sistema como um todo aumenta com o grau do aproveitamento deste calor. A geração de biogás na Alemanha é subsidiada por lei. Porém, para poder gozar destes subsídios, novas instalações precisam comprovar o aproveitamento eficiente de no mínimo, 60%

do calor residual produzido, a partir de 2012. As proporções do calor residual produzido e disponível para aplicações de aquecimento, secagem e refrigeração encontram-se na Figura 11.

Figura 11 – Energia térmica disponível em sistemas de cogeração



Fonte: Robra e Raussen (2014).

3.2.1 Aquecimento

Os reatores de biogás em regiões com invernos mais frios precisam ser aquecidos para manter a temperatura do substrato na faixa ideal de 35 °C a 37 °C. Portanto, uma parte do calor produzido pela cogeração, em torno de 30% a 35% do calor residual, é consumida como calor de processo na própria geração de biogás.

Descontando perdas do calor residual de aproximadamente 15%, o restante do calor residual de 55%, pode ser utilizado em várias aplicações, por exemplo, em sistemas de calefação para leitões e pintos.

Outras opções de aproveitamento do calor residual se encontram na secagem de produtos agrofloretais. Um dos produtos mais indicados para a secagem são os grãos para teores de umidade abaixo de 12%. A secagem de lenha é mais uma aplicação frequentemente encontrada. Em plantas com separação do efluente da biodigestão, a desidratação da parte sólida também pode ser uma opção para o aproveitamento do calor residual.

Dependendo do tamanho da planta, o calor residual produzido pela cogeração pode ser aproveitado por meio de redes locais de distribuição de calor, para a calefação de residências e de edifícios comerciais e públicos, em regiões com clima moderado no verão e frio durante o inverno.

3.2.2 Refrigeração

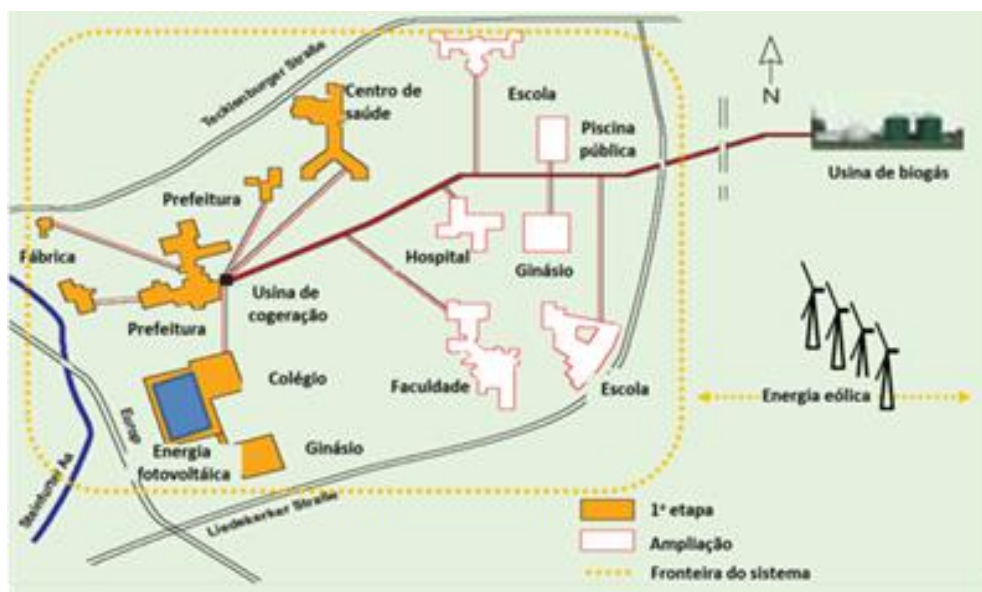
O calor residual pode ser aproveitado na refrigeração, por meio de refrigeradores de absorção a base de água/amônia, disponíveis com potências de 50 kW a 500 kW. Os sistemas são adequados para a climatização de ambientes residenciais, de trabalho e de galpões de animais, resultando em melhores resultados quanto à engorda, bem como, na redução de perdas de animais. A climatização da sala de ordenha e a refrigeração do leite possibilita a produção de leite de melhor qualidade.

Por fim, a refrigeração durante o armazenamento reduz consideravelmente a perda de qualidade de grãos, de frutas e de outros produtos agrícolas. Com o aumento dos preços de energia elétrica, o processo torna-se uma opção interessante do ponto de vista econômico em locais com calor residual disponível, desde que a distância entre a produção do calor e o local de refrigeração seja curta e não ultrapasse 2 km.

3.3 Microrrede a biogás

A microrrede de biogás é adequada para o abastecimento de bairros ou vilas com eletricidade e calor, e foi concebida devido ao fato de que a energia transportada em forma de biogás implica custos de investimento consideravelmente menores comparado com os custos necessários para o transporte de calor e de eletricidade. Outro fator importante é a possibilidade de armazenamento de energia em forma de biometano, por tempo quase ilimitado.

Figura 12 – Microrrede de biogás



Fonte: Robra e Raussen (2014).

A microrrede de biogás consiste de uma ou mais plantas de biogás e de uma ou mais unidades de cogeração localizadas perto dos consumidores, conectadas por gasodutos (Figura 12).

Dessa maneira, o calor pode ser aproveitado perto da sua produção, reduzindo as perdas durante o transporte. A combinação com outras fontes renováveis, como a energia solar, eólica e de biomassa, torna o sistema flexível e eficiente: A carga principal pode ser abastecida por energia eólica e solar. Em tempo de falta de vento e durante a noite, a eletricidade gerada pelo biogás preenche a lacuna de abastecimento.

3.4 Injeção na Rede de Gasodutos

A injeção do biometano nos gasodutos possibilita a geração de energia longe dos lugares onde é consumida, e devido à estrutura modular realizada por meio de unidades de cogeração descentrais, conectadas à rede interligada de eletricidade, contribui para a diversificação e para a segurança energética.

Depois de purificado (veja os itens 2.1, 2.2 e 2.3), o biometano é conduzido para as estações de injeção, onde é avaliado por quantidade e poder calorífico. Dependendo das especificações, o biometano é acondicionado com gás líquido ou ar, e odorizado. Em seguida, a pressão do biometano é adaptada conforme exigida pelo respectivo fornecedor da rede de gás natural.

Uma grande parte do biometano injetado nos gasodutos é transformado em energia elétrica e térmica, em unidades de cogeração. Outra parte é consumida em residências e empresas para fins de calefação e geração de calor de processo. Neste caso, os consumidores podem optar para uma alternativa ambientalmente mais amigável, que consiste em gás natural com adição de biometano, por um preço maior (FNR, 2014).

3.5 Utilização do Biogás como Combustível Automotivo

Assim como o gás natural veicular (GNV), o biometano pode ser utilizado como combustível automotivo. Uma vez purificado, o manuseio do biometano é o mesmo do GNV.

A grande vantagem do metano como combustível de carros e ônibus é a qualidade dos gases de escape, já que o metano produz apenas CO₂ e água, na sua combustão. Ao contrário do GNV, o biometano é quase neutro em carbono. Essas propriedades tornam o biometano um combustível ambientalmente adequado para o uso em centros urbanos.

Na Europa, a Suécia e a Suíça são entre os pioneiros, há anos utilizando o biometano em veículos, como carros de passeio, ônibus, caminhões e tratores bem como, no transporte ferroviário (FNR, 2014).

4 CONCLUSÕES

O biogás, produzido a partir de resíduos orgânicos e plantas energéticas, se constitui em uma forma de energia versátil e flexível. Uma vez purificado para atingir a quantidade do gás natural, o biometano armazenado nos gasodutos pode complementar e substituir as outras energias renováveis, por exemplo: a solar, a eólica e a hidrelétrica.

A cogeração de energia elétrica e de calor é a forma mais eficiente do uso da energia, atingindo eficiências totais de > 90%, se o calor residual for aproveitado. Para isso, existem várias opções, tais como: a calefação de residências e edifícios, a secagem de produtos e a refrigeração.

As microrredes de biogás apresentam uma alternativa local para o uso do biogás produzido na vizinhança. Interligadas com outras fontes alternativas de energia, funcionam como sistemas de apoio, aumentando a segurança energética.

Na Alemanha, o avanço tecnológico na produção e na purificação do biogás, só foi possível devido às políticas públicas de subvenções, baseadas na Lei das Energias Renováveis (*Erneuerbare Energien-Gesetz*, EEG).

A produção de energias renováveis neutras em CO₂ é desejável e urgentemente necessária do ponto de vista da proteção do clima e do ambiente. O desafio ainda está na produção de quantidades suficientes de energia renovável em escala local e regional, e na interligação dessas fontes. O biogás com suas diversas opções de utilização, apresenta uma fonte energética de alta flexibilidade. Na sua forma purificada de biometano, armazenável quase sem perdas de energia, o biogás pode desempenhar uma função central na estabilização do abastecimento com energia, de uma matriz energética baseada em energias renováveis.

REFERÊNCIAS

- ADLER, P. *et al.* **Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung**. 5. ed. Gülzow-Prüzen, Alemanha: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2014. p. 164.
- BMVIT. **Biogas-Netzeinspeisung**. Disponível em: <www.biogas-netzeinspeisung.at>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- CHAUHAN, A.; SAINI, R. P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 99-120, out. 2014.
- CORELL, J. Biogasanlagentechnik und Substrate (M. Kern, Ed.) Kasseler Abfallforum 2008. **Anais...** Witzhausen: Kasseler Abfallforum, 2008.
- FNR. **Biogas**. Disponível em: <<http://biogas.fnr.de/einstieg/>>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- HAHN, H. *et al.* Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 383-393, jan. 2014.
- HARASEK, M. *et al.* Biomethan – Technologie & Rahmenbedingungen. [s.l.: s.n.], 2012.
- KTBL. **Faustzahlen Biogas**. (H. Döhler & S. Krötzsch, Eds.; p. 181). Darmstadt, Alemanha: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft; Auflage: 1., Aufl. 2007.
- KUJAWSKI, O. Efficient energy production in modern biogas plants as an effective means of limiting CH₄ and CO₂ emissions. **Environment Protection Engineering**, v. 35, n. 3, p. 27-39, 2009.
- MIELKE, A. *et al.* Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. **Bayern Biogasforum**, v. IV, n. 10, p. 16, 2013.

- PANTOJA, C. E. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Tecnologias de Processamento de Gás Natural**. [s.l.] Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2009.
- ROBRA, Sabine; RAUSSEN, Thomas. Aproveitamento energético do biogás. In: Perreira, Christiane; Fricke, Klaus. (Eds.) 2º CONGRESSO TÉCNICO BRASIL-ALEMANHA – Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. **Anais...** Florianópolis – SC, 2014. Disponível em: <http://www.congressobrasilalemanha.com.br/temas/default/arquivos/palestras/27/11-SABINE_ROBRA.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014.
- SCHNEIDER, R. L. **Biologische Entschwefelung von Biogas**. Munique: Universidade Técnica de Munique, 2007.
- TU EINDHOVEN. **Biogas upgrading**. Disponível em: <<http://students.chem.tue.nl/ifp24/>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- TU WIEN. Überblick über Biogas-Aufbereitungstechnologien zur Produktion von Biomethan. **Vienna, Áustria: [s.n.], 2012.**
- URBAN, W. *et al.* **Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz**. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Oberhausen, Alemanha: [s.n.], 2008.
- WETTER, C. Verfahrenstechnik der Gasaufbereitung am Beispiel des Biogasnetzes Gronau / Epe. Fachtagung der Fachhochschule Lippe und Höxter “Einspeisung von Biogas in Gasnetze.” **Anais...** Steinfurt, Alemanha: Fachbereich Energie • Gebäude • Umwelt, 2008.
- ZHAO, Q. *et al.* Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. In: KRUGER, C.; YORGEY, G.; CHEN, S.; COLLINS, H.; FEISE, C.; FREAR, C.; GRANATSTEIN, D.; HIGGINS, S.; HUGGINS, D.; MacCONNELL, C.; PAINTER, K. (Ed.). **Climate Friendly Farming: Improving the Carbon Footprint of Agriculture in the Pacific Northwest**. CSANR Research Report 2010-00. Puyallup, WA, EUA: Washington State University, 2010. p. 24.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

ROBRA, Sabine. Aproveitamento Energético do Biogás. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Mai – 2017.**

Tecnologias de Purificação de Biogás

Technologies for Clean up the Biogas

Engenheiro Civil Helge Dorstewitz

Engenheiro Mecânico Axel Hüttner

RESUMO

O biogás produzido a partir de resíduos, rejeitos e matérias-primas renováveis pode ser empregado de diversas maneiras, como para a produção de calor e eletricidade, bem como para a substituição de gás natural e combustível fóssil. A valorização do biogás para gerar o biometano e incorporá-lo a rede de gás natural é uma forma eficiente de utilização da energia. Assim, o local de produção pode estar separado do local de consumo. Para a valorização do biogás várias tecnologias estão disponíveis como a lavagem física e química, a adsorção por pressão variada bem como, o processo de separação por membranas. Todas essas tecnologias chegaram a um pré-desenvolvimento comercial, sendo capaz de produzir o biometano após processos específicos de valorização do gás bruto, garantindo o condicionamento avançado e a odorização que atenda aos requisitos da rede de gás natural. A melhor opção de processo deve ser determinada com base nas condições específicas do projeto, até porque os custos de tratamento dependem consideravelmente das condições específicas encontradas nos diversos países. Os custos de tratamento para plantas construídas na Alemanha se encontram entre 0,75 e 2,5 ct/kWh, dependendo da capacidade operacional.

Palavras-chave: Biogás. Valorização. Tecnologia. Despesas de tratamento. Purificação.

ABSTRACT

Biogas produced from residues, wastes and renewable raw materials provide manifold utilisation possibilities as production of heat and electricity as well as the substitution of natural gas and fossil fuel. The upgrading of biogas to biomethane and feeding into natural gas grid is an efficient way of energy utilisation. Thereby the production site can be separated from the consumption site. For the upgrading of biogas various technologies are available as physical and chemical scrubbing, pressure swing adsorption and membrane technology. All these technologies have reached a pre-commercial development. They are able to produce biomethane after a process specific purification of the raw biogas and a advanced conditioning and odorisation that meets the requirements of the natural gas net operators. The optimal upgrading technology has to be determined specific to a project because the treatment expenses depending on various parameters as well as country-specific surrounding conditions. The upgrading expenses are a function of the throughput of the plants and are in German plants within a range of 0,75 to 2,5 €ct/kWh.

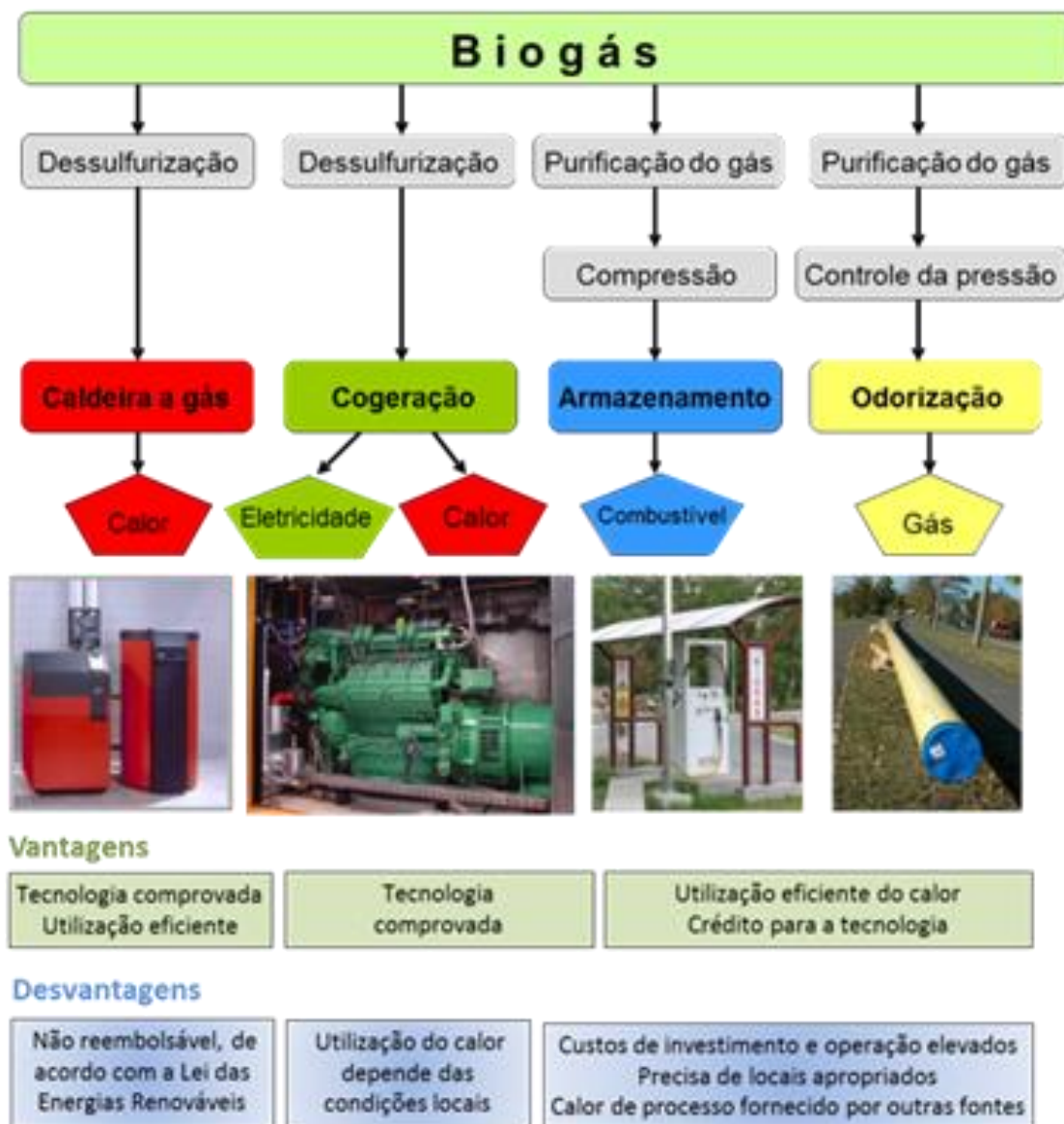
Keywords: Biogas. Upgrading. Technology. Treatment expenses. Biogas clean-up.

1 INTRODUÇÃO

O uso energético de resíduos e outros materiais residuais bem como, de plantas energéticas cultivadas para este fim, ganha cada vez mais importância em nível global. Além do uso em sistemas termelétricos para a produção de calor e eletricidade, a energia contida nos resíduos e materiais residuais é utilizada através do tratamento anaeróbio com produção do biogás.

A produção do biogás através dos resíduos e materiais residuais possibilita uma diversidade de usos (Figura 1).

Figura 1 – Panorama dos usos do biogás



Fonte: Elaborado pelos autores com dados internos.

Além da combustão, o biogás pode ser utilizado em sistemas de cogeração para a produção de energia elétrica e de calor. Enquanto a eficiência energética da eletricidade injetada à rede é realidade, o uso eficiente do calor exige um consumidor adequado, o qual talvez não exista em todos os locais. Como consequência, muitas vezes este calor é liberado ao ambiente sem o devido aproveitamento. O processamento do biogás para atender a qualidade do gás natural oferece a possibilidade do uso do biometano produzido, independente do local da sua produção, em locais com demanda de calor. Além da produção de calor e eletricidade, o processamento do biogás para gás natural possibilita seu uso em forma de BGC (biogás comprimido) ou BGL (biogás liquidificado), como combustível em veículos.

2 EXIGÊNCIAS PARA O PROCESSAMENTO DO BIOGÁS

O biogás destinado à injeção na rede de gasodutos deve cumprir as exigências em relação a sua composição bem como, as tecnológicas. Os regulamentos dos respectivos países – se existentes – apresentam apenas um padrão mínimo, sendo adaptado às próprias necessidades pelos operadores dos respectivos gasodutos, especialmente em países sem experiências próprias de operação. As exigências tecnológicas resultam do ponto de injeção previsto e da capacidade da rede de receber determinadas quantidades.

A injeção do biometano geralmente é efetuada em forma de gás de troca, portanto, o biometano e o gás natural utilizado por padrão devem apresentar as mesmas qualidades de combustão. O poder calorífico do biometano a ser injetado depende do tipo da rede de gasoduto receptor, seja ele uma rede de baixo poder calorífico (“L”) ou de alto poder calorífico (“H”). Portanto, o aumento do poder calorífico e o ajuste do índice de Wobbe são necessários conforme a qualidade do gás natural existente. Além disso, as concentrações dos outros componentes água, oxigênio, enxofre e hidrogênio normalmente encontrados no biogás, devem ser adaptadas aos padrões do gás natural existente na rede. O ponto de orvalho do biometano injetado deve ser menor que a temperatura do solo, em pressão regular do gasoduto, para evitar seguramente a condensação de água.

As propriedades principais a serem atingidas pelo processamento do biogás para biometano, de acordo com os padrões da DVGW 260 e 262, para a injeção do biometano nos gasodutos alemães, e que são amplamente compatíveis com os padrões de outros países, se encontram listados na Tabela 1.

No âmbito do planejamento deve-se avaliar as exigências à injeção existentes no local, além das exigências relacionadas à qualidade do gás. Os operadores dos gasodutos geralmente solicitam uma avaliação da injeção em relação às exigências tecnológicas e na determinação do ponto de injeção adequado. Os gasodutos de transporte e de distribuição apresentam diversos níveis de pressão. Os gasodutos de baixa pressão apresentam uma pressão menor de 100 mbar, enquanto a pressão em gasodutos de pressão média atinge até 1 bar, e em gasodutos de alta pressão pode ser ainda mais alta. Portanto, a adaptação da pressão do biometano à pressão encontrada no gasoduto é indispensável.

Tabela 1 – Padrões exigidos para a injeção do biometano nos gasodutos segundo Associação Alemã dos setores de gás e água

Parâmetro	Unidade	Limites
Poder calorífico superior	kWh/Nm ³	8,4 – 13,1
Índice de Wobbe	kWh/Nm ³	10,5 – 15,7
CH ₄	%	Depende do poder calorífico
H ₂	mg/Nm ³	< 30
CO ₂	%	< 6
O ₂	%	< 3
H ₂	%	< 5
H ₂ S	mg/Nm ³	< 5,0
Enxofre	mg/Nm ³	< 30
Densidade relativa		0,58 – 0,65

Fonte: DVGW, Arbeitsblatt G 260.

A capacidade de recepção do gasoduto, no local escolhido para a injeção, também deve ser considerada. A quantidade do biometano a ser injetado não pode superar a capacidade de recepção do gasoduto, o que pode resultar em problemas quando o biometano é injetado em redes locais com pouco volume de venda, especialmente nos meses de consumo reduzido, como no verão. Nestes casos, a injeção não é possível ou só pode ser realizada com maiores esforços técnicos.

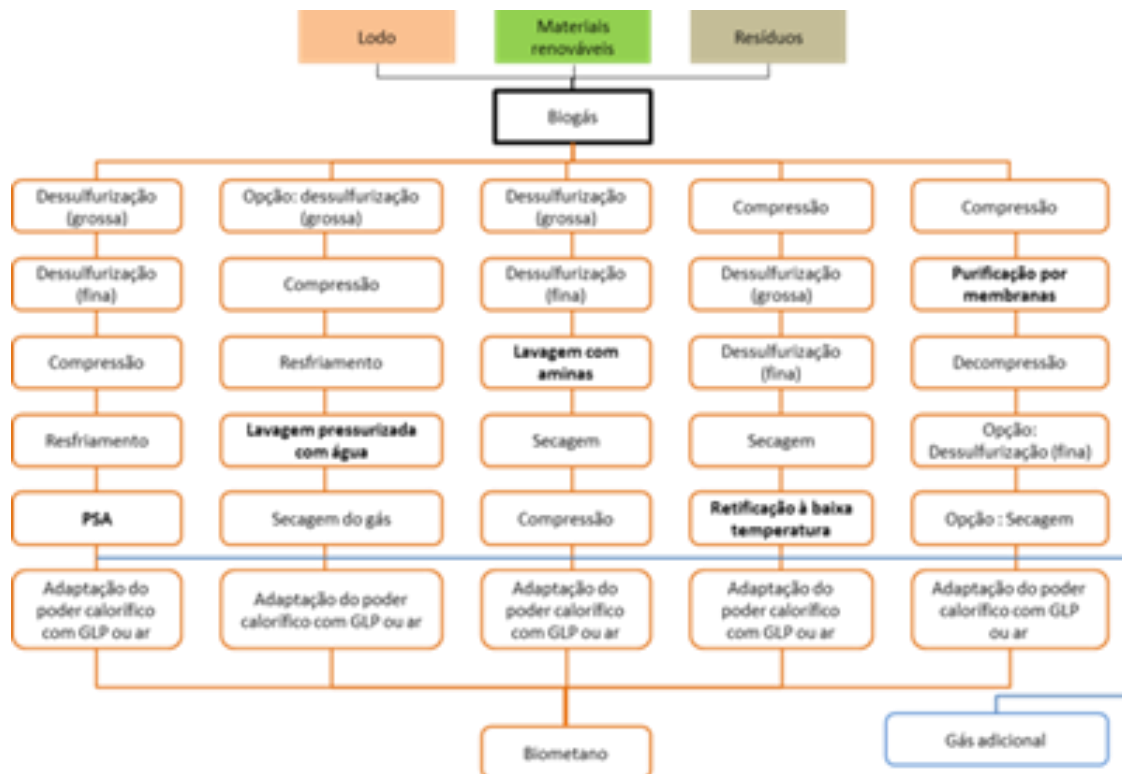
3 PROCESSOS PARA A PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O pré-requisito para a injeção do biometano no gasoduto é, como descrito acima, que as propriedades do gás estejam de acordo com as exigências do operador do gasoduto. A princípio, essas propriedades podem ser atingidas por meio de processos físicos, químicos ou físico-químicos (BEIL *et al.*, 2012; HOFMANN *et al.*, 2006), tais como:

- A lavagem química por absorção em solventes orgânicos (Lavagem por aminas);
- A lavagem física por absorção em solventes orgânicos (Lavagem com água sob pressão);
- A purificação a seco por adsorção em sólidos por modulação de pressão (*Pressure Swing Adsorption, PSA*);
- A separação por membranas;
- O processo de retificação em temperaturas baixas (processos criogênicos).

Além de uma cadeia de etapas de processos necessários (como secagem e dessulfurização) o foco da purificação está na separação do dióxido de carbono (CO_2) do biogás bruto com a finalidade de enriquecimento do metano (Figura 2).

Figura 2 – Etapas dos diversos processos para a purificação do biogás



Fonte: Base Technologies GmbH (2008).

Os processos listados na sua maioria são tecnicamente maduros, comprovados e utilizados na purificação do biogás. Os processos criogênicos, nos quais o enriquecimento do metano acontece por liquidação do biogás (separação do CO_2 na sua forma líquida) ou a separação em temperaturas baixas (congelamento e separação do CO_2 em forma sólida) são altamente sofisticados e, portanto, exigem altos custos de investimento e demanda energética. Contudo, os gases separados, como o CO_2 , apresentam um grau de pureza extremamente alto se constituindo em um produto de mercado. Entretanto, estes processos de purificação do biogás não estão sendo utilizados atualmente.

Os processos de separação por membranas são os mais recentes, representando avanços tecnológicos consideráveis, o que torna este processo interessante para plantas de baixa capacidade de produção, de $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Os processos de absorção por lavagem sob pressão e de adsorção por modulação de pressão encontram-se entre os processos com maior aplicabilidade na prática. Entretanto, os processos químicos de lavagem (por exemplo, com aminas) já possuem hoje as referências necessárias em escala industrial e ganham cada vez mais importância.

3.1 Lavagem com Água sob Pressão

A lavagem com água sob pressão utiliza o efeito físico da solubilidade de gases em líquidos e representa o processo mais aplicado na Europa para a separação do CO₂ em gases biogênicos.

O processo se baseia nas diferentes solubilidades dos diversos componentes do biogás. Os outros gases contidos no biogás, como o CO₂, sulfeto de hidrogênio (H₂S), mas também o gás amoníaco (NH₃), possuem uma maior solubilidade na água do que o metano.

A primeira etapa de processo da lavagem sob pressão constitui na lavagem do biogás. O biogás, comprimido para 9 bar e refrigerado por arrefecimento a água, é introduzido no fundo da coluna de lavagem e conduzido para cima. Em contracorrente, um líquido de lavagem (água) é conduzido de cima para o fundo da coluna. As colunas contêm um meio de suporte de granulometria diversificada, promovendo a distribuição eficiente da água no fluxo do gás e por outro lado, resultando em uma maior superfície de contato possível.

Sob as condições predominantes dentro da coluna (fria e com alta pressão), o CO₂ contido no biogás bem como, o H₂S, passam para o líquido de lavagem. Devido à eficiência alta do processo em relação à remoção do H₂S, uma etapa a jusante de dessulfurização fina geralmente não é necessária.

O gás retirado em cima da coluna apresenta o teor de metano desejado de geralmente, > 96% v/v.

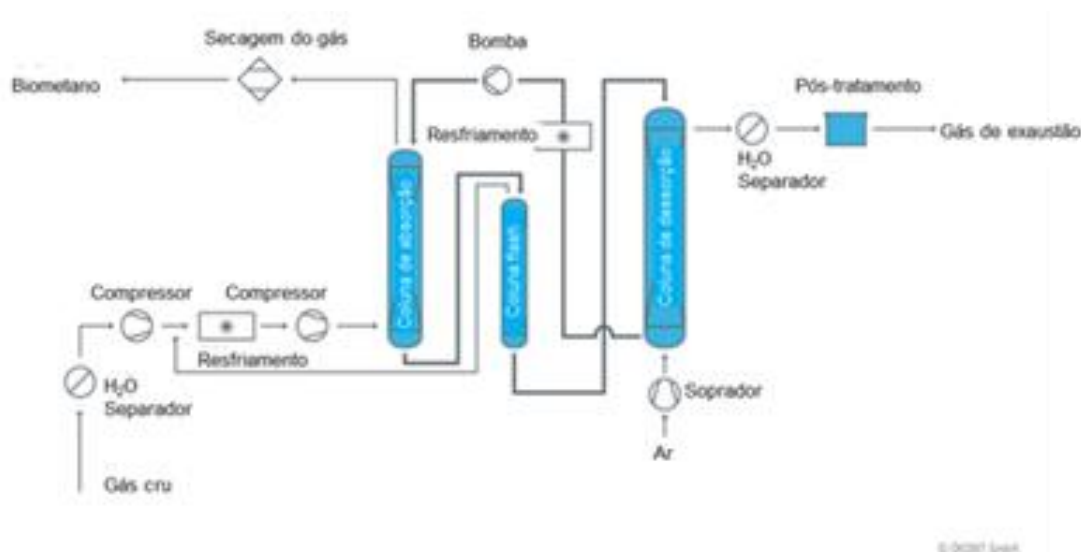
O biogás purificado pela coluna de lavagem é conduzido para etapa de lavagem. Este é tratado ao menos em duas colunas (dependendo da capacidade da planta) em operação paralela, das quais uma está em operação e a outra, em reserva (*stand-by*). Estas colunas têm uma mistura que atua como meio de secagem (por exemplo, gel sílica), o qual remove a umidade do gás. Depois de um tempo de uso a capacidade de absorção do meio é esgotada e o fluxo de gás a ser secado é conduzido para a segunda coluna, enquanto o primeiro passa por uma regeneração. Em muitos casos, o gás depois da secagem ainda passa por um filtro de carvão ativado para a remoção de impurezas ainda contidas no gás, especialmente traços de H₂S.

O gás purificado é analisado continuamente segundo parâmetros CH₄, H₂S e ponto de orvalho (teor de umidade). Se os limites exigidos não forem atingidos, o gás é conduzido em circuito interno de volta para a purificação.

Em uma etapa separada, na coluna de dessorção, o líquido de lavagem (água) carregado com CO₂ e H₂S, é regenerado. A regeneração ocorre em pressão ambiente, através da condução do ar em contracorrente pela coluna de regeneração. A mistura do gás liberada na regeneração contém a carga de CO₂ e CH₄ do biogás e geralmente é conduzida para o tratamento de ar exaurido. A Figura 3 mostra o fluxograma de um sistema de lavagem sob pressão.

O processo de lavagem e a regeneração do líquido de lavagem ocorrem em sistema contínuo. O arrefecimento do equipamento, do líquido de lavagem e do gás normalmente é efetuado por água fria.

Figura 3 – Fluxograma de um sistema de lavagem sob pressão



Fonte: Empresa ÖKOBIT GmbH.

O pH do líquido de lavagem é ajustado por meio da adição de pequenas quantidades de hidróxido de sódio (NaOH). O desenvolvimento de biofilmes, que podem causar o bloqueio das colunas de lavagem, é evitado através da adição de água hydrogenada (H₂O₂) como biocida, em intervalos de três a quatro semanas.

3.2 Lavagem Química com Aminas

Ao contrário da lavagem sob pressão, a lavagem química trabalha em pressão normal, tornando a pressurização do biogás desnecessária. Depois de gerado, o biogás na entrada do sistema de purificação apresenta uma pressão de 50 mbar a 100 mbar, sendo mantido durante todo o processo de purificação.

O primeiro passo da lavagem química com aminas consiste na pré-secagem do biogás. Este passo é necessário por que não há consumo de água na lavagem com aminas.

Para a pré-secagem, o biogás é conduzido por uma coluna de arrefecimento onde é resfriado com água fria, para promover a condensação da umidade contida no gás.

