

Caderno temático

3

Recuperação energética de
resíduos sólidos urbanos



PLANSAB

3

Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos¹

Autores

Alaim Silva de Paula
Christiane Dias Pereira
Gustavo Gallo Vilela
Klaus Fricke
Olga Kasper

Revisão

Ana Terra Meija Munhoz
Christiane Dias Pereira
Hélinah Cardoso Moreira
Mariana Silva
Rebeca Borges de Oliveira

Resumo

As práticas de tratamento de resíduos sólidos ganharam 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, e as ações de manutenção após o encerramento dos aterros são onerosas. Além disso, os recursos naturais estão se tornando cada vez mais valorizados (portanto, o mercado de recursos secundários tem ganhado força), os 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 a ações de proteção e preservação ambiental.

A combinação desses fatores gerou uma onda global – variando entre países de alta industrialização, como a Alemanha, até países com baixo desenvolvimento, como o Haiti, que exporta seus recicláveis para o Paquistão –, em prol da reciclagem dos materiais a partir da mola propulsora da economia verde e, ainda, da recuperação energética através da substituição de fontes finitas de energia e com alto potencial de impacto ambiental.

A inovação na forma de recuperação energética poderá ser aplicada diretamente na resolução dos gargalos de infraestrutura e no aumento de produtividade. A geração de conhecimentos científicos e tecnológicos irá acelerar e desburocratizar o relacionamento entre os

¹ Caderno coordenado Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH com apoio da Technische Universität Braunschweig.

produtores do conhecimento, os setores público e privado, atendendo a demanda deste mercado que se formou com a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

O setor cimenteiro tem fomentado discussões no que diz respeito a minimização dos impactos no processo produtivo e entende que o investimento em inovação é parte fundamental desse esforço. Desta forma a substituição da fonte energética tradicional pelo Combustível Derivado de Resíduos (CDR) tornou-se estratégico para o setor. As cimenteiras têm investido constantemente para alcançar, até 2030, padrões internacionais em uso de matérias-primas e combustíveis alternativos não fósseis via coprocessamento em suas unidades no Brasil.

Ainda, a nova condição de baixo crescimento econômico do país remonta a busca por alternativas, o que significa que o desafio atual não está relacionado ao desempenho do cimento, nem a produção e ao mercado, mas relacionado à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a possibilidade de conciliar as mudanças climáticas e as necessidades do setor cimenteiro, ou seja, buscando a sustentabilidade através da eficiência energética e do combustível derivado de materiais alternativos.

Neste contexto, a primeira parte do caderno de recuperação energética se propõe a apresentar a potencialidade da prática de coprocessamento, definindo diretrizes de intervenção através do estabelecimento de condições de contorno, aspectos qualitativos, firmando ainda um diagnóstico do mercado tanto de resíduos quanto do cimento e definindo aspectos financeiros, tendo em vista o potencial de implementação de projetos de substituição energética à médio e longo prazo.

Neste contexto, este caderno abre um diálogo multisetorial que além de garantir a transversalidade do tema, permitirá sua implementação de forma contínua e duradoura, representando uma alternativa de valorização que corrobora com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, tanto sob o aspecto econômico quanto ambiental e da saúde humana.

Importante contextualizar que para se buscar um equilíbrio econômico do negócio CDR onde se tenha metas financeiras para os projetos que atendam às expectativas de investidores privados, será necessário um esforço multilateral onde o poder público terá papel essencial de fomentar a qualidade tanto nos critérios de escolha dos projetos a serem priorizados, quanto também no correto e justo equacionamento das variáveis envolvidas no negócio, de modo que o esforço seja bem equalizado gerando então um ambiente de confiança entre os envolvidos. Este tem sido o maior entrave para a promoção da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU) e que precisa receber uma atenção especial do governo federal para seu desenvolvimento.

A segunda parte do caderno inclui o tratamento térmico e termoquímico através da incineração e tecnologias alternativas tais como pirólise, gaseificação, plasma e carbonização hidrotermal, sendo que neste caderno serão apresentadas de forma geral as condições, características e processos dessas tecnologias, os quais são diferentes de forma elementar do processo de combustão.

1. Coprocessamento

1.1. Introdução

Entre as fontes de degradação ambiental, os resíduos sólidos oferecem risco potencial ao ambiente, representando um dos maiores desafios para as sociedades contemporâneas. Essa questão tem sido cada vez mais objeto de preocupação da sociedade, ditando políticas públicas que se baseiam na preservação dos recursos naturais e na proteção climática.

A fim de reduzir os impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais, bem como mitigar os efeitos da gestão tradicional dos resíduos no clima, os países têm buscado medidas sustentáveis para aumentar a eficiência da proteção climática e a produtividade da utilização de recursos naturais. Esses objetivos, porém, só poderão ser atingidos com a valorização dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Neste contexto, o coprocessamento pode ser apresentado como uma prática que entrelaça reaproveitamento e destinação final em uma única operação: a queima de resíduos urbanos com características físico-químicas compatíveis com o processo de produção de clínquer, em fornos rotativos da indústria cimenteira. Enquanto ocorre um processo de tratamento e reciclagem de resíduos eficiente, seguro e econômico, através da utilização destes como combustíveis alternativos ou substitutos de matérias-primas, dá-se origem a um produto econômico importante, o cimento. E, com isso, proporciona-se um balanço ambiental global mais favorável.

Entre as principais vantagens dessa prática estão a substituição da fonte tradicional de energia por uma fonte ambientalmente adequada, a preservação de recursos energéticos não renováveis, a possibilidade de processamento em larga escala de combustíveis alternativos, a mitigação de passivos ambientais em decorrência do desvio de massa dos aterros e, indiretamente, a contribuição à saúde pública e a geração de empregos.

Como pontos potenciais de impacto, podem ser apontados: a instabilidade de clínquerização, a necessidade de investimento em equipamentos e infraestrutura para injeção e armazenagem, a redução das campanhas de refratários e, principalmente, o risco de descontinuidade do fornecimento do combustível derivado de resíduos (CDR). No entanto, existem contramedidas de contorno ou mitigação para todos esses pontos.

O setor cimenteiro tem fomentado discussões sobre a minimização dos impactos no processo produtivo, entendendo que o investimento em inovação é parte fundamental desse esforço. Desta forma, a substituição da fonte energética tradicional pelo CDR tornou-se estratégica para o setor. As cimenteiras têm investido para alcançar, em médio prazo, padrões internacionais em uso de matérias-primas e combustíveis alternativos não fósseis via coprocessamento em suas unidades no Brasil.

Além disso, a condição de baixo crescimento econômico do país impele à busca por alternativas que gerem maior competitividade, o que significa que o desafio atual não está relacionado ao desempenho do cimento, nem à produção e ao mercado, mas à redução das emissões de GEE e à possibilidade de conciliar as mudanças climáticas e a necessidade do setor cimenteiro. Busca-se a sustentabilidade através da eficiência energética e do combustível derivado de matérias-primas alternativas.

Admite-se que a sinergia entre o setor de resíduos e o do cimento possa vir a garantir o escoamento de parte significativa do CDR produzido a partir de resíduos urbanos em unidades de coprocessamento, podendo o quantitativo remanescente ser encaminhado para outros setores de atividade econômica. Assim, há que avaliar as variáveis e suas condições de contorno em que a produção e coprocessamento do CDR é uma alternativa não somente técnica, mas sobretudo economicamente viável. Nesse contexto, adotou-se como variável para avaliação no estudo a identificação das regiões com disponibilidade de volumes de resíduos que permitam ganho de escala nas operações e as distâncias entre essas regiões de geração e os potenciais consumidores do CDR a ser produzido, no caso, as fábricas de cimento.

Outro aspecto importante sobre o tema é desmistificar a concorrência entre a recuperação energética e a reciclagem de materiais quando se aborda o coprocessamento, pois neste caso

entende-se o coprocessamento como intervenção complementar à reciclagem de materiais, a qual é prioritária não apenas por garantir a preservação de recursos naturais, mas também por alcançar maiores índices de eficiência energética.

É preciso, também, abordar as práticas necessárias de transformação do resíduo sólido urbano bruto em CDR, apontando principalmente as diferenças e repercussões entre abordagens de fluxo parcial e total.

Considerando que tanto o poder público ou o setor privado quanto o setor cimenteiro deverão realizar investimentos significativos – aqueles para gerar o CDR e este para coprocessar a massa –, vale discutir a continuidade do fornecimento e do coprocessamento para balancear as relações contratuais, reduzindo o risco para ambas as partes.

Incorporou-se também a variável disponibilidade de volumes de resíduo industrial não perigoso como forma de atingir o ganho mínimo de escala necessário e a possibilidade de adicionar receitas acessórias para alcançar um equilíbrio econômico requerido para atrair investidores privados para os projetos mapeados.

Por fim, buscou-se mapear, a partir das condições de contorno avaliadas, os clusters onde os projetos de CDR sejam potencialmente viáveis. A partir desse mapeamento, levando-se em conta a atratividade econômica de cada projeto e seu esforço de implementação, pode-se elencar uma matriz de priorização que serve de instrumento de fomento ao desenvolvimento da rota tecnológica.

Portanto, o CDR representa uma fonte renovável de energia, corroborando para que o coprocessamento assuma função importante no âmbito não apenas da gestão sustentável dos resíduos, mas também da gestão eficiente de energia, contribuindo para a proteção climática através da redução de emissões de GEE e preservando os recursos naturais. Essa iniciativa permitirá ao Brasil dar um passo importante na rota de desenvolvimento do tema de gestão de resíduos sólidos, colocando-o no mesmo patamar que os demais países e principalmente, arrastando para a discussão uma diversidade de atores, seja de origem pública seja de origem privada.

Reciclagem de Materiais x Recuperação Energética

O papel da destinação final de RSU mudou radicalmente nos últimos anos. Estudos técnicos e científicos demonstraram que a gestão tradicional baseada no aterro sanitário contribui significativamente para as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE), tendo sido apontado pelo Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo, publicado em 2014, que

os aterros nos moldes atuais – resíduos não tratados – contribuem significativamente para as emissões de GEE (8 a 12%); os resíduos *in natura* dispostos em aterros se decompõem de forma descontrolada e as emissões líquidas e gasosas provenientes dos aterros de resíduos *in natura* permanecem pelo período de trinta a cinquenta anos (São Paulo, 2014, p. 329).

Este impacto ambiental corrobora o entendimento de que é urgente a permuta da simples disposição final dos resíduos por intervenções de valorização. Até porque, com o avanço tecnológico, o confinamento em aterros de resíduos sólidos urbanos se mostra cada vez mais um modelo obsoleto, tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico. A variedade de sistemas de valorização possibilita o uso do resíduo como insumo para diversas atividades produtivas, dispondo somente o rejeito nos aterros sanitários.

Notadamente, as legislações nacionais passaram a tratar de maneira mais ampla o manejo de resíduos. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) impôs a obrigatoriedade do tratamento antes da disposição final, incluindo a reutilização, reciclagem, compostagem,

recuperação e aproveitamento energético dos resíduos sólidos, de acordo com uma hierarquia de prioridades. Cabe ao aterro sanitário o confinamento do resíduo último (rejeito), ou seja, aquele que esgotou as possibilidades de valorização.

Essas obrigações criam uma cadeia positiva de valor em torno dos RSU, promovendo ao mesmo tempo a proteção climática e a preservação de recursos naturais. Possibilita, ainda, o incremento econômico do mercado, uma vez que cria fluxos para a recepção e distribuição de recursos secundários provenientes de matérias antes descartadas sem nenhum aproveitamento.

A formação de um novo mercado, mais complexo e dinâmico, também impõe desafios para gestores públicos e privados. Esforços como capacitação de recursos humanos, escolha de rota tecnológica, plano de negócios exequível, financiamento, aquisição e transferência de tecnologias, licenciamento ambiental, gestão, eficiência operacional e qualidade dos subprodutos constituem as atuais demandas para a consolidação da *expertise* nacional nesse cenário, que inclui o tratamento e a valorização como partes do manejo de RSU.

Eficiência energética de processos

A resposta para a questão sobre qual solução é mais eficiente em termos energéticos, se é a reciclagem de materiais ou a recuperação de energia, está relacionada principalmente com as seguintes frações de resíduos: papel e papelão, plásticos e resíduos orgânicos. Indiretamente, relaciona-se com os metais. A reciclagem de materiais possui uma clara vantagem em relação à recuperação energética quando se trata de RSU por preservar os recursos naturais, sendo também considerada de menor impacto ambiental e com alto potencial de integração social.

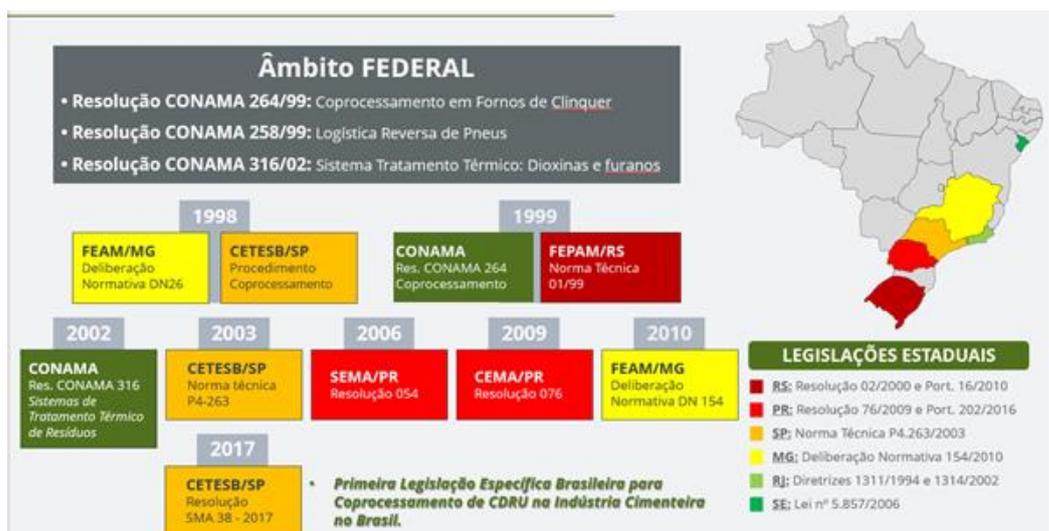
Para as frações recicláveis, de papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e metais, torna-se evidente que a intensificação dos sistemas de coleta seletiva em combinação com o maior emprego das tecnologias de triagem aumentará o índice de reciclagem de materiais. O uso de tecnologias de triagem adequadas deve ser expandido para incluir os resíduos mistos. Coleta seletiva e sistemas de triagem devem ser implementados. O objetivo geral do sistema é atingir um balanço ideal entre maiores taxas de recuperação de energia e uma boa qualidade dos produtos reciclados.

A reciclagem dos materiais é vantajosa em relação à recuperação de energia das frações presentes no RSU e gera uma menor emissão de GEE em relação ao processo de recuperação de energia. Para as frações na forma de papel e papelão, plásticos, resíduos orgânicos e metais, o grau de reciclagem tende a aumentar com a intensificação tanto dos sistemas de coleta seletiva quanto do uso de tecnologias de triagem.

Portanto, uma gestão sustentável de resíduos deve buscar o balanço entre maiores taxas de recuperação de energia e a boa qualidade dos produtos reciclados.

1.2. Bases Legais

No Brasil, a atividade de coprocessamento na indústria cimenteira é regulamentada por diversas normas de repercussão federal e estadual. Entretanto, como não há uma pacificação sobre o assunto, encontramos estados da Federação que permitem o coprocessamento de RSU, por exemplo Minas Gerais e São Paulo, em contraposição a outros estados. Entre outros aspectos regulamentados, há questões ligadas ao licenciamento das plantas ou mesmo características de emissões ou qualidade do CDR (Figura 1).



Fonte: ProteGEEr (2018).

Figura 1. Aspectos legais do coprocessamento – regulamentação do uso do CDR.

São regulamentações sobre o tema:

- **Resolução Conama 258/99:** determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis.
- **Resolução Conama 264/99:** refere-se ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.
- **Resolução Conama 316/02:** dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. As licenças de operação de coprocessamento adotam os limites de emissão para dioxinas e furanos dessa normativa para coprocessamento.
- **Norma Técnica Cetesb P4-263/03:** aborda procedimento para o coprocessamento em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo.
- **Resolução Conama 382/06:** estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas dos fornos de produção de clínquer.
- **Resolução Conama 436/11:** estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas dos fornos de produção de clínquer instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 2 de janeiro de 2007.
- **Resolução SMA 38/2017:** estabelece diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos em fornos de produção de clínquer.
- **Portaria MME 65/18:** estabelece novos Valores Anuais de Referência Específicos (VRES) para os sistemas de geração distribuída de que trata o artigo 2º, parágrafo 8º, inciso II, alínea “a”, da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, observado o disposto nos artigos 14 e 15 do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004.

Resolução 38/17

A Resolução SMA 38, de 31 de maio de 2017, estabelece as características mínimas para os Combustíveis Derivados de Resíduos Sólidos Urbanos (CDRU). A norma visa atender o critério de melhor tecnologia prática disponível, de modo a minimizar os impactos deletérios à saúde

pública e ao meio ambiente. Esta legislação é pioneira no mercado brasileiro por tratar especificamente do tema.

