

Volume 2

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: **Potencial de descarbonização por arranjo tecnológico**



Instituto 17

Este documento é um produto do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico e executado por um consórcio de organizações liderado pela *Adam Smith International* (ASI) e com a participação do Instituto 17 (i17), *Carbon Limiting Technologies* (CLT), hubz e Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Para mais informações, acesse:

<https://www.ukbrep.org/pt/home> e <http://i17.org/>



Adam Smith
International



EQUIPE TÉCNICA PROGRAMA DE ENERGIA PARA O BRASIL:

Diretores de Programa: Gilberto de Martino Jannuzzi (ASI) / Zane Kanderian (ASI)

Gerentes de Programa: Louise Hill (FCDO-UK) / Fernanda Guedes (ASI)

Conselheira Estratégica: Elbia Gannoum (ASI)

Coordenação Técnica: Alessandro Sanches Pereira (i17)

Líder em Aproveitamento Energético de Resíduos: Leidiane Ferronato Mariani (i17)

Líder da equipe: Vanice Helen Nakano (i17)

Responsável técnico: Marcela Valles Lange (i17) / Karina Guedes Cubas Amaral (i17)

Equipe técnica do i17: André Cestonaro do Amaral, Brenda Monteiro Rodrigues, Eduarda Piaia, Gladis Maria Backes Bühring, Guilherme Novaes Silva Pinto, Jessica Yuki de Lima Mito, Maria Eduarda Cação Rosa, Patrícia Maehata, Marilyn Mariano, Laiete Soto Messias, Norberto Schutz Cruzeiro, Renata Seganfredo Cavaignac e Yara Jurema Barros

Revisoras do ASI: Luiza Bazan (Gerente Monitoramento e Avaliação), Suzanne Maia (Conselheira em Inclusão Social e Igualdade de Gênero) e Marta Telles (Gerente de Comunicação e Inclusão)

Revisora editorial: Claudete Debértolis Ribeiro

Projeto gráfico e editoração: TXT Conteúdo e **dad**esign

EQUIPE TÉCNICA DA EMBRAPA SUÍNOS E AVES:

Equipe técnica: Airton Kunz, Camila Ester Hollas, Martha Mayumi Higarashi e Ricardo Luís Radis Steinmetz

EQUIPE TÉCNICA – PARCERIAS COM UNIVERSIDADES FEDERAIS:

Katia Gonçalves Gutierrez – Universidade Federal do Amazonas

Matheus Augusto de Oliveira Fernandes – Universidade Federal de Ouro Preto

Informações Legais

- Essa publicação está sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](#).
- Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos autores. Nem Instituto 17 ou os autores podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante de eventuais erros, imprecisões ou omissões de informações nele presentes.
- A duplicação ou reprodução de todo ou partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o Instituto 17 seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento escrito do Instituto 17.

Ficha catalográfica:

Instituto 17

Aproveitamento energético de RSU no Brasil: Potencial de descarbonização por arranjo tecnológico. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil). Relatório técnico 07-2022. São Paulo/SP: Instituto 17, 2022.

Waste to Energy in Brazil: Decarbonisation potential from municipal solid waste by technological arrangement. Brazil Energy Programme – BEP (Brazil). Technical report 07-2022. São Paulo: Instituto 17, 2022.

91 p. il. color.

ISBN 978-65-997883-3-8

1. Energia; 2. Descarbonização. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Transição energética. 5. Mudanças climáticas. 6. Avaliação do Ciclo de Vida.

PREFÁCIO

Nas últimas décadas, o aumento populacional global e o crescimento econômico têm acarretado diversos desafios relacionados à gestão dos resíduos gerados. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), sua gestão e destinação final configuram assim, tanto no Brasil como em todo o mundo, um tema da maior importância, com implicações ambientais e de saúde pública. Por outro lado, e tendo em vista os avanços tecnológicos observados, os resíduos podem também representar um recurso para aproveitamento energético.

No âmbito de um processo evolutivo visando a uma economia de caráter circular, somando-se a esforços de redução e reutilização dos resíduos, bem como ao aprimoramento da qualidade da sua destinação final, o aproveitamento energético compõe o rol de estratégias de gestão eficiente do RSU, podendo contribuir para reforçar a oferta de energia próxima aos centros de consumo, com impactos sociais e ambientais muito positivos.

Dentro do Programa de Energia para o Brasil (BEP), constituído a partir de uma estratégica parceria entre o Reino Unido e o Brasil, com foco no desenvolvimento sustentável, foram desenvolvidos estudos e produzidas informações valiosas que identificam o potencial de arranjos tecnológicos para o aproveitamento energético de RSU no país, além de apontarem o potencial de ganhos de eficiência e redução da pegada de carbono que esse aproveitamento pode vir a ter. São iniciativas como essa, quando executadas de forma sinérgica e colaborativa pelos setores público e privado, que serão capazes de fortalecer a posição de liderança do Brasil no movimento de transição energética global em direção a uma economia inclusiva de baixo carbono.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) orgulha-se pelo apoio dado ao Instituto 17, no âmbito do BEP, ao longo desse trabalho que reuniu especialistas em tema tão relevante para o desenvolvimento dessa solução energética e ambiental para o país. O diálogo e colaboração entre as instituições públicas brasileiras e o programa britânico viabilizou ao BEP constituir-se como um projeto bem-sucedido no que diz respeito ao avanço do entendimento sobre as energias limpas e sustentáveis.

Nesse sentido, com essas duas publicações da série "Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil", disponibiliza-se conhecimento para o melhor entendimento do potencial desses arranjos tecnológicos e para melhor nortear o desenvolvimento de políticas públicas nesse tema. Em última instância, esperamos que o amadurecimento sobre os desafios e oportunidades contribua para acelerar a destinação de investimentos para uma maior integração entre o setor energético e o setor de resíduos do Brasil.

Thiago Barral
Presidente
Empresa de Pesquisa Energética

APRESENTAÇÃO

Como parte do apoio do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico ao processo de transição energética do Brasil para uma economia inclusiva de baixo carbono, a frente de Aproveitamento Energético de Resíduos (*Waste-to-Energy*), liderada pelo Instituto 17, tem avançado na contribuição ao desenvolvimento do setor. O BEP foi implementado pelo consórcio liderado pela *Adam Smith International*, em parceria com o Instituto 17, a *Carbon Limiting Technologies*, a Hubz e a Fundação Getúlio Vargas.

Ao longo do segundo ano de implementação do BEP (agosto/2021 a maio/2022), foi dado um enfoque especial ao estudo e a proposições para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do país. Dentre os resultados obtidos estão:

1. Estimativa do potencial de aproveitamento de RSU para reciclagem e estimativa do potencial de aproveitamento energético de RSU.
2. Geração de indicadores ambientais de tecnologias para aproveitamento energético de RSU, baseados em casos reais e em projetos, baseado na técnica de Avaliação de Ciclo de Vida Ambiental (ACV).

Dessa forma, esta publicação apresenta os resultados relacionados à estimativa de potencial de descarbonização do Brasil por meio do setor de resíduos sólidos urbanos (RSU) do país, com base em casos reais, aplicando-se a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental. Destaca-se que as informações apresentadas a seguir são possibilidades existentes que devem ser consideradas e avaliadas conforme as necessidades e realidades locais e/ou regionais, cuja escolha final deve ser sempre precedida de diagnóstico.

AGRADECIMENTOS

As instituições partes do consórcio de implementação do Programa de Energia para o Brasil (BEP): *Adam Smith International*, *Carbon Limiting Technologies*, hubz e Fundação Getúlio Vargas e, em especial, o Instituto 17, responsável pela execução do componente de Aproveitamento Energético de Resíduos do BEP, agradecem ao governo do Reino Unido pela confiança na execução do Programa.

Também estendem o agradecimento às instituições que apoiaram a elaboração desse estudo: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Associação Brasileira de Biogás (ABiogás), Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), Caixa Econômica Federal, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB), Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas (Consimares), CS Bioenergia, CTRPE – Central de Tratamento de Resíduos (Ecoparque-PE), *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) no Brasil, Embrapa Suínos e Aves, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Energia Limpa Brasil, GEF Biogás Brasil - projeto liderado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e implementado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), tendo como Comitê Diretor do Projeto o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Itaipu Binacional, Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério do Meio Ambiente (MMA), e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), LBR Engenharia e Consultoria LTDA, OPERMAN Energia Sustentável, Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos do Ministério da Economia (ME), Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA/SP), Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), Universidade Federal do Amazonas (UFAM), WTEEC, Wise e ZEG Biogás.

Devem ser também destacados, aqui, todos os membros da equipe de Aproveitamento Energético de Resíduos do BEP, os quais, durante a execução do projeto, dedicaram seu tempo e conhecimento para a elaboração de uma análise de excelência técnica e relevância social. Nossos agradecimentos a todos e a todas.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO POTENCIAL DE DESCARBONIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU	10
2 CONTRIBUIÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU PARA A DESCARBONIZAÇÃO BRASILEIRA	14
3 AVALIAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS NO SETOR DE RSU	20
3.1 CENÁRIO-BASE: ATERRO SANITÁRIO SEM APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	22
3.2 ATERRO SANITÁRIO COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS	23
3.3 ROTAS DE BIODIGESTÃO	26
3.4 ROTAS TÉRMICAS	33
4 REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE I	53
METODOLOGIA APLICADA À AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	53
APÊNDICE II	65
I. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO-BASE	65
II. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE ATERRO SANITÁRIO COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS	67
III. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE BIODIGESTÃO SECA	72
IV. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO DE GASEIFICAÇÃO	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Abiogás	Associação Brasileira de Biogás
ABREN	Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
atm	Atmosfera
BEP	Programa de Energia para o Brasil (<i>Brazil Energy Programme</i>)
CDRI	Combustível Derivado de Resíduos Industriais
CDRU	Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄	Metano
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CO₂eq	Dióxido de Carbono equivalente
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
Consimares	Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas
CONVALE	Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Regional do Vale do Rio Grande
COP-26	26ª Convenção das Partes
CSTR	Tanque de Agitação Contínua
CTRC	Central de Tratamento de Resíduos Consimares
CTR-PE	Central de Tratamento de Resíduos Pernambuco
cv	Cavalo
d	Dia
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FORSU	Fração Orgânica dos RSU
g	Gramas
GEE	Gases causadores do Efeito Estufa
GIZ	Agência Alemã de Cooperação Internacional (<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>)
Gt	Gigatonelada
GWP-AR5	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>) no Quinto Relatório do IPCC (<i>IPCC's Fifth Assessment Report</i>)
GWP-SAR	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>) no Segundo Relatório do IPCC (<i>IPCC's Second Assessment Report</i>)

h	Hora
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
IDEMAT	Industrial Design & Engineering Materials database
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
L	Litro
LACAUT	Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos
m	Metro
m³	Metro cúbico
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
mg	Miligrama
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
Mt	Megatonelada
MW	Megawatt
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada (<i>National Determined Contribution</i>)
Nm³	Metro cúbico normal
N-NH₃	Nitrogênio amoniacal
Norg	Nitrogênio orgânico
NO_x	Óxidos de nitrogênio
NSCA	Sociedade Nacional de Ar Limpo do Reino Unido (<i>UK National Society for Clean Air</i>)
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de etileno
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SIMA/SP	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SO_x	Óxidos de enxofre
SST	Sólidos suspensos totais
ST	Sólidos totais
t	Tonelada
tkm	Tonelada-quilômetro
UE	União Europeia
UF	Unidade Funcional
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNIDO	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (<i>United States Environmental Protection Agency</i>)

1

CONTEXTUALIZAÇÃO DO POTENCIAL DE DESCARBONIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) figura como um desafio cada vez mais relevante à sociedade brasileira, como consequência do crescimento populacional aliado à urbanização e à industrialização. No Brasil, em 2020, foram geradas, aproximadamente, 82,5 milhões de toneladas de RSU, o equivalente a 390 quilogramas por habitante (ABRELPE, 2021). Do montante gerado, 60% dos resíduos (46 milhões de toneladas), aproximadamente, seguem para disposição em aterros sanitários, e o restante ainda é destinado a áreas de disposição inadequadas, incluindo lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2021).

O poder público vem, nos últimos anos, criando políticas públicas que visam à melhoria quantitativa e qualitativa da cobertura da coleta e do gerenciamento adequado de resíduos sólidos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS estabeleceu prazo, até 2014, para que todos os lixões clandestinos a céu aberto fossem encerrados (BRASIL, 2010). No entanto, o novo marco do saneamento básico (BRASIL, 2020) aumentou o prazo, que é distinto para os diferentes municípios, em função de sua população, e varia de 2021 até 2024. Com a PNRS, as distintas esferas do poder público passaram a contar com limitações relacionadas ao tipo de destinação e às emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a ordem de prioridade de gerenciamento de resíduos sólidos, a disposição final dos rejeitos deve preceder a reutilização, a reciclagem e o tratamento. A lei também estabelece que podem ser utilizadas tecnologias de valorização energética, uma vez que a viabilidade técnica e ambiental seja comprovada. Os avanços trazidos pela PNRS e pelo marco do saneamento têm contribuído para que muitos dos lixões estejam em fase de encerramento de operação. No entanto, observa-se, simultaneamente, a construção de novos aterros, evidenciando a transferência da problemática para anos seguintes.

Ainda são raros, no país, casos em que são aplicadas soluções com aproveitamento energético dos resíduos, distintas da mera disposição. Isto se dá por razões variadas, que vão desde questões financeiras, uma vez que tais soluções, normalmente, significam maiores investimentos – ainda que a movimentação financeira do setor tenha atingido R\$ 29,1 bilhões em 2020 (ABRELPE, 2021), até características de mercado, pois há grande disponibilidade de fontes de energia, mas existem dificuldades inerentes ao sistema de leilões de energia elétrica e à ausência de contratos no mercado de combustíveis (EPE, 2019).

Diferentes arranjos tecnológicos podem ser utilizados para o aproveitamento energético de RSU. Algumas tecnologias que podem constituir os arranjos se baseiam no processamento biológico dos resíduos, ou biodigestão, com geração de biogás, que pode ser utilizado para a produção de energia elétrica ou de biometano. Já outras se baseiam em rotas térmicas, dentre as quais se destacam a incineração, a gaseificação e o coprocessamento na indústria cimenteira, nos quais o resíduo passa a ser uma fonte de energia térmica que pode ser convertida, então, em energia elétrica ou substituir combustíveis fósseis, como na indústria cimenteira. No entanto, ainda há questionamentos e discussões a respeito do impacto ambiental gerado pelas rotas térmicas, em função de emissões gasosas (óxidos de nitrogênio, dioxinas e furanos). Em alguns países, tais como Suécia, Canadá, Bélgica e Holanda, essa preocupação causou o fechamento de incineradores (MME/EPE, 2008). Esses riscos, no entanto, vêm sendo progressivamente minimizados com o desenvolvimento de sistemas de tratamento de gases de alta eficiência, assim, em países como a Alemanha, há muitas usinas de incineração licenciadas (MME/EPE, 2008).

Apesar de o avanço tecnológico já estar permitindo a alteração de práticas tradicionais, com diversas vantagens financeiras, sociais e ambientais ao redor do mundo, para que esses benefícios sejam usufruídos pelo Brasil torna-se necessária, ainda, uma longa caminhada em termos regulatórios e procedimentais, com reflexos nos âmbitos econômico e político, para a remoção de barreiras à integração dos setores de energia e saneamento e à disseminação desses novos modelos de negócios. Embora cientes dessas barreiras, diversas iniciativas têm vislumbrado crescimento do aproveitamento energético dos RSU nos próximos anos no país, muitas delas, por considerar: seu evidente potencial de descarbonização, as estimativas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) dos RSU, sua constante taxa de crescimento ao longo dos anos e as metas de redução de emissões de GEE assumidas pelo país.

Segundo o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu (61.304.484 tCO₂) 61 MtCO₂eq. em 2020 no setor de Resíduos Sólidos¹ (SEEG, 2021). Esse valor é 3% maior do que o emitido em 2019 (59 MtCO₂eq.) e 26,3% maior do que o emitido dez anos antes (2010). O setor de Resíduos Sólidos representa 2,8% das emissões de CO₂eq. do Brasil, que, em 2020, emitiu 2.160 MtCO₂eq.² As destinações comuns no país – para aterros, controlados ou sanitários, ou ainda lixões – geram efluentes líquidos e emissões gasosas que permanecem por muito tempo depois do encerramento da atividade de recebimento de resíduos, o que se caracteriza como passivo ambiental e coloca em risco a saúde do ambiente e das populações locais.

Por sua vez, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (MME/EPE, 2022) traz o aproveitamento energético de resíduos como uma oportunidade socioambiental estratégica, ao ressaltar a importância da PNRS, do novo marco do saneamento (BRASIL, 2020) e das linhas de financiamento para projetos de descarbonização, o que indica a relevância do estímulo ao aproveitamento energético de resíduos e à gestão de resíduos.

Para fundamentar iniciativas de recuperação energética a partir dos RSU, torna-se importante a análise e a disponibilização de dados sobre os impactos ambientais de projetos no Brasil. A Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (ACV) permite considerar os potenciais impactos associados aos aspectos ambientais de um produto, com base em uma visão sistêmica que não se restringe ao processo avaliado em primeiro plano, mas inclui a cadeia de suprimentos e as destinações/tratamentos dos resíduos e efluentes gerados.

¹O setor de Resíduos Sólidos compreende as emissões oriundas da disposição final de resíduos, incineração ou queima a céu aberto e o tratamento biológico de resíduos sólidos.

²A emissão considerou os setores: Resíduos, Agropecuária, Energia, Mudança de Uso da Terra e Floresta e Processos Industriais.

Assim, este relatório apresenta os resultados das parcerias realizadas entre o BEP e as instituições envolvidas. Os estudos visaram a quantificar a pegada de carbono³ de diferentes rotas tecnológicas possíveis para aproveitamento energético de RSU. Foram considerados, neste estudo: as entradas de matéria e energia e as saídas (emissões para a água, o ar e o solo), desde o transporte do resíduo até a disposição final de todos os resíduos; e o pós-tratamento, incluindo os subprodutos gerados e o impacto evitado por esses últimos, quando dotados do potencial de substituir outros produtos existentes, com a mesma função. As rotas estudadas, que derivaram dos projetos/plantas estudados⁴ e foram comparadas ao cenário-base (disposição em aterro sanitário), a fim de indicarem potenciais benefícios para a descarbonização⁵, estão descritas, brevemente, a seguir:

- i. Aterro sanitário com aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade ou de biometano: aterro sanitário com parte do biogás queimado em *flare* aberto (por falta de capacidade para aproveitamento energético de todo o biogás captado) e parte destinada ao purificador ou ao gerador.
- ii. Biodigestão seca com aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade ou de biometano: são avaliados cenários de biodigestão de RSU brutos e também de biodigestão de RSU sem a fração orgânica dos RSU (FORSU). A biodigestão é seguida de compostagem e do uso do composto na agricultura.
- iii. Biodigestão em Tanque de Agitação Contínua (CSTR) com aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade ou de biometano: são avaliados cenários de biodigestão de resíduos orgânicos de grandes geradores. O digestato é enviado para compostagem.
- iv. Gaseificação com geração de energia elétrica: são avaliados cenários de gaseificação de RSU brutos após secagem da FORSU e de gaseificação de RSU sem a FORSU, que é destinada ao aterro sanitário e/ou para a biodigestão CSTR ou seca. O Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos (CDRU) é utilizado para a geração de energia elétrica.
- v. Incineração com geração de energia elétrica: são avaliados cenários de incineração de RSU brutos e de incineração de RSU sem a FORSU, que é destinada ao aterro sanitário ou para a biodigestão CSTR ou seca. A energia térmica é convertida em energia elétrica.
- vi. Produção de CDRU para coprocessamento em indústria cimenteira: são avaliados cenários de produção de CDRU a partir de RSU sem a FORSU, a qual é destinada ao aterro sanitário ou para a biodigestão CSTR ou seca.

³ A pegada de carbono é definida como a quantidade total de emissões de Gases de Efeito Estufa que são emitidas, de maneira direta ou indireta, por um determinado produto, ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até seu descarte final (ABNT ISO, 2015).

⁴ Quando havia processos incluídos no projeto/planta que não eram característicos da rota avaliada, eles foram excluídos para que se pudesse realizar uma análise isolada e mais significativa da situação-padrão de cada tecnologia.

⁵ Considera-se descarbonização a diferença entre o que é emitido no cenário tradicional e o emitido no cenário com produção e uso energético do combustível alternativo (biogás, CDRU) nas unidades analisadas, ou seja, a quantidade reduzida/evitada de emissões em CO₂ equivalente.

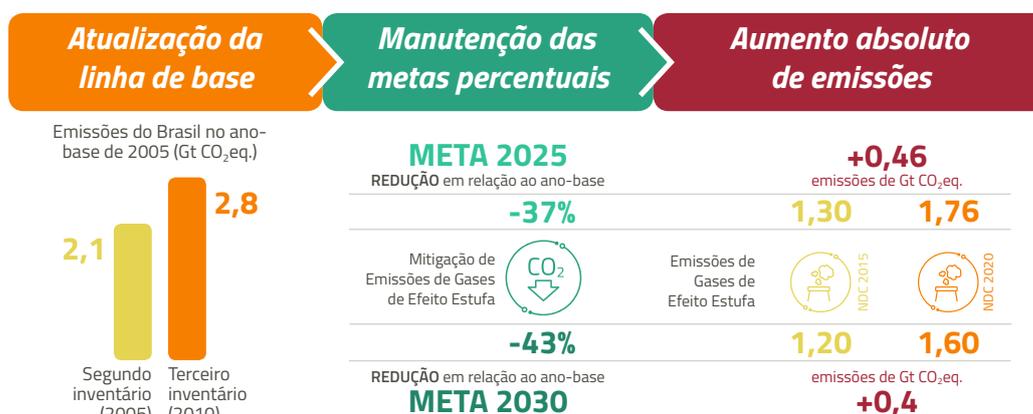
2

CONTRIBUIÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU PARA A DESCARBONIZAÇÃO BRASILEIRA

O Brasil celebrou, em 2015, o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e, em 2016, foi ratificada sua primeira Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). Em 2020, como forma de revisar os compromissos individuais de redução de emissões firmados, o país manteve a meta relativa para 2025, de redução de 37% das emissões de Gases causadores do Efeito Estufa (GEE), em relação aos níveis de 2005, e assumiu, como meta para 2030, a redução de 43% em relação a 2005, o que antes era apenas uma indicação. Também alterou a referência das emissões do ano-base 2005, que era de 2,1 GtCO₂eq. na primeira NDC, para 2,8 GtCO₂eq. As metas absolutas de emissão passaram para 1,8 GtCO₂eq. em 2025 e 1,6 GtCO₂eq. em 2030.

O ministro do Meio Ambiente, Joaquim Leite, anunciou, no dia 01 de novembro de 2021, em evento em Brasília, transmitido para o pavilhão brasileiro na 26ª Convenção das Partes (COP-26), em Glasgow, a revisão da meta brasileira de redução das emissões de GEE. Conforme anúncio, a meta passará de uma redução de 43% para 50% até 2030. As metas absolutas ainda não foram anunciadas, mas o Ministro indicou que adotará o conjunto de dados presente no Quarto Inventário Nacional de Emissões como base para o cálculo. Assim sendo, as emissões, em 2005, podem ser consideradas como 2,4 GtCO₂eq., segundo a métrica GWP-SAR5, ou 2,6 GtCO₂eq., segundo a métrica GWP-AR56. Uma redução de 50% significaria, portanto, que o país almeja alcançar um patamar de 1,2 GtCO₂eq. ou 1,3 GtCO₂eq. em 2030, dependendo da métrica utilizada, valores ainda um pouco maiores do que os prometidos na primeira NDC de 2015 (ver *Figura 1*).