Na etapa da lavagem com aminas, o biogás desumidificado é conduzido ao fundo da coluna de lavagem (coluna de contracorrente) e passa para cima. Em contracorrente, a solução de aminas é conduzida de cima para baixo pelas colunas. Neste processo, as colunas também são recheadas com um meio de suporte para possibilitar um ótimo contato do gás com a solução de lavagem. Os componentes CO₂ e H₂S são absorvidas pela solução de lavagem e, portanto, removidos do fluxo do gás. O biometano purificado retirado em cima da coluna apresenta teores de CH₄ > 98,5% v/v.

A solução de aminas entra por cima da coluna com temperatura de 25 °C e aquece devido ao processo de absorção, para 35 °C. A solução de lavagem carregada é retirada no fundo da coluna e conduzida para a regeneração. Porém, a regeneração exige o aquecimento para temperaturas de 180 °C, geralmente efetuado por meio de um sistema de óleo térmico. A regeneração acontece com base na regeneração (dessorção) térmica.

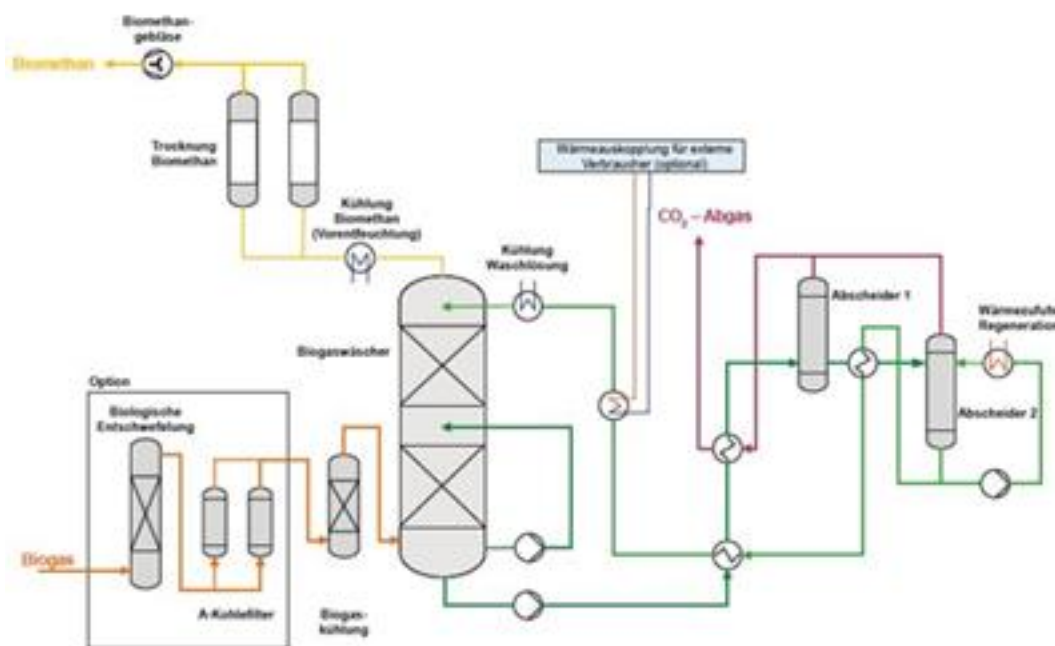
O biometano retirado da coluna de lavagem apresenta temperaturas de até 30 °C, com umidade relativa de 80% e precisa ser desumidificado. A secagem ocorre em duas etapas.

A pré-secagem ocorre por meio de água fria, reduzindo o teor de água no biometano. Na segunda etapa, o restante da umidade contida no biometano é removida por meio de colunas de secagem recheadas com gel sílica, cuja quantidade varia conforme a capacidade da planta (no mínimo duas) e que geralmente são operadas em sistema de modulação de pressão (PSA).

Sob pressão, o gel sílica absorve a umidade contida no biogás, podendo atingir pontos de orvalho de -80 °C. Após o esgotamento da capacidade da coluna, o teor de umidade no biogás aumenta e o fluxo de biogás úmido é conduzido para a outra coluna. A pressão da primeira coluna é reduzida (modulação de pressão) e uma pequena proporção do biometano seco é conduzida em contracorrente pela coluna. A água anteriormente absorvida é devolvida ao fluxo de biometano seco e o gel sílica volta a ter sua capacidade de secagem.

Por final, o biometano seco é conduzido por um filtro de carvão ativado (A06A/B), onde ocorre a remoção de restos de enxofre para concentrações < 1 mg/m³. O fluxograma do processo de lavagem com aminas é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma do processo de lavagem com aminas da empresa STRABAG segundo o processo BCM



Fonte: STRABAG Umwelttechnik GmbH.

3.3 Processos de Purificação por Membranas

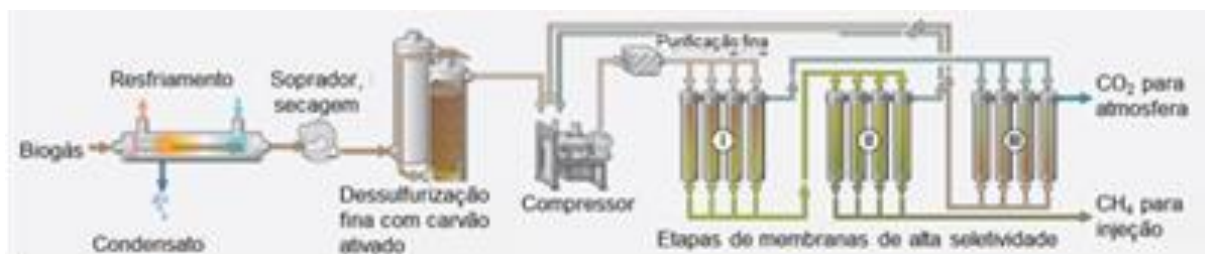
A tecnologia de membranas é um processo de purificação comparativamente recente. A purificação dos componentes indesejáveis do biogás ocorre devido à permeabilidade diferenciada do material da membrana. O material de membrana consiste, por exemplo, de acetato de celulose ou de poliamidas aromáticas. Os processos de separação por membranas podem ser diferenciados em processos a úmido e a seco. Nos processos a úmido, os componentes separados do biogás são absorvidos por um líquido de absorção.

A força motriz da separação das misturas de gases decorre da diferença da pressão entre os lados da membrana, podendo se tratar de sobrepressão no lado da alimentação, ou também, de baixa pressão no lado do permeado. A sobrepressão nos processos de membranas geralmente se encontra entre 5 bar e 10 bar. A redução de resistências de transporte, em função de taxas de fluxo suficientes, exige que as membranas sejam finas, e ao mesmo tempo, estáveis. Baseado no número limitado de instalações em escala industrial equipadas com essa tecnologia, existem apenas estimativas em relação à vida útil das membranas, de aproximadamente três anos.

As membranas mais utilizadas são membranas de mangueira, como tubos, fibras ocas e módulos capilares, ou membranas rasas como módulos de placas, de enrolamento ou de almofada. As membranas de mangueira possibilitam elevadas densidades, portanto muitas vezes os módulos de fibras ocas são instalados. Os processos de membranas apresentam vantagens devido a sua construção simples, pouco complicada e pela pequena demanda de manutenção. A construção modular possibilita a ampliação simples da instalação e a realização de pequenas unidades, respectivamente.

Além de se constituir na forma vantajosa de módulos, a capacidade de purificação é influenciada pela combinação dos módulos (em cadeia, em paralelo e com realimentação), os fluxos das substâncias (permeado, retentato) e das condições da pressão (sobrepressão, vácuo). A realimentação do ar exaurido resulta em uma melhor eficiência de separação, porém, implica um maior esforço tecnológico e financeiro (Figura 5).

Figura 5 – Processo de separação por membranas em três etapas



Fonte: Purificação do biogás com tecnologia altamente seletiva de membranas, informado pela empresa Eisenmann.

Nas instalações de separação por membranas, geralmente um passo de desumidificação e dessulfurização fina do biogás é conduzido anteriormente, para assegurar o melhor desempenho na separação e prolongar a vida útil das membranas.

3.4 Adsorção por Modulação de Pressão

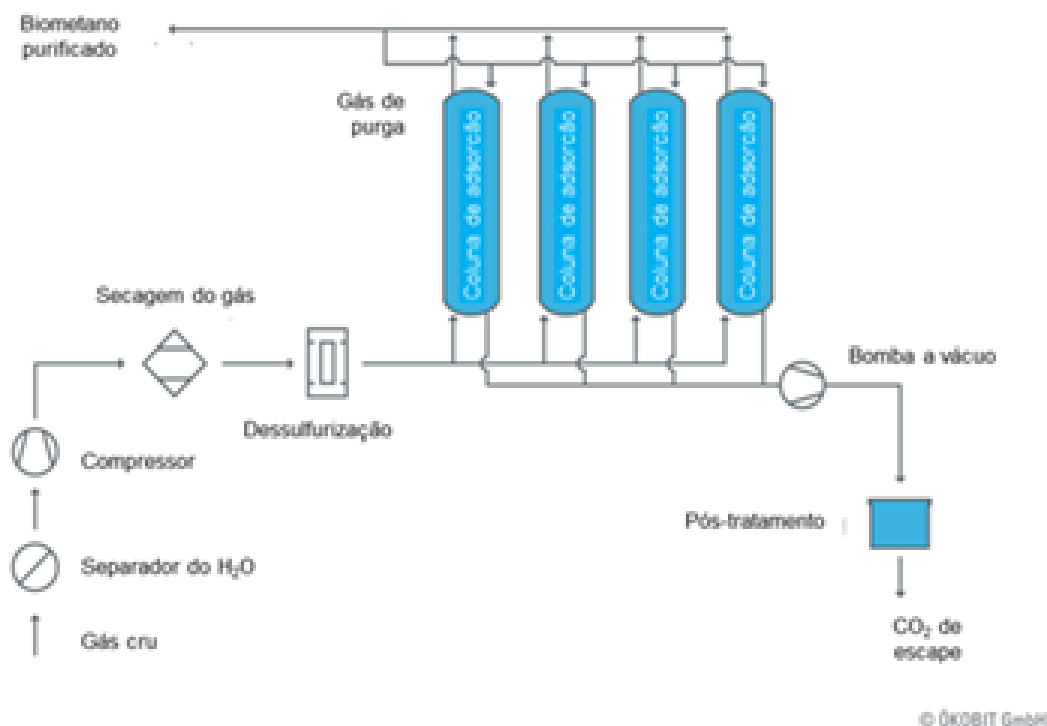
No processo de purificação por adsorção e modulação de pressão, a separação dos componentes indesejáveis do biogás ocorre por meio da adsorção das substâncias pela superfície de sólidos como carvão ativado, zeólitos e peneiras moleculares de carbono. Além do CO_2 , outros componentes do biogás, como água e H_2S e pequenas quantidades de O_2 , também são adsorvidos.

Para evitar que os materiais de adsorção sejam bloqueados por H_2S ou por vapor d'água, uma etapa de dessulfurização e de secagem é instalada antes da etapa de adsorção por modulação de pressão.

O processo de adsorção por modulação de pressão consiste de quatro fases:

- Adsorção com pressão de operação de 4 bar a 8 bar;
- Transição para a dessorção pela redução da pressão;
- Dessorção por lavagem com biogás ou biometano;
- Aumento da pressão para o próximo lote de adsorção.

Figura 6 – Fluxograma do processo de adsorção por modulação de pressão



Fonte: ÖKOBIT GmbH.

A adsorção ocorre até que o adsorvente esteja saturado quase completamente com os componentes indesejados do biogás. Neste momento, o fluxo de biogás é conduzido para uma coluna de adsorção regenerada, e na coluna saturada, o processo de dessorção é iniciado através da redução da pressão. A dessorção quase total da coluna é efetuada por meio de uma bomba a vácuo. Antes de reintegrar a coluna regenerada, a pressão de operação deve ser restabelecida. As colunas de adsorção passam pelas quatro fases consecutivamente, portanto uma instalação de adsorção por modulação de pressão geralmente consiste de quatro colunas para assegurar uma operação contínua de purificação do biogás (Figura 6).

A dessorção das colunas de adsorção por meio de uma bomba a vácuo resulta em uma regeneração quase completa dos adsorventes. Portanto, a vida útil de peneiras moleculares de carbono é quase ilimitada, desde que não haja presença de compostos de carbono de cadeia longa ou gotinhas de óleo no biogás.

3.5 Lavagem Física

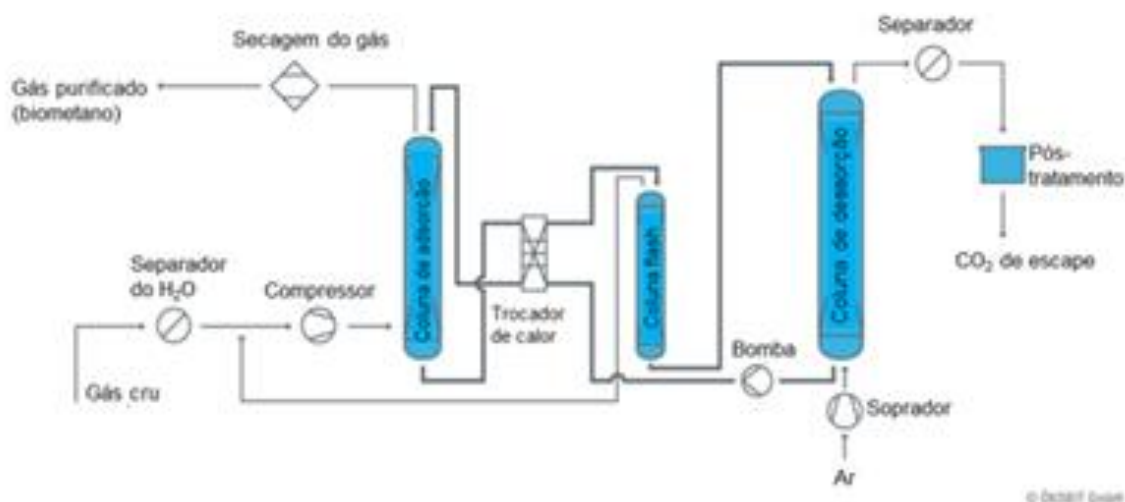
A lavagem física é um processo de absorção parecido com o processo de lavagem sob pressão, porém, com utilização de solventes orgânicos para a separação dos gases indesejados. Como meios de absorção são empregadas misturas de poliglicol (por exemplo, Genosorb, Selexol). A absorção física é principalmente apropriada para o tratamento de gases com altos teores de H₂S e, ou de CO₂, e uma etapa de dessulfurização não é obrigatoriamente necessária. Devido à alta solubilidade dos gases indesejados no meio de absorção, este processo opera com quantidades consideravelmente menores de líquido de lavagem.

O biogás é comprimido para 4 bar a 8 bar e conduzido para a coluna de absorção, que opera em contracorrente. Os gases indesejados são separados pelo meio de absorção através de percolação. A temperatura da coluna é de 40 °C, porém, para aumentar a solubilidade dos gases no meio de absorção, o processo pode ser conduzido também com líquidos de lavagem refrigerado. Por final, o biometano purificado passa por uma etapa de secagem.

A regeneração do líquido de lavagem ocorre em uma coluna flash, através da redução da pressão. O gás exaurido ainda rico em metano pode ser conduzido de volta para as colunas de absorção. A expulsão do CO₂ ocorre em uma coluna de dessorção adicional por arrastamento com ar. O fluxograma do processo de absorção física é apresentado na Figura 7.

A dessorção de grande parte do CO₂ ocorre em temperaturas de entre 50 °C e 80 °C, portanto o aquecimento do meio de absorção é necessário. A remoção completa do H₂S só é possível por aquecimento do líquido de lavagem em temperaturas entre 200 °C a 350 °C, portanto uma etapa anterior de dessulfurização do biogás é indispensável.

Figura 7 – Fluxograma do processo de absorção física



Fonte: Empresa ÖKOBIT GmbH.

4 COMPARAÇÃO ENTRE VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS

A escolha do processo para a purificação do biogás depende não apenas dos parâmetros econômicos, mas também dos parâmetros técnicos como as propriedades do biogás a ser tratado, sendo de maior importância a análise dos gases CO₂, H₂S e NH₃, pois os processos têm exigências diferenciadas segundo etapas de tratamento preliminares. Os processos de lavagem física e de lavagem sob pressão não necessitam de etapas preliminares de tratamento do biogás, especialmente, de dessulfurização. Porém isso pode resultar em um aumento do consumo do meio de lavagem.

O enriquecimento do metano no gás produzido para concentrações acima de 96% é atingido por todos os processos apresentados. Intrínseco a todos os processos é uma perda de metano através do gás exaurido que resulta não apenas em uma – mesmo que pequena – redução do ganho econômico pelo potencial de energia não utilizada, mas também torna necessário também o tratamento dos gases exaurido, conforme decretado em leis dos respectivos países. O tratamento dos gases exaurido para o cumprimento dos limites legais só é dispensado no processo de lavagem com aminas. Em contraste, o tratamento dos gases exauridos pode ser dispensado totalmente em outros países europeus devido ao cumprimento dos respectivos limites por todos os processos. O tratamento dos gases exauridos pode ser efetuado por oxidação térmica oxidativa ou por meio de um *flare* para o gás fraco. Teores elevados de metano no gás fraco possibilitam, após adição de biogás não tratado, a combustão em queimadores de gás para o fornecimento de calor de processo.

A regeneração da solução de lavagem nos processos de lavagem química e física precisa de energia térmica. Por exemplo, no processo de lavagem com aminas, a temperatura necessária

para a regeneração é de 160 °C, tornando necessária a combustão de uma parte do biogás ou de outro combustível, como cavacos de lenha, em casos onde outra fonte de calor no local não esteja disponível. Em pequena escala existe a possibilidade de recuperação do calor da regeneração do líquido de lavagem, para o fornecimento de calor de processo.

Comparado com isso, os processos de purificação do biogás que operam com pressão elevada do biogás, por exemplo, os processos de modulação de pressão, de lavagem sob pressão e de membranas, têm uma demanda elevada de energia elétrica. Dependendo das exigências do operador do gasoduto, o aumento da pressão para adequação à pressão do gasoduto, absolutamente necessário em processos que trabalham com pressão normal, pode não ser mais necessário. Uma parte do calor residual do compressor pode ser recuperada e utilizada como calor de processo.

Especialmente os processos de lavagem possibilitam elevada adequação do processo na área de 50% a 100% da capacidade nominal, sem que a qualidade do biometano seja reduzida. Apenas o processo de modulação de pressão apresenta uma margem reduzida para adequação, de $\pm 15\%$.

As vantagens e desvantagens dos diversos processos de purificação do biogás são apresentadas nas Tabelas 2a e 2b.

Tabela 2a – Apresentação das propriedades específicas dos processos para a purificação do biogás

	1	2	3	4	5
Princípio do processo	Purificação a seco (Adsorção)	Lavagem (Absorção física)	Lavagem química (Absorção)	Separação por membranas (Adsorção)	Lavagem física (Absorção)
Variação do processo	PSA com peneira molecular de carbono	Lavagem sob pressão	MEA DEA	Membrana de polímero-	Genosorb®
Efeito de separação	Ligação do gás a um sólido	Dissolução de gases no meio líquido	Dissolução de gases no meio líquido	Permeabilidades diferentes	Dissolução de gases no meio líquido
	Em pressão alta, o CO ₂ adsorve na peneira molecular melhor e mais rápido que o CH ₄ .	CO ₂ dissolvido na água	Reação química	Em pressão alta, o CO ₂ passa mais rápido pela membrana de polímero que o CH ₄	CO ₂ dissolvido na solução de lavagem
Pré-tratamento necessário	sim	não	sim	sim	não

Fonte: Elaborado pelos autores com dados internos.

Tabela 2b – Apresentação das propriedades específicas dos processos para a purificação do biogás

	1	2	3	4	5
Pressão operacional	4 – 7 bar	4 – 7 bar	Pressão ambiente	8 – 10 bar	4 – 7 bar
Perda de metano	< 3 – 10%	< 1 – 2%	< 0,1%	5%	2 – 4%
Tratamento dos gases exauridos	sim	sim	não	sim	sim
Consumo específico de eletricidade	0,25 kWh/Nm ³	< 0,25 kWh/Nm ³	< 0,15 kWh/Nm ³	0,35 kWh/Nm ³	0,25 – 0,33 kWh/Nm ³
Demanda de calor	não	não	160 °C	não	55 °C – 80 °C
Regulação	± 10% – 15%	50% – 100%	50% – 100%	não informado	50% – 100%

Fonte: Elaborado pelos autores com dados internos.

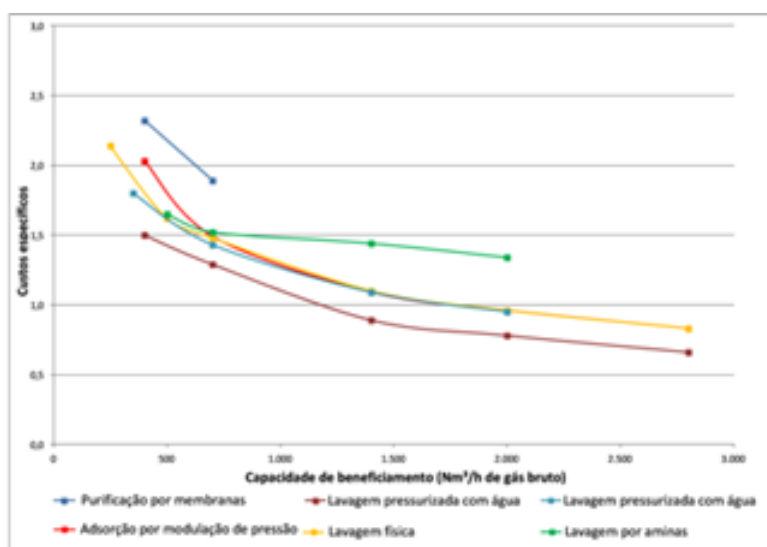
5 CUSTOS PARA PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Não é possível fornecer informações gerais sobre os custos da purificação do biogás, pois as condições específicas de cada país, como salários e preço de energia, bem como, os custos de investimento, influenciam consideravelmente os custos de tratamento. Portanto, os custos gerais de cada projeto devem ser levantados conforme as condições específicas. De qualquer forma, estaremos exemplificando os custos de purificação através de plantas construídas na Alemanha.

A avaliação dos custos de purificação é baseada em um levantamento extenso de dados de fabricantes dos diversos processos de purificação (custos de investimento, de manutenção, de materiais de operação) bem como, as taxas de custos de investimento (cálculo dos juros do capital próprio e de empréstimos, de 7%), período de amortização e preço de energia elétrica de 10 a 15 ct/kWh dependendo do tamanho da instalação (ADLER *et al.*, 2014).

Foram incluídos na pesquisa os fabricantes de sistemas de lavagem com aminas, lavagem sob pressão, de modulação de pressão e de separação por membranas. Os custos de investimento mostraram diferenças claras entre os diversos sistemas de purificação do biogás, com a mesma capacidade. Os custos específicos de investimento apresentam o decréscimo esperado com o aumento da capacidade e se encontram entre 4.000 €/Nm³ de biogás bruto para um sistema de purificação com capacidade de 250 Nm³/h, e de 1.400 €/Nm³ de biogás bruto, para uma capacidade de 2.000 Nm³/h de biogás bruto. Os custos específicos da purificação do biogás para os diversos processos, com base nas suposições supracitadas são apresentados na Figura 8. Estes dados não são transferíveis para outros países, porém pode-se assumir que as diferenças dos custos entre os diversos processos permanecem. Ainda, estima-se que devido ao desenvolvimento tecnológico e a otimização dos processos de purificação, os custos de tratamento irão sofrer alterações.

Figura 8 – Custos específicos de diversos processos para a purificação do biogás



Fonte: Adler *et al.* (2014, p. 109).

6 CONCLUSÕES

O uso energético de resíduos e outros materiais residuais bem como, de plantas energéticas cultivadas para este fim, ganha cada vez mais importância em nível global. Além do uso em sistemas termelétricos para a produção de calor e eletricidade, a energia contida nos resíduos e materiais residuais é utilizada através do tratamento anaeróbio com produção do biogás.

A valorização do biogás para gerar o biometano e incorporá-lo a rede de gás natural é uma forma eficiente de utilização da energia. Assim, o local de produção pode estar separado do local de consumo. Para a valorização do biogás várias tecnologias estão disponíveis como a lavagem física e química, a adsorção por pressão variada bem como, o processo de separação por membranas. Todas essas tecnologias chegaram a um pré-desenvolvimento comercial, sendo capaz de produzir o biometano após processos específicos de valorização do gás bruto, garantindo o condicionamento avançado e a odorização que atenda aos requisitos da rede de gás natural.

No âmbito do planejamento deve-se avaliar as exigências à injeção existentes no local, além das exigências relacionadas à qualidade do gás.

A escolha do processo para a purificação do biogás depende não apenas dos parâmetros econômicos, mas também dos parâmetros técnicos como as propriedades do biogás a ser tratado, sendo de maior importância a análise dos gases CO_2 , H_2S e NH_3 .

Os processos de lavagem física e de lavagem sob pressão não necessitam de etapas preliminares de tratamento do biogás, especialmente, de dessulfurização. Porém isso pode resultar em um aumento do consumo do meio de lavagem.

O enriquecimento do metano no gás produzido para concentrações acima de 96% é atingido por todos os processos apresentados, porém a perda de metano, em todos os processos, através do gás exaurido, resultando na redução do ganho econômico e tornando necessário o tratamento destes gases, conforme determinação legal.

Especialmente os processos de lavagem possibilitam elevada adequação do processo na área de 50% a 100% da capacidade nominal, sem que a qualidade do biometano seja reduzida. Apenas o processo de modulação de pressão apresenta uma margem reduzida para adequação, de $\pm 15\%$.

Ainda, estima-se que devido ao desenvolvimento tecnológico e a otimização dos processos de purificação, os custos de tratamento irão sofrer alterações.

REFERÊNCIAS

- ADLER, P.; BILLIG, E.; BROSIOWSKI, A.; DANIEL-GROMKE, J.; FALKE, I.; FISCHER, E.; GROPE, J.; HOLZHAMMER, U.; J. POSTEL; J. SCHNUTENHAUS; K. STECHER; G. SZMONSZED; M. TROMMLER; W. URBAN. **Leitfaden Biogasaufbereitung und – einspeisung**, Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 5. vollst. überarb. Aufl., Gülzow. 2014.
- BEIL, M.; W. BEYRICH; HOLZHAMMER, U.; KRAUSE, Th. **Biomethan**, Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Gülzow. 2012.
- DVGW-Arbeitsblatt G 260 “**Gasbeschaffenheit**”, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Ausgabe August 2008.
- DVGW-Merkblatt G 262 “**Nutzung von deponie-, Klär- und Biogasen**”, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., (Utilization of gases from landfill, sewage plants and of biogases) Ausgabe November 2004.
- HOFMANN, F.; PLÄTTNER, A.; LULIES, S.; SCHOLWIN, F.; KLINSKI, St.; DIESEL, K.; URBAN, W.; BURMEISTER, F. **Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz**; Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow, 2006.
- ÖKOBIT GmbH. ÖKOBIT – The biogas experts. Disponível em: <<http://www.oekobit-biogas.com/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.
- SCHMALSCHLÄGER, Th.; KLEIN, K.; TAUTU, V.; DREXLER, Chr. **Gasseitige Bündelung von Biogasanlagen und gemeinsame Einspeisung ins Erdgasnetz – Endbericht**. Machbarkeitsstudie gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten. 2007.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

DORSTEWITZ, Helge; HÜTTNER, Axel. Tecnologias de Purificação de Biogás. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246l>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Mai – 2017**.

Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: *status quo* na Alemanha e no Brasil

Energetic Use of Biogas in Wastewater treatment Plants: status quo in Germany and Brazil

Engenheira Hélinah Cardoso Moreira

Engenheiro Victor Bustani Valente

RESUMO

O Brasil apresenta um déficit significativo no tratamento de esgoto, com apenas 40% do esgoto gerado sendo tratado adequadamente. No entanto, o governo, e mais recentemente o setor privado, têm investido fortemente no setor de saneamento (cerca de 10 bilhões de euros desde 2007), a fim de, dentre outras ações, garantir a cobertura de tratamento para toda a sua população, com metas até 2033. Atualmente, o setor de saneamento é responsável por 3% do consumo de energia elétrica do setor público, o que representa o segundo maior custo operacional das prestadoras de serviço de saneamento. O lodo, um subproduto do tratamento de esgoto, também representa um alto custo operacional para o sistema. Com o crescimento esperado do setor, deve ser considerado um gerenciamento mais sustentável dos subprodutos do tratamento, bem como uma gestão energética mais eficiente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Portanto, o aproveitamento do biogás produzido na estação para a geração de energia térmica e elétrica, torna-se estratégico para a redução de custos e impactos no meio ambiente, como a emissão de gases de efeito estufa. Este artigo aborda o potencial de utilização de biogás nas ETEs no Brasil, e descreve o desenvolvimento deste mercado na Alemanha, como um exemplo de sucesso.

Palavras-chave: Aproveitamento energético de Biogás. Eficiência energética. Estação de tratamento de esgoto. Tratamento do lodo. Reatores anaeróbios.

ABSTRACT

Brazil still has a significant deficit of waste water treatment, with only 40% of the sewage generated being properly treated. Nevertheless, the government, and more recently the private sector, have been investing heavily in this sector (around 10 billion euros since 2007) in order to guarantee treatment coverage for its whole population. Today, the sanitation sector accounts for 3% of the electricity consumption of the public sector, representing the second largest operating cost of the water and wastewater utilities. The sludge, a byproduct of the wastewater treatment, also represents a high operating cost for the system. With the expected growth, a more sustainable management of the byproducts, as well as an more efficient energy management should be considered.

Therefore, the use of biogas produced in the WWTP for thermal and electricity generation, becomes strategic for reducing costs and impacts in the environment, such as Green House Gas (GHG) emissions. This article addresses the potential for Biogas use in WWTP in Brazil, and describes the development of this market in Germany, as an example of success.

Keywords: Biogas use. Energy efficiency. Wastewater treatment plant. Sludge treatment. Anaerobic reactors.

1 INTRODUÇÃO

O Plano Nacional de Saneamento (PLANSAB) apresenta como meta para o setor a universalização dos serviços de água e esgoto até 2033. Atualmente o panorama mostra que ainda há muito que se fazer, especialmente com o esgoto, visto que apenas 39,7% é devidamente tratado.

Desde 2007, como política de governo, o setor de saneamento começou a receber maiores investimentos, quando se iniciou o programa de aceleração de crescimento (PAC) que até o ano de 2014 previu investimentos de 70 bilhões de reais em obras de infraestrutura no setor.

Somado à meta ambiciosa e ao cenário do crescimento do número de Estações de Tratamento de Esgoto no país, as despesas com energia elétrica das prestadoras de serviço em saneamento atingiram o montante de R\$ 3,14 bilhões no ano de 2011, o que representa em média seu segundo maior custo operacional.

Por outro lado, toda ETE também convive com o lodo, um subproduto do tratamento de esgoto custoso e trabalhoso de ser gerenciado. A quantidade gerada de lodo de esgoto cresce proporcionalmente ao aumento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, que, por sua vez, deve acompanhar o crescimento populacional. Em 2010, estimativas apontavam uma produção nacional de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, considerando que o tratamento de esgoto atingia apenas 30% da população urbana (PEDROZA *et al.*, 2010).

De forma geral, as estações de tratamento de esgoto costumam realizar apenas o tratamento básico desse resíduo, adensando-o e elevando um pouco seu teor de sólidos (TS), até uma média de 20%. A partir daí, o lodo é destinado para um aterro sanitário, contendo majoritariamente água. Essa logística além de ser custosa, pode se tornar insustentável a partir deste ano. A Política Nacional de Resíduos Sólidos ([Lei nº 12.305/2010](#)) define que a partir de agosto apenas rejeitos poderão ser encaminhados para aterros e, neste caso, o lodo, dificilmente poderia ser considerado um rejeito, sem possibilidade de uso mais nobre.

Somado a isso, vale ressaltar que os custos para a destinação de lodo em aterro vêm aumentando a cada ano, em vista da falta de disponibilidade de áreas para tal disposição e pelo aumento do custo de transporte, somado às grandes distâncias normalmente percorridas. Algumas das grandes companhias de saneamento, como SABESP e SANEPAR, chegam a pagar R\$ 140,00/t (TS de 20-30%) e de R\$ 180,00 – 240,00/t (TS 40-65%), respectivamente.

