

COOPERAÇÃO TÉCNICA BRASIL-ALEMANHA

# MANUAL DA CALCULADORA DE EMISSÕES DE GEE PARA RESÍDUOS

*Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases  
de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU  
para o Brasil – Metodologia de Avaliação do  
Ciclo de Vida (ACV)*

AUTOR: Jürgen Giegrich

JULHO DE 2021

COOPERAÇÃO TÉCNICA BRASIL-ALEMANHA

MANUAL DA  
CALCULADORA DE EMISSÕES  
DE GEE PARA RESÍDUOS

*Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases  
de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU  
para o Brasil – Metodologia de Avaliação do  
Ciclo de Vida (ACV)*

AUTOR: Jürgen Giegrich

JULHO DE 2021

## **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

Presidente

**Jair Messias Bolsonaro**

Vice-presidente

**Antonio Hamilton Martins Mourão**

## **MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

Ministro

**Rogério Marinho**

Secretário Executivo

**Cláudio Xavier Seefelder Filho**

Secretário Nacional de Saneamento

**Pedro Maranhão**

# FICHA TÉCNICA

## ORGANIZAÇÃO

**Cooperação para a proteção do clima  
na gestão dos resíduos sólidos urbanos  
- ProteGEEr**

*Diretor Substituto do Departamento  
de Financiamento de Projetos, SNS/MDR*  
**Cássio Felipe Bueno**

*Deutsche Gesellschaft für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*  
**Annelie Albers**

*Autor*  
*ifeu - Institut für Energie- und  
Umweltforschung Heidelberg gGmbH*  
**Jürgen Giegrich**

*Consultoria técnica para adaptação  
ao Brasil*  
**Tathiana Almeida Sereval**

*Revisores*  
**Christiane Dias Pereira**  
**Francisco Javier Contreras Pineda**  
**Guilherme Gonçalves**  
**Jan Janssen**  
**Rebeca Borges de Oliveira**

*Contato*  
*ifeu - Institut für Energie und  
Umweltforschung Heidelberg gGmbH  
(Instituto de Energia e Pesquisa Ambiental)*  
**Jürgen Giegrich, juergen.giegrich@ifeu.de**

## EQUIPE TÉCNICA

*GIZ / ProteGEEr*

**Hélinah Cardoso Moreira**

**Mariana Silva**

**Ana Bárbara Zanella**

*Consórcio GOPAInfra – adelphi /*

*ProteGEEr*

**Guilherme Gonçalves**

*Universidade Técnica de Braunschweig /*

*ProteGEEr*

**Christiane Dias Pereira**

**Cora Buchenberger**

*Secretaria Nacional de Saneamento /*

*Ministério do Desenvolvimento Regional*

**Dogival de Oliveira Costa Junior**

**Ernani Ciríaco de Miranda**

**Karina Araujo Souza**

**Maria Ottília Bertazi Viana**

**Sérgio Luis da Silva Cotrim**

*Projeto Gráfico*

**Estúdio Cajuína**

*Versão de 2009 publicada por*

**KfW Bankengruppe**

**Palmengartenstrasse 5-9**

60325 Frankfurt am Main

Fone +49 (0)69 7431-0

[www.kfw.de](http://www.kfw.de)

*Em cooperação com*

**Deutsche Gesellschaft für Internatio-**

**nale Zusammenarbeit**

**(GIZ) GmbH**

# APRESENTAÇÃO

A limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos são componentes do saneamento básico regulamentados pela Lei 11.445, de 05 de janeiro de 2007, constituído pelas atividades de disponibilização e manutenção de infraestruturas operacionais de coleta, varrição, asseio e conservação urbana, assim como coleta, transporte, transbordo e a destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos por meio de tratamento e a disposição final dos rejeitos. São serviços que, se prestados de forma adequada, contribuem fundamentalmente para a proteção do meio ambiente com forte impacto positivo sobre a saúde e a qualidade de vida da população.

A melhoria da gestão dos resíduos sólidos urbanos deve se constituir como um ciclo virtuoso de atividades que observe, em ordem de prioridade, a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Deve, ainda, contemplar a sustentabilidade técnica, ambiental, social e econômico-financeira, numa visão de economia circular, que se inicia com a extração da matéria-prima e a produção de um bem ou produto, passando por sua distribuição e consumo, até a geração, reutilização e reciclagem dos resíduos, e reintrodução destes na cadeia produtiva, sendo descartados somente os rejeitos.

No Brasil, para alcançar este patamar de gestão, há inúmeras barreiras a enfrentar. A estrutura descentralizada, que tem o município como principal responsável pelo manejo dos resíduos sólidos urbanos, desponta como um dos maiores desafios, pois cerca de 70% dos municípios brasileiros têm menos de 20 mil habitantes, porte que

inviabiliza a sustentabilidade de alguns serviços. Ademais, os municípios de menor porte historicamente enfrentam dificuldades com a insuficiente capacidade técnica, institucional e financeira para uma gestão eficiente da limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos.

Neste contexto, a recente revisão do Marco Legal do Saneamento Básico, aprovada em 15 de julho de 2020, apresenta algumas diretrizes fundamentais que, uma vez implementadas, irão propiciar a melhoria sustentável dos serviços nos municípios brasileiros. A principal delas é a que impulsiona a prestação regionalizada, orientando para o agrupamento de municípios com a participação dos estados, de forma a assegurar a escala ótima, atendendo adequadamente às exigências de higiene e saúde pública, e proporcionando viabilidade econômica e técnica aos municípios, sobretudo aos menos favorecidos.

A Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional, cumprindo sua missão de apoiar os municípios brasileiros, sobretudo com foco no desenvolvimento regional, realiza diversas ações de apoio técnico e financeiro, desde programas de investimentos, como o Saneamento para Todos, até o assessoramento e a capacitação dos gestores municipais, como o que tem sido oferecido pelo Fundo de Apoio à Estruturação e ao desenvolvimento de Projetos de concessão e Parcerias Público-Privadas da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios – FEP CAIXA.

Nessa linha, dentre outros, desenvolve o **Projeto ProteGEEr**, coordenado no Brasil pela Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional em parceria com a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável,

por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Este projeto é parte da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI), apoiada pelo Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha. O Projeto atua, dentre outras formas, no apoio técnico aos municípios brasileiros de forma a propiciar a melhoria da gestão dos resíduos sólidos urbanos, promovendo a economia circular e o combate às mudanças climáticas.

Como parte de suas atividades, o **ProteGEEr** desenvolveu um conjunto de ferramentas de apoio à gestão municipal com potencial de auxiliar os gestores na tomada de decisão em temas prioritários referentes à gestão de resíduos sólidos urbanos. São nove ferramentas que se constituem de guias, roteiros e planilhas de cálculo, contemplando temas estratégicos, como encerramento de lixões, coleta seletiva, formação de consórcio público, cobrança pelos serviços, emissões de gases de efeito estufa, rotas tecnológicas e custos de investimentos e operação.

As ferramentas, testadas e validadas em vários municípios-piloto, são agora apresentadas e disponibilizadas aos técnicos e gestores para aplicação prática nos municípios interessados. A Secretaria espera que o uso de forma adequada possa efetivamente contribuir para a melhoria da gestão dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos em todo o país.

Boa leitura e bom uso das ferramentas!

**Pedro Maranhão**  
**Secretaria Nacional de Saneamento**  
**do Ministério do Desenvolvimento Regional**



# SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>CONTEXTO E OBJETIVO DA CALCULADORA</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>A ABORDAGEM BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>VISÃO GERAL DA CALCULADORA</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>ABA “INÍCIO”</b>	<b>26</b>
	4.1 Quantidade total de resíduos	26
	4.2 Composição dos resíduos	28
	4.3 Composição do RSU recomendada na ausência de informação gravimétrica	31
	4.4 Características dos resíduos – teor de água	35
	4.5 Cálculo de parâmetros de resíduos – resultado intermediário	36
	4.6 Fator de emissão de GEE para geração de eletricidade específico do país	40
<b>5</b>	<b>ABA “RECICLAGEM”</b>	<b>42</b>
	5.1 Materiais secos	42
	5.2 Compostagem e/ou biodigestão de resíduos orgânicos	46
	5.3 Resultados intermediários – Parâmetros dos resíduos após reciclagem	48
	5.4 Reciclagem – Processos de tratamento e fatores de emissão de GEE	48

<b>6</b>	<b>ABA “DESTINAÇÃO”</b>	<b>49</b>
	6.1 Considerações gerais sobre opções de tratamento e disposição final	49
	6.2 Opções para a disposição final no solo (aterramento)	51
	6.3 Opções de tratamento	55
	6.4 Incineração de resíduos	59
	<b>RECOMENDAÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>ABA “RESULTADOS”</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	8.1 Resultados para cada cenário	69
	8.2 Resultados finais - todos os cenários	72
	<b>ABA “CÁLCULO”</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO: ORIGEM DOS DADOS E PREMISSAS</b>	<b>82</b>
	<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>128</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>130</b>
	<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>132</b>

FERRAMENTA DE  
CÁLCULO DE EMISSÕES  
DE GASES DE EFEITO  
ESTUFA (GEE) NO MANEJO  
DE RSU PARA O BRASIL

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO  
DO CICLO DE VIDA (ACV)

# INTRODUÇÃO

A Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil (a seguir referida como “Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos” ou simplesmente “Calculadora”) deve apoiar a tomada de decisões de gestão de resíduos sólidos com base na influência desses resíduos nas emissões de GEE. Ela é desenhada para uso no Brasil a nível de municípios, estados e consórcios, bem como do governo federal. Este Manual é um instrumento básico para ajudar a utilizar a Calculadora e fornecer informações de apoio.

Após algumas considerações metodológicas importantes, este Manual segue a ordem das planilhas estabelecidas na Calculadora. Assim, o usuário pode navegar pelos capítulos e aprender a preencher as informações ou os parâmetros necessários para estabelecer cenários de gestão de resíduos.

É fornecida uma ajuda especial através de um capítulo sobre como criar cenários e, subsequentemente, como interpretar os resultados desses cenários. Brincar com cenários é fundamental para se familiarizar com as consequências das decisões de gestão de resíduos para a redução dos GEE. Informações de apoio sobre a origem dos dados, por exemplo, fatores de emissão e pressupostos da calculadora podem ser encontradas no anexo.

A Calculadora baseia-se na ferramenta originalmente desenvolvida em 2009 pelo ifeu-Institut, com apoio do KfW Development Bank (Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Financeiro), em cooperação com a GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) e financiamento a partir de fundos do Ministério para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento da Alemanha. Essa ferramenta original foi adaptada pelo ifeu-Institut para uso no Brasil, comissionado pelo projeto ProteGEEr e patrocinado com fundos da Iniciativa Internacional do Clima (IKI), do Ministério do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha.

# CONTEXTO E OBJETIVO DA CALCULADORA

A mudança climática é considerada um dos maiores desafios globais do século XXI. Existe um consenso entre a grande maioria dos especialistas em clima de que o efeito do aquecimento global é o resultado do aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera da Terra. Desde o início da industrialização, as atividades humanas intensificaram o efeito estufa natural através do aumento das emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e muitos outros compostos químicos.

A queima prolongada de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural é o principal contribuinte para o efeito estufa, porque o carbono armazenado é liberado para a atmosfera. Esses combustíveis fósseis são utilizados para fornecer energia para geração de eletricidade, aquecimento e resfriamento, transporte e produção industrial. O desmatamento de florestas primárias é outro fator para a redução do armazenamento de carbono em nosso planeta. Mas, além dos fluxos de dióxido de carbono, as emissões dos GEE de metano e óxido nitroso aumentaram durante o último século. Isso se deve à intensificação da agricultura e da pecuária, mas também à disposição de resíduos orgânicos em aterros.

Naturalmente, o foco da mitigação do efeito estufa está na redução das emissões de CO<sub>2</sub> da conversão de energia e desempenha um papel importante na elaboração de relatórios no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Ainda assim, a gestão de resíduos também foi identificada como um setor autônomo para relatórios de GEE e está principalmente relacionada aos aterros sanitários e lixões de resíduos. As emissões de metano de aterros sanitários são um produto da degradação anaeróbia de material orgânico e contribuem para a concentração crescente desse GEE na atmosfera.

De acordo com a sistemática do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considera-se que a gestão de resíduos contribui com apenas cerca de 5% para o efeito estufa global em média entre os países. Isso parece pequeno em comparação com outros setores, mas é preciso levar em conta que um número limitado de atividades é abarcado pelo setor “gestão de resíduos” como definido pelo IPCC. Aterro e lixão, compostagem e incineração de resíduos sem recuperação de energia são contabilizados nesse setor. Mas todas as atividades como reciclagem e qualquer tipo de recuperação de energia dos resíduos estão relacionadas com os setores de “produção industrial” e “geração de energia”. Portanto, os inventários nacionais, que seguem a mesma sistemática do IPCC, refletem apenas parcialmente a contribuição das atividades de gestão de resíduos para a mitigação dos GEE.



### *Exemplo: “Reciclagem” nos inventários nacionais de GEE*

Os efeitos da reciclagem de material ou energia não são creditados ao setor de “resíduos” nos inventários de GEE, mas nos setores “energia” ou “processos industriais” por razões metodológicas. Por exemplo, a reciclagem de sucata está incluída no setor industrial em “produção de metais – produção de ferro e aço”, utilizando um fator de emissão para a produção de aço em um forno elétrico a arco onde a maior parte da sucata é aplicada. As emissões resultantes são menores do que as de outros métodos de produção de aço onde o material primário é utilizado. Além disso, porque a sucata é utilizada para a produção de aço, menos ferro-gusa produzido a partir do minério de ferro é necessário. Nem as emissões economizadas devido ao processo de reciclagem, nem as emissões reduzidas da substituição da extração de minério de ferro e da produção de ferro-gusa são declaradas separadamente no inventário de GEE; portanto, não são evidenciadas as contribuições do setor de resíduos para essas reduções de GEE.



Consequentemente, o potencial para reduzir as emissões de GEE na gestão de resíduos é significativamente maior do que 5%, como sugerido pelas estatísticas do IPCC. Se o potencial de reciclagem de alto valor e recuperação de energia for levado em conta, uma redução de até 20% das emissões de GEE pode ser atribuída à gestão de resíduos. Naturalmente, os efeitos de substituição relacionados ocorrerão nos outros setores de relatórios dos inventários nacionais de GEE. A “economia circular” é a base para alcançar essas reduções.

Com esse conhecimento, foi desenvolvida esta Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o efeito de uma boa gestão de materiais no aquecimento global. A ferramenta deve ajudar a entender as consequências das decisões em gestão de resíduos sobre a redução das emissões de GEE. Ela permite a quantificação e comparação das emissões de GEE para diferentes estratégias de gestão de resíduos em um estágio inicial do processo de tomada de decisões.

A Calculadora não requer profunda experiência profissional na gestão de resíduos sólidos. Apenas alguns conhecimentos básicos sobre quantidades e composições de resíduos de uma determinada área são necessários. Ela permite explorar e observar as potenciais reduções de GEE com a aplicação de diferentes opções de reciclagem e tratamento de resíduos. Valores-padrão são fornecidos para permitir aproximações e gerar resultados preliminares de orientação.

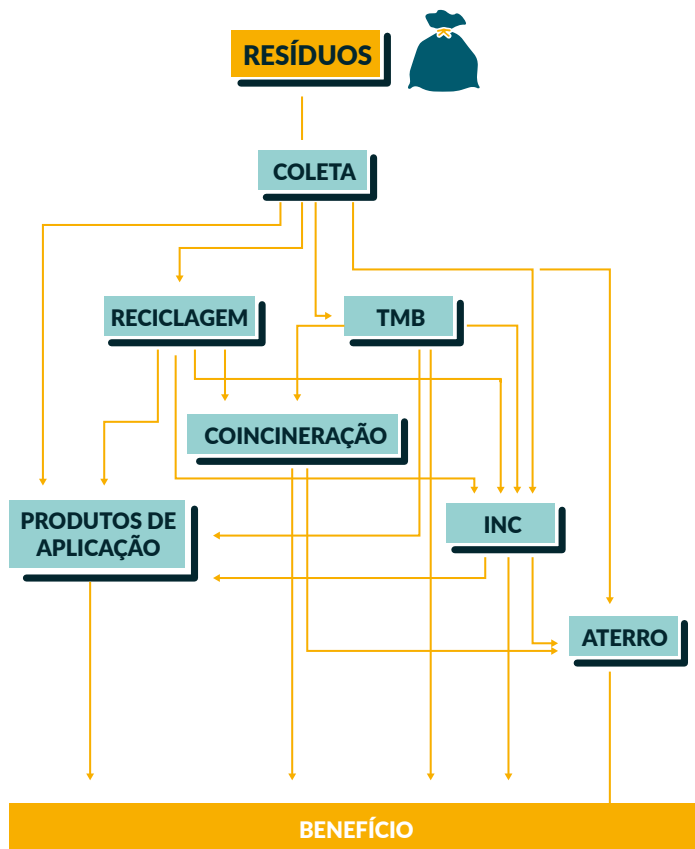
Mais de 10 anos atrás, uma versão em inglês e espanhol da Calculadora (SWM-GHG Calculator) foi desenvolvida e usada em diferentes partes do mundo. No âmbito do projeto “ProteGEEr: Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos” foi decidido pela adaptação da Calculadora a realidade brasileira e sua disponibilização aos Municípios que tiveram a oportunidade de testá-la.

## A ABORDAGEM BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Basicamente, o método usado na Calculadora para o Brasil segue o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Diferentes estratégias de gestão de resíduos podem ser comparadas através do cálculo das emissões de GEE das frações de resíduos reciclados (tipicamente vidro, papel e papelão, plásticos, metais e resíduos orgânicos) e tratados durante todo o ciclo de vida útil – “do berço ao túmulo”, por assim dizer. A Calculadora analisa as emissões de todos os fluxos dos resíduos para reciclagem, tratamento e disposição final respectivamente, e calcula as emissões totais de GEE de todas as etapas do processo em CO<sub>2</sub> equivalente. As emissões calculadas também incluem todas as emissões futuras causadas por determinada quantidade de resíduos tratados. Isso significa que, quando os resíduos são enviados para o aterro, por exemplo, as emissões calculadas de GEE (toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de resíduo), incluem as emissões acumuladas que essa quantidade de resíduos gerará durante a sua degradação.

A Figura 1 mostra um exemplo simplificado de sistema integrado de gestão de resíduos. Em todos os estágios das cadeias de reciclagem e tratamento, ocorrem emissões de GEE para cada fração de resíduo. As atividades de reciclagem levam a produtos secundários (“matérias-primas secundárias”), que substituem as matérias-primas primárias ou os combustíveis fósseis (no caso da geração de energia a partir dos resíduos). Os benefícios da substituição de matérias-primas primárias ou combustíveis fósseis são calculados como créditos de acordo com as emissões evitadas nos processos correspondentes, segundo o método da ACV. Os procedimentos contábeis aplicados ao uso de matérias-primas secundárias abrangem todas as etapas do processo, desde a triagem até sua valorização. Somente as emissões da coleta de resíduos não foram tomadas em consideração, pois pode-se supor que as emissões geradas pela coleta de resíduos estejam mais ou menos na mesma faixa para cada cenário.

FIGURA 1 DIAGRAMA DE FLUXO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (TMB = TRATAMENTO MECÂNICO BIOLÓGICO; INC. = INCINERAÇÃO DE RSU). FONTE: PROTEGEER (2021)



Até quatro sistemas diferentes de gestão de resíduos podem ser comparados usando a Calculadora. Isso quer dizer que, além do Cenário Base, três cenários definidos pelo usuário podem ser analisados ao mesmo tempo. Se os usuários desejarem fazer cálculos com diferentes quantidades de resíduos ou composições, a Calculadora deverá ser copiada e salva com um nome diferente.

Por razões metodológicas e práticas, foi necessário projetar a Calculadora aplicando várias simplificações. Deve-se enfatizar que a Calculadora não pode, de forma alguma, representar uma ACV completa. Ela toma o aquecimento global como o único impacto ambiental a ser quantificado, enquanto uma ACV completa abrange uma gama mais ampla de impactos ambientais.

