

# PROCEDIMENTO DE MANIFESTAÇÃO DE INTERESSE – PMI

## ADENDO DOS ESTUDOS

Consórcio Regional de Saneamento  
Básico Central de Minas - CORESAB



**PROCEDIMENTO DE MANIFESTAÇÃO DE INTERESSE – PMI  
EDITAL - 001/19**

**ADENDO**

**Avaliação preliminar de viabilidade econômica da implementação de  
tecnologias de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos**

**Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas –  
CORESAB**

**05 de março de 2021**

<b>Nº Documento:</b>		<b>Nº Contrato/Lote:</b>		
HBR 60-19-REL009		HBR 60-19		
00	10/03/2021	Minuta de Entrega	LAFF	FCM / VCQ
<b>Rev.</b>	<b>Data</b>	<b>Descrição da Revisão</b>	<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>

Belo Horizonte, 10 de março de 2021.

**A/C: Exmo. Vanderli de Carvalho Barbosa**  
**Presidente do Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas –**  
**CORESAB**

**C/C: Exmo. Leandro Vaz Pereira**  
**Superintendente do CORESAB**

Excelentíssimos Senhores,

A HIDROBR Consultoria Ltda., empresa habilitada para participação do processo de obtenção de estudos, levantamentos, investigações, dados, informações técnicas, projetos ou pareceres de interessados que tragam soluções ou insumos para estruturação de estudos de viabilidade visando à realização de investimentos e operação de estrutura necessária para o manejo e a disposição final de resíduos sólidos urbanos dos seus entes consorciados, apresenta o **ADENDO DOS ESTUDOS**, com **Avaliação preliminar de viabilidade econômica da implementação de tecnologias de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos**.

Colocamo-nos à disposição para quaisquer esclarecimentos que se façam necessários.

Atenciosamente,

Vitor Carvalho Queiroz  
**HIDROBR – Soluções Integradas**  
R. Marília de Dirceu, 199, 6º. andar  
Lourdes – Belo Horizonte/MG  
CNPJ: 19.368.145/0001-78  
[www.hidrobr.com](http://www.hidrobr.com)

## APRESENTAÇÃO

A HIDROBR é uma empresa focada em soluções de engenharia e estruturação de projetos para os setores de infraestrutura, especialmente saneamento, energia e mineração. Foi fundada no final de 2013, em Belo Horizonte/MG, com uma atuação mais pontual no setor de infraestrutura. No ano de 2017 traçou objetivos e metas com intuito de crescer e ampliar sua atuação no mercado, pois acreditamos que o contexto brasileiro, com todas suas adversidades e desafios, demanda por empresas de engenharia que possam atuar com valores, práticas e propostas mais conectados com as exigências atuais. A HIDROBR conta com uma equipe experiente, com atuação na iniciativa privada, setor público e acadêmico, nacional e internacional. Possui sólida base técnica e de gestão, além de formação diversificada. A HIDROBR propõe-se a fornecer soluções integradas, com inovação e adaptadas às necessidades dos clientes.

Este trabalho consiste na estruturação de estudos de viabilidade visando à realização de investimentos e operação de estrutura necessária para o manejo e a disposição final de resíduos sólidos urbanos dos entes consorciados do Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas (CORESAB). O processo previu o desenvolvimento de 7 (sete) Cadernos, a saber:

- Caderno I – Abordagem Tecnológica
- Caderno II – Síntese da Proposta
- Caderno III – Projeto de Implantação
- Caderno IV – Modelo Operacional
- Caderno V – Modelo Econômico-Financeiro e Plano de Negócios
- Caderno VI – Modelo Jurídico Institucional
- Caderno VII – Anexos e Documentação Complementar

Além disso, também foi elaborado um Caderno de Consolidação, apresentando a consolidação dos estudos realizados pela HIDROBR para elaboração destes cadernos, que contou com uma equipe multidisciplinar e discussão com especialistas com diferentes



expertises relacionadas ao trabalho para aprimorar a proposta apresentada de viabilização do manejo e destinação final dos resíduos sólidos dos municípios do CORESAB.

Já o presente documento apresenta uma avaliação preliminar de viabilidade econômica da implementação de tecnologias de tratamento térmico para a destinação adequada de resíduos sólidos urbanos dos municípios do CORESAB, com proposta de readequação de equações de mensuração de desempenho.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	PRINCÍPIO TÉCNICO DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA POR TRATAMENTO TÉRMICO DE RSU .....	3
2.1	Incineração.....	3
2.2	Pirólise .....	6
2.3	Gaseificação.....	8
2.4	Plasma.....	10
2.5	Coprocessamento em forno de clínquer.....	12
3	ASPECTOS LEGISLATIVOS.....	13
4	PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DA MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO.....	15
4.1	Análise de Sensibilidade .....	17
4.2	Análise da Geração de Energia .....	19
4.3	Análise de Sensibilidade do VPL por preço unitário (R\$/t) .....	20
4.4	Análise de Sensibilidade da Geração de Energia.....	22
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	26
6	BIBLIOGRAFIA .....	28

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fluxo do processo de incineração com recuperação de energia.	5
Figura 2 – Diagrama de fluxo da pirólise em um reator vertical.....	7
Figura 3 – Desenho esquemático dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado .....	9
Figura 4 – Fluxograma do processo de tratamento de RSU por plasma .....	11
Figura 5 – Gráfico do Valor pago por Araçáí x Taxa de Conversão.....	24
Figura 6 – Gráfico de Porcentagem Paga x Taxa de Conversão em Relação ao Aterramento Sanitário.....	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Legislações pertinentes à recuperação energética dos RSU .....	13
Tabela 2 – Análise de Sensibilidade AS x Gaseificação .....	18
Tabela 3 – Remuneração considerando 10% de recuperação para um município fictício .....	19
Tabela 4 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 350,00 por tonelada de resíduo..	20
Tabela 5 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 300,00 por tonelada de resíduo..	21
Tabela 6 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 250,00 por tonelada de resíduo..	21
Tabela 7 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 200,00 por tonelada de resíduo..	21
Tabela 8 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 150,00 por tonelada de resíduo..	22
Tabela 9 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão de 90% de RSUE (de 0 a 200 kWh/t).....	23
Tabela 10 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 90% de RSUE (de 250 a 500 kWh/t).....	23
Tabela 11 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 50% de RSUE (de 0 a 200 kWh/t).....	24
Tabela 12 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 50% de RSUE (de 250 a 500 kWh/t).....	24



## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CORESAB	Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas Gerais
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
PMI	Procedimento de Manifestação de Interesse
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSUE	Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos
TIR	Taxa Interna de Retorno
URE	Usina de Recuperação Energética
UTC	Usina de Triagem e Compostagem
VPL	Valor Presente Líquido

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão e o manejo adequado dos resíduos sólidos são instrumentos necessários para integrar as medidas de sustentabilidade de qualquer região. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº. 12.305/2010 (BRASIL, 2010), atualizada pela Lei nº. 14.026/2020 (BRASIL, 2020) a gestão sustentável é aquela que favorece a não geração, a prevenção, a redução, a reutilização e reaproveitamento, a reciclagem, o tratamento e, só então, disposição final ambientalmente adequada.

O Estado de Minas Gerais, por meio do Decreto nº 48.107, de 29 de dezembro de 2020 (MINAS GERAIS, 2020), permitiu que a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) seja feita por meio das tecnologias de tratamento térmico (exceto incineração), uma vez que seja comprovada a sua viabilidade técnica e ambiental e implantado programa de monitoramento de emissões atmosféricas aprovado pelo órgão ambiental licenciador. Sendo assim, o aterramento do rejeito deixa de ser a única opção possível e agregam-se os tratamentos térmicos.

O artigo 9º da PNRS libera a utilização de tecnologias que permitam a recuperação energética dos RSU, com as mesmas condições expressadas pelo decreto estadual mineiro. Dessa forma, ampliam-se as alternativas disponíveis para a disposição final, de tal maneira que se deve analisar técnica e economicamente a viabilidade do empreendimento de uma Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos (URE).

O foco deste documento, então, é introduzir o princípio de funcionamento e os respectivos cuidados técnicos e ambientais das tecnologias de tratamento térmico, como a incineração, a pirólise, a gaseificação, o plasma e o coprocessamento em forno de clínquer. Após essa introdução, apontar as normas, decretos, leis ou demais mecanismos legais que discorram sobre o tema.

Por fim, apresentar uma proposta de redefinição da equação de indicador de eficiência por serviços prestados, a influenciar na remuneração a ser paga pelos municípios e, conseqüentemente, recebida pelo empreendimento a gerir e operar a URE. Somam-se a isso análises de sensibilidade alterando algumas premissas e a discussão sobre os encaminhamentos possíveis das conclusões aqui postas.



Esse documento compreende um Adendo ao Procedimento de Manifestação de Interesse (PMI) Edital – 001/19, cujo objetivo é obter estudos, levantamentos, investigações, dados, informações técnicas, projetos ou pareceres interessados que levem soluções ou insumos para a estruturação de estudos de viabilidade que vise à realização de investimentos e operação de estrutura necessária para o manejo e a disposição final de resíduos sólidos urbanos dos entes consorciados do Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas (CORESAB).

## **2 PRINCÍPIO TÉCNICO DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA POR TRATAMENTO TÉRMICO DE RSU**

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos, por meio da queima do biogás de aterro sanitário e digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos, por exemplo, já são práticas presentes na prática e na literatura. Diferentemente da recuperação energética por tratamento térmico, em que é uma área ainda em expansão no país, onde apresenta um número reduzido dessas usinas em operação. Felizmente, têm surgido empreendimentos nesse nicho para divulgar e popularizar a técnica.

Serão descritos nos itens a seguir os princípios de funcionamento das tecnologias classificadas pelo Decreto nº 48.107/2020 (MINAS GERAIS, 2020), que altera o Decreto nº 45.181/2009 (MINAS GERAIS, 2009) – o qual regulamenta a Lei nº. 18.031/2009, que trata da Política Estadual de Resíduos Sólidos (MINAS GERAIS, 2009) –, como tratamento térmico: incineração; pirólise; gaseificação; plasma e coprocessamento em fornos de clínquer.

### **2.1 Incineração**

O Decreto nº 48.107/2020 do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2020) define a incineração como:

processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo, tais como carbono, hidrogênio e enxofre, em temperatura superior a 800 °C, com conversão da sua energia química em calor (MINAS GERAIS, 2020).

A composição gravimétrica diversificada do RSU, associada à combustão incompleta do processo, gera produtos além do vapor d'água e gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Esses são: óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), ácido clorídrico (HCl), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), metais, material particulado (usualmente com sílica) e substâncias orgânicas (FEAM, 2012).

O produto da combustão dos materiais inorgânicos presente nos resíduos são as cinzas volantes e as escórias. As cinzas volantes contêm dioxinas e furanos, compostos comprovadamente cancerígenos, e, portanto, devem ser inertizadas com cimento antes da

sua disposição final em aterro sanitário, de acordo com a federação ambiental mineira. As escórias devem passar por processo de desferrização antes do uso como cobertura de aterro e as sucatas ferrosas comercializadas, se possível.