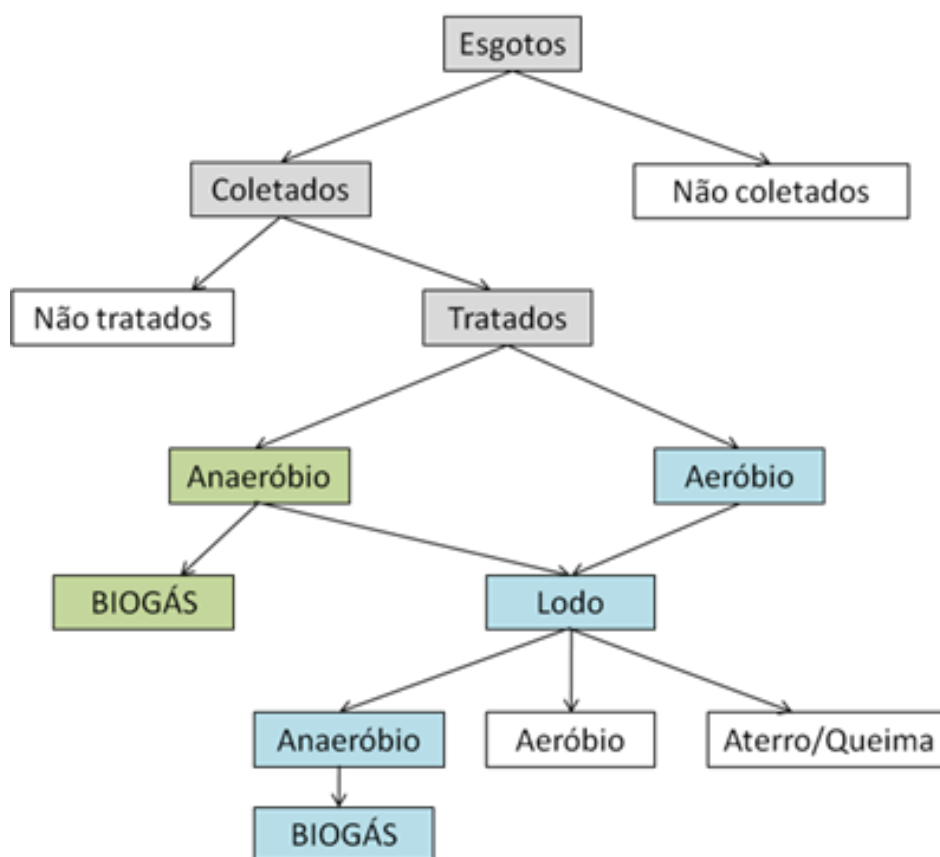
A partir desse contexto, as prestadoras de serviço vêm buscando alternativas para a logística do lodo, sendo uma delas aproveitar o potencial do biogás produzido em sistemas anaeróbios de tratamento para a sua secagem.

2 AS FONTES POTENCIAIS DE BIOGÁS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O biogás é uma mistura de gases gerados durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica, composta basicamente de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). Sua composição é variável, dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica a ser digerida, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato (NOYOLA *et al.*, 2006).

Em ETEs, a produção do biogás ocorre ao longo do tratamento dos efluentes, nos reatores anaeróbios, ou durante a digestão do lodo (Figura 1).

Figura 1 – Produção de biogás a partir de diferentes opções de tratamento dos esgotos



Fonte: Elaboração própria dos autores (2014).

Os constituintes usualmente presentes no biogás gerado por meio desses processos de digestão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterro sanitário	Digestores de Lodo
Metano – CH ₄	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás Carbônico – CO ₂	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25*	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3	Traços a >1	-
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	até 1000
Oxigênio – O ₂	%	traços	0,8	-

* A elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico.

Fonte: Lobato (2011, p. 49).

Uma característica importante do setor de saneamento no Brasil é o uso de sistemas anaeróbios para tratamento de esgotos. Nos países europeus e América do Norte, as ETEs urbanas utilizam sistemas de aeração prolongada, que consomem mais eletricidade, porém ocupam menores áreas. No Brasil, devido ao clima tropical e o forte incentivo do FINEP, via o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), sistemas como reator anaeróbio de fluxo ascendente, popularmente conhecido como UASB, têm sido cada vez mais adotados. Os UASBs são reatores que ocupam áreas menores que as lagoas e sistemas naturais em geral, mas demandam menos energia que os sistemas mecanizados e aeróbicos convencionais.

Esses reatores são uma fonte de biogás, que pode ser capturado e reutilizado de diferentes formas dentro da ETE. Como vantagens para o aproveitamento deste gás tem-se:

- Fonte renovável de energia;
- Redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera;
- Fonte adicional de renda ou custo evitado;
- Apto para geração distribuída ou centralizada;
- Armazenável (horário de ponta);
- Versátil no uso (térmico/elétrico/veicular);
- Possibilidade de coprodução de biofertilizantes.

O biogás também pode ser produzido a partir do tratamento anaeróbio do lodo. O lodo gerado no processo precisa ser tratado antes de ser reaproveitado na agricultura ou em caldeiras ou encaminhado para aterro. Esse tratamento varia de acordo com o uso final do lodo. Em todos os casos, porém, é preciso reduzir o seu volume por meio do adensamento e desaguamento, e reduzir seu odor, por meio da estabilização da matéria orgânica.

A digestão do lodo aeróbio em digestores anaeróbios é uma solução adotada em muitas estações de tratamento de esgotos em países desenvolvidos para estabilização da matéria orgânica, porém ainda pouco aplicada no Brasil.

Apesar das poucas experiências de aproveitamento energético utilizando biogás em ETEs no Brasil, os dois casos que existem atualmente de grande escala são de aproveitamento energético de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo, na COPASA em Minas Gerais e em Ribeirão Preto, São Paulo.

A ETE Ribeirão Preto foi, em março de 2011, a primeira do país a reaproveitar energeticamente o biogás, fazendo-o através do uso de dois motores de cogeração a ciclo Otto, de 752 kwh cada. A ETE apresenta uma potência instalada de 1,5 MW e gera cerca de 16.725 kwh/dia, conseguindo suprir cerca de 60% do consumo energético da planta.

Já a COPASA iniciou o aproveitamento energético do biogás em julho de 2011, na ETE Arrudas, com uma potência instalada de 2,4 MW. Para a cogeração são utilizadas 12 turbinas de 200 kw cada, suprimindo cerca de 70% do consumo energético elétrico da planta. Vale ressaltar que a energia térmica do biogás é utilizada para a secagem térmica do lodo, na etapa posterior.

3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS EMPREGADAS NO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS

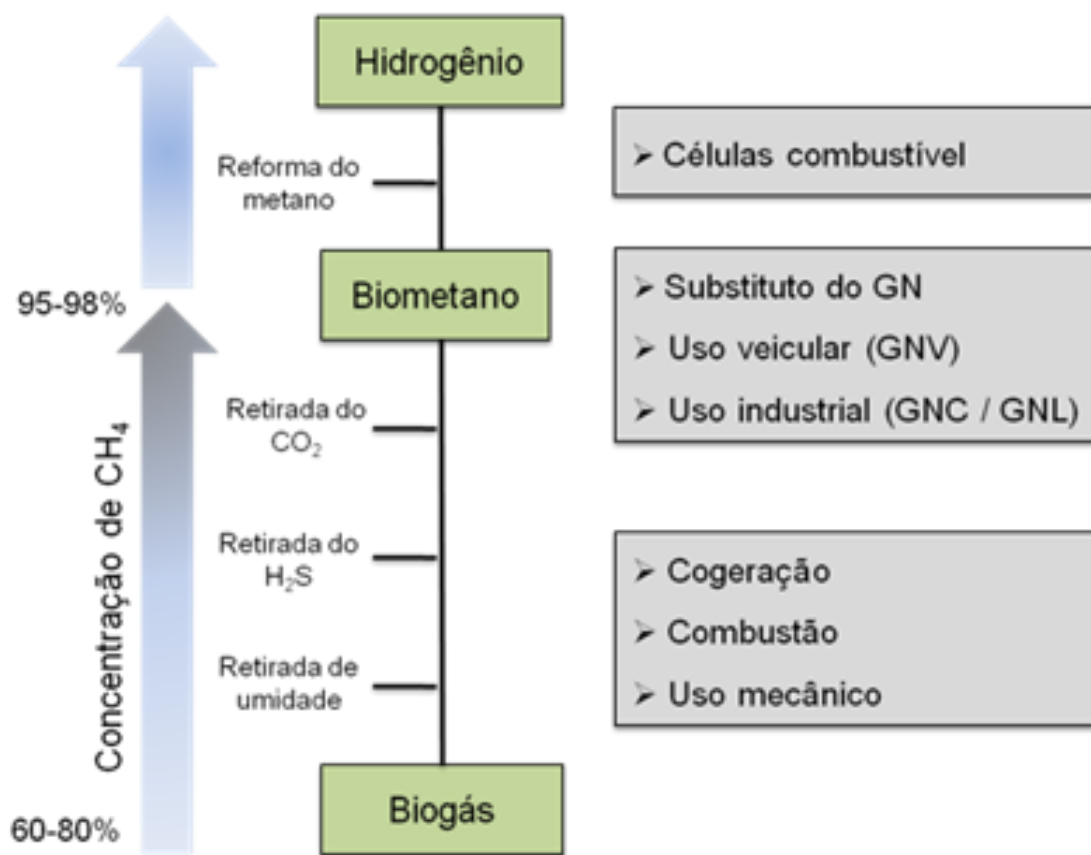
O biogás pode ser convertido em energia mecânica, elétrica ou térmica. Atualmente existem algumas tecnológicas consolidadas de uso energético deste gás no mundo. Estas se resumem a cogeração, uso direto no processo de tratamento de esgotos (i.e., sopradores) e recuperação do calor em caldeiras.

Além dos usos estabelecidos, na atualidade novas possibilidades de uso por meio de tecnologias inovadoras estão se estabelecendo no setor de saneamento. Estas se concentram principalmente na conversão do biogás em biometano e em hidrogênio. A razão para isso é que, tanto o biometano como o hidrogênio proporcionam uma gama maior de utilizações com eficiências energéticas superiores.

As diferentes rotas de aproveitamento do biogás oriundo de ETEs, atuais e em fase de pesquisa, estão ilustradas na Figura 2.

As diferentes formas de aproveitamento do biogás vão depender das características desse combustível. Dependendo das faixas de concentração das substâncias que compõe o biogás, este pode ser utilizado para diferentes fins e para tipos de tecnologia.

Figura 2 – Potenciais caminhos de aproveitamento do biogás



Fonte: Elaboração própria, baseado em BTE, IFEU ISA (2004).

4 A EXPERIÊNCIA DA ALEMANHA

Na Alemanha, desde o ano de 2006 é proibido o envio de resíduos orgânicos para o aterro, e a gestão do lodo se concentra o máximo possível dentro da própria ETE, buscando-se sempre reutilizar o residual do tratamento.

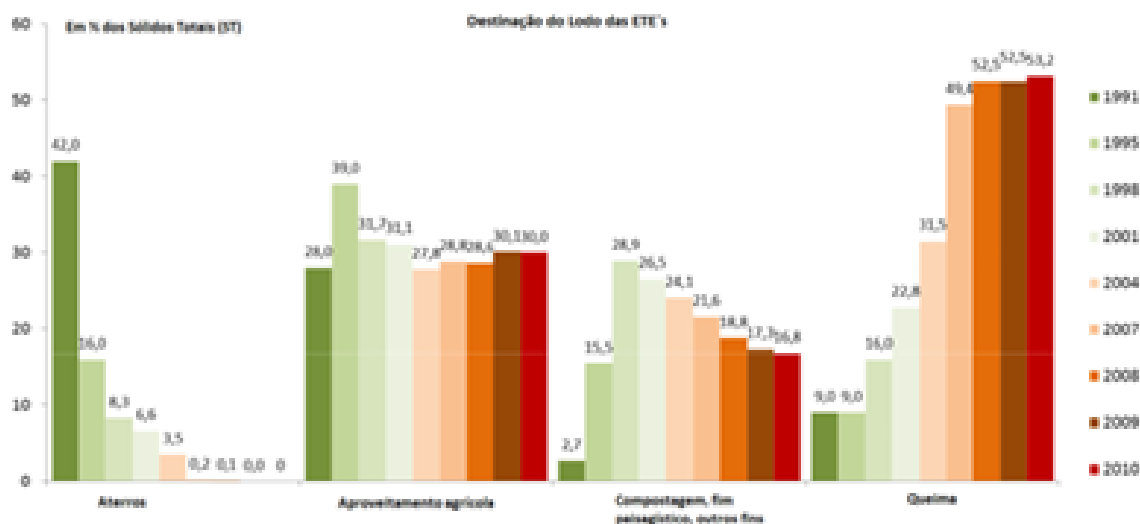
A Figura 3 mostra como se deu o tratamento do lodo ao longo dos anos, indicando claramente o fim da disposição em aterros e um aumento da queima do lodo, após sua digestão anaeróbia. Com a queima, o lodo atinge um percentual de sólidos acima de 90% e muitas vezes é conduzido às indústrias de cimento como um combustível complementar ao carvão.

No caso alemão, existiram leis que interferiram diretamente na gestão de resíduos, bem como um incentivo financeiro para as ETEs reaproveitarem o biogás. A tarifa *feed-in*, praticada no país, prevê o pagamento de valores maiores pela energia elétrica a partir do biogás injetada na rede. Isso torna esta aplicação viável economicamente.

Das cerca de 10.000 ETEs existentes na Alemanha, 1.190 produzem biogás. Essa produção atinge atualmente 710 milhões de m³/ano de biogás. A escala de tratamento destas ETEs mostra que este número é significativo, pois 2.214 ETEs representam cerca de 90% da capacidade

de tratamento do país (BMU, 2011). O biogás produzido é utilizado para gerar eletricidade e calor, ou simplesmente para geração de calor utilizado no processo de aquecimento do próprio digestor e para secagem do lodo.

Figura 3 – Evolução da destinação final do lodo de ETEs na Alemanha



Fonte: Agência Federal do Meio Ambiente, compilação de dados da Agência de Estatística da Alemanha (2011).

Ao todo, são mais de 1 TWh por ano de eletricidade gerada nas ETEs alemãs, que produzem em média 50% de sua energia consumida, o que representa uma geração de energia a partir do esgoto, *per capita*, de 11,5 kWh/(hab-ano).

Mesmo levando em consideração outras condições quadro neste país, é indubitável que as ETEs não objetivam apenas reduzir a carga orgânica no esgoto. Elas funcionam como unidades produtoras de energia, utilizando inclusive da codigestão para aumentar a produção de biogás e consequentemente, sua autossuficiência energética.

Por fim, o modelo que mais se observa nas plantas de esgoto alemãs é a tecnologia de lodos ativados para tratamento de esgoto, com a digestão anaeróbia do lodo cofermentado com outros substratos que aumentam a produção de biogás. Com o biogás produzido, das diversas aplicações as mais comumente encontradas são: a cogeração, aproveitando a energia térmica e elétrica ou a purificação do gás para biometano, injetando-o na rede de gás natural. Vale ressaltar que quanto às alternativas de uso de biogás, sempre deverá ser analisado cada projeto individualmente, pois a melhor aplicação vai sempre variar caso a caso.

5 CONCLUSÕES

A utilização do biogás em ETEs para geração de eletricidade é uma alternativa altamente promissora para o setor de saneamento no Brasil e representa também uma mudança de paradigma. Ao agregar valor e dar o *status* de fonte renovável de energia a um subproduto das atividades

humanas que sempre foi visto como um passivo ambiental e ignorado pelo poder público, esta alternativa representa um grande passo em direção de uma sociedade mais sustentável.

Em países desenvolvidos se observa uma maior atenção às questões de eficiência energética. A Alemanha é um exemplo de sucesso e de que o aproveitamento energético de biogás em ETEs é tecnicamente viável. Para tanto, os marcos legais foram importantes para que este modelo de negócio se consolidasse no setor.

Na realidade do Brasil, muito ainda tem que ser feito no saneamento como um todo, em especial no tratamento de esgoto, mas a forma que o setor vai se estruturar pode ser mais eficiente, caso seja dada a devida importância para isso.

As prestadoras de serviço em saneamento estão em busca de alternativas que melhorem sua gestão operacional e, principalmente, reduzam seus custos. O novo impacto devido a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é um grande estimulante às soluções mais sustentáveis para o sistema. A PNRS traz uma nova sistemática para a gestão de resíduos no país, particularmente no que diz respeito à introdução de novas tecnologias para o seu aproveitamento.

Por utilizar o tratamento anaeróbico do esgoto, assim como ter a alternativa de tratar o lodo de forma anaeróbia, o Brasil apresenta um grande potencial de produção de biogás nas estações de tratamento de esgoto. O conhecimento sobre este potencial, a capacitação técnica de quem trabalha no setor para aproveitá-lo e políticas que incentivem este aproveitamento, são os pilares para tornar realidade o uso energético do biogás no país.

REFERÊNCIAS

- BMU – Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. **Development of renewable energy sources in Germany 2011**. Graphics and tables Version: July 2012. BMU-KI III – Based on statistical data from the Working Group on Renewable Energy-Statistics (AGEE-Stat). Disponível em: <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/english/pdf/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab_en.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a **Lei nº 9.605**, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 20 dez. 2013.
- BRASIL. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNISS)**. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2011. Brasília: MCIDADES / SNSA, 2013. Disponível em: <http://www.engenhariaambiental.unir.br/admin/prof/arq/DiagAE_2011.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e Diretrizes Básicas**. Brasília/DF: MME / Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2011. Disponível em: <http://www.orcamentofederal.gov.br/projeto-esplanada-sustentavel/pasta-para-arquivar-dados-do-pes/Plano_Nacional_de_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2013.

BTE, IFEU, ISA 2004. **Ökobilanzielle Bewertung neuartiger Energieversorgungssysteme für Kläranlagen unter besonderer Berücksichtigung der Wasserstofftechnologie.**

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des MUNLV NRW, AZ IV – 9 – 042 426, Dezember 2004.

JENICEK, P.; BARTACEK, J.; KUTIL J.; ZABRANSKA J.; DOHANYOS, M. Potentials and Limits of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: Energy Self-Sufficient Municipal Wastewater Treatment Plant? **Water Science and Technology**, v. 66, n. 6, p. 1277-1281, doi: 10.2166/wst.2012.317, 2012.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/189D.PDF>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

NOYOLA, Adalberto; MORGAN-SAGASTUME, Juan Manoel; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, Jorge E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v. 5, p. 93-114. 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11157-005-2754-6#page-2>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

PEDROZA, Marcelo Mendes; VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; SOUSA, João Fernandes de; PICKLER, Arilza de Castilho; LEAL, Edina Ruth Mendes; MILHOMEN, Cleide da Cruz. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-188, jul./dez. 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/6HkD7m>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

VAN HAANDEL, Adrianus C.; LETTINGA, Gatz. **Tratamento anaeróbio de esgoto.** Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/zanette_luiz.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2013.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

MOREIRA, Hélinah Cardoso; VALENTE, Victor Bustani. Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: *status quo* na Alemanha e no Brasil. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil.** Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015.**

Versão Atualizada: **Mai – 2017.**

Comportamento dos Aterros quando da Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico

Landfill Behaviour when Disposal of Residues from Mechanical Biological Treatment

Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

RESUMO

O tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) antes da disposição nos aterros, transforma completamente, a longo prazo, o comportamento físico e químico dos resíduos depositados em relação aos resíduos *in natura* (fresco). Em consequência das diferentes propriedades dos materiais, a densidade de aterramento poderá aumentar, a estabilidade do talude poderá ser reduzida e o volume do chorume e o carregamento de base do aterro também serão reduzidos, e também poderá ocorrer contaminação por escoamento superficial provenientes das áreas de disposição. Desde o ano de 2005, na Alemanha, a disposição em aterros é permitida apenas para os resíduos tratados – desta forma enfatiza-se a aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos (TMB). Este artigo, a princípio, irá descrever a qualidade dos resíduos a serem dispostos em aterros resultante do cumprimento dos requisitos da Portaria Alemã DepV de Aterro (ALEMANHA, 2013). Serão explicadas as consequências em decorrência das mudanças nos padrões físicos, químicos e biológicos. Além dos padrões físicos, as emissões resultantes da disposição de resíduos também serão ilustradas com base nas medições realizadas em área demarcada para estudo durante um período de três anos. Possíveis novos conceitos serão apresentados e discutidos. Um panorama dos efeitos desses novos cenários na operação do aterro que influenciam os custos de operação também será discutido.

Palavras-chave: Aterro. Tratamento mecânico-biológico. Resíduos. Custos. Operação.

ABSTRACT

The treatment of municipal solid waste (MSW) before disposal on landfills changes completely the physical and chemical long-term behaviour of the deposited waste material compared to fresh waste. As a consequence of the different material properties, the emplacement density will increase, the slope stability reduced and the leachate volume and load at the base of the landfill will also be reduced, but at the same time contaminated surface runoff from the emplacement areas may be generated. Since the year 2005 in Germany only treated waste – here mechanical-biological treated waste (MBT) are only looked at – is allowed to be deposited on landfills. The following paper describes at first the product quality of the wastes to be landfilled resulting from the fulfilment of the requirements of the German Landfill Ordinance DepV (GERMANY, 2013). The

consequences of the change of the physical, chemical and biological behaviour of the deposited waste are explained. Besides the physical behaviour also the emissions resulting from disposal are illustrated on the basis of measurement made on a test area with fixed boundary conditions over a period of three years. New possible concepts are presented and discussed. In a short out look the effect of these new scenarios in landfill operation on the costs for operation is shown.

Keywords: Landfill. Mechanical and biological treatment. Residues. Costs. Operation.

1 INTRODUÇÃO

A implementação da Portaria de aterros sanitários na Alemanha, a partir de junho de 2005, restringiu a disposição final, em aterros sanitários, apenas aos resíduos tratados. As características físicas, químicas e biológicas dos resíduos, em comparação com os resíduos dispostos anteriormente, são parcialmente alteradas, fundamentalmente, de acordo com o tratamento aplicado. Prévias experiências dos últimos trinta anos com a operação de aterros sanitários demonstraram que os padrões dos resíduos durante a disposição e após essa etapa também são diferentes em muitos aspectos. Isto está relacionado ao material gerado tanto do tratamento de resíduos pelo processo térmico como o mecânico-biológico. A seguir, somente os resíduos provenientes do tratamento mecânico-biológico serão considerados, pois na Alemanha as escórias resultantes da incineração de resíduos são quase que totalmente utilizadas para a construção de estradas.

Na Portaria alemã de aterro são fornecidos os critérios de alocação de resíduos para diferentes classes de aterros sanitários. Resíduos provenientes do TMB devem ser dispostos em aterros que atendam aos requisitos exigidos pela classe II de aterro, ou seja, a mesma classe de aterro para os RSU. Os critérios de classificação dos materiais do TMB estão listados no Anexo 3 da Portaria.

Além de um grande número de critérios para a avaliação da estabilidade química, o Anexo 3 inclui parâmetros exclusivos para o tratamento mecânico-biológico (Tabela 1). Com esses parâmetros – chamados de “parâmetros de estabilidade” – a redução de emissão do material de TMB é garantida. Outro grupo de valores-limite tem por objetivo o incentivo para a reutilização de produtos de poder valor calorífico, chamados “parâmetros de utilização”. Com este parâmetro é assegurado que a maior parte do material como plástico, madeira etc., seja separada para ser utilizado na produção de energia, e que a matéria orgânica restante seja de origem biológica inativa.

Tabela 1 – Parâmetros de estabilidade e de utilização para os materiais do TMB

Parâmetro de estabilidade	Parâmetro de utilização
$RI_4 \leq 5 \text{ mg/g MS}$ ou $GB_{21} \leq 20 \text{ l/kg MS}$ $DOC_{Eluate} \leq 300 \text{ mg/l}$	Valor calorífico superior $H_o \leq 6.000 \text{ kJ/kg MS}$ ou $TOC_{Solid} \leq 18\% \text{ em MS (massa seca)}$

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Após o tratamento mecânico-biológico e o cumprimento dos valores requeridos, os materiais do TMB geralmente apresentam as características listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do material proveniente da planta de TMB

Tamanho do material	~ < 40 to 60 mm
Teor de água	~ 35% em WM
Teor de matéria orgânica	~ < 31% em MS
Potencial de gás residual	< 10 to 45 m ³ /Mg MS
Fluxo de gás residual	< 3 l CH ₄ /m ² × h
Potencial de oxidação do metano de materiais do TMB	10 to 20 l CH ₄ /m ² × h

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

2 PROPRIEDADES FÍSICAS

O tratamento mecânico influencia significativamente os aspectos mecânicos dos resíduos tratados a serem aterrados.

2.1 Comportamento Mecânico

Os valores obtidos para a densidade de aterramento, os recalques resultantes, a estabilidade e o comportamento hidráulico são diferentes daqueles identificados durante o aterramento de RSU frescos.

2.1.1 Densidade da massa

O tratamento mecânico de resíduos pode ter dois efeitos contrários na densidade dos resíduos. Por um lado, a densidade de armazenamento aumenta através da remoção dos materiais leves e, e por outro lado, pela separação de impurezas “pesadas” (metais, pedaços de concreto etc.) em princípio, a densidade será reduzida. A Tabela 3 mostra a variação das densidades de massa através do tratamento mecânico-biológico de diversos resíduos. Deve ser observado que a diferença no teor de água pouco influencia nos valores das densidades.

Tabela 3 – Mudanças de densidade segundo aspectos volumosos através do tratamento mecânico-biológico de resíduos

Tamanho do material [mm]	RSU [Mg/m ³] (FM)	TMB [Mg/m ³] (FM)
< 30	0,75	0,67 – 0,76
< 40	0,50	0,70 – 0,90
< 80	0,50	0,97 – 1,00
Sem triagem	0,80	0,65

Fonte: Turk (1998).

2.1.2 Densidade de aterramento

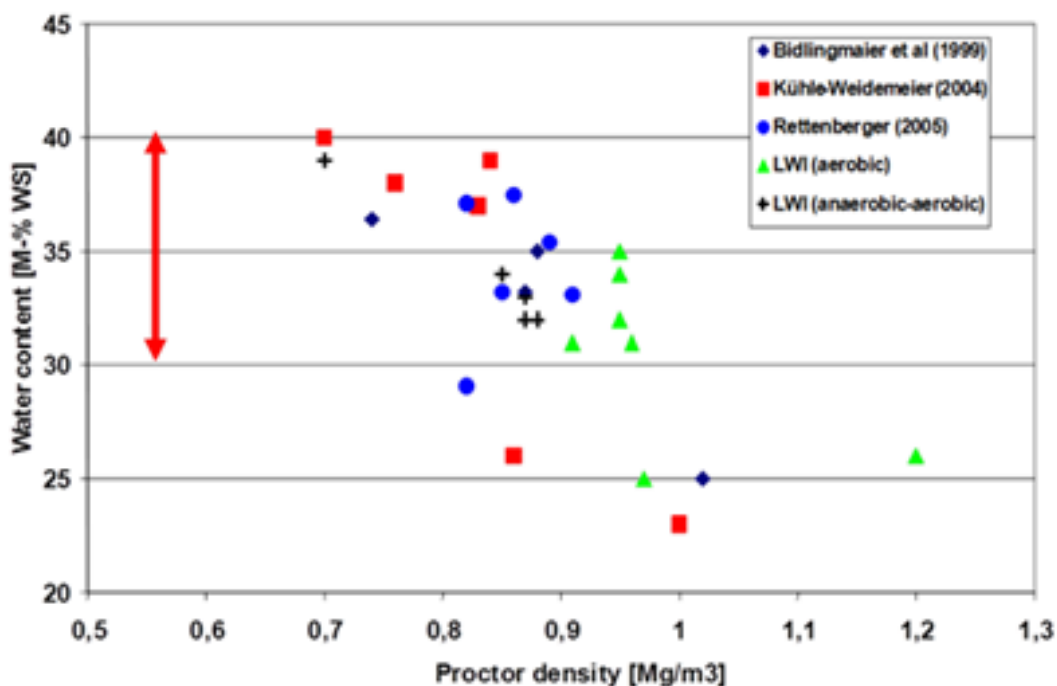
A estrutura do material proveniente do TMB a ser disposta nos aterros é influenciada pelos limites exigidos pela Portaria do aterro. Para que se possa atender aos valores limites firmados para o poder caloríficos e o teor de carbono orgânico total (COT) é necessário um peneiramento inferior a 60 ou 80 mm. A distribuição de diferentes tamanhos de materiais vai ficando mais homogênea e o material total vai tornando-se mais fino. Devido ao fato de que a fração grosseira separada consiste, na sua maior parte, de partículas leves, como por exemplo, plásticos finos e madeira, a densidade de disposição do material processado por meio do TMB é maior quando comparada com a dos resíduos frescos.

Um critério decisivo para a construção e operação de um aterro sanitário é a densidade de compactação que se pode atingir na prática. A determinação da densidade de compactação em testes de campos, de acordo com a GDA, segundo recomendação da E 3-13 (DGGT, 1997), demanda um consumo de tempo e de recursos financeiros. Conseqüentemente, a densidade de compactação é, com frequência, determinada antecipadamente com a ajuda do teste geotécnico de Proctor. Esse teste permite uma rápida avaliação do alcance da densidade de compactação, sob condições comparativas do teste. Através desse método, a determinação antecipada do teor de água pode ser realizada, cuja qual deve ser ajustada durante o tratamento de resíduos a fim de se obter uma densidade de aterramento ideal.

Os valores do teste de Proctor, no que diz respeito à melhoria das condições de aterramento, permitem que se tenha uma ideia melhor se as características dos resíduos a serem depositados no aterro podem ser sensíveis ao incremento das condições de compactação. As características serão toleráveis caso não sejam usados os padrões de análises químicas. A relação entre o diâmetro máximo das partículas de resíduos e os diâmetros do cilindro de Proctor deve ser levada em consideração quando se realizam ensaios de Proctor. Então, via de regra, o tamanho máximo de grão de resíduos de 60 mm não deve ser ultrapassado quando for utilizado um cilindro de Proctor com um diâmetro de 250 mm.

A Figura 1 ilustra densidades de Proctor determinadas a partir de diferentes resíduos tratados pelo TMB. Em relação a estes valores, deve ser lembrado que a densidade Proctor sempre se refere à matéria seca (MS), ao contrário da densidade de aterramento, na qual, a matéria fresca é geralmente usada como referência, condição esta também válida para a indicação do teor de umidade. As densidades de Proctor para resíduos aerobicamente estabilizados encontram-se no intervalo de 0,70 a 1,20 Mg/m³ (MS), levando em consideração que os materiais provenientes do tratamento anaeróbio tendem a apresentar as densidades de Proctor menores, e são mantidos na faixa de valores inferiores.

Figura 1 – Densidade de Proctor e teores de umidades associados aos materiais provenientes do TMB



- *Water content* [M-% WS] ⇒ Teor de umidade [M-% WS]
- *Proctot density* [Mg/m³] ⇒ Densidade de Proctor [Mg/m³]

Fonte: Elaborado pelos autores.

As densidades de aterramento que podem ser atingidas na prática podem ser diferentes da densidade de Proctor. Densidades maiores podem ser atingidas durante a disposição de resíduos nos aterros (Tabela 4). Entre outras razões, o motivo está nos testes realizados no laboratório, onde a carga é aplicada na forma de placa, o que é contrário à prática operacional do aterro, na qual os resíduos são colocados em um compactador ou trator de esteira, o que resulta em um efeito de trituração adicional, ou seja, as partículas de resíduos são deslocadas horizontalmente para o outro lado, resultando em uma tensão adicional. Esses efeitos podem ser repetidamente observados durante o aterramento de materiais provenientes do TMB, em área de teste, onde os resíduos são

dispostos por meio de um trator de esteira e compactados com rolo dinâmico. As densidades de aterramento medidas nos testes de campo por meio de um método de substituição de volume, foram de 25% maior que as densidades previamente determinadas pelo teste de Proctor. Nos casos em que os teores de umidade foram maiores que o ideal, menores densidades de aterramento foram atingidas.

Tabela 4 – Comparação entre as densidades de deposição atingidas – Proctor e teste *in-situ*

Tratamento	Material [mm]	Proctor		Teste de Campo	
		Densidade [Mg/m ³]	TA [%]	Densidade [Mg/m ³]	TA [%]
Aeróbio	Ma < 25	0,91	31	0,78 – 0,97	38 – 40
	Me < 60	0,97	25	1,17 – 1,45	33 – 35
	Wh < 60	0,96	31	0,92 – 0,97 (-1,12)	38
Anaeróbio/ Aeróbio	Bu < 60	0,87	33	0,85 – 1,08	30
	Nh < 60	0,92	35	0,67 – 1,09	22 – 42

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

O incremento das densidades de aterramento pode causar o aumento de carga na construção dos aterros. Altas densidades de aterramento geram altas tensões na base dos aterros. A base do aterro (fundação), e a impermeabilização de base, assim como o sistema de drenagem de chorume, devem ser dimensionados para cargas mais elevadas. O dimensionamento da base do aterro deve garantir a funcionalidade da impermeabilização e do sistema de drenagem do chorume, caso apareçam recalques maiores. As cargas maiores também devem ser consideradas, quando equipamentos técnicos, como, por exemplo, poços verticais de gás e de chorume ou a construção de obras de poço são dimensionados. Se necessário, a altura máxima do aterro deve ser ajustada.

2.1.3 Recalques

Recalques são causados pela pressão de carregamento e também por meio da degradação microbiana da matéria orgânica presente na massa aterrada. Com a combinação da alta densidade com a degradação preliminar da matéria orgânica, resultante do tratamento biológico, espera-se que os recalques nos aterros de TMB sejam consideravelmente reduzidos e mais homogêneos, em comparação com os aterros de RSU. Até o momento, quase nenhum dado relacionado a recalques em aterros – nos quais os resíduos provenientes de TMB são exclusivamente aterrados – está disponível.

Entretanto, inúmeras medições foram realizadas em RSU frescos. Os níveis de recalque total em um corpo de aterro que podem atingir valores até 40% (KÖLSCH, 1994), ou

respectivamente de até 20% da altura inicial (WIEMER, 1982), demonstraram uma vasta gama de diferentes valores. É preciso lembrar que essas medições foram, muitas das vezes, realizadas após o encerramento da operação do aterro sanitário, e que, portanto, os recalques durante a operação do aterro não foram registrados por completo.