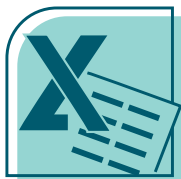
Esta versão da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos tem como objetivo utilizar informações o mais próximas possível da situação brasileira. Em caso de falta de dados específicos do Brasil, foram utilizados os dados mais apropriados de outras partes do mundo, o que não impacta o resultado obtido nem tampouco a sua análise crítica para a tomada de decisão. Os detalhes sobre as premissas subjacentes aos cálculos são apresentados no decorrer deste Manual e no Anexo.

As considerações e simplificações discutidas anteriormente não impactam o objetivo principal da Calculadora – contribuir para a compreensão das consequências das atividades de gestão de resíduos com relação às emissões de GEE. A Calculadora apresenta um valioso auxílio de orientação e contribuição para a tomada de decisão, uma vez que os resultados fornecem uma aproximação quantitativa suficientemente precisa dos impactos de GEE de diferentes estratégias tecnológicas de gestão de resíduos.

Mesmo se não tiverem acesso aos dados completos referentes a sua municipalidade, região ou país, os usuários podem usar os valores-padrão propostos para obter uma melhor estimativa. Certamente, quanto melhores as bases de dados – especialmente em termos de quantidade e composição dos resíduos –, melhores e mais confiáveis são os resultados. No entanto, na prática, as opções de tratamento de resíduos devem ser cuidadosamente avaliadas em qualquer caso antes de realizar um novo projeto.

# VISÃO GERAL DA CALCULADORA

A Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos é baseada em editor de planilhas amplamente utilizado (Microsoft Excel) e foi desenvolvida de maneira bastante simples para permitir que os usuários compreendam rapidamente seu funcionamento. O objetivo foi manter o layout do Excel o máximo possível, considerando que a maioria dos usuários está familiarizada com esse software.



A Calculadora contém breves instruções sobre o que fazer que podem ser encontradas como textos visíveis ou nos comentários do Excel em células específicas. Além disso, resultados intermediários são mostrados em distintas etapas, sempre indicadas em caixas de texto ou tabelas em amarelo.

Basicamente, para trabalhar com a Calculadora os dados relacionados à gestão dos resíduos (quantidades, caracterização, tratamentos, destinação final etc.) devem ser inseridos nas células verdes.

A Calculadora permite comparar três cenários a um cenário de linha de base, denominado de Cenário-base. Todos os quatro cenários são livremente programáveis em relação às opções de gestão de resíduos, com exceção do quantitativo anual de resíduos e da composição, que é mantida nos cenários para garantir uma base de comparação. Caso o usuário queira comparar mais opções, é necessário utilizar um segundo arquivo da Calculadora, mantendo o cenário de linha de base. Uma estratégia para configurar cenários de gestão de resíduos é descrita no capítulo 7 (“Recomendações de como definir cenários”). Nesse capítulo, um exemplo de opções de gestão de resíduos para um município brasileiro fictício é estabelecido e usado ao longo deste Manual.

A Calculadora inclui uma planilha de **Introdução**, que apresenta um breve resumo institucional e contatos.



As planilhas seguintes são destinadas à **entrada de dados** por parte do usuário, representando os cenários de gestão de resíduos sólidos que serão objeto de quantificação de emissões:

**Aba Início** Especificação da quantidade de resíduos, composição dos resíduos, características dos resíduos e matriz energética específica da região.

**Aba Reciclagem** Especificações para as opções de reciclagem de resíduos (secos e orgânicos). Até quatro cenários (incluindo o Cenário-base) podem ser definidos e comparados.

**Aba Disposição** Especificações para as opções de recuperação e/ou disposição do RSU residual (quantidade restante de resíduos após a reciclagem). Novamente, podemos definir e comparar até quatro cenários (incluindo o Cenário-base).

As abas subsequentes apresentam os resultados relacionados aos cenários propostos:

**Resultados Base** Resultados do Cenário-base

**Result Cen1** Resultados do Cenário 1

**Result Cen2** Resultados do Cenário 2

**Result Cen3** Resultados do Cenário 3

---

**Resultados Todos:** Comparação resumida dos resultados dos cenários definidos. As planilhas são explicadas com mais detalhes nas seções a seguir.

# ABA “INÍCIO”

Alguns dados básicos devem ser inseridos para iniciar os cálculos. Na primeira aba, “Início”, são eles:

- Quantidade total de resíduos
- Composição de resíduos em porcentagens de peso úmido
- Características dos resíduos (teor de água)
- Fator de emissão de GEE específico do país para a geração de eletricidade
- Cálculo de parâmetros de resíduos
  - resultado intermediário

## 4.1 QUANTIDADE TOTAL DE RESÍDUOS

A quantidade total de resíduos pode ser inserida como:

- a. **quantidade total** de resíduos em toneladas por ano (toneladas/ano), como primeira prioridade, **ou**
- b. **quantidade específica** de resíduos em quilogramas per capita e ano (**kg/cap/ano**) combinada com o número de habitantes, como segunda prioridade, **ou**
- c. **quantidade específica** de resíduos em quilogramas per capita e dia (**kg/cap/dia**) combinada com o número de habitantes, calculado para 365 dias/ano, como terceira prioridade.

Observe que apenas uma **opção (a, b ou c)** pode ser usada.

Note, ainda, que como fator de conversão geralmente é usado **1 kg/cap/dia = 365 kg/cap/ano**. Trata-se de um cálculo somente estatístico, que não tem relação com a frequência da coleta dos resíduos.

A ideia por trás da quantidade total de resíduos é representar os resíduos como são gerados nas residências e não apenas os resíduos coletados. No entanto, pode ser apropriado estimar a quantidade total de resíduos com base na coleta de resíduos pelo município e pelo setor informal. A diferença de valores entre a geração de resíduos e os resíduos coletados também pode ser devida a resíduos espalhados ou depositados ilegalmente.

A entrada da quantidade total de resíduos é mostrada nas Figuras 2 e 3.

Caso veja “inserir habitantes na célula verde”, insira o número de habitantes.

Caso veja “0”, especifique um valor para a quantidade de resíduos.

#### FIGURA 2 VISUALIZAÇÃO ANTES DA ENTRADA DE DADOS

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Resultado/informação intermediária	
Sua entrada resulta em uma quantidade total de resíduos	
<b>Resultado — quantidade total de resíduos</b>	
toneladas/ano	70.080
kg/cap/ano	insira o número de habitantes na célula verde
kg/cap/dia	insira o número de habitantes na célula verde

#### FIGURA 3 VISUALIZAÇÃO DEPOIS DA ENTRADA DE DADOS

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Resultado/informação intermediária	
Sua entrada resulta em uma quantidade total de resíduos	
<b>Resultado — quantidade total de resíduos</b>	
toneladas/ano	70.080
kg/cap/ano	350
kg/cap/dia	0,96

Os cálculos realizados são baseados na quantidade total de resíduos, de forma a avaliar adequadamente os possíveis cenários de gestão de resíduos. A quantidade total de resíduos é definida como a soma dos resíduos encaminhados para a reciclagem e dos resíduos encaminhados para a destinação final (incluindo as opções de recuperação e/ou disposição).

## 4.2 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS

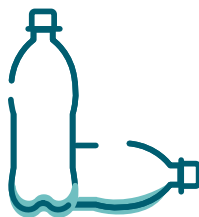
A composição dos resíduos é um dos principais fatores que influenciam as emissões de GEE do tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, porque diferentes frações de resíduos contêm quantidades diferentes de carbono orgânico degradável (COD) – também denominado de carbono orgânico regenerativo – e carbono fóssil. O COD é crucial para a formação de biogás nos aterros e em outros estágios de tratamento, ao passo que apenas o carbono fóssil contribui para as mudanças climáticas em caso de incineração. O CO<sub>2</sub> do carbono orgânico é considerado neutro para o clima, porque se origina de plantas que absorvem o CO<sub>2</sub> atmosférico. Outro aspecto importante é o poder calorífico, que varia em função da composição dos resíduos. Por exemplo, geralmente, quanto maior o conteúdo de resíduos orgânicos em resíduos sólidos urbanos (RSU), maior o teor de água dos resíduos menor o seu poder calorífico.

A composição de resíduos deve ser inserida em porcentagens de peso úmido. A relação com o peso é mais confiável que a relação com o volume. Recomenda-se utilizar os dados de composição do RSU específicos em cada município, caso disponíveis. Recomenda-se fortemente, também, a realização de análises de composição gravimétrica sempre que possível para obter os dados necessários não somente para a Calculadora, mas para um melhor entendimento das características dos resíduos a ser gerenciados.

A composição dos resíduos deve ser assim discriminada: resíduos de alimentos, resíduos de jardins e parques, papel e papelão, plásticos, vidro, metais ferrosos, alumínio, têxteis, borracha e couro, fraldas (descartáveis), madeira, resíduos minerais e outros. Esses componentes foram propostos com base nas considerações do IPCC (2006), com apenas duas pequenas alterações para adoção pela Calculadora. O componente “metal” foi subdividido em metais ferrosos e alumínio, pois esses são os metais mais importantes do RSU a ser reciclados. Resíduos minerais foram adicionados à categoria “Outros”.

Explicações e recomendações relacionadas à composição dos resíduos:

- Os resíduos de alimentos são os tradicionais resíduos orgânicos gerados antes do consumo (decorrentes da preparação) e depois do consumo (restos, sobras), incluindo quantidades menores de resíduos de carne.
- Se não houver informações disponíveis para distinguir entre resíduos de alimentos e resíduos verdes de poda (parques e jardins), é recomendável adotar a porcentagem de resíduos orgânicos como 90% de resíduos alimentares e 10% de resíduos verdes.
- Se houver informações disponíveis sobre as quantidades de compósitos de papelão ou embalagens de papelão, pode-se adicioná-las à fração de resíduos «papel e papelão».



- Os plásticos incluem polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS) e cloreto de polivinil (PVC).
- O alumínio é o único metal não ferroso considerado separadamente aqui. Outros metais não ferrosos são de menor importância e devem ser incluídos em “outros”. Se apenas uma porcentagem for conhecida como “metais”, recomenda-se dividi-la em 15% de alumínio e 85% de metais ferrosos.
- “Outros” inclui todas as frações de resíduos não mencionadas especificamente, como “fração fina”, “sucata eletrônica”, “diversas”, “carcaças e ossos” etc.

A Calculadora recomenda uma composição padrão para os RSU no Brasil ou nos municípios brasileiros, caso nenhuma informação gravimétrica esteja disponível ou não seja possível conduzir uma análise desta natureza no município em estudo.

### 4.3 COMPOSIÇÃO DO RSU RECOMENDADA NA AUSÊNCIA DE INFORMAÇÃO GRAVIMÉTRICA

Os dados de composição gravimétrica dos RSU gerados no país ou num município são um gargalo comum da base de dados nesse setor. Os inventários e estudos dedicados a quantificar as emissões de GEE tendem a adotar uma composição gravimétrica baseada em estudos locais, ou se baseiam, de forma recorrente, em informações pretéritas disponíveis.

A composição padrão se baseia em dados apresentados na primeira versão do Plano Nacional de Resíduos Sólidos<sup>1</sup> que, por sua vez, faz uma caracterização média do RSU nacional com base em dados da caracterização gravimétrica de 93 estudos realizados entre 1995 e 2008<sup>2</sup>. Os valores-padrão indicados no Plano são apresentados na Tabela 1.

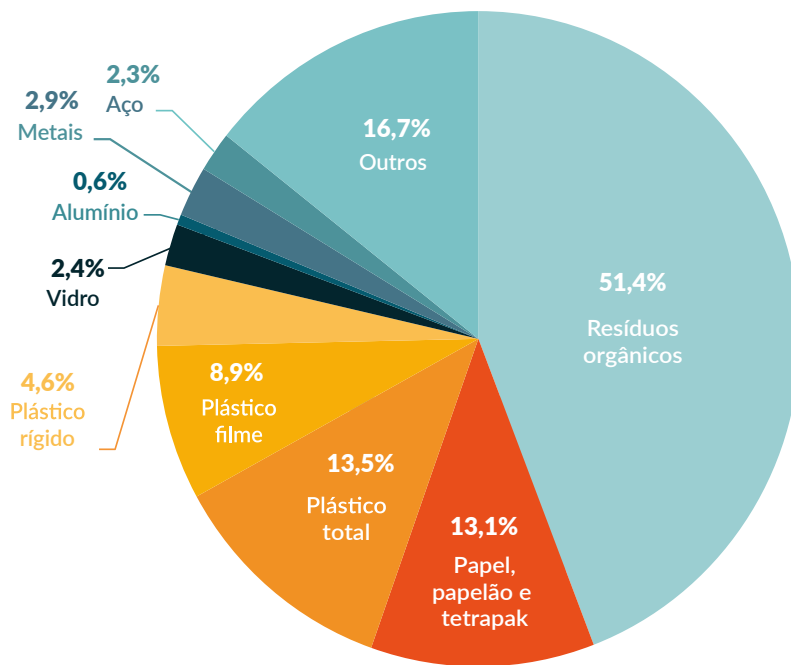
---

1 PLANARES 2020.

2 Foram utilizados estudos diversos, com distintas metodologias de amostragem e caracterização.

TABELA 1 COMPOSIÇÃO DOS RSU SEGUNDO O PLANARES 2020

PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PLANARES 2020	
COMPOSIÇÃO	%
Resíduos orgânicos	51,4
Papel, papelão e tetrapak	13,1
Plástico total	13,5
Plástico filme	8,9
Plástico rígido	4,6
Vidro	2,4
Alumínio	0,6
Metais	2,9
Aço	2,3
Outros	16,7





A composição indicada no Plano Nacional de Resíduos Sólidos<sup>3</sup> foi combinada à composição indicada pelo IPCC (2006), tendo sido aplicados os seguintes ajustes para obter valores finais, que representassem a realidade nacional, mas também considerassem outras categorias ausentes:

### 3 PLANARES 2020

- O resíduo orgânico com 51,4% foi subdividido em 48,4% para resíduos de alimentos e 3,0% para resíduos verdes (de jardins e parques), com base em estimativas de fontes brasileiras.
- Os resíduos de madeira não são mencionados no PLANARES 2020. Eles podem consistir em móveis de madeira usados, madeira de construção etc. Foram empregados 4,7% dos resíduos de madeira, conforme sugestão do IPCC, e subtraídos dos 16,7% da categoria “outros resíduos” apresentada pelo PLANARES.
- As fraldas não aparecem em ambas as listas de composição dos resíduos. Com o mesmo racional dos resíduos de madeira, a fração da fralda deve ser contabilizada em 4,0% (dado do IPCC). Por razões de consistência, essa quantidade foi subtraída da fração de “outros resíduos”.
- Os números do IPCC também incluem 2,6% para têxteis e 0,7% para borracha e couro. Isso também é subtraído da fração de “outros resíduos” do PLANARES.
- Os componentes de resíduos potencialmente recicláveis secos foram adotados de acordo com o PLANARES, utilizando 13,1% para papel e papelão, 13,5% para plásticos, 2,4% para vidro, 0,6% para alumínio e 2,3% para metais ferrosos.

Por fim, a composição do RSU padrão sugerida para uso na Calculadora, caso nenhuma informação gravimétrica esteja disponível, é apresentada na Tabela 2.

**TABELA 2 COMPOSIÇÃO PADRÃO DOS RSU PARA O BRASIL**

*Fonte: Adaptado segundo PLANARES 2020 e IPCC 2006*

<b>Componentes</b>	<b>% em peso úmido</b>
Resíduos alimentares	48,4%
Resíduos verdes	3,0%
Papel, papelão	13,1%
Plásticos	13,5%
Vidros	2,4%
Metais ferrosos	2,3%
Alumínio	0,6%
Têxteis	2,6%
Borracha, couro	0,7%
Fraldas (fraldas descartáveis)	4%
Madeira	4,7%
Resíduos minerais	0,0%
Outros	4,7%

## 4.4 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS – TEOR DE ÁGUA

O teor de água dos resíduos e, conseqüentemente, o poder calorífico podem variar significativamente, tendo um impacto importante nos resultados quando os resíduos são incinerados. A Calculadora considera essa influência e os usuários devem distinguir entre resíduos com baixo ou alto teor de água.

Insira “1” para baixo ou alto teor de água nas células verdes, conforme a condição.

A definição do teor de água deve ser orientada pelas condições climáticas do país ou região em estudo. Sua influência se limita às frações de resíduos orgânicos (resíduos alimentares e resíduos verdes) e à fração de resíduos “Outros”.

Como regra geral, um teor de água abaixo de 40% pode ser considerado baixo, e um teor de água acima de 40%, alto.

A Tabela 3 mostra alguns índices para ajudar a julgar se os resíduos em questão têm um teor de água baixo ou alto. Com base nas condições climáticas do Brasil, pode-se considerar que a maioria dos resíduos no país tem teor de água elevado.

TABELA 3 ÍNDICES DE BAIXO E ALTO TEOR DE ÁGUA

Fonte: Elaborada pelos Autores

Baixo teor de água	Alto teor de água
O resíduo parece seco.	O resíduo está lamacento, a água está escorrendo.
Os resíduos têm um alto teor de cinzas, por exemplo, em regiões onde as pessoas esquentam e cozinham em fogões a carvão.	Os resíduos têm um alto nível de restos de alimentos por causa de hábitos alimentares regionais.
Os resíduos têm um baixo nível de podas de jardins e parques, por exemplo, em regiões áridas.	Os resíduos têm um alto nível de poda de jardins e parques, mais comuns em áreas úmidas.
Os resíduos são armazenados em condições secas.	Os resíduos armazenados abertamente e sujeitos à precipitação possuem maior teor de água.

#### 4.5 CÁLCULO DE PARÂMETROS DE RESÍDUOS – RESULTADO INTERMEDIÁRIO

Com base na composição definida dos resíduos e na indicação de baixo ou alto teor de água, os parâmetros de teor de carbono regenerativo, teor de carbono fóssil e poder calorífico são calculados, considerando o teor de carbono e poder calorífico de cada tipo de resíduos e multiplicando pela porcentagem de cada fração de resíduos. O baixo e o alto teor de água são considerados para a fração orgânica e a fração não especificada, porque essas duas frações geralmente variam mais no teor de água. Outras frações de resíduos, como papel/papelão, plástico, vidro, metais e têxteis, geralmente têm um teor de água bastante estável e podem ser especificadas com poder calorífico fixo.

A Tabela 4 mostra as porcentagens usadas para o teor de carbono total e fóssil das frações de resíduos de acordo com o IPCC (2006).

TABELA 4 FRAÇÕES DE RESÍDUOS COM TEOR DE CARBONO –  
CARBONO TOTAL E CARBONO FÓSSIL (IPCC, 2006)

Fonte: IPCC, 2006

<b>Componentes</b>	<b>C total % em peso úmido</b>	<b>C fóssil % em peso úmido</b>
Resíduos de alimentos	15,2%	0%
Resíduos de jardins e parques	19,6%	0%
Papel, papelão	41,4%	1%
Plásticos	75,0%	100%
Vidros	0%	0%
Metais ferrosos	0%	0%
Alumínio	0%	0%
Têxteis	40,0%	20%
Borracha, couro	56,3%	20%
Fraldas descartáveis	28,0%	10%
Madeira	42,5%	0%
Resíduos minerais	0,0%	0%
Outros	2,7%	100%

A Tabela 5 mostra o poder calorífico dos componentes dos resíduos para fins de cálculo. A tabela também mostra o poder calorífico dos resíduos orgânicos e resíduos não especificados (“Outros”) em caso de baixo ou alto teor de água.

**TABELA 5 FRAÇÕES DE RESÍDUOS E PODER CALORÍFICO CORRESPONDENTE**

*Fonte: AEA (2001) e estimativa de madeira do ifeu*

<b>Componente</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg de resíduos úmidos)</b>
Resíduos orgânicos com baixo teor de água	4
Resíduos orgânicos com alto teor de água	2
Papel	11,5
Plásticos	31,5
Vidros	0
Metais	0
Têxteis, borrachas, couro	14,6
Madeira	15
Resíduos minerais	0
Outros com baixo teor de água	8,4
Outros com alto teor de água	5

Os resultados dos cálculos para poder calorífico e teor de carbono regenerativo e fóssil são mostrados na Calculadora, na Figura 4.