Figura 1
Metas de emissões do Brasil para os anos de 2025 e 2030 de acordo com as NDCs.



Fonte: (WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL, 2021).

Com o objetivo de identificar a potencial contribuição do aproveitamento energético de RSU para o alcance das metas comprometidas pelo Brasil no Acordo de Paris, foram realizadas projeções⁶ do potencial de redução de GEE a partir de arranjos de rotas e cenários de aproveitamento energético. As projeções partiram de casos reais, em fase de projetos ou em operação. Inicialmente, calculou-se a redução das emissões para cada tonelada de RSU brutos processada (**Tabela 1**) e, com base no potencial de aproveitamento energético de RSU por estados e regiões, foram realizadas as projeções de arranjos tecnológicos. Para isso, escolheu-se rotas de aproveitamento da FORSU e do CDRU para aproveitamento através de rota térmica, sendo escolhidos os arranjos: gaseificação + biodigestão CSTR; gaseificação + biodigestão seca, coprocessamento + biodigestão CSTR e coprocessamento + biodigestão seca; incineração + biodigestão CSTR e incineração + biodigestão seca.

⁶ Cabe ressaltar que os resultados do potencial de descarbonização podem ser alterados de acordo com a operação da unidade. Assim, os resultados apresentados, neste estudo, representam a situação atual de cada uma das unidades avaliadas e sua extrapolação implica em uma incerteza grande dos resultados.

Tabela 1

Rotas e arranjos tecnológicos estudados – redução das emissões em relação ao cenário-base (Unidade Funcional = kgCO₂ eq. de RSU).

Rotas de biodigestão								
Destino		Biodigestão seca + compostagem		Biodigestão CSTR				
Quantidade de RSU tratado (mil t/ano)		128,50		31,02				
Cenário atual/Previsto		Previsto: Energia elétrica e biometano		Energia elétrica				
Emissões do cenário-base		(kgCO ₂ /t resíduo)		1.883,15				
Cenário geração de energia elétrica para comparação com cenário-base	Quantidade de energia elétrica (MWh/ano)		15.959		7.800			
	Emissões do cenário (kgCO ₂ /t RSU)		430,39		-7,65			
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-1.452,76		-1.890,80			
%		-77%		-100%				
Cenário produção de biometano para comparação com cenário-base	Quantidade de biometano (m ³ /ano)		4.730.918		2.711.977			
	Emissões do cenário (kgCO ₂ /t RSU)		328,43		-116,6			
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-1.554,72		-2.007,40			
%		-83%		-106%				
Rotas térmicas								
Destino		Gaseificação		Incineração	Produção de CDRU e coprocessamento			
Quantidade de RSU tratado (mil t/ano)		65,7		229,4	462,0			
Cenário atual/Previsto		Sem uso		Previsto: energia elétrica	Coprocessamento			
Emissões do cenário-base		(kgCO ₂ /t resíduo)		1.883,15				
Cenário geração de energia elétrica para comparação com cenário-base	Quantidade de energia elétrica (MWh/ano)		13.140		144.064			
	Emissões do cenário (kgCO ₂ /t RSU)		1.229,99		224,41			
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-653,16		-1.658,74			
%		-35%		-88%				
Cenário de coprocessamento para comparação com cenário-base	Emissões do cenário (kgCO ₂ eq/t RSU)		-		549,60			
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-		-1.333,55			
		%	-		-71%			
Arranjos - rotas térmicas e biodigestão								
Arranjo		Gaseificação + biodigestão CSTR	Gaseificação + biodigestão seca	Coprocessamento + CSTR	Coprocessamento + biodigestão seca	Incineração + biodigestão CSTR	Incineração + biodigestão seca	
Quantidade de RSU tratado (mil t/ano)		65,7	65,7	462	462	229,4	229,4	
Cenário atual/Previsto		Sem uso	Sem uso	Coprocessamento	Coprocessamento	Previsto: energia elétrica	Previsto: energia elétrica	
Emissões do cenário-base		(kgCO ₂ /t resíduo)		1.883,15				
Cenário geração de energia elétrica para comparação com cenário-base	Quantidade de energia elétrica (MWh/ano)		-		-		-	
	Emissões do cenário (kgCO ₂ /t RSU)		284,59		503,62		-	
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-1.598,56		-1.379,53		-	
%		-85%		-73%		-		
Cenário de coprocessamento para comparação com cenário-base	Emissões do cenário (kgCO ₂ /t RSU)		-		-9,93		343,48	
	Emissões evitadas	kgCO ₂ eq/t resíduo	-		-1.893,08		-1.539,67	
		%	-		-101%		-82%	

*Todas as rotas tecnológicas dependem do aterro para destinação de rejeitos não aproveitados pelos processos. Sendo assim, foi considerada na avaliação a etapa de destinação dos rejeitos para aterro sanitário.

** A tecnologia CSTR demanda um substrato pré-tratado, ou seja, livre de rejeitos. A planta estudada recebe resíduos orgânicos somente de grandes geradores e não resíduo sólido urbano de coleta indiferenciada.

O potencial de descarbonização é apresentado em nível nacional, com base no potencial de aproveitamento energético dos RSU, considerando a segregação na fonte de recicláveis e extrapolando-se os valores de emissões evitadas de CO₂eq dos casos analisados. Na **Tabela 2**, são apresentados os valores estimados de potencial de descarbonização por meio do aproveitamento energético de RSU. É importante ressaltar que os valores de potencial de descarbonização mostrados nas linhas não podem ser somados, visto que as rotas tecnológicas têm como material de entrada os mesmos RSU gerados e, portanto, são alternativas a serem adotadas, em diferentes proporções, conforme os arranjos tecnológicos escolhidos.

Tabela 2
Potencial de descarbonização do Brasil pelo aproveitamento energético de resíduos via diferentes arranjos tecnológicos.

Cenários	Potencial quantidade de RSU aproveitado energeticamente	Potencial de descarbonização pelo aproveitamento energético de RSU
Para o cenário de geração de energia elétrica ¹	21,80 a 31,06 milhões t/ano	23,83 a 58,32 MtCO ₂ eq./ano
Para o cenário de produção de biometano ²		38,07 a 54,84 MtCO ₂ eq./ano
Cenário de coprocessamento + biodigestão ³	4,96 milhões t/ano	9,92 a 14,08 MtCO ₂ eq./ano

¹Aterro com aproveitamento de biogás; Biodigestão seca; Biodigestão CSTR; Gaseificação; Gaseificação+Biodigestão CSTR; Gaseificação+Biodigestão seca; Incineração; Incineração+Biodigestão CSTR e Incineração+Biodigestão seca.

²Aterro com aproveitamento de biogás; Biodigestão seca e Biodigestão CSTR.

³Coprocessamento; Coprocessamento+Biodigestão CSTR e Coprocessamento+Biodigestão seca.

Observa-se que todas as tecnologias avaliadas apresentam potencial de redução das emissões de GEE, que variam de 23,83 a 58,32 MtCO₂eq./ano para o cenário de geração de energia elétrica; de 38,07 a 54,84 MtCO₂eq./ano, para o cenário de produção de biometano; e de 9,92 a 14,08 MtCO₂eq./ano, para o de coprocessamento.

Os estados que possuem maior potencial de redução são os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, que representam entre 61,94% e 66,04% do potencial nacional, ou 15,74 a 38,51 MtCO₂eq./ano, no cenário de geração de energia elétrica; 61,94% e 63,38% do potencial nacional, ou 24,13 a 33,97 MtCO₂eq./ano, no cenário de produção de biometano, em função da maior geração de resíduos sólidos urbanos e da maior quantidade de plantas passíveis de utilização de CDRU em substituição a outros combustíveis. Para o cenário de coprocessamento, a região sudeste também se apresentou como a região com o maior potencial, representando 55,90% do potencial nacional, ou 5,54 MtCO₂eq./ano a 7,87 MtCO₂eq./ano para o arranjo de coprocessamento e biodigestão. Para a tecnologia de incineração, como há estados nos quais essa rota é proibida por normas legais, como Minas Gerais, o estado do Paraná soma-se a São Paulo e ao Rio de Janeiro como um dos três estados com maior potencial de redução de emissões de GEE, sendo que os três juntos representam 72,35% do potencial nacional, ou 32,89 MtCO₂eq./ano, no cenário de geração de energia elétrica.

No cenário de geração de energia elétrica, as rotas tecnológicas apresentam um potencial de redução que varia de 23,83 MtCO₂eq./ano a 58,32 MtCO₂eq./ano. Esses valores representam de 2,30% a 5,63% da meta estipulada na NDC de 2020 para 2025. Com relação à meta estipulada para 2030, a descarbonização representa de 1,98% a 4,84% da meta. Se forem consideradas as informações anunciadas sobre a revisão da NDC na abertura da COP26, pelo governo federal, os valores anuais de redução representariam de 1,99% a 4,86% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-SAR, e de 1,83% a 4,49% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-AR5.

No cenário de produção de biometano, as rotas tecnológicas apresentam um potencial de redução que varia de 38,07 a 54,84 MtCO₂eq./ano. Esses valores representam de 3,67% a 5,29% da meta estipulada na NDC de 2020 para 2025. Com relação à meta estipulada para 2030, a descarbonização representa de 3,16% a 4,55% da meta. Se forem consideradas as informações anunciadas sobre a revisão da NDC na abertura da COP26, pelo governo federal, os valores anuais de redução representariam em 3,17% a 4,57% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-SAR, e 2,93% a 4,22% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-AR5.

No cenário coprocessamento, a rota tecnológica apresenta um potencial de redução de 9,92 a 14,08 MtCO₂eq./ano. Esses valores representam entre 0,96 e 1,36% da meta estipulada na NDC de 2020 para 2025. Com relação à meta estipulada para 2030, a descarbonização representa de 0,82% a 1,17% da meta. Se forem consideradas as informações anunciadas sobre a revisão da NDC na abertura da COP26, pelo governo federal, os valores anuais de redução representariam de 0,83% a 1,17% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-SAR, e 0,76% a 1,08% da meta estipulada para 2030, caso a base de cálculo seja o GWP-AR5.

Ainda na COP26, o Brasil assumiu o compromisso de reduzir as emissões de metano (CH₄) em 30% até 2030. O Brasil está entre os signatários do “Compromisso Global de Metano”⁷, juntamente com um grupo de 103 países, em um esforço liderado pelos Estados Unidos e pela União Europeia (UE). A emissão de tCH₄ do Brasil, em 2020, foi de 20,24 milhões de toneladas. A redução firmada seria de 6,07 milhões de tCH₄. Mediante os inventários realizados, estimou-se que a redução de emissão de CH₄, em relação ao cenário-base, ficou de 0,99 a 1,95 MtCH₄/ano para o cenário de geração de energia elétrica, entre 1,50 e 1,74 MtCH₄/ano para o cenário de produção de biometano, e de 0,28 MtCH₄/ano para o cenário de coprocessamento. Esses valores representam entre 16,36% e 32,16% da meta brasileira de redução, para o cenário de geração de energia elétrica; entre 17,21% e 24,71% da meta brasileira de redução, para o cenário de produção de biometano; e 4,67% da meta brasileira de redução, para o cenário de produção de energia térmica. Assim, é possível observar o benefício do aproveitamento energético dos resíduos, por meio do potencial de descarbonização.

⁷ Mais informações em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/new-global-methane-pledge-aims-tackle-climate-change>

Existem, ainda, inúmeros benefícios adicionais, não só na esfera ambiental, mas também nas esferas social e econômica. Dentre eles, destacam-se: os ganhos sanitários advindos do tratamento adequado dos resíduos; o aumento das taxas de reciclagem, processo normalmente associado às unidades de recuperação energética; o aumento do potencial de oferta de energia renovável; a possibilidade do uso local da energia, reduzindo custos e impactos do sistema de transmissão; a redução do tempo de tratamento dos resíduos em relação ao aterramento; a redução dos custos de combustíveis para as frotas públicas; a redução da poluição local, por meio do controle das emissões por equipamento eficientes, o que, conseqüentemente, melhora a saúde da população e diminui custos e dificuldades relativos à gestão do setor de saúde; a substituição de importações; e a criação de postos de trabalho e a conseqüente melhoria da renda no país (ABREN, 2020; EPE, 2014a, 2019).

Em outras palavras, o aproveitamento energético de RSU possibilita a efetivação de modelos de negócios que promovem maior competitividade e auxiliam no desenvolvimento territorial e na redução de impactos ambientais, além de terem potencial para contribuir na caminhada rumo aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)⁸, agenda mundial adotada durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, em 2015.

Portanto, espera-se que os resultados desta publicação sirvam de base para que o setor de RSU e o setor energético considerem o aproveitamento dos benefícios ambientais, econômicos e sociais que estão atrelados ao aproveitamento energético dos RSU. Além disso, os resultados apresentados promovem um diálogo sobre o desenvolvimento de políticas e mecanismos para o fortalecimento e crescimento do aproveitamento energético de RSU no país.

⁸ Principalmente os ODS7 sobre energia limpa e acessível, ODS6 sobre o acesso à água potável e saneamento e ODS13 relacionado à ação contra a mudança global do clima.

3

AVALIAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS NO SETOR DE RSU

A fronteira dos sistemas de tratamento estudados considerou desde o transporte dos resíduos para a unidade até a destinação/uso dos produtos oriundos do tratamento de resíduos, incluindo o lixiviado, os fertilizantes produzidos a partir da compostagem dos resíduos orgânicos, a energia térmica produzida a partir da combustão dos resíduos, a energia elétrica produzida a partir do biogás ou do tratamento térmico, o biometano produzido a partir do biogás e os materiais oriundos da reciclagem.

Para incluir os benefícios oriundos do uso desses produtos secundários, no lugar de produtos convencionalmente disponíveis no mercado para realizar as funções em questão, o sistema foi expandido e foram considerados os impactos evitados da produção de fertilizantes inorgânicos⁹, da produção e transporte de coque¹⁰, da produção de energia elétrica¹¹, da produção e consumo do diesel¹² e da produção de materiais primários (substituídos por materiais recicláveis)¹³.

Os resultados¹⁴, apresentados a seguir, demonstram o potencial impacto ambiental de um cenário-base, que constitui a forma de disposição mais comum no país (disposição de resíduos em aterro sem aproveitamento energético do biogás), e de um aterro sanitário com aproveitamento do biogás (captação do biogás e uso para geração de energia elétrica e produção de biometano), de dois casos analisados que representam a rota biodigestão de resíduos e de três casos analisados que representam a rota térmica. Na rota biodigestão, os dois casos analisados são: a) biodigestão seca (tratamento mecânico e biodigestão seca, com compostagem do digestato e uso do biogás para geração de energia elétrica e produção de biometano) e b) biodigestão CSTR. Na rota térmica, os três casos analisados são: a) gaseificação (separação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), já livre de recicláveis, gaseificação do CDRU e *syngas* utilizado para produção de energia elétrica); b) incineração (*mass burning* de RSU com uso do vapor para geração de energia elétrica) e c) coprocessamento (produção de CDRU, separando a FORSU e os recicláveis, e coprocessamento em planta de cimento).

Para cada cenário, foram quantificados os impactos de aquecimento global para cada etapa do ciclo de vida.

⁹ No caso dos fertilizantes, como não se tem dados do transporte e das perdas do fertilizante orgânico produzido a partir do tratamento de resíduos, já que sua venda ainda não é prática consolidada no mercado brasileiro, optou-se por desconsiderar também o impacto destas etapas no caso dos fertilizantes inorgânicos, a fim de não superestimar o impacto evitado. Como a aplicação é muito semelhante para ambos os fertilizantes, foi também desconsiderada, já que seria anulada após a substituição.

¹⁰ No caso do coque, considerou-se o transporte do CDRU até a cimenteira e, portanto, o transporte evitado do coque até a mesma.

¹¹ No caso da energia elétrica, a etapa da transmissão foi desconsiderada, tanto para a energia elétrica produzida a partir do biogás quanto para a energia elétrica evitada, assumindo que a transmissão ocorre de forma semelhante para as energias de ambas as fontes e seria anulada após a substituição.

¹² Desconsiderou-se, também, a etapa de transporte até o usuário, tanto para o biometano quanto para o diesel. Isso se deu em função de não existirem dados factuais do transporte e das perdas do biometano, já que o uso veicular do biometano não é prática consolidada no Brasil. A fim de não superestimar o impacto evitado, a etapa de transporte foi desconsiderada também para o diesel.

¹³ Para os recicláveis, utilizou-se uma lógica de crédito, considerando os consumos de água, energia e insumos da reciclagem e subtraindo o impacto da produção dos materiais virgens. Os dados de transporte até as recicladoras foram ajustados para as realidades dos projetos.

¹⁴ Cabe ressaltar que os resultados do potencial de descarbonização podem ser alterados de acordo com a operação da unidade. Assim, os resultados apresentados, neste estudo, representam a situação atual de cada uma das unidades avaliadas e sua extrapolação implica em uma grande incerteza dos resultados.

3.1 CENÁRIO-BASE: ATERRO SANITÁRIO SEM APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Para a estimativa da redução dos impactos ambientais, foi realizado o inventário do cenário-base, em que o resíduo sólido urbano é destinado a um aterro sanitário típico brasileiro.

O inventário foi elaborado de acordo com o apresentado em (GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES; CHERNICHARO, 2019). Foi modelado um cenário de aterro sanitário convencional, com 50% do biogás sendo captado e direcionado para *flare* aberto, com eficiência de queima de 50%, resultando em 75% de emissões fugitivas. Considerou-se tratamento do lixiviado, utilizando-se lagoas anaeróbias, e lançamento do efluente em corpo receptor. Foi considerada, também, a utilização e a queima do diesel para a operação do aterro, além do transporte dos resíduos até a unidade. Para a modelagem, foram utilizados valores apresentados na literatura, semelhantes aos do caso real estudado.

A caracterização e o inventário desse cenário podem ser observados nos **Apêndices I e II**. O resultado da avaliação do impacto ambiental de cada etapa do cenário considerado como base é apresentado na **Figura 2**.

Figura 2
Resultado da avaliação do impacto ambiental para o cenário-base (Unidade Funcional = destinação em aterro de 1 t de RSU).

Etapas	Pegada de Carbono (kgCO ₂ eq./t resíduo)
Transporte até a unidade	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51
Emissões do <i>flare</i> aberto	768,98
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32
Total	1.883,15

Os resultados apresentados no gráfico são modelados a partir de dados da literatura a fim de representar uma situação padrão brasileira. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.



Ao se analisar os resultados, observa-se que a etapa do processo que mais contribui para a categoria aquecimento global é a das emissões fugitivas do aterro, mais especificamente, de metano para o ar, o que representa 56,8% do valor total dessa categoria de impacto ambiental. As emissões do *flare* aberto, mais especificamente, de metano para o ar, também contribuem significativamente para o aquecimento global, respondendo por 40,8% do total da categoria

3.2 ATERRO SANITÁRIO COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS

Foi avaliado um projeto de aproveitamento energético em aterro sanitário localizado na região sudeste do Brasil. No projeto, propõe-se queimar parte do biogás em *flare* enclausurado, devido à falta de capacidade dos motogeradores, e utilizar parte do biogás para a geração de energia elétrica e parte para a purificação do biometano, porém, para o estudo dessa rota tecnológica, foram considerados dois cenários: em um deles, todo o biogás que não é queimado no *flare* é utilizado para geração de energia elétrica; no outro, todo o biogás que não é queimado no *flare* é utilizado para purificação em biometano. Isso foi feito com o objetivo de tornar mais rica a análise dos resultados, do ponto de vista comparativo.

A caracterização e o inventário desses cenários podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

a) Cenário geração de energia elétrica:

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 3**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 3
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica - aterro sanitário com aproveitamento de biogás, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Etapas	Cenário-base kgCO ₂ ,eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ ,eq./t resíduo
Transporte até a unidade	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	1,29
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	671,27
Emissões do <i>flare</i> aberto	768,98	-
Emissões do <i>flare</i> enclausurado	-	3,84
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	2,73
Emissões do gerador	-	0,00
Energia elétrica evitada	-	-35,07
Total	1.883,15	685,86

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.



O benefício ambiental (impacto evitado) observado no cenário de geração de energia elétrica é oriundo da produção evitada de energia elétrica (4,64% do impacto total). Com relação aos impactos produzidos no cenário de geração de energia elétrica, a maior contribuição é a das emissões fugitivas do aterro (88,79% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência nessas etapas são: o potencial de geração de biogás, a eficiência de conversão do motorgerador, a quantidade de carbono orgânico nos RSU e a eficiência no sistema de captação do biogás.

b) Cenário produção de biometano

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de produção de biometano, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 4**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 4
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de produção de biometano - aterro sanitário com aproveitamento de biogás, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Etapas	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Cenário produção de biometano kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	1,29
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	671,27
Emissões do flare aberto	768,98	-
Emissões do flare enclausurado	-	3,84
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	2,73
Purificação do biogás	-	1,83
Queima do biometano em veículos	-	0,43
Diesel evitado	-	-21,13
Emissões evitadas da queima do diesel	-	-66,45
Total	1.883,15	635,61

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais. Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de diesel e as emissões evitadas da queima do diesel. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.



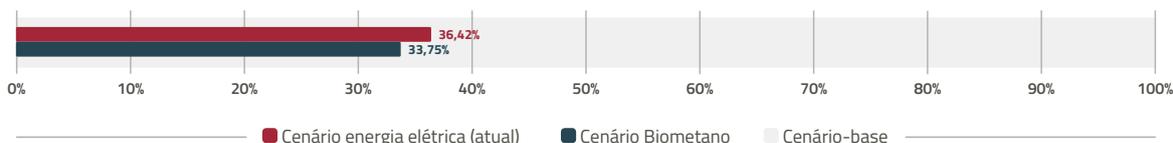
O benefício ambiental (impacto evitado) observado no cenário de produção de biometano é oriundo, principalmente, da queima evitada do diesel (8,20% do impacto total). Com relação aos impactos gerados no cenário de produção de biometano, a maior contribuição é a das emissões fugitivas do aterro (82,79% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência nessas etapas são: o potencial de geração de biogás, a eficiência do processo de purificação, a quantidade de carbono orgânico nos RSU e a eficiência do sistema de captação do biogás.

c) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de aproveitamento de biogás de aterro, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás); o resultado obtido deu-se em virtude dos impactos evitados da produção e queima de diesel e da geração de energia elétrica. Por meio da avaliação da pegada de carbono, identificou-se uma redução das emissões de GEE de 63,58%, para o cenário de geração de energia elétrica, e de 66,25%, para o cenário de produção de biometano, conforme demonstrado na **Figura 5**.

Figura 5
Comparação do cenário-base e dos cenários de geração de energia elétrica e de produção de biometano em aterro sanitário com aproveitamento de biogás – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ eq./t resíduo)		Comparação entre cenários - Valores relativos (%)			
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base		Cenário biometano X Cenário-Base	
Cenário geração de energia elétrica	685,86		-1.197,29		-63,58%
Cenário produção de biometano	635,61			-1.247,54	-66,25%



A potencial redução, ao se comparar o cenário de geração de energia elétrica com o cenário-base, é de 1.197,29 kgCO₂eq. por tonelada de resíduo tratado. A redução anual, considerando-se a geração anual de resíduo, fica em 613,8 mil tCO₂eq./ano.

A **Figura 6** apresenta o resumo do resultado do potencial de descarbonização para os cenários avaliados.

Para o cenário de produção de biometano, a descarbonização representa 1.247,54 kgCO₂eq./tonelada de resíduo ou 49,20 kgCO₂eq./Nm³ de biometano, o que equivale a um potencial de redução anual de 639,5 mil tCO₂eq.

Figura 6
Resumo do resultado do potencial de descarbonização para os dois cenários do aterro sanitário com aproveitamento de biogás.