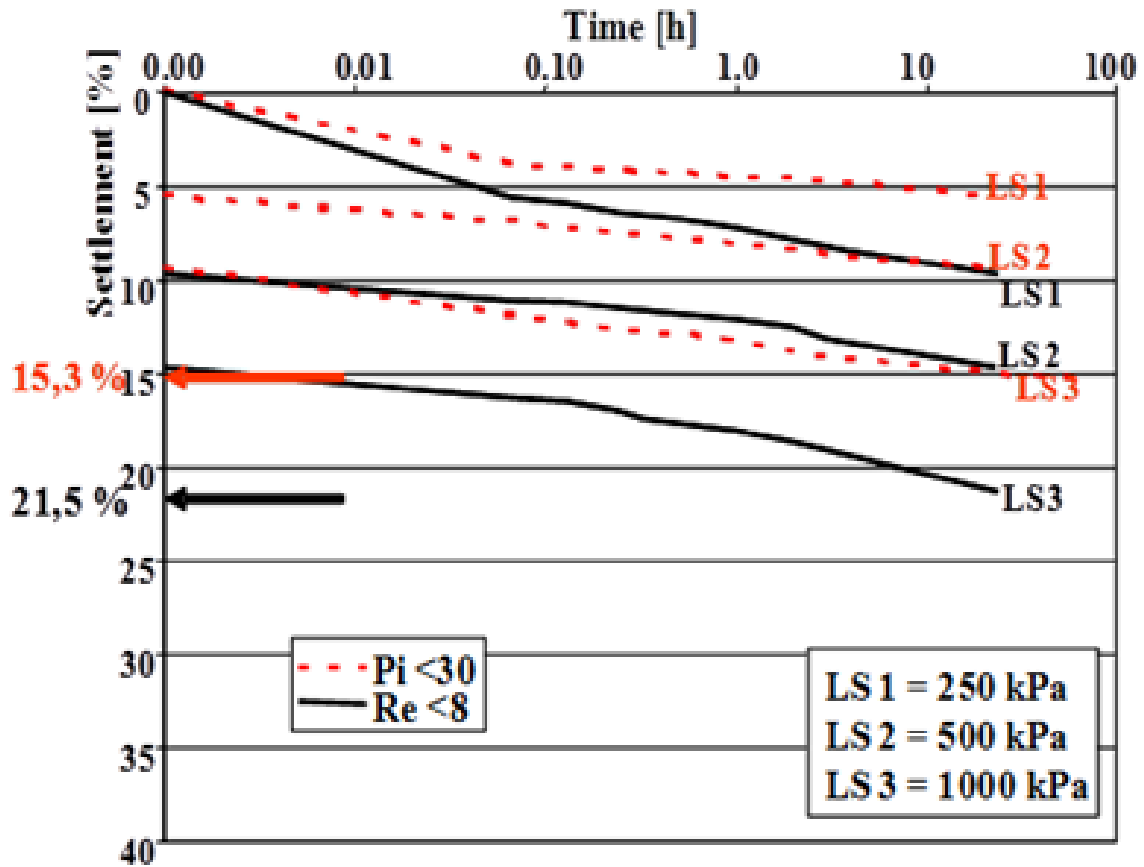
A determinação do recalque em escala laboratorial é realizada analogamente com os testes de mecânica dos solos, e dessa forma, o tamanho máximo de grãos em relação ao teste de implemento usado, também deve ser considerado. Testes de Oedomêtro de RSU antigos (JESSBERGER; KOCKEL, 1993) com diferentes cargas verticais mostraram um recalque total de aproximadamente 35% da altura inicial. Este recalque foi causado apenas pela carga, pois devido à idade dos resíduos, não ocorreram processos biológicos.

Testes de comparação vêm sendo realizados no Instituto Leichtweiß com materiais provenientes do TMB (Figura 2). O material $Re < 8$ foi depositado com uma densidade de $0,95 \text{ Mg/m}^3$, e material $Pi < 30$ com $1,20 \text{ Mg/m}^3$. Três cargas verticais foram aplicadas em ambos os testes e o período de recalque foi determinado. Os dois testes mostraram um recalque menor que 50%, que foram medidos com uma carga vertical similar com os resíduos antigos não tratados. As medições adicionais deixaram claro que uma boa compactação dos resíduos durante o aterramento ($Pi < 30$), definitivamente influencia na intensidade dos futuros recalques. Uma baixa densidade de aterramento pode ser mais tarde ligeiramente melhorada, e apenas por meio de altas sobrecargas, mas será sempre menor quando comparada a um grau ótimo de compactação. Ambos os testes mostram que após o término das medições, os recalques não foram interrompidos. Um teste de Oedomêtro a longo prazo, realizado durante dezoito meses no Instituto Leichtweiß, mostrou que há a ocorrência de movimentação nos resíduos, de modo que os próximos recalques ocorram em baixa intensidade.

Recalques causados pela degradação microbiana também irão ocorrer em resíduos provenientes do TMB, entretanto, considerando-se a taxa de produção de gás residual de $10 - 45 \text{ m}^3/\text{Mg}$ (MS), o valor máximo de recalque e respectivamente de redução de volume, é de aproximadamente 4,5%, como resultado da degradação da matéria orgânica, de acordo com Müller *et al.* (1998). O recalque de RSU frescos, causado pela biodegradação deve ser da mesma ordem de magnitude do recalque causado por cargas verticais (STAUB, 2010).

Como consequência da construção e operação de aterros, uma maior homogeneidade múltipla dos resíduos irá diferentes níveis de recalques, o que acima de tudo, poderá levar a danos nos equipamentos técnicos (por exemplo: tubos, eixos) de aterros operados de forma convencional. Além disso, após a conclusão de uma célula de aterro, um sistema final de impermeabilização da superfície poderá ser aplicado mais cedo. E ainda, esforços para as medições de recalques durante a fase de encerramento e manutenção posterior serão nitidamente reduzidos.

Figura 2 – Curvas de tempo de recalques de testes de compressão em larga-escala com materiais provenientes de TMB



Time [h] ⇒ Tempo [h] Settlement [%] ⇒ Recalque [%]

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

2.1.4 Estabilidade

As menores partículas dos resíduos provenientes do TMB a serem enviadas ao aterro – em comparação com os RSU frescos – sofrem uma clara mudança nas suas propriedades mecânicas, o que influencia na estabilidade.

A percentagem de elementos como fibras e plásticos filme, que é capaz de suportar tensões de tração, está na faixa acima de 25 peso-% nos RSU frescos. A tensão de tração suportável com um ângulo de tensão de tração interna de aproximadamente 30 – 35% é correspondentemente elevado. O ângulo de atrito interno é de aproximadamente 30°.

Se apenas o tratamento biológico é aplicado, o ângulo de atrito aumenta em cerca de 5°, enquanto que o ângulo de tensão interna se mantém inalterado.

Em uma separação adicional da fração grossa, com um corte de aproximadamente 60 – 100 mm, a porção de elementos capazes de suportar forças de tração reduz claramente para 25%.

Os ângulos de esforço de tensão interna são reduzidos para aproximadamente 15°. Valores um pouco maiores que 35 – 38° foram determinados para o ângulo de atrito interno.

As maiores mudanças nos parâmetros de estabilidade ocorrem com o peneiramento fino posterior adicional < 60 mm, o que é exigido pela diretriz DepV. A triagem reduz a porção de elementos de reforço fibrosos para < 5%, de modo que a resistência à tração seja quase que totalmente perdida. Pode haver o rastreamento devido ao fato de que os componentes menores dos resíduos causam a principal parte do atrito interno.

A coesão não é influenciada pela variação do tratamento e eleva-se a ~ 15 kN/m².

A estabilidade do corpo de aterro é claramente reduzida pela disposição de partículas finas de componentes dos resíduos. A quantidade de elementos de reforço em tensão de tração é reduzida e seguida por uma diminuição da estabilidade do corpo de aterro.

A alteração dos parâmetros de cisalhamento tem um efeito direto sobre a estabilidade do corpo de aterro. Na prática, encostas de aterros de RSU não tratados, com um ângulo maior do que 1:1 (ângulo de inclinação > 45°) podem ser observadas e são estáveis ao longo dos anos. No quadro da aplicação de uma cobertura de superfície, dependendo do sistema de impermeabilização, as encostas são achatadas (camada mineral + geomembrana < 18°; estrutura de geomembrana em relevo: < 30°). Experiências práticas em aterros sanitários que foram construídos exclusivamente com material proveniente de TMB, não estão disponíveis. Cálculos de estabilidade provam que os gradientes de inclinação de aproximadamente 1:3 mostram uma estabilidade suficiente a longo prazo. Declives mais acentuados podem ser observados nos taludes se o caso individual for provado com base nos testes de laboratório com os materiais presentes e com os cálculos de estabilidade.

A prática de disposição de resíduos demonstra que – sob condições desfavoráveis, cujas quais estão geralmente relacionadas com o alto teor de umidade nos resíduos (como por exemplo, chuvas fortes, compactação ruim, sistema de drenagem inadequado) – a estabilidade dos aterros sanitários fica altamente ameaçada. O principal problema é acertar no grau de saturação correto para o cálculo da estabilidade. Testes realizados em escala laboratorial com resíduos de TMB mostraram que o alto teor de umidade, relacionado com a saturação de água, leva a redução da força de cisalhamento. Como consequência, o talude do aterro pode ser reduzido cerca de 20% (BAUER; MÜNNICH; FRICKE, 2009; MÜNNICH; BAUER; FRICKE, 2010). Este fato deve ser considerado, tanto sob condições *in situ*, como durante a fase de operação, quando a precipitação pode se infiltrar na massa do aterro.

Além disso, testes realizados com material TMB que tenha teor de água em condição saturada, mostram que sob condições desfavoráveis, o fator de segurança nos cálculos de estabilidade pode ser reduzido devido ao excesso de pressão da água nos poros (MÜNNICH; BAUER; FRICKE, 2007). As razões para este efeito são a alta densidade de aterramento, os poros pequenos e a baixa permeabilidade dos resíduos do TMB. Particularmente, após a rápida aplicação de altas cargas verticais (por exemplo: compactação) o excesso de água nos poros pode não ser

mais insignificante. Dependendo dos resíduos materiais e as condições de limitação hidráulica, pode ocorrer a elevação ao excesso máximo de pressão da água nos poros, dependendo da permeabilidade, o que pode durar por um longo período de tempo.

2.2 Comportamento Hidráulico

O tratamento mecânico e a alta densidade de aterramento influenciam o comportamento hidráulico dos resíduos a serem dispostos em aterros. Na maioria dos casos o único parâmetro considerado é a condutividade hidráulica saturada (valor k). O GDA recomenda os valores de 10^{-3} a 10^{-6} m/s para RSU frescos e valores de 10^{-6} a 10^{-9} m/s para resíduos de tratamento mecânico-biológico.

O valor- k descreve somente o deslocamento inadequado da água no corpo do aterro, uma vez assumido que, com a determinação do valor- k , o espaço poroso está completamente preenchido com água. Esta situação existe no aterro – se não em todos – somente naquelas áreas onde o fluxo de chorume é bloqueado ou perto da superfície, como resultado da precipitação.

Em geral – mesmo com uma alta densidade de aterramento e com um conteúdo de água ideal – o volume dos poros no aterro é apenas parcialmente saturado com água, pois a parte residual do espaço dos poros é preenchida com gás. Isto significa que uma condutividade insaturada, dependendo da saturação de água dos resíduos, irá surgir no corpo do aterro, que é, de qualquer forma, uma taxa inferior à condutividade hidráulica saturada. Testes de laboratório e alguns cálculos mostraram que, por exemplo, com a diminuição do teor de água para 10 vol-%, a condutividade hidráulica diminui em mais de uma ordem de grandeza (MÜNNICH, 1999).

Nos últimos anos, uma série de testes com resíduos de TMB tem sido realizada em escala laboratorial. Os resultados de diferentes autores indicaram que, mesmo com os resíduos de TMB, os valores determinados podem variar muito (Figura 3). Nos casos em que dois valores são dados para o mesmo material, as diferenças entre as permeabilidades devem ser atribuídas à densidade de aterramento alcançada individualmente. Através da otimização da densidade de aterramento, a condutividade hidráulica pode, possivelmente, ser reduzida em várias ordens de magnitude. Ao contrário do que os fundamentos da mecânica dos solos descrevem, resíduos de menores dimensões, não causam uma redução da condutividade hidráulica. A razão pode ser devida ao fato de que as partículas mais grosseiras têm uma parcela crescente da placa ou componentes de forma plana (filmes etc.), na qual, uma camada de aterramento estratificada leva à deficiência maciça dos movimentos de água verticais.

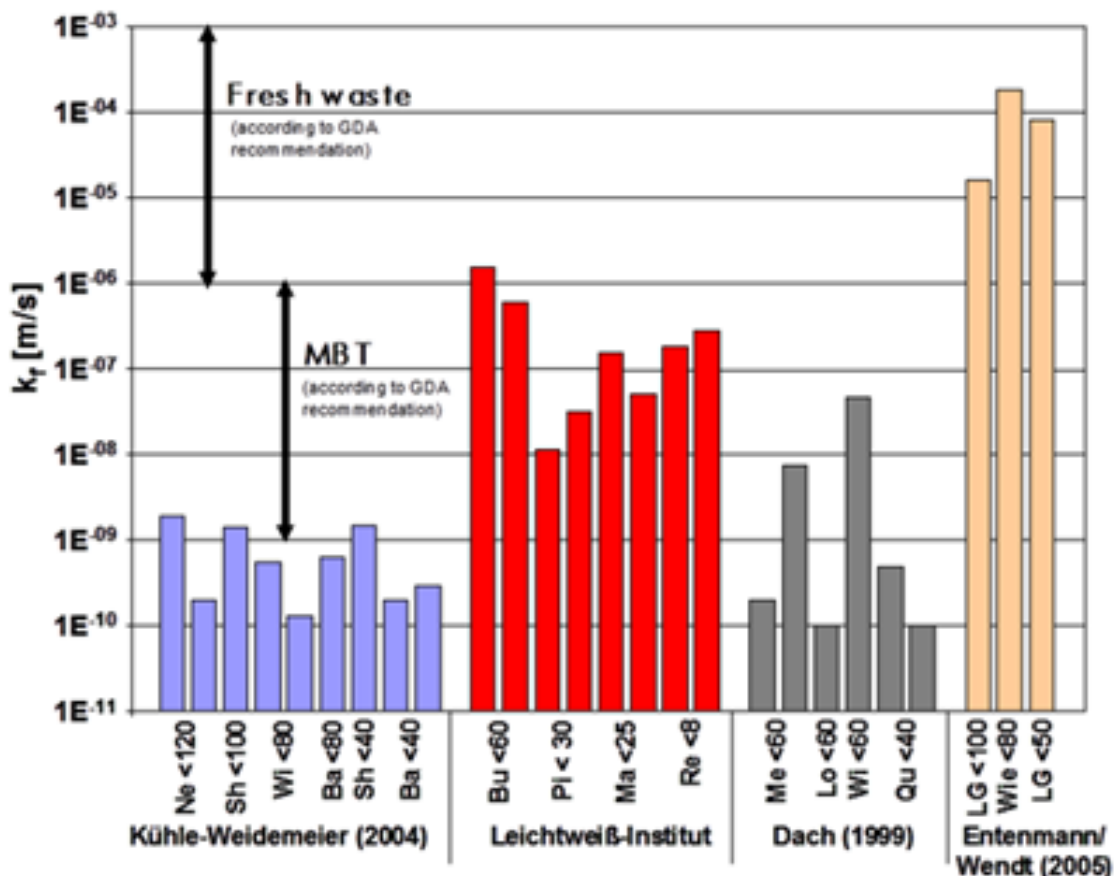
Os valores mostram que, em comparação com RSU frescos – o que de acordo com a literatura variam de 10^{-4} a 10^{-8} m/s –, uma redução distinta é possível, entretanto, não deve ser automaticamente assumida.

Considerando-se a prática no aterro, deve ser lembrado que os testes em laboratório são normalmente realizados em ensaios de coluna ou triaxiais, ou seja, a condutividade hidráulica unidimensional vertical dos resíduos é determinada. A anisotropia do material tratado a ser disposto

em aterro, em comparação com RSU frescos, é claramente reduzida pelo tratamento mecânico-biológico de resíduos, mas ainda há a presença de componentes planos remanescentes (filmes), que podem afetar explicitamente o padrão de fluxo do chorume. Dependendo do tamanho máximo do grão, a porção de volume dos componentes planos, juntamente com a densidade de aterramento dos resíduos, a relação de $k_{\text{horizontal}}/k_{\text{vertical}}$ na faixa de 1 a 250 pode ser determinada por meio de testes em laboratório (MÜNNICH *et al.*, 2005).

O baixo potencial de formação de gás ainda continua, apesar de que a estabilização influencia a condutividade hidráulica após o aterramento de material do TMB. A liberação de metano e dióxido de carbono interfere na circulação de água, cuja qual pode ser completamente interrompida. Este efeito pode ser observado principalmente em gradientes hidráulicos baixos, típicos para a situação na qual se encontra o aterro. Um aumento do gradiente, como muitas vezes apura-se para células triaxiais, leva a uma mobilização e à descarga do gás junto com a água (MÜNNICH *et al.*, 2005).

Figura 3 – Condutividade hidráulica saturada do material proveniente do TMB



- **MBT** (according to GDA recommendation) ⇒ **TMB** (de acordo com as recomendações GDA)
- **Fresh waste** (according to GDA recommendation) ⇒ **Resíduos frescos** (de acordo com as recomendações GDA)

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

3 OPERAÇÃO E CONTROLE DE ATERROS SANITÁRIOS

As técnicas e os equipamentos empregados para a disposição final tradicional irão sofrer modificação significativa devido ao tratamento mecânico. O tratamento biológico influencia fortemente as características qualitativas e quantitativas das emissões líquidas e gasosas.

3.1 Tecnologia de Aterramento

Mudanças significativas de padrão de aterramento, quando comparado ao aterro de RSU fresco, podem ser identificadas nos aterros de material tratado do TMB, principalmente no que se refere a construção e operação do aterro, devido a diminuição da massa a ser aterrada e as alterações das propriedades físicas dos resíduos.

O transporte dos resíduos para as células já não é mais conduzido por meio de veículos tradicionais de coleta. Os veículos pertencentes ao aterro podem transportar resíduos provenientes do TMB até a área de aterro. Dessa forma, os requisitos exigidos para a conclusão das estradas no aterro, como também o desgaste dos veículos de coleta, poderão ser consideravelmente reduzidos.

A estrutura homogênea e as partículas dos resíduos do TMB de menores espectros a serem depositadas, exigem requisitos extras para a disposição em aterro, o que até então era desconhecido. O rompimento e a homogeneização dos resíduos, que é, por exemplo, uma tarefa essencial dos compactadores utilizados até agora, serão omitidos. A principal função futura da unidade de aterramento será a compactação de todos os resíduos e, possivelmente, a de criação de uma superfície mais suave.

A baixa permeabilidade hidráulica dos resíduos deriva em uma menor precipitação da água que se infiltra nos resíduos. Isto pode acarretar um esforço operacional diário, devido ao fato de que, durante as fortes chuvas as áreas de disposição ficam intransitáveis, assim como, a água atinge as proximidades da superfície dos resíduos levando à formação de uma polpa de consistência macia na superfície. Deve-se examinar se a camada inferior de resíduos, que está disposta diretamente sobre a camada de drenagem, deve ser submetida apenas a uma baixa densidade. Com uma espessura de 1,5 a 2 m pode-se supor que, na sequência de uma nova disposição no aterro, a subsequente compactação desta camada continuará pequena. Esta camada tem a função de conduzir o chorume resultante mais rapidamente para a camada de drenagem do sistema. Pesquisas relacionadas à estabilidade do filtro dos materiais do TMB mostraram que a produção de material fino a partir dos resíduos é muito baixa, de modo que nenhuma camada de filtro de geotêxtil deve ser aplicada entre os resíduos e a camada de drenagem.

Os resíduos devem ser depositados na superfície do aterro com uma inclinação de 5-10%. Inclinações muito menores que o percentual citado devem ser evitadas, de modo que o fluxo da superfície não seja comprimido após a precipitação. E da mesma forma, inclinações muito maiores podem conduzir a problemas com a transitabilidade dos veículos de compactação. A distribuição dos resíduos na área do aterro por meio de um compactador ou uma carregadeira de rodas pode fazer com que o equipamento fique preso quando a superfície estiver molhada. Neste caso, a

distribuição deve ser feita com um trator de esteira. Os resíduos podem ser aplicados com um trator de esteira até uma altura de camada de 50 cm (antes da compactação). Camadas maiores devem ser evitadas, caso contrário não será garantida que após a compactação a densidade de aterramento necessária será atingida.

A compactação da camada de resíduos deve ser efetuada com um rolo vibratório. Os usos de rolos de tambor provaram ser adequados quando os materiais de TMB forem compactados. Quando se utiliza um rolo liso, deve ser considerado que o desempenho da compactação é um pouco menor e que inclinações da superfície maiores podem causar problemas com a tração. Uma combinação de ambos os tipos de compactação pode tornar-se necessária em relação à minimização da formação de chorume. O aprofundamento causado após a passagem, por exemplo, através do uso de um rolo pé-de-carneiro, pode levar a uma melhoria da interligação entre as camadas de resíduos (Figura 4); entretanto, quando há precipitação, ocorrerá uma maior formação de chorume. Através da combinação com um rolo liso, o aprofundamento pode ser vedado. Antes da aplicação de uma nova camada de resíduos, a superfície deve ser novamente preparada, a fim de se permitir a interação entre as camadas, assegurando-se assim, a estabilidade do corpo de aterro.

As múltiplas passadas para fins de vedação dos espaços vazios podem ser reduzidas em comparação com o aterramento de resíduos frescos, e presume-se que três passadas são suficientes para atingir a densidade de aterramento exigida.

Figura 4 – Superfície depois da passada com rolo pé-de-carneiro (à esquerda) e a suavização da superfície após a passagem de um rolo liso



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

De acordo com a Portaria alemã, o volume de chorume gerado na base do aterro deve ser reduzido ao mínimo possível. Como consequência, a necessidade de uma cobertura

impermeável diária torna-se tema de discussão. Se a cobertura mineral é um tema, deve-se lembrar que a permeabilidade do material do TMB após o aterramento, com uma alta densidade de compactação, deve ser menor que a fração mineral disponível na área. Além dos possíveis custos para a aquisição da fração mineral, compromete-se uma parte do volume disponível para aterramento com a introdução desta na operação.

Uma cobertura composta de geomembranas sintéticas garante que nenhuma precipitação da água pode entrar nos resíduos; entretanto, o manuseio das bobinas é muito demorado. A impermeabilidade da membrana pode levar a uma acumulação de água condensada debaixo das lâminas, levando-se em consideração as diferenças de temperatura entre o corpo do aterro e o ar ambiente (Figura 5). Esta película de água conduz a uma saturação do nível superior da camada de resíduos, o que dificulta a passagem preliminar após o recolhimento da lâmina.

Figura 5 – Saturação de água em materiais de TMB sob lâmina – PE por condensação



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Consequentemente, vem a pauta a necessidade de cobertura diária por membrana, onde se discute se ela deve ser suspensa de tempos em tempos para, entre outros motivos, intensificar a evaporação.

Em áreas parciais, onde, por um período mais longo não será aplicada nenhuma carga, deve ser usada uma cobertura formada por uma geomembrana sintética impermeável ou uma membrana semipermeável – o que, entretanto, remonta custos de investimento ainda mais elevados. Somente com este tipo de efeito de evaporação da folha, a membrana poderá ser utilizada e, consequentemente, a oxidação do gás metano, ser assegurada.

Todos os tipos de coberturas precisam de um sistema de drenagem superficial que deve ser orientada no sentido das bermas do talude.

A seleção de dispositivos, como inclinações da superfície etc., devem ser seguidas à risca, com base nas investigações de testes de campo, na qual são consideradas as características dos materiais e as condições climáticas da respectiva localização.

3.2 Características do Chorume

As demandas para as pequenas áreas abertas de aterramento, como altas densidades de aterramento, superfícies lisas e inclinadas, respectivamente, as membranas de PE de cobertura induzem a reduções distintas do volume gerado de chorume com um aumento simultâneo do escoamento superficial, fatores esses, que normalmente não tinham de ser anteriormente considerados em aterros de RSU. Os volumes de chorume emergentes dependem por um lado das propriedades físicas dos resíduos aterrados (por exemplo, o tamanho das partículas do material, a densidade de aterramento, a taxa de infiltração) e por outro lado, da intensidade de precipitação. Em relação à qualidade do chorume, espera-se que as cargas de substâncias indesejáveis nos chorumes e provenientes do escoamento superficial sejam distintamente menores em comparação com a situação dos aterros tradicionais de RSU.

Como consequência, uma adaptação da técnica de purificação das emissões líquidas pode ser necessária. Entretanto, dependendo das condições individuais de cada aterro, a completa ausência de sistema de tratamento de chorume é pouco provável. Experiências relacionadas à qualidade do chorume em aterros sanitários, que tenham sido exclusivamente preenchidos com material de TMB, ainda estão raramente disponíveis. Um grande número de testes de simulação em reatores de aterros com diferentes escalas tem sido realizado desde o começo dos anos 1980, e tem mostrado as tendências fundamentais em relação às emissões de chorume a longo prazo, entretanto, não indicam a situação atual sob essas condições de operação do aterro sanitário. Nos últimos anos, durante a implementação da técnica de TMB, testes de campo vêm sendo realizados nos aterros, a fim de se investigar o desempenho a longo prazo e sob condições locais específicas. A construção e operação de tais campos de teste é descrita em Münnich *et al.* (2011).

A seguir, o resultado de três anos de monitoramento durante o teste de campo para resíduos de TMB são apresentados.

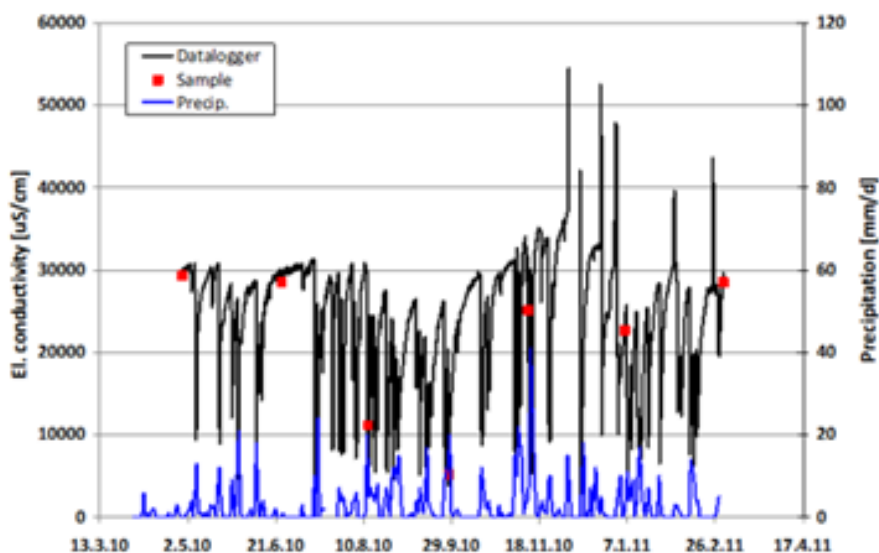
O material TMB aterrado é o material processado a partir de duas etapas de tratamento biológico (digestão anaeróbia e subsequente estabilização aeróbia), onde todos os requisitos exigidos pela legislação alemã foram cumpridos. Como resultado do tratamento mecânico, o diâmetro máximo dos resíduos é < 60 mm. Em testes preliminares, diferentes equipamentos para o aterramento dos resíduos foram testados e a densidade de aterramento mais elevada deu-se através do uso de um trator de esteiras para espalhar os resíduos na área de disposição, em combinação com um rolo liso para compactação. A utilização de um compactador e um rolo de vibração levaram a densidades de compactação inferiores. As densidades de compactação estão na faixa de 0,67 a 0,88 t/m³ (MS) com um teor de umidade correspondente no intervalo entre 26 – 43% (WS).

As medições feitas nesses campos de teste mostram que a informação quanto ao nível diário de precipitação não é suficiente para descrever a geração de chorume e do escoamento superficial. Altas taxas de precipitação diária só levam ao escoamento superficial se as chuvas acontecerem em curto espaço de tempo e se a saturação dos resíduos já for alta devido à ocorrência de chuvas anteriores. Se a taxa de precipitação diária é alta, mas a intensidade é baixa, mesmo que os resíduos já apresentem um elevado grau de saturação, a maior parte da chuva pode fluir lentamente através dos resíduos. No total, cerca de 60% da precipitação foi identificada como chorume ou como escoamento superficial, no qual, quase 2/3 são medidos como chorume a partir da base.

O resultado da determinação contínua da condutividade elétrica (CE) do chorume da base, dentro da área de teste, é ilustrado na Figura 6. Além disso, a precipitação diária também é fornecida para ilustrar o processo de diluição dos valores de CE. Como era esperado, a influência do TMB neste parâmetro é baixa. Uma tendência no comportamento frente à CE não pôde ser observada neste período, o que demonstra o alto potencial de componentes facilmente solúveis. Além disso, os valores de CE foram medidos de amostras coletadas em diferentes épocas, a fim de se evitar o problema da representatividade das amostras.

As amostras de chorume foram analisadas a fim de se determinar o comportamento químico dos resíduos a longo prazo, de acordo com as condições do aterro. Os parâmetros de pH, EC, DQO, COT, DBO₅, NH₄-N, NO₃-N, e diferentes metais pesados foram analisados.

Figura 6 – Progressão da curva por pluviosidade e condutividade elétrica em chorume



Datalogger ⇒ Dados

El. conductivity [uS/cm] ⇒ Condutividade elétrica [uS/cm]

Sample ⇒ Amostra

Precipitation [mm/d] ⇒ Precipitação [mm/d]

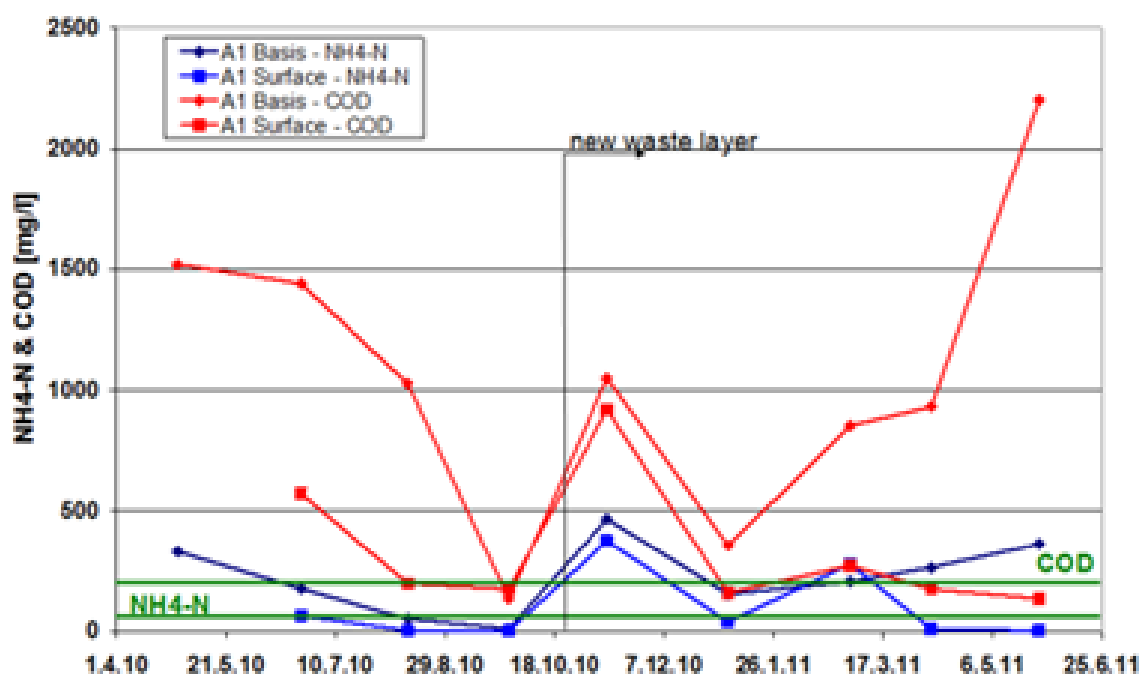
Precip. ⇒ Precipitação

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

A Figura 7 apresenta as concentrações de DQO e $\text{NH}_4\text{-N}$ do chorume da base, do escoamento superficial e dos valores-limites. Os valores mostram que, desde o início, as concentrações são muito mais baixas em relação aos resíduos frescos, encontrando-se em uma faixa típica para aterros de RSU antigos. No início, os valores são – particularmente no chorume na base – altos, cuja razão é que as substâncias que são removidas facilmente são lentamente lavadas pela pequena taxa de fluxo do líquido presente no material de TMB. As concentrações em ambos os chorumes caíram abaixo dos valores-limite depois de cerca de quatro meses.

O aterramento da segunda camada de resíduos conduz a um renovado aumento das concentrações de valores, os quais são parcialmente maiores do que no início. Este efeito é frequentemente observado na prática, pois o material novo depositado possui uma alta quantidade de substâncias facilmente removíveis. A forte diminuição nas concentrações no início de 2011 foi causada pela diluição dos efeitos do derretimento da neve/gelo. O forte aumento da DQO em maio de 2011, coincide com a diminuição do valor de pH, que antes era de 7.0 – 7.5 [-], e agora está 5.0 [-]. Sob estas condições, os metais pesados também puderam ser detectados no chorume, especialmente o zinco, que apresentou as concentrações mais elevadas, de até 2 mg/l.