#### FIGURA 4 RESULTADO INTERMEDIÁRIO: PODER CALORÍFICO E TEOR DE CARBONO

Fonte: Elaborada pelos Autores

<b>Resultado/informação intermediária</b>		
A composição de resíduos e o teor de água que você definiu levam às seguintes propriedades físicas do total de resíduos:		
<b>Resultado — poder calorífico e teor de carbono do total de resíduos</b>		
Poder calorífico Teor	em MJ/kg	8,8
total de carbono Teor	em % de resíduos úmidos	28,2%
de carbono fóssil	em % de resíduos úmidos	10,7%
Teor de carbono regenerativo	em % de resíduos úmidos	17,5%

Se a célula do poder calorífico indicar “errado”, verifique se a pergunta sobre o teor de água foi respondida.

O teor de carbono e o poder calorífico são parâmetros importantes por distintas razões. Conforme explicado, o teor de carbono orgânico e fóssil influencia os resultados das emissões de GEE. Já o poder calorífico é um indicador importante para a combustibilidade dos resíduos (potencial de queima). No entanto, os resultados calculados

e mostrados na Calculadora não são confiáveis ou representativos o suficiente para decidir se os resíduos são apropriados para a incineração ou para decisões estratégicas de gestão de resíduos. Para tomar tais decisões, são necessárias informações mais precisas, obtidas da análise detalhada dos resíduos.

Como regra geral, pode-se supor que a incineração autossustentável é difícil ou não é mais possível se o poder calorífico de um resíduo for inferior a 6 MJ/kg. Como discutido anteriormente, na prática, os resíduos devem ser exaustivamente avaliados quanto à adequação à incineração, antes de qualquer tomada efetiva de decisão por essa rota tecnológica.

Além disso, o teor de metais pesados, enxofre e halogênio, em particular, tem um impacto considerável para a determinação dos requisitos do sistema de controle dos gases de combustão e nos custos de incineração. A determinação desses parâmetros requer levantamentos aprofundados da composição dos resíduos e análises físicas e químicas detalhadas.

#### 4.6 FATOR DE EMISSÃO DE GEE PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE ESPECÍFICO DO PAÍS

A geração de eletricidade produz emissões de GEE, tanto de forma direta quanto indireta. Normalmente, as emissões diretas decorrem da oxidação do carbono fóssil devido à queima de combustível, sendo o CO<sub>2</sub> o principal poluente, enquanto as emissões indiretas são relacionadas ao suprimento de combustíveis, por exemplo, emissões de metano durante a mineração de carvão.



No geral, a quantidade específica de emissões de GEE por quilowatt-hora de eletricidade de um país ou uma região depende dos tipos de combustível e do mix das fontes de geração de energia usados na produção de eletricidade. As maiores emissões de GEE resultam da utilização de carvão e petróleo, pois possuem o maior teor de carbono fóssil em relação ao teor de energia.

As menores emissões de GEE de combustíveis fósseis resultam do gás natural, porque este tem um baixo teor de carbono em relação ao teor de energia. Quase nenhuma emissão de GEE resulta de fontes de energia renováveis, como vento ou água, ou de usinas nucleares, pois nesses casos nenhum carbono fóssil é queimado.

A Calculadora fornece um valor-padrão para as emissões de GEE da geração de eletricidade no Brasil de 93 g CO<sub>2</sub>eq/kWh para 2017 (Fator Médio Anual; Statistical Office Brazil, 2019).

Os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para a produção de eletricidade são usados para calcular não apenas as emissões de GEE do consumo de eletricidade, mas também o benefício da eletricidade gerada por uma tecnologia de tratamento de resíduos – por exemplo, decorrente da captura e do aproveitamento energético de biogás em aterros sanitários, da biodigestão ou da incineração.

## ABA “RECICLAGEM”

Na aba “Reciclagem”, são solicitadas as taxas de reciclagem de diferentes frações de resíduos e, adicionalmente, o tipo de tratamento no caso de resíduos orgânicos:

- taxas de reciclagem para materiais secos;
- taxas de reciclagem para resíduos orgânicos (resíduos alimentares e resíduos verdes);
- parcela de compostagem e digestão de resíduos orgânicos reciclados;
- tipo e parcela de utilização do biogás da digestão anaeróbia (geração de eletricidade ou produção de biometano).

### 5.1 MATERIAIS SECOS

As frações de resíduos secos consideradas na Calculadora são:

- papel, papelão
- plásticos
- vidros
- metais ferrosos
- alumínio

A taxa de reciclagem solicitada na Calculadora relaciona-se à quantidade de cada fração de resíduos correspondente ao total de resíduos nessa categoria (Figura 5).

#### Exemplo - taxa de reciclagem de papel e papelão

O total de resíduos em uma região é de 1.000.000 toneladas por ano.

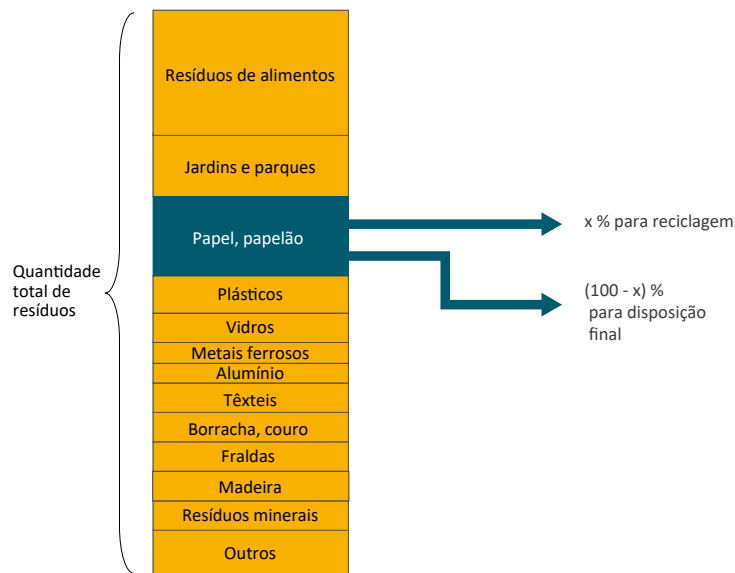
A parcela de papel e papelão na quantidade total de resíduos é de **10% = 100.000** toneladas por ano.

A taxa de reciclagem define quanto dessas 100.000 toneladas de papel e papelão no total de resíduos são recicladas.

Se 30.000 toneladas de papel e papelão forem recicladas por ano, a taxa de reciclagem será de  **$30.000/100.000 \times 100 \% = 30 \%$** , e esse valor deverá ser inserido nas células verdes.

#### FIGURA 5 EXEMPLO DE COMO CALCULAR A TAXA DE RECICLAGEM DE PAPEL E PAPELÃO

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



A taxa de reciclagem deve incluir as atividades que resultam em segregação de material – decorrente de coleta seletiva, do setor informal ou de plantas de tratamento mecânico.

A Calculadora para o Brasil oferece uma tabela auxiliar de cálculo a fim de facilitar a determinação das taxas potenciais de reciclagem.

O potencial total de material reciclável é baseado na quantidade total de resíduos e sua respectiva fração de resíduos recicláveis definida na aba “Início”. Esse valor representa os 100% necessários para calcular uma taxa de reciclagem. Em seguida, o material reciclado, como papel, vidro etc., normalmente medido em números absolutos (em toneladas por ano), é relacionado ao potencial total de resíduos. A taxa de reciclagem calculada deve ser inserida como célula certa para os cálculos de GEE.

Sugere-se separar a quantidade de material reciclado pelo setor informal e formal para potencialmente monitorar os efeitos de ambos os setores. A tabela auxiliar combina os dois setores e calcula uma taxa geral de reciclagem. Observe que a reciclagem no setor formal pode consistir na segregação do material diretamente após a coleta ou em um estágio posterior dos dispositivos de triagem das etapas de tratamento adicionais.

A tabela auxiliar também é adequada para definir cenários com diferentes taxas de reciclagem, pois todas as opções se relacionam com o potencial total de reciclagem de material. Assim, as metas de reciclagem para materiais individuais ou para a soma de recicláveis secos e úmidos podem ser facilmente definidas pelo usuário. A tabela auxiliar não está diretamente conectada ao fluxo de trabalho de cálculos. Os valores obtidos nesta tabela devem ser inseridos em porcentagem nos campos correspondentes às entradas de dados, assinalados em verde como mostra a Tabela 6.

#### TABELA 6 TABELA AUXILIAR PARA DETERMINAR TAXAS DE RECICLAGEM

*Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).*

Tabela auxiliar para determinar taxas de reciclagem						
Material em tonelada	Reciclado pelo setor informal	Reciclado pelo setor formal	Soma total dos reciclados	Potencial total em resíduos	Reciclado em %	Subtotal
Resíduo de alimentos	0	12.000	12.000	33.919	35,4%	Resíduo orgânico
Resíduo de poda	0	600	600	2.102	28,5%	35,0%
Papel, papelão	500	3.000	3.500	9.180	38,1%	
Plásticos	300	1.200	1.500	9.461	15,9%	
Vidros	0	70	70	1.682	4,2%	
Metais ferrosos	50	700	750	1.612	46,5%	Recicláveis secos
Alumínio	50	200	250	420	59,5%	27,2%

As taxas de reciclagem variam de região para região e não é possível fornecer valores-padrão de referência para o usuário.

## 5.2 COMPOSTAGEM E/OU BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Os resíduos orgânicos considerados na Calculadora são:

- Resíduos alimentares
- Resíduos verdes (jardins e parques)

A taxa de reciclagem de resíduos orgânicos deve ser inserida analogamente ao material reciclável. A reciclagem de resíduos orgânicos deve ser entendida como a produção de um composto de alta qualidade a partir de dois processos principais – a compostagem e a biodigestão anaeróbia. Considera-se que o composto produzido nesses processos vai ser aplicado na agricultura ou jardinagem para substituir fertilizantes minerais.

Posteriormente, nas opções de destinação final oferecidas (na aba “Destinação”), são previstas outras estratégias de manejo, envolvendo tratamento biológico com produtos residuais de baixa qualidade. Estas são consideradas operações de tratamento, anteriores à disposição final deste material (por exemplo, a cobertura dos resíduos em aterros sanitários), mas sem benefício direto decorrente da substituição de material.

A próxima etapa na Calculadora pergunta quanto do resíduo orgânico reciclado é compostado ou tratado pela biodigestão anaeróbia e, no caso desta, o que é feito com o biogás. O biogás pode ser usado para gerar eletricidade ou ser refinado como biometano visando seu uso no setor de transportes, em substituição ao gás natural veicular (GNV).

Se os resíduos orgânicos são reciclados, a soma dos resíduos orgânicos digeridos e/ou compostados deve ser 100% em qualquer caso. Se nenhuma reciclagem de resíduo orgânico estiver planejada, as células verdes não deverão ser preenchidas.

O uso do biogás deve ser definido apenas se a biodigestão anaeróbia for escolhida como opção de tratamento biológico. O destino do biogás, que pode ser selecionado entre a geração de eletricidade e a produção de biometano, deve sempre corresponder a 100% como observado na Tabela 7.

#### TABELA 7 RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA RECICLAGEM

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

x% de	Resíduos orgânicos para reciclagem	em %	em %	em %	em %
	Compostagem	0%	100%	50%	0%
	Digestão anaeróbia (DA)	0%	0%	50%	100%
	Total (deve ser 100%)	0,00%	100,00%	100,00%	100,00%
		em %	em %	em %	em %
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de eletricidade	0%	0%	100%	0%
	Biogás da digestão anaeróbia para produção de biometano	0%	0%	0%	100%

### 5.3 RESULTADOS INTERMEDIÁRIOS – PARÂMETROS DOS RESÍDUOS APÓS RECICLAGEM

As taxas de reciclagem definidas alteram a composição do resíduo que sobrou após o processo e, conseqüentemente, as características desses materiais, em termos de poder calorífico e teor de carbono regenerativo e fóssil. A Figura 6 apresenta esses valores com base no resíduo com composição recalculada, considerando que parte dos constituintes recicláveis e orgânicos que compunham a totalidade do RSU foi removida pelos processos de reciclagem indicados nesta aba da Calculadora.

#### FIGURA 6 INFORMAÇÃO INTERMEDIÁRIA DAS CARACTERÍSTICAS DO RSU APÓS A RECICLAGEM

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Resultado/informação intermediária		Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
A coleta seletiva altera a composição original dos resíduos. As taxas de reciclagem inseridas levam às seguintes propriedades físicas para o resíduo:					
Características do RSU residual após a reciclagem		Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Poder calorífico	em MJ/kg	8,7	8,7	8,4	9,6
Teor total de carbono	em% de resíduos úmidos	28,0%	27,9%	27,0%	28,2%
Teor de carbono fóssil	em% de resíduos úmidos	10,5%	10,5%	9,5%	10,0%
Teor de carbono regenerativo	em% de resíduos úmidos	17,5%	17,4%	17,5%	18,3%

Os cálculos subsequentes na Calculadora são realizados com base nessa composição recalculada, que é então a entrada para os processos da aba posterior, de opções de tratamento e disposição final.

### 5.4 RECICLAGEM – PROCESSOS DE TRATAMENTO E FATORES DE EMISSÃO DE GEE

As emissões de GEE para as frações de resíduos reciclados calculadas nesta etapa são determinadas com base na massa de resíduos reciclados e um fator de emissão de GEE. Os fatores de emissão de GEE utilizados são apresentados no anexo deste Manual e refletem a situação brasileira da melhor forma possível.



# ABA “DESTINAÇÃO”

## 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OPÇÕES DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL

Na aba "Destinação" é solicitado o tipo de tratamento dos resíduos que sobram dos processos ou são encaminhados para a disposição final, e alguns dados sobre as tecnologias aplicadas.

Existe uma diversidade de opções para tratamento e disposição final de resíduos, e alguns devem ser evitados por representarem riscos à saúde da população e ao meio ambiente. Alguns são muito simples, mas perigosos e, finalmente, existem tecnologias de tratamento sofisticadas ou avançadas. As tecnologias de tratamento e disposição final representadas na Calculadora estão listadas abaixo e na Tabela 8.

- Disposição final não controlada
  - Descarte a céu aberto
  - Queima a céu aberto
- Disposição final no solo
  - Lixão
  - Aterro controlado sem coleta de gás
  - Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás
- Outras opções de tratamento e disposição final:
  - Tratamento biológico + cobertura de aterro
  - Combustível Derivado de Resíduos (CDR) seco + cimenteira + rejeito para aterro
  - CDR seco + cimenteira + tratamento biológico + cobertura de aterro
  - CDR seco + biosecagem CDR orgânico + cimenteira
- Incineração de RSU

## TABELA 8 TIPO DE TRATAMENTO FINAL DE RESÍDUOS

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Tipo de tratamento e descarte de resíduos		Cenário-Base
		em %
<b>Evitar!</b>	Resíduos dispersos não queimados	
	Queima aberta de resíduos dispersos	
<b>Disposição no solo</b>	Lixão	100,0%
	Aterro controlado sem coleta de gás	
	Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás	
	<i>Se o tratamento biológico for digestão anaeróbia em vez de compostagem,</i>	
<b>Outras opções de recuperação e disposição final</b>	Tratamento biológico + cobertura de aterro	<i>preencha nas linhas 46/47</i>
	CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro	
	CDR seco + cimenteira + trat. biol.+ cobertura de aterro	<i>preencha nas linhas 51/52</i>
	CDR seco + biosecagem CDR org. + cimenteira	
	<b>Incineração de RSU</b>	
	<b>Total (deve ser 100%)</b>	<b>100,00%</b>

Observação: As dez opções de tratamento e/ou disposição final podem ser selecionadas em um único cenário. No entanto, são implementadas de maneira cumulativa para que todas sejam empregadas em 100% dos resíduos.

A recuperação de recicláveis secos também pode ocorrer durante as opções de tratamento (por exemplo, separação magnética de metal ferroso) e mesmo após os processos de incineração (queima em massa), como a remoção de metais das cinzas do fundo. Os resíduos que sobram após o processo de reciclagem são representados na Figura 5 como "(100-x)% para a disposição final".

### Exemplo

A quantidade total de resíduos em uma região é de 1.000.000 toneladas por ano.

O total de resíduos reciclados é de 300.000 toneladas por ano (somando as frações de papel, papelão, plástico, vidro, metais ferrosos, alumínio, têxtil, resíduos de alimentos, resíduos de jardins e parques para reciclagem).

- O O resíduo que sobrou após o processo de reciclagem é de  $1.000.000 - 300.000 = 700.000$  toneladas por ano.

## 6.2 OPÇÕES PARA A DISPOSIÇÃO FINAL NO SOLO (ATERRAMENTO)

O próximo conjunto de opções são todos os tipos de disposição de resíduos no solo:

1. Lixão = disposição não gerenciada e raso
2. Aterro controlado = disposição não gerenciada e profundo
3. Aterro sanitário = disposição gerenciada anaeróbia

As opções 1 a 3 de disposição final de resíduos em aterros são definidas de acordo com o IPCC, que foi alterado no Relatório de Refinamento de 2019 (IPCC, 2019). Uma abordagem simplificada é usada para a adaptação da Calculadora para o Brasil. Apenas três tipos de disposição final são implementados na Calculadora, em vez dos agora oito tipos propostos pelo IPCC (2019):

- Lixões (1) com disposição principalmente não gerenciada de resíduos e com profundidade inferior a 5 m. Esse tipo é considerado para operar parcialmente em condições aeróbias e calculado com um Fator de Correção de Metano (MCF) de 0,4.
- Aterros controlados ou lixões profundos (2), não gerenciados ou gerenciados simplesmente, sem qualquer sistema de coleta de gás e com uma profundidade de 5 m ou mais. Considera-se que esse tipo produz mais metano do que uma disposição rasa, portanto, as emissões de metano são calculadas com um MCF de 0,8.
- O aterro sanitário com coleta de gás (3) representa o tipo de aterro gerenciado que inclui a disposição controlada dos resíduos (por exemplo, através de compactação mecânica), algum tipo de sistema de coleta de gás, camada de base e cobertura dos resíduos. De acordo com o IPCC, esse aterro sanitário pode ser associado a processos de degradação anaeróbia e tem um MCF de 1.

Para aterros sanitários, a Calculadora requer a definição de parâmetros importantes:

- Eficiência de coleta de gás
- Tratamento do gás de aterro coletado

A eficiência da coleta de gás, nesse contexto, representa a porcentagem do gás de aterro gerado a partir de uma determinada quantidade de resíduos e coletado durante a vida útil do aterro. Deve-se considerar que a geração e captura de gás são diferentes conforme as fases de operação do aterro sanitário – por exemplo, na fase de disposição dos resíduos, no encerramento dos resíduos depositados e no período de manutenção posterior. A eficiência da coleta deve ser estimada incluindo todas as fases.

#### TABELA 9 EFICIÊNCIA NA COLETA DE GÁS

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

	Mín	Máx			
Eficiência na coleta de gás	10%	50%	0%	40%	40%

As opções de tratamento para o gás de aterro coletado são:

- Sem tratamento (apenas ventilação)
- Queima controlada (*flaring*)
- Geração de eletricidade
- Produção de biometano

#### TABELA 10 TRATAMENTO DE GÁS DE ATERRO COLETADO

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Tratamento de gás de aterro coletado			
Sem queima (teste de emissão do aterro sanitário)			
Queimador Flare		100%	
Geração da eletricidade			100%
Produção de biometano			
Total (deve ser 100%)	0,00%	100,00%	100,00%

O total das porcentagens de tratamento de gás inseridas deve ser igual a 100%.

Para o aterro sanitário, pressupôs-se uma oxidação de metano de 10% quando aplicada uma cobertura dos resíduos, conforme definido pelo IPCC (2006). A Calculadora inclui a possibilidade de aumentar a oxidação de metano por meio da construção de uma Camada de Oxidação de Metano (MOL) para atingir taxas de oxidação de metano mais altas. As eficiências dessa oxidação podem ser aplicadas conforme a construção da Camada, visto na Tabela 11.

**TABELA 11 EFICIÊNCIA DA OXIDAÇÃO DE METANO PELA CAMADA DE OXIDAÇÃO**

*Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).*

<b>Efeito da oxidação da cobertura do aterro</b>	Padrão IPCC 10%		
<b>Eficiência da oxidação de metano pela camada de oxidação</b>	10%	10%	10%

Mais informações sobre a eficiência da coleta e o tratamento do gás de aterro sanitário coletado são fornecidas no anexo.