3.3 ROTAS DE BIODIGESTÃO

Foram avaliadas duas rotas de processamento biológico de resíduos, por meio da biodigestão: a biodigestão seca e a biodigestão CSTR. A avaliação para a biodigestão seca baseou-se em dados de projeto e para biodigestão CSTR foram utilizados dados reais da operação da planta. A partir desses dados, foram criados dois cenários, um com aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e outro para a produção de biometano. Quando havia processos incluídos no projeto/planta que não eram característicos da rota avaliada, estes foram excluídos para que se pudesse realizar uma análise isolada e mais significativa da situação-padrão de cada tecnologia. Isso aconteceu no caso da biodigestão seca, no qual a operação com recicláveis foi desconsiderada.

3.3.1 Biodigestão seca

Foi avaliado um projeto de planta de biodigestão seca a ser localizado em Uberaba, Minas Gerais, que visa a atender os municípios do Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Regional do Vale do Rio Grande (CONVALE). A biodigestão é seguida de compostagem e uso do composto para comercialização, floricultura e parques públicos.

No projeto, há reciclagem dos resíduos da coleta seletiva, porém, nos cenários estudados, considera-se apenas os RSU enviados para tratamento mecânico e biodigestão, com compostagem do digestato. A operação com recicláveis é desconsiderada com o intuito de se analisar, isoladamente, os impactos referentes à rota tecnológica de biodigestão seca. São analisados, para essa rota, dois cenários: em um deles, o biogás é utilizado para a geração de energia elétrica e, no outro, é utilizado para a produção de biometano. Ambos os usos estão previstos no projeto. Os dados de entrada para a avaliação foram coletados de estudos disponibilizados pelo Consórcio e as estimativas de saídas e emissões foram calculadas com base em dados secundários.

Conforme detalhado no apêndice, os dados utilizados, relativos à produção de biogás, à eficiência de captação e à geração de energia elétrica, foram produzidos por especialistas em operação, em uma planta no Brasil. Conforme dados apresentados em um estudo realizado pela Probiogás, as plantas na Europa são superiores e, assim, podem alcançar melhores resultados (PROBIOGÁS, 2015) equiparando-se aos resultados do CSTR..

A caracterização e o inventário desses cenários podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

a) Cenário geração de energia elétrica:

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 7**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 7
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – biodigestão seca, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Etapas	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	26,59
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Transporte até a reciclagem	-	2,90
Reciclagem	-	22,15
Resíduos para aterro	-	261,92
Consumo de energia	-	11,56
Biodigestão	-	76,58
Compostagem do digestato	-	62,26
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	-	-5,24
Produção evitada de fertilizante fosfatado	-	-2,97
Emissões do gerador	-	0,00
Energia elétrica evitada	-	-25,35
Total	1.883,15	430,39

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de fertilizantes nitrogenados e fosfatados e o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário de geração de energia elétrica.



Os benefícios ambientais (impactos evitados) observados no cenário de geração de energia elétrica são oriundos, principalmente, da geração evitada de energia elétrica (5,10% do impacto total). Com relação aos impactos produzidos no cenário de geração de energia elétrica, a maior contribuição é a do envio de resíduos para aterro (52,64% do impacto total), seguida pela biodigestão (15,39% do impacto total) e pela compostagem do digestato (12,51% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência nessas etapas são: o potencial de geração de biogás, a eficiência de conversão do motogerador, a quantidade de carbono orgânico e nitrogênio nos RSU e as emissões fugitivas do processo de biodigestão.

b) Cenário produção de biometano

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de produção de biometano, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 8**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 8
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de produção de biometano – biodigestão seca, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Etapas	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário produção de biometano kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	26,59
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Transporte até a reciclagem	-	2,90
Reciclagem	-	22,15
Resíduos para aterro	-	261,92
Consumo de energia	-	11,56
Biodigestão	-	76,58
Compostagem do digestato	-	62,26
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	-	-5,24
Produção evitada de fertilizante fosfatado	-	-2,97
Purificação do biogás	-	2,74
Queima do biometano em veículos	-	0,65
Diesel evitado	-	-31,53
Emissões evitadas da queima do diesel	-	-99,16
Total	1.883,15	328,43

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, o consumo evitado de diesel e as emissões evitadas da queima do diesel. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário de produção de biometano.



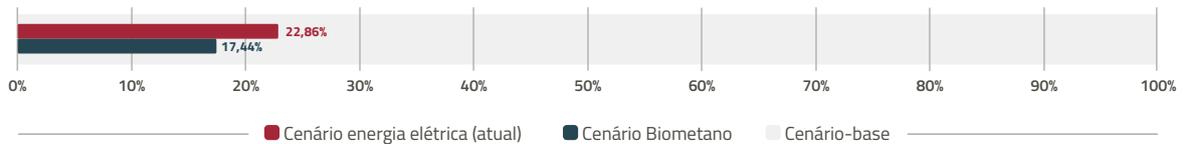
Os benefícios ambientais (impactos evitados) observados no cenário de produção de biometano são oriundos, principalmente, da queima evitada do diesel (16,36% do impacto total). Com relação aos impactos gerados no cenário de produção de biometano, a maior contribuição é a do envio de resíduos para aterro (43,20% do impacto total), seguida pela biodigestão (12,63% do impacto total) e pela compostagem do digestato (10,27% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência para essas etapas são: o potencial de geração de biogás, a eficiência do processo de purificação, a quantidade de carbono orgânico e nitrogênio nos RSU e as emissões fugitivas do processo de biodigestão.

c) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de biodigestão seca, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás); o resultado obtido deu-se em virtude dos impactos evitados da produção de fertilizantes inorgânicos, da produção e queima de diesel e da geração de energia elétrica. Por meio da avaliação da pegada de carbono, identificou-se uma redução das emissões GEE de 77,14% para o cenário de geração de energia elétrica e de 82,56%, para o cenário de produção de biometano, conforme demonstrado na **Figura 9**.

Figura 9
Comparação do cenário-base e dos cenários de geração de energia elétrica e de produção de biometano na biodigestão seca – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ .eq./t resíduo)		Comparação entre cenários - Valores relativos (%)			
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base	-77,14%	Cenário biometano X Cenário-Base	-82,56%
Cenário geração de energia elétrica	430,39				
Cenário produção de biometano	328,43				



A potencial redução, ao se comparar o cenário de geração de energia elétrica com o cenário-base, é de 1.452,76 kgCO₂.eq. por tonelada de resíduo tratado. A redução anual, considerando-se a geração anual de resíduo, fica em 186,7 mil tCO₂.eq./ano.

A **Figura 10** apresenta o resumo do resultado do potencial de descarbonização para os cenários avaliados.

Para o cenário de produção de biometano, a descarbonização representa 1.554,72 kgCO₂.eq./tonelada de resíduo ou 41,1 kgCO₂.eq./Nm³ de biometano, o que equivale a um potencial de redução anual de 199,8 mil tCO₂.eq.

Figura 10
Resumo do resultado do potencial de descarbonização para os dois cenários da biodigestão seca.



3.3.2 Biodigestão CSTR¹⁵

Foi avaliada uma planta de biodigestão CSTR localizada em São José dos Pinhais, Paraná. A planta recebe resíduos do CEASA, caixas de gordura, lodo de estação de tratamento de efluentes e de grandes geradores de resíduos orgânicos. A unidade utiliza o biogás para a geração de energia elétrica. O digestato é transportado para uma unidade que realiza a compostagem.

A caracterização e o inventário desses cenários podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

a) Cenário geração de energia elétrica:

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 11**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 11

Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – biodigestão CSTR, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ ,eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ ,eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	35,29
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	0,0968
Consumo de energia	-	23,67
Consumo de polímero	-	5,51
Emissões do flare enclausurado	-	0,27
Compostagem do digestato	-	0,00435
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	-	-40,62
Produção evitada de fertilizante fosfatado	-	-0,12
Emissões do gerador	-	3,2
Energia elétrica evitada	-	-34,96
Total	1.883,15	-7,65

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de fertilizantes nitrogenados e fosfatados e o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário de geração de energia elétrica.



¹⁵ Caso avaliado e disponível na publicação *Biogás no Brasil: Potencial descarbonização*. Utilizado banco de dados do Ecoinvent 3.6. Para os demais casos, foi utilizado o banco de dados Ecoinvent 3.7.1.

Os maiores benefícios ambientais (impactos evitados) são possibilitados pelas etapas de: geração de energia elétrica evitada, com 24,3% do impacto total (emissão evitada de -34,96 kgCO₂eq.), e produção evitada de fertilizante nitrogenado, que representa 28,26% (-40,62 kgCO₂eq.). Em relação aos impactos gerados, as maiores contribuições foram a do transporte de fração sólida, com 24,5% (35,29 kgCO₂eq.), e a do consumo de energia elétrica, que representa 16,5% (23,67 kgCO₂eq.).

b) Cenário produção de biometano

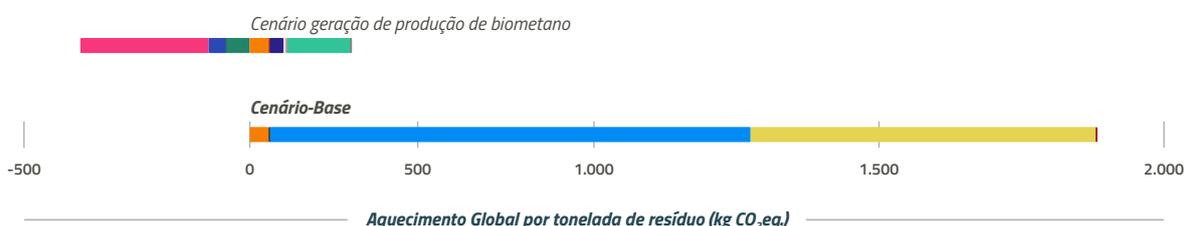
Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de produção de biometano, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 12**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 12
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de produção de biometano – biodigestão CSTR, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Cenário geração de produção de biometano kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	35,29
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	0,0968
Consumo de energia	-	23,67
Consumo de polímero	-	5,51
Emissões do flare enclausurado	-	0,27
Compostagem do digestato	-	0,00435
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	-	-40,62
Produção evitada de fertilizante fosfatado	-	-0,12
Purificação do biogás	-	113,73
Queima do biometano em veículos	-	1,74
Diesel evitado	-	-31,27
Emissões evitadas da queima do diesel	-	-224,9
Total	1.883,15	-116,6

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais. Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, o consumo evitado de diesel e as emissões evitadas da queima do diesel. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário de produção de biometano.



Os maiores benefícios ambientais (impactos evitados) são viabilizados pelas etapas de: queima evitada de diesel, que representa 47,13% (-224,90 kgCO₂eq.), e produção evitada de fertilizante nitrogenado, que corresponde a 8,51% (-40,62 kgCO₂eq.). Em relação aos impactos gerados, as maiores contribuições são as das etapas de upgrading, compressão e descompressão de biometano, que representam 23,8% (113,73 kgCO₂eq.), e a do transporte, que constitui 7,4% (35,29 CO₂eq.).

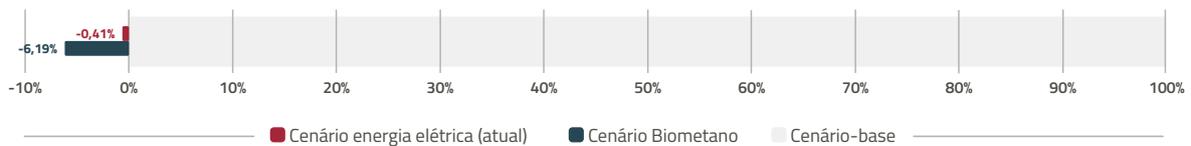
c) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de biodigestão CSTR, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás); o resultado obtido deu-se em virtude dos impactos evitados da geração de energia elétrica, da queima do diesel e da produção dos fertilizantes químicos, além do consumo evitado desses produtos. A **Figura 13** apresenta o comparativo dos cenários de uso energético em relação ao cenário-base.

Figura 13

Comparação do cenário-base e dos cenários de geração de energia elétrica e de produção de biometano na biodigestão CSTR – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ eq./t resíduo)		Comparação entre cenários - Valores relativos (%)			
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base		Cenário biometano X Cenário-Base	
Cenário geração de energia elétrica	-7,65		-100,41%		-106,19%
Cenário produção de biometano	-116,60				



Os potenciais de descarbonização foram de 100% e 106%, ao se comparar o cenário-base (aterro sanitário) ao cenário de energia elétrica e de biometano, respectivamente. No caso da comparação do cenário-base com o de energia elétrica, a redução representa 1.890,80 kgCO₂/t de resíduo, ou seja, uma redução anual (considerando uma geração de resíduo de 31 mil t/ano) de 59 mil tCO₂eq./ano. Esse valor corresponde ao plantio de cerca de 417 mil árvores.

Para o cenário biometano, a redução representa 1.999,75 kgCO₂eq./t de resíduo, o que equivaleria a uma redução anual de 62 mil tCO₂eq. na planta da CS Bioenergia. Esse valor anual corresponde ao plantio de 441 mil árvores. O resumo do potencial de descarbonização para cada um dos cenários energéticos pode ser observado na **Figura 14**.

Figura 14

Resumo do resultado do potencial de descarbonização para os dois cenários da biodigestão CSTR.



3.4 ROTAS TÉRMICAS

Foram avaliadas três rotas de processamento térmico de resíduos: a gaseificação, a incineração e o coprocessamento de CDRU na indústria cimenteira. Para a gaseificação, a avaliação baseou-se em dados de um sistema piloto; para a incineração, em dados de projeto; e para a produção de CDRU e seu uso na cimenteira, partiu-se de dados de uma planta de produção de CDRU em operação. Para cada uma das rotas, foi analisado um cenário de geração de energia elétrica, no caso da gaseificação, da incineração e da substituição térmica de coque de petróleo pelo CDRU. Em todas as rotas foram avaliados cenários da FORSU sendo encaminhada para aterro, biodigestão seca e biodigestão CSTR. Quando havia processos incluídos no projeto/planta que não eram característicos da rota avaliada, eles foram excluídos para que se pudesse realizar uma análise isolada e mais significativa da situação-padrão de cada tecnologia. Isso aconteceu no caso do projeto da incineração, que prevê operações de cooperativas de reciclagem e compostagem de resíduos orgânicos de grandes geradores dentro da planta; e no caso do coprocessamento, no qual a destinação de parte dos resíduos ao aterro foi desconsiderada.

3.4.1 Gaseificação

Foi avaliado um projeto piloto de gaseificação, em escala industrial, localizado em Mafra, Santa Catarina. Os RSU recebidos são resultantes da coleta seletiva, ou seja, são resíduos direcionados, comumente, para destinação final em um aterro. Foram avaliados 4 arranjos com essa rota tecnológica, os quais, após tratamento mecânico simplificado, resultaram, como produto final desse processo de separação: o combustível derivado de resíduos sólidos urbanos (CDRU) e a retirada de metais ferrosos, que foram encaminhados para reciclagem. Os arranjos foram:

- *a separação da FORSU úmida, que foi encaminhada para aterro;*
- *a separação da FORSU úmida, que foi encaminhada para biodigestão seca (item 3.3.1);*
- *a separação da FORSU úmida, que foi encaminhada para biodigestão CSTR (item 3.3.2);*
- *a secagem da FORSU com a energia térmica residual da caldeira e a agregação da FORSU seca ao CDRU para a gaseificação. Depois da gaseificação, o syngas é utilizado para a geração de energia elétrica¹⁶.*

A caracterização e o inventário desses cenários podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

¹⁶Via ciclo Rankine: O syngas é queimado em uma câmara de combustão para gases especiais, para aquecimento de uma caldeira de recuperação que gera vapor para um turbo-gerador.

a) FORSU úmida encaminhada para aterro

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, com a FORSU encaminhada para aterro, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 15**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

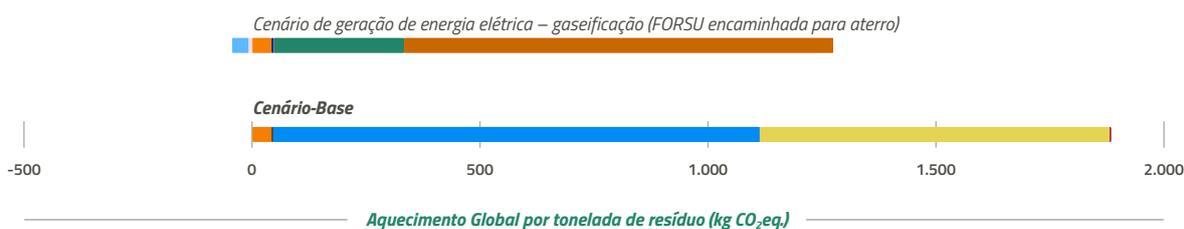
Figura 15
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – gaseificação, com a FORSU encaminhada para aterro, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica (FORSU para aterro) kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	4,84
Reciclagem de metais ferrosos	-	-8,03
Queima do CDRU	-	286,16
Energia elétrica evitada	-	-36,34
FORSU para aterro	-	941,57
Total	1.883,15	1.229,99

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto piloto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro e de materiais ferrosos virgens. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



Ao se analisar os resultados, observa-se o benefício ambiental da etapa de geração de energia elétrica evitada, que representa 2,76%. Com relação aos impactos efetivamente gerados, as etapas do processo que mais contribuem são: a da destinação FORSU ao aterro, com 71,40% do impacto total, e a da queima de CRDU, que representa 21,70%.

b) FORSU úmida encaminhada para biodigestão seca

Para esse cenário, foi utilizado o inventário ambiental da rota descrita em 3.3.1. A quantidade de FORSU gerada e separada no tratamento mecânico foi direcionada para a biodigestão seca no lugar do aterro.

A caracterização e o inventário desse cenário podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, sem secador, e FORSU encaminhada para biodigestão seca, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 16**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 16
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – gaseificação (FORSU para biodigestão seca), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário - FORSU para biodigestão seca kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	4,84
Reciclagem de metais ferrosos	-	-8,03
Queima do CDRU	-	286,16
Energia elétrica evitada	-	-36,34
FORSU para biodigestão seca	-	215,20
Total	1.883,15	503,62

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto piloto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais. Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro e de materiais ferrosos virgens. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



Ao se analisar os resultados, observa-se que o benefício ambiental da etapa de geração de energia elétrica evitada representa 6,13% do impacto total. Com relação aos impactos efetivamente gerados, as etapas do processo que mais contribuem são a da queima de CDRU, que representa 48,31% do impacto total, e a da destinação da FORSU para biodigestão seca, que contribui com 36,33%.

c) FORSU úmida encaminhada para biodigestão CSTR

Para esse cenário, foi utilizado o inventário ambiental da rota descrita em 3.3.2. A quantidade de FORSU gerada e separada no tratamento mecânico foi direcionada para a biodigestão CSTR no lugar do aterro. A caracterização e o inventário desse cenário podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica, sem secador, e FORSU encaminhada para biodigestão CSTR, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 17**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 17
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – gaseificação (FORSU para biodigestão CSTR), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ ,eq./t resíduo	Cenário - FORSU para biodigestão CSTR kgCO ₂ ,eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	4,84
Reciclagem de metais ferrosos	-	-8,03
Queima do CDRU	-	286,16
Energia elétrica evitada	-	-36,34
FORSU para biodigestão CSTR	-	-3,83
Total	1.883,15	284,59

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto piloto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais. Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro e de materiais ferrosos virgens. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



Ao se analisar os resultados, observa-se que o benefício ambiental da etapa de geração de energia elétrica evitada representa 6,13% do impacto total. Com relação aos impactos efetivamente gerados, a etapa do processo que mais contribui é a da queima de CDRU, que representa 48,31% do impacto total.

d) Uso de secador para secagem da FORSU

Para esse cenário, foi prevista a secagem da FORSU com a energia térmica residual da caldeira, agregando-se a FORSU seca ao CDRU para gaseificação (ver **Figura 18**).

Figura 18
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica – gaseificação (com uso de secador para FORSU), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ ,eq./t resíduo	Cenário - Gaseificação com uso do secador kgCO ₂ ,eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	41,79
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	7,68
Reciclagem de metais ferrosos	-	-12,04
Queima do CDRU	-	271,71
Energia elétrica evitada	-	-54,51
Total	1.883,15	254,63

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto piloto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro e de materiais ferrosos virgens. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



Ao se analisar os resultados, observa-se que o benefício ambiental da etapa de geração de energia elétrica evitada representa 14,06% do impacto total. Com relação aos impactos efetivamente gerados, a etapa do processo que mais contribui é a da queima de CDRU, que representa 70,08% do impacto total.

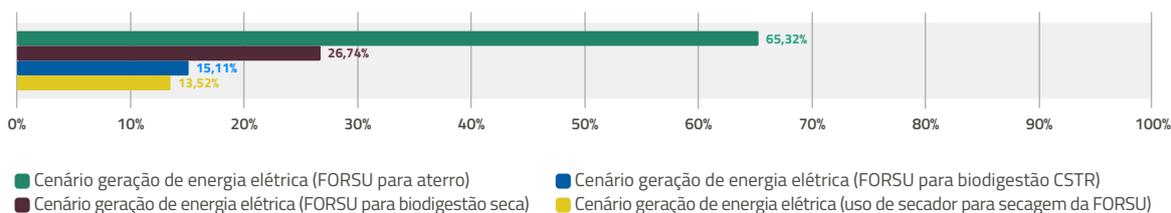
e) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de gaseificação, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás); o resultado obtido deu-se em virtude dos impactos evitados da reciclagem de metais ferrosos, da energia elétrica evitada e da não ocorrência de emissões fugitivas do aterro. Por meio da avaliação da pegada de carbono, identificou-se uma redução das emissões de GEE de 34,68% para o cenário em que a FORSU é encaminhada para aterro; de 73,26% para a biodigestão seca; de 84,89% para biodigestão CSTR; e de 86,48% para o cenário em que a FORSU é secada e agregada ao CDRU, conforme demonstrado na **Figura 19**.

Figura 19

Comparação do cenário-base e dos cenários de geração de energia elétrica na gaseificação – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

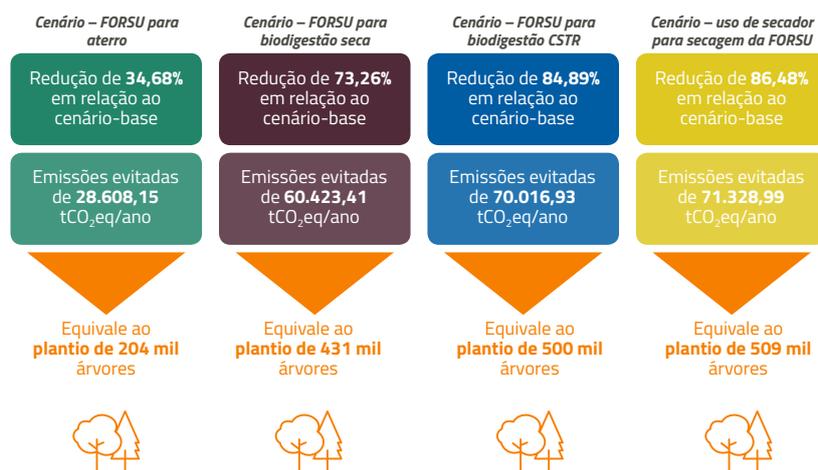
Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ eq./t resíduo)	Comparação entre cenários - Valores relativos (%)		
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base	
Cenário geração de energia elétrica (FORSU para aterro)	1.229,99	-653,16	-34,68
Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca)	503,62	-1.379,53	-73,26
Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR)	284,59	-1.598,56	-84,89
Cenário geração de energia elétrica (uso de secador para secagem da FORSU)	254,63	-1.628,52	-86,48



A potencial redução das emissões, ao se comparar o cenário de geração de energia elétrica com o cenário-base, é de 653,16 kgCO₂eq. por tonelada de resíduo tratado para o cenário em que a FORSU é encaminhada para aterro; de 1.379,53 kgCO₂eq. por tonelada de RSU para biodigestão seca; e de 1.598,56 kgCO₂eq. por tonelada de RSU para biodigestão CSTR. No cenário em que a FORSU é secada e agregada ao CDRU, a redução é de 1.628,52 kgCO₂eq. por tonelada de RSU. A **Figura 20** apresenta o resumo do resultado do potencial de descarbonização anual (considerando o recebimento anual de RSU da planta, que é de 43.800 t) para os cenários avaliados e a equivalência em plantio de árvores.