Figura 7 – Concentrações de DQO e $\text{NH}_4\text{-N}$ em chorumes e no escoamento superficial



A1 Basis – $\text{NH}_4\text{-N}$ \Rightarrow A1 Base – $\text{NH}_4\text{-N}$

A1 Surface – COD \Rightarrow A1 Superfície – DQO

A1 Surface – $\text{NH}_4\text{-N}$ \Rightarrow A1 Superfície – $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ COD [mg/l] \Rightarrow $\text{NH}_4\text{-N}$ DQO [mg/l]

A1 Basis – COD \Rightarrow A1 Base – DQO

new waste layer \Rightarrow nova camada de resíduos

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

As experiências até então existentes do escoamento superficial mostraram que:

- O escoamento superficial só ocorrerá após fortes chuvas;
- O escoamento superficial não pode ser despejado diretamente perto de corpos de água, devido à concentração de substâncias nocivas indesejáveis;
- Uma grande parte da carga química está ligada às partículas de matéria sólida, de modo que a carga possa ser reduzida consideravelmente por processos simples (por exemplo, sedimentação e filtração). Mas, mesmo assim, as concentrações podem ainda estar acima dos valores admissíveis para a descarga direta. Outros processos passivos mais simples e eficazes em termos de custos, como areia ou filtros de solo ou de uma estação de tratamento operada com plantas verdes, poderão ser usados. O que deve ser observado para cada caso, em particular.

Em relação à qualidade dos chorumes recolhidos na base do aterro de material de TMB, os resultados obtidos em testes de campo mostram que:

- A geração de chorume na base ocorre também sob baixas taxas de precipitação;
- Após o aterramento dos resíduos do TMB, as concentrações de substâncias indesejáveis são, na maior parte das vezes, elevadas, e geralmente os valores são maiores do que os valores determinados nos eluatos. Mas os valores máximos, em especial para substâncias orgânicas ou nitrogenadas são, de um fator de cerca de 10 a 100 abaixo dos valores do chorume de RSU fresco, no mesmo período, após o aterramento. As concentrações diminuem muito rapidamente podendo inclusive atender aos limites para lançamento direto nos corpos d'água;
- A cada nova camada de resíduos, as concentrações podem se elevar em um curto espaço de tempo;
- O tratamento do chorume ainda é necessário. As técnicas utilizadas devem estar de acordo com as concentrações do chorume, particularmente tendo em vista as cargas orgânicas.

3.3 Emissões Gasosas

O tratamento biológico dos resíduos conduz a uma extensiva estabilização biológica do material a ser aterrado com uma nítida redução da formação de gás após o aterramento. Segundo parâmetros alemães de estabilidade biológica, o potencial de formação de gás residual será em torno de 10 – 45 Nm³/Mg MS.

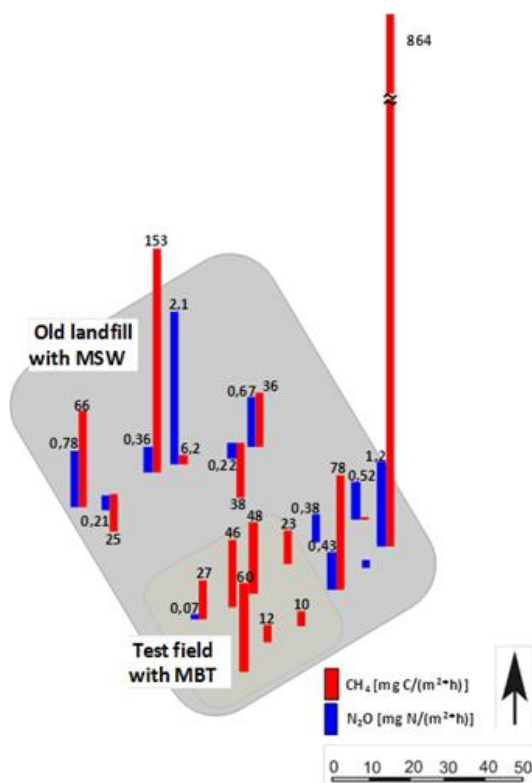
Em relação aos testes de longa duração com lisímetros, os quais vêm sendo instalados diretamente no corpo do aterro, as emissões de gases dos resíduos provenientes do TMB, sob as condições do aterro sanitário, foram investigadas (LORBER; NOVAK; MÜLLER, 2003). A produção de gás foi iniciada e convertida diretamente para a fase de estabilidade do metano, com apenas um mês após o aterramento dos resíduos. As taxas de produção de gás no início são de

1,5 a 2,2 Nm³/d, a qual diminuiu exponencialmente em apenas seis a nove meses, para 0,15 Nm³/d. Com a medição de um período de quase cinco anos, um total de aproximadamente 12 Nm³/Mg MS foi determinado. Em paralelo, testes com resíduos de TMB que foram reumedecidos resultaram em um potencial de gás de até 26 Nm³/Mg MS.

Em relação aos testes para monitoramento de comportamento a longo prazo do material do TMB após o aterramento, foram realizadas medições do fluxo de gás na superfície do corpo do aterro (HARBORTH *et al.*, 2013a). Os fluxos de gás foram medidos com o uso de câmaras fechadas e não foram detectados CH₄ e N₂O. Os resultados indicaram grandes diferenças entre os fluxos do aterro antigo com RSU fresco e o aterro com material de TMB (Figura 8). Como a área de TMB foi construída na superfície do antigo aterro, a manta em PEAD foi instalada para evitar a influência dos resíduos antigos no material tratado em questão.

Particularmente, os fluxos de metanos nas áreas com RSU frescos são muito maiores do que àqueles encontrados nas áreas de resíduos de TMB, apesar de que o aterro do resíduo fresco tenha sido encerrado há mais de quatro anos e a área foi coberta com uma camada mineral de no mínimo 50 cm. Os fluxos de N₂O também foram muito menores na área de TMB, sendo que foram detectados fluxos muito pequenos de óxido nitroso.

Figura 8 – Fluxos de CH₄ e N₂O na superfície de diferentes resíduos



Old landfill with MSW ⇒ Aterro antigo com RSU fresco

Test field with MBT ⇒ Área de teste com resíduos de TMB

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Medições realizadas em outros aterros sugerem que, após um curto período de tempo da disposição de materiais de TMB, altos fluxos de óxido nitroso podem ser detectados (HARBORTH *et al.*, 2013b). Nos dois casos, os resultados do monitoramento demonstraram que as emissões gasosas não são distribuídas de uma forma uniforme na superfície, entretanto, pontos críticos contendo altas concentrações podem ser indicados – Estes pontos críticos são, antes de tudo, formados por caminhos preferenciais de fluxo ou fendas nos resíduos, onde o gás pode facilmente migrar para a superfície. Devido às enormes diferenças das diversas áreas do aterro, é muito difícil realizar um cálculo do total de emissões.

Em comparação com o aterro de RSU, a quantidade de equipamentos técnicos exigidos para a coleta e tratamento de emissões gasosas são muito menores nos aterros de TMB. A desgaseificação ativa do aterro é causada devido à baixa produção de gás, em um sentido técnico muito complexo e sob aspectos econômicos problemáticos. Os sistemas passivos, como as camadas de oxidação do metano, são adequados para o tratamento dos fluxos inferiores de gás. A oxidação do metano também ocorre em solos naturais, entretanto, com a adição de material compostado o desempenho pode ser consideravelmente mais elevado. O potencial de oxidação do metano em coberturas com solo é de 2,5 até 12 l CH₄/m²*h e aumenta para cerca de 4,5 até 70 l CH₄/m²*h quando da adição de material compostado à camada de oxidação de metano.

O material composto deve cumprir os seguintes requisitos (LECHNER; HUBER-HUMMER, 2005):

- Estabilização suficiente da matéria orgânica (RI₄: < 8 mg/g DM);
- Alta porcentagem de nitrogênio estável, mas com baixas concentrações de amônia (NH₄-N < 350 mg/kg DS);
- Porcentagem suficiente de material de volume estável a longo prazo (por exemplo, madeiras com porcentagem de pelo menos 5-15% em peso de DS).

Com um potencial de oxidação do metano na faixa de 10 a 20 l CH₄/m²*h, o material proveniente do TMB também pode ser utilizado para a camada de oxidação. De qualquer forma, o potencial de oxidação do metano de camadas de recultivação é muito maior que o fluxo de metano proveniente de aterros de TMB, cuja faixa se encontra entre 2,5 e 3 l CH₄/m²*h diretamente após o aterramento de resíduos do TMB.

Na diretriz “Camada de oxidação do metano” são fornecidos dados gerais sobre o planejamento e operação destas camadas (ÖVA, 2008).

4 MUDANÇAS ECONÔMICAS

O item anterior mostrou que com a disposição de resíduos provenientes do TMB em aterros, os equipamentos técnicos utilizados para a construção e para a operação do aterro devem ser adaptados à nova forma de operação. As mudanças necessárias não podem ser generalizadas, pois tais alterações dependem da situação local do aterro. Devido ao fato de que os altos custos com investimentos e com a operação do aterro serem dependentes de uma variedade de diferentes

condições locais, como padrões técnicos, condições socioeconômicas, tipo de TMB, as comparações de custos por tonelada de resíduo são problemáticas e nem sempre adequadas.

Com base nas metodologias explicadas, em relação às propriedades dos materiais provenientes do TMB, os resultados das mudanças na operação do aterro e nos investimentos, os possíveis aumentos e as respectivas reduções nos preços que podem ocorrer, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Possíveis mudanças nos custos durante a operação de aterros de TMB

Modificação	Aumento dos custos	Redução dos custos
Chorume	Talvez seja necessária a cobertura da superfície durante a operação Formação de superfície de escoamento Tratamento da superfície de escoamento	Sistema de cobertura final mais barata Volume menor de chorume na base Concentração menor de chorume na base ⇒ menores custos para tratamento
Estabilidade	Menor resistência à tração, por exemplo, taludes menos íngremes ⇒ redução do volume do aterro na mesma área	Maior densidade de aterramento ⇒ necessidade de volume menor por tonelada de resíduo fresco
Gás	Não há aproveitamento energético do gás	Menos monitoramento relacionado à coleta e tratamento do gás
Operação	Veículos de transporte adicionais ou contêineres (+ exigência adicional de pessoal) Construção de áreas para armazenamento intermediário, eventualmente coberturas Eventual compra de novos equipamentos (por exemplo, um compactador)	Menor necessidade de pessoal e de máquinas no local de aterramento (menor tempo para o aterramento) Maior tempo de funcionamento dos motores para o aterramento de pequenas quantidades Necessidade de menos infraestrutura
Pós-tratamento	-	Fase de pós-tratamento mais curta e menos intensiva

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Por conta do potencial de emissão menor do material proveniente do TMB, são necessários menos equipamentos técnicos para a coleta e tratamento do gás e do chorume e os custos de operação também são reduzidos. Entretanto, surgem emissões adicionais como o escoamento superficial, ao qual requer coleta e tratamento. Se uma planta de energia para a utilização de gás de aterro sanitário já estiver em operação, o material proveniente do TMB não irá contribuir para a produção de gás utilizável no futuro.

Para o aterramento do material proveniente do TMB, novos dispositivos podem ser necessários, mas os custos para estes dispositivos, normalmente utilizados na construção subterrânea, são muito mais baixos do que os dispositivos especiais utilizados na disposição de RSU. Com o TMB, a massa de material a ser depositado no aterro é muito menor que o material

de RSU, o que conseqüentemente, por um lado reduz o tempo de disposição, assim como, os custos com equipamentos e com a mão de obra e por outro lado pode prolongar a vida útil do aterro, melhorando a condição de amortização dos investimentos.

Além disso, após o encerramento do aterro, os custos com pós-tratamento, manutenção posterior, remoção de instalações técnicas e monitoramento, são muito menores quando comparados aos aterros de RSU.

5 CONCLUSÕES

O tratamento mecânico-biológico dos resíduos resulta em efeitos positivos a longo prazo, tanto na construção como na operação de aterros sanitários. Devido à experiência com a operação de RSU em aterros, pode-se dizer que o comportamento dos resíduos em função da disposição em aterros de resíduos da planta TMB, será fundamentalmente diferente em muitos pontos. A mudança da estrutura dos resíduos a serem depositados no aterro é um ponto decisivo para a modificação do potencial de recalque e na estabilidade.

Através do peneiramento da fração de resíduos de alto poder calorífico, estes representando os componentes de reforço fibroso dos RSU, o material proveniente do TMB perde uma reserva de suporte, o que influencia na estabilidade do corpo do aterro. E como consequência do potencial de emissão – gás e chorume – o material proveniente do TMB é consideravelmente reduzido, e dessa forma, os equipamentos técnicos utilizados para a coleta e tratamento são menos complexos e os custos de operação mais baixos. Por outro lado, podem surgir emissões adicionais como o escoamento superficial, o que irá exigir coleta e tratamento.

O TMB conduz a um ajuste múltiplo dos custos das medidas individuais de operação do aterro sanitário. A fase de pós-tratamento de aterros de TMB devido às baixas emissões, é nitidamente reduzida, em comparação com os aterros de RSU. A longo prazo, os custos de aterros de TMB serão inferiores aos custos de operação de aterros de RSU, especialmente devido ao encurtamento da fase de manutenção posterior após encerramento das atividades do aterro. A operação do aterro deve ser sempre considerada em conexão com o processo TMB, pois as características do material oriundo da planta TMB tem uma significativa influência nas condições de aterramento, determinando intervenções customizadas durante a operação do aterro sanitário de resíduos tratados.

REFERÊNCIAS

- ALEMANHA. **Verordnung über Deponien und Langzeitlager** (Deponieverordnung – DepV) – Ordinance on Landfill Sites and Long-Term Storage Facilities (Landfill Ordinance – DepV). 2013.
- BAUER, Jan; MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. **Response of MBT residues in large scale triaxial compression tests**. SARDINIA 2009, 12th International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italien, 2009.

- BIDLINGMAIER, Werner; SCHEELHASE, Tanja; MAILE, Andreas. **Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie**. Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3.1 des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ Universität Essen, 1999.
- DGGT. **Geotechnik der Deponien und Altlasten**, GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin, 1997.
- ENTENMANN, W.; WENDT, P. Einbauversuche mit AbfAbIV-konformen MBA-Output. In: **Gallenkemper/Bidlingmaier/Doedens/Stegmann (Hrsg.): 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage**, 2005.
- HARBORTH, Peter; FUß, Roland; MÜNNICH, Kai; FLESSA, Heinz; FRICKE, Klaus. **Evidence of strong N₂O hotspots on two MBT landfills**: Microbial background and operational significance. Proceedings Sardinia 2013, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2013a.
- HARBORTH, Peter; FUß, Roland; MÜNNICH, Kai; FLESSA, Heinz; FRICKE, Klaus. Spatial variability of nitrous oxide and methane emissions from an MBT landfill in operation: Strong N₂O hotspots at the working face. **Waste Management**, v. 33, n. 10, p. 2099-2107. 2013b.
- JESSBERGER, H.-L.; KOCKEL, R. **Abschlussbericht: Untersuchungen zur Standfestigkeit und Zusammendrückbarkeit von Mischabfall in Zusammenhang mit Standsicherheitsberechnungen für die Deponie Hannover** (unveröffentlicht), 1993.
- KÖLSCH, Florian. **Ursachen von Sackungen und Setzungen im Deponiekörper und deren Auswirkungen auf Deponieoberflächen**. Mitt. des Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig: Geotechnische Probleme im Deponie- und Dichtwandbau, 1994.
- KÜHLE-WEIDEMEIER, M. **Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Restabfälle in Deutschland**. Diss. Univ. Hannover, 2004.
- LECHNER, Peter; HUBER-HUMER, Marion. Deponieabschluss und Methanoxidation. In: BILITIEWSKI, P.; WERNER, R.; STEGMANN, Rainer; RETTENBERGER, Gerhard. (Hrsg.): **Fachtagung „Perspektiven von Deponien – Stilllegung und Nachnutzung nach 2005“**, Dresden/Deutschland; Beiträge zu Abfallwirtschaft / Altlasten“, Band 42, p. 161-170, 2005.
- LORBER, K. E.; NOVAK, J.; MÜLLER, P. Deponie-Langzeitverhalten der MBA-Schwerfraktion, In: **Ersatzbrennstoffe 3**, TK Verlag, Neuruppin, 2003.
- MÜLLER, Wolfgang; FRICKE, Klaus; BIDLINGMAIER, Werner; RETTENBERGER, Gerhard; STEGMANN, Rainer. Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TAsi für die Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen auf der Deponie „Lübben-Ratsvorwerk“. In: FRIEDRICH, Rolf; FRICKE, Klaus. (Hrsg.) **Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TAsi für die Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen**, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 110, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, 1998.

- MÜNNICH, Kai. **Hydraulische Kenngrößen von mechanisch-biologisch behandeltem Abfall**. In: **Zentrum für Abfallforschung der TU Braunschweig 14**, S. 11-22, 1999.
- MÜNNICH, Kai; BAUER, Jan; FRICKE, Klaus. **Investigation on relationship between vertical and horizontal permeabilities of MBT wastes**. Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2005.
- MÜNNICH, Kai; BAUER, Jan; FRICKE, Klaus. **Investigaions of pore water presure in MBT waste material**. Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2007.
- MÜNNICH, Kai; BAUER, Jan; FRICKE, Klaus. **Einfluss des Einbauwassergehaltes auf das Langzeitverhalten von MBA-Deponien**. Deponietechnik 2010. Hamburger Berichte 35. Hamburg, 2010.
- MÜNNICH, Kai; BAUER, Jan; FRICKE, Klaus. **Monitoring of MBT Material after Disposal on Landfills**. Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italien, 2011.
- ÖVA – Österreichischer Verein für Altlastenmanagement. **Leitfaden Methanoxidationsschichten**. Erstellt von der ÖVA-Arbeitsgruppe „Leitfaden Methanoxidationsschichten“, Wien, 2008.
- RETTENBERGER, Gerhard. Die Deponierung von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall gemäß Abfallablagereungsverordnung. **KA-Abwasser, Abfall**, v. 52, n. 10, 2005.
- STAUB, M. **Approche multi-échelle du comportement bio-mécanique d'un déchet non dangereux**. PhD-thesis Universite de Grenoble, France, 2010.
- TURK, Michael. **Der Einfluß der maximalen Abfallstückgröße auf den Gasaustausch bei dem Kaminzug-Verfahren**. Dissertation. TU Braunschweig, 1998.
- WIEMER, Klaus. **Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien**. Dissertation im Fachbereich Umwelttechnik der TU Berlin, 1982.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. Comportamento dos Aterros quando da Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maió – 2017**.

Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas

Mining of Municipal Solid Waste Landfills: reduction of masses to be landfilled by treatment of the fine fraction

Administrador e Engenheiro Ambiental Anton Zeiner

Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich

Engenheiro Civil e Ambiental Sebastian Wanka

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

RESUMO

Nas últimas décadas, as razões pelas quais vêm se realizando a mineração de aterros sanitários estão mudando. Na maioria dos projetos desenvolvidos no passado, os principais objetivos foram a proteção das águas subterrâneas, o ganho de volume de aterro e o aumento das áreas para assentamento. Como consequência do fato de que os recursos explorados, futuramente irão entrar em escassez, assim como ocorrerá um aumento nos seus preços, cada vez mais, a mineração de frações de lixo recicláveis em aterros, tem ganhado força. A viabilidade da mineração dos aterros, especialmente no que se diz respeito à viabilidade econômica, tem sido o tema de muitas discussões. O presente trabalho demonstra o potencial dos recursos de aterros na Alemanha e avalia a contribuição do uso dessas matérias-primas secundárias no fornecimento de materiais e de energia. A mineração de aterros, sob a premissa de reciclagem, é uma questão viável. Entretanto, detalhes sobre quais são as melhores técnicas de tratamento à serem aplicadas para os diferentes tipos de resíduos, muitas das vezes, ainda não estão facilmente disponíveis. No projeto de pesquisa TÖNSLM, um dos principais objetivos, é o de desenvolver uma concepção geral de mineração em aterros e a de fornecer as informações necessárias para a implementação de projetos de mineração.

Palavras-chave: Aterro. Mineração. Impacto. Tratamento. Resíduo.

ABSTRACT

The reasons for landfill mining have changed in the last decades. In most of the projects executed in the past the main focus had been set on groundwater protection, gain of landfill volume and gain of areas for settlement. As a consequence of the fact that a shortage of resources is to be expected in the future as well as an increase in price, the aspect of mining of recyclable fractions from landfills is becoming more and more the centre of consideration. The feasibility of landfill mining, especially the economic viability, is subject of many discussions. The paper will show the

potential of resources in German landfills and evaluate the contribution of these secondary raw materials to energy and material supply. Landfill mining under the premise of recycling is as a matter of principle feasible. Details about the best techniques of treatment to be applied for the different wastes are often not available. In the research project TÖNSLM one major point amongst other is to develop an overall concept for landfill mining and to provide the necessary information for the implementation of mining projects.

Keywords: Landfill. Mining. Impact. Treatment. Residues.

1 INTRODUÇÃO

As razões para a mineração dos aterros têm mudado nas últimas décadas. No passado, os principais objetivos dos projetos de mineração dos aterros eram a remediação dos aterros contaminados e da recuperação de pedaços de terra. A separação das frações de lixo, antes do descarte dos resíduos, é raramente executada na prática. Como consequência do fato de que os recursos explorados futuramente irão entrar em escassez, assim como ocorrerá um aumento nos seus preços, cada vez mais, a mineração de frações de lixo recicláveis em aterros tem ganhado força. Consequentemente, há alguns anos a extensão da mineração clássica de aterros, o então chamado “Reforço da Mineração em Aterros (RMA)”, vem sendo muito discutido e já tem sido aplicado nos primeiros projetos (TIELEMANS; LAEVERS, 2010).

A ideia básica do RMA é de fazer o lixo recircular economicamente, o que significa que os aterros não são mais considerados como local final de depósito de todos os resíduos do lixo, mas sim como um local temporário onde os materiais são estocados até o momento em que seu uso sustentável seja possível (ULMANS, 2011).

A viabilidade da mineração dos aterros, especialmente no que se diz respeito à viabilidade econômica, tem sido o tema de muitas discussões. Os benefícios resultantes da reciclagem da fração calorífica do lixo e dos metais não são suficientes para equilibrar os custos com a própria mineração. Do ponto de vista econômico, apenas a consideração de outros benefícios, tais como, menores custos no pós-tratamento do aterro e um valor maior do espaço dos aterros, são vantajosos (VAN VOSSSEN; PRENT, 2011).

O inventário do corpo do aterro é o principal fator que influencia o balanço econômico e biológico. Em relação aos materiais recicláveis, o foco está particularmente voltado para a fração calorífica e para os metais. Embora as concentrações de ferro sejam, na maior parte das vezes, mais elevadas quando comparadas com as concentrações de metais como alumínio ou cobre, a viabilidade econômica da mineração do aterro depende muito mais do conteúdo destes metais que possuem altos preços. Os elementos raros, apesar de suas concentrações muito baixas, algumas vezes, também são considerados. O grande número de estudos realizados em todo o mundo sobre a viabilidade de projetos envolvendo a mineração de aterros ou de projetos já em execução, nos dá uma boa visão em relação ao inventário dos aterros. Os resultados mostram que, sob o ponto de vista de massa dos resíduos, a maior parte, entre 50 – 70%, é representada pelas frações finas (geralmente materiais < 20 mm) (RETTENBERGER, 2009, VAN VOSSSEN; PRENT, 2011).

Entretanto, na maioria dos projetos de mineração de aterros executados até agora, a reciclagem tem se restringido à fração grossa dos resíduos (por exemplo, plásticos, papéis, sucatas e madeiras), enquanto que a fração fina dos resíduos volta para o aterro sem ou apenas com um pequeno tratamento adicional. A dificuldade no processamento de materiais mais finos, também é um dos motivos pelo qual até o momento, a mineração de aterros tem sido aplicada apenas em alguns aterros para cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos ou de cinzas provenientes de processos industriais. Entretanto, o potencial da matéria-prima secundária nestes aterros – em particular no que se diz respeito aos metais – é maior quando comparado com os aterros de resíduos sólidos urbanos. A mineração em aterro com ênfase em uma extensa reciclagem é basicamente viável, mas ainda faltam informações confiáveis no que se diz respeito à aplicação de tecnologias de tratamento e sobre a quantidade e qualidade da recuperação de matérias-primas secundárias.

2 CONDIÇÃO *QUO* DA MINERAÇÃO NOS ATERROS

A mineração nos aterros vem sendo aplicada por mais de 60 anos em diferentes escalas, pelo mundo todo. Existem inúmeras razões para a prática da mineração de aterros, cujos motivos têm mudado ao longo dos anos. Uma revisão de 77 projetos mundiais (Volume > 10,000 m³) mostrou que um dos principais motivos para a mineração é a proteção das águas subterrâneas (33%), sendo essa, uma das principais prioridades (BUDDE; CHLAN; DÖRRIE, 2002). Outros motivos são o ganho de volume (20%), recuperação de recursos (13,5%), construção de aterros internos (13%) recuperação de áreas de assentamento (12%) e redução de custos (8%) para o acompanhamento do tratamento.

Dentre todos os projetos citados, comparativamente, apenas uma pequena parcela dos fluxos de materiais foi especialmente direcionada para reciclagem. A maior parte do material é depositado no estado da arte nos aterros. A mineração de aterros, no que se diz respeito à recuperação de recursos, até o momento não foi realizada nem para os resíduos sólidos urbanos e nem em aterros de escórias.

Revisões da literatura mostram que até o momento, a mineração em aterros tem sido aplicada apenas em alguns poucos aterros de escórias. Entretanto, o potencial presente das matérias-primas secundárias é alto. Durante uma remediação em 2005, aproximadamente 200.000 toneladas de materiais foram recuperadas de um aterro de escórias na Suíça, sendo esses, aproximadamente 4.270 toneladas de ferro, alumínio, cobre e bronze.

As medidas adotadas até agora mostram que a recuperação de aterros e a preparação mecânica de materiais são basicamente viáveis. O estado da arte ainda não está bem definido. Em algumas áreas (por exemplo, a de estabilização dos resíduos e técnicas de separação de resíduos), certas técnicas já estão estabelecidas na prática (DWA/VKS, 2012). Entretanto, em muitas áreas, detalhes sobre a aplicação de tecnologias de processos de remediação, tratamento e classificação, reciclagem de embalagens, tratamento e disposição de resíduos, ainda não estão disponíveis de forma clara.

3 MOTIVAÇÃO E OBSTÁCULOS

Os prós e contras da mineração em aterros podem ser resumidos da seguinte forma:

3.1 Prós: Rendimentos da Extração de Matérias-Primas Secundárias

- Rendimentos da reciclagem da terra (por exemplo: alto valor de utilização como a construção de terrenos);
- A economia nos custos para as fases de fechamento e pós-tratamento (após o encerramento do aterro, geralmente um tratamento do lixiviado e do gás produzido é necessário por pelo menos várias décadas);
- Melhoria e remediação do aterro (por exemplo: a construção de um sistema de barreira na base). Extensão do tempo de eliminação de resíduos através do ganho de volume;
- Crescente aceitação entre os moradores devido à modernização da área após a conclusão da ação;
- Proteção do clima, ar, água, solo e da paisagem.

3.2 Contras: Custos com Escavação, Processamento, Tratamento e Redisposição dos Resíduos de Lixo

- Baixa aceitação da mineração pelos habitantes locais, principalmente devido à emissão de odores e poeira, produção de barulho e congestionamentos;
- Regras legais ainda não estão claras;
- Falta de informações confiáveis para a mineração, (por exemplo, entre outras, informações sobre a qualidade dos produtos e economia/ecologia).

Sob o ponto de vista apenas ecológico, a mineração nos aterros, com o objetivo de levar o máximo possível de resíduos de lixo de volta para o ciclo de materiais, é certamente discutida de forma controversa. As principais questões discutidas estão voltadas para os aspectos econômicos. Os rendimentos das vendas de matérias-primas secundárias, da reciclagem da terra e a economia feita durante o fechamento e na fase de pós-tratamento são compensadas pelas despesas com a mineração, tratamento e disposição do material restante.

Hoje em dia, os aspectos econômicos não são a principal motivação que levam a mineração em aterros, mas, de qualquer forma, os rendimentos gerados reduzirão consideravelmente os custos totais no processo mineração. Com o crescente aumento dos preços das matérias-primas para o processo em questão, sob os aspectos de produção, as matérias-primas secundárias tornar-se-ão mais importantes. Para a mineração de aterros, isso significa que, não é a questão “se”, mas apenas “quando” este processo é relevante.

4 FLUXO DE TRABALHO PARA A MINERAÇÃO DE ATERRO

O processo de mineração de aterro pode ser dividido em seis etapas principais:

1. **Estudos de viabilidade:** identificação do tipo e das quantidades de resíduos para que se possa definir o seu potencial de reciclagem e os equipamentos a serem utilizados. Identificação das condições econômicas e ecológicas. Determinação do potencial de risco e das medidas de segurança a serem seguidas.
2. **Estabilização biológica:** se na primeira etapa, a composição e idade dos resíduos indicarem um aumento no volume de gás no aterro, o que deve ser observado durante a mineração, uma estabilização aeróbia pode ser necessária. Através da alteração do ambiente bioquímico no corpo do aterro de condições anaeróbias para aeróbias, as emissões de gases e odores dos aterros podem ser reduzidas à um grau mínimo. Através da aplicação da técnica de ventilação e de extração do gás, o teor de água nos resíduos é reduzido, o que, conseqüentemente, facilita etapas posteriores do tratamento mecânico.
3. **Extração dos materiais:** o lixo é escavado em camadas e é transportado para as unidades de tratamento individual. Nesta etapa já se pode iniciar a pré-triagem de resíduos.
4. **Separação:** os fluxos individuais de materiais são separados e classificados em diferentes etapas e com diferentes técnicas para que sejam obtidas frações de resíduos definidas para a próxima etapa, ou seja, para o tratamento.
5. **Tratamento e recuperação:** se e quais as etapas de tratamento – mecânico e/ou biológico e térmico – deverão ser integradas, é uma questão que está sujeita à avaliação individual. A manipulação de resíduos não recicláveis é de grande importância para a eficiência da mineração em aterros, em particular, das frações mais finas, que podem representar até cerca de 50% da massa total do lixo. E também, nesta fração, técnicas de tratamento devem ser aplicadas para que se possa reduzir o potencial de riscos.
6. **Disposição:** todos os materiais que não puderem ser utilizados para reciclagem ou recuperação térmica, devem ser novamente depositados nos aterros, o que deve estar de acordo com o estado da arte. A disposição deve ser feita no sentido de especificidade da substância, e recuperados, a fim de se permitir a mineração de materiais específicos no futuro.

5 POTENCIAL DOS RECURSOS EM ATERROS NA ALEMANHA

De acordo com estimativas baseadas em dados da literatura, 2,5 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) vêm sendo dispostas em aterros na Alemanha desde 1975. A quantidade de resíduos depositados no mundo todo durante este período é de aproximadamente de 36 a 45 bilhões de toneladas (BILITEWSKI, 2000; FRICKE *et al.*, 2011; MOCKER *et al.*, 2009).

Com base nesses dados que indicam as quantidades de resíduos de lixo, é possível a realização de uma avaliação dos grupos de materiais depositados em combinação com as análises de resíduos feitas em datas diferentes e com as análises realizadas durante os projetos de mineração de aterros. A Tabela 1 mostra os resultados das análises de resíduos de lixo obtidos de diferentes projetos de mineração de aterros.

Tabela 1 – Resultados das análises de materiais de projetos de mineração de aterros

Materiais	Massa
	% substância úmida
Papel / cartão / papelão	8 – 6
Madeira	3 – 10
Plásticos	4 – 9
Têxteis	1 – 3
Metais ferrosos	1 – 4
Metais não ferrosos	0,3 – 0,8
Vidros	2 – 4
Minerais	30 – 75
Orgânicos nativos	6 – 12
Lodo de esgoto	1 – 3

Fonte: Elaborada pelos autores com dados de Fricke *et al.* (2011); Mehlhart e Ustohalova (2012); e, Rettenberger (2009).

Como o esperado, a percentagem de tipos individuais de resíduos encontra-se em uma ampla gama de diferentes valores. A composição depende, particularmente, da idade do aterro e das condições sociais e econômicas do aterro em específico. Observar que valores relativamente altos de papel / cartão / papelão (PCP) e as pequenas quantidades da fração orgânica nativa são compartilhados. PCP, plásticos, madeira e têxteis formam a fração calorífica e podem ser encontrados, particularmente, na fração grosseira dos resíduos de lixo. Ferro, alumínio e zinco são os metais que normalmente podem ser encontrados em maiores concentrações nos resíduos, e estes materiais são encontrados distribuídos em todas as frações dos resíduos. Os elementos raros também podem ser encontrados em baixas concentrações. Especialmente metais raros como o praseodímio (0,7 – 5,4 mg/kg), neodímio (2,9 – 21 mg/kg) ou gadolínio (0,6 – 4,1 mg/kg), que são utilizados em aparelhos eletrônicos e podem ser detectados em concentrações ligeiramente superiores (RETTENBERGER, 2012).

Como resultado da incineração do lixo, a concentração de componentes metálicos nas cinzas é maior em comparação àquelas encontradas nos resíduos de lixo fresco. O fato de que somente após alguns anos, e apenas em algumas poucas plantas de incineração, os metais não ferrosos são separados, é um fator decisivo. Os resultados das análises químicas mostraram que não apenas o ferro, mas também as concentrações de alumínio são elevadas (Tabela 2). O enriquecimento de metais preciosos e de elementos raros nas cinzas, durante a incineração, reduzem consideravelmente os custos para a recuperação desses elementos em relação aos resíduos frescos (MORF *et al.*, 2013).

Tabela 2 – Análises das cinzas provenientes da incineração de RSU alemães

Metais	Cinzas alemãs	Dados da literatura
	mg/kg	mg/kg
Ferro	72,706	4,120 – 150,000
Alumínio	42,605	21,900 – 72,800
Níquel	221	100 – 300
Manganês	1,361	100 – 2,200
Cobre	2,208	290 – 8,240
Titânio	7,095	3,000 – 9,500
Vanádio	32	20 – 122

Fonte: Elaborada pelos autores com dados de Deike, Warnecke e Vogell (2012) e Chandler *et al.* (1997).