## 6.3 OPÇÕES DE TRATAMENTO

Um terceiro grupo de opções de destinação final de resíduos engloba uma variedade de tratamentos:

1. Tratamento biológico da matéria orgânica + uso como cobertura de aterro (Tratamento biológico + cobertura de aterro)
2. Produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira e todo o resto destinado ao aterro sanitário (CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro)
3. Produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira + tratamento biológico do resto + uso do material tratado como cobertura de aterro (CDR seco + cimenteira + tratamento biológico + cobertura de aterro)
4. Produção de CDR + biosecagem para a produção de um CDR orgânico + ambos CDR como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira (CDR seco + biosecagem CDR orgânico + cimenteira)

Essas opções de tratamento podem ser brevemente caracterizadas da seguinte forma:

- O tratamento biológico dos resíduos restantes (1) tem como objetivo a produção de um material que serve como camada de cobertura para um aterro sanitário. A decomposição controlada da matéria orgânica evita áreas anaeróbias na camada e reduz as emissões difusas no aterro sanitário. O tratamento biológico pode ser realizado: a) por processos aeróbios simples; ou b) mediante processo de biodigestão anaeróbia.
- Nesta opção de tratamento (2), a produção de CDR a partir de resíduos secos pode ser alcançada através de intervenções mecânicas entre elas um tambor rotativo com uma malha de 50 mm. Esse dispositivo seleciona grandes resíduos, como plásticos, papel, têxteis etc., que podem ser usados para coprocessamento, a exemplo da indústria de cimento, para substituir outros combustíveis. O restante que passa pelas malhas é, em sua maioria, de origem orgânica e, nesta opção de tratamento, é depositado diretamente em aterro sanitário.
- A produção de CDR com subsequente tratamento biológico (3) do resto da separação orgânica combina a opção 1 e a opção 2. Uma fração seca de CDR pode ser usada na indústria de cimento e o resto orgânico será preparado para um material de uso como camada de cobertura do aterro. Como opção de tratamento biológico, pode ser um tratamento aeróbio ou uma digestão anaeróbia.



- A produção de CDR seco (acima de 50mm) e de um CDR orgânico (4) a partir da matéria orgânica passante na malha de 50 mm e encaminhada para biosecagem é uma opção de tratamento que tenta converter as frações orgânicas em um CDR com poder calorífico adequado para coprocessamento.

As opções de tratamento 1 e 3 consistem em um processo de tratamento biológico. Esse processo pode ser um tratamento aeróbio simples (como compostagem) ou uma digestão anaeróbia. Ambos os processos biológicos estão disponíveis na Calculadora para as opções 1 e 3, perfazendo seis opções de tratamento. O tratamento padrão aqui é o tratamento aeróbio simples (compostagem).

A biodigestão anaeróbia gera biogás, que pode ser usado para produzir eletricidade ou biometano, no caso da Calculadora, para fins de transporte. A escolha do produto a partir do biogás pode ser feita com as seguintes células na Calculadora:

#### TABELA 12 OPÇÃO DE TRATAMENTO 1

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Tratamento biológico + cobertura de aterro			
Produção de eletricidade a partir do biogás			
Produção de biometano a partir do biogás			
Total (deve ser 100% ou 0%)	0,00%	0,00%	0,00%

## TABELA 13 OPÇÃO DE TRATAMENTO 3

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro			
Produção de eletricidade a partir do biogás		100%	70%
Produção de biometano a partir do biogás			30%
Total (deve ser 100% ou 0%)	0,00%	100,00%	100,00%

Caso a biodigestão anaeróbia se aplique a um cenário de gestão de resíduos como tratamento das opções 1 e 3, deve-se selecionar o uso previsto para o biogás (eletricidade ou biometano). Neste caso, aplica-se uma mudança automaticamente do tratamento aeróbio pré-instalado para a biodigestão anaeróbia. O uso de biogás deve somar 100% (ou ser deixado em 0% ou em branco para o tratamento aeróbio simples padrão).

Mais explicações e fluxogramas para os tratamentos encontram-se em anexo.

## 6.4. INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS

A incineração de resíduos também figura entre as opções de tratamento previstas na Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos. Existem entradas para definir os benefícios de conversão dessa fração do RSU em energia, sabendo que, no Brasil, destinam-se quase unicamente à produção de eletricidade. As emissões de GEE são baseadas na quantidade incinerada de carbono fóssil. A energia gerada por meio do processo de incineração é enquadrada como fonte alternativa de energia, podendo substituir as fontes tradicionais de energia.

O usuário é convidado a definir a eficiência energética da produção de energia elétrica e térmica na Tabela 14. Essa eficiência é a eficiência líquida, fornecida a um consumidor externo após subtrair o consumo interno da planta de incineração.

**TABELA 14 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA**

*Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).*

	Padrão			
Eletricidade	15%	15,0%	15,0%	15,0%
Térmica	0%	0,0%	0,0%	0,0%

Mais informações sobre a eficiência líquida da utilização de energia por meio da incineração de resíduos são fornecidas no anexo.

## RECOMENDAÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

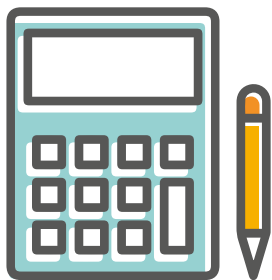
A Calculadora para o Brasil aplica a técnica de cenários. Portanto, definir cenários úteis é a chave para usar a Calculadora. Depois de conhecer as características mais importantes, esta seção dará algumas recomendações de como configurar cenários.

- Todos os cenários têm que se referir à mesma região, quantidade e composição de resíduos. Como todos os cálculos se referem a um ano calendário específico de geração de resíduos, selecione-o e guarde-o para todos os cenários.
- Defina um Cenário-base com o qual todos os outros cenários devem ser comparados. Essa linha de base pode refletir um *status quo* existente ou qualquer outra situação que possa ser fundamentada em um desenvolvimento da gestão de resíduos. Para começar, use as informações de entrada facilmente disponíveis, mas necessárias quantidade total de resíduos ou população e geração de resíduos *per capita*, composição razoável de resíduos, práticas existentes de gestão de resíduos etc.. Se for difícil encontrar essas informações, trabalhe com estimativas para testar a importância dos parâmetros ou use os valores-padrão sugeridos.

- Defina um Cenário 1 que seja orientado à situação de linha de base, mas que inclua algumas melhorias. Essas melhorias podem ser decorrentes de planos ou políticas nacionais de gestão de resíduos, realizações em municípios vizinhos ou planejamento real. Não se esqueça do papel do setor informal e das disposições legais previstas para curto e/ou médio prazo.
- O Cenário 2 deve refletir um sistema de gestão de resíduos sólidos mais avançado. Os esquemas de coleta seletiva do município podem aumentar a reciclagem das frações secas e úmidas. Podem ser previstos investimentos para alguns dispositivos de tratamento para os resíduos após a reciclagem e uma melhor disposição final, como um aterro sanitário com coleta e uso eficiente do gás de aterro, por exemplo.
- Selecione um Cenário 3 como um sistema moderno de gerenciamento de resíduos sólidos aplicando tecnologias mais complexas e consolidadas internacionalmente. As atividades de gestão e comunicação podem resultar em elevadas taxas de reciclagem, e o tratamento avançado de resíduos orgânicos através da biodigestão anaeróbia pode fornecer biogás e composto orgânico. Outras estratégias de tratamento associadas podem produzir um CDR para usos industriais e, paralelamente, reduzir o material biodegradável encaminhado ao aterro.
- Se forem necessários mais cenários – o que é comum –, salve a planilha Excel da Calculadora com outro nome e use-a novamente para a composição de mais cenários. Recomenda-se manter o cenário de linha de base como uma referência comum para comparação, variando as três opções de cenário.

Independente da estratégia de cenário, brinque com a Calculadora. Tente identificar o que pode ser alcançado na mitigação de GEE aplicando diferentes estratégias tecnológicas para o gerenciamento de resíduos sólidos na sua cidade, região ou mesmo no seu país e identifique o que é mais ou menos relevante nesta mitigação.

Como exemplo, trabalhar com um município brasileiro virtual de 200.000 habitantes e definir um Cenário-base e três cenários de gestão de resíduos, seguindo uma estratégia conforme descrito anteriormente. A Tabela 15 propõe cenários de gerenciamento.



**TABELA 15 EXEMPLO DE UM CENÁRIO-BASE E TRÊS CENÁRIOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS PARA UM MUNICÍPIO BRASILEIRO VIRTUAL**

*Fonte: Elaboração do autor*

<p><b>Cenário-base</b></p>	<p>Um cenário de linha de base pode descrever uma situação em que existe um gerenciamento de resíduos simples – inclusive não apropriado. Algumas atividades de reciclagem são realizadas pelo setor informal, de forma que apenas o material seco é reciclado, contudo, de forma limitada. A fração orgânica não é reciclada.</p> <p>Presume-se que todos os resíduos são coletados (o que não é necessariamente assim) e depositados em lixão, sem gerenciamento algum.</p>
<p><b>Cenário 1: Aprimoramentos iniciais</b></p>	<p>Neste cenário 1, presume-se que uma taxa de reciclagem mais alta de material seco pode ser realizada por medidas planejadas do setor formal de gestão de resíduos. Uma parcela de resíduos orgânicos (alimentares e verdes) são coletados separadamente e compostados. O restante dos resíduos é encaminhado para aterro sanitário, onde ocorre a captura de biogás de forma eficiente (40%), sendo o gás apenas queimado para a atmosfera.</p>
<p><b>Cenário 2: Reciclagem aprimorada e início de recuperação de energia</b></p>	<p>Para o cenário 2, a coleta seletiva e estratégias de comunicação e conscientização levarão ao aumento da reciclagem de material seco e úmido. A coleta seletiva de resíduos orgânicos atinge 20% e será tratada metade por compostagem e metade por biodigestão anaeróbia, com geração de energia elétrica a partir do biogás.</p> <p>Os demais resíduos serão parcialmente (50%) submetidos a um tratamento mecânico que conta, entre outros equipamentos, com uma peneira de, por exemplo, 50 mm para separar material de alto poder calorífico, como papel residual, papelão e plástico que pode ser aplicado na indústria de cimento como CDR. A fração de menor tamanho e o restante dos resíduos coletados convencionalmente (50%) serão dispostos em aterro sanitário. O gás de aterro sanitário é coletado com a mesma eficiência do cenário 1, mas agora usado para gerar eletricidade.</p>

### Cenário 3: Reciclagem ambiciosa e tratamento extensivo

O cenário 3 representa a estratégia mais avançada de gestão de resíduos sólidos. Presumem-se taxas de reciclagem muito ambiciosas – mas viáveis – de recicláveis secos, bem como uma maior eficiência na coleta seletiva e na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (alimentares e verdes). O biogás é usado para produzir biometano, que pode ser usado para transporte e substituto do diesel.

Grande parte (80%) dos resíduos residuais é tratada por uma planta de TMB com produção de CDR para coprocessamento e geração de biometano para fins de transporte. Apenas 20% dos resíduos convencionais coletados são encaminhados diretamente para o aterro sanitário. Além disso, esse aterro sanitário possui um sistema de captura de gás com eficiência de 40% e produz biometano para transporte.

As taxas de reciclagem assumidas, o tipo de reciclagem dos resíduos orgânicos (compostagem ou biodigestão anaeróbia) e o tratamento dos resíduos são apresentados nas tabelas abaixo. Essas tabelas correspondem aos dados de entrada conforme apareceriam na simulação destes cenários na Calculadora para o Brasil.

TABELA 16 TAXAS DE RECICLAGEM – CENÁRIO-BASE E CENÁRIOS 1 A 3

Fonte: *Elaboração do autor*

	Cenário-base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Papel, papelão	6%	20%	50%	80%
Plásticos	4%	10%	35%	60%
Vidros	4%	20%	50%	80%
Metais ferrosos	15%	30%	60%	90%
Alumínio	40%	60%	75%	90%
Resíduos alimentares	0%	5%	20%	60%
Resíduos verdes e podas	0%	5%	20%	60%



TABELA 17 COMPOSTAGEM OU BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS COLETADOS SEPARADAMENTE

*Fonte: Elaboração do autor*

	Cenário-base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Compostagem		100%	50%	0%
Biodigestão anaeróbia		0%	50%	100%

TABELA 18 USO DO BIOGÁS RESULTANTE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

*Fonte: Elaboração do autor*

	Cenário-base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Produção de eletricidade			100%	0%
Produção de biometano			0%	100%

TABELA 19 OPÇÕES DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS POR TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL

Fonte: *Elaboração do autor*

	Cenário-base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Descarte a céu aberto				
Queima a céu aberto				
Lixão	100%			
Aterro controlado sem coleta de gás				
Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás		100%	50%	20%
Tratamento biológico + uso não nobre do produto				
CDR seco + cimenteira + aterro sanitário				
CDR seco + cimenteira + tratamento biológico + uso não nobre do produto			50%	
CDR seco + biosecagem para CDR fino + cimenteira				80%
Incineração				

## TABELA 20 OPÇÕES DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL

Fonte: *Elaboração do autor*

	Cenário-base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Eficiência na coleta de gás	0%	40%	40%	40%
<b>TRATAMENTO DE GÁS COLETADO DE ATERRO</b>				
Sem tratamento (apenas ventilação)				
Queima para a atmosfera (Flare)		100%		
Geração de eletricidade			100%	
Geração de biometano				100%
<b>CDR SECO + CIMENTEIRA + TRAT. BIOLÓGICO + USO NÃO NOBRE</b>				
Geração de eletricidade				
Geração de biometano				100%

## ABA “RESULTADOS”

Os resultados da análise dos cenários e dos cálculos, conforme explicado anteriormente, são apresentados nas abas da Calculadora e assim dispostos:

- “Result Cenário-base”: Planilhas e gráficos com resultados do fluxo de massa e saldo de emissões de GEE do Cenário-base
- “Result Cenário 1”: Planilhas e gráficos com resultados do fluxo de massa e saldo de emissões de GEE do Cenário 1
- “Result Cenário 2”: Planilhas e gráficos com resultados do fluxo de massa e saldo de emissões de GEE do Cenário 2
- “Result Cenário 3”: Planilhas e gráficos com resultados do fluxo de massa e saldo de emissões de GEE do Cenário 3
- “Resultados Finais - Todos os Cenários”: Balanço de emissões de cada cenário, de forma comparativa

## 8.1 RESULTADOS PARA CADA CENÁRIO

Em cada planilha, os resultados são estruturados da seguinte maneira:

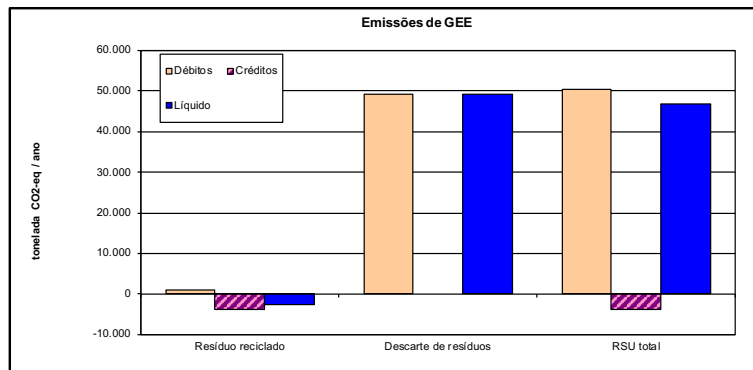
- Balanço dos resíduos encaminhados segundo opção de gerenciamento oferecida – reciclagem, tratamento e/ou disposição final (em t/ano);
- Resultados do balanço de emissões de GEE (em t CO<sub>2</sub>eq/ano) relacionados à reciclagem e às demais opções de tratamento e /ou disposição final dos resíduos.

O balanço dos resíduos por opção de gerenciamento, apresentado em toneladas por ano, é mostrado em uma tabela, um gráfico de barras e um diagrama de balanço de massa.

Os resultados da reciclagem e das demais opções de tratamento e/ou disposição final do RSU são mostrados em uma tabela e um gráfico de barras. A Figura 7 mostra os resultados para o exemplo do cenário 2, tal como descrito na seção 7, separadamente para atividades de reciclagem e disposição final bem como a soma dos dois componentes (“RSU total”). A primeira barra indica as emissões de GEE relacionadas à reciclagem (débitos). A segunda barra representa a economia de emissões dos processos primários em razão da reciclagem e utilização de matéria-prima secundária (créditos e valores negativos). A terceira barra mostra o efeito líquido, ou seja, a diferença entre créditos e débitos (líquido).

## FIGURA 7 EMISSÕES DE GEE EM UM MUNICÍPIO TEÓRICO - CENÁRIO 2

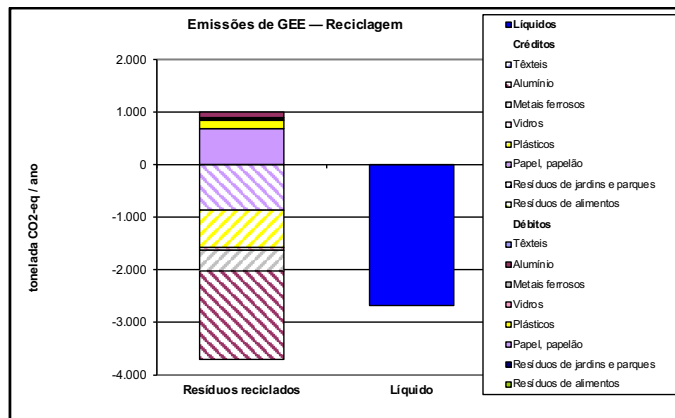
Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



Além disso, os resultados das emissões de GEE são mostrados em mais detalhes, tanto para reciclagem (Figura 8), quanto para disposição final (Figura 9).

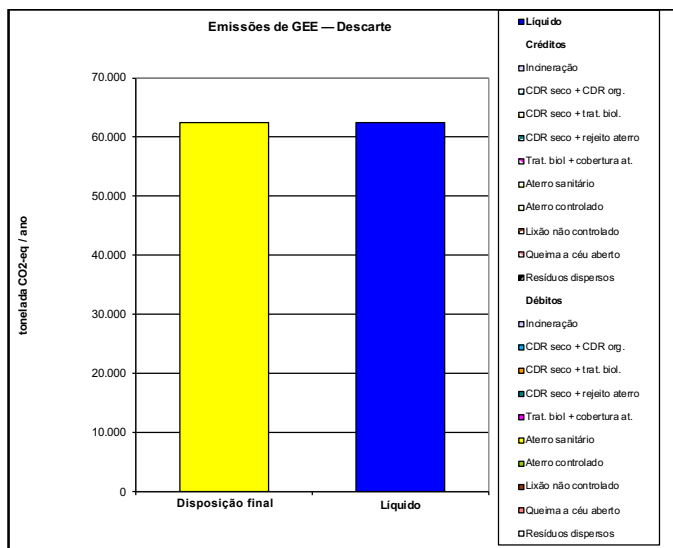
## FIGURA 8 EMISSÕES DE GEE POR FRAÇÃO DE RESÍDUOS - RECICLAGEM

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



## FIGURA 9 EMISSÕES DE GEE POR FRAÇÃO DE RESÍDUOS – DISPOSIÇÃO FINAL

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



Na Figura 8, as barras com "débitos" e "créditos" são separadas por fração de resíduos reciclados. Assim, os valores positivos na primeira barra ("resíduo reciclado") mostram os débitos (emissões de GEE da reciclagem de plásticos, papel e metais), e os valores negativos na primeira barra mostram os créditos (com a contribuição maior de plásticos e papel, seguidos de reciclagem de alumínio e metais ferrosos). A segunda barra (líquido) representa novamente o resultado líquido, a diferença entre os valores positivos (débitos) e negativos (créditos), e deve ser idêntica ao resultado líquido para "resíduo reciclado" na Figura 7. Na Figura 9, as barras de

---

“Débitos” e “Créditos” são distinguidas da mesma forma pelos resultados para cada tipo de tratamento.