A norma também prevê as condições operacionais, os limites de emissão e os critérios de controle e monitoramento para disciplinar o licenciamento ambiental da recuperação energética do CDRU nos fornos de produção de clínquer. Nessa direção, dispõe que a unidade de preparo desses combustíveis e a unidade onde for recuperada a energia contida neles dependerão de prévio licenciamento, sem prejuízo de outras licenças ou autorizações exigíveis.

O interessado em licenciar um forno de produção de clínquer para coprocessar CDRU deve demonstrar, inicialmente, que sua instalação atende as Resoluções Conama 382/2006 ou 436/2011 para a produção de cimento. Ademais, o uso dos CDRU em fornos de clínquer é passível de licenciamento ambiental, atendendo as legislações relacionadas na Resolução SMA 38 de 2017. Vale destacar que a incorporação de resíduos sólidos industriais à preparação do CDRU dependerá de autorização do órgão ambiental. Assim, a identificação do resíduo industrial deverá ser efetuada utilizando os códigos da Lista Brasileira de Resíduos Sólidos da Instrução Normativa 13/2012, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama).

Os resultados obtidos em um teste de queima são válidos somente para o forno avaliado, nas quantidades e composições típicas do CDRU verificadas durante o teste. Outras unidades deverão realizar testes específicos para cada forno. Nesse caso, quando os padrões de CDRU forem normatizados pela autoridade competente, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) publicará, no prazo de 90 dias, norma regulamentando procedimentos específicos para o licenciamento ambiental do forno, revendo o procedimento para levar em consideração as classes de CDRU normatizadas.

Esta norma trata, ainda, dos critérios para definição dos limites de emissão para a atmosfera do forno de clínquer; do monitoramento contínuo dos efluentes gasosos gerados no forno de clínquer; da comprovação ao atendimento aos limites de emissão; do monitoramento e registro contínuo dos parâmetros operacionais do processo; e do Relatório Anual de Atividades. Por fim, determina que a infringência a qualquer de seus artigos sujeitará o infrator às penalidades estabelecidas na legislação em vigor. A Tabela 1 retrata os parâmetros limitantes das emissões previstos na SMA 38 de 2017.

Tabela 1. Parâmetros firmados na Resolução SMA 38/17.

Poluente	Limite de Emissão
Sox	350 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
NOx	800 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Ácido Clorídrico	10,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Ácido Fluorídrico	4,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Cd + Tl	0,05 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Hg	0,04 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
Pb	0,275 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
As + Co + Ni + Se + Te + Be	1,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂

Pb + As + Co + Ni + Se + Te + Be + Cr + Mn + Sb + Sn +	
Zn	5,0 mg/Nm ³ a 10% de O ₂
THC (como propano)	20 ppmv
Dioxinas e Furanos (expressos como 2,3,7,8 TCDD)	0,1 ng/Nm ³ a 11% de O ₂

Fonte: Estado de São Paulo (2017).

E ainda, complementando os parâmetros orientadores, a SMA 38 de 2017 também define pioneiramente limites para os seguintes critérios:

I – Poder calorífico inferior: ≥ 3583 kcal/kg na base seca;

II – Teor de cloro: $\leq 1,0\%$;

III – Teor de mercúrio: $\leq 0,5$ mg/kg.

A Resolução SMA 38/17 também estabelece que o limite de emissão de material particulado proveniente da queima de CDRU deve ser de 50 mg/Nm³ a 11% de O₂.

Comparando os limites legais previstos na Resolução 38/17 com os padrões praticados na Europa, podemos afirmar que:

- em geral, os limites estabelecidos na Resolução 38/17 são mais tolerantes do que àqueles estipulados pela diretiva IED (2010/75/EU), com exceção de ácido clorídrico, metais voláteis (Hg, Cd, Tl) e dioxinas/furanos, que são idênticos;
- a Resolução 38/17 é mais tolerante quanto aos metais pesados não voláteis, mas também demanda monitoramento de grupos distintos de metais;
- as autoridades dos Estados membros europeus podem estabelecer limites mais estritos ou para outros poluentes do que os descritos na Diretiva 2010/75/EU. Para tanto, devem levar em consideração o documento BREF de melhores técnicas disponíveis na indústria cimenteira. Neste documento, não há distinção entre emissões das instalações com ou sem coprocessamento de resíduos, e só se impõem limites mais restritivos para particulados, NO_x e NH₃-Slip;
- uma comparação detalhada também deve considerar os métodos analíticos prescritos nos respectivos regulamentos.

1.3. Aspectos qualitativos

Considerando a excepcionalidade do emprego de RSU como fonte de CDR no mercado brasileiro, entendemos ser pertinente a avaliação dos parâmetros de controle propostos pela indústria cimenteira. Com isso, visa-se contribuir durante o estabelecimento deste novo mercado, aproximando os requisitos do setor consumidor da viabilidade de atendimento pelo setor produtivo para potencializar a recuperação dos resíduos a partir da geração de CDR com segurança ambiental e viabilidade técnica. Neste sentido, sugerimos que seja discutido o estabelecimento de bandas limitadoras e não valores individualizados, flexibilizando a operação e maximizando a quantidade a ser processada, sem afastar os critérios de proteção ambiental e qualidade do clínquer.

Em função do ineditismo do coprocessamento do CDR no Brasil, mas também da experiência acumulada pelas cimenteiras no coprocessamento de *blending* de Resíduos Sólidos Industriais (RSI), os cimenteiros elaboraram uma tabela com os principais parâmetros avaliados dentro da atividade de coprocessamento a fim de nortear a especificação da qualidade do CDR a ser produzido para consumo ou coprocessamento nas fábricas de cimento (Tabela 2). As cores verde,

amarela ou vermelha em cada parâmetro traduzem a sua criticidade e importância na visão do ente consumidor, no caso das cimenteiras.

Tabela 2. Especificações para recebimento e controle de CDR de acordo com Votorantim Cimentos e análises elaboradas pelos autores.

Especificações – Revisão MAR/2018					Comentários e recomendações	
Parâmetros	Unidade	CDR Queimador principal	CDR pré-calcinador	Queimador principal (SRF)	Pré-calcinador (RDF)	
Poder calorífico superior (PCS)	MJ/kg	≥ 21	≥ 19	Aceitável. É importante implantar um sistema de controle de qualidade no pré-tratamento e de informação ao cliente em caso de desvio importante.	Aceitável.	
Umidade	%	5,0 - 10,0	≤ 20	Quando muito baixa (5%), acarreta problemas de particulado/poeira durante o processamento e manuseio e requer um sistema robusto contra incêndios.	Aceitável.	
⚙ Cinzas totais, em resíduos líquidos]	%	15	≤ 20	Aceitável.	Aceitável. Pode ser superior a 20%, desde que com qualidade controlada.	
Enxofre (S)	%	≤ 1,2	≤ 1,2	Geralmente não é necessário medir em RSU.		
⚙ Cloretos (Cl-)	%	≤ 1,0	≤ 1,0	Esse valor de 1,0% é um limite trazido pela legislação do CDRU em SP. Basicamente, o conteúdo de Cl no CDR irá definir o nível de substituição que as cimenteiras poderão atingir sem a instalação de um By Pass de Cl. Assim, o comprometimento de buscar patamares de Cl mais baixos nos processos de produção do CDR é uma alavanca importante para elevar os volumes de consumo do CDR em uma primeira onda de coprocessamento pelas cimenteiras – haja vista que várias cimenteiras já fazem coprocessamento <i>blending</i> com RSI, o que impõe certo aporte de Cl, de modo que o CDR vem a se somar ao aporte já existente. Trata-se, portanto, do mais importante parâmetro de controle de qualidade depois do poder calorífico.		
Fluoretos (F-)	%	≤ 0,3	≤ 0,3	Esse elemento pode reduzir a demanda de energia na clínquerização, mas precisa ser mantido sob controle e limitado, pois influencia o tempo de pega no cimento.		
P2O5	%	≤ 2	≤ 2	Parâmetro relevante apenas durante o coprocessamento de resíduos animais (carnes, ossos) e lodos de esgoto. Não há necessidade de análise permanente em RSU.		
Tamanho máximo de partícula – 2D	mm	≤ 25	–	O tamanho do grão não afeta a eficiência da queima, e sim o tempo de retenção da fração na chama. Então, são apropriados a classificação por ar no pré-processamento e o peneiramento em 30 mm, que demandam menos custo. Testes práticos no queimador principal	Não relevante para taxas de substituição abaixo de 80% da carga térmica do calcinador. Acima desse patamar, necessita-se de um CDR com qualidade similar à requerida pelo maçarico.	

Especificações – Revisão MAR/2018					Comentários e recomendações	
Parâmetros	Unidade		CDR Queimador principal	CDR pré-calcinador	Queimador principal (SRF)	Pré-calcinador (RDF)
					permitem um ajuste final da dimensão do CDR requerido.	
Tamanho máximo de partícula – 3D	mm	≤	15	≤	50	É um fator limitante para a taxa de utilização no maçarico principal com o intuito de evitar a presença de partículas que possam se depositar no leito de clínquer. Para o pré-calcinador, tem influência sobre o ponto de injeção no calcinador e sobre a taxa máxima de utilização. Para taxas de substituição acima de 80% do calcinador, requer-se uma dimensão similar à do maçarico principal.
Granulometria – passante P-50mm	%		100		100	É um fator limitante para a taxa de utilização no maçarico principal com o intuito de evitar tanto a presença de partículas que possam se depositar no leito de clínquer como entupimentos nos canais de passagem do material no maçarico. Para taxas de substituição abaixo de 80% do calcinador, não tem grande impacto, mas acima desse patamar tem impacto sobre a regularidade do processo.
Ponto de fulgor	oC	≥	80	≥	80	Parâmetro antigo de resíduos líquidos classe 1, não sendo relevante para RSU classe 2.
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/kg	≥	17,5	≥	15	Tão importante quanto o patamar é assegurar a regularidade desses parâmetros para permitir um controle eficiente do forno. Tão importante quanto o patamar é assegurar a regularidade desses parâmetros para permitir um controle eficiente do calcinador
Cádmio (Cd)	mg/kg		–		–	O cádmio é um elemento altamente volátil, que deve ser controlado nas emissões atmosféricas. É possível limitar com base no teor por unidade de energia (mg/MJ), mas isso requer estudo detalhado. Sugestão: 50 mg/kg.
☼ Mercúrio (Hg)	mg/kg	≤	10	≤	10	O mercúrio é um elemento altamente volátil, que deve ser controlado nas emissões atmosféricas. É possível limitar com base no teor por unidade de energia (mg/MJ), mas isso requer estudo detalhado. Sugestão: 5 mg/kg.
Tálio (Tl)	mg/kg		–		–	O tálio é um elemento altamente volátil, que deve ser controlado nas emissões atmosféricas. É possível limitar com base no teor por unidade de energia (mg/MJ), mas isso requer estudo detalhado. Sugestão: 50 mg/kg.
☼ Soma grupo I (Cd + Hg + Tl)	mg/kg	≤	100	≤	100	Aceitável. Mesmo este parâmetro pode ser substituído por valor relativo à energia.
Arsênio (As)	mg/kg		–		–	Pode se tornar volátil em alguns fornos, por isso deve ser regulamentado individualmente e não em caráter geral.
Cobalto (Co)	mg/kg		–		–	Sem limitação necessária, pois está vinculado à poeira (particulados).
Níquel (Ni)	mg/kg		–		–	Sem limitação necessária, pois está vinculado à poeira (particulados).
Selênio (Se)	mg/kg	≤	100	≤	100	Valores de RSU são inferiores a estes limites. Critério não relevante.
Telúrio (Te)	mg/kg		–		–	Não é necessário. Abaixo do limite de determinação.
☼ Soma Grupo II (As+ Co+ Ni+ Se+ Te)	mg/kg	≤	1.500	≤	1.500	Aceitável. Mesmo este parâmetro pode ser substituído por valor relativo à energia.
Antimônio (Sb)	mg/kg		–		–	Pode se tornar volátil em alguns fornos, por isso

Especificações – Revisão MAR/2018					Comentários e recomendações	
Parâmetros	Unidade	CDR Queimador principal	CDR pré-calcinador	Queimador principal (SRF)	Pré-calcinador (RDF)	
						deve ser regulamentado individualmente e não em caráter geral.
Cromo (Cr)	mg/kg	≤ 3.000	≤ 3.000			Aceitável. É necessário limitar para evitar altos valores de Cr 6+.
Estanho (Sn)	mg/kg	–	–			Sem limitação necessária, pois está vinculado à poeira (particulados).
☼ Chumbo (Pb)	mg/kg	≤ 3.000	≤ 3.000			Pode se tornar volátil em alguns fornos, por isso deve ser regulamentado individualmente e não em caráter geral.
Vanádio (V)	mg/kg	–	–			Sem limitação necessária, pois está vinculado à poeira (particulados).
☼ Soma Grupo III (Sb + Cr + Sn + Pb+ V)	mg/kg	≤ 5.800	≤ 5.800			Aceitável. Mesmo este parâmetro pode ser substituído por valor relativo à energia.
Bário (Ba)	mg/kg	≤ 3.000	≤ 3.000			Valores de RSU são inferiores a estes limites. Critério não relevante.
Cobre (Cu) **	mg/kg	≤ 3.000	≤ 3.000			Parâmetro antigo. O cobre não representa uma emissão relevante, sendo ainda de difícil determinação. Consequentemente, não faz mais parte da lista de critérios relevantes de poluição. No entanto, é importante limitar e observar regularmente, pois esse elemento catalisa a formação de dioxinas.
Manganês (Mn)	mg/kg	≤ 10.000	≤ 10.000			O manganês é importante para a grelha, por isso foi destituído da lista de emissões relevantes (em concentração relevante, deverá se tornar parâmetro de análise das cinzas).
Cianetos (CN-)	mg/kg	≤ 100	≤ 100			Parâmetro antigo de combustíveis líquidos.
Zinco (Zn) **	mg/kg	≤ 3.000	≤ 3.000			O zinco está presente nos pneus. Em geral, não há motivo para sua limitação.
Berílio (Be)	mg/kg	≤ 100	≤ 100			Valores de RSU são inferiores a estes limites. Critério não relevante.
☼ Fe2O3	%	≤ 15	≤ 15			Como parte do total da mineralogia do clínquer, o teor de ferro tem de ser regulado individualmente. O ferro metálico tem de ser evitado devido ao perigo de perturbação da moagem do clínquer por clinquerização incompleta.
Resíduos radioativos	–	Ausentes	Ausentes			Ausente. Ausente.
Resíduos de serviços de saúde	–	Ausentes	Ausentes			Ausente. Ausente.
☼ PCBs (bifenil policlorados e similares)	mg/kg	≤ 50	≤ 50			O forno cimenteiro é uma excelente ferramenta para destruir estas moléculas. No entanto, é importante evitar que sejam diluídos em outros resíduos para eliminação de maneira ilícita, sem conhecimento do operador. Apesar disso, não é considerado necessário monitorar com muita frequência. Substância proibida pela legislação federal Conama 264/99.
☼ Pesticidas	–	Ausentes*	Ausentes *			O forno cimenteiro é uma excelente ferramenta para destruir estas moléculas. No entanto, é importante evitar que sejam diluídos em outros resíduos para eliminação de maneira ilícita. Substância proibida pela legislação federal Conama 264/99.
Explosivos	–	Ausentes	Ausentes			Ausente. Ausente.
Benzeno	mg/kg	≤ 5.000	≤ 5.000			O forno cimenteiro é uma excelente ferramenta para destruir estas moléculas. No entanto, é importante evitar que sejam diluídos em outros resíduos para eliminação de maneira ilícita.

Especificações – Revisão MAR/2018				Comentários e recomendações	
Parâmetros	Unidade	CDR Queimador principal	CDR pré- calcinador	Queimador principal (SRF)	Pré-calcinador (RDF)
				Substância proibida pela legislação federal Conama 264/99.	

1.4. Princípios fundamentais

Introdução ao coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer

A prática do coprocessamento de resíduos na indústria de cimento tem se expandido devido à necessidade crescente de uma destinação ambiental e socialmente mais adequada de resíduos provenientes de diversos processos industriais.

O processo de fabricação de cimento é, essencialmente, a calcinação e a fusão de um material constituído aproximadamente de 94% de calcário, 4% de argilas e 2% (p/p) de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo operando em temperaturas de 1.450°C para os sólidos, em que a temperatura de chama oscila em torno de 2.000°C. Nesse forno é produzido o clínquer, um dos constituintes do cimento. A indústria cimenteira é uma consumidora em larga escala de recursos naturais não renováveis e combustíveis fósseis. Dessa forma, as cimenteiras são confrontadas com os dilemas da sustentabilidade, que vão desde a garantia de suprimentos de matéria-prima e insumos energéticos até o cumprimento de normas e padrões.