Com base nas massas de resíduos de lixo depositadas e incineradas no período compreendido entre 1975 a 2005 e também nas suas concentrações, pode-se estabelecer uma estimativa aproximada dos potenciais de materiais recicláveis (Tabela 3). Desse modo, o valor para metais como ferro, cobre e alumínio depositados na Alemanha desde 1975 são estimados aproximadamente em 9 bilhões de euros, para as substâncias caloríficas – com base no equivalente de petróleo – aproximadamente de 60 bilhões de euros. O valor monetário da fração calorífica é baseado no valor do teor energético e é consequentemente compreendido como uma percepção visual dos rendimentos. De fato, na Alemanha, os rendimentos dos resíduos caloríficos (RRC) só conseguem ser alcançados em casos excepcionais.

Os valores na Tabela 3 também proporcionam uma ideia da contribuição da mineração de aterros para as necessidades anuais de recursos na Alemanha. Os números absolutos parecem ser muito pequenos, mas o tempo necessário para a mineração de aterros também devem ser

levados em consideração. Se apenas 1% dos resíduos depositados são minados por ano (as capacidades de triagem e tratamento atualmente estão disponíveis na Alemanha), então a atribuição, por exemplo, da sucata de ferro no processo de produção aumentaria em cerca de 1 – 5%. Além disso, para mais 20 anos, de 2,5 a 4% da demanda para energia primária poderia ser compensada pela fração calorífica proveniente de mineração do aterro.

Tabela 3 – Potencial de matérias-primas secundárias na Alemanha

Materiais	Massa	Percentual necessário para um ano na Alemanha
	10 ⁶ t	%
Alumínio	0,5 – 0,7	50 – 65
Ferro	20 – 28	100 – 180
Cobre	0,9 – 1,2	140 – 170
Fração calorífica	250 – 400	50 – 80

Fonte: Elaborada pelos autores com dados de Rettenberger (2009).

6 PROJETO DE MINERAÇÃO EM ATERRO TÖNSLM

Até o ano de 2005 a Alemanha ainda depositava uma fração de seus resíduos *in natura* nos aterros, significando que essas áreas possuem alto potencial de recuperação de recursos secundários. Para avaliar este potencial foi proposto o projeto de pesquisa TÖNSLM que será abordado nos próximos itens.

6.1 Objetivos e Métodos

No outono de 2012, o projeto de larga escala TÖNSLM, financiado pelo Ministério Alemão da Educação e Investigação iniciou estudos relacionados à mineração de aterros (MÜNNICH *et al.*, 2013). O objetivo do projeto é o de desenvolver uma concepção geral sobre a mineração de aterros e de fornecer informações para a tomada de decisões, assim como, de instruções para a realização de projetos semelhantes. Pela primeira vez, um conceito integrado geral para o desmantelamento de aterros de resíduos urbanos e cinzas, assim como para a utilização máxima dos recursos, foram desenvolvidos.

Os principais temas do projeto de pesquisa são:

- Avaliação do potencial dos recursos.
- Desenvolvimento de conceitos técnicos para a classificação e tratamento.
- Quais matérias-primas secundárias podem ser geradas e qual a sua qualidade?

- Integração de instalações de tratamento já existentes.
- Aspectos econômicos e ecológicos.
- Requisitos legais.
- A aceitação entre os moradores.

O projeto é realizado por meio de um consórcio composto de diversas empresas e Universidades:

- Tönsmeier Dienstleistung GmbH & Co. KG, Porta Westfalica (gerente do consórcio).
- Operação de resíduos do distrito de Minden-Luebbecke, AML, Minden.
- Universidade Técnica de Braunschweig (três Institutos).
- Universidade Técnica de Clausthal (um Instituto).
- Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen (dois Institutos).
- Joint venture IFEU – Instituto de Energia e Pesquisa Ambiental Heidelberg GmbH e Öko-Instituto e.V., Freiburg.

6.2 Abordagem Sistemática e Primeiros Resultados das Investigações

As investigações são realizadas em três aterros, os quais possuem uma composição diferente de resíduos (lixo doméstico, cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos, codeposição de RSU e cinzas). Na sequência, as averiguações realizadas no aterro de resíduos sólidos urbanos de Pohlsche-Heide do centro de gestão de resíduos de Minden-Luebbecke são apresentadas. O aterro é situado na parte norte-ocidental da Alemanha. Em uma área de 27 hectares, cerca de $2,5 \cdot 10^6$ m³ de resíduos de lixo foram depositados de 1988 até 2005. O histórico das pesquisas mostra que principalmente resíduos sólidos comerciais, similares ao lixo doméstico, resíduos domésticos, de construção e materiais de solo, foram depositados. Nas áreas onde as três trincheiras foram estabelecidas para a amostragem dos resíduos, sete perfurações de teste (Ø 30 cm) (Figura 1) estão sendo investigados, como a composição dos resíduos e a situação do lixiviado (chorume empoleirado). Medições de gás foram realizadas a fim de se avaliar a necessidade de ações passivas ou de aeração ativa antes da escavação. As amostras foram coletadas e a fração fina (< 40 mm) foi analisada, principalmente quanto à atividade biológica remanescente.

Os resultados das análises químicas confirmaram as investigações do histórico de exploração no que se diz respeito às medidas de gestão de resíduos implementadas (por exemplo: a separação de resíduos biológicos) e do impacto resultante na composição dos resíduos. Devido à idade dos resíduos, eram esperados valores baixos de Carbono Orgânico Total (COT) para a atividade biológica, entretanto, uma relação entre esses valores e a idade do material não é evidente. A aeração ativa antes escavação não foi necessária devido as baixas taxas de liberação de gás durante a perfuração e o baixo potencial de produção de gás. Aproximadamente 8.700 toneladas de resíduos

e 2.300 toneladas de materiais de solo da tampa foram escavadas das três trincheiras (cada uma com cerca de 2.600 m³) através do uso de uma pá com uma garra para o material de fração grosseira e uma retroescavadeira para os materiais da fração fina (Figura 2).

Figura 1 – Vista do aterro de Pohlsche-Heide com áreas de investigações



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Figura 2 – Escavação dos resíduos das trincheiras



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

O material foi levado para a superfície patamar do aterro, onde ocorreu o primeiro pré-condicionamento (Figura 3).

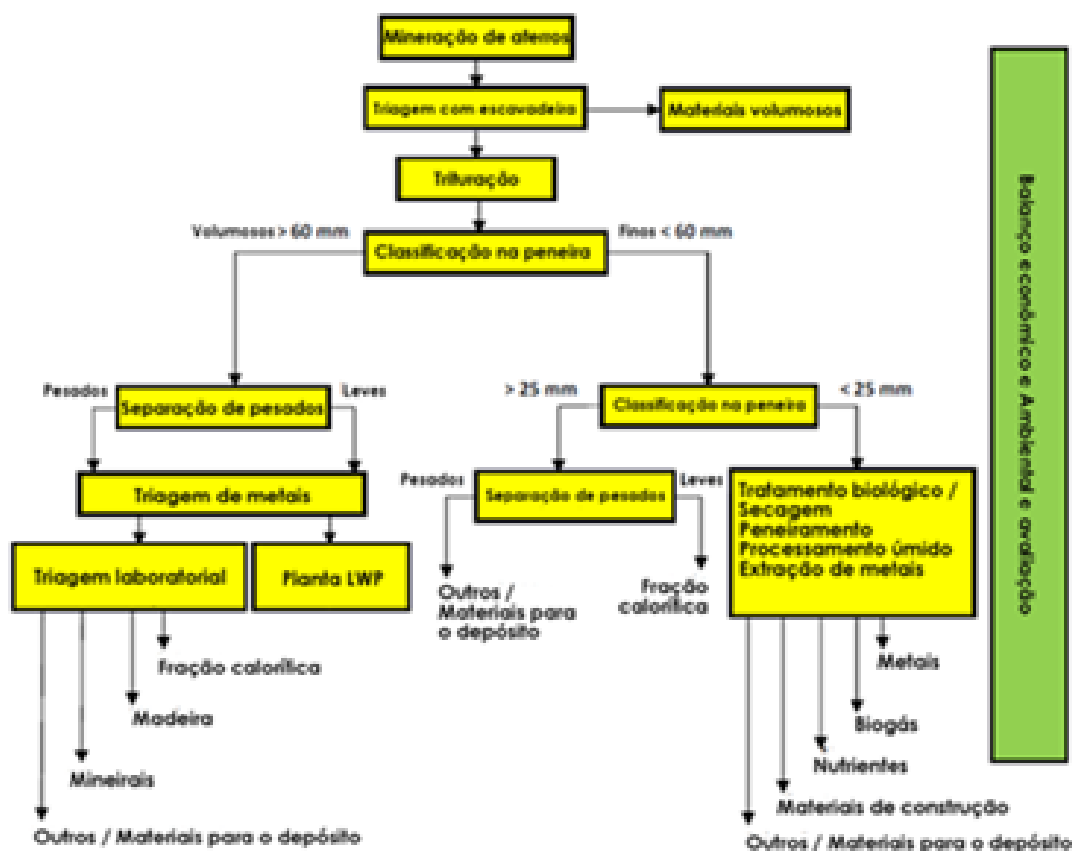
Figura 3 – Armazenamento intermediário e pré-condicionamento dos resíduos



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Os fluxos dos resíduos escavados e o processo dos fluxos estão esquematicamente ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Fluxos e métodos de tratamento dos resíduos

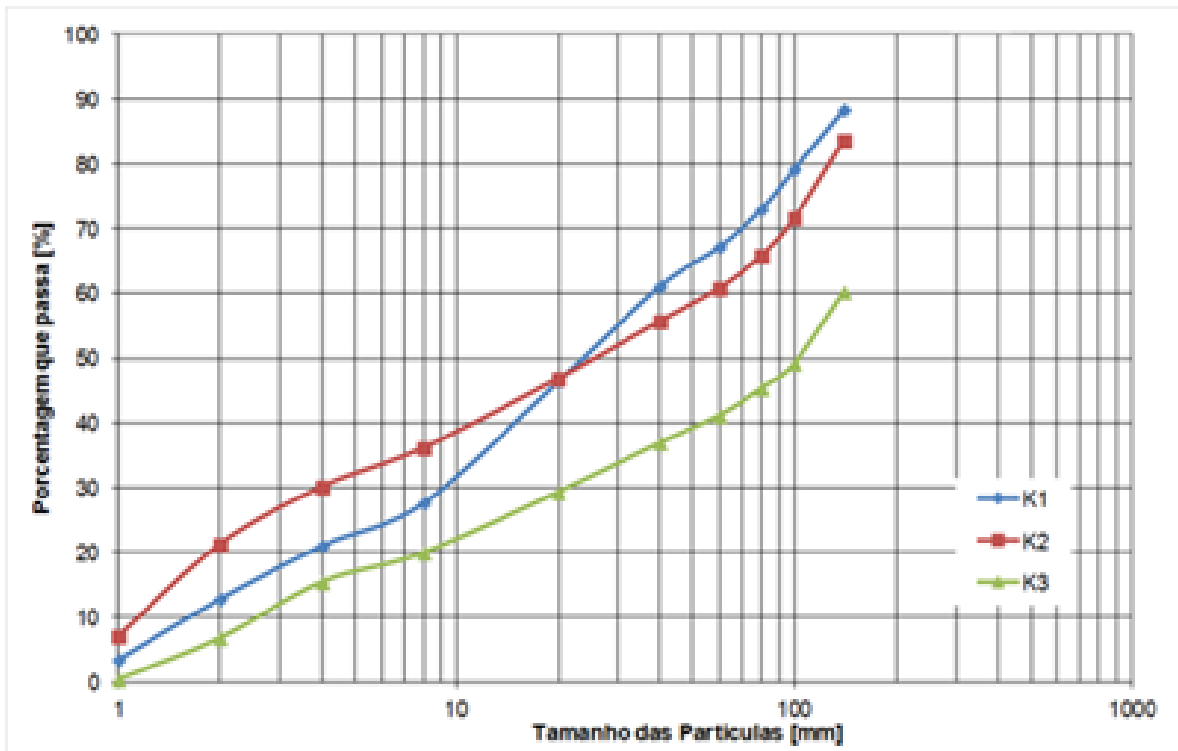


Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Após a trituração, a separação entre os materiais grosseiro e fino foi realizada através de peneiração, com corte de peneira de 60 mm. Então, ambas as frações foram preparadas de acordo com seus diferentes aspectos, cada um dos materiais foi examinado e quando necessário, customizados para processos posteriores. A análise granulométrica, antes do tritramento, demonstrou diferenças consideráveis na composição dos resíduos (Figura 5). O aumento da quantidade de material > 140 mm da amostra K3, deve-se a uma grande quantidade de têxteis de grande escala nesta área. Entretanto, as curvas também confirmaram que a proporção de material fino < 60 mm, cerca de 40 – 68% (WS) é alta. E se a fração fina é definida por um corte de peneira de 25 mm, cerca de 50% (WS) (K3 32%) também é classificado como material fino.

No geral, os valores estão de acordo com os dados da literatura. Por um lado, se o esforço para continuidade no processamento da fração fina é relativamente elevado, por outro lado, essa mesma fração fina pode interferir no posterior processamento da fração grosseira. Os primeiros testes realizados com a com fração calorífica grosseira mostraram que o valor de aquecimento dos resíduos é reduzido e que a quantidade de cinzas indesejadas aumenta. Devido à adesão da fração fina, a identificação óptica dos materiais plásticos, durante a sua separação, torna-se impossível.

Figura 5 – Análise granulométrica dos resíduos escavados



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Figura 6 – Fração de material de solo fino agregado 80 – 100 mm K1

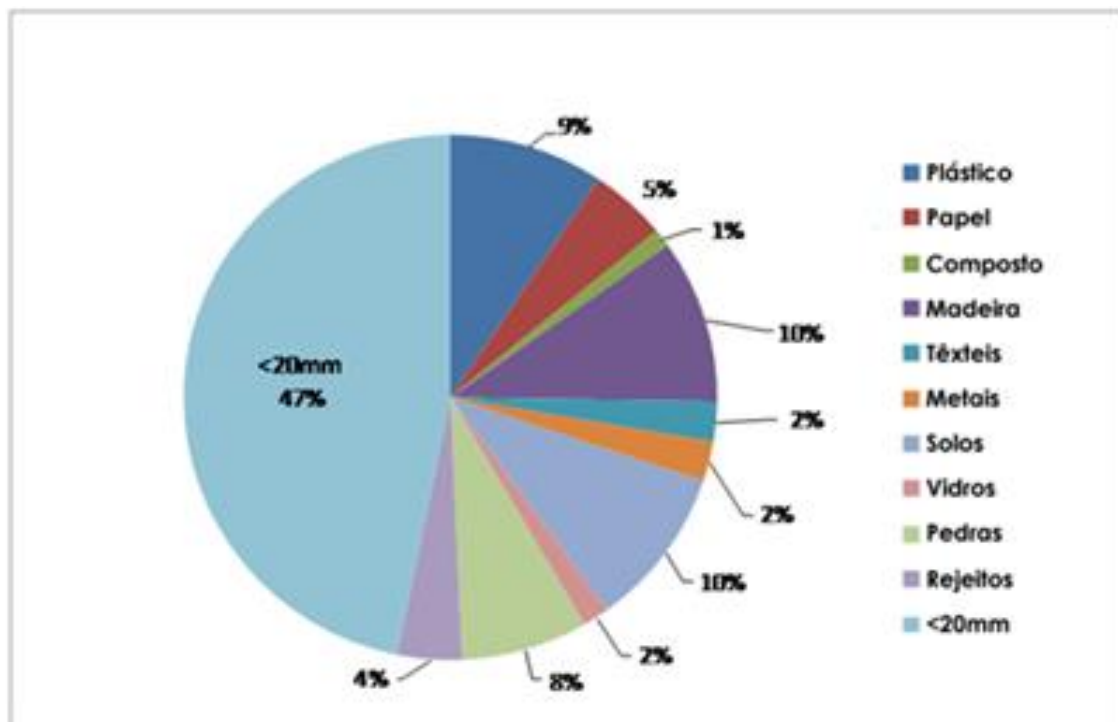


Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

A análise de triagem do material residual ilustra a elevada percentagem de material fino ($K1 < 20 \text{ mm}$ 47%) (Figura 7), os quais não puderam ser investigados devido à sua composição material. A Figura 7 também demonstra que cerca de 27% dos resíduos de lixo são formados pela fração calorífica. O teor de metal é de 2,5%, o que se encontra na faixa intermediária do que foi encontrado em outros aterros. Notável é o aumento da proporção de material de solo fino agregado, o que foi causado pela aplicação da tampa intermediária durante a fase de funcionamento do aterro (Figura 6).

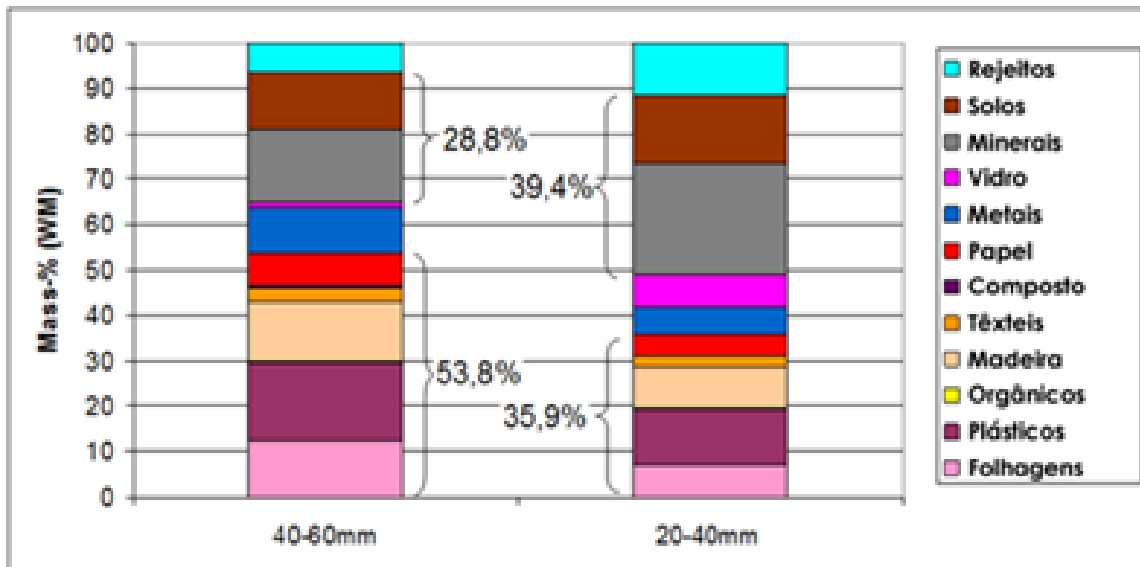
As análises de classificação do material $< 60 \text{ mm}$ demonstraram que a fração calorífica continua significativa (Figura 8). A proporção da fração calórica em relação à categoria de tamanho $40 - 60 \text{ mm}$ é em torno de 54%, na categoria de tamanho de $20 - 40 \text{ mm}$ continua cerca de 36%. E, ao mesmo tempo, a fração inerte aumentou de aproximadamente 29% para cerca de 39%. Dessa forma, é assumido que a quantidade de material inerte aumenta significativamente na fração $< 20 \text{ mm}$. Além disso, as análises granulométricas mostraram que em cada fração há uma grande sujidade dos resíduos (Figura 9).

Figura 7 – Análise de classificação de resíduos da trincheira K1



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Figura 8 – Análise de classificação da fração fina < 60 mm



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Figura 9 – Grau de contaminação do papel na fração > 140 mm

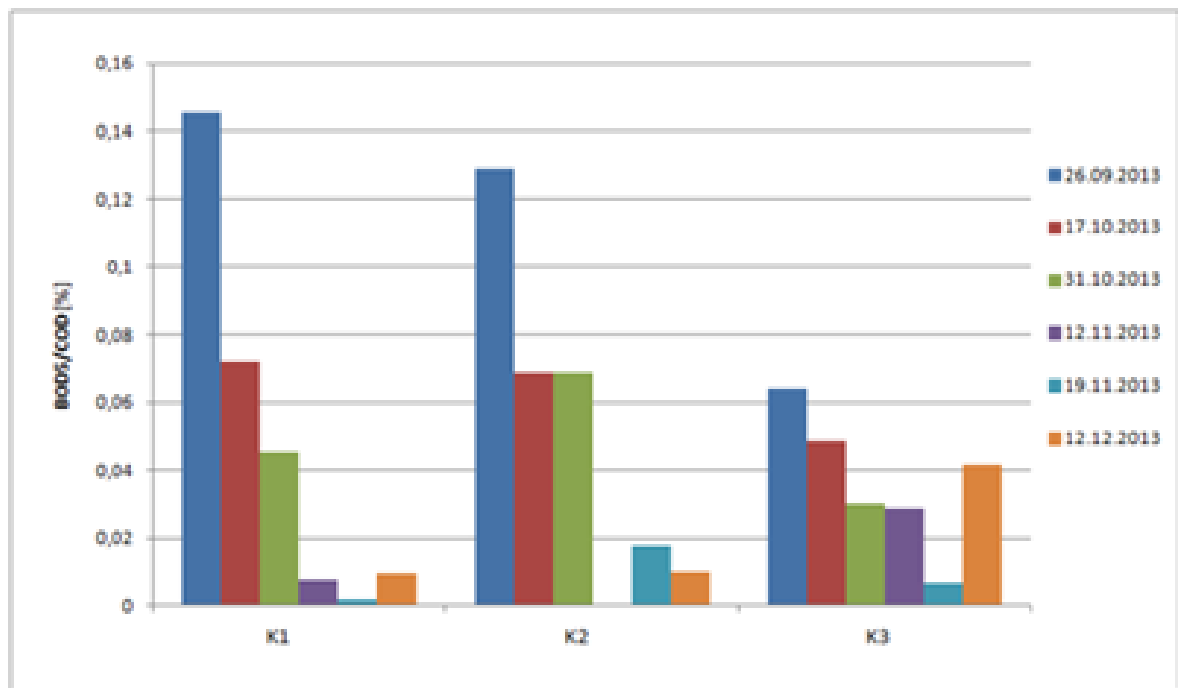


Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Baseado nos estudos biológicos das frações finas (< 60 mm) é possível determinar se os resíduos depositados ainda são biologicamente ativos, para que possam ser utilizados em um pós-tratamento biológico. Para essa finalidade, diversos parâmetros foram analisados a fim de se acessar a biodegradabilidade dos resíduos de lixo.

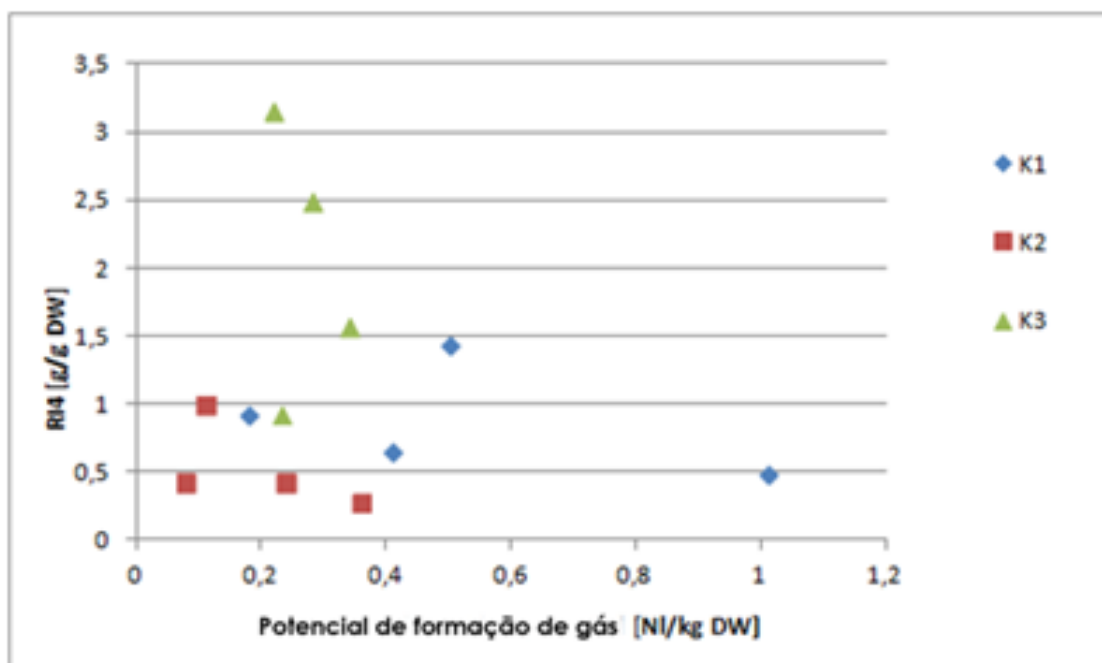
O teor de água dos resíduos com valores entre 20% e 30%, o que é relativamente baixo, sugerem que o material não é mais biologicamente ativo. Os valores de COT (max. 17,8% K1) são, em todos os casos, significativamente maiores que os limites legais de $\leq 3\%$, de acordo com a Portaria Alemã de Aterros (DepV, 2011). Os testes de autoaquecimento indicaram temperaturas máximas muito baixas, 30 °C, o que significa que este material já está bem estabilizado. Parâmetros biológicos também são determinados no eluato. A relação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)₅ / Demanda Química de Oxigênio (DQO) de amostras individuais mostraram, em todos os casos, valores significativamente menores que 50%, indicando que os resíduos estão estáveis (Figura 10).

Figura 10 – Proporção de DBO₅/DQO nas amostras individuais



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

A fim de se descrever a atividade biológica nos resíduos de lixo, os índices de respiração (IR₄) e de potencial de produção de gás foram determinados. Em todas as amostras os valores estiveram abaixo dos valores-limite determinados pela Portaria Alemã de Aterros (DepV, 2011) de 5 mg/g para IR₄ e 20 l/kg para o potencial de formação de gás. Na Figura 11 os resultados dos testes de IR₄ são plotados contra os potenciais de formação de gás. O gráfico ilustra que, em contraste com os resíduos frescos, não há correlação entre esses dois parâmetros para resíduos antigos.

Figura 11 – Correlação de IR₄ e do potencial de formação de gás de materiais escavados

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

A fim de se confirmar que os metais pesados presentes nos resíduos escavados não possuem nenhum efeito inibitório sobre os processos biológicos, as concentrações de metais pesados nos eluatos também foram analisadas (Tabela 4). As concentrações de metais pesados nos eluatos foram tão baixas, que nenhum efeito inibidor biológico é esperado.

Tabela 4 – Concentração de metais pesados no lixiviado

		K1		K2		K3		Efeito inibitório ¹
		K1 a	K1 b	K2 a	K2 b	K3 a	K3 b	
Cobre	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,1	0,1	> 50
Zinco	mg/l	0,19	0,26	0,31	0,27	0,45	0,45	> 150
Cromo – total	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	> 100

¹⁾ KTBL (2007).

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Outro tópico de investigação é a reutilização de materiais finos como nutriente. Análises de teores de nutrientes (N, NH₄-N, K₂O, P₂O₅, CaO, MgO) mostraram que todos os nutrientes necessários estão presentes em pequenas quantidades. Como esperado, o teor de nutrientes é significativamente menor do que aquele encontrado em resíduos orgânicos frescos. As análises de elementos traços (níquel, cobalto, selênio, ferro etc.) mostraram que estes elementos estão

presentes em quantidades suficientes, e em altas concentrações (em particular, o ferro, o níquel e o zinco). Uma possível inibição de processos biológicos devido à alta quantidade desses elementos deve ser testada.

Os parâmetros investigados permitiram uma avaliação da biodegradabilidade dos resíduos com a ajuda de critérios de teste. Tratamentos biológicos só são eficazes se a proporção de matéria orgânica rica em nutrientes facilmente degradável é alta. Em aterros antigos, onde os processos de mineralização já estão em estado avançado e o potencial de formação de gás é pequeno, o pós-tratamento biológico do material não é apropriado (ATV-DVWK/VKS, 2002). As Tabelas 5a e 5b mostram os testes de critérios realizados para que se possa decidir se um tratamento aeróbico do depósito é sensato ou não, e se este critério deve ser aplicado nos resíduos de lixo de “Pohlsche-Heide”. Por um lado, os dados mostram que o aterro é composto em sua maior parte por lixo municipal, o que representa de moderada à alta viabilidade para a aplicação de um tratamento aeróbico. Mas por outro lado, devido à idade e aos parâmetros de perda de ignição, autoaquecimento e dos grupos de substâncias orgânicas, esse material é inadequado para tratamento biológico.

Tabela 5a – Critérios para um pós-tratamento aeróbio

Critério	Valores	Avaliação	Aterro de “Pohlsche Heide”
Tipos de resíduos	Resíduos municipais	° +	Resíduos municipais
	Massas de terra, resíduos de construção	-	
Idade dos resíduos municipais	< 10 anos	+	25 anos
	> 30 anos	-	
Produção de gás no aterro	> 8 m ³ /Mg a	+	> 8 m ³ /Mg a
	< 8 m ³ /Mg a	-	
Estrutura do material	Principalmente fração fina (< 8 mm)	-	< 60 mm
	Estrutura distinta	+	
+ Altamente adequado para o tratamento aeróbico			
- Moderadamente adequado para o tratamento aeróbico			
° Pouco adequado para o tratamento aeróbico			

Fonte: ATV-DVWK/VKS (2002).

Tabela 5b – Critérios para um pós-tratamento aeróbio

Critério	Valores	Avaliação	Aterro de “Pohsche Heide”
Perda de ignição	< 15%	-	K2 < 19% K1 & K3 > 25%
	> 25%	° +	
Autoaquecimento	> 30 °C	+	< 30 °C
	< 30 °C	-	
Substâncias orgânicas Grupos (de acordo com van Soest)	Luz primária e forma solúvel	+	Principal dificuldade e não solubilidade
	Principal dificuldade e não solubilidade	-	
+ Altamente adequado para o tratamento aeróbico			
- Moderadamente adequado para o tratamento aeróbico			
° Pouco adequado para o tratamento aeróbico			

Fonte: ATV-DVWK/VKS (2002).

6.3 Tratamento Mecânico Úmido da Fração Fina

O conhecimento relacionado ao processamento mecânico úmido de materiais dos aterros – em particular de frações finas – é estimado como ainda sendo baixo. Por este motivo, diversos métodos de processamento mecânico úmido serão investigados no projeto de P&D.

A fração mineral ou inerte dos resíduos abrange toda a gama de tamanho de grãos, ou seja, de argila à pedra. O material fino não é formado apenas pelo material inerte, mas também pode conter elevadas quantidades de material orgânico. Para que o material inerte possa ser reutilizado, por exemplo, material de construção, a matéria orgânica deve ser previamente separada.

No projeto de pesquisa, o tratamento mecânico úmido é utilizado para separar os resíduos finos em diferentes fluxos de materiais já definidos. Durante o processo, as substâncias são separadas como material pesado, leve e de suspensão. Através da adição de água no processo de tratamento, a contaminação dos resíduos de lixo é reduzida e, conseqüentemente, a qualidade do material inerte tende a aumentar. A água utilizada na lavagem deve ser tratada por técnicas adequadas.

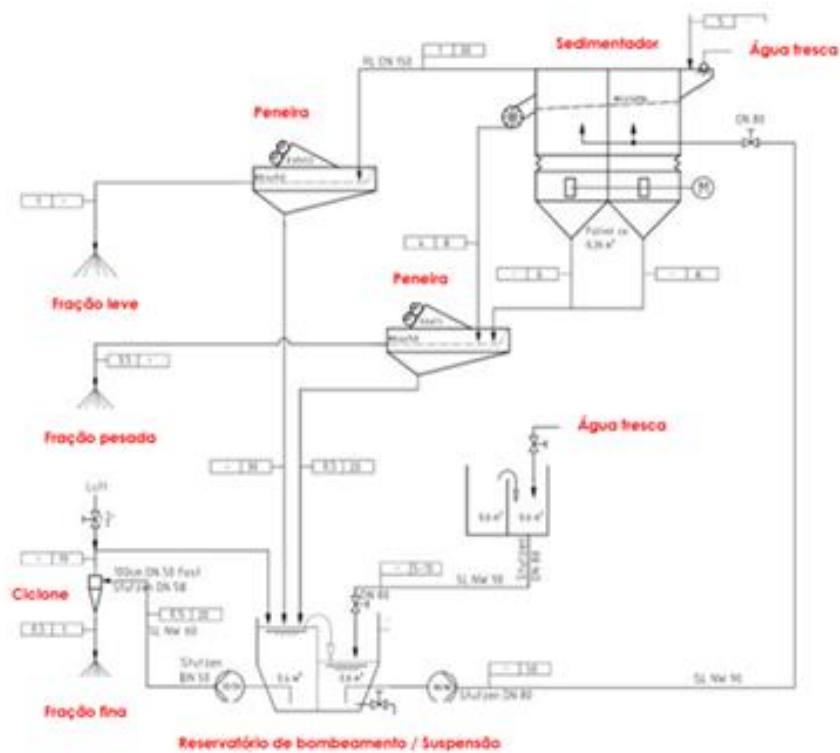
Figura 12 – Coqueteleira úmida “Triplo A” da “AGS Instalações + Método GmbH



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Para investigações foi utilizada a máquina de coqueteleira úmida do tipo “Triplo A” da empresa alemã “AGS Anlagen + Verfahren GmbH” (Figuras 12 e 13).