## 8.2 RESULTADOS FINAIS - TODOS OS CENÁRIOS

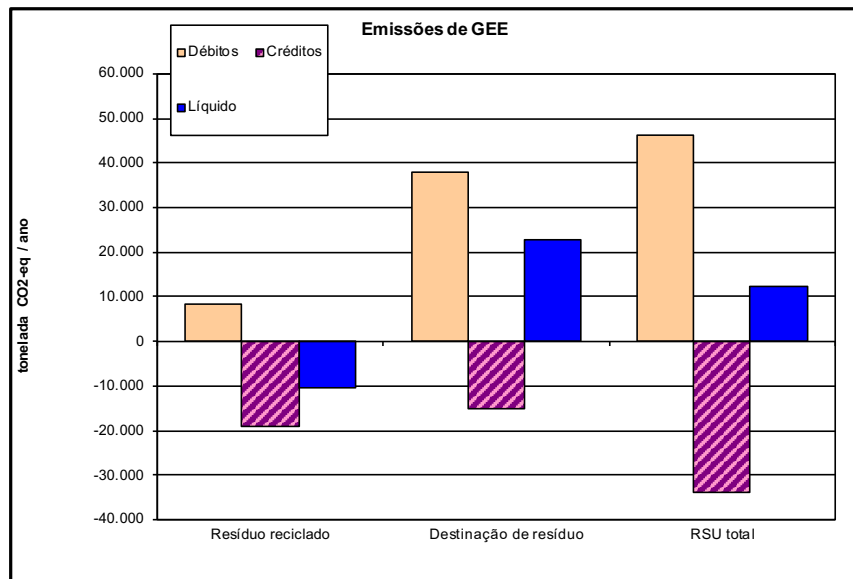
Esta aba mostra os resultados para os fluxos de massa de resíduos e as emissões de GEE para todos os cenários calculados. A parte superior mostra uma tabela e um gráfico de barras comparando as quantidades de resíduos tratadas em cada cenário. Os resultados para as emissões de GEE também são mostrados na Figura 10. Os exemplos mostrados a seguir correspondem aos resultados para os cenários ilustrados na seção 7.

A Figura 10 compara os quatro cenários e mostra os resultados da mesma maneira que na Figura 7. A primeira barra (débitos) mostra o total de emissões de GEE no Cenário-base, a segunda barra mostra os créditos, e a terceira barra, o resultado líquido.



## FIGURA 10 VISÃO GERAL DAS EMISSÕES DE GEE PARA TODOS OS CENÁRIOS

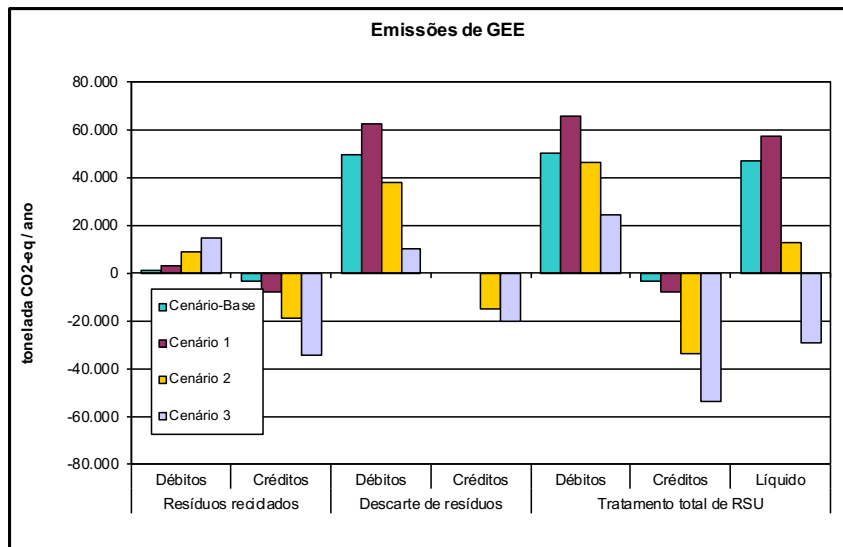
Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



A Figura 11 também mostra os resultados para a comparação dos quatro cenários, mas com uma estrutura diferente e mais detalhada. A primeira parte refere-se aos resultados para reciclagem. As quatro primeiras barras mostram os débitos da reciclagem nos quatro cenários, e as quatro barras seguintes mostram os créditos da reciclagem nos quatro cenários. A parte seguinte mostra o mesmo para a disposição final de resíduos. Na parte final, são mostrados débitos e créditos e resultados líquidos para o tratamento total dos RSU em cada caso, para os quatro cenários.

## FIGURA 11 VISÃO GERAL DAS EMISSÕES DE GEE PARA TODOS OS CENÁRIOS

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).



## ABA “CÁLCULO”

A planilha final da Calculadora contém todos os cálculos, conforme descrito nas seções anteriores. Em geral, são usados parâmetros e fórmulas que ajudam os usuários a entender os cálculos da melhor maneira possível. Além disso, maiores explicações são oferecidas nos comentários das planilhas em Excel.

Os seguintes fatores são fornecidos e os cálculos ocorrem no primeiro setor da planilha:

- Fatores de emissão de demanda de energia
- Teor de carbono das frações de resíduos
- Poder calorífico das frações de resíduos
- Quantidades totais de resíduos, poder calorífico e teor de carbono
- Percentual de reciclagem e demais resíduos e seus valores de poder calorífico e teor de carbono
- Composição calculada dos resíduos (pós-reciclagem)
- Teor de carbono calculado, poder calorífico dos resíduos pós-reciclagem

- Composição calculada do CDR> 50 mm
- Conteúdo de carbono calculado, poder calorífico do CDR> 50 mm
- Composição calculada de resíduos sem CDR> 50 mm
- Teor de carbono calculado, poder calorífico em resíduos sem CDR> 50 mm

Os fatores de emissão são fornecidos (reciclagem) ou calculados (descarte) na seguinte seção:

- Fatores de emissão para reciclagem
- Fatores de emissão para opções de tratamento e/ou disposição final

A seção seguinte mostra os resultados para a quantidade de resíduos e as emissões de GEE (primeiro para reciclagem e depois para tratamento dos resíduos que são transferidos para as planilhas de resultados):

- Resultados da reciclagem em relação ao Potencial de Aquecimento Global (GWP)
- Resultados das opções de tratamento e/ou disposição final em relação ao GWP.

# REFERÊNCIAS

CEMPRE (2019). Cempre Review 2019 apud Associações setoriais/IPEA/SNIS

Cuhls et al. (2015) Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen, Carsten Cuhls, Birte Mähl, Joachim Clemens, gewitra Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 206 33 326, 3709 44 320, TEXTE 39/2015

Ecoinvent (2007). Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1, and Data v2.0. [Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischer R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., Wernet G.]. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.

Ecoinvent (2018). Ecoinvent 3.5 Dataset Documentation, Aluminium production, primary, ingot - IAI Area, South America, Linlin Wu, International Aluminium Institute, Review Tereza Levova, Louis Brimacombe, Emilia Moreno Ruiz, ecoinvent Centre.

Ecoinvent (2018). Ecoinvent 3.5 Dataset Documentation Packaging glass production, white - RER w/o CH+DE, Roland Hischer, Eidgenössische Materialprüf- und -forschungsanstalt, Review Emilia Moreno Ruiz, Gregor Wernet, ecoinvent Centre.

- Ecoinvent (2018). Ecoinvent 3.5 Dataset Documentation, Kraft paper production, bleached – RoW, Roland Hischier, Eidgenössische Materialprüf- und –forschungsanstalt, Review Emilia Moreno Ruiz, ecoinvent Centre, Hans-Jörg Althaus, Eidgenössische Materialprüf- und –forschungsanstalt, ecoinvent Centre.
- Ecoinvent (2018). Ecoinvent 3.5 Dataset Documentation, Graphic paper production, 100% recycled – RoW, Thomas Kägi, Carbotech AG, Review Bo Weidema, Emilia Moreno Ruiz, ecoinvent Centre.
- ENZO (2016). GHG Emissionen Düngemittel; zitiert: Brentrup 2018.
- Inácio, C. (2010). Dinâmica de gases e emissões de metano em leiras de compostagem. Acesso em 25/07/2019. <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli470.pdf>
- Humer, Marion, Lechner, Peter (2001). Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten, Universität für Bodenkultur Wien, Abteilung Abfallwirtschaft/IWGA, Abluft, Hamburg.
- IPCC (1996). Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 pp.

- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- IPCC (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Volume 5 Waste*, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5 Waste*, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland, 2019
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge

---

University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPEA (2010). Relatório: Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília.

IPEA (2012). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos – Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília.

MCTIC (2019). Fatores de emissão. MCTIC Inventários Corporativos.

ÖVA (2008). Leitfaden Methanoxidationsschichten, erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe „Leitfaden Methanoxidationsschichten“, Marion Huber-Humer, Andreas Amann, Tobias Bogolte, Maria Dos Santos, Isolde Hagenauer, Wolfgang Pauliny, Thomas Reichenauer, Andrea Watzinger, Bernhard Wimmer, Friedrich Gartner, Christian Gikopoulos, Günter Gretzmacher, Peter Lechner, Robert Philipp, Wien.

PlasticsEurope (2015). Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers – Vinyl chloride (VCM) and Polyvinyl chloride (PVC), PlasticsEurope/The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM), LCA Practitioner ifeu Heidelberg.

PlasticsEurope (2015). Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers – Expandable Polystyrene (EPS); PlasticsEurope, LCA Practitioner PE International.



- PlasticsEurope (2017). Eco-profile and Environmental Product Declaration of the PET Manufacturers in Europe – Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade) Committee of PET Manufacturers in Europe (CPME). LCA Practitioner ifeu Heidelberg.
- PlasticsEurope (2014). Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers – High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE), PlasticsEurope, LCA Practitioner ifeu Heidelberg. December 2016: update water balance.
- PlasticsEurope (2014). Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers – Polypropylene (PP), PlasticsEurope, LCA Practitioner ifeu Heidelberg. December 2016: update water balance.
- RED EU (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union, Brussels.
- UBA (2012) Indicators for the use of raw materials in the context of sustainable development in Germany, J. Giegrich, A. Liebich, C. Lauwigi, J. Reinhardt, German Federal Environment Agency, Report No. UBA FB 001563, UBA-Texte 01/2012, Dessau

# ANEXO: ORIGEM DOS DADOS E PREMISSAS

## I QUESTÕES GERAIS

Nos aterros sanitários e nos lixões, geram-se grandes quantidades de metano ( $\text{CH}_4$ ). Por outro lado, qualquer tratamento de resíduos orgânicos envolve processos biológicos aeróbios ou anaeróbios, responsáveis pelas emissões de metano e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Como esses GEE desempenham um papel importante na gestão de resíduos, sua relação com o  $\text{CO}_2$  nas mudanças climáticas deve ser levada em consideração.

Através dos anos, pesquisa focada ao comportamento dos diferentes GEE em relação ao  $\text{CO}_2$  tem proporcionado uma série de atualizações dos fatores de equivalência utilizados para determinar a quantidade equivalente de  $\text{CO}_2$ . Os fatores de multiplicação para o Potencial de Aquecimento Global (GWP), com base em um modelo de tempo de 100 anos, tiveram a seguinte evolução ao longo das últimas publicações do IPCC:

TABELA A-1: FATORES DE MULTIPLICAÇÃO PARA O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

Fonte: *Elaboração do autor*

	Metano fóssil	Metano renovável	Óxido nitroso	Referência
Segundo Relatório de Avaliação	21	21	310	(IPCC, 1996)
Terceiro Relatório de Avaliação	23	23	296	(IPCC, 2001)
Quarto Relatório de Avaliação	25	25	298	(IPCC, 2007)
Quinto Relatório de Avaliação	30	28	265	(IPCC, 2013)

Pode-se notar que o peso da forçante radiativa do metano tem aumentado em relação ao CO<sub>2</sub> e diminuído em relação ao N<sub>2</sub>O com a melhoria do conhecimento científico ao longo dos anos. Além disso, pela primeira vez, o Quinto Relatório de Avaliação distingue entre metano baseado em fontes fósseis e em fontes renováveis de carbono. Isso se deve ao fato de que o metano é oxidado a CO<sub>2</sub> na atmosfera e o produto da oxidação do CO<sub>2</sub> de uma fonte fóssil contribui para o efeito estufa, além do precursor metano, enquanto o CO<sub>2</sub> de fonte renovável, não.

Na Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, os fatores de multiplicação mais recentes para metano e óxido nitroso (IPCC, 2013) são usados sempre que possível. No entanto, alguns dados de emissão de GEE em certos processos podem ser mais antigos e, além disso, não diferenciar a contribuição entre seus gases. Consequentemente, em alguns casos, os fatores de multiplicação mais antigos são incorporados.

## II PROCESSOS DE RECICLAGEM

A Calculadora utiliza a abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida para a avaliação dos cenários de gestão de resíduos.

Os cálculos são distintos para atividades de reciclagem relativas ao tipo e à quantidade de materiais a ser recuperados. Para a abordagem do ciclo de vida, é necessário modelar todos os processos desde a coleta de resíduos, contendo material valioso, até a produção do material vendido ao mercado. Esse material de recuperação substitui as cadeias de valor primárias que representam a mesma função e quantidade. Portanto, essas cadeias de valor primário também são modeladas para calcular os benefícios causados pelo uso do material de recuperação. Todas as emissões de GEE dos processos de recuperação e todas as emissões de GEE dos processos de produção



primária são quantificadas para calcular o balanço líquido de GEE para cada opção de reciclagem (ver também capítulo 2).

Seguindo a abordagem ACV para cada material reciclável e opção de recuperação, as seguintes informações e dados são necessários.

Para o sistema de gestão de resíduos:

- **Estrutura do sistema de reciclagem** em relação ao tipo de material no fluxo de resíduos, a tecnologia de reciclagem aplicada, a qualidade do material secundário e seu uso benéfico, que pode substituir o material primário.
- **Emissões de GEE causadas por esse sistema de reciclagem** (aqui também chamado de débitos).

Para o sistema substituído de material primário:

- **Estrutura de produção de material primário** que atenda ao mesmo uso benéfico do material secundário fornecido pelo sistema de reciclagem.
- **Emissões de GEE** causadas pela **produção equivalente de material primário** (aqui também chamado de créditos).

Cada um desses quatro níveis de informação foi investigado para o Brasil, para os recicláveis secos papel, vidro, metais ferrosos, alumínio e plástico, bem como para resíduos orgânicos (alimentares e verdes), considerando compostagem e biodigestão anaeróbia como opções de tratamento.

A melhor informação disponível foi selecionada e adotada como base para os cálculos. Os seguintes princípios foram aplicados:

- Em primeiro lugar, foi priorizado o uso de informações específicas do Brasil, sempre que acessíveis e viáveis.
- Em seguida, informações alternativas disponíveis, nesta ordem de prioridade:
  - regional (América Latina),
  - em todo o mundo (excluindo a Europa) ou
  - informação europeia.
- Também foram combinadas informações de origem não brasileira a características brasileiras (por exemplo, processos de produção que são similares mundialmente para diferentes materiais, mas considerando o mix de eletricidade brasileiro).

Emissões específicas de GEE por massa de material primário e material reciclado, em todo o seu ciclo de vida (“do berço ao túmulo”), foram usadas na Calculadora. Esses fatores de emissão específicos são multiplicados pelas quantidades de materiais primários e reciclados dos diferentes cenários para obter seu saldo líquido de emissões de GEE.

TABELA A-2: FATORES DE EMISSÃO ESPECÍFICOS

Fonte: *Elaboração do autor*

kg CO <sub>2</sub> eq/t Resíduo	Resíduo orgânico		Papel e papelão	Vidro	Metais ferrosos	Alumínio	Plástico
	Biodigestão	Compostagem					
Emissões (produção primária)	90	95	1.256	483	64	697	410
Emissões evitadas (reciclado)	24	24	1.548	604	1.712	9.880	1.910
Resultado líquido	66	71	-292	-121	-1.648	-9.183	-1.500

**Nota:** Para a biodigestão anaeróbia, o valor mostrado na tabela das emissões evitadas representa apenas a produção de fertilizante mineral (que é similar à compostagem). No entanto, a biodigestão anaeróbia adicionalmente produz biogás, que pode ser usado para gerar eletricidade ou biometano, substituindo a eletricidade da rede ou o diesel para fins de transporte – isso não é mostrado nessa tabela, mas considerado na Calculadora. A configuração flexível entre os dois produtos de energia (eletricidade ou biometano) pode ser feita na Calculadora pelo usuário, sendo esse benefício adicional computado.

A modelagem de sistemas primários e secundários, bem como a seleção subjacente de fatores de GEE e suas fontes, são brevemente descritas aqui.

## PAPEL, PAPELÃO

A reciclagem de papel e papelão é um sistema complexo que leva a produtos diferentes dependendo da qualidade do material de entrada. Segundo a Associação Nacional dos Aparistas de Papel (ANAP), a reciclagem de papel resulta principalmente na produção de embalagens, papéis gráficos e higiênicos. Como nenhuma dado de emissão específica de GEE para reciclagem de papel estava disponível para o Brasil, decidiu-se usar os números de produção do EcolInvent 3.5 para papel de impressão e administração feito com fibras 100% recicladas, válidos para o resto do mundo (EcolInvent 2018)<sup>4</sup>. EcolInvent fornece um valor ajustado para todo o ciclo de vida, desde o papel usado até o produto de papel, incluindo perdas, resultando em uma emissão de **1,26 kg CO<sub>2</sub>eq/kg** de papel reciclado.

Uma vez que também não há números específicos de produção e emissões de GEE relacionadas para papel feito de fibra primária, dados do EcolInvent 3.5 também foram adotados. A produção de papel Kraft branqueado, para todo o mundo, com exceção da Europa, é responsável pela emissão de **1,55 kg CO<sub>2</sub>eq/kg** de papel produzido.

---

<sup>4</sup> A EcolInvent Association, empresa suíça, oferece bancos de dados e inventários para avaliação do ciclo de vida. Disponível em: <https://www.ifu.com/en/umberto/ecoinvent-database>



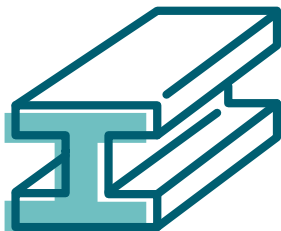


## VIDRO

A reciclagem de vidro é geralmente uma produção combinada de vidro a partir de material primário e material secundário em um processo de fusão. Entretanto, é difícil atribuir a necessidade de energia separadamente à produção de vidro primário e à produção de vidro secundário, e portanto, estimar as emissões de GEE relacionadas a essa energia.

Segundo o CEMPRE (2019), 45% do insumo para a produção brasileira de embalagens de vidro é material secundário. Para a emissão de GEE da produção de vidro, o IPEA (2010) calculou para o Brasil um fator de emissão de  $0,6 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$  de vidro, provavelmente com base em uma entrada de material secundário semelhante. Levando em consideração uma eficiência energética aprimorada de cerca de 10% desde 2010, assumiu-se, após comunicação com especialistas em produção de vidro, que são valores razoáveis e plausíveis para o Brasil emissões da ordem de  $0,6 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$  de vidro para a produção primária e de  $0,48 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$  de vidro para a produção secundária.





## METAIS FERROSOS

Metais ferrosos como ferro e aço podem ser facilmente reciclados por fusão diretamente no alto-forno para a produção de aço primário, ou então fundidos separadamente usando um forno elétrico a arco exclusivamente para o material secundário. Para o Brasil, ambas as tecnologias são aplicadas, correspondendo à adoção de 75% da tecnologia de alto-forno para produção de aço e 25% por forno elétrico a arco (Instituto Aço Brasil, 2010).

Os fatores de emissão de GEE foram deduzidos de diferentes maneiras. A tecnologia do forno a arco requer apenas eletricidade, que foi citada pelo estudo do IPEA (2010) como tendo uma emissão associada de **0,69 kWh/kg** de aço. Com o fator de emissão de GEE da geração de eletricidade em 2017 de **0,093 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh** (MITIC, 2020), isso resultaria em um fator de emissão de GEE para a produção de aço de **0,064 kg CO<sub>2</sub>eq/kg** de aço da reciclagem.

O fator de emissão para a produção de aço primário foi adotado a partir de cálculos fornecidos pela Agência do Meio Ambiente da Alemanha (UBA 2012) com base em dados europeus com um valor de **1,7 kg CO<sub>2</sub>eq/kg** de aço, já que nenhum dado brasileiro pôde ser encontrado.