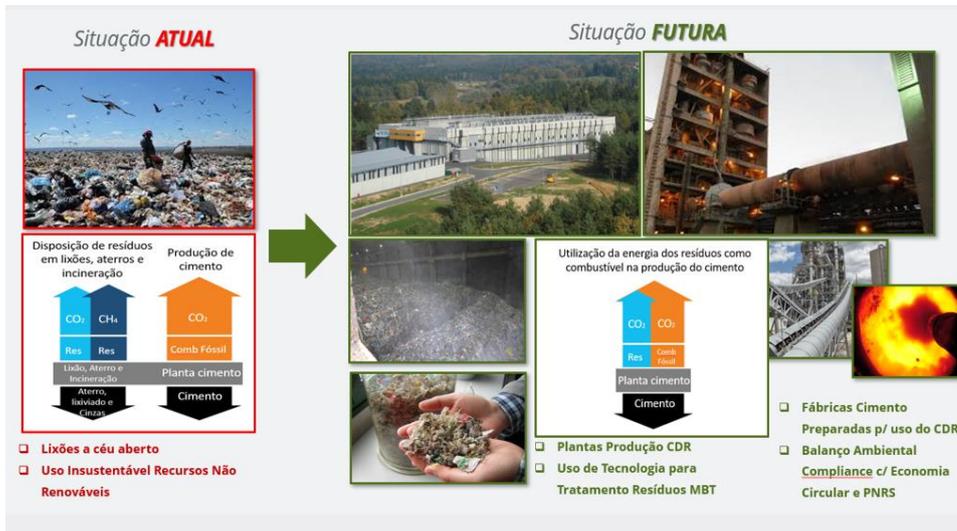
Os dilemas da sustentabilidade no setor cimenteiro são evidenciados principalmente pelo aspecto econômico, isto é, pelo custo do suprimento de combustível. Entre 1960 e 1970, essa indústria foi dependente do petróleo cru; depois, migrou em parte para o carvão mineral e em parte para o carvão vegetal. Em 1990, introduziu-se o uso de resíduos renováveis e resíduos industriais e sucatas no processo de produção de cimento.

A utilização de resíduos industriais como combustível complementar aos convencionais e aos resíduos de origem vegetal colocou a indústria cimenteira em uma condição inédita, pois, em vez de pagar por seu suprimento de combustíveis, ela passou a faturar com a recepção de resíduos para coprocessamento. Além dos aspectos econômicos, o coprocessamento contribui para compensar os problemas da alteração ambiental decorrente da cadeia produtiva.

A concepção tecnológica do coprocessamento baseia-se na queima dos resíduos no forno rotativo de clínquer em condições especiais. Os resíduos são processados nos fornos rotativos devido às condições específicas do processo, como alta temperatura, ambiente alcalino, atmosfera oxidante, ótima mistura de gases e produtos, e tempo de residência superior a 2 segundos, geralmente suficiente para a destruição de resíduos perigosos. Por outro lado, a utilização desses combustíveis alternativos no processo de produção de clínquer possui limitações, como as relacionadas ao volume de combustível secundário que alimenta o forno e à segurança ambiental.

A adequação da palavra “coprocessamento” é questionada, mas é o mais utilizado na literatura, tanto para o uso de resíduos apenas como combustíveis como para utilização como matéria-prima, além de fonte de energia. O coprocessamento é vantajoso porque permite a substituição da fonte tradicional de energia por fonte ambientalmente adequada, a preservação de recursos energéticos não renováveis, o de processamento em larga escala de combustíveis

alternativos, a mitigação de passivos ambientais em decorrência do desvio de massa dos aterros e, indiretamente, a contribuição à saúde pública e geração de novos empregos.



Fonte: ABPC (2017) e análises elaboradas pelos autores.

Figura 2. Gestão de Resíduos x Setor de Cimento: Situação atual e futura.

Panorama do Mercado de Cimento Brasileiro

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), existem hoje 24 grupos cimenteiros em atuação no Brasil, com 100 fábricas de cimento e uma capacidade instalada de produção total de 102Mton/ano (Figura 3). Em função da retração na economia em 2017, há um excesso de capacidade no setor de aproximadamente 50%.

- ❑ 24 grupos industriais
- ❑ 100 fábricas
 - 64 Integradas
 - 36 moagens
- ❑ Produção

2014:	71,3 M t
2015:	64,5 M t
2016:	57,4 M t
- ❑ Consumo

2014:	71,7 M t
2015:	65,4 M t
2016:	57,6 M t
- ❑ Capacidade Instalada (2017): 100 M t/ano
- ❑ Quantidade de resíduos destinados :

2014:	1,2 M t
2015:	1,1 M t
2016:	1,0 M t



Associação Brasileira de Cimento Portland
Fonte: SNIC 2017

Fonte: ABPC (2017) e análises elaboradas pelos autores.

Figura 3. Cenário Mercado Cimento brasileiro.

Cenário Evolutivo Coprocessamento: Brasil e Mundo

Como consequência desse contexto de posicionamento das diversas empresas do setor cimenteiro, há uma estagnação dos volumes anuais coprocessados nos últimos anos no Brasil, conforme demonstrado na Figura 4.



Fonte: ABPC (2017) e análises elaboradas pelos autores.

Figura 4. Coprocessamento fornos cimento no Brasil.

Os volumes coprocessados oscilam ligeiramente acima de 1,0 milhão de toneladas por ano, distribuídas entre matérias-primas alternativas, pneus inservíveis e combustíveis alternativos ou resíduos com conteúdo energético. Isso equivale a uma substituição em base térmica de 10% a 12,5% da demanda energética para a produção de clínquer nas fábricas do Brasil. Diante desse contexto, o *roadmap* de desenvolvimento tecnológico do setor cimenteiro aponta para uma meta de 35% de substituição de energia térmica das fontes tradicionais para fontes alternativas, onde o CDR representa algo em torno de 10%. Para 2050, o mesmo estudo indica uma taxa de substituição superior a 50%, sendo o CDR responsável por um patamar em torno de 20%. Esse *roadmap* revela a importância estratégica do CDR para o setor cimenteiro no Brasil, em linha com países mais desenvolvidos, onde se tem uma gestão de resíduos em mercados considerados maduros em termos de tecnologias de tratamento e destinação.

No Brasil, os materiais coprocessados são matérias-primas alternativas (solos contaminados, resíduos gastos de cuba da indústria de alumínio etc.), combustíveis alternativos (pneus inservíveis, *blending* de resíduos industriais com poder calorífico, como borras oleosas e óleos contaminados, *blending* de resíduos sólidos triturados e resíduos líquidos etc.) e biomassas (cavaco de madeira, casca de arroz, caroço de açaí, casca de castanha, sementes descartadas para plantio etc.). A Figura 5 mostra alguns exemplos.



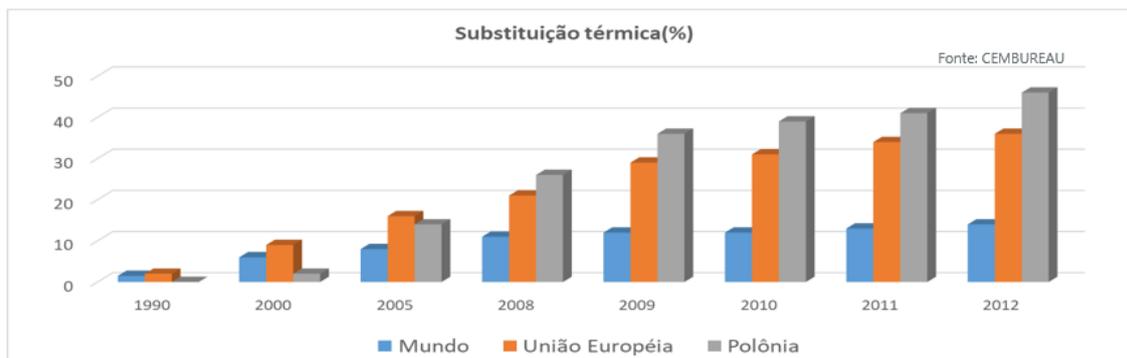
Fonte: ABPC (2017) e análises elaboradas pelos autores.

Figura 5. Materiais mais utilizados no coprocessamento.

O termo CDR foi cunhado para descrever o combustível a ser produzido a partir do tratamento dos resíduos sólidos urbanos e industriais não perigosos que já foram processados *a priori* na forma de reciclagem de materiais, não restando assim alternativa complementar além da

recuperação energética, sendo que os materiais sobressalentes passarão a ser enquadrados como rejeitos e encaminhados para disposição final em aterros sanitários.

A Figura 6 expõe informações sobre as taxas de substituição térmica que representam o uso de CDR: uma estimativa da média mundial, da média europeia e do *case* da Polônia, que é um dos destaques no cenário europeu. Os fatores de sucesso do *case* polonês permitem verificar que a evolução observada ao longo dos últimos 10 anos veio fortemente amparada por uma evolução contínua da legislação aplicável ao setor, incluindo uma sobretaxa sobre disposição em aterros de materiais não tratados ou com algum potencial de recuperação e, sobretudo, o rigor na fiscalização do cumprimento da nova legislação.



Fonte: Apresentação sobre Recuperação Energética – ABPC, 2017 e análises elaboradas pelos autores, 2018.

Figura 6. Evolução Coprocessamento fornos.

Principais fatores de sucesso mostrados na Figura 6:

- Evolução contínua da legislação;
- Aplicação da regulamentação;
- Implementação com taxa de aterros;
- Comprometimento do Setor de Cimento;

1.5. Análise situacional

Contexto & Oportunidade para o “Negócio CDR”

O setor cimenteiro tem fomentado discussões sobre a minimização dos impactos no processo produtivo, entendendo que o investimento em inovação é parte fundamental desse esforço. Desta forma, a substituição da fonte energética tradicional no Brasil, o coque de petróleo importado, pelo CDR tornou-se estratégica para o setor. As cimenteiras têm investido em iniciativas de sustentabilidade para alcançar, no médio prazo, padrões internacionais em uso de matérias-primas e combustíveis alternativos não fósseis via coprocessamento em suas unidades no Brasil.

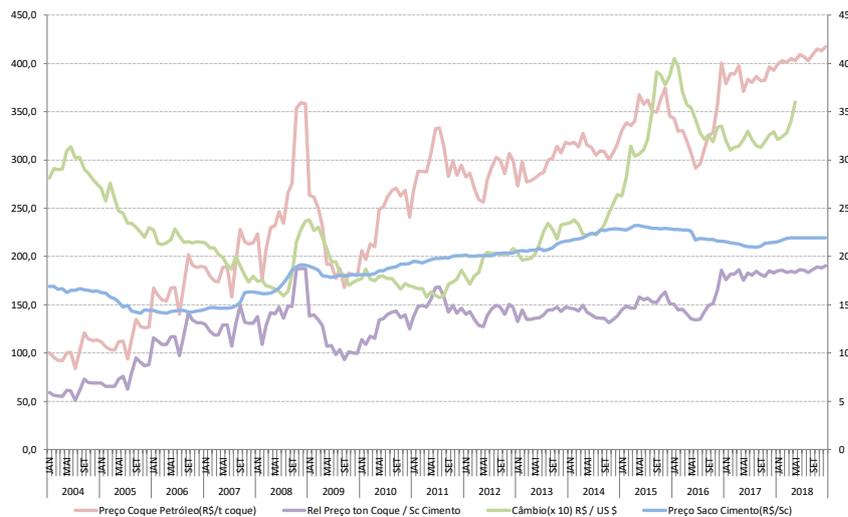


Fonte: Empresas produtoras cimento, WBCSD/CSI e análises elaboradas pelos autores.

Figura 7. Indústria cimenteira.

Além disso, a condição de baixo crescimento econômico do país impele à busca por alternativas que gerem maior competitividade, o que significa que o desafio atual não está relacionado ao desempenho do cimento, nem à produção e ao mercado, mas à redução das emissões de GEE e à possibilidade de conciliar as mudanças climáticas e a necessidade do setor cimenteiro. Busca-se a sustentabilidade através da eficiência energética e do combustível derivado de matérias-primas alternativas.

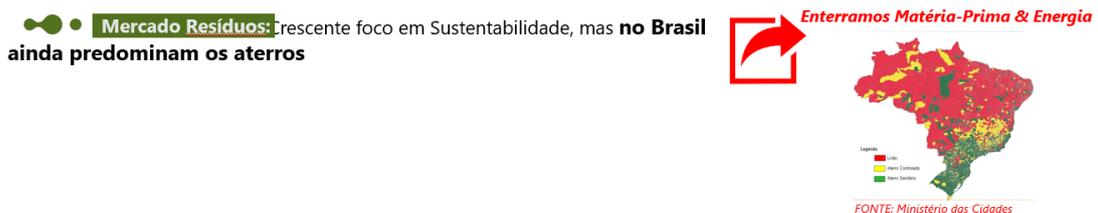
Conforme mostrado no gráfico a seguir (Figura 8) entre 2004 e 2018 o preço do coque de petróleo importado para as cimenteiras no Brasil aumentou em torno de 425%. No mesmo período, o preço médio do saco de cimento mais comum subiu algo em torno de 30%, sendo que praticamente permanece fluando no mesmo patamar depois de 2015.



Fonte: Empresas produtoras cimento, cimento.org e análises elaboradas pelos autores, 2018.
 Figura 8. Dados econômicos da indústria cimenteira (2004-2018).

Isto se deve ao impacto da redução da atividade da construção civil e uma nova dinâmica de competição perante as capacidades instaladas e *players* que entraram no mercado de produção de cimento no Brasil. Essa grande flutuação e volatilidade do preço do coque faz com que as empresas cimenteiras estejam empenhadas em buscar uma alternativa a essa grande exposição do resultado operacional de seus negócios, uma vez que a energia térmica representa algo em torno de 30% do custo total de produção do cimento.

Por outro lado, o cenário de destinação de resíduos permanece predominado por aterros e, em boa parte do território nacional, por lixões ou aterros controlados, segundo dados do Ministério das Cidades (Figura 9).



Fonte: Ministério das Cidades e Abrelpe (2017).
 Figura 9. Mercado de resíduos.

A sinergia entre o setor de resíduos e o do cimento pode vir a garantir o escoamento de parte significativa do CDR produzido a partir de resíduos urbanos em unidades de

coprocessamento, podendo o quantitativo remanescente ser encaminhado para outros setores de atividade econômica.

A diversidade geográfica das fábricas de cimento no Brasil, presentes em quase todos os estados e próximas dos centros populosos (onde se encontram também os grandes centros geradores de resíduos), e o fato de os fornos de clínquer já estarem instalados, fazem com que a necessidade de investimento para desenvolver o negócio CDR esteja voltada para as adaptações dos fornos, em termos de sistemas de estocagem, manuseio, dosagem e injeção do CDR nos fornos, e para o monitoramento dos gases de emissão de suas chaminés, em conformidade com a legislação aplicável – e, em alguns casos, para além dela, com o intuito de fomentar o compromisso do setor cimenteiro com a segurança do desenvolvimento do tema no Brasil.

Além da questão econômica, há uma motivação ambiental de crescente importância no contexto dos desafios de sustentabilidade que o setor cimenteiro voluntariamente se predispõe a transpor. O setor de cimento é responsável por pouco mais de 6% das emissões de CO₂ pelas indústrias no mundo – a maior parte dessas emissões advém da descarbonatação/calцинаção da matéria-prima calcário, não estando, portanto, ligada à matriz de combustível utilizada. Por outro lado, diante das iniciativas em desenvolvimento para a consecução das metas voluntárias assumidas de redução das emissões, a substituição dos combustíveis fósseis tem um potencial relevante de contribuição, cujo caminho de implementação já é conhecido e testado, portanto precisa ser alçado a um patamar prioritário.

Nesse contexto, o setor cimenteiro em todo o mundo se juntou para debater soluções e, ao mesmo tempo, avaliar rotas tecnológicas e caminhos alternativos para não somente definir as metas de desempenho de emissões ambientais, mas também estabelecer uma governança com credibilidade e transparência para a sociedade em termos dos pilares para o desenvolvimento sustentável de acordo com a convenção das Nações Unidas. Como órgão coordenador desse programa se criou o Cement Sustainability Initiative (CSI), que é um braço dedicado ao setor junto ao World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), que coordena o desenvolvimento sustentável do setor industrial. A Figura 10 mostra a estruturação e as principais diretrizes desses órgãos.



Fonte: WBCSD e CSI (2018).

Figura 10. Iniciativa de sustentabilidade do cimento.

Potencialidade Do Mercado CDR para Cimenteiras

Com o intuito de levantar a potencialidade do mercado de consumo do CDR a ser produzido a partir de resíduos sólidos urbanos e industriais não perigosos, procurou-se primeiramente estratificar a base de dados acerca da capacidade instalada de produção de cimento, segregando aqueles fornos e fábricas com capacidade de coprocessamento.

As informações da amostragem de plantas de cimento estão sintetizadas a seguir e foram captadas das empresas produtoras de cimento, do site cimento.org e a partir de análises internas dos autores e diz respeito ao levantamento sobre a base da indústria de cimento e a sua capacidade instalada de produção deduzindo os fornos paralisados por questões obsolescência tecnológica:

- Total fábricas cimento: 100 plantas;
- 24 grupos cimenteiras;
- Apenas Moagens Cimento (sem Fornos): 36 plantas;
- Fábricas Pozzolana ou Desmobilizadas: 5 Plantas, sendo 2 de produção de Pozzolana e outras 7 desmobilizadas sem perspectivas de retorno (Mercado e Obsolescência);
- Total Fábricas Avaliadas no Estudo: 55 Plantas produzem, aproximadamente, 75 a 85 Mton Cimento/ano;
 - Desse montante 12 Fábricas ainda não têm licença coprocessamento;

Para avaliar o CDR como negócio, definem-se os seguintes *drivers* principais:

- **Receitas de faturamento:** receitas advindas do pagamento, pelas prefeituras, do serviço de destinação de resíduos mais receitas acessórias advindas da venda do CDR para empresas cimenteiras;
- **Fretes *inbound* e *outbound*:** como tanto os resíduos quanto o CDR são materiais de baixo valor agregado, caso sejam necessárias movimentações em grandes distâncias, perde-se muita competitividade pelo peso significativo do frete em longas distâncias no custo operacional total do negócio;
- **Volume de resíduos a ser tratado e capacidade de consumo das cimenteiras:** como o montante de investimentos é significativo e uma parcela considerável do custo de produção tem características de custo fixo, a escala de volumes do projeto se torna um fator importante para a diluição de custos e o alcance do *breakeven* do projeto. É importante frisar a necessidade de compatibilizar a capacidade de consumo das cimenteiras e a disponibilidade de resíduos no entorno da cimenteira;
- **Custo de energia tradicional das cimenteiras:** um dos ganhos econômicos sob o ponto de vista das cimenteiras se dá com a substituição do coque de petróleo importado pelo CDR. Assim, quanto maior o preço do coque, maior será o potencial preço de venda do CDR, que deverá ser definido em relação à alternativa do uso do coque de petróleo;
- **Metaqualidade CDR, grau de tecnologia de produção de CDR, gravimetria, resíduos a serem tratados, Capex e Opex do projeto:** há sempre um compromisso entre essas cinco variáveis, que devem ser combinadas de modo a obter a melhor relação custo-benefício na visão da prefeitura, das cimenteiras e do investidor estratégico privado;
- **Plano de comunicação robusto para a implementação do projeto CDR:** dado o contexto inovador de um projeto CDR e a diversidade de *stakeholders* envolvidos, deve-se

estruturar um plano de comunicação robusto para propiciar a melhor gestão de relacionamentos entre a coordenação do projeto e os principais *stakeholders*, como ação de mitigação de risco e esforço de implementação do projeto CDR.