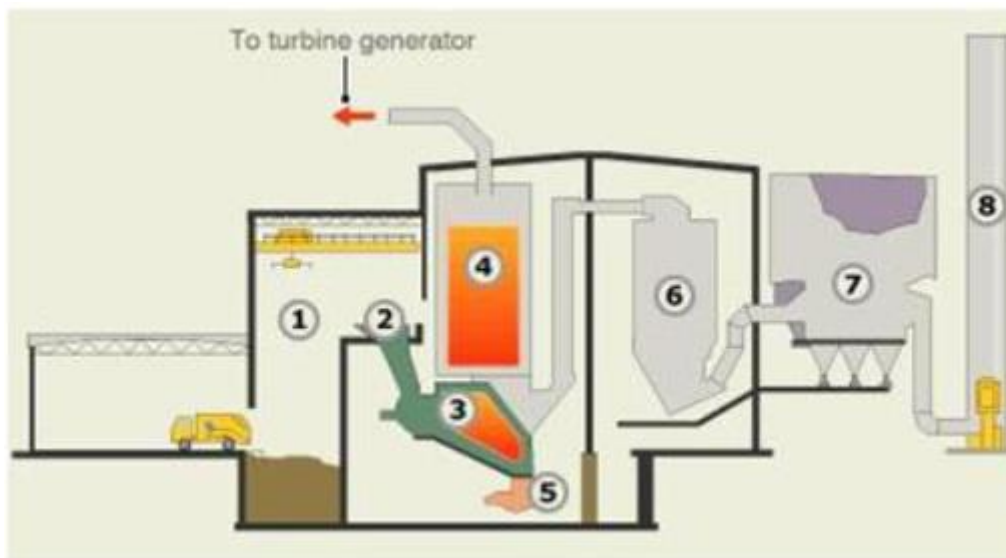
Os gases gerados pela incineração são gases de efeito estufa (GEE), principalmente o gás carbônico. Por isso, é necessário todo o cuidado com o sistema de filtragem, limpeza e controle das emissões, de forma a não lançar na atmosfera valores superiores aos permitidos por norma. As plantas de incineração devem dispor de rigorosos sistemas de tratamento/disposição de efluentes e monitoramento dos controles operacionais e emissões atmosféricas. O controle com o chumbo deve seguir as regulamentações pertinentes.

A combustão é realizada em um forno de incineração, composto pela câmara de combustão e pela câmara de pós-combustão, onde se completa a queima controlada de CO e outros gases formados.

As configurações desses fornos são (FEAM, 2012):

- **Combustão em grelha:** consiste em uma grelha móvel no interior de um forno caldeira, que se desloca queimando o resíduo e ocorre a combustão material carbonoso. Os compostos orgânicos voláteis são perdidos. É bastante utilizado para RSU por permitir uma granulometria variada.
- **Leitos fluidizados tipo circulante ou borbulhante:** os resíduos triturados e com granulometria inferior a 2,5cm são dispostos sobre leitos de partículas inertes e são incinerados. Mais utilizado para lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).
- **Câmaras múltiplas:** incinerados em grelhas fixas na câmara primária e finalizados na câmara secundária, com o processo de pós queima. Utilizado para pequenas gerações de resíduos e não é recomendada para a geração de energia elétrica.
- **Forno rotativo:** mais utilizado para resíduos industriais.

Está apresentado na Figura 1 o modelo de gestão de uma URE de incineração com combustão em grelha. Em **1** é descarregado o resíduo no silo da usina e jogado nas moegas (2) que enviam ao interior do incinerador (3). O calor da queima (4) aquece a água cujo vapor movimenta a turbina para gerar energia. Em **5** restam os resíduos que são drenados para os sistemas coletores. Em **6** e **7** ocorrem a remoção dos poluentes dos gases e a filtração das partículas finas, respectivamente, que são lançados à atmosfera pela chaminé (8).



**Figura 1 – Diagrama de fluxo do processo de incineração com recuperação de energia**

Fonte: FEAM, 2012

As principais exigências técnicas para o pleno funcionamento do sistema são:

- Temperatura da ordem dos 1.000 °C na câmara de combustão. A variação da temperatura altera os produtos da queima;
- Teor de oxigênio acima de 7% em volume nos gases de combustão emitidos na chaminé;
- Turbulência nos gases de combustão;

- Sistema de intertravamento para impedir a alimentação de resíduos aos fornos nas condições especificadas em normas.

Vale reforçar que “é vedado o uso da tecnologia de incineração para destinação de resíduos sólidos urbanos conforme determinado pelo art. 17 da Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009.” (MINAS GERAIS, 2020).

## 2.2 Pirólise

O Decreto nº 48.107/2020 do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2020) define a pirólise como:

processo formado por uma série de reações complexas, iniciadas quando um material é aquecido de 400 °C a 800 °C, na ausência de oxigênio, para produzir correntes de vapores condensáveis e não condensáveis e resíduos sólidos. O calor fraciona a estrutura molecular dos resíduos, liberando compostos de carbono na forma líquida, sólida e gasosa, que poderão ser utilizados como combustíveis (MINAS GERAIS, 2020).

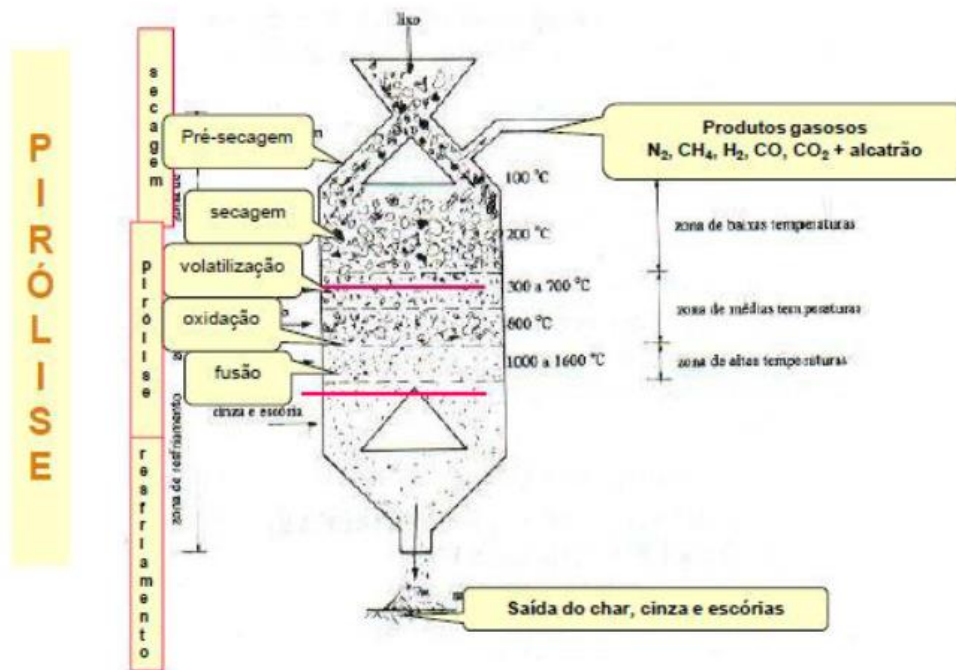
É um processo que se caracteriza pela decomposição térmica na ausência de oxigênio, convertendo a matéria orgânica em diversos subprodutos. As substâncias são fracionadas à medida que passam pelas zonas de calor do reator, que pode ser vertical ou horizontal.