## ALUMÍNIO

O alumínio de material secundário é produzido por instalações de fundição separadas. O IPEA (2012) relatou uma taxa geral de reciclagem de alumínio para o Brasil de 37% para 2008. Nenhum fator brasileiro de emissão de GEE para a reciclagem de alumínio foi encontrado. Portanto, foi adotado um conjunto de dados do Ecolnvent 3.5 (2018) para o tratamento de sucata de alumínio rotulado, em aplicação para o mundo (com exceção da Europa), resultando em um fator de emissão de GEE de **0,7 kg CO<sub>2</sub>eq/kg** de alumínio secundário produzido.

A produção de alumínio primário, por sua vez, é um processo que consome muita energia. A Ecolnvent 3.5 extrapolou um fator de emissão de GEE do Instituto Internacional de Alumínio (IAI) para a América do Sul de 2015 a 2018. Eles calcularam o fator de emissão em **9,9 kg CO<sub>2</sub>eq/ kg** de lingote de alumínio produzido.

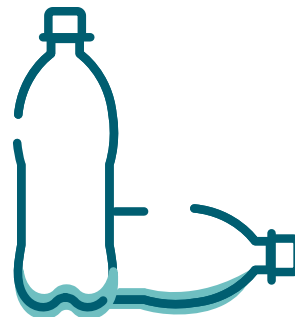


## PLÁSTICOS

Os plásticos são representados por uma família muito ampla de polímeros, que possuem distintas aplicações. Além do tipo de polímero, diferentes aditivos são usados para fornecer certas características demandadas para cada aplicação.

Para o propósito da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos, foi priorizada uma seleção de termoplásticos que podem ser reciclados por fusão e extrusão em granulados secundários para uso subsequente. Esses polímeros são:

- Polietileno (LLDPE, LDPE, HDPE)
- Polipropileno (PP)
- Polietileno tereftalato (PET)
- Poliestireno (PS)
- Policloreto de vinila (PVC)



Outros polímeros não são considerados para reciclagem na Calculadora, devendo ser subtraídos das taxas de reciclagem o máximo possível. Ou seja, a taxa de reciclagem para esse componente do RSU deve ser focada na recuperação de termoplásticos, caso seja possível essa diferenciação.

O ponto de partida para o cálculo das emissões de GEE para a reciclagem de plásticos foi a participação de cada tipo de material no fluxo de resíduos plásticos. A melhor aproximação é usar o consumo de plástico do Brasil como orientação, porque não se pode esperar que uma análise detalhada de classificação por tipos de plástico esteja disponível em nível municipal. As melhores informações disponíveis para o consumo de plástico no Brasil foram divulgadas para 2007 e atingiram cerca de 5 milhões de toneladas, das quais 4,15 milhões pertencem aos termoplásticos (IPEA 2010). Assim, a quantidade máxima de reciclabilidade não pode ultrapassar 83%.

O consumo de termoplásticos em 2007 no Brasil, por tipo de material, é apresentado a seguir (IPEA, 2010, baseado em dados de Abiplast, Abiquim e Abrelpe):

- PE: 30%
- PP: 29%
- PET: 13%
- PS: 9%
- PVC: 19%

A distribuição desse material, assumido como potencialmente reciclável, foi utilizada para calcular o fator de emissão de GEE para o material primário a ser substituído.

As emissões de GEE da reciclagem de termoplásticos podem ser atribuídas predominantemente a uma etapa de separação e ao processo de extrusão movido a eletricidade. O estudo do IPEA (2010) indica um fator de emissão de GEE de 0,41 kg CO<sub>2</sub>eq/kg re-granulado. Não foi possível encontrar mais informações específicas a cada tipo de plástico e o consumo de eletricidade associado a ele. Estudos realizados na Alemanha indicam que a extrusão de plástico é responsável pela emissão de 1,0 kg CO<sub>2</sub>eq/kg re-granulado, o que parece plausível devido à produção de eletricidade mais renovável, que prevalece no Brasil.

A produção de termoplásticos potencialmente substituídos a partir de recursos fósseis primários inclui todo o ciclo de vida, desde a extração do gás e do petróleo bruto, refinamento e craqueamento das matérias-primas até a fabricação do polímero. Existem grandes diferenças na produção e, portanto, nos fatores de emissão de GEE para os vários tipos de polímero.

Para a Calculadora, foram utilizados dados de emissões de plásticos primários da European Plastics Manufacturing Association PlasticsEurope, pois não foram encontrados dados para o Brasil ou a América Latina. Geralmente, presume-se que os processos técnicos subjacentes são bastante semelhantes em todo o mundo. Visto que a PlasticsEurope está constantemente coletando e atualizando o inventário de ACV e os dados de impacto ambiental de todas as unidades de produção na Europa (PlasticsEurope 2014-2017), decidiu-se trabalhar com esses valores por sua qualidade e nível da informação. A partir de diferentes relatórios, os seguintes fatores de emissão de GEE foram usados para calcular uma média ponderada para o Brasil:

- PE 30% \* 1,87 kg CO<sub>2</sub>eq/kg (como LDPE)
- PP 29% \* 1,63 kg CO<sub>2</sub>eq/kg
- PET 13% \* 2,19 kg CO<sub>2</sub>eq/kg
- PS 9% \* 2,37 kg CO<sub>2</sub>eq/kg
- PVC 19% \* 1,99 kg CO<sub>2</sub>eq/kg (como S-PVC)
- Média ponderada: 1,91 kg CO<sub>2</sub>eq/kg



## RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA COMPOSTAGEM

As frações de resíduos orgânicos destinados à compostagem são representadas pelos resíduos de alimentos e resíduos de parques e jardins. Ainda que em determinadas condições ocorra a decomposição de outros materiais orgânicos, como papel, papelão, madeira, partes de fraldas, couro e borracha, estes não foram considerados para compostagem.

A Calculadora compreende por compostagem a produção de um composto de alta qualidade a partir do momento que se adota a perspectiva de “reciclagem” do material orgânico, resultando em um benefício relacionado à substituição de fertilizante mineral como material primário.

Um composto de qualidade deve ter uma alta proporção de substâncias benéficas e ser baixo em materiais perturbadores, como plásticos ou vidro, e contaminantes, como compostos orgânicos persistentes ou metais pesados. A classificação pode ser definida por critérios absolutos relativos a substâncias benéficas e prejudiciais, mas também pode depender do tipo de aplicação.

O tratamento aeróbio de material orgânico será tratado na aba “destinação” e não “reciclagem” da Calculadora se o objetivo for produzir um composto de baixa qualidade para aplicações que não envolvam a substituição de recursos primários (por exemplo, para a camada de cobertura de um aterro sanitário).

Uma variedade de tecnologias de compostagem existe para produzir um composto de alta qualidade – desde uma simples compostagem em leira até tecnologias de compostagem mecanizada e encapsulada de alta tecnologia. Além disso, processos operacionais adicionais, como dispositivos de separação, trituração ou preparação final de produtos, podem ter influência na qualidade dos produtos e nas respectivas emissões de GEE. Em geral, pode-se afirmar que uma coleta separada de resíduos de alimentos, jardins e parques é um elemento-chave para obter um composto de alta qualidade.

Para a Calculadora, uma estimativa razoável teve que ser feita em relação a quais tecnologias de compostagem seriam predominantemente aplicadas no Brasil, no momento presente e nos próximos 20 anos. Uma análise em contexto nacional identificou quatro sistemas principais de compostagem:

- Leiras estáticas com aeração passiva
- Leiras com rotação periódica
- Leiras com aeração forçada
- Compostagem em contêiner (contêineres fechados de tamanhos distintos)

Como apenas uma tecnologia deve ser implementada para a Calculadora, foi decidido aplicar uma mistura de 80% de leiras estáticas com aeração passiva e 20% de compostagem de contêiner.



O tratamento biológico aeróbio, como a compostagem, também causa emissões de GEE, como metano e óxidos nitroso, devido a imperfeições dos processos. Emissões de metano da ordem de 1,2 kg CH<sub>4</sub>/tonelada de resíduo orgânico para um estudo de caso no Brasil, mas sem maiores informações sobre esse dado (Inácio, 2010). Geralmente é difícil encontrar fatores de emissão confiáveis que possam ser associados à compostagem sob diferentes tecnologias e condições de tratamento. Um estudo relevante realizado pela Agência Ambiental Federal Alemã (UBA) fornece uma série de medições de emissões de metano e óxido nitroso, também mostrando os intervalos dos valores (Cuhls et al., 2015).

A análise das tecnologias consideradas, bem como os resultados do estudo em questão, levou à conclusão de usar os seguintes fatores de emissão para a Calculadora:

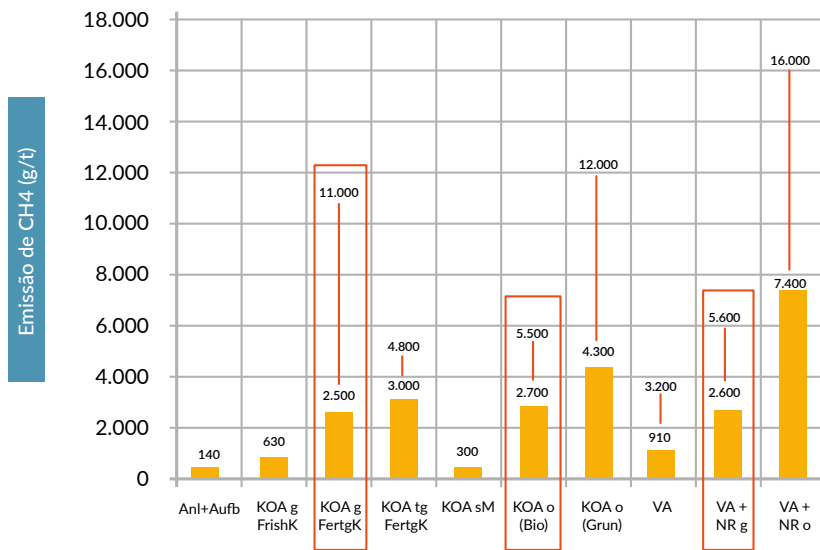
- 2,7 kg CH<sub>4</sub>/t e 79 g N<sub>2</sub>O/t para compostagem aberta em leira (ver coluna “KOA o” na Figura A-1)
- 2,5 kg CH<sub>4</sub>/t e 77 g N<sub>2</sub>O/t para compostagem em contêiner fechado (ver coluna “KOA g” na Figura A-1)

Com os fatores de equivalência de GEE mais recentes para metano e óxido nitroso e uma combinação de tecnologia de 80% aberto e 20% de compostagem em contêiner fechado, o fator de emissão ponderado é de 95 kg CO<sub>2</sub>eq/t de resíduo úmido.

Baseado no estudo de Cuhls (2015), a Figura A-1 apresenta as variações relativas das emissões de CH<sub>4</sub> em relação a uma série de estudos de caso. As grandes margens de variação representam, subsequentemente, a incerteza associada a esse parâmetro importante para os cálculos de GEE.

FIGURA A-1 FATORES DE EMISSÃO PARA EMISSÕES DE METANO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO MEDIDOS POR CUHLS ET AL. (2015)

Fonte: Cuhls et al. (2015)



**Notas:** KOA g – compostagem tipo contêiner fechado, KOA o – compostagem em leira aberta; VA + NR g – digestão anaeróbia com pós-tratamento fechado.

As atividades operacionais da compostagem, como dispositivos de separação, trituração ou preparação final de produtos, geram emissões de GEE que são pequenas e insignificantes em comparação com as altas margens de incerteza das emissões de GEE do próprio processo de compostagem. Portanto, elas não são mais consideradas no cálculo do total de emissões de GEE da compostagem.

A função de substituição do fertilizante orgânico foi apontada como o principal benefício para a aplicação de composto de alta qualidade no Brasil. Fertilizantes minerais produzidos quimicamente, com alto consumo de energia, são substituídos pela mesma quantidade de nutrientes. Portanto, o conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio nos resíduos alimentares foi derivado de medições de nutrientes por Benites et al. 2004 (citado em Inácio, 2010) e relacionado ao aporte de resíduos orgânicos. Considerou-se que 1 tonelada de resíduo orgânico contém 5,4 kg de nitrogênio, 1,6 kg de óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 5,2 kg de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O).

A produção equivalente de fertilizante mineral a partir de recursos químicos está associada às emissões de GEE apresentadas pela ENZO Calculator (2016):

- Fertilizante de nitrogênio:  
3,4 kg CO<sub>2</sub>eq/kg N (como nitrato de amônio)
- Fertilizante de fósforo: 1,56 kg CO<sub>2</sub>eq/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>
- Fertilizante de potássio: 0,58 kg CO<sub>2</sub>eq/kg K<sub>2</sub>O

O crédito de GEE para a aplicação de fertilizantes proveniente de 1 tonelada de resíduo orgânico úmido convertido em composto é calculado como:

- 5,4 kg N = 18,4 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido
- 1,6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 2,5 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido
- 5,2 kg K<sub>2</sub>O = 3,0 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido

Considerando os dados apresentados, o fator de substituição do fertilizante mineral, em termos de emissões evitadas de GEE, é de 23,9 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo úmido orgânico.

## RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Outra opção de tratamento biológico é a biodigestão anaeróbia, em que o material orgânico é convertido em biogás em condições de ausência de oxigênio, resultando também em um composto estabilizado.

Medições de GEE de Cuhls et al. (2015) demonstraram uma emissão de GEE de biodigestão anaeróbia com pós-tratamento fechado dos resíduos de fermentação (digestato) de 2,6 kg CH<sub>4</sub>/tonelada e 66 g N<sub>2</sub>O/tonelada. Isso resulta em uma emissão total de GEE de 90,2 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido.

**Nota:** Se o tratamento dos resíduos da biodigestão não for realizado em sistema fechado, a emissão de GEE pode ser superior ao dobro (227 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido).

O digestato (material restante da biodigestão) contém os mesmos nutrientes do composto produzido aerobicamente. Assim, o mesmo benefício será atribuído ao resíduo que substitui o fertilizante mineral por um equivalente a 23,9 kg CO<sub>2</sub>eq/tonelada de resíduo orgânico úmido tratado via biodigestão anaeróbia.

Por sua vez, o biogás resultante do processo de biodigestão anaeróbia apresenta duas possíveis aplicações a geração de eletricidade ou sua utilização como biometano para a substituição de diesel no setor de transporte. Se uma quantidade relativa para a biodigestão anaeróbia é inserida na planilha “Reciclagem”, deve-se escolher qual das duas possibilidades será aplicada para o uso do gás (entre 0% e 100%), como visto na Tabela A-3.

#### TABELA A-3 - RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA RECICLAGEM E BIOGÁS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Resíduos orgânicos para reciclagem	em %	em %	em %	em %
Compostagem	0%	100%	50%	0%
Digestão anaeróbia (DA)	0%	0%	50%	100%
Total (deve ser 100%)	0,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	em %	em %	em %	em %
Biogás da digestão anaeróbia para produção de eletricidade	0%	0%	100%	0%
Biogás da digestão anaeróbia para produção de biometano	0%	0%	0%	100%

O cálculo do rendimento do biogás adota uma produtividade fixa de 100 Nm<sup>3</sup> por tonelada de resíduo orgânico tratado, com um teor de metano de 60 vol%. 100 Nm<sup>3</sup> de biogás e uma taxa de degradação de 30%-35% do carbono orgânico em uma mistura de resíduos alimentares e de poda verde. É importante enfatizar que substratos diferentes, por exemplo, com alto teor de gordura, podem levar a diferentes rendimentos de gás. No entanto, a Calculadora parte do suposto de que as estimativas adotadas são uma base aceitável para o seu objetivo. Qualquer planejamento detalhado para um projeto efetivo de biodigestão anaeróbia deve ser orientado por um estudo específico e pelas características do substrato.

Para a geração de eletricidade, a Calculadora adota como premissa um motor gerador com uma eficiência de 30%. Como resultado, 1 tonelada de resíduo orgânico produzirá 180 kWh de eletricidade. As emissões de GEE substituídas são calculadas com o fator de emissão de GEE da eletricidade da rede nacional do Brasil, conforme definido na aba “Início”.

Para a produção de biometano, o metano deve ser extraído do biogás, deixando para trás uma porção de CO<sub>2</sub> altamente concentrado (de origem regenerativa, sem potencial de aquecimento global). O conteúdo de energia do biometano separado, que será utilizado energeticamente, é calculado em 600 kWh por tonelada de resíduo orgânico introduzido no tratamento via biodigestão anaeróbia. E este biometano pode substituir o diesel no transporte. O diesel de fontes fósseis usadas para transporte possui um fator de emissão de GEE específico de 94 g CO<sub>2</sub>eq/MJ ou 338 g CO<sub>2</sub>eq/kWh (RED EU, 2015).

### III OPÇÕES DE DISPOSIÇÃO FINAL NO SOLO

Para a disposição final dos rejeitos no solo, estão previstas as seguintes opções (ver também capítulo 6):

#### Operação descontrolada

- Descarte a céu aberto;
- Queima a céu aberto;

#### Disposição final no solo

- Lixão;
- Aterro controlado sem coleta de gás;
- Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás.

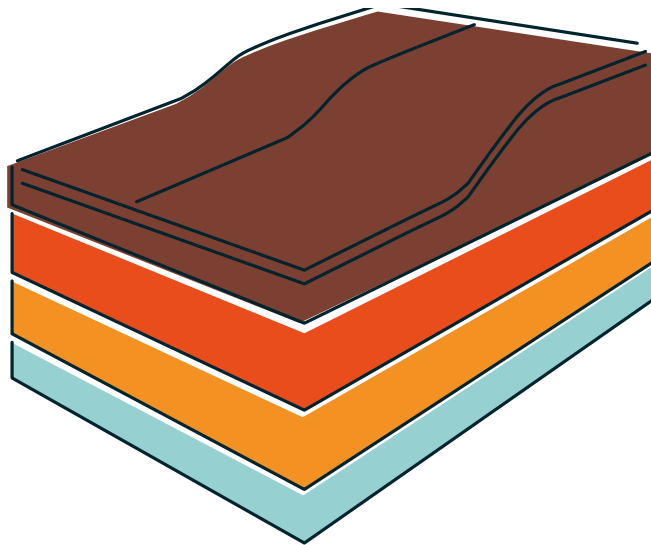
**Disposição a céu aberto:** Trata-se de resíduos dispostos no solo de maneira aleatória, mediante descarte irregular. Nesse caso, os resíduos normalmente se decompõem em condições aeróbias e, portanto, não produzem metano. Mas, por ser ilegal, não deve ser considerada uma opção para reduzir as emissões de GEE na gestão de resíduos. Essa opção está incluída na Calculadora porque a disposição irregular a céu aberto ainda ocorre no Brasil e em muitos outros países.

**Queima a céu aberto:** A queima de resíduos é uma prática ilegal e resulta em emissões de fumaça associadas a uma incineração incompleta, que produz substâncias altamente tóxicas, aumentando ainda mais a ameaça à saúde humana e ao meio ambiente. Para questões de mudança climática, os itens de base fóssil em resíduos queimados serão convertidos em CO<sub>2</sub> e impactarão também o aquecimento global. Além disso, o chamado *black carbon* é gerado na fumaça e contribui para o aquecimento global. A queima a céu aberto também está incluída na Calculadora por representar uma prática utilizada no Brasil, na América Latina e em outros países. Para a Calculadora, a oxidação de resíduos fósseis como plásticos em CO<sub>2</sub> está incluída nesta opção, mas não o efeito de *black carbon*.

## DISPOSIÇÃO FINAL NO SOLO

A disposição final dos resíduos no solo pode ser considerada o contribuinte mais importante para o aquecimento global por meio da gestão de resíduos, devido à sua ampla utilização e às elevadas emissões de metano associadas a essa prática, por sua componente anaeróbia de degradação dos resíduos. As diretrizes do IPCC para reportar as emissões de GEE (IPCC, 2006) dedicam metodologias extensas à questão de como medir e como calcular as emissões de metano de aterros sanitários.

O Refinamento do IPCC às diretrizes de 2006, divulgado em novembro de 2019 (IPCC, 2019), fornece diretrizes atualizadas e uma nova categorização para tipos de aterro. Afirma que o desempenho da aeração do aterro depende muito da idade, da composição e das propriedades dos resíduos, bem como da capacidade e tecnologia dos locais de disposição final de resíduos sólidos. Segundo essas características, um Fator de Correção de Metano (MCF) deve ser aplicado, considerando o grau de aeração de um aterro e levando à redução da formação de metano.