Figura 13 – Esquema do processo da Coqueteleira úmida “Triplo A”



Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

Nessa coqueteleira são investigados os resíduos de lixo < 25 mm e < 60 mm. O princípio básico de funcionamento do tratamento mecânico úmido é que as impurezas aderidas aos componentes minerais possuem uma densidade menor do que os próprios componentes minerais.

Através do tratamento do material de abastecimento com a água pulsante e corrente e picos de pressão (afrouxamento e limpeza), componentes flutuantes (plástico, madeira, têxteis) são separados da mistura total e também podem ser separadas através de uma abertura de extravasamento (material leve). Componentes pesados, como minerais, vidros ou sedimentos de cerâmica, podem ser subsequentemente descarregados. Diferentes composições e as alterações resultantes nas densidades do material residual são levados em consideração por uma variação de parâmetros de taxas de fluxos do meio de lavagem e da profundidade da água da bacia de definição.

As possíveis aplicações dos produtos obtidos são as seguintes:

- Fração pesada → material de construção
- Fração leve → combustível
- Fração fina → material de construção
- Suspensão → recuperação de energia

Para a utilização de componentes minerais para fins de construção, o material deve preencher determinados requisitos de qualidade. Na Alemanha, os requerimentos exigidos para a utilização de materiais de resíduos minerais, em especial, os valores-limite Z2, são de muita importância (LAGA, 2003).

As primeiras investigações sobre o material de entrada em termos de concentração de metais pesados nos eluatos, mostraram que os valores-limite para Z2 só foram ultrapassados em alguns casos, como por exemplo, para cloretos e sulfatos (Tabelas 6 e 7). Estes dois parâmetros são altamente solúveis em água e podem ser facilmente removidos durante a lavagem. Este é um bom ponto de partida para o processamento úmido.

Tabela 6 – Valores sólidos em relação aos valores do LAGA

Substância original	Unidade	K1	K2	K3	LAGA – valor limite		
					Z0	Z1	Z2
Chumbo	mg/kg DW	635,32	185,19	2.704,92	140,00	210,00	700,00
Cádmio	mg/kg DW	1,27	5,70	2,73	1,00	3,00	10,00
Cromo	mg/kg DW	101,65	156,70	81,97	120,00	180,00	600,00
Cobre	mg/kg DW	266,84	1.794,87	1.502,73	80,00	120,00	400,00
Níquel	mg/kg DW	67,34	72,65	61,48	100,00	150,00	500,00
Mercúrio	mg/kg DW	0,38	0,57	0,27	1,00	1,50	5,00
Zinco	mg/kg DW	749,68	1.894,59	819,67	300,00	450,00	1.500,00

Fonte: LAGA (2003).

Tabela 7 – Valores do lixiviado em relação aos valores limites do LAGA

Valores do eluato	Unidade	K1		K2		K3		LAGA – valor limite			
		K1 a	K1 b	K2 a	K2 b	K3 a	K3 b	Z0	Z 1.1	Z 1.2	Z2
Valor do pH		7,3	7,2	7,3	7,3	7,2	7,3	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	6 - 12	5,5 - 12
Condutividade elétrica	µS/cm	1.338	1.680	968	1.151	1.915	2.070	250	250	1.500	2.000
Chumbo	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	40	40	80	200
Cádmio	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	1,5	1,5	3	6
Cobre	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,1	0,1	20	20	60	100
Níquel	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	15	15	20	70
Zinco	mg/l	0,19	0,26	0,31	0,27	0,45	0,45	150	150	200	600
Cromo-total	mg/l	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	12,5	30	50	100
Cloreto	mg/l	51,1	65,2	20,6	27,7	115	121	30	30	50	100
Sulfato	mg/l	658	914	552	903	912	1.072	20	20	50	200

Fonte: LAGA (2003).

As prioridades na investigação de tentativas de tratamento mecânico úmido são as seguintes:

- Contabilidade do fluxo de massa;
- Análise e avaliação do fluxo de massa, no que diz respeito a:
 - ✧ Valores de classificação de solos de acordo com o LAGA (Z2);
 - ✧ Nutrientes e poluentes;
 - ✧ Parâmetros de deposição após o DepV;
 - ✧ Testes de critérios do combustível derivado de resíduos (fração leve);
 - ✧ Características mecânicas;
 - ✧ Parâmetros para os processos biológicos;
- Coleta de todos os dados para a avaliação ecológica e econômica.

6.4 Redução do Volume Através da Realocação e da Utilização de Materiais Depositados

A recuperação do volume de aterro para a extensão de tempo de uso do próprio aterro é de particular relevância na Alemanha, uma vez que a aprovação de novos aterros é quase que

impossível. Mas também, especialmente em áreas urbanas de rápido crescimento de países emergentes e em desenvolvimento, a recuperação do volume do aterro recebe uma alta prioridade. Os principais objetivos da realocação dos aterros são o ganho de volume do aterro e a redução de impactos ambientais através da distribuição dos resíduos em áreas equipadas com sistemas lineares de revestimento de base.

Tabela 8 – Volume de recuperação através da realocação e reciclagem de aterros antigos

Tipos de realocação	
Alemanha	Volume de recuperação
Escavação e novo aterro com maior densidade	30 – 35%
Escavação e novo aterro com maior densidade e reciclagem (CDR e metais)	40 – 55%
Escavação e novo aterro com maior densidade e reciclagem (CDR e metais e fração mineral selecionada)	50 – 70%
Brasil	Volume de recuperação
Escavação e novo aterro com maior densidade	40 – 55%
Escavação e novo aterro com maior densidade e reciclagem (CDR e metais)	50 – 70%
Escavação e novo aterro com maior densidade e reciclagem (CDR e metais e fração mineral selecionada)	65 – 80%

Fonte: Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut.

A Tabela 8 mostra possíveis ganhos de volumes sob condições alemãs e brasileiras. Os ganhos de volume significativamente maiores no Brasil, são baseados nas relativas baixas densidades de instalações atualmente observadas no Brasil. Portanto, apenas a realocação de densidades de 0,7 para 0,8 t/m³ podem ser alcançadas no Brasil. Na Alemanha, a realocação é realizada através de compactadores, o que resulta em densidades na gama de 1,0 para 1,3 t/m³. De acordo com os valores indicados na tabela, presume-se que no Brasil, a redistribuição dos resíduos também é praticada por meio de compactadores.

7 CONCLUSÕES

O cálculo do potencial de matérias-primas secundárias em aterros sanitários na Alemanha é alto. Antes da introdução de medidas de manejo do lixo para a recuperação de recursos, é importante fazer a distinção entre aterros antigos de aterros recentes. No caso de aterros antigos, maiores concentrações de metais e substâncias de alto valor calorífico podem ser esperadas. Em aterros mais recentes, o teor dessas substâncias será menor devido à separação dos resíduos antes da sua disposição.

Os resultados obtidos no projeto de P&D TÖNSLM mostraram a percentagem significativa de materiais de alto valor calorífico presentes no aterro localizado em Pohlsche-Heide. Antes da reciclagem desse material ou para a produção de combustível derivado de resíduos, um tratamento adicional é necessário, devido à alta contaminação de partículas finas de solo. Este é especialmente o caso de substâncias de alto poder calorífico nas frações > 60 mm. Levando-se em consideração a massa total, a mais importante é a fração < 60 mm. Nessa fração, a percentagem de materiais minerais, que podem ser utilizados como material de construção após etapas adicionais de processo é alta.

As investigações relacionadas à biodegradabilidade dos resíduos mostraram a ausência ou apenas uma pequena atividade biológica. Portanto, tratamentos biológicos dos resíduos sob essas condições, para a recuperação de energia ou como etapas de pré-tratamento com outros processos, não são adequados. Os primeiros testes com o tratamento mecânico de resíduos molhados < 60 mm mostraram que os valores-limite exigidos na Alemanha, para o uso como material de construção podem ser alcançados por uma configuração padrão dos parâmetros do processo. Entretanto, no geral, é presumido que, mesmo depois de um processamento otimizado dos resíduos, ainda permanecerão alguns materiais, que ainda não podem ser utilizados e que deverão ser dispostos novamente nos aterros.

*Os autores gostariam de agradecer ao
Ministério Alemão para Educação e Pesquisa (BMBF)
pelo suporte financeiro.*

REFERÊNCIAS

- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDTECHNIK UND LANDWIRTSCHAFTLICHES BAUWESEN IN BAYERN e.V., Ed. **Bayern Biogasforum – Prozessmodell Biogas, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und land-wirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.** Freising, 2010.
- ATV-DVWK/VKS Fachausschuss 3.6 “Deponien”, Ed. **Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen**: ATV-DVWK/VKS – Arbeitsbericht, 2002.
- BILITEWSKI, B. **Abfallwirtschaft**: Handbuch für Praxis und Lehre, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- BIOGAS, KTBL, DARMSTADT.
- BUDDE, Friedrich-Wilhelm; CHLAN, Peter; DÖRRIE, Timo. **Landfill restoration with the BIOPUSTER®-System** – Aeration as prerequisite for occupational-, residential and environmental safety. EUROARAB 2002. Inst. LABW, University of Rostock, 2002. Disponível em: <<http://goo.gl/QpMcXI>>. Acesso em: 31 maio 2014.

- CHANDLER, A.; EIGHMY, T.; HARTLEN, J.; HJELMAR, O.; KOSSON, D.; SAWELL, S.; van der SLOOT, H.; VEHLow, J. **Municipal solid waste incinerator residues**. Studies in Environmental Science 67. Amsterdam: Elsevier, 1997.
- DEIKE, R.; WARNECKE, R.; VOGELL, M. **Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“**. Institut für Metallurgie und Umformtechnik. Universität Duisburg-Essen, 2012.
- DEPONIEVERORDNUNG (DepV). **Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 27. April 2009**, last modified 17. Oktober 2011.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V. (FNR). Ed. **Handreichung Biogasgewinnung und – nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.**, Gülzow, 2005.
- FRICKE, Klaus, MÜNNICH, Kai; SCHULTE, Burkart. Urban Mining – ein Beitrag für die zukünftige Ressourcensicherung. **Ressource Abfall, Festschrift zur 50-Jahr-Feier des BDE**. TK-Verlag, Neuruppin, 2011.
- KURATORIUM für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Fauszahlen, 2007.
- LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall. **Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln – Allgemeiner Teil**. Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20. Mainz. Endfassung vom 06.11.2003
Disponível em: <<http://www.hamburg.de/contentblob/136982/data/trbod-allg.pdf>>.
Acesso em: 31 maio 2014.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA). **Anforderungen an die stoffliche Verwertung**, 2003.
- MEHLHART, Georg; USTOHALOVA, Veronika. **Workshop „Option oder Fiktion?“** des OEKO-Institutes in Berlin am 10. Februar 2012.
- MOCKER, Mario; FRICKE, Klaus; LÖH, I.; FRANKE, Matthias; BAHR, Thomas; MÜNNICH, Kai; FAULSTICH, Martin. Urban Mining – Rohstoffe der Zukunft. **Müll und Abfall 10**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2009.
- MORF, Leo S.; GLOOR, Rolf; HAAG, Olaf; HAUPT, Melanie; SKUTAN, Stefan; DI LORENZO, Fabian; BÖNI, Daniel. Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 634-644, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12004229>>. Acesso em: 31 maio 2014.
- MÜNNICH, K.; FRICKE, K.; WANKA, S.; ZEINER, A. **Landfill Mining – a contribution to conservation of natural resources?** Sardinia, 2013. Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2013.

RETTENBERGER, Gerhard. Rohstoffpotential in Deponien. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J., GOLDMANN, D. (HRSG) **Recycling und Rohstoffe 5**, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 919-932, 2012.

RETTENBERGER, Gerhard. Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. (Prospective usage of landfills as resource). In: FLAMME, S.; GALLENKEMPER, B.; GELLENBECK, K.; BIDLINGMAIER, Werner; KRANERT, M.; NELLES, M.; STEGMANN, Rainer. (Ed.). **Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage**, Münster, 10-11 Februar 2009. p. 101-109.

TIELEMANS, Yves, LAEVERS, Patrick. **Closing the Circle, an Enhanced Landfill Mining case study**. 1st International Symposium on Enhanced Landfill Mining. Houthalen-Helchteren, (Belgium) 4-6 October 2010. Disponível em: <http://elfm.eu/Uploads/ELFM/FILE_b0acf3f7-32cf-490b-a3bf-b8f6a2bf148a.pdf>. Acesso em: 31 maio 2014.

ULMANS, L. **Landfill minning**: A multi-actor approach on policy preparation. Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3-7 October 2011.

VAN VOSSSEN, W. J.; PRENT, O. J. **Feasibility study sustainable material and energy recovery from landfills in Europe**. Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula. Cagliari, Italy; 3-7 October 2011.

VON MINERALISCHEN ABFÄLLEN – Technische Regeln – der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) from 6 November 2003.

Como citar [ABNT NBR 6023:2002]:

ZEINER, Anton; MÜNNICH, Kai; WANKA, Sebastian; FRICKE, Klaus. Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos**: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: dd mmm. aaaa.

Este e-book será constantemente atualizado,
verifique sempre se está com a última versão.

<http://gsrsu.blogspot.com.br/p/e-book.html>

1ª Versão: **Junho – 2015**.

Versão Atualizada: **Maió – 2017**.

SOBRE OS COLABORADORES

Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite

Graduado em Direito. Especialista em Direito Público administrativo e constitucional, *marketing* político, planejamento estratégico, gestão de crise e construção de cenários políticos. Ocupou cargos políticos como assessor na Câmara Municipal de Jundiaí, Chefe de gabinete na Câmara dos Deputados, com participação ativa nas discussões da Política Nacional de Resíduos Sólidos nas Comissões do Congresso Nacional. Secretário de Governo do município de Porto Feliz, responsável pela implantação da modernização do sistema de Limpeza Urbana, processo de encerramento e monitoramento de aterro sanitário. Desde janeiro de 2013 é o secretário de Serviços Públicos de Jundiaí, responsável pela elaboração e implantação do Plano Municipal de Saneamento, setoriais, resíduos sólidos, macro e micro drenagem e água e esgoto. Atual presidente da Comissão do Plano Municipal de Saneamento Básico e secretário Executivo do Consórcio Intermunicipal de Aterro Sanitário (CIAS). Especializado em Gerenciamento de Contratos de Parcerias-Público-Privadas de serviços de água, saneamento básico e tratamento de resíduos sólidos, pela *London School of Economic and Political Science*.

E-mail: agleite@jundiai.sp.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ A Realidade dos Municípios Brasileiros Frente à Nova Política Nacional de Resíduos Sólidos

Veja na Parte II ⇒ Resíduos de Construção Civil – Sistema de Gerenciamento Integrado no Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Capacitação e Pesquisa Fundamental para Desenvolver e Implementar uma Instalação de Tratamento Mecânico Biológico, com Estágio de Fermentação Integrada em Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Projeto i-NoPa – Capacitação e pesquisa fundamental, a fim de gerar metodologia de análise para o desenvolvimento de projeto para uma instalação de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) com fermentação integrada na cidade de Jundiaí-SP

Doutor Engenheiro de Minas Alexander Gosten

Em 1990 passou a atuar na gestão de resíduos em diversos projetos e assumindo posições de chefia na empresa RWE Umwelt GmbH. A partir de 1996 tornou-se o diretor de negócios da empresa Berliner Stadtreinigung A. ö. R. assumindo os negócios relativos a gestão de tratamento de resíduos, planejamento e construção de novas plantas, tendo operado mais que vinte plantas, ainda realizou remediação de aterros e gestão de fluxo de materiais. Atualmente ocupa a posição de vice-presidente do departamento de gestão de resíduos.

E-mail: alexander.gosten@bsr.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na
Planta de Fermentação da Cidade de Berlim*

Tecnóloga Aline Cardoso Domingos

Tecnóloga em Gestão Ambiental e cursando Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Padre Anchieta.

E-mail: aline.cardoso_d@yahoo.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Tecnólogo em Meio Ambiente Anderson Luiz de Araújo

Tecnólogo em Meio Ambiente formado pelo Centro Universitário Padre Anchieta, cursando Engenharia Ambiental no Centro Universitário Padre Anchieta, atua como Técnico em Construção Civil na Secretaria Municipal de Serviços Públicos da Prefeitura do Município de Jundiaí-SP.

E-mail: aaaraujo@jundiai.sp.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Doutor Geógrafo André Luiz da Conceição

Mestre e Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos, pela UNICAMP. Graduado e Especialista em Geografia, pela UNESP. Docente do Centro Paula Souza e do Centro Universitário Padre Anchieta – UniAnchieta, em Jundiaí-SP.

E-mail: conceicao.andreluiz@yahoo.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte II ⇒ Iniciativas de Ensino e Pesquisa em
Gestão de Resíduos em Jundiaí-SP, Brasil*

Doutor Andreas Jaron

Desde 1994 atua como Chefe de Divisão do Departamento de “Princípio e assuntos internacionais da economia Circular; Movimento Transfronteiriço de Resíduos” do Ministério Federal do Meio Ambiente, da Conservação da Natureza, da Construção e da Segurança Nuclear em Bonn, na Alemanha. Dr. Jaron estudou Economia e Filosofia/Política/Sociologia da Universidade de Muenster e Ciência da Computação da Universidade de Ciências Aplicadas, em Dortmund. A partir de 1986, trabalhou em várias funções no Ministério do Meio Ambiente da Baixa Saxônia (Niedersachsen). Em 1990, mudou-se para a Comissão Europeia ocupando a Direção-Geral do Ambiente, e em 1992 para o gabinete do Ministro Federal Klaus Toepfer, em Bonn. Membro da Mesa (Conselho de Direção) da OCDE, “Grupo de Trabalho da Produtividade de Recursos e Resíduos” e foi membro da Mesa da Convenção de Basileia durante dez anos. É autor de vários artigos e publicações sobre questões nacionais e internacionais de gestão de resíduos e a produtividade dos recursos. É muito ativo no mercado europeu e em projetos internacionais para apoiar o desenvolvimento de uma economia circular de resíduos.

E-mail: andreas.jaron@bmu.bund.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Gestão Internacional de Resíduos:
desafios, medidas e possibilidades*

Anne-Sophie Fölster

Estudante de engenharia ambiental na TU Braunschweig, Alemanha desde 2011 com atuação em diversos projetos na Alemanha e no Brasil voltados para a gestão de resíduos sólidos e proteção ao meio ambiente.

E-mail: a.foelster@tu-braunschweig.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Administrador e Engenheiro Ambiental Anton Zeiner

Administrador e Engenheiro Ambiental. Desde 2013 tem atuado como assistente de pesquisa na Universidade Técnica de Braunschweig, nos seguintes ramos de pesquisa: tratamento mecânico e biológico (aeróbio e anaeróbio) de resíduos sólidos urbanos, mineração de aterros e desenvolvimento de planos de gerenciamento de RSU para municípios.

E-mail: a.zeiner@tu-bs.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários:
redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas*

Engenheiro Civil Antonio Marius Zuccarelli Bagnati

Engenheiro Civil, formado pela UFRGS em 1975, possui uma carreira consolidada na iniciativa privada, atuando na execução de obras de infraestrutura urbana e na área de tecnologia, como dirigente da empresa Tecno Acción do Brasil. Atualmente ocupa a Diretoria de Operações da Companhia Melhoramentos da Capital, Florianópolis, Santa Catarina (Comcap), tendo exercido a Presidência por dez anos em diferentes períodos, a partir de 1986. É pós-graduando em Direito Ambiental pela Faculdade de Ciências Sociais de Florianópolis (CESUSC) e em Consultoria Ambiental pela Universidad Europea Miguel de Cervantes.

E-mail: marius@comcap.org.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos:
desafios e oportunidades***

***Veja na Parte II ⇒ Programa Beija-Flor de Tratamento Descentralizado
de Resíduos em Florianópolis-SC, Brasil***

Engenheiro Mecânico Axel Hüttner

Estudou engenharia na Universidade Técnica de Clausthal-Zellerfeld. Mestrado em engenharia de processos. Atua no campo da reciclagem, tratamento e recuperação de energia de materiais, resíduos e rejeitos, tendo como especialidade o tratamento anaeróbio. Após atuar como pesquisador no Instituto de Tecnologia do Centro de Pesquisa Agrícola Federal, ingressou na empresa Bühler GmbH, tendo em seguida trabalhado como consultor para diversas empresas em projetos de engenharia e planejamento. Atualmente é engenheiro sênior da IGLux Witzenhausen GmbH.

E-mail: a.huettner@iglux-witzenhausen.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

VOLTAR ⇒ Tecnologias de Purificação de Biogás

Doutora Geóloga Beate Vielhaber

Formada em Geografia e doutora em Geologia. Desde 1998, é diretora de planejamento na Associação de Resíduos da Região de Hannover e coordenadora técnica da AHA (planta municipal de tratamento mecânico e biológico) e ainda assessora os comitês de DGGT e DWA, com ampla experiência em planejamento de aterros e técnicas ambientais de valorização e gestão de planta de tratamento mecânico e biológico com fermentação integrada.

E-mail: beate.vielhaber@aha-region.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos:
conceito, experiências operacionais e otimização*

Doutor Bertram Kehres

Diretor executivo da BGK (Associação alemã que regulamenta a qualidade do composto).

E-mail: b.kehres@kompost.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Gestão de Qualidade: certificação de produtos
para o emprego sustentável do composto orgânico*

Engenheiro Bruno Mattheeuws

Gerente de relações públicas da OWS, graduado em 2003 como engenheiro ambiental. Atuou durante 3,5 anos como controlador da ONG Belga para simulação de biogás. Trabalhou também em Honduras e Colombia em plantas de biogás a partir de palmeiras. Desde 2008 trabalha para a OWS no departamento de *Marketing*.

E-mail: bruno.mattheeuws@ows.be

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ A Tecnologia DRANCO

Dipl.-Engenheiro Nuclear Burkart Schulte

Engenheiro nuclear e vice-presidente do CREED. Trabalhou no departamento para tratamento de resíduos radioativos no Centro de Pesquisa de Karlsruhe. Em 1980, mudou para a unidade de reprocessamento de combustível nuclear queimado (WAK). Foi nomeado à Usina europeia de reprocessamento EUROCHEMIC em Mol, na Bélgica. Participou, em 1985, do planejamento da planta piloto de condicionamento PKA em Gorleben. Foi responsável pelo planejamento e iniciação da planta de reprocessamento em Wackersdorf antes de mudar para a empresa COLENCO, na Suíça. A partir de 1993 gerenciou a planta de valorização de resíduos local (AML). Atualmente é membro de vários grêmios nacionais e internacionais na área de gestão de resíduos.

E-mail: schulte@CReED-ev.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ CReED – Centro para Pesquisa, Educação e
Demonstração em Gerenciamento de Resíduos*

Camila Barbi Campos

Cursando Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Padre Anchieta.

E-mail: camila.bcampos@hotmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheiro Eletromecânico Carlo Vendrix

Formado em engenharia eletromecânica no Technisch Instituut H.Hart na cidade de Hasselt – Bélgica. Trabalhou na Mannesmann Demag – Vespasiano – MG nas áreas de compressores alternativos industriais e de controladoria para o *follow-up* de custos de contratos. Atualmente exerce a função de gerente de contratos no setor de tecnologias de meio ambiente da Kuttner do Brasil, responsável pela tecnologia de tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos orgânicos.

E-mail: c.vendrix@kuttner.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ Biodigestão – Tecnologia Kompogas

Advogado Carlos RV Silva Filho

Advogado, Diretor Presidente da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e Vice-Presidente da *International Solid Waste Association* (ISWA).

E-mail: carlos@abrelpe.org.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil:
panorama, desafios e perspectivas***

Doutor Engenheiro Civil e Químico Ambiental Carsten Cuhls

Doutor em engenharia, engenheiro civil e químico ambiental, consultor e professor universitário em Braunschweig (desde 2009) e Magdeburg (desde 2014). Até 2000 atuou como pesquisador em Tecnologias para Tratamento de Resíduos no Instituto da Qualidade da Água e Gestão de Resíduos da Universidade de Hannover. Após este período foi cientista sênior e engenheiro-chefe do Instituto de Engenharia Ambiental, ministrou palestras sobre produtos perigosos, áreas contaminadas, avaliação do ciclo de vida, gestão dos gases residuais e o controle das emissões. De 2000 a 2014 foi gerente da GEWITRA Ltd. empresa em Hannover, atuando como engenheiro consultor para tecnologias tratamento de resíduos e o controle das emissões.

E-mail: Carsten.Cuhls@gewitra.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de
Tratamento Mecânico Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos*

Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira

Engenheira civil e advogada. Especialista em Direito Ambiental e Gestão Empresarial. Doutoranda pela Technische Universität Braunschweig. Atua como coordenadora da Universidade Técnica de Braunschweig e do Instituto CReED no Brasil. Com trajetória profissional formada pela pluralidade de eixos temáticos, foi como diretora de empresas que abarcou responsabilidades voltadas para o nível tecnológico e jurídico, participando de projetos nacionais e internacionais. Atuação especializada em tratamento de resíduos sólidos urbanos com atividades desenvolvidas juntamente a órgãos públicos e entidades privadas, desde o desenvolvimento de conceitos tecnológicos, implementação de plantas de tratamento de RSU até avaliação técnica e desenvolvimento de análise de risco.

E-mail: christiane@terramelhor.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Apresentação

VOLTAR ⇒ A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento Socioambiental em Gestão de Resíduos

VOLTAR ⇒ Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos

VOLTAR ⇒ CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos

VOLTAR ⇒ A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

Veja na Parte II ⇒ Capacitação e Pesquisa Fundamental para Desenvolver e Implementar uma Instalação de Tratamento Mecânico Biológico, com Estágio de Fermentação Integrada em Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Os Desafios da Educação Ambiental Formal em Matéria de Tratamento de Resíduos Sólidos no Brasil

Veja na Parte II ⇒ Proteção Climática através de uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos

Veja na Parte II ⇒ Projeto i-NoPa – Capacitação e pesquisa fundamental, a fim de gerar metodologia de análise para o desenvolvimento de projeto para uma instalação de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) com fermentação integrada na cidade de Jundiaí-SP

Veja na Parte III ⇒ Tecnologias Ambientais: ferramentas para a valorização de resíduos sólidos urbanos

Veja na Parte III ⇒ Análise de Risco: combustão em plantas de tratamento mecânico biológico e em áreas de armazenagem e disposição final de resíduos

Pedagoga Christine Pereira-Glodek

Pedagoga, técnica em administração e em meio ambiente, atuou na Alemanha em projetos educacionais e terapia curativa baseados na antroposofia. Tem atuação no Brasil na gerência de projetos de tratamento de resíduos sólidos urbanos com atividades desenvolvidas juntamente a órgãos públicos e entidades privadas, auxiliando no intercâmbio de informações técnicas entre a Universidade Técnica de Braunschweig, Instituto CReED e prefeituras brasileiras.

E-mail: christine@terramelhor.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Os Desafios da Educação Ambiental Formal em
Matéria de Tratamento de Resíduos Sólidos no Brasil***

Engenheiro Civil Christof Heußner

Engenheiro civil. Atua desde 2011 como assistente de Pesquisa no departamento de gestão de resíduos e recursos do Instituto Leichtweiß da Universidade Técnica de Braunschweig.

E-mail: c.heussner@tu-bs.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

Tecnóloga Diana Piffer Gigliotti

Tecnóloga em Gestão Ambiental e cursando Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Padre Anchieta.

E-mail: diana_pg88@hotmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheiro Civil e Ambiental Diego de Carvalho Frade

Engenheiro Civil e Ambiental pela Universidade de Brasília (UnB), com pós-graduação em Finanças Corporativas e Banco de Investimento pela Fundação Instituto de Administração (FIA/USP). Analista do Departamento de Energia e Tecnologias Limpas (DENE) da FINEP. Responsável pela gestão da carteira, interface com clientes e a análise de projetos reembolsáveis nos segmentos de Resíduos, Água e Esgoto.

E-mail: dfrade@finep.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ FINEP e seu Papel na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Professor Doutor Eduardo Tomasevicius Filho

Bacharel em Direito, Mestre em História Social e Doutor em Direito Civil pela Universidade de São Paulo – USP. Professor do Departamento de Direito Civil da Faculdade de Direito da Universidade de São Paulo – USP e Professor do Curso de Direito das Faculdades Integradas “Campos Salles”. Advogado em São Paulo.

E-mails: tomasevicius@usp.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte II ⇒ A Política Nacional dos Resíduos Sólidos no
Funcionamento do Sistema Econômico*

*Veja na Parte II ⇒ Os Desafios da Educação Ambiental Formal em
Matéria de Tratamento de Resíduos Sólidos no Brasil*

Engenheiro de Petróleo Erick Meira de Oliveira

Engenheiro de petróleo formado com dignidade acadêmica (*Cum Laude*) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2012, tendo participado também em um programa de extensão na forma de intercâmbio acadêmico com a *École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès* (França). Atualmente cursando o Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), com previsão de conclusão em março de 2015. Além disso, desde 2014, é analista de projetos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), lotado no Departamento de Energia e Tecnologias Limpas (DENE).

E-mail: emeira@finep.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ FINEP e seu Papel na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

CEO Franz Vogel

Owner manager.

E-mail: info@kompostanlagen.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte III ⇒ Tratamento Biológico Aerado em Leiras
Envelopadas com o Sistema GORE® Cover*

Gabriel de Carvalho Gimenez

Cursando Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Padre Anchieta.

E-mail: g.carvalhogimenez@gmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Geógrafa e Mestre em Ciências Gabriela Gomes Prol Otero

Geógrafa e Mestre em Ciências, Coordenadora Técnica da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE).

E-mail: gabriela@abrelpe.org.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte II ⇒ Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil:
panorama, desafios e perspectivas*

Engenheiro Civil Helge Dorstewitz

Engenheiro Civil. Diretor Técnico da IGLux s.à r. l. Desde 1994 coleciona uma vasta experiência na Alemanha, Luxemburgo, França, Reino Unido e em outros países Europeus durante a concepção, construção, comissionamento e operação de plantas de tratamento de resíduos industriais em larga escala. No âmbito destes projetos, foi responsável por todos os aspectos técnicos, comerciais, ambientais e questões contratuais. Ganhou experiência em estudos de viabilidade bem como em licitações públicas para a gestão da coleta de resíduos.

E-mail: h.dorstewitz@iglux.lu

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Tecnologias de Purificação de Biogás

Doutor Helge Wendenburg

Desde 2005 atua em Bonn como Diretor-geral e chefe do departamento de “Gestão da Água e Conservação dos Recursos” do Ministério Federal do Meio Ambiente, da Conservação da Natureza, da Construção e da Segurança Nuclear. Desde 2010 o departamento é responsável também pelo programa eficiência ecológica dos recursos. Estudou Direito na Universidade de Göttingen, onde também fez seu Doutorado em leis e apoiou entre 1979 e 1982 o Instituto de Ciência Política. Desde 1983, trabalhou em diversas funções no Governo do Distrito de Brunswick (Braunschweig) e mudou, em 1990, para o ministério do meio ambiente da Baixa Saxônia (Niedersachsen), onde chefiou diferentes divisões e ainda a Direção-Geral para a gestão de resíduos e controle de poluição do ar. É membro do Conselho de Administração da Associação Água Alemã (DWA) e da Academia de Ciências Geológicas. Autor de diversos artigos relacionados à gestão da água e dos resíduos, além de temas como legislação sobre a água e resíduos que foram publicados em diferentes periódicos, revistas e jornais. É coautor de comentários sobre as leis de gestão dos resíduos e Membro do Conselho de Administração dos editores de revistas científicas da Alemanha como “AbfallR”, “Müll und Abfall”, “W+B” and “Umwelt- und Planungsrecht (UPR)”.

E-mail: helge.wendenburg@bmub.bund.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ A Eficiência dos Recursos e Gestão da Reciclagem:
implementação na Alemanha*

Engenheira Ambiental Hélinah Cardoso Moreira

Engenheira Ambiental.

E-mail: helinah.cardoso@giz.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de
Tratamento de Esgoto: status quo na Alemanha e no Brasil*

Engenheiro Civil Herbert Beywinkler

Engenheiro civil e ambiental, cofundador, coproprietário e gerente da of Umweltmanagement-Verfahrenstechnik Neubacher & Partner Ges.m.b.H. (UV&P) desde 1991, trabalhando na Áustria e em outros países em projetos de gestão e tratamento de resíduos na forma de geração de CDR. Atuou no desenvolvimento de diversos termos de referência na modalidade PPP para projetos de recuperação energética a partir dos resíduos e também projetos de tratamento mecânico e biológico mesofílica e termofílica, sistemas secos e úmidos de biodigestão, sistemas abertos e fechados de aerobização e compostagem e diversas modalidades de tratamento mecânico com geração de CDR, biomassa e captação de recicláveis. Sua experiência abarca ainda tecnologias diversificadas desde leito fluido estacionário e circulante, grelhas de incineração, purificação seca e úmida de gás combustível e tecnologias de “*denoxification*”.

E-mail: Herbert.Beywinkler@uvp.at

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos

Doutor Hubert Baier

Doutor em mineralogia, geocientista e pesquisador, desenvolveu atividades juntamente à Holcim na busca por alternativas para a matriz energética. Trabalhou na EnTeCo em recursos energéticos alternativos, na empresa Deutag-Remex AG atuou no pré-tratamento de recursos minerais para a produção de clínquer. Responsável por atividades e implementação de plantas cimenteiras, na Dyckerhoff AG, na Alemanha. Em 2006, assumiu o cargo de diretor na empresa ECOWEST que foi a primeira empresa alemã a ser certificada como provedora de combustível secundário para coprocessamento. Atuou entre 2007 e 2010 em diversos países no desenvolvimento de conceitos sustentáveis para a promoção de resíduos em energia. Entre 2010 e 2013, atuou para Thyssen Krupp como gerente de coprocessamento na empresa Vecoplan-FuelTrack GmbH para produção de combustível derivado de resíduos. Assessorou normativas alemãs para a regulação do emprego de combustível secundário. Atualmente trabalha como consultor independente e editor de publicação técnica ZKG do segmento cimentício.