Ocorre inicialmente a perda da umidade do material, na zona de secagem, e seguida da volatilização, oxidação e fusão na zona pirolítica. Os produtos desse processo são (FEAM, 2012):

- Gases não condensáveis (principalmente com nitrogênio e gás de síntese). Podem ser queimados para gerar energia;
- Líquido pirolenhoso (condensação dos gases que se desprendem ao longo do processo). Altamente poluente, corrosivo e nocivo. Pode ser refinado para gerar energia ou utilizado na agricultura;
- Resíduo sólido (carbono praticamente puro, char, compostos inorgânicos e escória). Podem ser fundidos com escória e passíveis de segregação, obtendo-se vidros e metais. O carvão pode ser utilizado como carvão ativado.

Os cuidados necessários para garantir a segurança ambiental dos produtos desse processo são semelhantes àqueles apresentados para a pirólise. Os gases emitidos são GEE e os devidos cuidados devem ser tomados. A emissão de partículas sólidas também deve estar dentro da norma pertinente.

É apresentado na Figura 2 as diferentes zonas do processo da pirólise com reator vertical. Percebe-se uma divergência entre o diagrama do processo exposto no material da FEAM em relação ao apresentado pelo decreto 45.181 em relação à temperatura de operação, onde o primeiro apresenta valores até 1.600°, enquanto o segundo limita à 800°.



**Figura 2 – Diagrama de fluxo da pirólise em um reator vertical**

Fonte: FEAM, 2012

Os principais fatores que modificam a proporção dos produtos finais são:

- Origem do composto pirolisado;
- Temperatura e taxa de aquecimento;
- Adição ou não de catalisadores;



- Técnica utilizada;
- Pressão.

### 2.3 Gaseificação

O Decreto nº 48.107/2020 do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2020) define a gaseificação como:

processo de reação de carbono com o vapor para produzir hidrogênio e monóxido de carbono, onde ocorre a conversão da matéria-prima sólida ou líquida em gás por meio de oxidação parcial, sob a aplicação de calor (MINAS GERAIS, 2020).

É um processo termoquímico onde ocorre a decomposição da matéria orgânica. Usualmente, utiliza-se a oxidação parcial, ou seja, por meio de um agente gaseificante (oxigênio, ar ou vapor quente) em quantidades de oxigênio inferiores à estequiométrica, produz o *syngas*. A gaseificação pode ser por fluxo contínuo ou por bateladas. Seus principais componentes CO e hidrogênio. A geração de energia é através da queima desse gás.

Deve-se utilizar oxigênio puro para a geração do *syngas* de modo a ser economicamente viável. Dessa forma, atinge-se poderes caloríficos médio e alto para a elevar a produção de energia elétrica mediante sua queima.

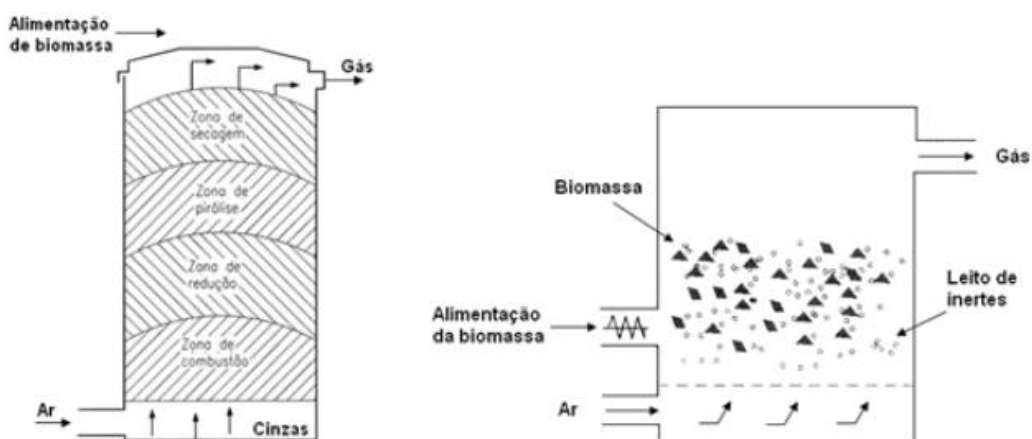
Além do produto já citado, há a geração de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos pirolenhosos. A proporção desses é reflexo das seguintes características (FEAM, 2012):

- Tipo de forno de gaseificação;
- Forma de fornecimento de energia;
- Injeção ou não de vapor d'água;
- Tempo de retenção;
- Sistema de retirada de gases;
- Matéria-prima.

Os gaseificadores podem ser classificados segundo o tipo de leito utilizado:

- **Leito fixo:** opção tecnológica mais difundida. É subdividida em outras duas categorias, a depender da movimentação entre os sólidos e os gases (FEAM, 2012):
  - **Corrente paralela:** o sólido e o gás se movem no mesmo sentido. Usualmente, de cima para baixo.
  - **Contracorrente:** o sólido e o gás se movem em sentidos opostos
- **Leito fluidizado:** subdividido em outras duas categorias a depender da velocidade com que o resíduo atravessa o leito, normalmente de areia.
  - **Tipo borbulhante:** velocidade em torno de 1 m/s.
  - **Tipo circulante:** velocidade de 7 a 10 m/s. Maiores velocidades permitem melhor mistura do ar com o material a ser gaseificado. Em contrapartida, as bolhas são maiores e geram lacunas no leito, separando-o do gás. Por serem mais complexos, usualmente são empregados em grandes instalações.