A categorização atualizada de tipos de disposição de resíduos e o MCF relacionado são apresentados na Tabela A-4 (IPCC, 2019):

**TABELA A-4 CATEGORIZAÇÃO DE TIPOS DE DISPOSIÇÃO E O MCF (IPCC, 2019)**

Fonte: IPCC, 2019

Tipos de disposição final	Fator de Correção de Metano (MFC)	Observação
Gerenciado - anaeróbico	1,0	Estes devem ter localização controlada de resíduos (ou seja, resíduos direcionados a áreas de deposição específicas, um grau de controle de eliminação e um grau de controle de incêndios) e incluirão pelo menos um dos seguintes: (i) material de cobertura; (ii) compactação mecânica; ou (iii) nivelamento dos resíduos.
Gerenciado - semi-anaeróbico	0,5	Estes devem ter localização controlada de resíduos e incluirão todas as seguintes estruturas para a introdução de ar na camada de resíduos: (i) material de cobertura permeável; (ii) sistema de drenagem de chorume; (iii) regular a lagoa de chorume; e (iv) sistema de captação de biogás.
Mal gerenciado - semi-aeróbico	0,7	Quando o tipo de local de disposição final é semi-aeróbico é gerenciado sob uma das seguintes condições, ele é considerado mal administrado; (i) condição de afundamento do sistema de drenagem do chorume; (ii) fechamento da válvula de drenagem ou sem abertura da saída de drenagem; (iii) tamponamento da saída de captação de biogás.
Bem gerenciado - aeração ativa	0,4	A aeração ativa de aterros gerenciados inclui a tecnologia de aeração de baixa pressão in-situ, pulverização de ar, bioventilação, ventilação passiva com extração (sucção). Estes devem ter disposição controlada de resíduos e incluir sistema de drenagem de chorume para evitar o bloqueio da penetração de ar, e (i) material de cobertura; (ii) sistema de injeção de ar ou extração de gás sem secagem de resíduos.

Tipos de disposição final	Fator de Correção de Metano (MFC)	Observação
Mal gerenciado - aeração ativa	0,7	Quando o local de disposição final, que está equipado, bem como a aeração ativa do local de disposição final, é gerenciado sob uma das seguintes condições, é julgada como má gestão; (i) bloqueio do sistema de aeração devido a falha de drenagem; (ii) falta de umidade disponível para microrganismos devido à aeração de alta pressão.
Inadequado - profundo (> 5 m de resíduos) e/ou lençol freático alto	0,8	Todos os locais de disposição final que não atendem aos critérios de gerenciamento e que tenham profundidades iguais ou superiores a 5 metros e/ou lençol freático alto próximo ao nível do solo. A última situação corresponde ao abastecimento de águas superficiais, como lagoas, rios ou pântanos, contaminada por resíduos.
Inadequado - raso (<5 m de resíduos)	0,4	Todos os locais de disposição final que não atendem aos critérios de gerenciamento e que possuem profundidades inferiores a 5 metros.
Não classificado	0,6	Somente se os países não puderem categorizar seus locais de disposição final nas categorias acima de gerenciado e não gerenciado, o MCF para esta categoria pode ser usado.

Em vez de cinco tipos de disposição final e MCFs relacionados das Diretrizes do IPCC de 2006, o refinamento de 2019 sugere oito categorias de aterramento, conforme apresentado na tabela anterior. Essa abordagem pode ser melhor para relatar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), usando o modelo de decaimento de primeira ordem (*First Order Decay*, FOD), mas requer um bom conhecimento de um aterro.

Para fins da Calculadora, decidiu-se mantê-la mais simples e trabalhar com três tipos de disposição final no solo:

- Lixão (como tipo de disposição final “não gerenciada e raso”), com  $MCF = 0,4$
- Aterro controlado sem coleta de gás ou lixão com maior profundidade (como tipo de disposição final “não gerenciada e profundo”), com  $MCF = 0,8$
- Aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás (como tipo de disposição final “gerenciada anaeróbia”), com  $MCF = 1$

Para obter explicações adicionais, consulte a seção 6.2.

A implementação desses três tipos de disposição final no solo é considerada suficiente para a Calculadora porque ela não deve se concentrar em relatar a situação mais precisa do aterro, mas permitir a avaliação de futuras mudanças no aterro – por exemplo, com relação ao modo de operação e à coleta e tratamento do gás gerado e captado.

No contexto da realidade da gestão de resíduos no Brasil e das estatísticas oficiais (SNIS), uma relação simples foi usada para os cálculos:

- Lixão = não gerenciado e raso
- Aterro controlado = não gerenciado e profundo
- Aterro sanitário = gerenciado anaeróbio

A Calculadora usa a metodologia teórica de produção de gás para comparar as opções de gestão de resíduos. Esse é o método mais simples para calcular as emissões de metano relacionadas à gestão dos resíduos. Ela assume que todo o metano potencial é hipoteticamente liberado no ano em que o resíduo é gerado. Essa suposição segue a abordagem ACV e não as diretrizes do IPCC, que aplicam o modelo de decaimento de primeira ordem para calcular a dependência do tempo na produção de metano. Isso não é necessário para a abordagem ACV.

A abordagem ACV requer um entendimento específico da geração de gás de aterro e sua coleta; portanto, os parâmetros necessários para os cenários de gestão de resíduos na Calculadora referem-se:

- à eficiência da captura de gás (eficiência média ao longo da vida útil do aterro sanitário)
- ao tratamento do gás de aterro captado e seus benefícios potencialmente gerados (eletricidade ou biometano).

As emissões de metano relacionadas ao aterramento dos resíduos são calculadas de forma consistente para todos os tipos de aterro, conforme os MCFs adotados. Entretanto, o potencial efetivo de geração de metano para um cenário é determinado individualmente com base no conteúdo de carbono orgânico dos resíduos restantes após a reciclagem.

A Calculadora presume que o carbono orgânico se decompõe em biogás de aterro com uma taxa de 50% ao longo da vida útil do aterro (a taxa de decomposição em um aterro é mais alta em comparação com um processo de biodigestão anaeróbia por causa do longo período de degradação). Além disso, presume-se que 55% do carbono orgânico decomposto é convertido em metano e 45% em CO<sub>2</sub> biogênico, sendo, portanto, neutro para o clima. Em seguida, os MCFs são aplicados conforme descrito anteriormente.

Na Calculadora, uma coleta de gás ativa só pode ser implementada para aterros sanitários com MCF = 1. Geralmente, a eficiência da coleta de gás pode ser selecionada na Calculadora sem quaisquer limitações predefinidas. No entanto, é preciso ter em mente que a eficiência da coleta de gás deve incluir toda a vida útil do aterro sanitário e todas as deficiências que surgirem ao longo do tempo. Ou seja, certo conservadorismo é sempre benéfico na modelagem.

Segundo o IPCC (2006), as medições de eficiências de captação reportadas para projetos de recuperação de gás em aterros atingiram valores de 9% até mais de 90%. Mas tais medições refletem, principalmente, uma situação específica no tempo, um retrato estático durante o processo de degradação anaeróbia. Durante a vida útil de um aterro, presume-se que no máximo 50% do metano potencialmente gerado pode ser capturado, mesmo usando técnicas avançadas de coleta de gás. A eficiência média da coleta de gás depende do tempo. Nos estágios iniciais de disposição de resíduos no aterro, estes não são cobertos por uma camada mineral. Portanto, apenas uma pequena quantidade do metano gerado pode ser capturada. Posteriormente, a taxa de captura de gás é consideravelmente maior quando poços de captura de gás são instalados e o aterro sanitário é coberto por uma camada mineral. Os exemplos simplificados a seguir explicam como a eficiência de coleta de gás pode ser estimada.

A Calculadora permite tratar o gás de aterro coletado de diferentes maneiras:

- Sem tratamento (apenas ventilação)
- Queima para a atmosfera (Flare)
- Geração de eletricidade
- Produção de biometano

Em alguns casos, um sistema de coleta de gás ativo ou passivo foi instalado apenas para minimizar os efeitos do armazenamento de gás no aterro para evitar o risco de explosões. Portanto, todo o metano coletado é liberado para a atmosfera se nenhum tratamento adicional existir, causando um alto impacto relacionado ao aquecimento global. Já a simples queima do gás de aterro coletado em uma tocha técnica (flare) – como segunda opção – oxida o metano em  $\text{CO}_2$  e reduz o efeito estufa a zero.

A produção de eletricidade e biometano também resulta na destruição final do metano do gás de aterro coletado. Mas essas duas opções fornecem um benefício adicional para substituir a energia equivalente à eletricidade média da rede brasileira ou diesel fóssil para o transporte, no caso do biometano. A Calculadora estima um conteúdo de energia do metano de  $10 \text{ kWh/m}^3$ . As emissões de GEE substituídas são calculadas para a energia elétrica com o fator de emissão de GEE de eletricidade conforme definido na aba “Início”, e para o biometano, com o fator de emissão de GEE  $338 \text{ g CO}_2\text{-eq./kWh}$  para diesel substituído (ver também explicação em Biodigestão Anaeróbia, Anexo II).

Importante lembrar que as quatro opções de tratamento para o gás de aterro coletado podem ser escolhidas em paralelo, mas devem sempre somar 100%.

Além da coleta ativa de gás, todo o gás não capturado é emitido como emissão difusiva. Isso se aplica a quaisquer lixões, a aterros controlados e ao gás não capturado de aterros sanitários.

Não obstante, as Diretrizes do IPCC (2006) introduzem um fator de oxidação (OX) que reflete a quantidade de  $\text{CH}_4$  que é oxidado em uma cobertura de solo ou outro material de cobertura de um aterro sanitário, quando bem administrado. O IPCC 2006 afirma que o valor-padrão do fator de oxidação para tipos de disposição não gerenciados, como lixão e aterro controlado, é zero, o que também é assumido pela Calculadora.

Por sua vez, o IPCC (2006) afirma que “o uso do valor de oxidação de 0,1 é justificável para tipos de disposição cobertos e bem gerenciados para estimar a oxidação do metano durante sua difusão através da camada superior e o escape por rachaduras/fissuras”. Por esse motivo, na categoria “aterro sanitário” da Calculadora, geralmente se modela um fator de oxidação de 10%.

Fatores de oxidação maiores que 10% podem ser aplicados apenas se instalações específicas foram construídas para aumentar a oxidação na camada de cobertura de um aterro sanitário. Essas camadas são denominadas de Camada de Oxidação de Metano (Methane Oxidation Layer, MOL). De acordo com estudos de projetos e medições, alguns requisitos podem ser introduzidos para atingir uma alta eficiência de uma MOL, mostrada na Figura A-2:

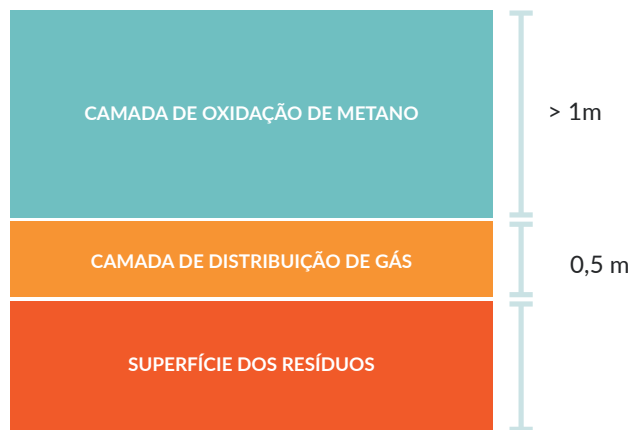
- O potencial de geração de gás do corpo de um aterro não deveria exceder certos valores. Altos fluxos de metano podem passar por uma camada de oxidação sem redução significativa. Um fluxo de metano inferior a 5 litros de  $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{h}$  deve ser alcançado para se enquadrar como uma MOL de alta eficiência (Humer, 2008). Esse pode ser o caso após o fechamento de um sistema ativo de coleta de gás de aterro, quando a coleta de gás não for mais eficiente.



- Uma camada de distribuição de gás deveria ser construída para garantir uma distribuição homogênea de metano antes de entrar na MOL. Deve evitar a quebra de fluxos de metano de áreas de alta concentração. Altas concentrações localizadas de metano podem facilmente sobrecarregar a capacidade de oxidação na Camada. Essa camada de distribuição de gás pode ser constituída de cascalho ou pedras para permitir que o metano seja distribuído facilmente. Recomenda-se usar uma espessura de 0,5 m.
- A própria MOL deveria ser constituída por uma mistura de solo e composto maduro que forneça superfície suficiente para a reação de oxidação, garantindo um movimento lento do gás e certa capacidade de retenção de água, observando as condições ideais de oxidação. Recomenda-se utilizar uma espessura de cerca de 1 m para essa camada (ÖVA, 2008).

FIGURA A-2 CONSTRUÇÃO RECOMENDADA PARA UMA CAMADA DE OXIDAÇÃO DE METANO EFICIENTE

Fonte: Öva, 2008



A Calculadora inclui a possibilidade de alterar o valor de oxidação do metano pela instalação de uma camada de cobertura avançada para atingir taxas de oxidação mais elevadas (ver Figura A-2). Essas eficiências de oxidação do metano podem ser aplicadas dependendo das características dos resíduos, do aterro e da construção da camada. O IPCC exige que o uso de um valor de oxidação superior a 10% seja claramente documentado, referenciado e apoiado por dados relevantes. O usuário pode alterar o fator de oxidação do metano separadamente para cada cenário na Tabela A-5, mas deve manuseá-lo com cuidado. As células para alterar o fator são deixadas em branco mesmo quando estão abertas para alterações.

#### TABELA A-5 EFICIÊNCIA DA OXIDAÇÃO DE METANO PELA CAMADA DE OXIDAÇÃO

Fonte: IPCC (2019)

Efeito da oxidação da cobertura do aterro	Padrão IPCC 10%		
Eficiência da oxidação de metano pela camada de oxidação	10%	10%	10%

## IV OPÇÕES DE TRATAMENTO DO RESÍDUO

Quatro tipos de tratamento e, adicionalmente, a possibilidade de incineração são previstos na Calculadora para o Brasil. As quatro opções de tratamento dos resíduos após a reciclagem são:

1. Tratamento biológico da matéria orgânica + uso como cobertura de aterro (Tratamento biológico + cobertura de aterro)
2. Produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira e todo o resto destinado ao aterro sanitário (CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro)
3. Produção de CDR a partir de resíduos secos como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira + tratamento biológico do resto + uso do material tratado como cobertura de aterro (CDR seco + cimenteira + trat. biol.+ cobertura de aterro)
4. Produção de CDR + biosecagem do rejeito para a produção de um CDR orgânico + ambos CDR como insumo para coprocessamento na indústria cimenteira (CDR seco + biosecagem CDR org. + cimenteira)

As opções de tratamento 1 e 3 consistem em um processo de tratamento biológico, que pode ser um tratamento aeróbio simples (como compostagem) ou uma digestão anaeróbia. Ambos os processos biológicos estão disponíveis na Calculadora para as opções 1 e 3, perfazendo seis opções de tratamento.

O tratamento padrão aqui é o aeróbio simples (compostagem).

A biodigestão anaeróbia gera biogás, que pode ser usado para produzir eletricidade ou biometano para fins de transporte (idêntico ao biogás de aterro). A escolha do produto a partir do biogás pode ser feita com as seguintes células na Tabela A-6:

### Para a opção de tratamento 1:

TABELA A-6 OPÇÕES DE TRATAMENTO 1 E 3

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

Tratamento biológico + cobertura de aterro			
Produção de eletricidade a partir do biogás			
Produção de biometano a partir do biogás			
Total (deve ser 100% ou 0%)	0,00%	0,00%	0,00%

### Para a opção 3:

CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro			
Produção de eletricidade a partir do biogás		100%	70%
Produção de biometano a partir do biogás			30%
Total (deve ser 100% ou 0%)	0,00%	100,00%	100,00%

Caso a biodigestão anaeróbia se aplique a um cenário de gestão de resíduos como tratamento das opções 1 e 3, a seleção do uso previsto para o biogás (eletricidade ou biometano) deverá ser feita. Neste caso, aplica-se uma mudança automaticamente do tratamento aeróbio preinstalado para a biodigestão anaeróbia. O uso de biogás deve somar 100% (ou ser deixado em 0% ou em branco para o tratamento aeróbio simples padrão).

As premissas técnicas para as seis opções de tratamento são descritas a seguir. A maioria das especificações técnicas foram sincronizadas com a [Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU](#).



### Opção 1a: Tratamento biológico aeróbio + uso como cobertura de aterro

O RSU após a reciclagem de materiais principais (orgânicos e secos) é encaminhado a uma instalação de tratamento biológico que pode ser compostagem em leiras ou qualquer outra instalação aerada passiva ou ativamente. Os GEE emitidos na etapa de tratamento consistem em  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  do próprio tratamento e do consumo de energia para operá-lo.

Como não existe fator de emissão confiável para o tratamento aeróbio de resíduos após a reciclagem, decidiu-se usar dados de medição da Alemanha relatados em Cuhls (2015). Para o gás bruto de uma estação de TMB com tecnologia de leiras, o autor relatou um intervalo de 0,44 a 1,2 kg  $\text{CH}_4$ /tonelada de resíduo para emissões de metano e de 0,03 a 0,09 kg de  $\text{N}_2\text{O}$ /tonelada de resíduo para emissões de óxido nítrico. A mediana dessas medições e os fatores de conversão para  $\text{CO}_2$  foram aplicados para esses gases, resultando para o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{N}_2\text{O}$ , juntamente, uma emissão de GEE de 35 kg  $\text{CO}_2$ -eq/tonelada de resíduo. Para atividades de compostagem, a Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU relatou uma demanda de eletricidade de 5 kWh/tonelada de resíduo, resultando em 0,5 kg  $\text{CO}_2$ -eq/tonelada (usando a eletricidade brasileira da aba “Início”), que é adicionada como consumo de energia com as suas emissões GEE.

Os resíduos tratados biologicamente podem ser usados para aplicações como camada de aterro. Assim, não ocorre uma substituição de matéria primária e os benefícios dessa etapa evitam emissões do metano pela disposição final no aterro.

### Opção 1b: Tratamento biológico aeróbio + uso como cobertura de aterro com indicação para uso do gás

O RSU após a reciclagem é encaminhado a uma instalação de biodigestão anaeróbia. As emissões de GEE da etapa de tratamento consistem nas emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  da fase aeróbia pós-digestão e no consumo de energia para operar as unidades de biodigestão e pós-digestão.

Novamente, nenhum dado confiável de emissão foi encontrado para essa opção de tratamento. Como a fase de pós-digestão é um tratamento aeróbio como na opção 1a, decidiu-se trabalhar com o mesmo fator de emissão de GEE de 35 kg  $\text{CO}_2$ -eq/tonelada de resíduo. Para atividades de compostagem, a Ferramenta de [Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU](#) relatou uma demanda de eletricidade de 100 kWh/Mg residual, resultando em 9,3 kg  $\text{CO}_2$ -eq/Mg de resíduo, adotando o fator de emissão da rede elétrica brasileira definido na aba “Início”.

A biodigestão anaeróbia fornece um rendimento de biogás dependendo do conteúdo calculado de carbono orgânico no fluxo de resíduos após a reciclagem, uma taxa de decomposição de 35% e uma parcela de metano de 60%. De acordo com os dois produtos feitos a partir do biogás, o conteúdo energético é calculado e as emissões evitadas são determinadas pela substituição da quantidade de energia equivalente da rede elétrica brasileira ou diesel para o transporte.