Figura 20

Resumo do resultado do potencial de descarbonização para os cenários de geração de energia elétrica da gaseificação.



3.4.2 Incineração

Foi avaliado um projeto de planta de incineração a ser localizado no município de Nova Odessa, estado de São Paulo, que visa a atender os municípios integrantes do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas (Consimares). O projeto prevê recebimento de RSU brutos para incineração (*mass burning*), com recuperação de energia para geração de energia elétrica. Prevê, também, compostagem de resíduos orgânicos de grandes geradores e reciclagem de resíduos provenientes da coleta seletiva. No cenário estudado, porém, considera-se somente que os RSU brutos são enviados para incineração. A reciclagem e a compostagem de resíduos orgânicos de grandes geradores foram desconsideradas para que se pudesse analisar, isoladamente, os impactos referentes à rota tecnológica de incineração. São analisados, para essa rota, três cenários: i. no qual não há separação da FORSU; ii. no qual a FORSU é separada e encaminhada para biodigestão seca; iii. no qual a FORSU é separada e encaminhada para biodigestão CSTR. Em todos esses cenários, a energia térmica e o biogás são utilizados para a geração de energia elétrica.

A caracterização e os inventários desses cenários podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

a) Cenário geração de energia elétrica (RSU com FORSU):

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica a partir dos RSU com a FORSU, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 21**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 21
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica (RSU com FORSU) – incineração, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	18,02
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Recebimento, pesagem, prensagem e envelopamento	-	4,90
Entradas e saídas difusas	-	0,0014
Tratamento da água	-	0,09
Desmineralização	-	0,12
Gerador de emergência	-	0,06
Centrais hidráulicas	-	0,0024
Tratamento térmico	-	320,07
ETE contaminados	-	3,47
ETE baixa contaminação	-	2,42
Energia elétrica evitada	-	-124,74
Total	1.883,15	224,41

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



O benefício ambiental (impacto evitado) observado no cenário de geração de energia elétrica (RSU com FORSU) é oriundo da geração evitada de energia elétrica (26,32% do impacto total). Com relação aos impactos gerados no cenário de geração de energia elétrica, a maior contribuição é a do tratamento térmico (67,54% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência nessas etapas são: as eficiências da combustão na caldeira, do tratamento de gases e da conversão no gerador.

b) Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca):

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca), incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 22**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

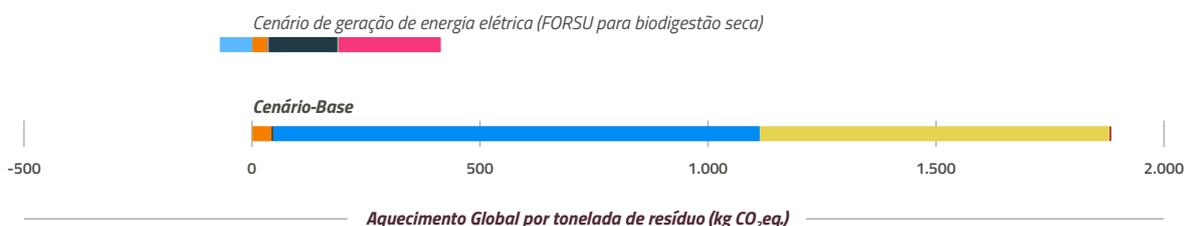
Figura 22
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca) – incineração, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	32,23
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Recebimento, pesagem, prensagem e envelopamento	-	2,28
Entradas e saídas difusas	-	1,45x10 ⁻⁰³
Tratamento da água	-	0,05
Desmineralização	-	0,06
Gerador de emergência	-	0,06
Centrais hidráulicas	-	2,36x10 ⁻⁰³
Tratamento térmico	-	149,12
ETE contaminados	-	1,71
ETE baixa contaminação	-	1,53
Energia elétrica evitada	-	-71,66
Biodigestão seca	-	229,21
Total	1.883,15	344,59

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



O benefício ambiental (impacto evitado) observado no cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca) é oriundo da geração evitada de energia elétrica (14,69% do impacto total). Com relação aos impactos gerados, a maior contribuição é a da biodigestão seca (46,98% do impacto total), seguida pela do tratamento térmico (30,56% do impacto total).

c) Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR):

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR), incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 23**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

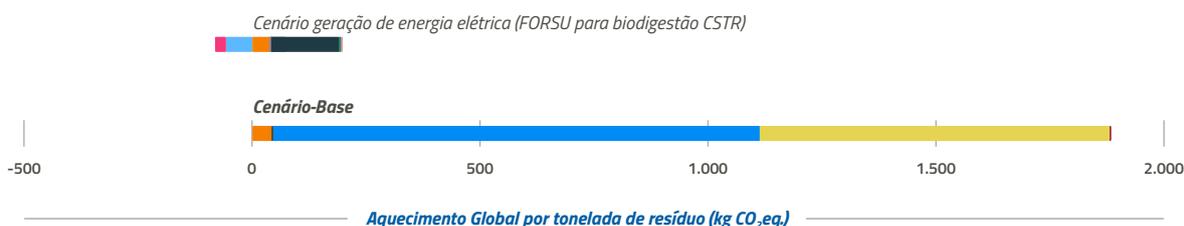
Figura 23
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR) – incineração, em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Cenário geração de energia elétrica kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	36,86
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Recebimento, pesagem, prensagem e envelopamento	-	2,28
Entradas e saídas difusas	-	0,0014
Tratamento da água	-	0,05
Desmineralização	-	0,06
Gerador de emergência	-	0,06
Centrais hidráulicas	-	0,0023
Tratamento térmico	-	149,12
ETE contaminados	-	1,71
ETE baixa contaminação	-	1,53
Energia elétrica evitada	-	-58,12
Biodigestão CXTR	-	-18,60
Total	1.883,15	114,95

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para um projeto e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica do grid brasileiro. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário geração de energia elétrica.



O benefício ambiental (impacto evitado) observado no cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR) é oriundo da geração evitada de energia elétrica (21,65% do impacto total) e da biodigestão CSTR (6,93% do impacto total). Com relação aos impactos gerados, a maior contribuição é a do tratamento térmico (55,56% do impacto total), seguida pela do transporte até a unidade (13,73% do impacto total). Os fatores que exercem maior influência nessas etapas são: as eficiências do transporte, da combustão na caldeira, do tratamento de gases e da conversão no gerador.

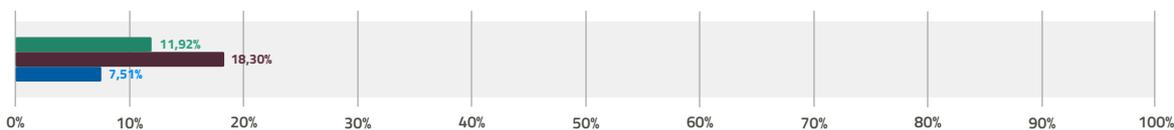
d) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de incineração e geração de energia elétrica, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás); o resultado obtido deu-se em virtude do impacto evitado da geração de energia elétrica. Por meio da avaliação da pegada de carbono, identificou-se uma redução das emissões de GEE de 88,08% para o cenário de RSU com a FORSU; de 81,70% para o cenário da FORSU encaminhada para biodigestão seca; e de 92,49% para o cenário da FORSU encaminhada para biodigestão CSTR, conforme demonstrado na **Figura 24**.

Figura 24

Comparação do cenário-base e do cenário de geração de energia elétrica na incineração – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ eq./t resíduo)		Comparação entre cenários - Valores relativos (%)	
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base	
Cenário geração de energia elétrica (RSU com FORSU)	224,41	-1.658,74	-88,08%
Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca)	344,59	-1.538,56	-81,70%
Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR)	141,34	-1.741,81	-92,49%



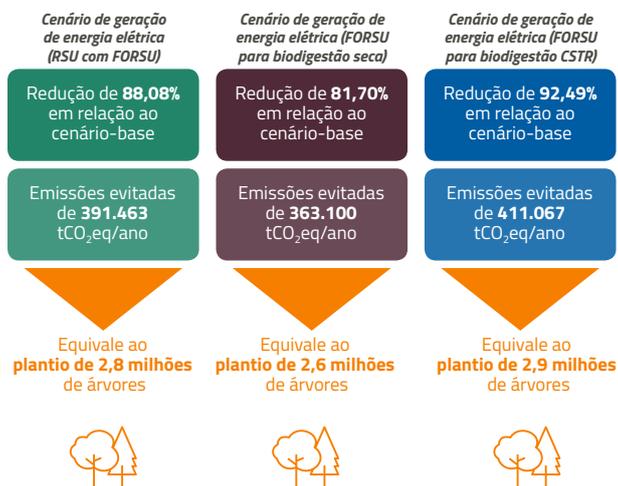
■ Cenário geração de energia elétrica (RSU com FORSU)
 ■ Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão CSTR)
 ■ Cenário geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca)

A potencial redução, ao se comparar o cenário de geração de energia elétrica com o cenário-base, é de 1.658,74 kgCO₂eq. para o cenário de RSU com a FORSU; de 1.538,56 kgCO₂eq. para o cenário em que a FORSU é encaminhada para biodigestão seca; e de 1.741,81 kgCO₂eq. para o cenário em que a FORSU é encaminhada para biodigestão CSTR, por tonelada de resíduo tratado. A redução anual, considerando-se a geração anual de resíduo, fica em torno de 388 mil tCO₂eq./ano.

A **Figura 25** apresenta o resumo do resultado do potencial de descarbonização para os cenários avaliados.

Figura 25

Resumo do resultado do potencial de descarbonização para o cenário de incineração com geração de energia elétrica



3.4.3 Coprocessamento

Foi avaliado um caso real de produção de combustível derivado de resíduo sólido urbano – CDRU para coprocessamento. A planta está localizada em Pernambuco, no município de Igarassu, e realiza a produção de CDR (CDRU e CDRI¹⁷) para uma cimenteira localizada a uma distância de 60 km.

O resíduo é segregado, sendo a FORSU direcionada para aterro, com recuperação do biogás para geração de energia elétrica, e os resíduos recicláveis são encaminhados para beneficiamento dentro da própria unidade e para outras recicladoras localizadas até uma distância de 119 km.

Foi considerado que 100% dos RSU passam pelo tratamento mecânico para produção de CDRU e para a separação da FORSU e dos recicláveis. A ACV foi realizada com dados primários da produção de CDRU e dados secundários do coprocessamento na planta de cimento.

Foram avaliados 3 arranjos com essa rota tecnológica, após tratamento mecânico e segregação dos recicláveis e da FORSU:

- FORSU encaminhada para aterro com geração de energia elétrica;
- FORSU encaminhada para biodigestão seca (item 3.3.1);
- FORSU encaminhada para biodigestão CSTR (item 3.3.2).

¹⁷ Combustível derivado de resíduos sólidos industriais.

a) FORSU encaminhada para aterro

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de produção de CDRU para uso em cimenteira, em substituição ao coque de petróleo, e a FORSU sendo destinada ao aterro, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 26**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 26
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de coprocessamento (FORSU para aterro), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ eq./t resíduo	Ecoparque - coprocessamento (FORSU para aterro) kgCO ₂ eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	37,61
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	0,63
Reciclagem	-	21,42
Produção de CDRU	-	1,34
Transporte até a cimenteira	-	3,74
Coprocessamento CDRU	-	191,62
FORSU para aterro	-	553,36
Energia elétrica evitada para moagem do coque	-	-0,48
Coque de petróleo - evitado	-	-24,14
Queima evitada do coque	-	-235,51
Total	1.883,15	549,60

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para uma planta e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais. Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica para a moagem do coque, o consumo evitado de coque e as emissões evitadas da queima do coque. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário coprocessamento.



Os benefícios ambientais (impacto evitado) observados no cenário de coprocessamento, com a FORSU destinada ao aterro, são oriundos da queima evitada de coque (22,01% do impacto total), da produção de coque evitada (2,26%) e da energia elétrica evitada pela moagem do coque (0,04%). Com relação aos impactos gerados, a maior contribuição é a da destinação da fração orgânica ao aterro com captação do biogás para geração de energia elétrica (51,72% do impacto total). O fator que exerce maior influência nessas etapas é o poder calorífico do CDRU.

b) FORSU encaminhada para biodigestão seca

Para esse cenário, foi utilizado o inventário ambiental da rota descrita em 3.2.1. A quantidade de FORSU gerada e separada no tratamento mecânico foi direcionada para a biodigestão seca no lugar do aterro.

A caracterização e o inventário desse cenário podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica e FORSU encaminhada para biodigestão seca, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 27**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 27

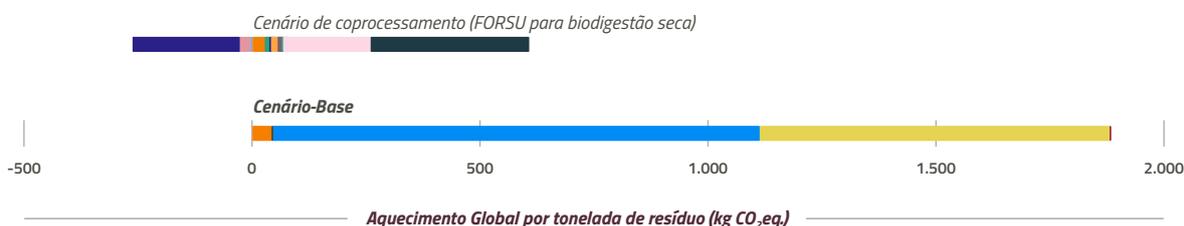
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de coprocessamento (FORSU para biodigestão seca), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário coprocessamento (FORSU para biodigestão seca) kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	37,61
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	0,63
Reciclagem	-	21,42
Produção de CDRU	-	1,34
Transporte até a cimenteira	-	3,74
Coprocessamento CDRU	-	191,62
FORSU para biodigestão seca	-	347,24
Energia elétrica evitada para moagem do coque	-	-0,48
Coque de petróleo - evitado	-	-24,14
Queima evitada do coque	-	-235,51
Total	1.883,15	343,48

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para uma planta e não representam necessariamente valores padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica para a moagem do coque, o consumo evitado de coque e as emissões evitadas da queima do coque. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário base e até a planta no cenário coprocessamento.



Os benefícios ambientais (impacto evitado) observados no cenário de coprocessamento, com a FORSU sendo destinada para biodigestão seca, são oriundos da queima evitada de coque (27,27% do impacto total), da produção de coque evitada (2,80%) e da energia elétrica evitada pela moagem do coque (0,06%). Com relação aos impactos gerados, a maior contribuição é a da destinação da fração orgânica para biodigestão seca (40,20% do impacto total).

c) FORSU encaminhada para biodigestão CSTR

Para esse cenário, foi utilizado o inventário ambiental da rota descrita em 3.3.2. A quantidade de FORSU gerada e separada no tratamento mecânico foi direcionada para a biodigestão CSTR no lugar do aterro.

A caracterização e o inventário desse cenário podem ser observados nos **Apêndices I e II**.

Os resultados da avaliação da pegada de carbono para o cenário de geração de energia elétrica e FORSU encaminhada para biodigestão CSTR, incluindo todas as etapas que compõem o sistema estudado, são apresentados na **Figura 28**, em valores absolutos e em contribuição relativa.

Figura 28
Resultados da avaliação de impacto de aquecimento global para o cenário de coprocessamento (FORSU para biodigestão CSTR), em comparação ao cenário-base (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU).

Impacto por etapas consideradas na rota tecnológica	Cenário-base kgCO ₂ .eq./t resíduo	Cenário coprocessamento (FORSU para biodigestão CSTR) kgCO ₂ .eq./t resíduo
Transporte até a unidade*	41,79	37,61
Operação das máquinas no aterro	1,55	-
Emissões fugitivas do aterro (50%)	1.069,51	-
Emissões do flare aberto	768,98	-
Lançamento do efluente em corpo receptor	1,32	-
Consumo de energia elétrica	-	0,63
Reciclagem	-	21,42
Produção de CDRU	-	1,34
Transporte até a cimenteira	-	3,74
Coprocessamento CDRU	-	191,62
FORSU para Biodigestão CSTR	-	-6,17
Energia elétrica evitada para moagem do coque	-	-0,48
Coque de petróleo evitado	-	-24,14
Queima evitada do coque	-	-235,51
Total	1.883,15	-9,93

Os resultados apresentados no gráfico são específicos para uma planta e não representam necessariamente valores-padrão para a rota tecnológica avaliada. Por isso, não devem ser utilizados para realizar comparações entre as rotas tecnológicas, já que cada projeto/planta apresenta suas especificidades técnicas e operacionais.

Os valores negativos representam os impactos evitados, sendo, neste caso, o consumo evitado de energia elétrica para a moagem do coque, o consumo evitado de coque e as emissões evitadas da queima do coque. Os valores positivos representam os impactos efetivamente ocorridos.

*Transporte até o aterro no cenário-base e até a planta no cenário coprocessamento.



Os benefícios ambientais (impacto evitado) observados no cenário de coprocessamento, com a FORSU sendo destinada à biodigestão CSTR, são oriundos da queima evitada de coque (45,06% do impacto total), da produção de coque evitada (4,62%) e da energia elétrica evitada pela moagem do coque (0,09%). Com relação aos impactos gerados, a maior contribuição é a da etapa de coprocessamento do CDRU (36,66% do impacto total).

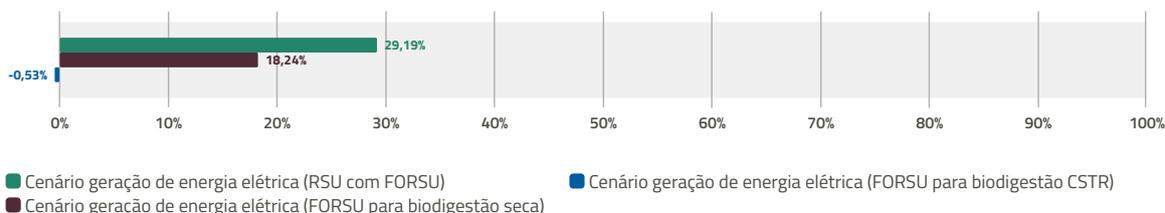
d) Comparação entre os cenários

Os cenários analisados, de coprocessamento, demonstram um potencial de descarbonização do sistema em comparação ao sistema tradicional de manejo desses resíduos (aterro sem aproveitamento do biogás). O resultado obtido deu-se em virtude do impacto evitado da produção e queima do coque e da energia elétrica evitada da moagem. Por meio da avaliação da pegada de carbono, identificou-se uma redução das emissões de GEE que varia entre 70,81% e 100,53%, conforme demonstrado na **Figura 29**.

Figura 29

Comparação do cenário-base e do cenário de coprocessamento – redução em relação ao cenário-base (%) - (Unidade Funcional = tratamento de 1t de RSU)

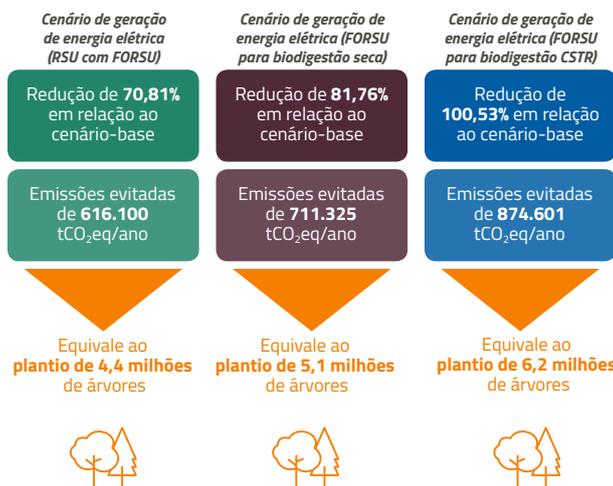
Impactos por cenário - Valores absolutos (kgCO ₂ eq./t resíduo)	Comparação entre cenários - Valores relativos (%)		
Cenário-Base	1.883,15	Cenário energia elétrica X Cenário-Base	
Cenário produção de CDRU e coprocessamento - FORSU para aterro	549,60	-1.333,55	-70,81%
Cenário produção de CDRU e coprocessamento - FORSU para biodigestão seca	343,48	-1.539,67	-81,76%
Cenário produção de CDRU e coprocessamento - FORSU para biodigestão CSTR	-9,93	-1.893,08	-100,53%



A potencial redução, ao se comparar o cenário de coprocessamento com o cenário-base, é de 1.333,55 kgCO₂eq. por tonelada de resíduo, para o cenário em que a FORSU é destinada ao aterro, e de 1.539,67 e 1.893,08, quando a FORSU é destinada à biodigestão seca e CSTR, respectivamente. A redução anual, considerando-se a geração anual de resíduo, fica em 616 mil tCO₂eq./ano para o cenário em que a FORSU é encaminhada para aterro, e de 711 mil tCO₂eq./ano e 875 mil tCO₂eq./ano, para os cenários de biodigestão seca e CSTR, respectivamente. A **Figura 30** apresenta o resumo do resultado do potencial de descarbonização para os cenários avaliados.

Figura 30

Resumo do resultado do potencial de descarbonização para o cenário de coprocessamento



4

REFERÊNCIAS

ABNT. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Brasil: ABNT, 2014. Disponível em: www.abnt.org.br

ABNT. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. p. 21.

ABNT ISO. **ABNT ISO/TS 14067:2015 Gases de efeito estufa — Pegada de carbono de produtos — Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação.** Brasil: ABNT, 2015.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021.** São Paulo, Brasil: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>

ABREN. **Benefícios das Usinas de Recuperação Energética de Resíduos em comparação com os aterros sanitários.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://abren.org.br/2020/09/07/beneficios-das-usinas-de-recuperacao-energetica-de-residuos-em-comparacao-com-os-aterros-sanitarios/>. Acesso em: 12 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis.** Rio de Janeiro: ANP, 2021.

BEYLOT, Antoine; VILLENEUVE, Jacques; BELLENFANT, Gaël. *Life Cycle Assessment of landfill biogas management: Sensitivity to diffuse and combustion air emissions.* **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 401–411, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.08.017>

BIANCO, Isabella; PANEPINTO, Deborah; ZANETTI, Mariachiara. *End of life tyres: Comparative life cycle assessment of treatment scenarios.* **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11083599>

BRASIL. **1o Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasil: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2011.

BRASIL. **Lei No 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Versão 12.305. Brasília, Brasil: Casa Civil, 2010.

BRASIL. **Lei no 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020.

CONSÓRCIO VITAL. **Estruturação do Sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU): Plano de negócio referencial: CONVALE**. Brasil: Consorcio Vital, 2020.

EPE. **Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Rurais**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S?rie> Estudos de Energia/DEA 17 - Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de.pdf

EPE. **Potencial Energético dos Resíduos Urbanos**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2019.

FELICI, Elson Mendonça. **Coagulação - Flocculação - Sedimentação como pós-tratamento de efluente de sistema**. 2010. - Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento., [s. l.], 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000163256>

GOEDKOOPE, Mark *et al.* **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2009.

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Parecer Unico 13828711382871/2017**. Minas Gerais: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2017.

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Parecer único No 0283058/2019 (SIAM) Indexado**. Minas Gerais: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2019.

GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES, M. A.O.; CHERNICHARO, C. A.L. **Modelling of a sanitary landfill for developing countries to improve the reliability of Life Cycle Assessment studies.** Graz, Austria: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012085>

GUTIERREZ, Katia Gonçalves. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação do ciclo de vida.** 2014. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2014.

HUIJBREGTS, MAJ *et al.* **ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization.** Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2016.

JUNGBLUTH, Niels *et al.* **Life cycle inventories of bioenergy.** Uster: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/230725648_Life_Cycle_Inventories_of_Bioenergy._ecoinvent_report_No._17/file/9c96051b76e2fb8dce.pdf

MAIA, Iracema Souza *et al.* Avaliação do tratamento biológico de lixiviado de aterro sanitário em escala real na Região Sul do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 665–675, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040140926>

MANANCIAL PROJETOS E CONSULTORIA AMBIENTAL. **Estudo de Impacto Ambiental: Central de Tratamento de Resíduos Consimares.** Nova Odessa: Manancial: Projetos e Consultoria Ambiental, 2021.

MÁXIMO, Vivian Alves. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados do aterro sanitário da região metropolitana de Florianópolis.** 187 f. 2007. - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89595>

MME/EPE. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2008. Disponível em: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S?rieEstudosdeEnergia/20081208_1.pdf

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 - Versão para Consulta Pública.** Brasília: MME/EPE, 2022.

NSCA. **Comparison of Emissions from Waste Management Options**. Brighton BN2 9QA, UK.: National Society for Clean Air and Environment, 2002.

PROBIOGÁS. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. In: Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), 2015.

REBITZER, Gerald *et al.* *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. **Environment International**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

RIITTA PIPATTI *et al.* *Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste*. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, [s. l.], p. 4.1-4.8, 2006.

SEEG. **Emissões por Setor - Resíduos**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/residuos>.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York: McGrawHill International Editions, 1993.

USEPA. **Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills**. EPA/600/R-08-116.: ion Agency, Office of Research and Development, 2008.

WAGNER, Luiz Gustavo *et al.* **Avaliação da eficiência da queima de biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um queimador enclausurado**. Curitiba, Brasil: Congresso ABES FENASAN, 2017.

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Nova NDC do Brasil: entenda por que a meta climática foi considerada pouco ambiciosa**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/nova-ndc-do-brasil-entenda-por-que-meta-climatica-foi-considerada-pouco-ambiciosa>. Acesso em: 5 jan. 2022.

APÊNDICE I

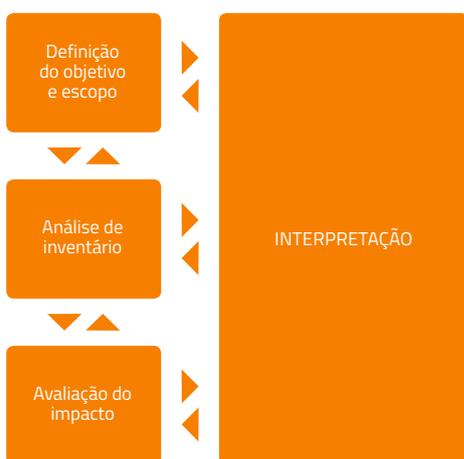
METODOLOGIA APLICADA À AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, aplicada internacionalmente por diversas organizações. Por considerar todo o ciclo de vida dos produtos ou processos, possibilita uma visão mais abrangente e completa dos aspectos e impactos ambientais. Essa metodologia pode auxiliar as organizações no planejamento estratégico, na elaboração de políticas públicas, na definição de processos de tratamento e na monetização de serviços ambientais.

A ACV é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto ou serviço, a partir de um inventário de entradas e saídas (de recursos e energia, de emissões para o ar, a água e o solo), desde a extração da matéria-prima até a disposição final (ABNT, 2014). Nas ACVs que lidam com sistemas de tratamento de resíduos, é usual considerar-se desde a geração dos resíduos, passando pelo transporte, tratamento, até a disposição dos subprodutos gerados.

Os estudos de ACV possuem quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação, conforme apresentado na **Figura 1**.

Figura 1
Fases de uma avaliação de ciclo de vida.



Na realização da ACV para este estudo, foram adotadas as diretrizes das normas da série ISO 14.040 (ABNT, 2014). Conforme as normas, é necessário basear-se em uma unidade de referência que indique o desempenho quantificado de um sistema, de modo a permitir que bens e serviços sejam comparados e analisados; a esta medida é dado o nome de Unidade Funcional (UF) (ABNT, 2009; ABNT, 2014 ; Rebitzer *et al.*, 2004).

Neste estudo, a UF adotada foi a de tratar 1 tonelada (1 t) de resíduo sólido urbano. Foram incluídos, no sistema analisado, os processos que sucedem a geração do resíduo, o que compreende o transporte, o tratamento realizado e todos os subprodutos gerados. Foram considerados, também, numa perspectiva de expansão do sistema, os impactos evitados, oriundos da substituição de produtos, cujas funções podem ser desempenhadas pelos subprodutos do tratamento do resíduo.

Para a elaboração do inventário do ciclo de vida do tratamento e disposição final dos resíduos, foram utilizados dados primários dos projetos/plantas ou de referências científicas nacionais e internacionais e dados provenientes da base de dados do *ecoinvent*¹⁸ (ABNT, 2009; ABNT, 2014; Rebitzer *et al.*, 2004). A avaliação foi realizada por meio do software SimaPro, e a metodologia de avaliação de impacto foi a ReCiPe Midpoint 2016, para a categoria de impacto aquecimento global. O fator de caracterização das mudanças climáticas é o potencial de aquecimento global, baseado no relatório de 2013 do IPCC. Para a perspectiva hierárquica, foi utilizado horizonte de 100 anos e foram incluídos os feedbacks climáticos do carbono também para os demais poluentes (que não o CO₂), o que afeta sua importância relativa, adicionando incerteza, mas trazendo mais consistência ao método.

Considera-se que a emissão de um gás do efeito estufa levará a um aumento da concentração atmosférica desse tipo de gás, que, por sua vez, vai incrementar a capacidade de forçamento radiativo, levando a um aumento da temperatura média global. O aumento da temperatura, em última análise, resulta em danos à saúde humana e aos ecossistemas (Goedkoop *et al.*, 2009; Huijbregts *et al.*, 2016).

A caracterização e o limite do sistema foram realizados para cada uma das rotas tecnológicas de aproveitamento energético, que foram agrupadas em dois tipos (biodigestão e térmica) e estão discriminadas a seguir.

¹⁸Essa base de dados de inventários internacional fornece dados de processos para produtos em diversas áreas, como abastecimento de energia, agricultura, transporte, produtos químicos, materiais de construção e tratamento de resíduos.

I. Caracterização e fronteira do sistema para os cenários de aterro sanitário com aproveitamento de biogás

O aterro sanitário no qual se prevê a implantação da planta de biogás está localizado no sudeste. O aterro, que tem aproximadamente 9 anos, atende uma população de 1.790.706 pessoas e recebe 512.636 toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano.

São captados anualmente 28.224.000 m³ de biogás (37°C, 1 atm). Prevê-se, no projeto, que parte desse biogás coletado seja direcionada para um *flare* enclausurado (11,43%), parte seja direcionada para geração de energia elétrica (17,14%) e parte seja direcionada para purificação em biometano (71,43%). A partir daí, serão gerados, anualmente, 17.520 MWh de energia elétrica e 10.483.200 Nm³ de biometano. Essas informações são mostradas na **Tabela I**.

Tabela I
Informações sobre o projeto – aterro sanitário com aproveitamento de biogás

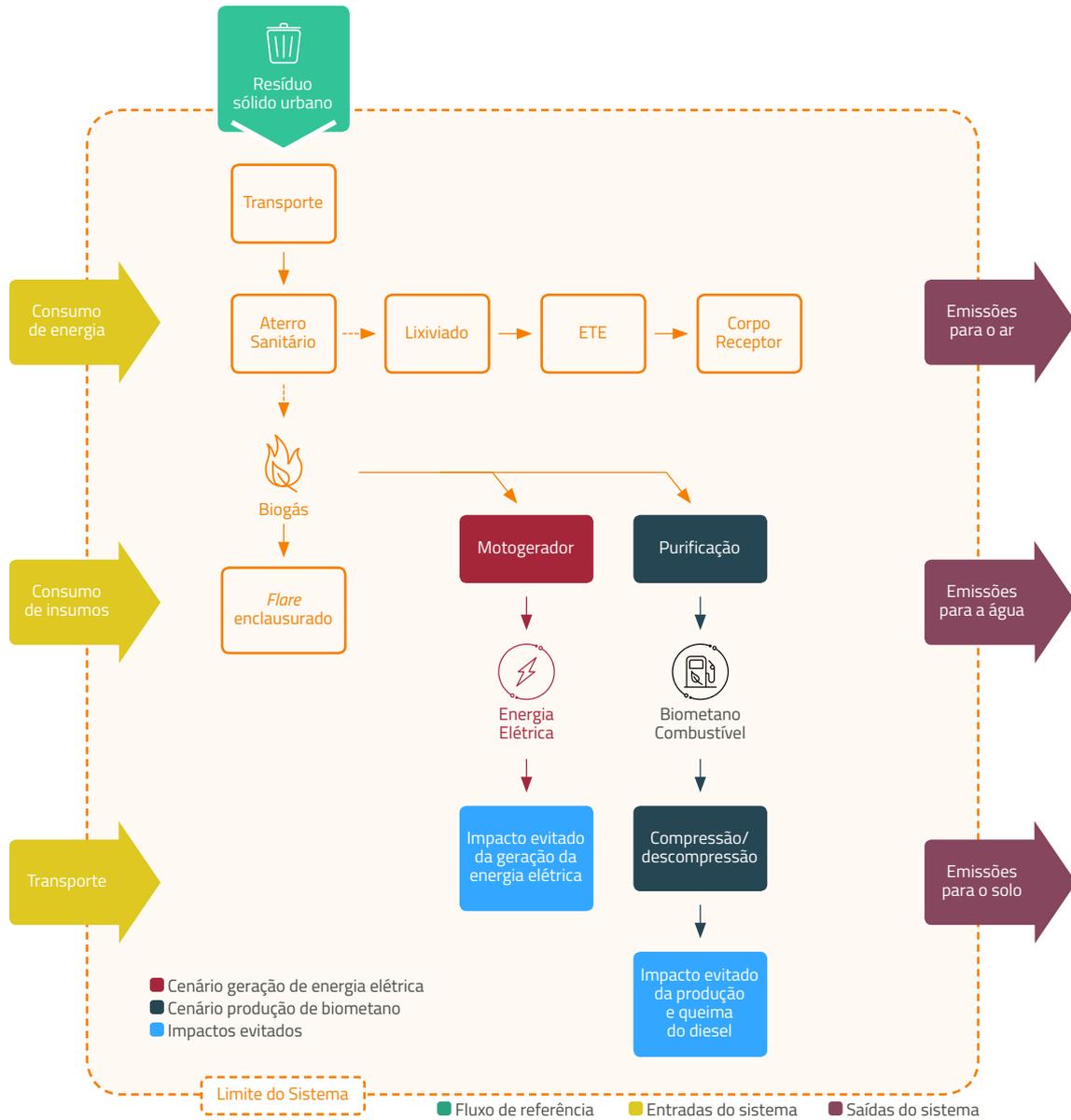
Nome do empreendimento	Localização	RSU recebidos	Biogás captado	Energia elétrica gerada	Biometano produzido
Aterro sanitário com aproveitamento do biogás	São Paulo	512.636 t/ano	28.224.000 m ³ /ano (37°C, 1 atm)	17.520 MWh/ano	10.483.200 Nm ³ /ano

A fronteira do estudo (**Figura II**) considerou desde o transporte dos resíduos ao aterro até o consumo/destinação dos produtos do tratamento desses resíduos, ou seja, a fração gasosa (biogás) e a fração líquida (lixiviado).

A partir disso, foram elaborados os inventários ambientais de dois cenários:

- i. cenário de geração de energia elétrica: disposição em aterro com tratamento do lixiviado e parte do biogás queimado em *flare* enclausurado (11,43%) e parte destinada a um gerador (88,57%); e
- ii. cenário de produção de biometano: disposição em aterro com tratamento do lixiviado e parte do biogás queimada em *flare* enclausurado (11,43%) e parte destinada à purificação a biometano (88,57%).

Figura II
Fronteira do sistema - aterro sanitário com aproveitamento de biogás.



II. Caracterização e limite do sistema para os cenários de biodigestão seca

O sistema de gestão de RSU para os municípios do CONVALE foi estruturado considerando não somente a disposição dos RSU, mas visando a aumentar a vida útil do aterro e a englobar reciclagem, biodigestão e compostagem. Os processos de reciclagem e compostagem, porém, foram desconsiderados nos cenários avaliados. O consórcio localiza-se na região do Vale do Rio Grande, em Minas Gerais, e engloba os municípios de Água Comprida, Campo Florido, Conceição das Alagoas, Delta, Planura, Sacramento, Uberaba e Veríssimo.

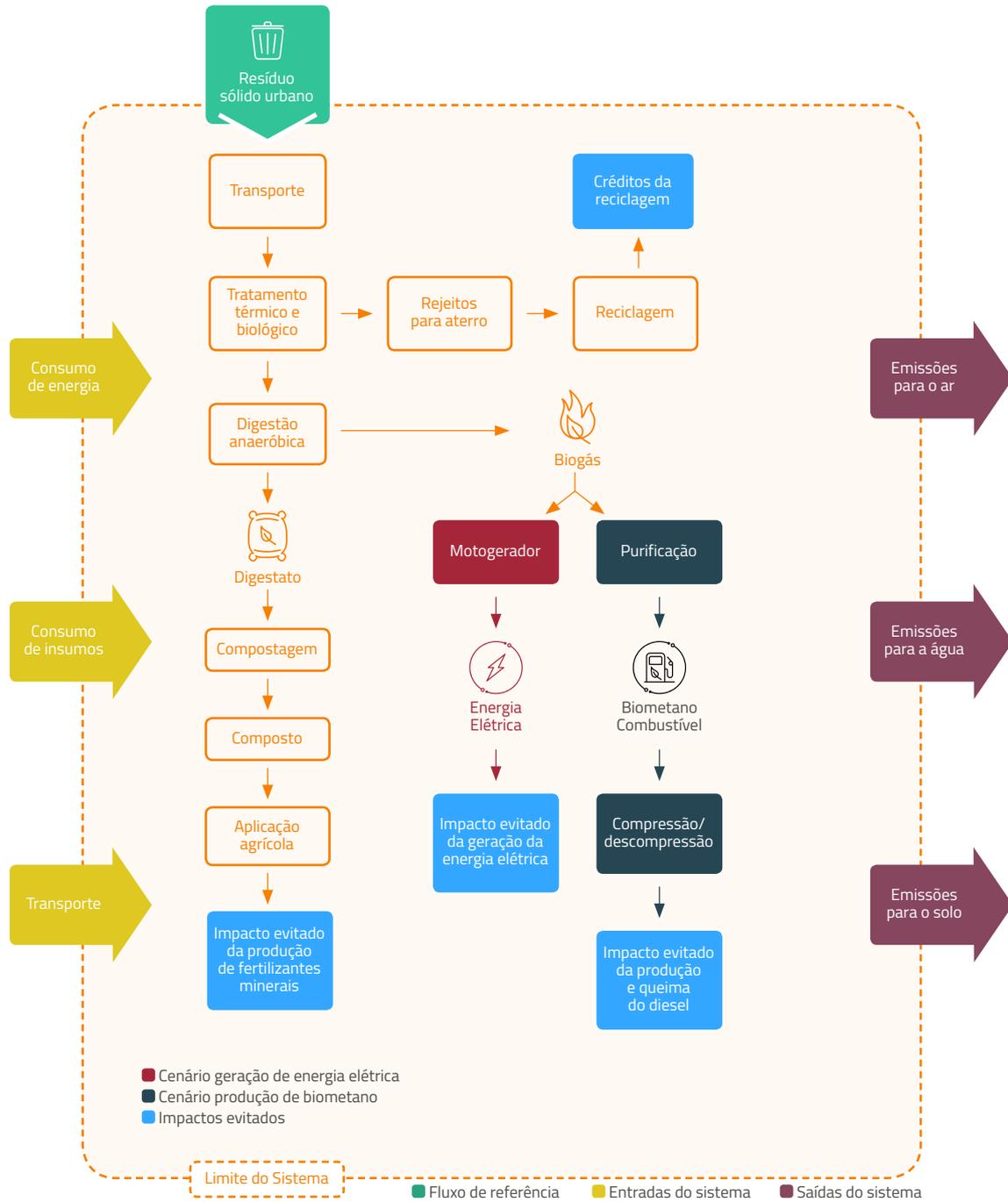
O projeto considera o uso inicial do aterro sanitário de Uberaba, no estado de Minas Gerais, e visa a atender os oito municípios, cuja população é de 433.288 pessoas que geram, anualmente, 128.501,9 t de RSU (CONSÓRCIO VITAL, 2020).

A fronteira do estudo (*Figura III*) considerou desde o transporte dos resíduos à unidade até o consumo/destinação dos produtos do tratamento desses resíduos, ou seja, a fração gasosa (biogás) e a fração líquida (lixiviado).

A partir disso, foram elaborados os inventários ambientais de dois cenários:

- i. cenário de geração de energia elétrica, no qual os RSU são direcionados para tratamento mecânico, a partir do qual os rejeitos são destinados a aterro, os recicláveis à reciclagem e parte da FORSU é destinada à digestão anaeróbia, seguida de compostagem do digestato e uso do composto na agricultura, e o biogás produzido é destinado a um gerador de energia elétrica; e
- ii. cenário de produção de biometano, no qual os RSU são direcionados para tratamento mecânico, a partir do qual os rejeitos são destinados a aterro, os recicláveis à reciclagem e parte da FORSU é destinada à digestão anaeróbia, seguida de compostagem do digestato e uso do composto na agricultura, e o biogás produzido é destinado a um purificador.

Figura III
Fronteira do sistema – biodigestão seca.



III. Caracterização e limite do sistema para o cenário de gaseificação

A Energia Limpa do Brasil é uma empresa brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas de tratamento térmico em resíduos sólidos. A tecnologia foi desenvolvida pela Energia Limpa do Brasil em parceria com a UFPR e a LACAUT, para o aproveitamento energético dos RSU.

O projeto, que se iniciou no ano de 2006, teve como objetivo a gaseificação de rejeitos de resíduos sólidos urbanos para a produção de energia térmica, com possibilidade de produção de vapor e eletricidade, sendo o piloto instalado na cidade de Mafra, em Santa Catarina. A **Tabela II** apresenta as principais características da planta avaliada.

Tabela II

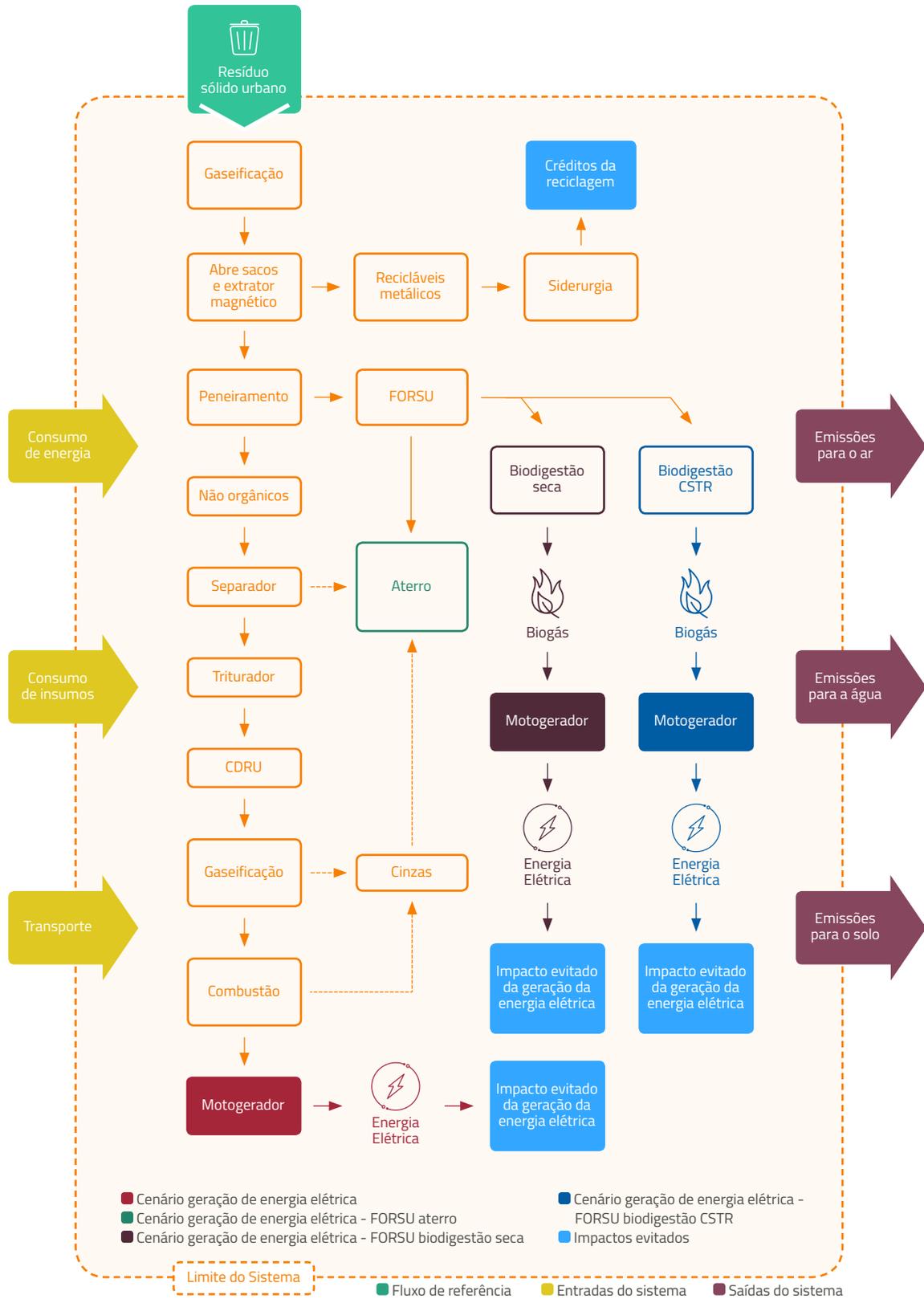
Informações sobre o projeto – aterro sanitário com aproveitamento de biogás

Nome do empreendimento	Localização	Entrada de RSU	Geração de gás combusto	Geração de energia elétrica
Energia Limpa - Gaseificação	Santa Catarina	120 t/dia	29.000 kg/h	3 MW

O limite do sistema é demonstrado na **Figura IV**, na qual é possível observar que a ACV considera o impacto da geração dos resíduos sólidos urbanos até a destinação final dos subprodutos do processo, incluindo os recicláveis e as cinzas.

A partir disso, foi elaborado o inventário ambiental do cenário de geração de energia elétrica, no qual os resíduos são gaseificados e a energia térmica é transformada em energia elétrica em um turbogerador.

Figura IV
Fronteira do sistema – gaseificação.



IV. Caracterização e limite do sistema para os cenários de incineração

A Central de Tratamento de Resíduos Consimares (CTRC) corresponde à implantação e operação de uma unidade industrial de tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados em sete municípios (Capivari, Elias Fausto, Hortolândia, Monte Mor, Nova Odessa, Santa Bárbara d'Oeste e Sumaré), no estado de São Paulo, integrantes do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas (Consimares).