É apresentado Figura 3 esquemas dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado.



**Figura 3 – Desenho esquemático dos gaseificadores contracorrente e de leito fluidizado**

As exigências técnicas da gaseificação são:

- A taxa de alimentação do gaseificador;
- Pressão e temperatura;
- Proporção e pureza do oxigênio e matéria prima;
- Sistema de limpeza dos gases;
- Sistema de remoção das cinzas.

As emissões desse processo constam com materiais particulados, metais alcalinos e alcatrão. Os tratamentos desses rejeitos devem ser adequados de forma a atingirem os níveis permitidos pelas regulações pertinentes.

## **2.4 Plasma**

O Decreto nº 48.107/2020 do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2020) define o plasma como:

processo que gaseifica os resíduos sólidos por meio do jato de plasma. O processo ocorre em temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, mas tipicamente da ordem de 15.000 °C (MINAS GERAIS, 2020).

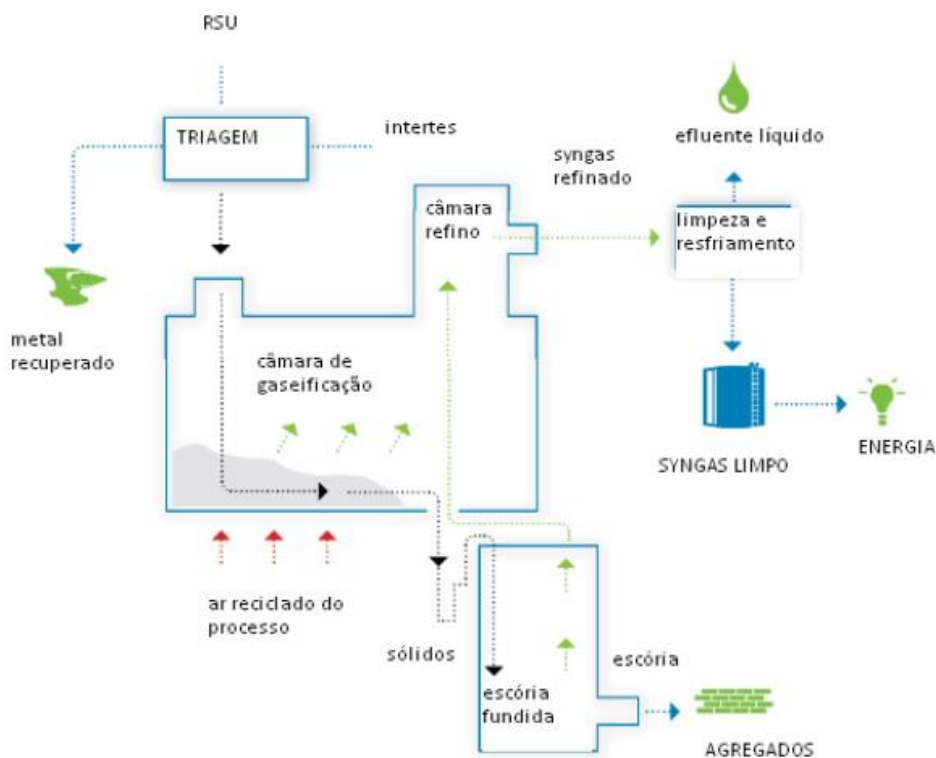
O plasma é o estado da matéria atingido após as moléculas gasosas serem dissociadas e perderem parte dos seus elétrons devido a temperatura de aquecimento de mais de 3.000 °C, sendo assim conhecido como “o quarto estado da matéria” (FEAM, 2012). Não há a combustão ou queima dos resíduos nesse processo.

Para o tratamento de resíduos por plasma, existem basicamente dois tipos (FEAM, 2012):

- Incidência de tocha de plasma diretamente nos resíduos, gerando compostos mais simples (syngas) e com maior consumo energético;
- Incidência de tocha de plasma sobre os gases provenientes do processo de gaseificação, gerando assim um gás mais limpo.

O syngas é semelhante ao discutido para o processo de gaseificação e pirólise. Os materiais inorgânicos são transformados em escória vítrea, que, à princípio, é não perigosa. Sendo assim, tanto resíduos orgânicos quanto inorgânicos são passíveis de serem tratados com plasma.

É apresentado na Figura 4 o esquema de funcionamento de uma planta de tratamento e recuperação energética por plasma.



**Figura 4 – Fluxograma do processo de tratamento de RSU por plasma**

Fonte: FEAM, 2012

Apesar de o processo inicial de ionização dos gases devido a elevadas temperaturas não queimar os resíduos, a energia recuperada é proveniente da combustão desses gases. Por definição, processos de combustão, completa ou incompleta, geram GEE e, portanto, suas emissões devem ser precedidas de filtros e limpezas de forma a atender as normas técnicas e ambientais pertinentes.

## 2.5 Coprocessamento em forno de clínquer

O Decreto nº 48.107/2020 do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2020) define o coprocessamento como:

utilização de resíduos para substituição de matérias-primas e aproveitamento energético em fornos de clínquer (MINAS GERAIS, 2020).

Consta na fabricação do cimento Portland comum (CPI) o clínquer, que é um composto à base de silicatos e aluminatos, que atua como retardador de pega. Isso evita a reação imediata do cimento com a água, trazendo um tempo maior da sua trabalhabilidade (FEAM, 2012).

O coprocessamento é uma alternativa para as borrachas, pneus, biomassa, lodo de ETEs, substâncias oleosas, e afins que servem ou de matéria-prima ou de agregados nos alto fornos para serem processados conjuntamente à produção do clínquer. Alguns desses resíduos possuem alto poder calorífico que aportam energia térmica ao processo.

Como ocorre a combustão do material, há emissões de GEE, material particulado, gases ácidos. Dessa forma, é preciso que essas emissões estejam dentro dos limites máximos regulados pelas normas técnicas e ambientais pertinentes.