Definição das condições de contorno para estudo diagnóstico

Com a análise desses *drivers* principais do negócio CDR, pode-se identificar algumas condições de contorno sem as quais dificilmente se chegará a um equilíbrio econômico satisfatório. Dessa forma, para prosseguir com o estudo e mapeamento do diagnóstico do consumo potencial de CDR no Brasil, assumiram-se as condições listadas a seguir. Ao mesmo tempo, estudaram-se os patamares de taxa de substituição conservador, realista, desafiador e ambição (máximo limite técnico).

- Identificação da Taxa Coprocessamento Atual (TSR – Thermal Substitution Rate) via Report ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland);
- Definição de 2 tipos de CDR: Tipo A (15 MJ/t) e Tipo B (20 MJ/t);
- Condições contorno com RSU:
 - Distância de planta cimento ao grande centro RSU: menor que 150 km;
 - Número de habitantes maior que 250 mil dentro do raio considerado;
 - Avaliação tecnológica individual por forno vs capacidade coprocessamento CDR;
 - Roadmap: Potencial de expansão dessas condições com estudos específicos;
 - Premissas de atratividade econômica dos projetos em avaliação.
- Definição de cenários potenciais de avaliação:
 - “TSR Base” atual (ABCP: Panorama Coprocessamento 2017): ~ 12,5%.
 - Potencial Conservador:
 - Acréscimo à “TSR Base” de +10% c/ CDR Tipo A - (Roadmap 2030).
 - Potencial Realista:
 - Acréscimo à “TSR Base” de +20% c/ CDR Tipo A.
 - Potencial Desafiador:
 - Acréscimo à “TSR Base” de +50% (Roadmap 2050) c/ CDR Tipo B - incluindo de forma acumulativa os volumes do Potencial Realista.
 - Potencial AMBIÇÃO (Limite Potencial):
 - Benchmarking Mundial & Experiências Brasil - (Tecnologias Fornos caso a caso).

Cabe destacar que os *targets* de cada patamar potencial foram definidos levando em conta as metas do *roadmap* de coprocessamento elaborado pela entidade representante do setor cimenteiro (ABCP). Nesse *roadmap*, o setor definiu a ambição de ter uma taxa de substituição térmica de combustíveis fósseis pelo CDR em torno de 10% em 2030, chegando a algo próximo de 20% em 2050. Como o próprio *roadmap* sinaliza o potencial de ir além desses patamares com estudos mais específicos, optou-se por criar um potencial desafiador levando em conta as potencialidades adicionais que requerem maior esforço, seja de investimento em capacidade de produção do CDR, seja em adaptações das plantas de cimento aliadas a uma maior complexidade no cenário de implementação.

Análise da Potencialidade do mercado CDR para cimenteiras

Em função das condições de contorno definidas, calcularam-se os volumes potenciais de consumo de CDR nos cenários conservador, realista, desafiador e ambição (Tabela 3). Estimou-se

assim um potencial de consumo de CDR superior a 1 milhão de toneladas em um cenário realista, o que significa que 3,3 milhões de toneladas de RSU seriam tratadas em plantas de produção de CDR com essa finalidade. Esse valor pode ser duplicado em um cenário desafiador, onde o montante de Capex requerido é duas vezes maior.

Tabela 3: Volumes CDR x Região e RSU x Região.

Volumes CDR (ton/ano) x Região				
Rótulos de Linha	Cenário 1 – Potencial Conservador	Cenário 2 – Potencial Realista	Cenário 3 – Potencial Desafiador	Cenário 4 – Potencial Ambição
CO	49.896	99.792	246.720	398.215
N	35.368	70.737	145.687	199.962
NE	151.785	303.569	684.982	1.085.669
SE	202.043	440.564	1.009.501	1.775.836
SU	110.951	208.003	333.434	535.048
Total geral	550.043	1.122.665	2.420.324	3.994.730

Volumes RSU (ton/ano) x Região				
Rótulos de Linha	Cenário 1 – Potencial Conservador	Cenário 2 – Potencial Realista	Cenário 3 – Potencial Desafiador	Cenário 4 – Potencial Ambição
CO	153.526	307.052	674.373	1.053.110
N	108.826	217.651	405.028	540.715
NE	467.030	934.060	1.887.592	2.889.310
SE	577.265	1.258.755	2.681.096	4.596.933
SU	317.004	594.294	907.871	1.411.906
Total geral	1.623.650	3.311.812	6.555.960	10.491.973

Fonte: Estudo elaborado pelos autores.

Os volumes do cenário potencial Ambição referem-se ao que tecnicamente seria possível de ser consumido, mas com projetos cuja atratividade econômica é inferior à média nacional. Dentro desse potencial, teríamos o tratamento de mais de 10 milhões de toneladas de RSU, o que significa em torno de 15% do volume produzido no Brasil em 2017.

Esses mesmos dados são apresentados por estado na Tabela 4:

Tabela 4. Volumes RSU x Estado.

Volumes RSU (ton/ano) x Estado				
Rótulos de Linha	Cenário 1 – Potencial Conservador	Cenário 2 – Potencial Realista	Cenário 3 – Potencial Desafiador	Cenário 4 – Potencial Ambição
MG - Minas Gerais	437.843	875.685	1.888.480	3.039.296
PR - Paraná	264.053	528.106	777.672	1.178.468
PB - Paraíba	217.977	435.955	939.310	1.165.385
SP - São Paulo	139.422	383.070	734.508	1.218.779
SE - Sergipe	130.618	261.236	386.913	615.879
GO - Goiás	95.040	190.080	343.533	500.082
PA - Pará	68.721	137.442	247.645	357.607
RN - Rio Grande do Norte	59.217	118.434	232.389	320.199
CE - Ceará	59.217	118.434	265.458	518.468

MT - Mato Grosso	58.486	116.972	176.654	227.811
SC - Santa Catarina	52.951	66.189	130.200	166.778
TO - Tocantins	40.104	80.209	157.383	183.108
RJ - Rio de Janeiro	0	0	58.108	265.338
DF - Distrito Federal	0	0	154.186	325.218
BA - Bahia	0	0	63.522	195.859
AL - Alagoas	0	0	0	0
RS - Rio Grande do Sul	0	0	0	66.660
MS - Mato Grosso do Sul	0	0	0	0
ES - Espírito Santo	0	0	0	73.521
AM - Amazonas	0	0	0	0
PE - Pernambuco	0	0	0	0
MA - Maranhão	0	0	0	0
PI - Piauí	0	0	0	73.521
Total geral	1.623.650	3.311.812	6.555.960	10.491.973

Fonte: Estudo elaborado pelos autores

Esses são volumes totais dentro de cada estado, resultantes dos projetos avaliados individualmente. Dessa forma, faz-se necessário apresentar os projetos ou cases ou clusters onde as condições de contorno são atendidas, com potencial relevante de que o projeto CDR tenha boa atratividade para o setor privado quando se equacionam as variáveis econômicas envolvidas. Nesse contexto, foram diagnosticados no estudo 25 clusters potenciais para a avaliação de um projeto CDR (Tabela 5). Dentro de cada cluster, foram identificados os municípios que assumem papel central em termos de disponibilidade de volumes de RSU, pois esse é um fator de peso relevante no equilíbrio econômico a ser buscado.

Tabela 5. Volumes RSU x Cluster.

Volumes RSU (ton/ano) x Estado						
Rótulos de Linha	Código Cluster	Centro logístico do Cluster	Cenário 1 – Potencial Conservador	Cenário 2 – Potencial Realista	Cenário 3 – Potencial Desafiador	Cenário 4 – Potencial Ambição
1	SU1	RS - Bagé	0	0	0	66.660
2	SU2	SC - Blumenau	52.951	66.189	130.200	166.778
3	SU3	PR - Curitiba	264.053	528.106	777.672	1.178.468
4	SE1	SP - Grande São Paulo	139.422	383.070	623.847	935.450
5	SE2	SP - Jacupiranga	0	0	110661	283329
6	SE3	RJ - Nova Friburgo	0	0	58.108	265.338
7	SE4	ES - Cachoeira de Itapemirim	0	0	0	73.521

8	SE5	MG - Barbacena	87.120	174.240	461.109	676.647
9	SE6	MG - Belo Horizonte	129.579	259.157	513.473	947.532
10	SE7	MG - Uberaba	132.893	265.785	610.401	702.201
11	SE8	MG - Passos	0	0	35.550	231.073
12	SE9	MG - Lavras	88.251	176.503	267.948	328.911
13	SE10	MG - Montes Claros	0	0	0	152.932
14	CO1	GO - Goiania	95.040	190.080	343.533	500.082
15	CO2	MT - Cuiabá	58.486	116.972	176.654	227.811
16	CO3	DF - Distrito Federal	0	0	154.186	325.218
17	NE1	PE - Petrolina e BA - Juazeiro	0	0	63.522	122.338
18	NE2	SE - Aracaju	130.618	261.236	386.913	615.879
19	NE3	BA - Vitoria da Conquista	0	0	0	73.521
20	NE4	PB - João Pessoa	217.977	435.955	939.310	1.165.385
21	NE5	RN - Mossoró	118.434	236.869	464.777	590.572
22	NE6	CE - Sobral	0	0	33.069	167.709
23	NE7	CE - Crato	0	0	0	153.906
24	N1	PA - Belém	68.721	137.442	247.645	357.607
25	N2	PA - Marabá	40.104	80.209	157.383	183.108
Total geral			1.623.650	3.311.812	6.555.960	10.491.973

Fonte: Estudo elaborado pelos autores.

Caracterização gravimétrica do CDR

A partir dos dados coletados na campanha de caracterização, os tipos serão reordenados em seis grupos para refletir melhor o potencial de aproveitamento energético em uma cimenteira:

- CDR: frações potencialmente com alto poder calorífico e, assim, as mais interessantes para a produção de CDR;
- PVC: tem potencial energético, mas é indesejado no processo de clinquerização por seu alto teor de cloro;
- Metais: ferrosos e não ferrosos, que será mais interessante separar para reciclagem do que enviar à cimenteira;
- Inertes: minerais em geral. Sua quantidade é importante, pois reduz o poder calorífico do resíduo, e deve ser controlada – os minerais podem ser absorvidos no processo de clinquerização;
- Biodegradáveis: frações mais facilmente biodegradáveis e em geral com alto teor de umidade e baixo PCI, portanto, de baixo interesse para a produção de CDR se não tiverem sido submetidas ao processo de biossecagem;
- Rejeitos: frações indesejadas no processo de clinquerização.

Tabela 6. Agrupamento das frações para avaliação do potencial de CDR, Terra Melhor (2016).

Fração	Grupo	Fração	Grupo
Papel		PVC	PVC
Papelão		Metais ferrosos	Metais
Tetrapak		Metais não ferrosos	Metais
Higiênicos		Vidro	Inertes
Fraldas		Mineral	
Plástico 2 D		Orgânico	Biodegradável
Plástico 3 D	CDR	Verdes	
Plástico com alumínio		Pilhas e baterias	
Madeira		Rejeitos	Rejeitos
Couro		Contaminantes	
Borracha		Cabos	
Isopor			
Têxtil			

1.6. Necessidade de investimentos

Estimativa de custos para adaptação das cimenteiras para recebimento de CDR

Para implementar o coprocessamento de CDR, as cimenteiras necessitam fazer investimentos em adaptações internas, conforme as descrições a seguir:

- sistemas de armazenagem, injeção/dosagem e injeção de CDR para coprocessamento nos fornos pelo maçarico principal e pelo calcinador. Os investimentos são da ordem de R\$ 15 milhões (sistemas de armazenagem, dosagem e injeção pneumáticos para maçarico ou calcinador) e R\$ 20 milhões (sistemas de armazenagem, dosagem e injeção via correias no calcinador), respectivamente.
- Sistemas de monitoramento das emissões das chaminés dos fornos conforme a Resolução Conama 264/99, acrescidos do monitoramento de emissões de mercúrio. Os investimentos com tecnologia FTIR são da ordem de R\$ 3 milhões.
- Adequação e expansão dos laboratórios de controle de qualidade CDR nas fábricas de cimento, capacitando-os na preparação de amostras e análises dos parâmetros essenciais de controle da qualidade do CDR. Os investimentos estimados são da ordem de R\$ 2,5 milhões.
- By Pass de cloro. Após um patamar de substituição térmica de 35% baseado em CDR, os fornos estarão muito próximos das capacidades de purga do aporte de cloro introduzidos via CDR e outros combustíveis alternativos. Dessa forma, a maioria dos fornos irá necessitar de um sistema que aumente a sua pré-disposição a um aporte maior de cloro, denominado By Pass de cloro. Esse sistema consiste de um ventilador de tiragem adicional, um novo filtro de desempoeiramento e sistemas de armazenagem do pó a ser coletado e posterior dosagem e injeção nas moagens de cimento. Os investimentos para um sistema de By Pass de cloro e seus periféricos são da ordem de R\$ 35 a R\$ 40 milhões, dependendo da complexidade e do arranjo de equipamentos necessários a cada sistema de forno.

Investimento aproximado de uma planta de preparação de CDR no Brasil

Os dados apresentados na Tabela 7 e 8 servem apenas como informação de caráter orientador, pois comparar a capacidade nominal das plantas depende diretamente da característica dos resíduos e, por consequência, do conceito tecnológico correspondente, que determinará o potencial de taxa de desvio dos aterros. Assim, os dados não poderão ser empregados de forma absoluta.

Tabela 7. Estudos de comparação de capacidade nominal e características de resíduos – fluxo integral.

Capacidade anual a partir de fluxo de fluxo integral (1)	População estimada (2)	Investimento (em R\$ milhões) (3)	Custo de operação anual (em R\$ milhões) (4)	Receita acessória anual com a venda de CDR (em R\$ milhões) (5)	Demanda de área (m ²) (6)
100.000 t/a	350.000	62	11,3	5,8	10.700
155.000 t/a	530.000	80	22	7,7	13.600
310.000 t/a	1.080.000	140	45	15,2	25.000

- (1) Fluxo integral significa que as frações superiores a 30 mm foram encaminhadas para processamento na forma de CDR.
- (2) Estimativa populacional considerando a geração de 0,8 Kg/hab/d.
- (3) Estimativa de 40% de carga tributária de importação e câmbio na ordem de 1 euro = R\$ 4,00. No custo de investimento, cerca de 30%-40% representam intervenções civis.
- (4) Estimativa considerando uma taxa de desvio de 70% e valor de aterramento na ordem de R\$ 100,00/t de rejeito. Esta taxa de desvio está diretamente relacionada com a característica do resíduo domiciliar processado.
- (5) Estimativa considerando a receita acessória de R\$ 100,00/t de CDR.
- (6) Tecnologia de biossecagem na forma de túneis, com redução de massa estimada em 30%.

Tabela 8. Estudo de comparação de capacidade nominal e características dos resíduos – fluxo parcial.

Capacidade anual a partir de fluxo parcial (1)	População estimada (2)	Investimento (em R\$ milhões) (3)	Custo de operação anual (em R\$ milhões) (4)	Receita acessória anual com a venda de CDR (em R\$ milhões) (5)	Demanda de área (m ²)
100.000 t/a	350.000	42	11,5	3,3	5.000

- (1) Fluxo parcial significa que as frações acima de 80 mm foram encaminhadas para processamento na forma de CDR.
- (2) Estimativa populacional considerando a geração de 0,8 Kg/hab/d.
- (3) Estimativa de 40% de carga tributária de importação e câmbio na ordem de 1 euro = R\$ 4,00. No custo de investimento, cerca de 25% representam intervenções civis.
- (4) Estimativa considerando uma taxa de desvio de 35% e valor de aterramento na ordem de R\$ 100,00/t de rejeito. Esta taxa de desvio está diretamente relacionada com a característica do resíduo domiciliar processado.
- (5) Estimativa considerando a receita acessória de R\$ 100,00/t de CDR.