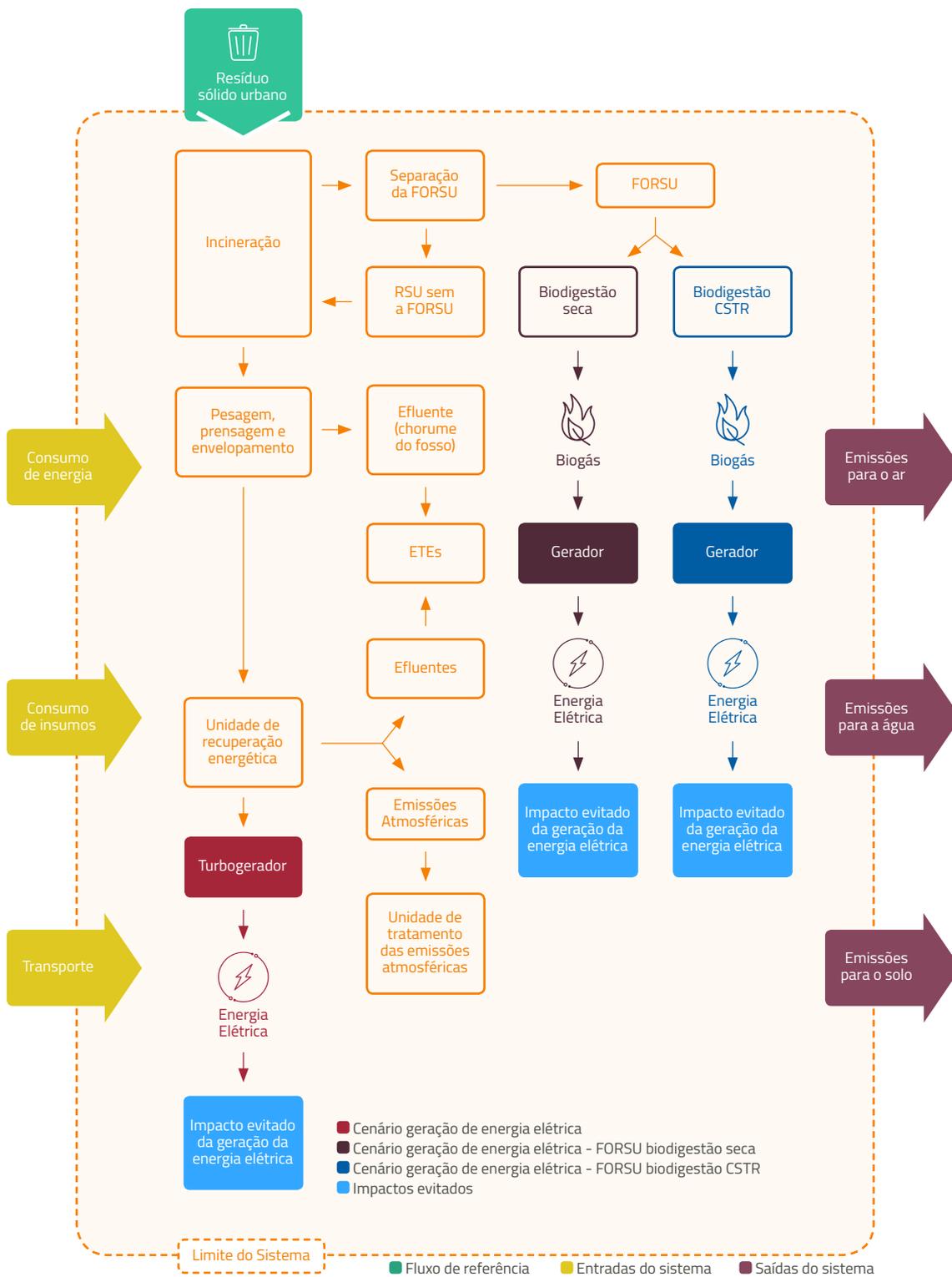
A população que será atendida pelo empreendimento é a que compõe os sete municípios participantes do Consimares, que totaliza 910.000 habitantes (2020) e, atualmente, gera 628,5 t/dia de RSU.

Além do tratamento térmico, a CTRC também tem como finalidades a produção de composto orgânico para uso como fertilizante e a recuperação de resíduos recicláveis por meio de separação e triagem (EIA, 2021), porém, esses processos foram desconsiderados nos cenários avaliados.

A fronteira do estudo (**Figura V**) considerou desde o transporte dos resíduos à central até o consumo/destinação dos produtos do tratamento desses resíduos, ou seja, a fração sólida (resíduos da incineração e das ETEs), a fração gasosa (combusto) e a fração líquida (lixiviado).

A partir disso, foram elaborados os inventários ambientais dos cenários de geração de energia elétrica, nos quais os resíduos são incinerados e a energia térmica é transformada em energia elétrica em um gerador.

Figura V
Fronteira do sistema – incineração.



V. Caracterização e limite do sistema para o cenário de coprocessamento

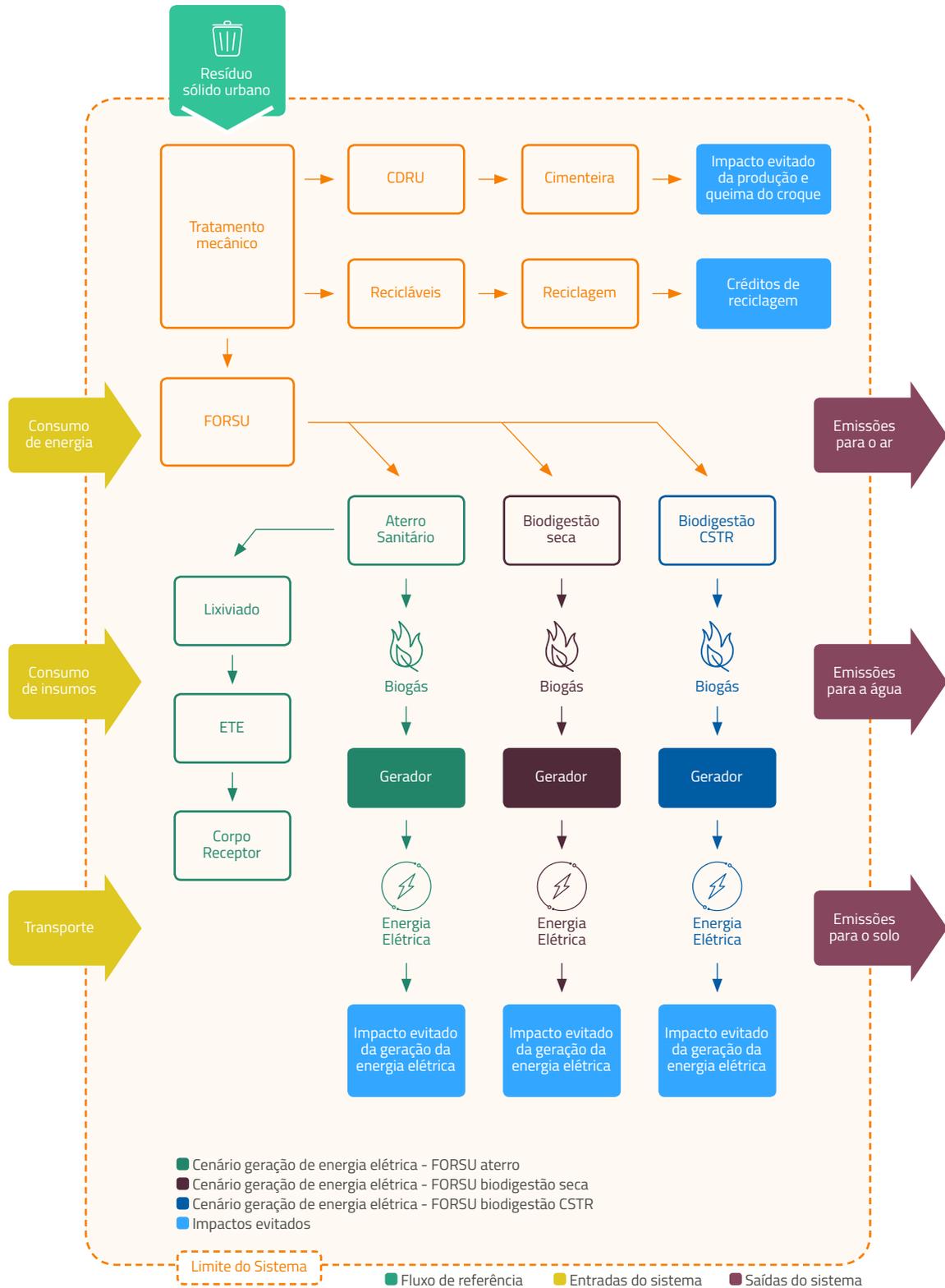
A Central de Tratamento de Resíduos Pernambuco (CTR-PE), que está localizada no município de Igarassu, região metropolitana de Recife, consiste em um complexo composto por: Aterro Sanitário Classe I, Classe IIA e IIB, britador para resíduos de construção civil, produção de CDRU e CDRI, compostagem e usina de biogás. Realiza o tratamento mecânico de, aproximadamente, 43% dos resíduos que chegam no aterro para tratamento mecânico e separação da fração orgânica e recicláveis.

A unidade recebe, em média, 38.500 t de RSU/mês, de uma distância média de 45 km dos locais de coleta até a unidade. Dentro da unidade está localizado um sistema de reciclagem de plástico (PP e PE). Os demais recicláveis são enviados para recicladoras localizadas entre 30 e 66km de distância da unidade.

A fronteira do estudo (**Figura VI**) considerou desde o transporte dos resíduos à central e do CDRU até a cimenteira, além do consumo/destinação dos produtos do tratamento desses resíduos, incluindo as emissões atmosféricas do coprocessamento.

A partir disso, foi elaborado o inventário ambiental do cenário de produção de CDRU e coprocessamento, no qual o CDRU é utilizado na cimenteira em substituição ao coque, considerando os impactos evitados da produção do coque e de sua queima e a energia elétrica evitada da moagem do coque.

Figura VI
Fronteira do sistema – produção de CDRU e coprocessamento.



APÊNDICE II

I. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO-BASE

Para a estimativa da redução das emissões, foi realizado o inventário do cenário-base, em que o resíduo sólido urbano é destinado ao aterro sanitário, sem aproveitamento do biogás.

No inventário do cenário-base (*Tabela III*), foram considerados: o transporte dos resíduos até o aterro, o diesel consumido na operação, o direcionamento do biogás para o *flare* (50% do biogás produzido) e a fuga de biogás (50% do biogás produzido mais 50% do biogás captado e direcionado para o *flare*, para o qual é considerada uma eficiência de 50%) (WAGNER *et al.*, 2017). As emissões da queima do biogás no *flare* foram calculadas com base em fatores de emissão da USEPA (2008) e da NSCA, (2002) publicados no artigo de (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013). Nesse processo, considerou-se que ocorrem emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), material particulado, dioxinas e furanos, óxidos de enxofre (SO_x), ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF).

Foi ainda considerado, no cenário-base, o tratamento do lixiviado, cujas emissões foram calculadas com base em dados de literatura dos seguintes parâmetros: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), teor de fósforo, metano (CH_4), sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais (ST), nitrogênio amoniacal (N-NH_3) e nitrogênio orgânico (N_{org}), conforme apresentado por Gutierrez, (2014). Foram considerados, também, os metais: zinco, chumbo, níquel, cromo, cádmio e cobre, conforme apresentado em Maia *et al.* (2015).

Tabela III
Inventário para o cenário-base de aterramento de RSU
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Diesel para operação do aterro	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing APOS, U</i>	4,312 kWh
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U</i>	100 tkm
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Emissões fugitivas para o ar	<i>Methane</i>	44,64 kg
	<i>Nitrogen</i>	4,26 kg
	<i>Ammonia</i>	0,43 kg
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	0,14 kg
	<i>Sulfur dioxide</i>	1,62 kg
Emissões para o ar da queima no flare aberto	<i>Nitrogen oxides</i>	19,98 g
	<i>Carbon monoxide</i>	23,34 g
	<i>Particulates</i>	7,54 g
	<i>Dioxins (TEQ)</i>	2,12 x10 ⁻⁷ g
	<i>Sulfur oxides</i>	42,11 g
	<i>Hydrogen chloride</i>	21,05 g
	<i>Hydrogen fluoride</i>	4,21 g
Emissões fugitivas do flare – sem queima	<i>Methane</i>	22,62 kg
	<i>Nitrogen</i>	2,13 kg
	<i>Ammonia</i>	0,22 kg
	<i>Carbon monoxide</i>	0,07 kg
	<i>Hydrogen sulfide</i>	0,81 kg
Emissões para o ar do tratamento do lixiviado	<i>Methane</i>	0,039 kg
	<i>BOD₅ (Biological Oxygen Demand)</i>	38,20 g
	<i>COD (Chemical Oxygen Demand)</i>	91,15 g
	<i>Suspended solids, unspecified</i>	149 g
	<i>Ammonia</i>	20,23 g
	<i>Nitrogen, organic bound</i>	1,55 g
	<i>Phosphorus, total</i>	0,61 g
	<i>Zinc</i>	0,007 g
	<i>Lead</i>	0,007 g
	<i>Nickel</i>	0,0262 g
Emissões para a água do tratamento do lixiviado	<i>Chrome</i>	0,0274 g
	<i>Cadmium</i>	0,009 g
	<i>Copper</i>	0,012 g

II. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE ATERRO SANITÁRIO COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS

A elaboração dos inventários teve início com a coleta de dados primários de projeto disponibilizados pela empresa (*Tabela IV*).

Tabela IV

Dados brutos¹⁹ - aterro sanitário com aproveitamento de biogás.

Parâmetros		
Aterro	Quantidade anual de resíduos que recebem	512.636 t/ano (acumulado 2020)
	Teor de Matéria Orgânica	0,55
	Distância média dos resíduos até o aterro (pontos de coletas)	50 km
	Diesel para operação do aterro	40.000 L/mês
	Captação anual de biogás	28.224.000 m ³ /ano (37° C, 1 atm)
	Quantidade anual de biogás direcionado para o flare	3.225.600 m ³ /ano (37° C, 1 atm)
	O Flare é aberto ou enclausurado	Enclausurado
Biogás	Caracterização do biogás (% de CH ₄ , H ₂ S)	CH ₄ 57% CO ₂ 39% O ₂ 0,8% N ₂ 3,2% H ₂ S 10 ppm
	Quantidade anual de biogás direcionada para purificação	20.160.000 m ³ /ano (37° C, 1 atm)
	Tipologia do purificador	Water Washer
	Volume de biometano gerado e % de CH ₄	10.483.200 Nm ³ /ano a 95% CH ₄
	Quantidade anual de biogás direcionada para geração de energia elétrica	4.838.400 m ³ /ano (37° C, 1 atm)
	Tipologia do gerador	Cabinado
	Volume de lixiviado gerado	65.944,67 m ³ /ano
Lixiviado	Tipologia de tratamento do lixiviado	Físico-químico / Biológico
	Caracterização do efluente tratado	DBO 857 mg/l DQO 5.270 mg/l
	Fósforo	17,524 mg/L
Transporte final	Distância média até o usuário final do biometano	35 km

Com base nesses dados, foram realizados os inventários dos cenários de geração de energia elétrica e de produção de biometano.

¹⁹ Os valores apresentados foram coletados a partir de dados da empresa, sendo específicos para este caso, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

a) Inventário do cenário de geração de energia elétrica

Neste cenário, todo o biogás que é direcionado para aproveitamento energético no projeto é destinado à geração de eletricidade.

No inventário do cenário geração de energia elétrica (**Tabela V**), foram considerados: o transporte dos resíduos até o aterro; o diesel consumido na operação de máquinas; o direcionamento do biogás para o *flare* enclausurado (11,43% do biogás captado) e para o gerador (88,57% do biogás captado); e a fuga de biogás (50% do biogás produzido mais 5% do biogás captado e direcionado para o *flare*, para o qual é considerada uma eficiência de 95% (WAGNER *et al.*, 2017).

As emissões da queima do biogás no *flare* e as emissões fugitivas foram calculadas da mesma forma que o foram no cenário-base. As emissões do gerador foram calculadas com base em fatores de emissão da USEPA, (2008) e da NSCA, (2002) publicados no artigo de (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013). Nesse processo, considerou-se que ocorrem emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), material particulado, dioxinas e furanos, óxidos de enxofre (SO_x), ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF). Foi ainda considerado, no cenário energia elétrica, o tratamento do lixiviado, cujas emissões foram calculadas da mesma forma que foram estimadas no cenário-base.

Tabela V

**Inventário para o cenário de geração de energia elétrica – aterro sanitário com aproveitamento de biogás
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).**

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Diesel para operação do aterro	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing APOS, U</i>	3,605 kWh
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U</i>	100 tkm
Energia elétrica evitada	<i>Electricity, high voltage {BR} production mix APOS, U</i>	0,176 MWh
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Emissões fugitivas para o ar	<i>Methane</i>	19.856,069 g
	<i>Nitrogen</i>	1.950,772 g
	<i>Ammonia</i>	185,062 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	60,962 g
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	54.342,927 g
Emissões para o ar da queima no flare	<i>Sulfur dioxide</i>	0,740 g
	<i>Nitrogen oxides</i>	1,918 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	2,241 g
	<i>Particulates</i>	0,724 g
	<i>Dioxins (TEQ)</i>	2,037 x10 ⁻⁸
Emissões para o ar do tratamento do lixiviado	<i>Sulfur dioxide</i>	9,143 g
	<i>Hydrogen chloride</i>	4,571 g
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,914 g
	<i>Methane</i>	0,039 kg
	<i>BOD₅ (Biological Oxygen Demand)</i>	110,243 g
Emissões para a água do tratamento do lixiviado	<i>COD (Chemical Oxygen Demand)</i>	677,924 g
	<i>Suspended solids, unspecified</i>	19,167 g
	<i>Solids, inorganic</i>	135,713 g
	<i>Ammonia</i>	21,868 g
	<i>Nitrogen, organic bound</i>	1,672 g
Emissões para o ar da queima no flare	<i>Phosphorus, total</i>	2,254 g
	<i>Nitrogen oxides</i>	287,728 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	209,843 g
	<i>Particulates</i>	5,754 g
	<i>Sulfur dioxide</i>	88,571 g
Emissões para o ar da queima no flare	<i>Hydrogen chloride</i>	7,971 g
	<i>Hydrogen fluoride</i>	8,857 g

b) Inventário do cenário de produção de biometano

Neste cenário, todo o biogás que é direcionado para aproveitamento energético no projeto é destinado à produção de biometano.

No inventário do cenário de produção de biometano (*Tabela VI*), foram considerados: o transporte dos resíduos até o aterro; o diesel consumido na operação de máquinas; o direcionamento do biogás para o *flare* enclausurado (11,43% do biogás captado) e para o purificador (88,57% do biogás captado); e a fuga de biogás (50% do biogás produzido mais 5% do biogás captado e direcionado para o *flare*, para o qual é considerada uma eficiência de 95%) (WAGNER *et al.*, 2017).

As emissões da queima do biogás no *flare* e as emissões fugitivas foram calculadas da mesma forma que o foram no cenário-base.

A purificação do biogás foi considerada com base na utilização de inventário de purificação por adsorção com modulação de pressão do *ecoinvent*. O cálculo do diesel evitado foi realizado considerando-se poder calorífico inferior a 34,45 MJ/Nm³ para o biometano (JUNGBLUTH *et al.*, 2007). Considerou-se o teor de 10% de biodiesel (de soja) no diesel brasileiro, tendo como fundamento inventários das bases de dados *ecoinvent* e IDEMAT, e um poder calorífico da mistura inferior a 41,80 MJ/kg, com base em dados do último anuário estatístico da ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2021). As emissões da queima do biodiesel foram consideradas com base em uma publicação do *ecoinvent* (JUNGBLUTH *et al.*, 2007). As emissões da queima do diesel foram calculadas com base em fatores de emissão do Primeiro Inventário Nacional de Veículos Automotores (BRASIL, 2011).

Foi ainda considerado, no cenário energia elétrica, o tratamento do lixiviado, cujas emissões foram calculadas da mesma forma que foram estimadas no cenário-base.

Tabela VI

**Inventário para o cenário de produção de biometano – aterro sanitário com aproveitamento de biogás
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).**

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Diesel para operação do aterro	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing APOS, U</i>	3,605 kWh
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U</i>	100 tkm
Purificação do biogás	<i>biomethane, high pressure {RoW} biogas purification to biomethane by pressure swing adsorption APOS, U</i>	5,421 m ³
Produção de diesel evitada (90% de diesel)	<i>Diesel {BR} market for diesel APOS, U</i>	18,809 kg
Inventários adaptados (base: IDEMAT)		
Produção evitada do diesel (10% de biodiesel)	<i>Idemat2022 biodiesel (soybean ester, 100% Brazil)</i>	2,090 kg
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Emissões fugitivas para o ar	<i>Methane</i>	19,856,069 g
	<i>Nitrogen</i>	1,950,772 g
	<i>Ammonia</i>	185,062 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	60,962 g
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	54,342,927 g
Emissões para o ar da queima no flare	<i>Sulfur acid</i>	0,740 g
	<i>Nitrogen oxides</i>	1,918 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	2,241 g
	<i>Particulates</i>	0,724 g
	<i>Dioxins (TEQ)</i>	2,037 x10 ⁻⁸
	<i>Sulfur dioxide</i>	9,143 g
Emissões para o ar do tratamento do lixiviado	<i>Hydrogen chloride</i>	4,571 g
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,914 g
	<i>Methane, biogenic</i>	0,080 kg
Emissões para a água do tratamento do lixiviado	<i>BOD₅ (Biological Oxygen Demand)</i>	110,243 g
	<i>COD (Chemical Oxygen Demand)</i>	677,924 g
	<i>Suspended solids, unspecified</i>	19,167 g
	<i>Solids, inorganic</i>	135,713 g
	<i>Ammonia, as N</i>	21,868 g
	<i>Nitrogen, organic bound</i>	1,672 g
Emissões para o ar da queima do biometano no carro	<i>Phosphorus, total</i>	2,254 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	0,126 kg
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	48,784 kg
	<i>Methane, biogenic</i>	0,013 kg
	<i>Nitrogen oxides</i>	0,006 kg
Emissões para o ar evitadas da queima do diesel	<i>Particulates, < 2.5 um</i>	1,892 x10 ⁻⁴ kg
	<i>NM VOC, non-methane volatile organic compounds</i>	0,003 kg
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	66,454 kg
	<i>Carbon monoxide, fossil</i>	82,552 g
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	15,883 g
Emissões para o ar evitadas da queima do diesel	<i>Nitrogen oxides</i>	179,105 g
	<i>Particulates, diesel soot</i>	1,797 g

III. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE BIODIGESTÃO SECA

A elaboração dos inventários ambientais teve início com a coleta de dados primários (*Tabela VII*), a partir dos documentos de estruturação do sistema de gestão de RSU para o CONVALE (CONSÓRCIO VITAL, 2020).

Tabela VII

Dados brutos²⁰ - biodigestão seca.

Parâmetros	
	Quantidade de RSU recebida dos municípios
	Campo Florido 3,74t/d; Verissimo 1,12 t/d; Pianura 5,53 t/d; Conceição das Alagoas 20 t/d; Água Comprida 1,48 t/d; Sacramento 12,47 t/d; Delta 3,97 t/d; Uberaba 303,75 t/d
	Composição gravimétrica dos RSU
	MO 50,18%; Papéis 9,10%; Madeira 1,00%; Trapos 5,20%
Gerais	Composição gravimétrica dos resíduos recicláveis
	Papel 3,63%; Papelão e tetrapak 5,47%; Plásticos 12,08%; PET 1,8%; Vidros 2,48%; Ferrosos 1,22%; Alumínio 0,21%; Metais 2,24%
	Distância média dos municípios até a planta de tratamento de RSU
	Campo Florido 179,4 km; Verissimo 127 km; Planura 263,2 km; Conceição das alagoas 160,8 km; Água Comprida 125,6 km; Sacramento 151,6 km; Delta 50,8 km; Uberaba 40 km
	Distâncias médias da planta de tratamento até empresas de reciclagem
	Papel 207,90 km; plásticos 575,25 km; metal 506,86 km; vidro 262,00 km
Aterro	Altura das células
	5 m
	Altura do aterro
	40 m
	Quantidade de RSU recebida
	370 t/d
	Quantidade de FORSU para digestão anaeróbica
	185 t/d
Aterro	Quantidade de RSU destinada para aterro
	185 t/d
	Quantidade de digestato destinada à compostagem
	60 t/d
	Quantidade de resíduos destinada à reciclagem
	20 t/d

Com base nesses dados, foram realizados os inventários dos cenários de geração de energia elétrica e de produção de biometano.