### 3 ASPECTOS LEGISLATIVOS

É apresentado na Tabela 1 os documentos normativos e regularizadores a respeito da recuperação energética por tratamento térmico dos RSU. Não foi objetivo, porém, esgotar a legislação no que diz respeito à implantação de uma URE e pode ser que haja instrumentos pertinentes que não foram aqui elencados.

**Tabela 1 – Legislações pertinentes à recuperação energética dos RSU**

<b>Legislação/Instrumento</b>	<b>Conteúdo</b>
<b>Resíduos Sólidos</b>	
Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010	Regulamenta a Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.
Lei nº. 18.031, de 12 de janeiro de 2009	Dispõe sobre a Política Estadual Resíduos Sólidos.
Resolução CONAMA nº. 316, de 29 de outubro de 2002	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
Resolução CONAMA nº.499, de 6 de outubro de 2020	Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer.
Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010	Dispõe sobre o Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.
<b>Recuperação Energética</b>	
Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019	Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010.
<b>Aspectos Ambientais</b>	
Lei nº 7.302, de 21 de julho de 1978	Dispõe sobre a proteção contra a poluição sonora no Estado de Minas Gerais.
Deliberação Normativa COPAM nº. 01, de 26 de maio de 1981	Dispõe sobre a proteção, conservação e melhoria do meio ambiente no Estado de Minas Gerais, considerando a necessidade de operacionalizar imediatamente a proteção ambiental no Estado, resolve fixar normas e padrões para Qualidade do Ar
Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986	Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.
Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989	Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR.
Resolução CONAMA nº. 003, de 28 de junho de 1990	Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.
Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997	Resolve sobre Estudos, Licença e Licenciamento ambiental.
Resolução CONAMA nº.357, de 17 de março de 2005	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Legislação/Instrumento	Conteúdo
Resolução CONAMA n.º. 382, de 26 de dezembro de 2006	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
Resolução CONAMA n.º. 396, de 3 de abril de 2008	Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n.º 01, de 05 de maio de 2008	Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
Resolução CONAMA n.º. 430, de 13 de maio de 2011	Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.
Deliberação Normativa COPAM n.º 187, de 19 de setembro de 2013	Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências.
Deliberação Normativa COPAM n.º. 217, de 06 de dezembro de 2017	Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências.
Geração, Distribuição e Comercialização de Energia Elétrica	
Lei n.º 10.848, de 15 de março de 2004	Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis n.ºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.
Resolução Normativa ANEEL n.º 414, de 9 de setembro de 2010	Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.
Resolução Normativa ANEEL n.º 482, de 17 de abril de 2012	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
Portaria Ministério de Minas e Energia n.º 65, de 27 de fevereiro de 2018	Estabelece novos Valores Anuais de Referência Específicos - VRES, para os Sistemas de Geração Distribuída de que trata o art. 2º, § 8º, inciso II, alínea "a", da Lei n.º 10.848, de 15 de março de 2004, observado o disposto nos arts. 14 e 15 do Decreto n.º 5.163, de 30 de julho de 2004.
Resolução Normativa ANEEL n.º 876, de 10 de março de 2020	Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas e outras fontes alternativas e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida.

**Legenda:** ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos; CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente; COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental;

**Fonte:** HIDROBR, 2021

#### 4 PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DA MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO

O cálculo do índice proposto inicialmente no “Caderno V – Modelo Econômico-Financeiro e Plano de Negócios” da HIDROBR do PMI 001/19 considera a proporção de resíduos reciclados, reutilizados e compostáveis (identificado como RSU destinado) como parcela majoritária da pontuação, conforme Equação 1. Esse procedimento está de acordo com as diretrizes da PNRS para minimizar a quantidade de resíduos para a disposição final. O índice ainda é composto pela eficiência do sistema de transbordo, apresentado pela Equação 2 e pela quantidade de rejeitos aterrados, de acordo com a Equação 3. A mensuração do desempenho total é realizada de acordo com a Equação 4.

$$\text{Equação 1} \quad I_D = \frac{RSU \text{ Destinado}}{RSU \text{ Entregue}}$$

$$\text{Equação 2} \quad I_T = 1 - \frac{RSU \text{ Pernoitado}}{Capacidade}$$

$$\text{Equação 3} \quad I_{DF} = 1 - \frac{RSU \text{ Aterrado}}{RSU \text{ Entregue}}$$

$$\text{Equação 4} \quad N_I = (0,6 \times I_D) + (0,2 \times I_T) + (0,2 \times I_{DF})$$

Essas equações, porém, foram propostas em um contexto em que o aterro sanitário era a única opção e não tinha concorrência com as alternativas de tratamento térmico para RSU, uma vez que tinha restrições legais no estado de Minas Gerais. Dessa forma, não foram modeladas para possibilitar a comparação entre técnicas com objetivo que visam a redução do impacto ambiental na gestão dos resíduos. A consequência é que inviabilizaria a concorrência de tecnologias mais sustentáveis, já que naturalmente apresentam um custo financeiro um pouco mais elevado.

O desafio, então, foi propor uma metodologia de cálculo dos indicadores que ainda esteja de acordo com os preceitos da PNRS, reconhecendo o reaproveitamento dos resíduos, mas que valorize adequadamente os esforços em minimizar a quantidade aterrada e promover a recuperação energética do resíduo. Para isso, introduz-se o parâmetro referente aos Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos (RSUE) como argumento



da equação. É válido ressaltar que a Portaria Interministerial nº 274, de 2019, que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, não se aplica ao aproveitamento energético de biodigestão ou recuperação de gás de aterro (BRASIL, 2019).

O índice  $I_D$  é responsável por mensurar a recuperação dos resíduos e é calculado pela Equação 5 (proposta de substituição da Equação 1). Os seus argumentos são formados por uma parcela relativa à triagem inicial, de reuso e reciclagem do resíduo e por outra parcela associada à parte do resíduo para fins energéticos. O índice  $I_T$ , relativo às unidades de transbordo, foi mantido conforme apresentado na Equação 2. O índice  $I_{DF}$  é responsável por valorizar as alternativas com o mínimo de aterramento e está apresentado na Equação 6 (proposta de substituição da Equação 3). A nota final é a soma dos produtos dos indicadores já apresentado na Equação 4, com os respectivos pesos. Todos os índices são válidos apenas entre 0 e 1. Para valores além desses extremos, considerar 0 ou 1, o que for mais próximo.