Estimativa de preço do CDR para viabilizar sua produção

Precificar o CDR está diretamente relacionado com a contraprestação e o valor de mercado da fonte de energia tradicional. Para uma precificação do CDR que justifique sua produção, há uma série de variáveis que interferem na decisão, como valor remunerado pelo gerador público ou privado para a destinação adequada na forma de contraprestação, valor de aterramento dos rejeitos na região, taxa interna de retorno e reinvestimento. (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Estimativas de viabilização da produção de CDR – fluxo integral.

Capacidade anual a partir de fluxo integral (1)	População estimada (2)	Investimento (em R\$ milhões) (3)	Custo de operação anual (em R\$ milhões) (4)	Receita acessória anual com a venda de CDR (em R\$ milhões) (5)	Contraprestação para uma TIR 12% (R\$/t) (6)
100.000 t/a	350.000	62	11,3	5,8	142,00
155.000 t/a	530.000	80	22	7,7	163,00
310.000 t/a	1.080.000	140	45	15,2	155,00

(1) Fluxo integral significa que as frações acima de 30 mm foram encaminhadas para processamento na forma de CDR.

(2) Estimativa populacional considerando a geração de 0,8 Kg/hab/d.

(3) Estimativa de 40% de carga tributária de importação e câmbio na ordem de 1 euro = R\$ 4,00. No custo de investimento, cerca de 30%-40% representam intervenções civis.

(4) Estimativa considerando uma taxa de desvio de 70% e valor de aterramento na ordem de R\$ 100,00/t de rejeito. Esta taxa de desvio está diretamente relacionada com a característica do resíduo domiciliar processado.

(5) Estimativa considerando a receita acessória de R\$ 100,00/t de CDR.

(6) Tecnologia de biossecagem na forma de túneis com redução de massa estimada em 30%.

Tabela 10. Estimativas de viabilização da produção de CDR – fluxo parcial.

Capacidade anual a partir de fluxo parcial (1)	População estimada (2)	Investimento (em R\$ milhões) (3)	Custo de operação anual (em R\$ milhões) (4)	Receita acessória anual com a venda de CDR (em R\$ milhões) (5)	Contraprestação para uma TIR 12% (R\$/t)
100.000 t/a	350.000	42	11,5	3,3	147,00

(1) Fluxo parcial significa que as frações superiores a 80 mm foram encaminhadas para processamento na forma de CDR.

(2) Estimativa populacional considerando a geração de 0,8 Kg/hab/d

(3) Estimativa de 40% de carga tributária de importação e câmbio na ordem de 1 euro = R\$ 4,00. No custo de investimento, cerca de 25% representam intervenções civis.

(4) Estimativa considerando uma taxa de desvio de 35% e valor de aterramento na ordem de R\$ 100,00/t de rejeito. Esta taxa de desvio está diretamente relacionada com a característica do resíduo domiciliar processado.

(5) Estimativa considerando a receita acessória de R\$ 100,00/t de CDR.

Estimativa de preço do CDR para viabilizar a substituição da fonte primária de energia

Visando precificar o CDR empregamos como base de cálculo o valor do coque de petróleo e seu potencial energético (base 2018):

- Preço Coque de Petróleo: R\$ 500,00/ton
 - Poder Calorífico: 8000kcal/kg ou 33,5 GJ/ton
 - Preço Energia Coque de Petróleo: R\$ 62,5/Gcal
- CDR de RSU e RSI Classe 2
 - Poder Calorífico 4.000kcal/kg ou 15 GJ/ton
 - Preço Equivalente Energético do Coque: R\$ 225/ton
- Considerando que o CDR é recurso secundário tendo limitações em relação as cinzas, cloro e sulfetos, temos como referência que na Europa estes “déficits” oneram em 50% o preço, ou seja para o Mercado Brasileiro temos como preço “justo” o valor referencial em torno de R\$ 100/t – uma vez que estamos tratando de valores médios e assim cada fábrica de cimento potencial consumidora de CDR tem a sua especificidade em função do seu custo de energia do coque levando em conta os fretes de transporte de coque de petróleo importado do porto até a fábrica.

Cabe destacar ainda que o coque de petróleo nacional ou importado é comercializado em dólar, o que lhe confere uma grande volatilidade e imprevisibilidade. Percebe-se que a qualidade do CDR através do poder calorífico efetivo tem um papel fundamental na sua precificação. Outro aspecto fundamental é resguardado à negociação da relação entre preço da energia tradicional via coque de petróleo e da energia tradicional via CDR, aqui sugerida para 50%. Essa negociação se dará em torno das necessidades de adaptações das plantas de cimento e do caráter secundário da energia alternativa via CDR, que requer um esforço adicional das cimenteiras no domínio e controle de sua combustão em seus fornos.

1.7. Roadmap de implementação dos projetos CDR

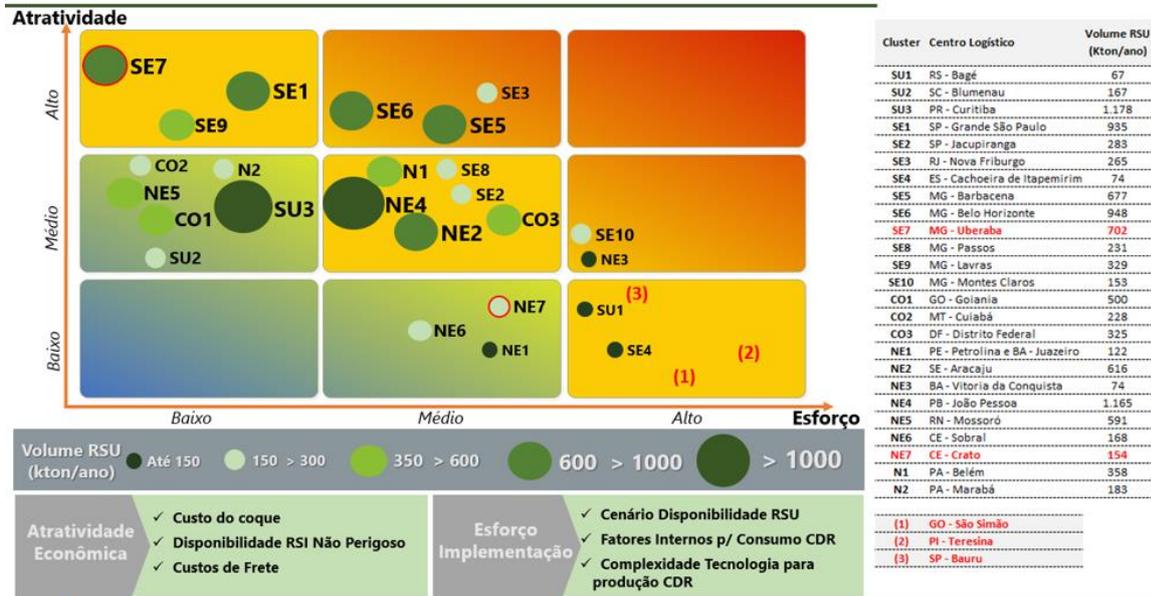
Avaliando os volumes de cada *cluster* dentro de cada nível potencial, constata-se que alguns *clusters* têm volumes apenas a partir do cenário desafiador, o que denota um maior esforço de implementação. Existe também grande variabilidade de patamares de volume, o que revela uma tendência de atratividade econômica nos projetos de maior volume.

Com isso em mente, é importante refletir sobre os fatores que influenciam a atratividade econômica e o esforço de implementação de modo a definir critérios de priorização entre os projetos. Assim, criou-se uma matriz de priorização, com dois eixos: nível de atratividade econômica do projeto, que pode ser alto, médio ou baixo; e nível de esforço para implementação do projeto, que da mesma forma pode ser alto, médio ou baixo. Cada eixo possui suas respectivas alavancas, que foram analisadas para a caracterização do posicionamento de cada *cluster*.

No eixo da atratividade econômica, foram adotadas as alavancas “preço do coque das cimenteiras consumidoras do CDR”, “disponibilidade de RSI que poderiam ser usados na produção de CDR com receitas acessórias para o investidor estratégico do projeto” e “distâncias envolvidas que possam refletir sobre o custo de movimentação de frete de resíduos e de CDR”. No eixo do esforço de implementação, foram consideradas as alavancas “complexidade do cenário local de concessão/obtenção do RSU”, “complexidade do lado das cimenteiras em ter que adaptar os fornos para consumo do CDR” e, por último, “complexidade do grau de tecnologia necessário para a produção do CDR requerido para um determinado *cluster*”. Cada uma dessas alavancas foi avaliada e recebeu um *status* de favorabilidade ou desfavorabilidade.

Com a combinação do *status* de cada alavanca, define-se o *status* de cada eixo e, consequentemente, o posicionamento do *cluster* dentro da matriz de priorização. O resultado desse posicionamento pode ser visto na Figura 11, onde o tamanho de cada círculo que representa o *cluster* reflete o volume potencial a ser tratado de RSU, conforme as escalas mostradas na legenda.

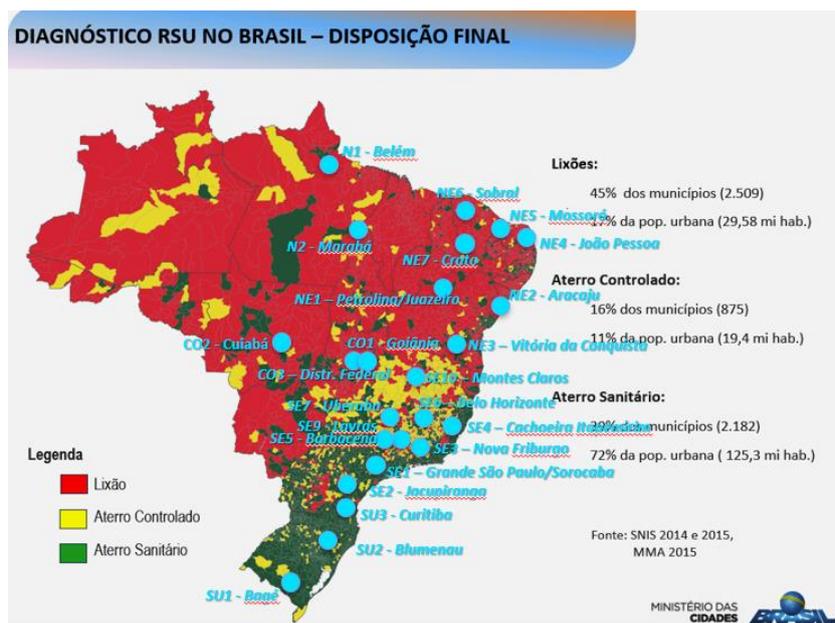
Projetos Clusters: Matriz Atratividade Econômica vs. Esforço de Implementação



Fonte: Estudo elaborado pelos autores, 2018.

Figura 11. Potencial de consumo de CDR pela indústria de cimento no Brasil.

Posicionando os 25 *clusters* sobre o mapa diagnóstico da disposição final de resíduos no Brasil, visualiza-se que a tecnologia CDR como negócio poderia ser desenvolvida em várias localidades onde a destinação atual é irregular, o que permitiria uma evolução significativa de cenário em caso de implementação. Aproximadamente 50% dos 25 *clusters* com potencial de reaproveitamento energético via CDR para cimenteiras estão localizados em regiões de lixão e aterro controlado (Figura 12).



Fonte: Proteger (2018).

Figura 12. Potencial de consumo de CDR no Brasil.

1.8. Metas de Curto, Médio e Longo Prazo

As metas de curto, médio e longo prazo, respectivamente 2018, 2023 e 2033, para a introdução e o desenvolvimento da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos estão diretamente relacionadas com o desempenho dos editais públicos de contratação de serviços de limpeza urbana e ainda com o reconhecimento e interesse do setor cimenteiro em estabelecer uma política de substituição energética (Tabela 11).

Tabela 11 .Recuperação energética de resíduos urbanos no país e macrorregiões: situação atual e metas para 2023 e 2033 (%).

Indicador	Fonte	Ano	Brasil
R1: Número de editais contratados em modalidade parceria público-privada que elegeram a recuperação energética como intervenção tecnológica	Tribunal de Contas do Estado ou Municipal	2018	0
		2023	10
		2033	20
R2: Número de fábricas de cimento licenciadas para substituição energética na forma de combustível derivado de resíduos	ABCP ² /SNIC: Panorama Anual do Coprocessamento	2018	1
		2023	10
		2033	20
R3: Volume RSU (Kton) direcionado para recuperação energética via plantas de produção CDR	Tribunal de Contas do Estado ou Municipal (TCE) Agência ambiental do Estado Ministério das Cidades (SNIS)	2018	0
		2023	500
		2033	2.000

² ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland e SNIC: Sindicato Nacional da Indústria de Cimento.

1.9. Macrodiretrizes e Estratégias

Macrodiretrizes

- Estabelecer e promover uma política de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.
- Fortalecer a coordenação nacional do Ministério das Cidades para a política de recuperação energética com a participação dos diversos setores do governo federal no seu desenvolvimento.
- Definir estratégias de interlocução e articulação com outros planos setoriais correlatos e com planos municipais, estaduais e regionais de recuperação energética, visando garantir a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- Fortalecer a cooperação entre União, estados e municípios e promover a integração federativa para o estabelecimento da política de recuperação energética.
- Adotar estratégias que assegurem a intersetorialidade das ações de valorização de resíduos (energia, cimento e outros interessados).
- Apoiar e fomentar arranjos institucionais e estudos de viabilidade de recuperação energética junto aos municípios e estados.
- Fortalecer a capacidade gerencial e de fiscalização dos municípios e estados para implementar a recuperação energética.
- Explorar as potencialidades de parceria com o setor privado para a prestação dos serviços e substituição de fonte primária de energia, com base no arcabouço legal existente.
- Apoiar o desenvolvimento científico e tecnológico para recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, visando avaliar, criar, monitorar e consolidar soluções tecnológicas, considerando as especificidades regionais.
- Fomentar o estabelecimento de normativas que regulamentem o setor, pacificando a discussão sobre a potencialidade de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos a nível nacional.
- Avaliar modelos tributários que privilegiem a substituição energética das fontes primárias por fontes secundárias.
- Incentivar a qualificação de projetos que demonstrem desvio de resíduos dos aterros.
- Incentivar ações de inclusão social em projetos de recuperação energética.

Estratégias

- Articular ações entre os diversos setores da sociedade visando fomentar a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.
- Avaliar a criação de uma comissão institucional e multissetorial para a promoção da recuperação energética no Brasil, composta por governo federal, entidades de classe, municípios e estados, agências ambientais e entidades reguladoras, como a ABNT.
- Apoiar e articular a atualização e o aperfeiçoamento da Resolução Conama 264/99, com ênfase na regulamentação do uso do CDR pelo setor cimenteiro.
- Apoiar e articular o desenvolvimento de uma norma técnica de normatização do CDR pela ABNT.

- Enfatizar a capacidade de desviar resíduos do aterro quando da introdução da recuperação energética.
- Enfatizar e disseminar a complementariedade dos conceitos de reciclagem de materiais e recuperação energética.
- Estabelecer e promover uma política de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.
- Estabelecer parceria com estados para apoio ao desenvolvimento de política de coprocessamento.
- Desenvolver estudo comparativo para fundamentar uma política de promoção da atividade do coprocessamento junto ao setor cimenteiro através do afrouxamento do limite das emissões de NOx explicitados nas licenças de coprocessamento do CDR quando da substituição de fonte de energia tradicional pelo CDR pago como medida compensatória ao setor.
- Desenvolver estudo comparativo para firmar diretrizes de promoção da recuperação energética, tais como sobretaxa de aterramento e isenção fiscal.
- Dentro do processo de padronização e normatização pela ABNT, avaliar a criação de faixas de tolerância dentro de cada parâmetro de qualidade do CDR.
- Promover estudos que identifiquem *clusters* de coprocessamento segundo análise de potencialidade.
- Apoiar técnica e financeiramente a elaboração de projetos para municípios e estados que privilegiem a recuperação energética.
- Fomentar projetos-piloto junto a *clusters* de coprocessamento e articular com os diferentes atores uma política multissetorial de implementação de novos projetos.
- Priorizar projetos que demonstrem o atendimento a indicadores de clima, energia e taxa de desvio de resíduos dos aterros.
- Estudar a criação de mecanismos para a destinação de recursos federais para investimentos em ações de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.
- Fomentar parcerias e apoiar arranjos institucionais para a implementação de projetos de recuperação energética envolvendo setores públicos, privados, instituições de pesquisa e inclusão social.
- Fomentar a confecção de manuais técnicos de recuperação energética.
- Levantar e divulgar boas práticas de recuperação energética.
- Desenvolver ações de capacitação para a gestão e prestação de serviços para administrações municipais e prestadores públicos, entre outros.
- Incentivar estratégias para promover a covalorização de resíduos sólidos domiciliares e resíduos de origem privada na forma de classe 2, industrial e comercial.
- Estabelecer procedimentos específicos para fomento de um programa de certificação nacional de CDR e promover a necessidade de acreditação da qualidade do CDR em relação aos parâmetros da norma ABNT como medida de regulamentação do CDR como um produto de mercado sujeito a controle e fiscalização.
- Atuar na capacitação dos municípios para ampliar sua capacidade de implementação de projetos de recuperação energética.

1.10. Programas

A proposta de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos é parte do programa governamental Saneamento Estruturante, garantindo materialidade a hierarquização de procedimentos, definida no artigo 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos, e ainda intersetorialidade, a partir da interlocução entre atores públicos e privados, oriundos tanto do setor de gestão de resíduos quanto de energia, meio ambiente e meios de produção.