E-mail: hubert.baier@wltp.eu

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Experiências Comprovadas com Combustíveis
Alternativos em Fornos de Cimento*

Doutor Jens Giersdorf

Responsável pelo projeto DKTI Sistemas de acionamento energeticamente eficientes da GIZ Brasil. De 2013 a 2016 atuou como líder de componente no projeto DKTI-Biogás. Em 2012, completou o doutorado na FU Berlin sob o tema: “*Politics and Economics of Ethanol and Biodiesel Production and Consumption in Brazil*”. Entre 2008 e 2013 foi diretor da equipe internacional no Centro Alemão de Pesquisa de Biomassa (DBFZ) em Leipzig.

E-mail: jens.giersdorf@giz.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Proteção Climática através de uma
Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos***

Professor Doutor Psicólogo José Luiz Crivelatti de Abreu

Psicólogo com especialização em Psicologia Clínica na Abordagem Cognitivo-Comportamental. Mestre e Doutor em Psicologia pela Universidade de São Paulo – USP. Professor aposentado da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

E-mail: joseluiz@crivelatti.psc.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Programa Beija-Flor de Tratamento Descentralizado
de Resíduos em Florianópolis-SC, Brasil***

Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich

Doutor em Engenharia Civil. Assistente de pesquisa desde 1987 na Universidade Técnica de Braunschweig, professor associado da PUC-Rio no curso de mestrado em engenharia urbana e professor na Universidade Técnica de Braunschweig e responsável pelos módulos de gestão de resíduos na graduação e curso de mestrado “Pró Água”. Líder de grupo de trabalho “Tecnologias de Aterro e Geotécnica” do Instituto Leichtweiss e responsável pelo Departamento de Laboratório em Geotécnica, Solos, Resíduos e Águas. Ramos de pesquisa: comportamentos hidráulicos em sistemas lineares, resíduos sólidos e solos, comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos (RSU), recalques em aterros, tratamento mecânico-biológico (TMB) de RSU e adaptação de sistemas TMB às condições locais de países em desenvolvimento.

E-mail: k.muennich@tu-bs.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Comportamento dos Aterros quando da
Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico*

*VOLTAR ⇒ Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários:
redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas*

Engenheiro Civil Karlgünter Eggersmann

Engenheiro Civil, assumiu os negócios da Fechtelkord & Eggersmann. Proprietário da empresa Eggersmann Anlagenbau, comprou a Backhus GmbH e a BRT Recycling Technologie GmbH, atualmente é uma das maiores empresas do setor atuando desde o desenvolvimento de projetos de engenharia, produção de maquinários, execução da obra e operação, especializada em equipamentos de tratamento mecânico, biológico, fermentação, compostagem e secagem biológica.

E-mail: k.eggersmann@f-e.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ Otimização de Sistemas de Tratamento de Resíduos através de Conceitos Modulares

Engenheira Agrônoma Mestre Kátia Goldschmidt Beltrame

Engenheira Agrônoma formada pela ESALQ/USP. Mestre em microbiologia agrícola. Especialista em compostagem em escala industrial. Diretora Técnica de Compostagem do Grupo Ambipar. Membro do Conselho Técnico da Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal (ABISOLO).

E-mail: katia.beltrame@mk2r.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte II ⇒ Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos
no Brasil: benefícios × problemas*

Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke

Formado em Geologia, doutor em Engenharia, professor catedrático e pesquisador da TUBS (Universidade Técnica de Braunschweig). Diretor de Departamento de Resíduos Sólidos e Recursos naturais, presidente do CReED, editor da revista técnica MUELL und ABFALL, atua há mais de trinta anos em gestão de resíduos na Alemanha e em outros continentes, foi responsável pela implantação, em 1983, da coleta seletiva e compostagem de orgânicos na Alemanha. Autor de diversas publicações técnicas, tem participação como assessor técnico do Governo Alemão pelos Ministérios de Educação e Pesquisa, de Cooperação e de Meio Ambiente. Trabalhou no Brasil como consultor em projetos da ANEEL e Caixa Econômica Federal, para prefeituras. Coordena o curso de mestrado em Engenharia Urbana ministrado pela cooperação PUC e TUBS.

E-mail: klaus.fricke@tu-bs.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Apresentação

VOLTAR ⇒ A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento Socioambiental em Gestão de Resíduos

VOLTAR ⇒ Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos

VOLTAR ⇒ CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos

VOLTAR ⇒ A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

VOLTAR ⇒ Comportamento dos Aterros quando da Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico

VOLTAR ⇒ Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas

Veja na Parte II ⇒ Capacitação e Pesquisa Fundamental para Desenvolver e Implementar uma Instalação de Tratamento Mecânico Biológico, com Estágio de Fermentação Integrada em Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Proteção Climática através de uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos

Veja na Parte II ⇒ Projeto i-NoPa – Capacitação e pesquisa fundamental, a fim de gerar metodologia de análise para o desenvolvimento de projeto para uma instalação de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) com fermentação integrada na cidade de Jundiaí-SP

Veja na Parte III ⇒ Tecnologias Ambientais: ferramentas para a valorização de resíduos sólidos urbanos

Veja na Parte III ⇒ Análise de Risco: combustão em plantas de tratamento mecânico-biológico e em áreas de armazenagem e disposição final de resíduos

Administrador e Especialista em Gestão de Negócios

Lauro Raphael Acorci Donadell

Graduado em Administração de Empresas na Faculdade Politécnica de Jundiaí, e Especialização em Gestão Estratégica de Negócios pela Faculdade Anhanguera, atua para a Universidade Técnica de Braunschweig como supervisor de projetos para a gestão ecoeficiente de resíduos sólidos.

E-mail: donadell@hotmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheiro Luc A. De Baere

Managing Director OWS nv.

Mestre em Química e Gestão de Resíduos pela Universidade de Wisconsin (EUA). Entre o período de 1980 e 1987 foi responsável pela pesquisa e desenvolvimento do processo DRANCO de digestão anaeróbia. Desde 1988 tem atuado como Diretor-geral e Gerente dos Sistemas de Resíduos Orgânicos. Detentor de diversas patentes em digestão anaeróbia de resíduos sólidos também autor e coautor de mais de 50 publicações sobre digestão anaeróbia e medição de degradabilidade.

E-mail: luc.de.baere@ows.be

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ A Tecnologia DRANCO

Gestor Empresarial Lucas Aparecido Rodrigues

Gestor Empresarial formado pela FATEC de Tatuí, graduando em Engenharia Civil pela CEUNSP e Pós Graduando em Gestão de Resíduos Sólidos pelo SENAC, atua como Diretor de Limpeza Pública na Secretaria Municipal de Serviços Públicos da Prefeitura do Município de Jundiaí.

E-mail: larodrigues@jundiai.sp.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

***Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil***

Geólogo Mestre Luiz Gustavo Gallo Vilela

Formado em Geologia pela Universidade de São Paulo (USP). Nascido em 03 de dezembro de 1970, trabalhou em grandes obras de engenharia, tais como o Metrô de São Paulo, túneis e plantas hidrelétricas. Entre 2003 e 2008, foi sócio-diretor de importante empresa em São Paulo com atuação em meio ambiente, notadamente no estudo e recuperação de áreas degradadas e contaminadas, onde atendia grandes construtoras e incorporadoras do ramo imobiliário, além de indústrias e o setor público. Em 2009, foi nomeado Secretário de Meio Ambiente da Saev Ambiental pelo prefeito Junior Marão. Possui Mestrado em Ciências Geológicas e Ambientais pela USP de São Paulo e é Auditor Ambiental com diplomação internacional em curso desenvolvido pela JPD Environmental Ltd., da Inglaterra.

E-mail: gustavogallo@saev.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos em Cidades de Menor Porte: caso de Votuporanga-SP, Brasil

Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann

BUPnet GmbH; Membro CReED, Formado em Germanística, Política e Pedagogia, fundador da empresa BUP Goettingen/Sehnde – formação, meio ambiente e gerenciamento de projetos. Fundador e diretor da BUP Consultoria Postdam e BUPNET. Fundador e prestador de serviços da empresa OC-Office Connection Goettingen.

E-mail: lhoffmann@bupnet.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ CReED – Centro para Pesquisa, Educação e
Demonstração em Gerenciamento de Resíduos*

*VOLTAR ⇒ Formação Profissional e Continuada:
instrumento fundamental para uma gestão sustentável dos resíduos*

Engenheiro Civil Magnus Martins Caldeira

Engenheiro Civil e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Atualmente Analista de Infraestrutura do Governo Federal e Suplente do Ministério das Cidades na Rede CLIMA. Atuou como Coordenador e Professor de Curso de Graduação em Engenharia Ambiental; e exerceu cargo de Engenheiro Civil em Prefeituras Municipais.

E-mail: magnus.caldeira@cidadas.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil – PROBIOGÁS

Engenheiro Civil Marcelo de Paula Neves Lelis

Engenheiro Civil; Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Analista de Infraestrutura; Gerente de Projetos da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades; Conselheiro do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente e Membro do Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

E-mail: marcelo.lelis@cidadess.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil – PROBIOGÁS

Engenheiro Civil e Especialista em Engenharia Ambiental

Marcelo Foelkel Patrão

Engenheiro Civil formado pela PUC-Campinas e Especializado em Engenharia Ambiental pela UNICAMP, atua como Engenheiro na Secretaria Municipal de Serviços Públicos da Prefeitura do Município de Jundiaí e como Diretor Técnico na Empresa MP. Projetos, com foco em projetos de infraestrutura e saneamento.

E-mail: mfptrao@jundiai.sp.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheira Agrônoma Maria Thelen-Jüngling

Diretora de garantia de qualidade para o composto da BGK (Associação alemã que regulamenta a qualidade do composto).

E-mail: m.thelen-juengling@kompost.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Gestão de Qualidade: certificação de produtos
para o emprego sustentável do composto orgânico*

PhD. Doutor Markus Bux

CEO da Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH (Filderstadt, FRG). Professor associado (Docente Privado) na Universidade de Hohenheim (Stuttgart, FRG). Possui PhD em Tecnologia de Secagem e um grau de Doutorado (Habilitação) da Universidade de Hohenheim. Com mais de 50 publicações científicas sobre Secagem Solar de Lodo, é um dos principais especialistas da área.

E-mail: Markus.Bux@thermo-system.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte III ⇒ Secagem do Lodo do Esgoto Comum e Industrial
em Plantas de Tratamento de Águas Residuais:
uma forma sustentável de administração do lodo***

Engenheiro Civil Michael Balhar

Engenheiro Civil especializado na gestão de resíduos e engenharia sanitária ambiental. Desde janeiro de 2008 é CEO e Diretor da ASA GmbH. Membro de VDI, DWA, CReED, BGS e RETech.

E-mail: info@asa-ev.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do
Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha*

Químico Michael Ludden

Formado em química e único acionista do Grupo LM. Presidente da Associação de Tecnologia de Resíduos e Reciclagem na VDMA (Associação Alemã de Engenharia de Plantas e Máquinas). Membro do Conselho de Administração de Resíduos Domésticos na RETech Partnership e.V. alemã. Sócio-diretor da Sutco RecyclingTechnik GmbH.

E-mail: michael.ludden@sutco.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte III ⇒ Resíduos Sólidos Urbanos com Aproveitamento de Recicláveis em uma Planta de Tratamento Mecânico-Biológico

Mestre em Geografia Olga Kasper

Formada em Geografia, possui Mestrado em Geografia Aplicada com ênfase em Gestão do Meio Ambiente e de Resíduos Sólidos pela Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH Aachen, Alemanha). Participou de projetos internacionais durante a Graduação, como a introdução de conceitos de Educação Ambiental em Tena, Equador. Desenvolveu, em conjunto com órgãos municipais, um plano de Gerenciamento Energético para a cidade de Lich, na Alemanha, resultando em redução de custos e da emissão de gases do efeito estufa no município. Atualmente é Assistente Administrativa Ambiental na Terra Melhor Ltda., atuando em temas relacionados ao Tratamento Mecânico e Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos e participando em projetos nacionais e internacionais.

E-mail: olga@terramelhor.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

***Veja na Parte II ⇒ Proteção Climática através de uma
Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos***

Doutor Engenheiro Professor Mestre Paulo Belli Filho

Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em Química Industrial e Ambiental pela Université de Rennes, na França. Pós-doutorado na Ecole Polytechnique de Montreal. Supervisor do Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos. Bolsista pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. Realiza projetos com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA e a Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. Possui projetos financiados por: CNPq; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina – FAPESC; Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, Companhia de Gás de Santa Catarina – SCGAS; Fundação Nacional de Saúde – FUNASA; Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN; Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS e setor privado. Tem experiência na área de Engenharia Sanitária e Ambiental, com ênfase em Tratamento de despejos, sustentabilidade da suinocultura, biogás e gestão de odores integrada ao saneamento ambiental. Coordena projetos para a disseminação de Tecnologias Sociais para o Saneamento Ambiental.

E-mail: paulo.belli@ufsc.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Tecnologias Sustentáveis para a Gestão de Resíduos da Agroindústria de Santa Catarina

Tecnóloga Roberta da Silva Leone

Tecnóloga em Gestão Ambiental e cursando Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Padre Anchieta.

E-mail: roberta.leone@hotmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheiro Agrícola e Civil Mestre

Rodrigo Miguel Pereira Batalha

Engenheiro Agrícola e Civil com Mestrado em Água e Solo. Doutorando na Universidade Técnica de Braunschweig (TUBS). Atua como Diretor de Programa Especial da Prefeitura Municipal de Jundiaí. Professor do Centro Universitário Padre Anchieta, cursos de Engenharia Ambiental e Sanitária e Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental. Coordenador do Curso de Pós-Graduação (*lato sensu*) em Gestão de Recursos Hídricos.

E-mail: rbatalha@jundiai.sp.gov.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Resíduos de Construção Civil – Sistema de Gerenciamento Integrado no Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil

Doutora Engenheira Agrônoma Sabine Robra

Engenheira agrônoma (Universität Kassel, 1991). Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente (Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC, 2007). Atualmente doutoranda do curso do PRODEMA (UESC) e pesquisadora do Grupo Bioenergia e Meio Ambiente, da UESC. Tem experiência na área de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos agrários, urbanos e industriais, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) incluindo estudos de viabilidade energética, econômica e ambiental, gestão de resíduos sólidos.

E-mail: sruesc.ios@gmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Aproveitamento Energético do Biogás

Engenheiro Civil e Ambiental Sebastian Wanka

Engenheiro Civil e Ambiental. Atua desde 2012 como assistente de pesquisa da Universidade Técnica de Braunschweig, nos seguintes ramos de pesquisa: tratamento mecânico e biológico (aeróbio e anaeróbio) de resíduos sólidos urbanos, otimização energética de plantas de tratamento, processos de otimização e automação, estudos gravimétricos de resíduos de tratamento mecânico e biológico, mineração de aterros e tratamento posterior de resíduos após a atividade e mineração de aterros.

E-mail: s.wanka@tu-braunschweig.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários:
redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas*

Bióloga Simone Neiva Rodella

Graduada em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário do Triângulo (UNITRI), com especialização em Administração e Controle da Qualidade Ambiental pelo Centro Universitário de Votuporanga – UNIFEV e Educação Ambiental, pela UNESP Botucatu. Ocupa o cargo de Diretora da Divisão de Meio Ambiente da Saev Ambiental (Autarquia Municipal) de Votuporanga-SP, atuando, principalmente, na gestão de resíduos sólidos urbanos. Desde 2013 é Interlocutora do Programa Município Verde Azul, junto à Secretaria Estadual de Meio Ambiente, pelo qual, o município ocupa atualmente, o segundo lugar no *ranking* estadual. Atuou na área de assessoria em planejamento ambiental em Uberlândia-MG tendo trabalhado em projetos de licenciamento, recuperação de áreas degradadas e programas de educação ambiental. Atuou também como docente do ensino médio e coordenadora e docente de curso técnico em meio ambiente.

E-mail: ambiental@saev.com.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos em Cidades de Menor Porte: caso de Votuporanga-SP, Brasil

Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos

PhD. em Mecânica dos Solos (Imperial College of Science, University of London). Professor e diretor do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e pesquisador 1A do CNPq. Criou e coordena, desde 1996, o Núcleo de Excelência em Geotecnia Ambiental, reconhecido pelo CNPq/MCT e FAPERJ. Já prestou serviços de consultoria e coordenou Projetos P&D junto a grandes empresas, como Petrobras, Alumar, Alcoa, Eletronuclear, Ligth e Furnas. Coordena o Projeto PRONEX, que tem, como um de seus temas principais, o estudo de movimentos de massas terrosas (ruptura de taludes naturais e desenvolvimento de processos erosivos). Atualmente coordena investigações voltadas à definição de mecanismos de ruptura ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro frente ao megadesastre de 2011, coordena o Projeto de Pesquisa Tinguá, junto ao CENPES/PETROBRAS, com o objetivo de desenvolver uma metodologia para análise de riscos a corridas de massa em dutos e faz parte do corpo técnico internacional de consultores do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho, Rio de Janeiro. Possui vasta experiência em investigações geotécnicas de campo e laboratório, análise do comportamento de solos saturados / não saturados e de resíduos de diferentes origens, análises de estabilidade de taludes naturais, aterros e escavações em solos, processos de contaminação do subsolo e desenvolvimento de técnicas de remediação ou recuperação de áreas degradadas.

E-mail: tacio@puc-rio.br

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Capacitação e Pesquisa Fundamental para Desenvolver e Implementar uma Instalação de Tratamento Mecânico Biológico, com Estágio de Fermentação Integrada em Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil

Veja na Parte II ⇒ Projeto i-NoPa – Capacitação e pesquisa fundamental, a fim de gerar metodologia de análise para o desenvolvimento de projeto para uma instalação de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) com fermentação integrada na cidade de Jundiaí-SP

Engenheiro Civil Theo Schneider

Engenheiro civil, Diretor-geral da Ressource Abfall GmbH desde 2008, atuando em nível nacional e internacional no mercado de gestão e tratamento de resíduos, desenvolvendo estudos de impacto ambiental e projetos de eficiência energética. Executou diversos projetos para diferentes clientes, empresas privadas e públicas, Ministérios, Agências de cooperação como GIZ e KfW. Tem mais de dez anos de experiência como diretor de planta de tratamento de resíduos e mais de vinte anos de experiência em planejamento e desenvolvimento de conceitos, projetos de licenciamento, construção e operação de plantas de tratamento de resíduos tais como: TMB, digestão anaeróbia e compostagem, desde pequena escala como 14.000 t/a até larga 120.000 t/a em plantas de digestão anaeróbia, esta última integrante de uma planta de TMB para 200.000 t/a, plantas de compostagem de diferentes capacidades até 600.000 t/a incluindo tratamento mecânico, produção de CDR e outras tecnologias em Istambul.

E-mail: mail@ressource-abfall.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos

CEO Thomas Schlien

Environmental Consultant.

E-mail: t.schlien@kompostanlagen.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*Veja na Parte III ⇒ Tratamento Biológico Aerado em Leiras
Envelopadas com o Sistema GORE® Cover*

Engenheiro Mecânico Thomas Turk

Engenheiro de técnicas de tratamento e especialista em segurança ambiental. Atuando desde 1983 em gestão de resíduos sólidos urbanos. Durante o período de 1986 a 1986 – 2010 foi sócio-diretor da empresa Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH onde planejou e acompanhou mais de cem projetos de tratamento mecânico-biológico. Entre 2008 – 2010 foi diretor técnico da Pöyry Environment GmbH. Desde 2011 ocupa a posição de sócio-diretor da empresa IGLux Witzenhausen GmbH e sócio das empresas Oeko-Bureau s.a r.l., Rumelange (L) e ORA LTD, Organic Ressource Agency, Malvern (UK). Também tem participado na direção de diversas associações tais como ANS-Arbeitskreis für Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V., BBE Bundesverband BioEnergie e.V., deENet Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien e HERO e.V. Hessen Rohstoffe.

E-mail: t.turk@iglux-witzenhausen.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha

Engenheiro Victor Bustani Valente

Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

E-mail: victor.valente@giz.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

VOLTAR ⇒ Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: status quo na Alemanha e no Brasil

Vinicius Silva de Macedo

Cursando Engenharia Ambiental e Sanitária na PUC – Campinas-SP.

E-mail: vncmacedo@gmail.com

VOLTAR ⇒ Colaboradores

Veja na Parte II ⇒ Caracterização Inovadora de Resíduos Sólidos Municipais

*Veja na Parte II ⇒ Metodologia de Diagnóstico Ambiental em
Grandes Geradores para uma Gestão Sustentável de
Resíduos Sólidos do Município de Jundiaí-SP, Brasil*

Engenheiro Mecânico Wilhelm Winkelmann

Engenheiro com especialização em Administração de Empresas iniciou sua carreira em 1996 como engenheiro e líder de projeto, durante o período entre 2002 a 2007 foi chefe de departamento para novos projetos e otimização de processos de gestão de resíduos. Desde 2010 implementou e gerencia a planta de biodigestão. Atualmente ocupa a posição de CFO da empresa de limpeza urbana de Berlim (*Biogasanlage der Berliner Stadtreinigung A. ö. R.*).

E-mail: wilhelm.winkelmann@bsr.de

VOLTAR ⇒ Colaboradores

*VOLTAR ⇒ Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na
Planta de Fermentação da Cidade de Berlim*

ÍNDICE

COLABORADORES	4
APRESENTAÇÃO	7
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	7
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira.....	7
A Alemanha como Protagonista do Desenvolvimento Socioambiental em Gestão de Resíduos	22
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	22
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira.....	22
A Eficiência dos Recursos e Gestão da Reciclagem: implementação na Alemanha.....	25
<i>Resource Efficiency and Recycling Management: implementation in Germany</i>	<i>25</i>
Doutor Helge Wendenburg.....	25
Eficiência Energética da Reciclagem de Materiais e da Recuperação Energética de Frações Seleccionadas dos Resíduos	42
<i>Energy Efficiency of Material Recycling and Energy Recovery of Selected Waste Fractions.....</i>	<i>42</i>
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	42
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira.....	42
Gestão Internacional de Resíduos: desafios, medidas e possibilidades.....	62
<i>International Waste Management: measures and chances</i>	<i>62</i>
Doutor Andreas Jaron.....	62

CReED – Centro para Pesquisa, Educação e Demonstração em Gerenciamento de Resíduos	68
<i>CReED – Centre for Research, Education and Demonstration in Waste Management</i>	<i>68</i>
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	68
Dipl.-Engenheiro Nuclear Burkart Schulte	68
Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann	68
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira	68
 Formação Profissional e Continuada: instrumento fundamental para uma gestão sustentável dos resíduos	 85
<i>Continuously Capacity Building: a fundamental instrument for a sustainable waste management</i>	<i>85</i>
Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann	85
 Estado da Arte e Potencial de Desenvolvimento do Tratamento Mecânico-Biológico na Alemanha.....	 102
<i>State of the Art and Development Potential of Mechanical and Biological Treatment in Germany</i>	<i>102</i>
Engenheiro Civil Michael Balhar	102
 Tratamento de Emissões Gasosas Provenientes de Plantas de Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos.....	 114
<i>Treatment of Gaseous Emissions from Mechanical-Biological Treatment of Municipal Solid Waste.....</i>	<i>114</i>
Doutor Engenheiro Civil e Químico Ambiental Carsten Cuhls	114
 Lições Aprendidas Sobre Como Proceder com a Digestão Anaeróbia e Outras Plantas de Tratamento de Resíduos	 139
<i>Lessons Learned on the Way to Realize Anaerobic Digestion Plants and Other Waste Treatment Plants</i>	<i>139</i>
Engenheiro Civil Theo Schneider	139
Engenheiro Civil Herbert Beywinkler	139

Experiências Comprovadas com Combustíveis Alternativos em Fornos de Cimento	154
<i>Proven Experiences with Alternative Fuels in Cement Kilns.....</i>	<i>154</i>
Doutor Hubert Baier	154
Gestão de Qualidade: certificação de produtos para o emprego sustentável do composto orgânico.....	163
<i>Quality Assurance: product certification for sustainable application of compost.....</i>	<i>163</i>
Doutor Bertram Kehres	163
Engenheira Agrônoma Maria Thelen-Jüngling.....	163
A Biodigestão de Resíduos Sólidos na Alemanha	174
<i>The Biodigestion of Solid Waste in Germany</i>	<i>174</i>
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	174
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira.....	174
Engenheiro Civil Christof Heußner	174
Engenheiro Mecânico Axel Hüttner	174
Engenheiro Mecânico Thomas Turk	174
Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos: conceito, experiências operacionais e otimização	207
<i>Recovery of Municipal Solid Waste: experience and optimization</i>	<i>207</i>
Doutora Geóloga Beate Vielhaber	207
Exploração e Beneficiamento do Biogás Obtido na Planta de Fermentação da Cidade de Berlim.....	230
<i>Exploitation and Beneficiation Biogas Derived Fermentation Plant the City of Berlin.....</i>	<i>230</i>
Engenheiro Mecânico Wilhelm Winkelmann	230
Doutor Engenheiro de Minas Alexander Gosten	230

Aproveitamento Energético do Biogás	249
<i>Biogas for Energy Production</i>	<i>249</i>
Doutora Engenheira Agrônoma Sabine Robra.....	249
Tecnologias de Purificação de Biogás	273
<i>Technologies for Clean up the Biogas</i>	<i>273</i>
Engenheiro Civil Helge Dorstewitz.....	273
Engenheiro Mecânico Axel Hüttner.....	273
Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: <i>status quo</i> na Alemanha e no Brasil.....	289
<i>Energetic Use of Biogas in Wastewater treatment Plants: status quo in Germany and Brazil.....</i>	<i>289</i>
Engenheira Hélinah Cardoso Moreira.....	289
Engenheiro Victor Bustani Valente.....	289
Comportamento dos Aterros quando da Disposição de Resíduos do Tratamento Mecânico-Biológico	298
<i>Landfill Behaviour when Disposal of Residues from Mechanical Biological Treatment</i>	<i>298</i>
Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich	298
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	298
Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas.....	322
<i>Mining of Municipal Solid Waste Landfills: reduction of masses to be landfilled by treatment of the fine fraction.....</i>	<i>322</i>
Administrador e Engenheiro Ambiental Anton Zeiner	322
Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich	322
Engenheiro Civil e Ambiental Sebastian Wanka	322
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke	322

SOBRE OS COLABORADORES.....	348
Especialista em Direito Público Aguinaldo Leite	349
Doutor Engenheiro de Minas Alexander Gosten	350
Tecnóloga Aline Cardoso Domingos.....	351
Tecnólogo em Meio Ambiente Anderson Luiz de Araújo	352
Doutor Geógrafo André Luiz da Conceição	353
Doutor Andreas Jaron.....	354
Anne-Sophie Fölster.....	355
Administrador e Engenheiro Ambiental Anton Zeiner	356
Engenheiro Civil Antonio Marius Zuccarelli Bagnati.....	357
Engenheiro Mecânico Axel Hüttner	358
Doutora Geóloga Beate Vielhaber	359
Doutor Bertram Kehres	360
Engenheiro Bruno Mattheeuws	361
Dipl.-Engenheiro Nuclear Burkart Schulte.....	362
Camila Barbi Campos	363
Engenheiro Eletromecânico Carlo Vendrix.....	364
Advogado Carlos RV Silva Filho	365
Doutor Engenheiro Civil e Químico Ambiental Carsten Cuhls	366
Engenheira Civil e Advogada Christiane Pereira.....	367
Pedagoga Christine Pereira-Glodek.....	369
Engenheiro Civil Christof Heußner	370
Tecnóloga Diana Piffer Gigliotti	371
Engenheiro Civil e Ambiental Diego de Carvalho Frade.....	372
Professor Doutor Eduardo Tomasevicius Filho	373
Engenheiro de Petróleo Erick Meira de Oliveira	374
CEO Franz Vogel	375
Gabriel de Carvalho Gimenez.....	376
Geógrafa e Mestre em Ciências Gabriela Gomes Prol Otero	377
Engenheiro Civil Helge Dorstewitz	378

Doutor Helge Wendenburg.....	379
Engenheira Ambiental Hélinah Cardoso Moreira.....	380
Engenheiro Civil Herbert Beywinkler.....	381
Doutor Hubert Baier.....	382
Doutor Jens Giersdorf.....	383
Professor Doutor Psicólogo José Luiz Crivelatti de Abreu.....	384
Doutor Engenheiro Civil Kai Münnich.....	385
Engenheiro Civil Karlgünter Eggersmann.....	386
Engenheira Agrônoma Mestre Kátia Goldschmidt Beltrame.....	387
Professor Doutor Engenheiro Klaus Fricke.....	388
Administrador e Especialista em Gestão de Negócios Lauro Raphael Acorci Donadell.....	390
Engenheiro Luc A. De Baere.....	391
Gestor Empresarial Lucas Aparecido Rodrigues.....	392
Geólogo Mestre Luiz Gustavo Gallo Vilela.....	393
Dipl.-Germanística Lutz Hoffmann.....	394
Engenheiro Civil Magnus Martins Caldeira.....	395
Engenheiro Civil Marcelo de Paula Neves Lelis.....	396
Engenheiro Civil e Especialista em Engenharia Ambiental Marcelo Foelkel Patrão.....	397
Engenheira Agrônoma Maria Thelen-Jüngling.....	398
PhD. Doutor Markus Bux.....	399
Engenheiro Civil Michael Balhar.....	400
Químico Michael Ludden.....	401
Mestre em Geografia Olga Kasper.....	402
Doutor Engenheiro Professor Mestre Paulo Belli Filho.....	403
Tecnóloga Roberta da Silva Leone.....	404
Engenheiro Agrícola e Civil Mestre Rodrigo Miguel Pereira Batalha.....	405
Doutora Engenheira Agrônoma Sabine Robra.....	406
Engenheiro Civil e Ambiental Sebastian Wanka.....	407
Bióloga Simone Neiva Rodella.....	408
Professor Doutor Tacio Mauro Pereira de Campos.....	409

Engenheiro Civil Theo Schneider.....	410
CEO Thomas Schlien.....	411
Engenheiro Mecânico Thomas Turk	412
Engenheiro Victor Bustani Valente.....	413
Vinicius Silva de Macedo	414
Engenheiro Mecânico Wilhelm Winkelmann	415



Prof. Dr. Eng. (Dipl. Geol.) Klaus Fricke

Formado em Geologia, doutor em Engenharia, professor catedrático e pesquisador da TUBS (Universidade Técnica de Braunschweig). Diretor de Departamento de Resíduos Sólidos e Recursos naturais, presidente do CReED, editor da revista técnica MUELL und ABFALL, atua há mais de trinta anos em gestão de resíduos na Alemanha e em outros continentes. Foi responsável pela implantação, em 1983, da coleta seletiva e compostagem de orgânicos na Alemanha. Autor de diversas publicações técnicas, tem participação como assessor técnico do Governo Alemão pelos Ministérios de Educação e Pesquisa, de Cooperação e de Meio Ambiente. Trabalhou no Brasil como consultor em projetos da ANEEL, Caixa Econômica Federal, FINEP, CETESB e para Prefeituras. Coordena o curso de mestrado em Engenharia Urbana ministrado pela cooperação PUC e TUBS.



Eng. Civil e Adv. Christiane Pereira

Engenheira civil e advogada. Especialista em Direito Ambiental e Gestão Empresarial. Doutoranda pela Technische Universität Braunschweig. Atua como coordenadora da Universidade Técnica de Braunschweig e do Instituto CReED no Brasil. Com trajetória profissional formada pela pluralidade de eixos temáticos, foi como diretora de empresas que abarcou responsabilidades voltadas para o nível tecnológico e jurídico, participando de projetos nacionais e internacionais. Atuação especializada em tratamento de resíduos sólidos urbanos com atividades desenvolvidas juntamente a órgãos públicos e entidades privadas, desde o desenvolvimento de conceitos tecnológicos, implementação de plantas de tratamento de RSU até avaliação técnica e desenvolvimento de análise de risco.



Esp. em Direito Aginaldo Leite

Graduado em Direito. Especialista em Direito Público Administrativo e Constitucional, *marketing* político, planejamento estratégico, gestão de crise e construção de cenários políticos. Ocupou cargos políticos como assessor na Câmara Municipal de Jundiaí, Chefe de gabinete na Câmara dos Deputados, com participação ativa nas discussões da Política Nacional de Resíduos Sólidos nas Comissões do Congresso Nacional tendo atuado ainda como Secretário de Governo do município de Porto Feliz. Desde janeiro de 2013 é o secretário de Serviços Públicos de Jundiaí, responsável pela elaboração e implantação do Plano Municipal de Saneamento e de Resíduos Sólidos e ainda é secretário Executivo do Consórcio Intermunicipal de Aterro Sanitário (CIAS). Especializado em Gerenciamento de Contratos de Parcerias Público-Privadas de serviços de saneamento, pela London School of Economic and Political Science.



Eng. Civil Antonio Marius Zuccarelli Bagnati

Engenheiro Civil, formado pela UFRGS em 1975, possui uma carreira consolidada na iniciativa privada, atuando na execução de obras de infraestrutura urbana e na área de tecnologia, como dirigente da empresa Tecno Acción do Brasil. Atualmente ocupa a Diretoria de Operações da Companhia Melhoramentos da Capital, Florianópolis, Santa Catarina (Comcap), tendo exercido a Presidência por dez anos em diferentes períodos, a partir de 1986. É pós-graduado em Direito Ambiental pela Faculdade de Ciências Sociais de Florianópolis (CESUSC) e em Consultoria Ambiental pela Universidad Europea Miguel de Cervantes.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

ISBN: 978-3-924618-46-9