#### Equação 5

$$I_D = \frac{0,16}{0,16 + 40 * e^{\left[ -13 * \frac{RSU \text{ Recuperado}}{RSU \text{ Entregue}} - 7 * \frac{RSUE}{(RSU \text{ Entregue} - RSU \text{ Recuperado})} \right]}}$$

#### Equação 6

$$I_{DF} = \frac{0,03}{0,03 + 45 * e^{\left[ -19 * \left( 1 - \frac{RSU \text{ Aterrado}}{RSU \text{ Entregue}} \right) \right]}}$$

À título de elucidação: a relação RSU Recuperado/RSU Entregue significa a porcentagem do material recuperado; a relação RSUE/(RSU Entregue – RSU Recuperado) significa a porcentagem do resíduo que terá a recuperação energética dentre aqueles que não foram

reaproveitados no seu estado bruto; a relação RSU Aterrado/RSU Entregue significa a porcentagem do resíduo a ser aterrado.

A proposta pela remuneração também não foi alterada. Ela é um produto direto entre a quantidade de resíduos entregue pelos municípios ( $Q_{RS}$ ), o preço unitário por tonelada ( $P_{RS}$ ) e o indicador de eficiência ( $N_I$ ), apresentada pela **Equação 7**.

**Equação 7** 
$$CONTRAPRESTAÇÃO = Q_{RS} * P_{RS} * N_I$$

#### 4.1 Análise de Sensibilidade

Baseado nas equações propostas, foram simuladas algumas alternativas para apresentar a forma de crescimento e remuneração das alternativas possíveis. Para isso, pensando que o índice  $I_T$  não está necessariamente relacionado à tecnologia de disposição final, que é o ponto central desse adendo, foi considerado como uma constante, no valor de 0,75, para todos os cenários. A geração anual dos resíduos foi considerada constante em 70 milhares de toneladas, apenas como efeito comparativo.

Para adotar os critérios de comparação, foi utilizada a análise de sensibilidade já apresentada no Caderno V para os dados relativos ao aterro sanitário. A análise de sensibilidade para a opção de tratamento térmico com recuperação de energia foi simulada com dados aproximados de um estudo de uma planta de gaseificação. É apresentado na Tabela 2 o ponto de equilíbrio do Cenário 1, com Curvelo, alternativa 1, sem Usina de Triagem e Compostagem (UTC), para as duas análises de sensibilidade com os indicadores de eficiência variando de 0,1 a 1, para cada décimo cheio.

O Ponto de Equilíbrio é o valor por tonelada de resíduo tratado que zera o Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento. Isto é, para valores acima do ponto de equilíbrio, o negócio é viável, do ponto de vista financeiro. Para valores menores que esse ponto, a viabilidade econômica não é alcançada.

**Tabela 2 – Análise de Sensibilidade AS x Gaseificação**

Indicador	Ponto de Equilíbrio – AS (R\$/t)	Indicador	Ponto de Equilíbrio – URE Gaseificação (R\$/t)
0,1	R\$ 1.286,74	0,1	R\$ 3.147,94
0,2	R\$ 630,35	0,2	R\$ 1.541,81
0,3	R\$ 411,55	0,3	R\$ 1.006,33
0,4	R\$ 302,15	0,4	R\$ 738,59
0,5	R\$ 236,51	0,5	R\$ 577,94
0,6	R\$ 192,75	0,6	R\$ 470,85
0,7	R\$ 161,49	0,7	R\$ 394,35
0,8	R\$ 138,05	0,8	R\$ 336,98
0,9	R\$ 119,82	0,9	R\$ 292,35
1,0	R\$ 105,23	1,0	R\$ 256,65

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos.

Fonte: HIDROBR, 2021

Vale ressaltar que pela forma como a equação foi proposta, uma URE estará com o coeficiente de eficiência próximo a 1,0 mesmo que a recuperação seja relativamente pequena. Enquanto o aterro sanitário tem o  $N_1$  superior a 0,3 com mais de 30% de recuperação do resíduo. Isso para dizer que a comparação a ser feita na Tabela 2 é entre as primeiras linhas do AS com as últimas linhas da URE. Da mesma forma, caso uma alternativa por aterramento consiga um coeficiente superior a 0,9 (recuperação de aproximadamente 60%), consegue oferecer valores reduzidos e ser consideravelmente mais viável que a opção pela recuperação energética.

Considerando uma proposta de URE com 5% de resíduo recuperado, o seu coeficiente de eficiência seria de 0,886. Para esse indicador, o empreendimento torna-se viável se o preço por tonelada de resíduo for de R\$ 297,99. Para que uma proposta por aterramento sanitário consiga ser competitiva com esse mesmo valor unitário, deve haver uma recuperação de 38,5% do material recebido, cujo indicador será de 0,488. Assumindo a nota 1,0 para a URE, a solução por aterro deve recuperar (reciclar, reutilizar ou compostar), pelo menos, 41,3% do resíduo.

Em suma, para que a solução por aterramento sanitário seja competitiva frente ao preço unitário da URE, a reciclagem e reutilização deve ser da ordem de 40% da massa total

recebida. Isso representa, por exemplo, reciclar os materiais recicláveis e ainda aproveitar uma parcela da massa orgânica do total recebido.

Como a proposta de remuneração para as empresas investirem e operarem a planta de disposição final dos resíduos é baseada também na nota de eficiência, é necessário que a proposta, para ser competitiva perante a concorrência, atinja um nível mínimo do coeficiente  $N_i$ .