O enquadramento de ordem estruturante reforça a necessidade de desenvolvimento de capacidades e políticas públicas que permitam um diálogo, onde o tema recuperação energética seja compreendido como a intervenção tecnológica que permite alcançar uma maior taxa de desvio, maximizando a proteção do clima e a preservação dos recursos naturais.

1.11. Monitoramento

O diagnóstico do potencial técnico de aproveitamento energético do RSU via CDR na indústria cimenteira no Brasil aponta para um volume de 10,4 milhões de toneladas de RSU anuais, que poderiam ser utilizados para a produção de aproximadamente 4,0 milhões de toneladas de CDR anuais a serem coprocessadas pelo setor cimenteiro. A implementação dessa iniciativa demanda um investimento de R\$ 8,5 bilhões, distribuídos entre R\$ 3,9 bilhões nas adaptações das cimenteiras e R\$ 4,6 bilhões em plantas de tratamento de resíduos para produção de CDR. A implementação dessa iniciativa significaria uma redução de 2,46 milhões de toneladas de coque importado na produção de cimento do setor, o que implicaria a diminuição de emissões de CO₂_{equiv} de quase 1,6 milhão de toneladas anuais. O equivalente energético da implementação dessa iniciativa seria de 20.762 GWh.

Conforme demonstrado, foram mapeados 25 *clusters*/projetos a serem implementados de acordo com um *roadmap* a ser firmado com o setor cimenteiro via sua instituição representante, o SNIC/ABCP. Estima-se que dentro de até 5 anos se pode implementar os projetos prioritários e de maior atratividade econômica (baixo/médio esforço de implementação e alta atratividade econômica), e os demais, ao longo de 5 a 15 anos devido a sua complexidade e menor atratividade econômica (médio esforço de implementação e média atratividade econômica).

Essa velocidade de implementação permitiria ao setor cimenteiro atender à sua demanda interna de alinhamento com o Cement Technology Roadmap: Alternative Fuels for Cement Sector in Brazil, que prevê uma contribuição em base térmica de aproximadamente 10% do CDR até 2030 e o patamar de aproximadamente 20% até 2050. Para consecução das metas desse *roadmap*, seria necessário um investimento de R\$ 5,2 bilhões, distribuídos entre R\$ 2,3 bilhões nas adaptações das cimenteiras e R\$ 2,9 bilhões em plantas de tratamento de resíduos para produção de CDR. A implementação dessa iniciativa significaria uma redução de 1,4 milhão de toneladas de coque importado na produção de cimento do setor, diminuindo as emissões de CO₂_{equiv} em quase 1 milhão de toneladas anuais. O equivalente energético da implementação dessa iniciativa seria de 12.065 GWh.

Na Tabela 12, temos um resumo das potencialidades de substituição energética a partir dos cenários estabelecidos no relatório.

Tabela 12. Potencial impacto do uso CDR na indústria cimenteira.

KPI	Potencial conservador	Potencial realista	Potencial desafiador	Potencial ambição
Economia de				
volume de coque (Mton)	0,28	0,58	1,43	2,46
Volume de CDR (Mton)	0,55	1,12	2,42	4,00
Volume de RSU (Mton)	1,62	3,31	6,55	10,50
Capex –				
cimenteiras (R\$ milhões)	180	340	2.280	3.940
Capex – plantas de				
produção de CDR (R\$ milhões)	1.040	1.630	2.900	3.940
Redução de				
emissões de CO₂ (Kton)	197	402	948	1.609
Equivalente				
energético (GWh)	2.399	4.896	12.065	20.762

Fonte: Estudo elaborado pelos autores.

2. Incineração

2.1. Introdução

Nos últimos anos, foi evidente o grande avanço do potencial de geração de energia térmica no processo de queima e transformação em subprodutos como calor e energia elétrica. Dessa forma, a incineração tornou-se um meio de recuperação energética em plantas de produção de energia a partir de resíduos (*Waste-to-Energy - WtE*), representando um processo ainda mais viável e sustentável.

Em 2015, aproximadamente 90 milhões de toneladas de rejeitos foram tratados em 495 plantas de WtE na Europa (incluindo Noruega e Suíça) e 255 milhões toneladas em 2.200 plantas no mundo (Eurostat, 2016). Além disso, a recuperação energética representa um fator importante para a proteção ambiental e climática, contribuindo significativamente para a redução de emissões de GEE através da substituição de matéria-prima na geração de energia. Também são reduzidas emissões através do desvio e tratamento de massa orgânica do aterro, prevenindo assim a contaminação de solo, água e ar (CEWEP, 2015).

2.2. Bases Legais

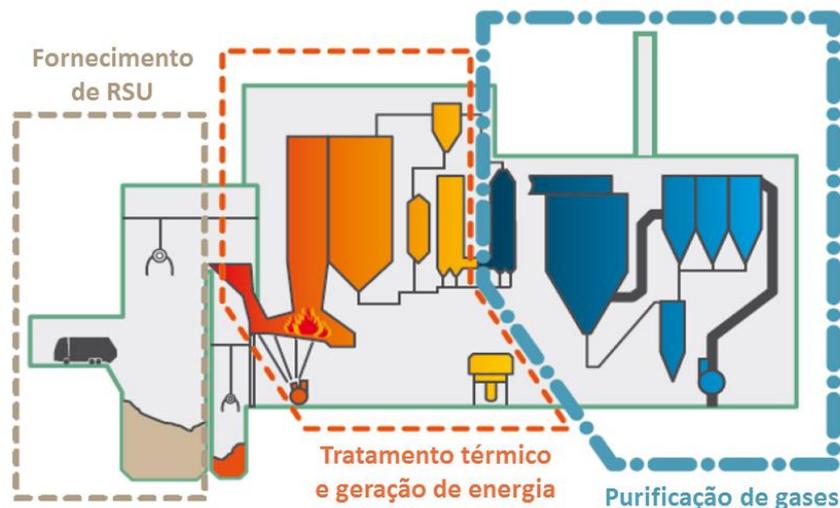
Devem ser observadas as seguintes disposições legais relacionadas à aplicação do tratamento térmico (ABRELPE, 2015):

- NBR 11.175/90 – incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho.
- Resolução Conama 006/91 – incineração de resíduos sólidos provenientes de estabelecimentos de saúde, portos e aeroportos.
- Resolução Conama 264/99 – licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.
- Resolução Conama 316/02 – procedimentos para tratamento térmico.
- Resolução Conama 358/05 – dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências.

No estado de São Paulo, deve-se cumprir a SMA 79/09, que estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em usinas de recuperação de energia (URE).

2.3. Princípios fundamentais

De forma simplificada, uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos pode ser dividida em três partes. A etapa do fornecimento do material compreende desde a área de recebimento e armazenagem até a alimentação na câmara de combustão, seguida do tratamento térmico através de queima em grelha e, por fim, da purificação de gases e retirada de escória para posterior tratamento (Figura 13).



Fonte: CEWEP (2018)

Figura 13. Etapas principais de uma planta de WtE.

O processo de incineração é composto por cinco fases principais, com diferentes requisitos de condições e temperaturas para um tratamento eficaz (Tabela 13).

Tabela 13: Fases principais do processo de incineração

1. Desidratação	Região superior da grelha, aquecimento dos resíduos até 100°C através de radiação ou convecção, favorecendo a separação de umidade (<i>start-up</i> do queimador).
------------------------	---

2. Degaseificação	Aquecimento contínuo até 250°C, eliminação de substâncias voláteis, principalmente umidade residual e gases de pirólise. Este processo ocorre em uma atmosfera redutora e com adição de calor.
3. Queima	Nesta etapa, os resíduos são queimados por completo.
4. Gaseificação	Aqui os produtos da gaseificação são oxidados por oxigênio molecular. Apenas uma pequena parte do processo ocorre na grelha de combustão. A maioria dos resíduos oxida em temperaturas de 1000°C na parte superior da câmara de combustão.
5. Pós-combustão	Para minimizar a quantidade de resíduos não queimados e o conteúdo de CO nos gases de combustão, nesta etapa o ar ou o gás de combustão já tratado e livre de poeira é adicionado para uma combustão completa. O tempo mínimo de retenção, exigido por lei, é de 2 segundos a 850°C.

Fonte: Münnich (2017)

Descrição técnica

No processo de incineração, os resíduos são queimados através da adição de combustível e ar, resultando em geração de energia, bem como em subprodutos como cinzas e gases de combustão. O uso de combustível é necessário em razão do baixo valor calorífico dos resíduos mistos, que se encontra entre 3.500 MJ/t e 7.500 MJ/t no Brasil, enquanto o lignite chega a 13.200 MJ/t (Münnich, 2017).

Sistemas de combustão

De forma geral, a combustão em grelha é a tecnologia mais utilizada em plantas de incineração. Isto se dá devido ao menor grau de exigência nos requisitos mínimos de pré-tratamento, como o dimensionamento e a trituração do material. Além disso, devem ser mencionados os inúmeros campos de aplicação deste sistema no tratamento de resíduos domiciliares, volumosos e industriais, bem como de madeiras. Esta tecnologia pode ser instalada em vários tamanhos e capacidades de 3 Mg/h a 40 Mg/h, operando com temperaturas de gás entre 750 °C e 1.000 °C. Há diversos tipos de grelhas no mercado, destacando-se as de ação inversa, as horizontais, as recíprocas e as de rolos (Igelbüscher, 2011, Münnich, 2017).

Um outro sistema de combustão é reator de queima de leito fluidizado, há instalada uma cama de calcário ou areia em vez de grelha de fornalha automática. Estes são alimentados por um sistema de distribuição de ar. O aquecimento da cama e as velocidades crescentes do ar provocam o surgimento de bolhas, que resultam em um movimento fluido. As temperaturas típicas variam entre 850 °C e 900 °C (Münnich, 2017). Esta tecnologia é bastante usada no tratamento de lodo de esgoto. A principal vantagem é a combinação ótima entre a quantidade de ar e resíduos, permitindo manter baixos níveis de emissões de NOx. Isto se deve aos níveis mais baixos de temperaturas e a uma operação com menos ar em exaustão, resultando em uma recuperação energética mais eficiente. As desvantagens são a granulometria reduzida necessária para o material de entrada, que torna seu pré-tratamento obrigatório, e a dificuldade de remoção de metais e pedras ao término do processo (Münnich, 2017).

O forno rotativo é usado para a queima completa de resíduos perigosos, sejam eles sólidos, pastosos, gasosos ou líquidos. A geometria cilíndrica dos fornos é a mais utilizada neste tipo de tecnologia. A queima acontece a altas temperaturas do gás, podendo chegar a 1.500 °C. Uma vantagem importante é a possibilidade de tratamento de diversos tipos de materiais, o que permite uma mistura ideal de resíduos (Münnich, 2017). Por causa das temperaturas altas, esta

tecnologia provoca emissões de NOx, e a recuperação energética impõe mais desafios para ser executada. Deve-se notar que um sistema caro e complexo de limpeza de gases de combustão é necessário neste caso (Münnich, 2017).

Com o objetivo de ilustrar a tecnologia de forma mais clara, são mostrados os equipamentos e sistemas principais de uma usina de incineração de RSU em um diagrama esquemático (Figura 14).

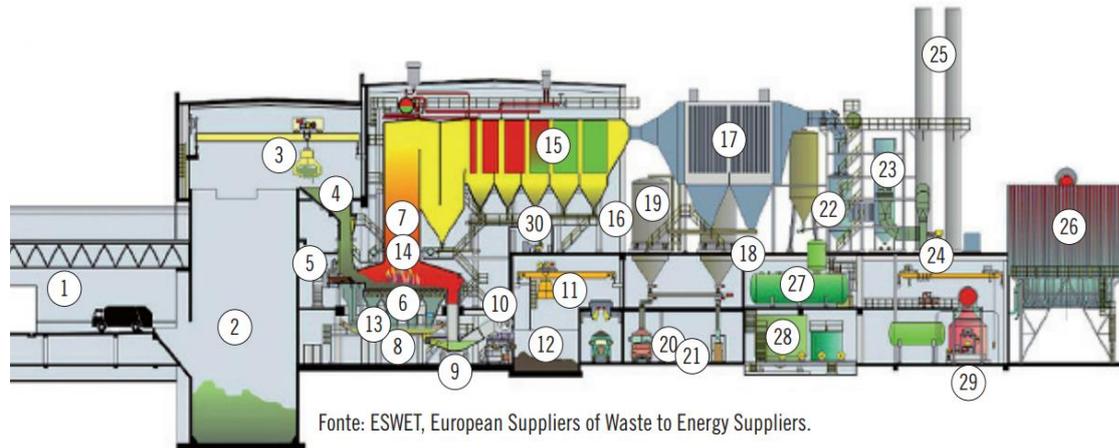


Figura 14. Diagrama esquemático de uma usina de recuperação energética de RSU.

- | | | |
|--|---|---|
| 1.Recebimento de RSU | 14. Ar de Combustão Secundário | 21. Ensacamento de Cinzas e Resíduos |
| 2. Poço de Armazenamento de RSU (Bunker) | + Sistema de Abatimento de NOx | 22. Lavador de Gases |
| 3. Ponte Rolante de RSU | 15. Caldeira de Recuperação de Calor | 23. Filtro de Mangas |
| 4. Moega de Alimentação | 16. Transportador de Cinzas de Caldeira | 24. Ventilador de Tiragem Induzida |
| 5. Alimentador da Grelha | 17. Reator de Tratamento de Gases de Combustão | 25. Chaminé |
| 6. Grelha de Incineração | 18. Transportador de Resíduos do Tratamento de Gases de Combustão | 26. Aerocondensador |
| 7. Fornalha | 19. Silo de Cinzas de Caldeira e Resíduos do Tratamento de Gases de Combustão | 27. Tanque de Água de Alimentação |
| 8. Transportador / Peneira de Cinzas | 20. Estação de Carregamento de Cinzas e Resíduos | 28. Planta de Tratamento de Água (Desmineralização) |
| 9. Extrator de Cinzas de Fundo | | 29. Turbina / Gerador |
| 10. Peneira Vibratória | | 30. Sala de Controle |
| 11. Talha de Cinzas de Fundo | | |
| 12. Poço de Armazenamento Auxiliar (Bunker Auxiliar) | | |
| 13. Ar de Combustão Primário | | |

Recuperação energética

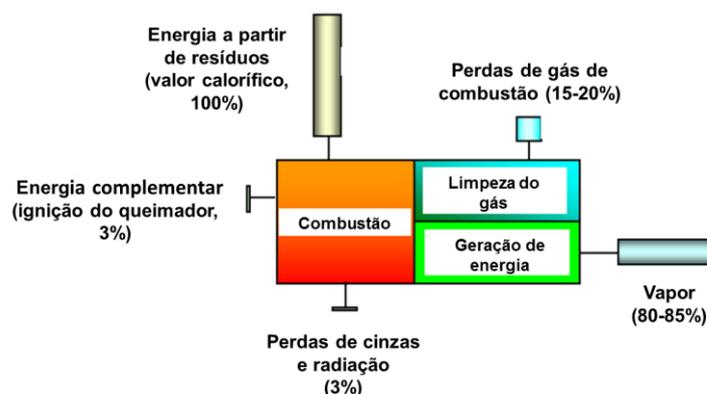
A recuperação de energia representa uma parte muito importante em plantas modernas de incineração de resíduos. Esta grandeza pode ser caracterizada pelos fatores listados na Tabela 14:

Tabela 14. Valores da recuperação energética em plantas de incineração de resíduos.

Poder calorífico de RSU	7,5 a 9,5 MJ/kg
Geração de vapor por tonelada de resíduos	1,9 a 2,4 t
Geração de energia elétrica por tonelada	até 680 kWh
Demanda de energia da planta por tonelada	até 200 kWh

Fonte: Wendenburg (2008).

Existem vários conceitos para o uso da energia recuperada, que podem ser introduzidos e adaptados segundo as necessidades e demandas. A forma mais fácil é a recuperação simples da energia através de um trocador de calor. Através da introdução de uma usina de geração combinada com turbina de contrapressão ou turbina de condensação-extração ou turbina de condensação, é possível recuperar a energia em forma de calor e eletricidade. O balanço energético do processo de incineração é apresentado na Figura 15.



Fonte: Münnich (2017).

Figura 15. Balanço energético no processo de incineração e geração de energia.

O tratamento térmico de RSU gera em suas diferentes etapas os seguintes rejeitos e subprodutos: lixiviados, cinzas da caldeira (*bottom ash, slag e fly ash*), metais ferrosos e não ferrosos, resíduos após a limpeza de gases de combustão, e emissões gasosas (ABRELPE, 2012). De acordo com a legislação e as normas de cada país, as emissões e os rejeitos provenientes do processo de incineração precisam ser coletados e tratados da forma adequada.

De acordo com a legislação e as normas de cada país, as emissões e os rejeitos provenientes do processo de incineração precisam ser coletados e tratados da forma adequada.

O processo de incineração também gera resíduos na forma de cinzas, para as quais existem diferentes conceitos de tratamento e utilização. Um passo importante é a recuperação de metais ferrosos e não ferrosos, bem como metais pesados e preciosos. Além

disso, há tecnologias para a recuperação de elementos nutrientes, como cálcio, potássio e fósforo. Após o tratamento de limpeza, grande parte das cinzas (na Alemanha, aproximadamente 45%-50%) é utilizada como material na construção de estradas e aterros ou em outras obras. Em países industrializados, são aterrados em média menos de 10% das cinzas geradas na incineração (Fehrenbach et al., 2006). De acordo com a Confederação de Plantas Europeias Waste-to-Energy, uma tonelada de cinzas residuais contém aproximadamente 10% a 12% de metais. Uma tonelada de metais reciclados economiza até 2 toneladas de emissões de CO₂eq. Além disso, os minerais recuperados podem ser reaproveitados como matéria-prima secundária na construção (CEWEP, 2018).