²⁰Os valores apresentados foram coletados nos documentos de projeto, sendo específicos para este caso, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

c) Inventário do cenário de geração de energia elétrica

O cenário de aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica é o que compreende as seguintes etapas básicas: os resíduos passam pelo processo de biodigestão, que é seguido pela compostagem e pelo uso do composto na agricultura. O biogás resultante da biodigestão é encaminhado para gerador.

No inventário do cenário de geração de energia elétrica (*Tabela VIII*), são considerados; o transporte dos resíduos até o aterro e até as recicladoras; a operação do aterro, conforme inventário do cenário-base; os créditos provenientes da reciclagem dos resíduos; o consumo de energia e as emissões da digestão anaeróbia; as emissões do gerador; a produção evitada de energia elétrica; as emissões da compostagem do digestato; e a produção evitada dos fertilizantes evitados.

As emissões do processo de biodigestão basearam-se em uma fuga de 10% do biogás (informação verbal)²¹ e na composição do biogás (TCHOBANOGLIOUS; THIESEN; VIGIL, 1993). A vazão de biogás do processo de biodigestão foi considerada como 70m³/t (a vazão a 40°C e 1atm+5mbar) (informação verbal). As emissões da compostagem foram consideradas com base nos fatores de emissão de metano e óxido nitroso do Tier 1, no Capítulo 4 – *Biological treatment of solid waste* - das Diretrizes do IPCC de 2006, para Inventários Nacionais de Gases de Efeito (RIITTA PIPATTI *et al.*, 2006).

As emissões do gerador foram calculadas com base em fatores de emissão da (USEPA, 2008) e da (NSCA, 2002), publicados no artigo de (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013).

²¹ Informação referente ao processo de biodigestão seca, repassada por Bernardo Ornellas Ferreira, autor de tese de doutorado que trata da metanização em estado sólido de resíduos orgânicos urbanos, com vistas ao aproveitamento energético do biogás (Bernardo Ornellas Ferreira, 2019).

Tabela VIII

**Inventário para o cenário de geração de energia elétrica – biodigestão seca
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).**

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários modelados anteriormente		
Rejeitos para aterro	-	0,025 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3</i> APOS, U	56,561 tkm
Consumo de energia na biodigestão	<i>electricity, medium voltage {BR}</i> <i>market group for electricity, medium voltage</i> APOS, U	0,051 MWh
Reciclagem do papel	<i>Paper (waste treatment) {GLO}</i> <i>recycling of paper</i> APOS, U	0,016 t
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	<i>urea {RoW}</i> <i>urea production</i> APOS, U	3,404 kg
Produção evitada de fertilizante fosfatado	<i>evitado_monoammonium phosphate {RoW}</i> <i>monoammonium phosphate production</i> APOS, U	3,699 kg
Energia elétrica evitada	<i>Electricity, high voltage {BR}</i> <i>production mix</i> APOS, U	0,128 MWh
Inventários adaptados (base: Idemat)		
Reciclagem	<i>Idemat2022 PET (Polyethylene terephthalate, upcycling credit</i>	0,003 t
	<i>Idemat2022 Aluminium, recycling credit closed loop</i>	3,610 x10 ⁻⁴ t
	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	0,002 t
	<i>Idemat2022 Copper, recycling credit closed loop</i>	0,001 t
	<i>Idemat2022 Lead, recycling credit closed loop</i>	0,001 t
	<i>Idemat2022 Nickel, recycling credit closed loop</i>	0,001 t
	<i>Idemat2022 Zinc, recycling credit closed loop</i>	0,001 t
	<i>Idemat2022 PE (Polyethylene), upcycling credit</i>	0,005 t
	<i>Idemat2022 PVC (Polyvinylchloride), upcycling credit</i>	0,005 t
	<i>Idemat2022 PP (Polypropylene), upcycling credit</i>	0,005 t
	<i>Idemat2022 PS (Polystyrene), upcycle credit</i>	0,005 t
	<i>Idemat2022 Silica glass estimate</i>	-0,004
	<i>Recycled silica glass estimate</i>	0,004 t
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Emissões da biodigestão	<i>Methane, biogenic</i>	2.252,469 g
	<i>Nitrogen, atmospheric</i>	236,509 g
	<i>Ammonia</i>	23,932 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	7,884 g
	<i>Sulfur dioxide</i>	90,099 g
Emissões para o ar da compostagem	<i>Dinitrogen monoxide</i>	0,072 kg
	<i>Methane</i>	1,200 kg
Emissões para o ar do gerador	<i>Nitrogen oxides</i>	380,256 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	277,324 g
	<i>Particulates</i>	7,605 g
	<i>Sulfur dioxide</i>	117,054 g
	<i>Hydrogen chloride</i>	10,535 g
	<i>Hydrogen chloride</i>	11,705 g

d) Inventário do cenário de produção de biometano

O cenário de aproveitamento do biogás para produção de biometano é o que considera que os resíduos passam pelo processo de biodigestão, seguido pelos de compostagem e de uso do composto na agricultura. O biogás resultante da biodigestão é purificado e utilizado em veículo, em substituição ao diesel.

No inventário do cenário projeto biometano (*Tabela IX*), são considerados: o transporte dos resíduos até o aterro e até as recicladoras; a operação do aterro, conforme inventário do cenário-base; a reciclagem dos resíduos; o consumo de energia e as emissões da digestão anaeróbia; a purificação do biometano; as emissões da queima do biometano em veículo; as emissões da compostagem do digestato; o diesel evitado (produção e queima); e os fertilizantes evitados.

As emissões do processo de biodigestão basearam-se em uma fuga de 10% do biogás e na composição do biogás (TCHOBANOGLIOUS; THIESEN; VIGIL, 1993). A vazão de biogás do processo de biodigestão foi considerada como 70m³/t (vazão a 40°C e 1atm+5mbar) (informação verbal). As emissões da compostagem foram consideradas com base nos fatores de emissão de metano e óxido nitroso do Tier 1, no Capítulo 4 – *Biological treatment of solid waste* - das Diretrizes do IPCC de 2006, para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (RIITTA PIPATTI *et al.*, 2006).

A purificação do biogás foi considerada com base na utilização de inventário do *ecoinvent*. O cálculo do diesel evitado foi realizado considerando-se poder calorífico inferior a 34,45 MJ/Nm³ para o biometano (JUNGBLUTH *et al.*, 2007). Considerou-se o teor de 10% de biodiesel (de soja) no diesel brasileiro, tendo como fundamento inventários das bases de dados *ecoinvent* e IDEMAT, e um poder calorífico inferior a 41,80 MJ/kg, com base em dados do último anuário estatístico da ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2021). As emissões da queima do biodiesel foram consideradas com base em uma publicação do *ecoinvent* (JUNGBLUTH *et al.*, 2007). As emissões da queima do diesel foram calculadas com base em fatores de emissão do Primeiro Inventário Nacional de Veículos Automotores (BRASIL, 2011).

Tabela IX

**Inventário para o cenário de produção de biometano – biodigestão seca
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).**

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários modelados anteriormente		
Rejeitos para aterro	-	0,025 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3</i> APOS, U	56,561 tkm
Consumo de energia na biodigestão	<i>electricity, medium voltage {BR}</i> <i>market group for electricity, medium voltage</i> APOS, U	0,051 MWh
Reciclagem do papel	<i>Paper (waste treatment) {GLO}</i> <i>recycling of paper</i> APOS, U	0,016 t
Purificação do biometano	<i>biomethane, high pressure {RoW}</i> <i>biogas purification to biomethane by pressure swing adsorption</i> APOS, U	8,089 m ³
Produção evitada de fertilizante nitrogenado	<i>urea {RoW}</i> <i>urea production</i> APOS, U	3,404 kg
Produção evitada de fertilizante fosfatado	<i>evitado_monoammonium phosphate {RoW}</i> <i>monoammonium phosphate production</i> APOS, U	3,699 kg
Produção evitada de diesel (90% diesel fóssil)	<i>diesel {BR}</i> <i>market for diesel</i> APOS, U	28,067 kg
Inventários adaptados (base: Idemat)		
Emissões fugitivas para o ar	<i>Idemat2022 PET (Polyethylene terephthalate, upcycling credit)</i>	19,856,069 g
	<i>Idemat2022 Aluminium, recycling credit closed loop</i>	1,950,772 g
	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	185,062 g
	<i>Idemat2022 Copper, recycling credit closed loop</i>	60,962 g
	<i>Idemat2022 Lead, recycling credit closed loop</i>	54.342,927 g
	<i>Idemat2022 Nickel, recycling credit closed loop</i>	0,740 g
	<i>Idemat2022 Zinc, recycling credit closed loop</i>	1,918 g
	<i>Idemat2022 PE (Polyethylene), upcycling credit</i>	2,241 g
	<i>Idemat2022 PVC (Polyvinylchloride), upcycling credit</i>	0,724 g
	<i>Idemat2022 PP (Polypropylene), upcycling credit</i>	2,037 x10 ⁻⁸
	<i>Idemat2022 PS (Polystyrene), upcycle credit</i>	9,143 g
	<i>Idemat2022 Silica glass estimate</i>	4,571 g
	<i>Recycled silica glass estimate</i>	0,914 g
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Emissões da biodigestão	<i>Methane, biogenic</i>	2.252,469 g
	<i>Nitrogen, atmospheric</i>	236,509 g
	<i>Ammonia</i>	23,932 g
	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	7,884 g
	<i>Sulfur dioxide</i>	90,099 g
Emissões para o ar da compostagem	<i>Dinitrogen monoxide</i>	0,072 kg
	<i>Methane</i>	1,200 kg
Emissões para o ar da queima do biometano no carro	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>	0,189 kg
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	72,795 kg
	<i>Methane, biogenic</i>	0,019 kg
	<i>Nitrogen oxides</i>	0,009 kg
	<i>Particulates, < 2.5 um</i>	2,823 x10 ⁻⁴ kg
	<i>NMVOC, non-methane volatile organic compounds</i>	0,004 kg
Emissões para o ar evitadas da queima do diesel	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	99,163 kg
	<i>Carbon monoxide, fossil</i>	123,184 g
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	23,701 g
	<i>Nitrogen oxides</i>	267,262 g
	<i>Particulates, diesel soot</i>	2,682 g

IV. INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO DE GASEIFICAÇÃO

A elaboração dos inventários ambientais teve início com a coleta de dados primários da planta para os cenários em que ocorre a separação da FORSU e esta é incorporada ao CDRU, por meio de secagem.

a) Cenário geração de energia elétrica (com a segregação da FORSU para aterro/biodigestão):

A **Tabela X** apresenta os dados fornecidos pela propriedade para o cenário em que a FORSU é separada e destinada ao aterro ou à biodigestão.

Tabela X

Tabela de dados brutos²² - Energia Limpa (com secagem da FORSU).

	Dados primários	Valores
Entrada de RSU	<i>RSU</i>	180 t/dia
	<i>Distância até a unidade</i>	50 km
Potências dos equipamentos – Pré - tratamento	<i>Abre-saco e extrator mecânico</i>	200 CV
	<i>Peneiramento</i>	5,5 kW
	<i>Triturador</i>	300 CV
	<i>Tempo de funcionamento</i>	12 hs /dia – 6 dias na semana
	<i>Consumo de energia</i>	3.839 kWh/dia
	<i>Recicláveis – metais ferrosos</i>	4 t/dia
Saídas do pré-tratamento	<i>Fração orgânica + rejeitos para aterro</i>	90 t/dia
	<i>CDRU</i>	86 t/dia
	<i>Distância até a siderurgia</i>	100 km
Gaseificador	<i>Potência instalada</i>	170 cv
	<i>Emissões atmosféricas - Vazão</i>	23.600 Nm ³ /h
	<i>CO₂</i>	4.350 kg/h
	<i>Material Particulado</i>	1,13 mg/Nm ³
	<i>NO_x</i>	28,1 mg/Nm ³
	<i>SO_x</i>	4,7 mg/Nm ³
	<i>Ácido Clorídrico (HCl)</i>	1,6 mg/Nm ³
	<i>Ácido Fluorídrico (HF)</i>	0,0002 mg/Nm ³
	<i>Hidrocarbonetos Totais - HCT (expresso como metano e não metano)</i>	0,74 mg/Nm ³
	<i>Classe I (Cd, Hg, Tl)</i>	0,03621 mg/Nm ³
	<i>Classe II (As, Co, Ni, Se, Te)</i>	0,00153 mg/Nm ³
<i>Classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)</i>	0,2607	
<i>Dioxinas e Furanos</i>	N/D	
Combustão / Caldeira de recuperação	<i>Gás combusto</i>	29.000 kg/h
	<i>Cinzas</i>	350-500 kg/h
	<i>Potência</i>	150 CV
	<i>Energia elétrica evitada</i>	3 MW

²² Os valores apresentados foram fornecidos pelo empreendimento, sendo específicos para este, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

Para a elaboração do inventário (**Tabela XI**), foram considerados: o transporte até a unidade de gaseificação; o consumo de energia do pré-tratamento e do gaseificador; a reciclagem dos metais ferrosos e seu transporte; as emissões do gaseificador; a destinação das cinzas e da fração orgânica ao aterro/biodigestão; e a energia elétrica evitada.

Tabela XI
Inventário para o cenário de aproveitamento para geração de energia elétrica – Energia Limpa
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent e Idemat)		
Transporte até a unidade	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>Transporte, frete, caminhão 3,5-7,5 toneladas métricas, EURO3 {RoW}</i>	100 tkm
Eletricidade	<i>Electricity, medium voltage {BR} market group for electricity, medium voltage APOS, U</i> <i>Eletricidade, média voltagem - transformação de alta voltagem para média voltagem APOS, U</i>	43,39 kWh
Reciclagem de metais ferrosos	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	0,022 t
Transporte até reciclagem	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>Transporte, frete, caminhão 3,5-7,5 toneladas métricas, EURO3 {RoW}</i>	4,44 tkm
Destinação das cinzas	<i>Inert waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U</i>	56,67 kg
Eletricidade evitada	<i>Electricity, medium voltage {BR} market group for electricity, medium voltage APOS, U</i>	0,2 MWh
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Gaseificação	<i>Particulates, unspecified</i>	3.555,73 mg
	<i>NO_x</i>	88.421,33 mg
	<i>SO_x</i>	14.789,33 mg
	<i>Hydrogen chloride</i>	5.034,67 mg
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,63 mg
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	2.328,53 mg
	<i>Classe I (Cd, Hg, Tl)</i>	113,94 mg
	<i>Classe II (As, Co, Ni, Se, Te)</i>	4,81 mg
	<i>Classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)</i>	820,34 mg
	<i>CO₂ total</i>	580,00 kg
Caldeira	<i>Carbon dioxide, fos</i>	284,20 kg
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	295,80 kg
Caldeira	<i>Gás combusto</i>	3.866,67 kg
Inventários realizados pelo BEP (cenário-base)		
Emissões da biodigestão	<i>Aterro municipal sem aproveitamento do biogás e flare aberto /</i> <i>Biodigestão seca (Tabela VIII) / Biodigestão CSTR</i>	0,5 t

b) Cenário geração de energia elétrica (secagem da FORSU):

A **Tabela XII** apresenta os dados fornecidos pela propriedade para o cenário em que a FORSU é secada e incorporada ao CDRU.

Tabela XII

Tabela de dados brutos²³ - Energia Limpa (com secagem da FORSU).

Dados primários		Valores	
Entrada de RSU	<i>RSU</i>	120 t/dia	
	<i>Distância até a unidade</i>	50 km	
Potências dos equipamentos - Pré - tratamento	<i>Abre-saco e extrator mecânico</i>	200 CV	
	<i>Peneiramento</i>	5,5 kW	
	<i>Secador</i>	30 CV	
	<i>Triturador</i>	300 CV	
	<i>Tempo de funcionamento</i>	12 h/dia – 6 dias na semana	
	<i>Consumo de energia</i>	4.066 kWh/dia	
	<i>Recicláveis – metais ferrosos</i>	4 t/dia	
Saídas do pré-tratamento	<i>Fração orgânica + rejeitos para aterro</i>	30 t/dia	
	<i>CDRU</i>	86 t/dia	
	<i>Distância até a siderurgia</i>	100 km	
	<i>Potência instalada</i>	170 cv	
Gaseificador	<i>Emissões atmosféricas - Vazão</i>	23.600 Nm ³ /h	
	<i>CO₂</i>	4.350 kg/h	
	<i>Material Particulado</i>	1,13 mg/Nm ³	
	<i>NO_x</i>	28,1 mg/Nm ³	
	<i>SO_x</i>	4,7 mg/Nm ³	
	<i>Ácido Clorídrico (HCl)</i>	1,6 mg/Nm ³	
	<i>Ácido Fluorídrico (HF)</i>	0,0002 mg/Nm ³	
	<i>Hidrocarbonetos Totais - HCT (expresso como metano e não metano)</i>	0,74 mg/Nm ³	
	<i>Classe I (Cd, Hg, Tl)</i>	0,03621 mg/Nm ³	
	<i>Classe II (As, Co, Ni, Se, Te)</i>	0,00153 mg/Nm ³	
	<i>Classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)</i>	0,2607	
	<i>Dioxinas e Furanos</i>	N/D	
	Combustão / Caldeira de recuperação	<i>Gás combusto</i>	29.000 kg/h
		<i>Cinzas</i>	350-500 kg/h
<i>Potência</i>		150 CV	
<i>Energia elétrica evitada</i>		3 MW	

²³ Os valores apresentados foram fornecidos pelo empreendimento, sendo específicos para este, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

Para a elaboração do inventário (**Tabela XIII**), foram considerados: o transporte até a unidade de gaseificação; o consumo de energia do pré-tratamento e do gaseificador; a reciclagem dos metais ferrosos e seu transporte; as emissões do gaseificador; a destinação das cinzas e da fração orgânica ao aterro; e a energia elétrica evitada.

Tabela XIII

Inventário para o cenário de aproveitamento para geração de energia elétrica – Energia Limpa (Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent e Idemat)		
Transporte até a unidade	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>Transporte, frete, caminhão 3,5-7,5 toneladas métricas, EURO3 {RoW}</i>	100 tkm
Eletricidade	<i>Electricity, medium voltage {BR} market group for electricity, medium voltage APOS, U</i> <i>Eletricidade, média voltagem - transformação de alta voltagem para média voltagem APOS, U</i>	66,97 kWh
Reciclagem de metais ferrosos	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	0,033 t
Transporte até reciclagem	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>Transporte, frete, caminhão 3,5-7,5 toneladas métricas, EURO3 {RoW}</i>	6,66 tkm
Destinação das cinzas	<i>Inert waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U</i>	85 kg
Eletricidade evitada	<i>Electricity, medium voltage {BR} market group for electricity, medium voltage APOS, U</i>	0,3 MWh
Inventários adaptados (base: Idemat)		
Gaseificação	<i>Particulates, unspecified</i>	5.333,60 mg
	<i>NO_x</i>	132.632,00 mg
	<i>SO_x</i>	22.184,00 mg
	<i>Hydrogen chloride</i>	7.552,00 mg
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,94 mg
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	3.492,80 mg
	<i>Classe I (Cd, Hg, Tl)</i>	170,91 mg
	<i>Classe II (As, Co, Ni, Se, Te)</i>	7,22 mg
	<i>Classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)</i>	1.230,50 mg
	<i>CO₂ total</i>	870,00 kg
Caldeira	<i>Carbon dioxide, fos</i>	268,83 kg
	<i>Carbon dioxide, biogenic</i>	601,17 kg
Caldeira	<i>Gás combusto</i>	5.800 kg

c) INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO DE INCINERAÇÃO

A elaboração do inventário ambiental teve início com a coleta de dados primários (*Tabela XIV*) em um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da Central de Tratamento de Resíduos CONSIMARES (MANANCIAL PROJETOS E CONSULTORIA AMBIENTAL, 2021), os quais foram validados ou complementados, quando necessário, pela equipe responsável pelo EIA.

Tabela XIV

Tabela de dados brutos²⁴ - incineração.