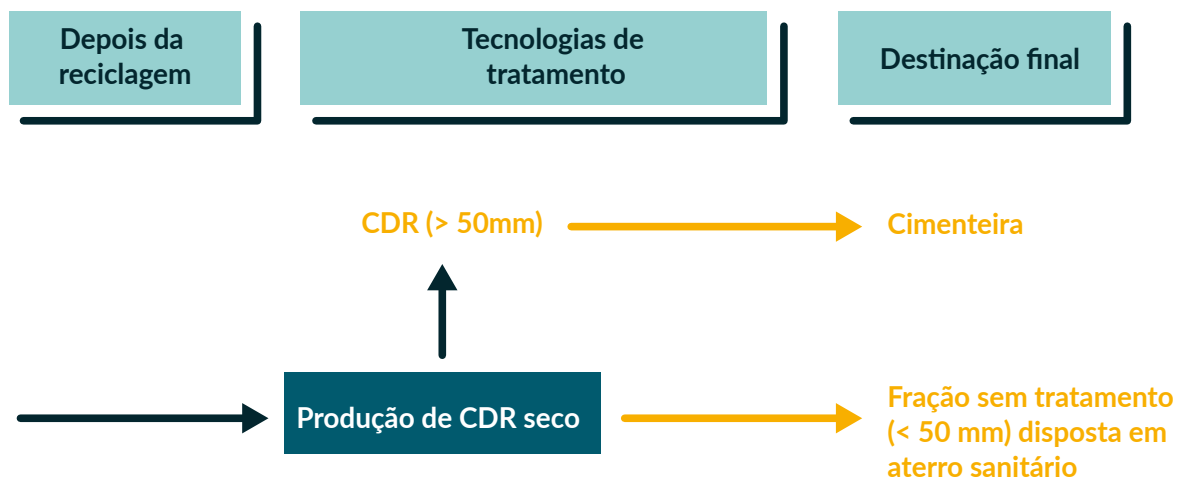
Os resíduos tratados biologicamente podem ser usados como camada de aterro (veja descrição 1a.)

## Opção 2: Produção de CDR para coprocessamento + rejeito para aterro sanitário (CDR seco + cimenteira + rejeito para aterro)

Nesta opção de tratamento, a produção de CDR a partir de resíduos secos pode ser alcançada através de intervenções mecânicas entre elas um tambor rotativo com uma malha de 50 mm.. Esse dispositivo seleciona grandes resíduos, como plásticos, papel, têxteis etc., que podem ser usados para coprocessamento, a exemplo da indústria de cimento, para substituir outros combustíveis. O restante que passa pelas malhas é, em sua maioria, de origem orgânica e, nesta opção de tratamento, depositado diretamente em aterro sanitário.

FIGURA A-4 CDR SECO + CIMENTEIRA + REJEITO PARA ATERRRO

Fonte:





A separação levará a uma fração maior que 50 mm de alto poder calorífico que ainda deverá ser triturada, homogeneizada e compactada para servir como combustível à indústria cimenteira. A Calculadora determina a composição do produto CDR estimando a eficiência de cada componente de resíduo, conforme apresentado na Tabela A-7.

#### TABELA A-7 COMPOSIÇÃO CALCULADA DE CDR > 50mm

Fonte: Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Manejo de RSU (MDR, 2021).

##### Composição calculada de CDR > 50 mm

Resíduo restante	cota > 50mm	Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2
Resíduos de alimentos				
Resíduos de jardins e parques				
Papel, papelão	70%	8,8%	8,0%	6,1%
Plásticos	70%	9,3%	9,3%	8,1%
Vidros				
Metais ferrosos				
Alumínio				
Têxteis	90%	2,4%	2,5%	3,1%
Borracha e couro	80%	0,6%	0,6%	0,7%
Fraldas	100%	4,1%	4,4%	5,3%
Madeira	90%	4,3%	4,6%	5,6%
Resíduos minerais				
Outros	50%	2,4%	2,6%	3,1%
<b>Total</b>		<b>31,8%</b>	<b>31,9%</b>	<b>32,1%</b>

A fração de resíduo que será enquadrado como CDR é definida manualmente pelo usuário e aplicada à composição de entrada dos vários resíduos provenientes de diferentes atividades de reciclagem. Consequentemente, o fluxo de CDR e o fluxo de resíduos orgânicos remanescentes devem-se as novas características relacionadas ao poder calorífico e ao conteúdo de carbono fóssil e orgânico. A demanda de energia elétrica para a etapa de separação foi definida como de 32,5 kWh/tonelada de resíduo e é convertida em emissões de GEE considerando o fator de emissão da rede brasileira.

O CDR, com seu poder calorífico específico e conteúdo de carbono fóssil, é utilizado na indústria de cimento substituindo os combustíveis fósseis, sendo o coque de petróleo o combustível fóssil típico. Portanto, um poder calorífico equivalente de CDR é atribuído à respectiva quantidade de coque de petróleo. As propriedades do coque de petróleo – 90% de carbono fóssil e poder calorífico de 33,5 MJ/kg – permitem calcular a emissão de GEE evitada na indústria de cimento.

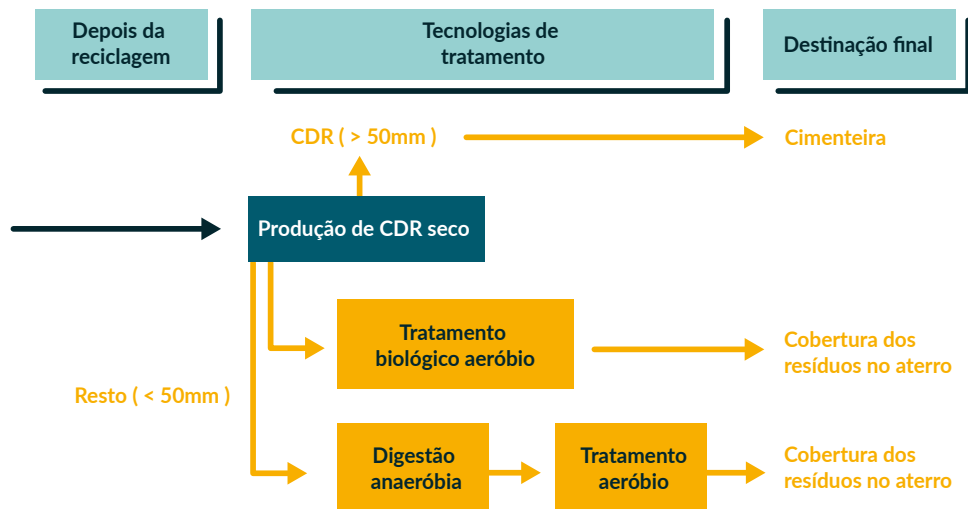
A fração residual, constituída principalmente por orgânicos que representam a fração menor do que 50 mm, é depositada em aterro sanitário. As características do aterro sanitário seguem as configurações de eficiência de coleta e tratamento de gás definidas para o aterro sanitário naquele cenário.

### **Opção 3: Produção de CDR para coprocessamento + tratamento biológico + uso do material tratado como cobertura de aterro (CDR seco + cimenteira + trat. biol. + cobertura de aterro)**

A produção de CDR com subsequente tratamento biológico do resto da fração orgânica combina a opção 1 e a opção 2. Uma fração seca de CDR pode ser usada na indústria de cimento e o resto orgânico será preparado para um material de uso como camada do aterro.

FIGURA A-5 CDR SECO + CIMENTEIRA + TRAT. BIOL. + COBERTURA DE ATERRO

Fonte:



### Opções de tratamento 3a e 3b

O resíduo após a reciclagem é encaminhado para o tratamento mecânico que conta com tambor rotativo para separar o CDR seco dos orgânicos. Em seguida, o CDR é preparado por meio de outros equipamentos para substituir o coque de petróleo na indústria de cimento. As mesmas características se aplicam à opção de tratamento 2.

Aqui, o fluxo de resíduos orgânicos após a separação do CDR é submetido a um tratamento biológico que pode ser especificado, como a opção 1, em um tratamento aeróbio (3a) e uma biodigestão anaeróbia (3b). As especificações técnicas seguem exatamente as disposições feitas para as opções (1a) e (1b).

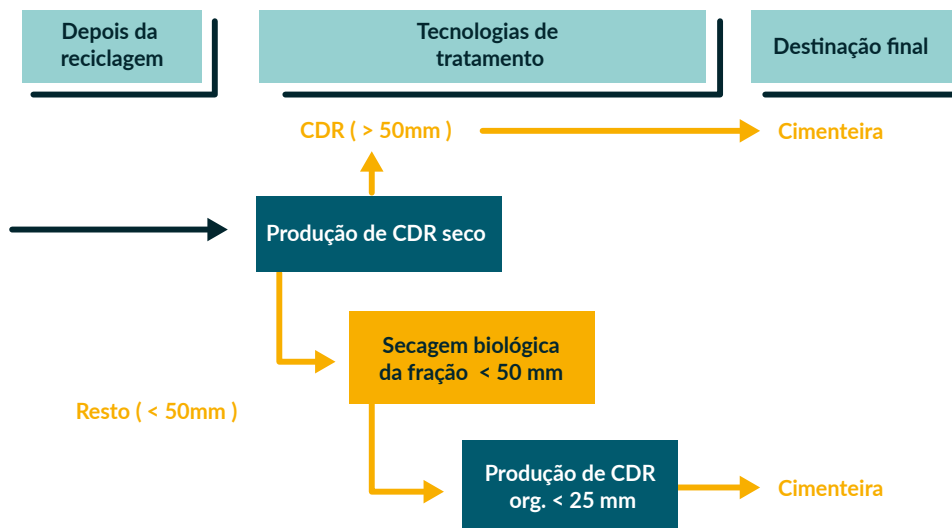
#### Opção 4: Produção de CDR + biosecagem para CDR orgânico + coprocessamento na indústria cimenteira

(CDR seco + biosecagem CDR org. + cimenteira)

A produção de CDR seco (acima de 50 mm) e de um CDR orgânico a partir da matéria orgânica passante na malha de 50 mm via biosecagem é uma opção de tratamento que tenta converter parte dos rejeitos em um CDR com poder calorífico adequado para coprocessamento.

FIGURA A-6 CDR SECO + BIOSECAGEM CDR ORG. + CIMENTEIRA

Fonte:



O material principalmente orgânico tem que passar por processos biológicos e mecânicos para gerar uma fração fina orgânica de CDR que tenha poder calorífico suficiente para ser adequado à indústria de cimento. Uma tarefa importante é reduzir a umidade desse fluxo de resíduos que pode ser obtida por meio da biosecagem. A opção na Calculadora assume uma eficiência de secagem de 25%.

É importante lembrar que deve ser cuidadosamente analisado se essa fração orgânica de CDR é aceitável para a indústria de cimento. A umidade remanescente pode ser um fator limitante, uma vez que alguns levantamentos indicaram que o poder calorífico dos RSU típicos brasileiros estariam apenas um pouco acima de 6 MJ/kg do limite teórico da incineração autossustentável. Por outro lado, materiais contaminantes podem permanecer nos resíduos, tendo efeitos negativos para a produção de cimento, como vidro, cloro de PVC ou metais pesados. Análises aprofundadas devem ser feitas para tomar decisões apropriadas.

A produção de CDR fino por meio de biosecagem está associada a uma considerável demanda de energia. Para o modelo na Calculadora, as seguintes suposições foram feitas:

- Demanda de energia elétrica: 100 kWh/tonelada de resíduos
- Demanda de calor (óleo e gás): 0,5 kWh/tonelada de resíduos
- Demanda de energia mecânica (diesel): 2 kWh/tonelada de resíduos

É difícil supor um valor confiável para a demanda de eletricidade. Como solução, a demanda por biodigestão anaeróbia – a maior das opções de tratamento relatadas pela Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU – foi selecionada. O atendimento dessa demanda energética resulta em uma emissão de GEE em torno de 8 kg CO<sub>2</sub>-eq/tonelada de resíduo, dependendo das características do resíduo e das especificações de tratamento.

## INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS

Existem diferentes tecnologias de planta de incineração. Os modelos mais comuns são incineração em grelha e, em certa medida, combustão em leito fluidizado. Em termos de preocupações ambientais, o aspecto mais importante das tecnologias de incineração é o tipo e a eficiência do tratamento dos gases de combustão.

Além disso, os resíduos devem ser exaustivamente analisados quanto à sua adequação para incineração. Pode-se presumir que a incineração autossustentável geralmente requer um poder calorífico mínimo de cerca de 6 MJ/kg de resíduo. Além disso, informações sobre o nível de poluentes (por exemplo, cloro, metais pesados etc.) devem estar disponíveis, uma vez que têm influência nos requisitos de limpeza de gases de combustão.

As emissões relevantes para as mudanças climáticas são as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil resultantes da incineração do carbono fóssil contido nos resíduos. Como uma simplificação conservadora, a Calculadora assume uma combustão completa de carbono em CO<sub>2</sub>. O destino das cinzas de fundo, das cinzas volantes e dos resíduos de limpeza de gases de combustão não são considerados na Calculadora.

As plantas de incineração modernas geralmente são projetadas para geração de energia. Como consequência, a Calculadora requer a entrada de valores para a eficiência energética diferenciados pela eletricidade e energia térmica. Normalmente, as instalações são equipadas com uma turbina que produz eletricidade e, potencialmente, calor. Se apenas eletricidade for produzida, o que é o caso provável para uma planta no Brasil, a eficiência elétrica máxima é de cerca de 25%, levando em consideração os parâmetros mais comuns de operação (40 bar para pressão e 400°C para temperatura). A necessidade de eletricidade para operar o incinerador e o sistema de limpeza de gases de combustão irá reduzir a eficiência líquida de cerca de 20%. Como valor padrão para o Brasil, a Calculadora então adota uma eficiência elétrica de 15% e nenhuma eficiência térmica.

As emissões evitadas pela substituição de eletricidade e calor são consideradas na Calculadora. Para a geração de eletricidade, consideram-se as emissões de CO<sub>2</sub> definidas na aba “Início” e para a energia térmica, se fosse escolhida, as emissões de GEE associadas ao uso de 50% de petróleo e 50% de gás natural.

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
C	CARBONO
CDR	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS
CH <sub>4</sub>	METANO
CO <sub>2</sub>	DIÓXIDO DE CARBONO
COD	CARBONO ORGÂNICO DEGRADÁVEL
EQ	EQUIVALENTES
FOD	FIRST ORDER DECAY (DECAIMENTO DE PRIMEIRA ORDEM)
GEE	GASES DE EFEITO ESTUFA
GNV	GÁS NATURAL VEICULAR
IPCC	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS)
MCF	FATOR DE CORREÇÃO DE METANO
MDL	MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO
MOL	METHANE OXIDATION LAYER (CAMADA DE OXIDAÇÃO DE METANO)



<b>N<sub>2</sub>O</b>	ÓXIDO NITROSO
<b>PE</b>	POLIETILENO
<b>PET</b>	TEREFTALATO DE POLIETILENO
<b>PO</b>	POLIOLEFINAS
<b>PP</b>	POLIPROPILENO
<b>PS</b>	POLIESTIRENO
<b>PVC</b>	CLORETO DE POLIVINIL
<b>RSU</b>	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
<b>TMB</b>	TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO
<b>UNFCCC</b>	<i>UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE</i> (CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA)
<b>WTE</b>	WASTE TO ENERGY (RESÍDUO EM ENERGIA)

# LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b>	DIAGRAMA DE FLUXO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (TMB = TRATAMENTO MECÂNICO BIOLÓGICO; INC. = INCINERAÇÃO DE RSU)	20
<b>FIGURA 2</b>	VISUALIZAÇÃO ANTES DA ENTRADA DE DADOS	27
<b>FIGURA 3</b>	VISUALIZAÇÃO DEPOIS DA ENTRADA DE DADOS	27
<b>FIGURA 4</b>	RESULTADO INTERMEDIÁRIO: PODER CALORÍFICO E TEOR DE CARBONO	39
<b>FIGURA 5</b>	EXEMPLO DE CALCULAR A TAXA DE RECICLAGEM DE PAPEL E PAPELÃO	43
<b>FIGURA 6</b>	INFORMAÇÃO INTERMEDIÁRIA DAS CARACTERÍSTICAS DO RSU RESIDUAL APÓS A RECICLAGEM	48
<b>FIGURA 7</b>	EMISSÕES DE GEE EM UM MUNICÍPIO TEÓRICO - CENÁRIO 2	68
<b>FIGURA 8</b>	EMISSÕES DE GEE POR FRAÇÃO DE RESÍDUOS – RECICLAGEM	70
<b>FIGURA 9</b>	EMISSÕES DE GEE POR FRAÇÃO DE RESÍDUOS – DISPOSIÇÃO	71
<b>FIGURA 10</b>	VISÃO GERAL DAS EMISSÕES DE GEE PARA TODOS OS CENÁRIOS	73

<b>FIGURA 11</b>	VISÃO GERAL DAS EMISSÕES DE GEE PARA TODOS OS CENÁRIOS	74
<b>FIGURA A-1</b>	FATORES DE EMISSÃO PARA EMISSÕES DE METANO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO MEDIDOS POR CUHLS ET AL. (2015)	98
<b>FIGURA A-2</b>	CONSTRUÇÃO RECOMENDADA PARA UMA CAMADA DE OXIDAÇÃO DE METANO EFICIENTE	113
<b>FIGURA A-3</b>	TRATAMENTO BIOLÓGICO + COBERTURA DE ATERRO	117
<b>FIGURA A-4</b>	CDR SECO + CIMENTEIRA + REJEITO PARA ATERRO	120
<b>FIGURA A-5</b>	CDR SECO + CIMENTEIRA + TRAT. BIOL. + COBERTURA DE ATERRO	123
<b>FIGURA A-6</b>	CDR SECO + BIOSECAGEM CDR ORG. + CIMENTEIRA	125

# LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b>	COMPOSIÇÃO DOS RSU SEGUNDO O PLANO NACIONAL DE 2012	32
<b>TABELA 2</b>	COMPOSIÇÃO PADRÃO DOS RSU PARA O BRASIL	34
<b>TABELA 3</b>	ÍNDICES DE BAIXO E ALTO TEOR DE ÁGUA	36
<b>TABELA 4</b>	FRAÇÕES DE RESÍDUOS COM TEOR DE CARBONO – CARBONO TOTAL E CARBONO FÓSSIL (IPCC, 2006)	37
<b>TABELA 5</b>	FRAÇÕES DE RESÍDUOS E PODER CALORÍFICO CORRESPONDENTE	38
<b>TABELA 6</b>	TABELA AUXILIAR PARA DETERMINAR TAXAS DE RECICLAGEM	45
<b>TABELA 7</b>	RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA RECICLAGEM	47
<b>TABELA 8</b>	TIPO DE TRATAMENTO E DESCARTE DE RESÍDUOS	48
<b>TABELA 9</b>	EFICIÊNCIA NA COLETA DE GÁS	53
<b>TABELA 10</b>	TRATAMENTO DE GÁS DE ATERRO COLETADO	53
<b>TABELA 11</b>	EFICIÊNCIA DA OXIDAÇÃO DE METANO PELA CAMADA DE OXIDAÇÃO	54
<b>TABELA 12</b>	OPÇÃO DE TRATAMENTO 1	57
<b>TABELA 13</b>	OPÇÃO DE TRATAMENTO 3	58

<b>TABELA 14</b>	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA	59
<b>TABELA 15</b>	EXEMPLO DE UM CENÁRIO-BASE E TRÊS CENÁRIOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS PARA UM MUNICÍPIO BRASILEIRO VIRTUAL	63
<b>TABELA 16</b>	TAXAS DE RECICLAGEM – CENÁRIO-BASE E CENÁRIOS 1 A 3	64
<b>TABELA 17</b>	COMPOSTAGEM OU BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS COLETADOS SEPARADAMENTE	65
<b>TABELA 18</b>	USO DO BIOGÁS RESULTANTE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	65
<b>TABELA 19</b>	OPÇÕES DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS RESIDUAIS POR TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL	66
<b>TABELA 20</b>	OPÇÕES DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL	67
<b>TABELA A-1:</b>	FATORES DE MULTIPLICAÇÃO PARA O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL	83
<b>TABELA A-2:</b>	FATORES DE EMISSÃO ESPECÍFICOS	87
<b>TABELA A-3 -</b>	RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA RECICLAGEM E BIOGÁS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	101
<b>TABELA A-4</b>	CATEGORIZAÇÃO DE TIPOS DE DISPOSIÇÃO E O MCF (IPCC, 2019)	105
<b>TABELA A-5</b>	EFICIÊNCIA DA OXIDAÇÃO DE METANO PELA CAMADA DE OXIDAÇÃO	114
<b>TABELA A-6</b>	OPÇÕES DE TRATAMENTO 1 E 3	116
<b>TABELA A-7</b>	COMPOSIÇÃO CALCULADA DE CDR > 50MM	121



ProteGEEr

Elaborado por:

**GOP/Infra**

**adelphi**



Ministério Federal  
do Ambiente, Proteção da Natureza  
e Segurança Nuclear

da República Federal da Alemanha

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



MINISTÉRIO DO  
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