A fim de assegurar o cumprimento dos limites de emissão de poluentes, é obrigatória a aplicação de um tratamento do ar de combustão. Uma comparação de valores-limites do Conama para os principais poluentes no ar com valores da Europa, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e do estado de São Paulo demonstra que os limites do SMA e da Europa são os mais rigorosos (Tabela 15).

Tabela 15. Poluentes e requisitos para usinas e o ar purificado.

Poluente/Parâmetro	Unidade	EPA	EU	SMA	Conama
Material particulado (MP)	mg/Nm ³	20	10	10	70
Monóxido de carbono (CO)	mg/Nm ³	130	50	50	125
Cloreto de hidrogênio (HCl)	mg/Nm ³	20	10	10	80
Fluoreto de hidrogênio (HF)	mg/Nm ³	--	1	1	5
Óxido de enxofre (SO _x)	mg/Nm ³	90	50	50	280
Óxido de nitrogênio (NO _x)	mg/Nm ³	210	200	200	560
Mercúrio (Hg)	mg/Nm ³	0,05	0,05	0,05	--
Cádmio + titânio (Cd + Ti)	mg/Nm ³	0,01	0,05	0,05	--
Dioxinas e furanos	ng/Nm ³	0,26	0,1	0,1	0,5

Fonte: EPA 40 CFR Part 40; EU 2007/07/CE; SMA 079/2009; Conama 316/2002.

2.4. Aspectos de Custos

Em estudos elaborados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram consideradas duas hipóteses para a análise de investimentos necessários à implementação de um tratamento térmico de resíduos sólidos no Brasil (BNDES, 2014; ABRELPE, 2015). Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Capacidades e custos para plantas de incineração, ABRELPE (2015) e BNDES (2014).

	650 t/dia	1.300 t/dia
Capacidade máxima	60 MW potência térmica	120 MW potência térmica
	15 MW potência elétrico	30 MW potência elétrico

Custos totais de investimento por planta	R\$ 280.000.000,00	R\$ 480.000.000,00
Custos totais de operação e manutenção	R\$ 23.000.000,00 /ano	R\$ 40.330.000,00 /ano

Os 76,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos gerados em 2013 no Brasil podem ser divididos, segundo a caracterização nacional, em aproximadamente 24 milhões de toneladas de resíduos secos, 39 milhões de toneladas de resíduos úmidos e 13 milhões de toneladas de outros tipos de materiais. Os cenários elaborados referem-se às metas intermediárias brasileiras propostas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). Isto significa que haveria um acréscimo nos investimentos necessários (Capex) de R\$ 235 milhões até 2023 para as usinas de tratamento térmico (ABRELPE, 2015). Os investimentos necessários para a implantação, operação e manutenção diferenciada por tipo de tratamento de resíduos sólidos estão especificados na Tabela 17.

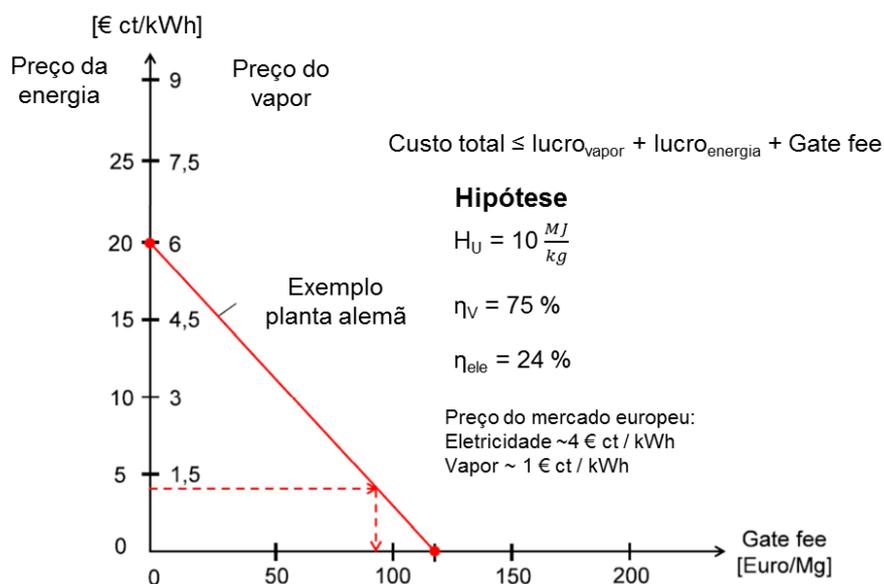
Tabela 17. Distribuição de investimentos até 2023 e 2031 (em R\$ bilhões).

2023											
Sistema de triagem		Compostagem		Aterros sanitários		Biogás		Tratamento térmico		Total	
Capex	*Opex	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE
0,66	8,22	0,17	2,49	2,11	0,71	4,48	0,76	0,24	0,02	7,66	12,2
2031											
Sistema de triagem		Compostagem		Aterros sanitários		Biogás		Tratamento térmico		Total	
Capex	*Opex	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE	CAP	*OPE
0,15	10,65	0,07	3,47	-	0,71	2,58	0,63	1,17	0,12	3,97	15,59

*OPEX por ano. Fonte: ABRELPE (2018).

A distribuição exemplar do preço de uma planta WtE na Europa é apresentada na Figura 16. Certamente, é necessário elaborar um banco de dados confiável representando a realidade brasileira (CNIM, 2012).

Em geral, uma planta economicamente viável deve apresentar um custo total inferior aos lucros da venda de energia e vapor, e o *gate fee*. Na Europa, por exemplo, é considerado um período de *pay-back* para projetos de WtE de 20 a 25 anos (CNIM, 2012). Segundo estimativas da empresa Keppel Seghers (2018), os custos de Capex para uma planta WtE com capacidade de tratamento de 1.000 toneladas por dia de resíduos mistos no Brasil são de 150 milhões de dólares ou aproximadamente R\$ 600 milhões. Os custos de operação são estimados entre 30 e 40 dólares por tonelada.



Fonte: CNIM (2012).

Figura 16. Distribuição exemplar de custos de uma planta de incineração na Europa.

3. Tecnologias Alternativas

3.1. Introdução

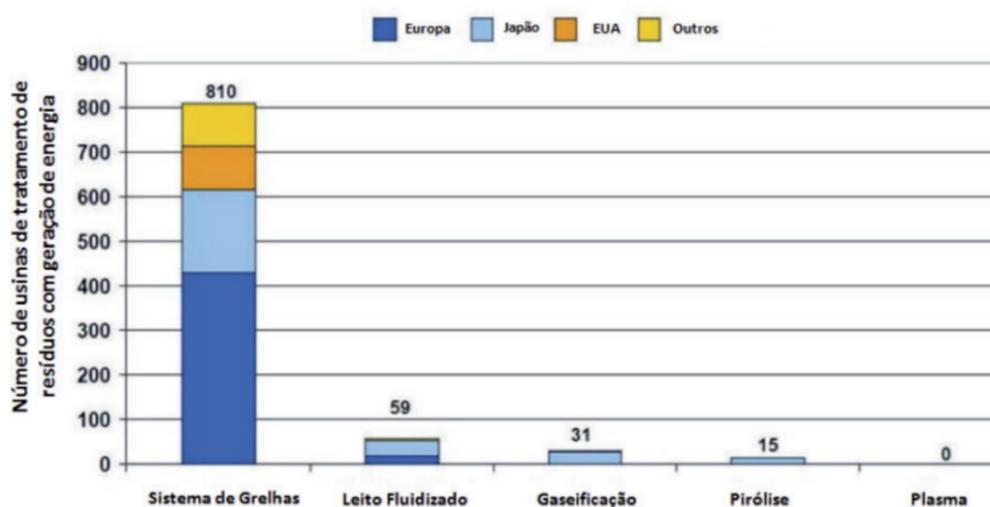
Nos últimos anos surgiu uma variedade de tecnologias alternativas, as quais visam ao uso de altas temperaturas para a recuperação ou neutralização de substâncias perigosas. O objetivo inclui a redução de massa e volume dos resíduos e a geração de energia ou outro subproduto. As principais tecnologias alternativas para tratamentos térmicos e termoquímicos de resíduos sólidos urbanos são pirólise, gaseificação, plasma e carbonização hidrotermal (HTC). Todos os processos operam com temperaturas altas, mas diferem na aplicação de oxigênio e, dessa forma, na estruturação das atmosferas e temperaturas de gás. Em geral, os processos dessas tecnologias são caracterizados por sistemas relativamente complexos. O objetivo da pirólise é a obtenção de uma variedade de gases, líquidos e produtos sólidos (Lopes, 2014).

No processo da gaseificação de resíduos, é necessário adicionar um fumigador com elementos como oxigênio, vapor ou CO₂. Além disso, a gaseificação serve para a produção máxima de gases para posterior uso como combustível na geração de calor e energia elétrica. Os tratamentos de plasma foram desenvolvidos inicialmente para fins militares, bem como para as viagens espaciais, tendo sido aplicados em metalurgia e, desde meados da década de 1970, no tratamento de resíduos. O gráfico na Figura 17 e a Tabela 18 apresentam o cenário mundial das tecnologias térmicas aplicadas para o tratamento de RSU.

Tabela 18. Desenvolvimento de plantas de tratamento de RSU 1984-2007.

Número de Plantas	1984	1990	1993	1996	2007
Incineração	46	48	56	51	72
Pirólise	1	1	1	1	1
Atterramento	372	295	560	426	124

Fonte: Wiemer (2015).



Fonte: ABRELPE (2012).

Figura 17. Cenário mundial das tecnologias térmicas de tratamento de RSU.

3.2. Princípios fundamentais

Um pré-tratamento, como a trituração, homogeneização e secagem da massa a ser introduzida, é obrigatório para todos os processos apresentados. Também são necessários sistemas de controle ambiental para os gases decorrentes do processo de combustão (ABRELPE, 2012). Principalmente, os processos diferem em temperatura, pressão e atmosfera, o que pode ser visto em comparação com o processo de incineração na Tabela 19.

Tabela 19. Características dos processos de tratamento térmico.

Parâmetro	Pirólise	Gaseificação	HTC	KDV	Incineração
Temperatura (°C)	150 - 800	800 - 1.600	170 -250	máx. 500	850 - 1.300
Pressão (bar)	1	1 - 45	10 - 40	1	1
Atmosfera	Inerte/N ₂	O ₂ , H ₂ O, Ar		Inerte/N ₂	Ar, O ₂
Estequiometria	0	<1		0	>1 Ar, O ₂

Fonte: Wiemer (2015)

3.3. Descrição técnica

Pirólise

Após a secagem do material de entrada, a pirólise, ou carbonização, sempre representa o primeiro passo em todos os tratamentos térmicos entre 250°C e 800 °C, seguido por processos da gaseificação e incineração.

Na pirólise, o tratamento térmico ocorre sob total exclusão de oxigênio. Os componentes dos RSU são decompostos em hidrocarbonetos na forma gasosa e cinzas. A fração gasosa pode ser destilada para obter diferentes hidrocarbonetos ou queimados em caldeiras ou geradores para gerar energia elétrica. Além disso, os gases podem ser oxidados parcialmente para obter o gás de síntese, como ocorre na gaseificação (ABRELPE, 2012). O ajuste do nível de temperatura é dividido em pirólise de baixa temperatura (< 500°C), média temperatura (500-800°C) e alta temperatura (> 800°C). (Thomé, 1979). Relevantes para o tratamento térmico de resíduos são os processos de pirólises médias e lentas que ocorrem a partir de uma faixa de temperatura média e alta.

Os produtos oriundos nestas condições são principalmente os gasosos, formados com tempos de permanência suficientemente longos para gerar as reações de recuperação do gás por aromatização e polimerização a partir dos produtos de reação líquidos ou sólidos. O gás é composto principalmente de CO₂, CO, hidrogênio, metano, etano e eteno. A composição dos resíduos tem influência significativa sobre os produtos. Então, por exemplo, o domínio de certos tipos de plástico na pirólise pode levar a composições de gases significativamente diferentes (Gonçalves, 2007).

De acordo com a proporção de oxigênio fornecido, são também formadas água de reação e compostos orgânicos contendo oxigênio, tais como metanol, acetaldeído, acetona, ácido fórmico ou ácido acético. Com o aumento da temperatura, as proporções de hidrogênio e monóxido de carbono no gás aumentam, enquanto diminui a concentração em dióxido de carbono, metano e alcanos superiores. Também a proporção de massa dos produtos condensáveis diminui com a temperatura (Vieira et al., 2011).

Após a pirólise, permanece um coque, que consiste principalmente de carbono, e rejeitos compostos de frações inertes. O valor calorífico dos gases de pirólise varia, dependendo da natureza da carga de alimentação, ao longo de um largo intervalo. Incluindo os componentes condensáveis ou vapores de pirólise, podem ser alcançados valores

caloríficos muito elevados, de 12.500 kJ/m³N a 46.000 kJ/m³N. Os gases remanescentes condensáveis atingem valores calóricos entre 12.000 kJ/m³N e 16.000 kJ/m³N (Vieira et al., 2011). A desvantagem é, geralmente, o alto esforço energético e operacional. A operação de tais processos sob regime europeu ou alemão, e também nas condições brasileiras, não é economicamente viável devido aos altos custos (Gleis, 2011).

Para o processo de pirólise em reator de leito fluidizado, existem duas formas: borbulhante ou circulante. Devido ao contato homogêneo do fluido com a biomassa, o reator borbulhante alcança taxas de aquecimento mais altas. Isto resulta em uma atmosfera ideal para a produção do assim chamado bio-óleo (Silveira, 2015). O leito fluidizado circulante funciona no mesmo processo, porém, a velocidade do gás de arraste é maior que no leito borbulhante. Os sólidos inertes em conjunto com partículas de carvão são capturados por um ciclone e transportados para uma câmara para combustão do carvão, transferindo calor para as partículas inertes, que retornam ao reator aquecidas e se misturam ao gás de fluidização (Silveira, 2015). O reator de leito fixo é utilizado principalmente para a produção de carvão, já que a taxa de aquecimento do resíduo é lenta e o tempo de permanência do produto na zona de pirólise é alto (BASU, 2010).

Ainda existem poucos estudos e análises extensas e confiáveis para a determinação da poluição e os impactos ambientais do sistema de pirólise. Uma análise de produtos da pirólise de RSU executada por Miscolczi et al. (2013) identificou que a fração gasosa do processo continha enxofre, cloro e bromo, enquanto a fração líquida apresentava ainda mais poluentes, como potássio, enxofre, fósforo, cloro, cálcio, zinco, ferro, cromo, bromo e antimônio. Outros estudos recentes identificaram altas taxas de ácido clorídrico (HCl) devido ao conteúdo de PVC na massa tratada. Os resultados do estudo de Bernardo et al. (2010) demonstraram uma concentração relativamente alta de metais pesados na fração sólida, como cádmio, chumbo, zinco, cobre, mercúrio e arsênio, além de componentes orgânicos não voláteis, como hidrocarbonetos pesados e derivados, fazendo o carvão ser classificado como resíduo perigoso e tóxico (Silveira, 2015).

Gaseificação

O objetivo do processo de gaseificação é a conversão de um sólido e de substâncias líquidas ou pastosas em um possível gás combustível ou de síntese, que tem elevada aplicabilidade a partir do estado físico das frações geradas. Para este fim, o sólido entra em contato com um reativo de gaseificação. Como agente de gaseificação, é introduzido o oxigênio (com a utilização de hidrogênio e também vapor de água) no processo (Lopes, 2014).

Na gaseificação, o carbono e o hidrogênio presentes nos RSU reagem parcialmente com o oxigênio (combustão), gerando o gás de síntese (gás hidrogênio e monóxido de carbono, conhecido como syngas), dióxido de carbono e cinzas. São empregados equipamentos chamados de gaseificadores, que possuem diversas configurações. Os tipos comerciais mais comuns de gaseificadores são de leito fixo, leito fluidizado e plasma. O syngas pode ser queimado em geradores especiais para geração de energia elétrica ou utilizados como intermediários para reações que geram produtos químicos (ABRELPE, 2012).

Ademais, a gaseificação pode ser direta ou indireta. A gaseificação direta, ou autotérmica, ocorre em um único reator, assim como a oxidação exotérmica do carbono.

Geralmente, nesses processos é introduzido ar ou oxigênio como agente oxidante. Neste caso, o calor necessário é produzido internamente no reator a partir das reações de oxidação (Vitasari et al., 2011). Ao contrário, a gaseificação indireta, ou alotérmica, precisa de uma l de energia externa. O agente mais utilizado é vapor d'água, por sua facilidade de produção e pelo aumento significativo da quantidade de hidrogênio no gás combustível produzido.

A composição do produto da gaseificação depende da temperatura e da pressão. Com o aumento da temperatura, há maior formação e CO e de hidrogênio, diminuindo simultaneamente o conteúdo em metano do produto gasoso. O aumento da pressão favorece a formação de metano e dióxido de carbono (Morrin, 2011). O poder calorífico dos gases gerados é inferior aos gases de pirólise e fortemente determinado pelo agente de gaseificação usado. Na vaporização alotérmica, o poder calorífico de gaseificação alcança 12.000 kJ/m³ (Morrin, 2011). Quando se utiliza o oxigênio como agente de gaseificação, os valores caloríficos situam-se entre 10.000 kJ/m³N e 18.000 kJ/m³N. Os menores valores caloríficos, na ordem de 5.000 kJ/m³, são observados na gaseificação autotérmica de ar, já que o alto teor de nitrogênio inerte até 60% dilui o gás.