	Parâmetros	Dados
	<i>Quantidade de RSU recebida dos municípios</i>	Capivari 40,0 t/d; Elias Fausto 12,7 t/d; Hortolândia 166,3 t/d; Monte Mor 43,1 t/d; Nova Odessa 43,3 t/d; Santa Bárbara d'Oeste 138,0 t/d; Sumaré 203,2 t/d
	<i>Distâncias dos trajetos de ida e volta dos municípios até a CTR</i>	Capivari 53,3 km ida e 57,0 km volta; Elias Fausto 59,9 km ida e 43,1 km volta; Hortolândia 15,6 km ida e 13,5 km volta; Monte Mor 25,3 km ida e 25,8 km volta; Nova Odessa 10,4 km ida e 13,0 km volta; Santa Bárbara d'Oeste 24,0 km ida e 27,0 km volta; Sumaré 15,5 km ida e 19,3 km volta
Gerais	<i>Distância média dos trajetos de ida e volta da CTR até as empresas de reciclagem</i>	29,94 km
	<i>Resíduos para URE</i>	650 t/d
	<i>Resíduos para planta de compostagem</i>	6 t/d
	<i>Resíduos para o galpão de separação e triagem</i>	2,5 t/d
Uso predial	<i>Consumo de água</i>	0,3 m ³ /h
	<i>Esgoto para rede</i>	0,3 m ³ /h
Operação de recebimento, pesagem, prensagem e envelopamento	<i>Consumo de filme plástico</i>	1,6 kg/t resíduo
	<i>Saída de chorume de fosso (destinado à ETE contaminada)</i>	2 m ³ /h
	<i>Entrada de resíduos</i>	29.500 kg/h
	<i>Consumo de ar</i>	104.975 kg/h
	<i>Consumo de água de resfriamento</i>	3.500 kg/h (do tanque de água de reuso e da captação em poço)
	<i>Consumo de uréia sólida 99%</i>	67 kg/h
Caldeira - tratamento térmico	<i>Consumo de cal viva 95%</i>	550 kg/h
	<i>Consumo de óleo diesel (uso esporádico)</i>	2,6 m ³ /h
	<i>Saída de escória e cinzas (destinadas ao aterro)</i>	5.302 kg/h
	<i>Saída de sucata ferrosa</i>	120 kg/h
	<i>Evaporação de água de resfriamento</i>	3.000 kg/h
Caldeira - geração de vapor	<i>Água de reposição</i>	800 kg/h
	<i>Purga da caldeira</i>	800 kg/h
	<i>Energia elétrica exportada</i>	18,53 MW
	<i>Consumo de fosfato</i>	18 kg/mês
Caldeira - condicionamento de água	<i>Consumo de sequestrante de O₂</i>	17 kg/mês
	<i>Consumo de amins</i>	28,4 kg/mês
	<i>Consumo de amônia</i>	20 kg/h

²⁴ Os valores apresentados foram coletados em documentos do projeto, sendo específicos para este caso, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

	Parâmetros	Dados
Emissões atmosféricas da URE	<i>Material particulado</i>	1,486 kg/h
	<i>SO_x</i>	7,428 kg/h
	<i>NO_x</i>	29,711 kg/h
	<i>HCl</i>	1,486 kg/h
	<i>HF</i>	0,149 kg/h
	<i>CO</i>	7,428 kg/h
	<i>Hidrocarbonetos totais</i>	1,486 kg/h
	<i>Cd + Ti e seus compostos</i>	0,007 kg/h
	<i>Hg e compostos</i>	0,007 kg/h
	<i>Pb + AS + Co + Ni + Cr + Mn + Sb + Cu + V e seus compostos</i>	0,074 kg/h
	<i>Dioxinas e Furanos</i>	1,49x 10 ⁻⁸ kg/h
Tratamento de odores	<i>Consumo de carvão ativado</i>	250 kg/dia
	<i>Capacidade de recebimento</i>	6 t/dia
Planta de compostagem	<i>Consumo de água</i>	0,5 m ³ /h
	<i>Saída de composto finalizado</i>	3 t/dia
	<i>Vazão de efluente (destinado à rede de esgoto)</i>	0,5 m ³ /h
Galpão para separação e triagem de resíduos	<i>Composição orientativa dos recicláveis</i>	Plásticos 14%; Papel e papelão 34%; Vidro 6%; Embalagem Longa Vida (Tetrapack®) 2%; Metais não ferrosos 2%; Metais ferrosos 5%
ETA	<i>Consumo de água para retrolavagem dos equipamentos</i>	1 m ³ /h
	<i>Consumo de sulfato de alumínio</i>	15 kg/dia
	<i>Consumo de soda cáustica</i>	15 kg/dia
	<i>Consumo de hipoclorito</i>	4 L/dia
	<i>Consumo de floculante</i>	4 L/dia
	<i>Descarte de purga</i>	1 m ³ /h
Unidade de desmineralização	<i>Consumo de água</i>	1,5 m ³ /h
	<i>Consumo de água para regeneração das resinas</i>	0,3 m ³ /h
	<i>Consumo de solução de soda cáustica NaOH 35%</i>	72 L/dia
	<i>Consumo de solução de ácido clorídrico HCl 40%</i>	54 L/dia
	<i>Consumo de resinas</i>	80 L/ano
	<i>Saída de água desmineralizada para uso na reposição da água de caldeira</i>	1,5 m ³ /h
ETE baixa contaminação	<i>Descarte de purga (destinada à ETE baixa contaminação)</i>	0,3 m ³ /h
	<i>Entrada de efluentes (purgas da ETA, da desmineralizadora e da caldeira e águas pluviais e de lavagem)</i>	2,6 m ³ /h
	<i>Perdas de água (evaporação)</i>	0,1 m ³ /h
	<i>Saída de água para tanque de água de reúso</i>	2,5 m ³ /h
ETE contaminados	<i>Saída de lodo adensado (incorporado à escória) para descarte em aterro</i>	0,052 m ³ /h
	<i>Entrada de efluentes (chorume de fosso e águas oleosas)</i>	2,1 m ³ /h
	<i>Consumo de policloreto de alumínio</i>	500 mg/L
	<i>Lançamento na rede de esgoto</i>	2,1 m ³ /h
Gerador de emergência	<i>Lodo adensado para aterro</i>	0,073 m ³ /h
	<i>Consumo de óleo diesel</i>	400 L/mês
Centrais hidráulicas	<i>Consumo de óleos hidráulicos</i>	45 L/mês
	<i>Consumo de água de poço para outros usos</i>	1,25 m ³ /h
Entradas e saídas difusas	<i>Saída de águas pluviais e de lavagem</i>	0,5 m ³ /h
	<i>Saída de águas oleosas provenientes da oficina de manutenção e lavagem de veículos do Canteiro de Obras</i>	0,1 m ³ /h

d) Inventário do cenário de geração de energia elétrica (RSU com a FORSU)

O cenário de aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica (RSU com a FORSU) (*Tabela XI*) considera que os resíduos, sem separação da FORSU, passam pelo processo de incineração para a geração de energia térmica, que é, então, convertida em energia elétrica em um turbogerador.

No inventário do cenário de geração de energia elétrica (RSU com a FORSU), são considerados: o tratamento térmico; a geração de vapor; a geração de energia elétrica em turbogerador; e os processos associados a essas etapas (tais como a desmineralização e as estações de tratamento de efluentes).

A maior parte dos dados foi retirada do EIA (MANANCIAL PROJETOS E CONSULTORIA AMBIENTAL, 2021). Algumas informações adicionais, que não se encontravam no estudo, foram solicitadas à equipe responsável pela realização do estudo. Foram elas: a quantidade de plástico-filme utilizada para envelopamento dos resíduos, considerada como 1,6 quilos por tonelada de resíduo; e as quantidades de lodo geradas nas ETEs de contaminados e de baixa contaminação, estimadas como 3,5 e 2% da vazão tratada, respectivamente.

As emissões do gerador foram calculadas com base em fatores de emissão da (USEPA, 2008) e da (NSCA, 2002), publicados no artigo de (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013). O consumo de policloreto de alumínio na ETE de contaminados foi estimado com base em FELICI (2010) e MÁXIMO (2007).

Tabela XV

**Inventário para o cenário de geração de energia elétrica (RSU com a FORSU) – incineração
(Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).**

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U</i>	43,125 tkm
Energia elétrica evitada	<i>Electricity, high voltage {BR} production mix APOS, U</i>	0,628 MWh
Filme plástico para envelopamento	<i>Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for APOS, U</i>	1,600 kg
Uréia sólida para o tratament térmico	<i>urea {RoW} market for urea APOS, U</i>	2,271 kg
Cal viva para o tratamento térmico	<i>Quicklime, milled, packed {RoW} market for quicklime, milled, packed APOS, U</i>	18,644 kg
Óleo diesel para os queimadores (esporádico)	<i>diesel {BR} market for diesel APOS, U</i>	0,167 kg
Fosfato para condicionamento de água	<i>Sodium phosphate {RoW} market for sodium phosphate APOS, U</i>	8,474x10 ⁻⁴ kg
Sequestrante de O ₂ para condicionamento de água	<i>Sodium sulfite {RoW} market for sodium sulfite APOS, U</i>	8,004 x10 ⁻⁴ kg
Aminas para condicionamento de água	<i>Morpholine {GLO} market for morpholine APOS, U</i>	0,001 kg
Amônia para condicionamento de água	<i>Ammonia, anhydrous, liquid {RoW} market for ammonia, anhydrous, liquid APOS, U</i>	0,678 kg
Tratamento de odores	<i>Activated carbon, granular {GLO} market for activated carbon, granular APOS, U</i>	0,353 kg
Escória e cinzas da grelha e da caldeira (tratamento térmico) para aterro	<i>Average incineration residue {RoW} treatment of, residual material landfill APOS, U</i>	179,729 kg
Sulfato de alumínio para o tratamento da água	<i>Aluminium sulfate, powder {RoW} market for aluminium sulfate, powder APOS, U</i>	0,20 kg
Soda cáustica para o tratamento da água	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, U</i>	0,20 kg
Hipoclorito para o tratamento da água	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RoW} market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state APOS, U</i>	6,441 g
Floculante para o tratamento da água	<i>Polyacrylamide {GLO} market for APOS, U</i>	5,635 g
Soda cáustica para desmineralização	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, U</i>	72,135 g
Ácido clorídrico para a desmineralização	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW} market for APOS, U</i>	46,780 g
Resina catiônica para a desmineralização	<i>Cationic resin {RoW} market for cationic resin APOS, U</i>	6,811x10 ⁻⁵ kg
Resina aniônica para a desmineralização	<i>Anionic resin {RoW} market for anionic resin APOS, U</i>	6,811x10 ⁻⁵ kg
Lodos das ETes	<i>Sludge from pulp and paper production {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U</i>	4,125 kg
Esgoto para rede (uso predial, compostagem, ETes)	<i>Wastewater, from residence {RoW} treatment of, capacity 1.1E10l/year APOS, U</i>	0,079 m ³

Inventários utilizados - com ou sem adaptação (base: <i>ecoinvent</i>)		
Policloreto de alumínio para a ETE de contaminados	<i>Polyaluminium chloride {GLO} market for polyaluminium chloride APOS, U</i>	35,593 g
Óleos hidráulicos para as centrais hidráulicas	<i>Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil APOS, U</i>	1,894 g
Gerador de emergência	<i>Electricity, high voltage {RoW} heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction APOS, U</i>	0,073 kWh
Inventários adaptados (base: <i>Idemat</i>)		
Sucata ferrosa para reciclagem	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	4,068 kg
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Consumo de água captada em poço (ETA)	<i>Water, well, BR-SP</i>	0,187 m ³
Consumo de ar na caldeira (tratamento térmico)	<i>Air</i>	3.558,474 kg
	<i>Carbon dioxide</i>	0,291 t
	<i>Particulates</i>	0,050 kg
	<i>Sulfur oxides</i>	0,252 kg
	<i>Nitrogen oxides</i>	1,007 kg
	<i>Hydrogen chloride</i>	0,050 kg
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,005 kg
	<i>Carbon monoxide</i>	0,252 kg
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	0,050 kg
	<i>Heavy metals, unspecified</i>	0,003 kg
Emissões para o ar do tratamento térmico (caldeira)	<i>Dioxins (TEQ) / Furan</i>	5,037 x10 ⁻¹⁰ kg
	<i>Water</i>	101,695 kg

e) Inventário do cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca ou CSTR)

O cenário de aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca ou CSTR) (**Tabela XVI**) considera que os resíduos, depois da separação da FORSU, passam pelo processo de incineração para a geração de energia térmica, que é, então, convertida em energia elétrica em um turbogerador.

No inventário do cenário de geração de energia elétrica (FORSU para biodigestão seca ou CSTR), são considerados: a biodigestão seca/CSTR da FORSU; o tratamento térmico; a geração de vapor e de energia elétrica em turbogerador; e os processos associados às etapas de incineração (tais como a desmineralização e as estações de tratamento de efluentes).

As fontes dos dados de biodigestão seca/CSTR estão descritas na parte deste apêndice que trata dessa rota tecnológica. Quanto à incineração, a maior parte dos dados foi retirada do EIA (MANANCIAL PROJETOS E CONSULTORIA AMBIENTAL, 2021). Algumas informações adicionais, que não se encontravam no estudo, foram solicitadas à equipe responsável pela realização do estudo. Foram elas: a quantidade de plástico-filme utilizada para envelopamento dos resíduos, considerada como 1,6 quilos por tonelada de resíduo; e as quantidades de lodo geradas nas ETEs de contaminados e de baixa contaminação, estimadas como 3,5 e 2% da vazão tratada, respectivamente.

As emissões do gerador foram calculadas com base em fatores de emissão da (USEPA, 2008) e da (NSCA, 2002), publicados no artigo de (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013). O consumo de policloreto de alumínio na ETE de contaminados foi estimado com base em FELICI (2010) e MÁXIMO (2007).

Tabela XVI

Inventário para o cenário de geração de energia elétrica (FORSU para a biodigestão seca) – incineração (Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Transporte do resíduo até o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U</i>	43,125 tkm
Energia elétrica evitada	<i>Electricity, high voltage {BR} production mix APOS, U</i>	0,293 MWh
Filme plástico para envelopamento	<i>Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for APOS, U</i>	0,745 kg
Uréia sólida para o tratamento térmico	<i>urea {RoW} market for urea APOS, U</i>	1,058 kg
Cal viva para o tratamento térmico	<i>Quicklime, milled, packed {RoW} market for quicklime, milled, packed APOS, U</i>	8,686 kg
Óleo diesel para os queimadores (esporádico)	<i>diesel {BR} market for diesel APOS, U</i>	0,078 kg
Fosfato para condicionamento de água	<i>Sodium phosphate {RoW} market for sodium phosphate APOS, U</i>	3,948 x 10 ⁻⁴ kg
Sequestrante de O ₂ para condicionamento de água	<i>Sodium sulfite {RoW} market for sodium sulfite APOS, U</i>	3,729 x 10 ⁻⁴ kg
Aminas para condicionamento de água	<i>Morpholine {GLO} market for morpholine APOS, U</i>	6,229 x 10 ⁻⁴ kg
Amônia para condicionamento de água	<i>Ammonia, anhydrous, liquid {RoW} market for ammonia, anhydrous, liquid APOS, U</i>	0,316 kg
Tratamento de odores	<i>Activated carbon, granular {GLO} market for activated carbon, granular APOS, U</i>	0,164 kg

Inventários utilizados - com ou sem adaptação (base:ecoinvent)		
Escória e cinzas da grelha e da caldeira (tratamento térmico) para aterro	<i>Average incineration residue {RoW} treatment of, residual material landfill APOS, U</i>	83,736 kg
Sulfato de alumínio para o tratamento da água	<i>Aluminium sulfate, powder {RoW} market for aluminium sulfate, powder APOS, U</i>	0,009 kg
Soda cáustica para o tratamento da água	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, U</i>	0,009 kg
Hipoclorito para o tratamento da água	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RoW} market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state APOS, U</i>	3,001 g
Floculante para o tratamento da água	<i>Polyacrylamide {GLO} market for APOS, U</i>	2,626 g
Soda cáustica para a desmineralização	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, U</i>	33,608 g
Ácido clorídrico para a desmineralização	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW} market for APOS, U</i>	21,795 g
Resina catiônica para a desmineralização	<i>Cationic resin {RoW} market for cationic resin APOS, U</i>	3,173 x10 ⁻⁵ kg
Resina aniônica para a desmineralização	<i>Anionic resin {RoW} market for anionic resin APOS, U</i>	3,173 x10 ⁻⁵ kg
Lodos das ETEs	<i>Sludge from pulp and paper production {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U</i>	1,922 kg
Esgoto para rede (uso predial, compostagem, ETEs)	<i>Wastewater, from residence {RoW} treatment of, capacity 1.1E10l/year APOS, U</i>	0,037 m ³
Policloreto de alumínio para a ETE de contaminados	<i>Polyaluminium chloride {GLO} market for polyaluminium chloride APOS, U</i>	16,583 g
Óleos hidráulicos para as centrais hidráulicas	<i>Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil APOS, U</i>	0,882 g
Gerador de emergência	<i>Electricity, high voltage {RoW} heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction APOS, U</i>	0,034 kWh
Inventários adaptados (base: Idemat)		
Sucata ferrosa para reciclagem	<i>Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	1,895 kg
Inventários adaptados (base: Idemat)		
FORSU para biodigestão seca/CSTR	-	0,534 kg
Substâncias (calculadas com base nos dados primários)		
Consumo de água captada em poço (ETA)	<i>Water, well, BR-SP</i>	0,087 m ³
Emissões para o ar do tratamento térmico (caldeira)	<i>Air</i>	1657,902 kg
	<i>Carbon dioxide</i>	0,135 t
	<i>Particulates</i>	0,023 kg
	<i>Sulfur oxides</i>	0,117 kg
	<i>Nitrogen oxides</i>	0,469 kg
	<i>Hydrogen chloride</i>	0,023 kg
	<i>Hydrogen fluoride</i>	0,002 kg
	<i>Carbon monoxide</i>	0,117 kg
	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	0,023 kg
	<i>Heavy metals, unspecified</i>	0,001 kg
	<i>Dioxins (TEQ) / Furan</i>	2,347 x10 ⁻¹⁰ kg
<i>Water</i>	47,380 kg	

f) INVENTÁRIO PARA ANÁLISE DO CENÁRIO DE PRODUÇÃO DE CDRU E COPROCESSAMENTO

A elaboração do inventário ambiental teve início com a coleta de dados primários na unidade de produção de CDRU (*Tabela XVII*)

Tabela XVII

Tabela de dados brutos²⁵ - produção de CDRU.

	Dados primários	Valores
RSU	<i>Entrada de RSU</i>	38.500 t/mês
	<i>Distância até a unidade</i>	45 km
	<i>Resíduo direcionado para aterro/biodigestão</i>	21.928 t/mês
	<i>Resíduo direcionado para tratamento mecânico</i>	16.572 t/mês
Tratamento mecânico	<i>Consumo de diesel</i>	3.258 L/mês
	<i>Consumo de energia elétrica</i>	47.104 kWh/mês
	<i>Consumo de água</i>	12.000 L/mês
	<i>Saídas</i>	
	<i>PP e PE</i>	65,23 t/mês
	<i>PET</i>	77,30 t/mês
	<i>metais</i>	42,15 t/mês
	<i>papelão</i>	48,50 t/mês
	<i>pneus</i>	3,17 t/mês
	<i>filme</i>	95,22 t/mês
Distâncias até reciclagem	<i>PP e PE</i>	1,00 km
	<i>PET</i>	66,00 km
	<i>Sucata Ferrosa</i>	47,00 km
	<i>Alumínio</i>	43,00 km
	<i>Papelão</i>	30,00 km
	<i>Pneus</i>	59,00 km
Poder calorífico do CDRU	<i>PCI CDRU</i>	3.500 kcal/kg

²⁵Os valores apresentados foram coletados em documentos do projeto, sendo específicos para este caso, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

Para o coprocessamento, foram utilizados dados de literatura para a etapa da queima em fornos de cimento e dados primários relacionados ao consumo de energia, diesel e transporte (**Tabela XIX**). Para o consumo de energia, foi adotado o valor de 92 kW, sendo 70% de utilização. O consumo de diesel foi estimado em 200 L/dia. Para a estimativa das emissões atmosféricas atribuídas ao CDRU, foi calculada a diferença entre teste em branco (que é o conjunto de medições realizadas no forno em funcionamento normal, operando sem a alimentação de resíduos) e o teste de queima (conjunto de medições realizadas na unidade operando com a alimentação de resíduos). Foram utilizados os valores de uma unidade de coprocessamento localizada em Minas Gerais, que constam no PARECER ÚNICO N° 0283058/2019 (SIAM) e no PARECER ÚNICO N° 1382871/2017 (SIAM) (GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2017, 2019).

Para a estimativa das emissões de CO₂ no forno, foi utilizado o fator de emissão para o coque, sendo este de 92,8 kg/GJ (GHG Protocol). Como fator de emissão para o CDRU, foi utilizado o valor de 75,0 kg/GJ, por estar na faixa apresentada no GHG Protocol.

Para a reciclagem dos pneus, foi utilizado o inventário apresentado em (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2021) para a reciclagem dos pneus para manta asfáltica, considerando o impacto do processo de reciclagem e o impacto evitado da produção da manta convencional.

Foram avaliados dois cenários com relação à destinação da FORSU: com destinação ao aterro e para a biodigestão.

Para a destinação da FORSU ao aterro, foi utilizado o mesmo inventário apresentado na **Tabela XVI**, em que os RSU são destinados ao aterro, com o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica. Para a destinação da FORSU para biodigestão, foram utilizados os inventários apresentados nas **Tabelas XVI e XX** da publicação de Biogás no Brasil: Descarbonização.

Tabela XVIII

Tabela de dados brutos²⁶ - coprocessamento.

	Dados primários e literatura	Valores
RSU	<i>Entrada de CDRU</i>	2.870 t/mês
	<i>Transporte até cimenteira</i>	60 km
	<i>Consumo de energia elétrica</i>	46.368 kWh/mês
	<i>Consumo de diesel (pá carregadeira)</i>	200 L/dia
Emissões atmosféricas	<i>Vazão nas condições normais base</i>	301.924,5 Nm ³ /h
	<i>FE CO₂ – coque</i>	92,8 kg/GJ
	<i>FE – CO₂ – CDRU</i>	17,8 kg/GJ
Coque evitado	<i>PCI coque</i>	8.367,2 kcal/kg
	<i>PCI do CDRU</i>	3.500 kcal/kg
	<i>Energia elétrica evitada para moagem e transporte interno do coque</i>	29 kWh/tcoque

²⁶Os valores apresentados foram coletados em documentos do projeto, sendo específicos para este caso, assim, não devem ser generalizados para outras atividades/empreendimentos.

Com base nesses dados, foi realizado o inventário do cenário produção de CDRU e coprocessamento (*Tabela XVI*), que considera que os resíduos são segregados, separando-se a FORSU e recicláveis, e o CDRU é transportado até a cimenteira, em substituição ao coque de petróleo.

Tabela XIX

Inventário para o cenário de geração de energia elétrica – produção de CDRU e coprocessamento (Unidade Funcional = tratamento de 1t de resíduo).

Etapas	Processos/Substâncias	Valor
Fluxo de referência	RSU	1 t
Inventários adaptados (base: Ecoinvent)		
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3</i> APOS, U	90 tkm
Diesel – tratamento mecânico	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i> <i>processing</i> APOS, U (10% biodiesel)	1.668 kcal
Consumo de água	<i>tap water {BR}</i> <i>market for tap water</i> APOS, U	0,724 kg
Energia elétrica	<i>electricity, medium voltage {BR}</i> <i>market group for electricity, medium voltage</i> APOS, U	2,84 kWh
Reciclagem	<i>Adaptado_Transp_ECOPARQUE_Idemat2022 PP (Polypropylene), upcycling credit</i>	0,00197 t
	<i>Adaptado_Trnasp_ECOPARQUE_Idemat2022 PE (Polyethylene), upcycling credit</i>	0,00197 t
	<i>Adaptado_credit_ECOPARQUE_Paper (waste treatment) {GLO}</i> <i>recycling of paper</i> APOS, U	0,002927 t
	<i>Adaptado_Transp_trade mix_ECOPARQUE_Idemat2022 Steel, recycling credit closed loop</i>	0,001272 t
	<i>Adaptado_Transp_ECOPARQUE_Idemat2022 PET/bio-PET upcycled (estimate)</i>	0,004664 t
	<i>Adaptado_Transp_trade mix_ECOPARQUE_Idemat2022 Aluminium, recycling credit closed loop</i>	0,001272 t
	<i>Adaptado_Transp_ECOPARQUE_Idemat2022 PVC (Polyvinylchloride), upcycling credit</i>	0,005746 t
	<i>Reciclagem de pneus para produção de manta asfáltica (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2021)</i>	0,000191 t
Destinação da FORSU	<i>Resíduos sólidos urbanos (RSU) para aterro com aproveitamento do biogás (Tabela V)</i>	
	<i>Resíduos sólidos urbanos (RSU) para biodigestão seca (Tabela V)</i>	0,806808 t
	<i>Resíduos sólidos urbanos (RSU) para biodigestão CSTR (Tabela V)</i>	
Coprocessamento		
Produto evitado	<i>Petroleum coke {GLO}</i> <i>market for</i> APOS, U	72,4427 kg
	<i>Queima evitada do coque – CO₂</i>	235,51 kg
	<i>Energia elétrica evitada – moagem do coque electricity, medium voltage {BR}</i> <i>market group for electricity, medium voltage</i> APOS, U	2,100839451 kWh
Diesel	<i>Adaptado_Diesel, burned in building machine {GLO}</i> <i>processing</i> APOS, U (10% biodiesel)	3.071,69 kcal
Transporte até cimenteira	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i> <i>transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3</i> APOS, U	8,960363636 tkm
Energia elétrica	<i>Electricity, medium voltage {BR}</i> <i>market group for electricity, medium voltage</i> APOS, U	2,79797 kWh
Emissões	<i>Carbon dioxide</i>	190,33 kg
	<i>Particulates</i>	9.448 mg
	<i>Hydrogen chloride</i>	0,01515 kg
	<i>Hydrogen fluoride</i>	4.142 mg
	<i>Nitrogen dioxide</i>	309.512 mg
	<i>Sulfur dioxide</i>	353.588 mg
	<i>Toluene / Benzene / Xylene</i>	7.866 mg
	<i>Classe 1 (Cd, Hg, Tl)</i>	133 mg
	<i>Classe 2 (As, Co, Ni, Se, Te)</i>	136 mg
<i>Classe 3 (Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn)</i>	10.519 mg	
<i>Carbon monoxide</i>	252.729 mg	

ISBN: 978-65-997883-3-8

CRL



9 786599 788338