A classificação dos gaseificadores podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores (Moura, 2012):

- poder calorífico do gás produzido (baixo: até 5 MJ/Nm³; médio: de 5 a 10 MJ/Nm³; alto: 10 a 40 MJ/Nm³);
- tipo de agente gaseificador (ar, vapor, oxigênio ou hidrogênio na hidrogaseificação);
- direção do movimento do material a ser gaseificado e do agente de gaseificação (contracorrente, concorrente, fluxo cruzado ou leito fluidizado);
- pressão de operação (pressão atmosférica ou pressurizado – até 6 MP);
- tipo de material de alimentação (resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa/madeira etc.).

Os reatores mais conhecidos são o de leito fluidizado e o de leito fixo. No reator de leito fixo, o movimento do combustível acontece apenas por ação da gravidade. Aproximadamente 77,5% dos projetos de gaseificadores em operação ou construção no mundo são reatores de leito fixo. Os gaseificadores de leito fixo podem ser subdivididos em gaseificadores concorrentes, contracorrentes e de fluxo cruzado (Henriques, 2009; Lopes, 2014).

Plasma

Os procedimentos para o tratamento térmico dos resíduos regulam a temperatura geralmente pela oxidação parcial do combustível (direta) ou a partir de um reator da parede e/ou da distribuição de calor médio (indireta). A produção de plasma representa outra possibilidade de fornecimento de calor direto. Para isso, a alta quantidade de energia é fornecida a um gás de trabalho (oxidante ou inerte), pelo qual esta se ioniza. A energia pode ser fornecida tanto térmica como por meio de uma corrente elétrica e/ou de um campo eletromagnético. O nível de energia presente no plasma é denominado de quarto estado de agregação (Helsen, 2010).

O plasma é produzido em um queimador de plasma, em decorrência de uma tensão elétrica formada pelo arco elétrico entre dois eletrodos. O queimador de plasma pode ser

executado em duas variantes, como um arco de luz transferido e não transferido. Os tratamentos térmicos dos resíduos geram os plasmas em temperaturas entre 1.700 °C e 20.000 °C. Como vantagem do plasma, temos um controle relativamente simples da temperatura durante o processo através da regulagem do rendimento elétrico. No caso da gaseificação do plasma, este controle ocorre pela liberação de calor dos possíveis agentes oxidantes. Os processos de plasma são caracterizados por um grande calor de transição para o material que pode ser tratado, por alta taxa de aquecimento na fase de arranque e por pequenas demandas de áreas construídas. O tratamento com plasma resulta na decomposição de composto com elevada massa molecular (alcatrões etc.), que se desenvolvem nos processos alternativos térmicos. Devido às altas temperaturas de processo, dependendo da realização do procedimento, é possível a fusão até mesmo daqueles resíduos resistentes à temperatura de fusão (Helsen, 2010).

Os processos têm altos custos de investimento, operação e manutenção. A técnica é relativamente frágil. Os eletrodos têm vida curta, e os componentes eletrônicos para a geração de plasma são sensíveis. Atualmente, nenhum método de plasma pode atestar a maturidade da tecnologia em operação industrial de longa duração. De qualquer forma, o emprego da tecnologia de plasma para plantas de tratamento de resíduos em larga escala é improvável devido à elevada demanda por energia, à susceptibilidade do processo e ao elevado custo deste método (Quicker et al., 2014).

Carbonização hidrotermal - HTC

Métodos de carbonização hidrotermal (HTC) são adequados apenas para os resíduos orgânicos, como lodo de esgoto ou resíduos biológicos. Através da carbonização hidrotérmica os materiais biogênicos, tais como resíduos de jardins, orgânicos de cozinha ou lodo de esgoto, são transformados em carbono e materiais carbonizados de alto poder calorífico (Char). O tratamento da biomassa acontece em uma fase líquida, com períodos de retenção de 2 a 16 horas, em temperaturas entre 170 °C e 250 °C e uma pressão suficientemente elevada (10 bar-40 bar) a fim de manter o estado líquido.

Além do subproduto carbonizado, são produzidos gases permanentes (5%-10%) e águas residuais (5%-15%). O ar de exaustão, dependendo da matéria-prima, geralmente contém quantidades significativas de sulfeto de hidrogênio. Também estão presentes monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos voláteis, tornando-se essencial purificar os gases exauridos através de filtros de carvão ativado (Serfass, 2014).

Atualmente, nenhum processo HTC encontra-se em operação industrial de longo prazo. Há uma gama de plantas-piloto semi-industriais, mas estas são usadas apenas em modo de campanha para examinar, por exemplo, substratos especiais para potenciais clientes ou para o desenvolvimento da tecnologia. A cadeia completa de processo para o tratamento de todos os fluxos secundários (águas residuais, ar de exaustão) não costuma ser implementada (Quicker et al., 2014).

3.4. Aspectos de Custos

Em geral, as tecnologias alternativas de tratamento térmico são caracterizadas como complexas e de alta automação, portanto, demonstram custos de operação e principalmente manutenção mais elevados que os de outras formas de tratamento. É importante destacar que a maioria das tecnologias apresentadas ainda não existe em operação ou em operação em grande escala. Os projetos dessas tecnologias dependem de vários fatores, o que torna cada planta original. Isto dificulta a definição de custos médios e até impossibilita uma comparação de custos de investimento e operação entre as tecnologias. Algumas experiências e dados de estudo de casos de plantas existentes são:

- Pirólise - Método Destrugás – MPA Burgau (Rymssa, 1977; Meier, 2014)
 - Projeto para a pirólise de RSU, RSC, volumosos, pneus, óleos e lodos em um reator com aquecimento indireto.
 - Uma tonelada de resíduos gera aproximadamente 660 kg de coque com um conteúdo de água de 47% e 330 kg de gás de pirólise.
 - Geração de energia elétrica de aproximadamente 2,2 MW.
 - Custo de operação: 200 euros por tonelada de resíduo tratado, mais 100 euros/Mg para aterramento dos rejeitos.
- Gaseificação - Método Energos – MPA Burgau (Rymssa 1977; Meier, 2014)
 - Processo de combustão gradual, com gaseificação de resíduos rejeitos em uma câmara com grelha com câmara superior de oxidação para a retirada e queima do gás de síntese.
 - Tratamento de 5 Mg/h a 6 Mg/h de material com valor calorífico entre 10 MJ/kg e 14 MJ/kg.
 - O ar é usado como agente e o processo ocorre em temperaturas de 900 °C a 1100 °C.
 - Atualmente, existem 5 plantas na Noruega, com capacidade de 264.000 Mg/a, e 6 plantas na Inglaterra, com capacidade de 636.000 Mg/a.
 - Custos de tratamento por tonelada de combustível alternativo entre 60 euros e 70 euros.

Em geral, dependendo do projeto de gaseificação, o mercado europeu confirmou os custos mínimos de investimento entre 12 milhões de euros e 160 milhões de euros.

- Plasma – Alter NRG (Wood, 2013)
 - Tratamento de RSU (62%), pneus (3,5%) e adição de coque, ar, calcário, vapor e gás de plasma.
 - Temperaturas dentro do jato de plasma entre 5.000 °C e 7.000 °C. As temperaturas médias de reação são 2.000 °C.
 - *Output*: Syngas (82,1%), metais (5,5%) e escória (12,4%).

- Falta de disponibilidade de custos. Segundo estimativas, os custos de operação são de 123 dólares/Mg.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Cement Technology Roadmap – Brazil – Alternative Fuels for Cement Sector in Brazil – 2016*. São Paulo, 2016.

_____. *Recuperação energética de resíduos sólidos na indústria de cimento*. São Paulo, 2016.

_____. *Panorama do coprocessamento Brasil 2016 2017*. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Caderno informativo: recuperação energética*. 2012. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/informativo_recuperacao_energetica.pdf. Acesso em: out. 2018.

_____. *Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil*. 2015. Disponível em <http://abrelpe.org.br/estimativa-dos-custos-para-viabilizar-a-universalizacao-da-destinacao-adequada-de-residuos-solidos-no-brasil/>. Acesso em: out. 2018.

_____. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017*. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.004: Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA (ABLP). *Guia de orientação para adequação dos municípios à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)*. 2011. Disponível em: http://www.ablp.org.br/pdf/Guia_PNRS_11_alterado.pdf. Acesso em: out. 2018.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Jaboaão dos Guararapes, PE: Grupo de resíduos sólidos – UFPE, 2014.

BASU, Prabir. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Burlington: Elsevier, 2010.

BERNARDO, M. et al. Toxicity of char residues produced in the co-pyrolysis of different wastes. *Waste Management*, v. 30, n. 4, p. 628-635, 2010.

BLASI, C. D. Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chemical Engineering Science*, v. 55, n. 15, p. 2931-2944, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000925099900562X>. Acesso em: out. 2018.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305, de 2 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. *Diário Oficial da União*, 3 ago. 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: out. 2018.

CALDERONI, Sabetai. *Os bilhões perdidos no lixo*. 3. ed. Humanitas, 1999.

CHEN, D. et al. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste Management*, 2014.

CHHITI, Y.; KEMIHA, M. Thermal conversion of biomass, pyrolysis and gasification - a review. *The International Journal of Engineering and Science*, v. 2, n. 3, p. 75-85, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Norma Técnica P4.263*.

2003. Disponível em

http://camarasambientais.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/49/2013/12/P4_263.pdf. Acesso em: 25 ago. 2018.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS (CEWEP). *Waste-to-energy plants in Europe*. 2015. <<http://www.cewep.eu/2017/09/07/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2015/>>. Acesso em: out. 2018.

_____. *Interactive map of waste-to-energy plants*. 2018.

<<http://www.cewep.eu/2018/03/27/interactive-map-of-waste-to-energy-plants/>>. Acesso em: out. 2018.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL DE MINAS GERAIS (COPAM). *Deliberação Normativa 154/2010*. Disponível em:

<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=14613>. Acesso em: 28 ago. 2018.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ (CEMA). *Resolução 076, de 30 de novembro de 2009*. Disponível em:

<http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=146365&codItemAto=891638>. Acesso em: 25 ago. 2018.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO SUL (CONSEMA).

Resolução 02/2000. Disponível em: <http://ww.fepam.rs.gov.br/consema/Res02-00.pdf>.

Acesso em: 28 ago. 2018.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução 264/1999*. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=262>. Acesso em: 29 ago. 2018.

_____. *Resolução 316/2002*. Disponível em

<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>. Acesso em: 29 ago. 2018.

_____. *Resolução 375/2006*. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2018.

_____. *Resolução 416/2009*. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>. Acesso em: 29 ago. 2018.

EUROSTAT. *Waste Management and Energy Recovery*. 2016. Disponível em:

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Acesso em: out. 2018.

- FONSECA, A. D. D. *Biomass-to-liquids: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch*. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- FRICKE, K.; PEREIRA, C. *Apresentação técnica para módulo gestão de resíduos aplicado no curso de mestrado Engenharia Urbana e Ambiental na PUC-Rio*. Universidade Técnica de Braunschweig, 2018a.
- _____. *Apresentação técnica para módulo tecnologias ambientais aplicada no curso de mestrado Engenharia Urbana e Ambiental na PUC-Rio*. Universidade Técnica de Braunschweig, 2018b.
- FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M. (Coords.). *Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.
- GLEIS, Markus. *Pyrolyse und Vergasung*. 2011. Disponível em http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2011_eaa/2011_EaA_435_466_Gleis.pdf. Acesso em: out. 2018.
- GONÇALVES, C. K.: *Pirólise e combustão de resíduos plásticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- HELSEN, L., BOSMANS, A. *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process*. 1st International Symposium on Enhanced Landfill Mining. Houthalen-Helchteren, 2010.
- HENRIQUES, R. M. *Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação*. Tese (Doutorado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- HERNÁNDEZ, J. J.; BALLESTEROS, R.; ARANDA, G. *Characterisation of tars from biomass gasification: effect of the operating conditions*. 2013. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212009127>. Acesso em: out. 2018.
- IGELBÜSCHER, A. *Einsatz der Wirbelschichttechnik in der Abfallwirtschaft – Praktische Grundlagen*. Anwendungsbeispiele, 2011.
- LOPES, E. J. *Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 2014.
- LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: _____. *Biocombustíveis*. Interciência, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). *Relatórios de Pneumáticos 2017 (Ano-Base 2016)*. 2017.
- MISKOLCZI, N.; ATEŞ, F.; BORSODI, N. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char and pyrolysis oil properties. *Bioresource Technology*, v. 144/0, p. 370-379, 2013.
- MORRIN, S. et al. Two stage fluid bed-plasma gasification process for solid waste valorisation: technical review and preliminary thermodynamic modelling of sulphur

emissions. *Waste Management*, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11003849>. Acesso em: out. 2018.

MÜNNICH, Kai. *Thermal Waste Treatment*. Mestrado Profissional. Technische Universität Braunschweig, PUC-Rio de Janeiro, 2017.

QUICKER, P.; NEUERBURG, F.; NOEL, Y.; HURAS, A. *Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen* – Schlussbericht. 2014.

RYMSA, K.-H. Müllpyrolyse nach dem Destrugas-Verfahren. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. (hrsg.). *Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis – Neue Technologien zur Abfallbeseitigung*. Band 2, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1977, s. 87-111.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. *Plano de resíduos sólidos do estado de São Paulo*. São Paulo, 2014.

_____. *Proteção e conservação dos mananciais de abastecimento da região metropolitana de São Paulo – Alto Tietê – Cabeceiras*. Disponível em: <http://sma.visie.com.br/o-que-fazemos/pnma-ii/>. Acesso em: out. 2018.

_____. Resolução SMA 38, de 31 de maio de 2017. *DOE*, 2 jun. 2017, p. 48-49. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/06/resolucao-sma-038-2017-processo-3840-2017-estabelece-diretrizes-e-condicoes-para-licenciamento-e-operacaoda-atividadede-recuperacaode-energis-cdru.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2018.

_____. *Resolução SMA nº 79, de 4 de novembro de 2009*. Disponível em: http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/resolucao/2009/2009_res_est_sma_79_republicada.pdf. Acesso em: out. 2018.

SCUR, P. *Herstellung eines kostengünstigen Brennstoffs für die Zementherstellung durch die Vergasung von Abfällen in einer ZWS* - CEMEX Deutschland AG, Konferenzbeitrag, 2005.

SERFASS, K. *Emissionsdaten von HTC Anlagen*. Apresentação no encontro de grupo de trabalho para a diretriz VDI 3933. Berlim, 13 fev. 2014.

SILVEIRA, P. D. *Avaliação do potencial da pirólise de resíduos sólidos urbanos como processamento termoquímico para recuperação de matéria e energia*. Tese (Doutorado). Londrina, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5345/1/LD_COEAM_2015_1_18.pdf. Acesso em: out. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). *Dados do setor*: parque produtor de cimento. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>.

_____. *Dados do setor*: localização das fábricas de cimento. Disponível em: <http://snic.org.br/fabricas-localizacoes.php>.

_____. *Dados do setor*: capacidade das fábricas de cimento. Disponível em: <https://cimento.org>.

TABASOVÁ, A. et al. Waste-to-energy technologies: impact on environment. *Energy*, v. 44, n. 1, 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212000199>. Acesso em: out. 2018.

TERRA MELHOR. *Relatório técnico: gestão sustentável de resíduos sólidos*. Ubatuba, 2018.

THOMÉ-KOZMIENSKY, K.; HEIL, J.; LINK, K-L.; SEGEBRECHT, J. *Prozessgestaltung Abfallpyrolyse - Untersuchungen über die Entgasung von Abfällen in einem kontinuierlich betriebenen Schachtreaktor - Umweltforschungsplan des Bundesministerium des Innern, Berlin, 1979*.

VIEIRA, G. E. G. et al. *O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto: uma revisão*. Revista Liberato, n. 12, 2011.

VITASARI, C. R.; JURASCIK, M.; PTASINSKI, K. J. Exergy analysis of biomass-to-synthetic natural gas (SNG) process via indirect gasification of various biomass feedstock. *Energy*, v. 36, n. 6, p. 3825-3837, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210005050>. Acesso em: out. 2018.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *Cement Sustainable Initiative*. Disponível em: <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative>.

_____. *Toward a Sustainable Cement Industry*. 2018. Disponível em: <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Toward-a-Sustainable-Cement-Industry>

WIEMER, K. *Thermal treatment of municipal solid waste: energetic utilization by other technologies like pyrolysis, gasification and plasma*. Apresentação no Foro Internacional de Valorização Energética de Resíduos Urbanos, 8 de outubro, México, 2015.

SITES CONSULTADOS

www.csn.com.br

www.cimentoapodi.com.br

www.cimentosliz.com.br

www.ciplan.com.br

www.cimentonacional.com.br

www.cimentoitambé.com.br

www.cimentotupi.com.br

www.crh.com.br

<http://www.entsorga.it/ITA/index.php>

www.keppelseghers.com/en

www.lafargeholcim.com.br

www.intercement.com.br

www.mizu.com.br

www.nassau.com.br

www.supremocimento.com.br

www.votorantimcimentos.com.br