#### 4.2 Análise da Geração de Energia

Apesar das remunerações para a simulação da recuperação energética serem superiores, tem-se que averiguar a economia da conta de luz proporcionada pelo aproveitamento da energia gerada pela URE. Para esse propósito, a estimativa de conversão apresentada por alguns autores é de 500kWh por tonelada de RSUE (TSAI, 2019; GLOBAL WERT COUNCIL, 2021). Há dados mais conservadores que consideram até 50kWh por tonelada de RSUE. Considerando as premissas de recuperação de 10% dos resíduos, preço pago pela prefeitura de R\$ 0,80 por kWh e ambas as taxas de conversão, tem-se uma economia de, no mínimo, R\$ 360,00 para um município fictício com geração de 10 mil toneladas por ano.

Comparando, então, as alternativas entre o aterramento sanitário e a gaseificação, para a recuperação de 10% do resíduo recebido, têm-se os seguintes valores para o mesmo município na Tabela 3.

**Tabela 3 – Remuneração considerando 10% de recuperação para um município fictício**

Cenário de 10% de Recuperação	Indicador	Preço de equilíbrio por tonelada	Economia por geração de energia	Remuneração (milhares de reais)
<b>URE - Gaseificação</b>	0,915	R\$ 286,50	R\$ 360	R\$ 2.261,192
<b>Aterro Sanitário</b>	0,160	R\$ 992,70	R\$ 0	R\$ 1.584,016

Fonte: HIDROBR, 2021

Dessa forma, caso a taxa de recuperação energética dos resíduos seja de 210 kWh/t, onde 90% do total é RSUE, o total a mais gasto com a gestão de resíduos é totalmente compensada pela economia da conta de luz. Ou seja, adotar a URE seria mais vantajoso

do ponto de vista ambiental, sem acrescentar custos para as prefeituras. Essa taxa de recuperação ainda é menor que o limite mínimo apresentado por Tsai (2009), cuja taxa de conversão varia de 287 a 568 kWh/t (TSAI, 2019), e também da Waste-to-Energy Research and Technology Council, cuja estimativa é de 500 a 600 kWh/t (GLOBAL WERT COUNCIL, 2021).

#### 4.3 Análise de Sensibilidade do VPL por preço unitário (R\$/t)

Será apresentada a comparação da viabilidade de possíveis empreendimentos cujos parâmetros serão o VPL e a Taxa Interna de Retorno (TIR) por preço unitário (R\$ por tonelada de resíduo), para diferentes percentagens de recuperação. Para valores unitários variando de R\$ 150,00 a R\$ 350,00 por tonelada, em incrementos de R\$ 50,00 e percentagens de recuperação de 20 a 50%, em incrementos de 10%. São mostrados nas Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 os valores da análise financeira variando os parâmetros citados. Os valores apresentados do VPL estão em milhares de reais.

**Tabela 4 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 350,00 por tonelada de resíduo**

	Recuperação dos Resíduos	Tecnologia	Índice	VPL (x1.000)	TIR
<b>R\$ 350,00/t</b>	<b>20%</b>	AS	0,186	<b>-R\$ 23.326,11</b>	N/A
		URE	0,94	R\$ 25.960,76	14,2%
	<b>30%</b>	AS	0,282	<b>-R\$ 8.861,84</b>	N/A
		URE	0,947	R\$ 27.061,28	14,5%
	<b>40%</b>	AS	0,516	R\$ 22.042,30	39,1%
		URE	0,949	R\$ 27.375,71	14,6%
	<b>50%</b>	AS	0,766	R\$ 54.900,15	76,1%
		URE	0,95	R\$ 27.532,93	14,6%

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; N/A – Não se aplica; TIR – Taxa Interna de Retorno; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos; VPL – Valor Presente Líquido.

**Fonte:** HIDROBR, 2021

**Tabela 5 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 300,00 por tonelada de resíduo**

	Recuperação dos Resíduos	Tecnologia	Índice	VPL (x1.000)	TIR
<b>R\$ 300,00/t</b>	<b>20%</b>	AS	0,186	<b>-R\$ 28.713,36</b>	N/A
		URE	0,94	R\$ 8.139,77	9,9%
	<b>30%</b>	AS	0,282	<b>-R\$ 13.813,79</b>	N/A
		URE	0,947	R\$ 9.107,58	10,1%
	<b>40%</b>	AS	0,516	R\$ 12.981,31	27,4%
		URE	0,949	R\$ 9.384,10	10,1%
	<b>50%</b>	AS	0,766	R\$ 41.518,13	61,0%
		URE	0,95	R\$ 9.522,35	10,2%

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; N/A – Não se aplica; TIR – Taxa Interna de Retorno; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos; VPL – Valor Presente Líquido.

**Fonte:** HIDROBR, 2021

**Tabela 6 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 250,00 por tonelada de resíduo**

	Recuperação dos Resíduos	Tecnologia	Índice	VPL (x1.000)	TIR
<b>R\$ 250,00/t</b>	<b>20%</b>	AS	0,186	<b>-R\$ 34.100,60</b>	N/A
		URE	0,94	<b>-R\$ 9.681,22</b>	5,8%
	<b>30%</b>	AS	0,282	<b>-R\$ 18.958,74</b>	N/A
		URE	0,947	<b>-R\$ 8.846,12</b>	6,0%
	<b>40%</b>	AS	0,516	R\$ 3.920,31	15,0%
		URE	0,949	<b>-R\$ 8.607,52</b>	6,1%
	<b>50%</b>	AS	0,766	R\$ 28.136,11	45,1%
		URE	0,95	<b>-R\$ 8.488,22</b>	6,1%

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; N/A – Não se aplica; TIR – Taxa Interna de Retorno; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos; VPL – Valor Presente Líquido.

**Fonte:** HIDROBR, 2021

**Tabela 7 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 200,00 por tonelada de resíduo**

	Recuperação dos Resíduos	Tecnologia	Índice	VPL (x1.000)	TIR
<b>R\$ 200,00/t</b>	<b>20%</b>	AS	0,186	<b>-R\$ 39.487,84</b>	N/A
		URE	0,94	<b>-R\$ 27.502,21</b>	1,8%
	<b>30%</b>	AS	0,282	<b>-R\$ 26.929,44</b>	N/A
		URE	0,947	<b>-R\$ 26.799,83</b>	2,0%
	<b>40%</b>	AS	0,516	<b>-R\$ 5.140,68</b>	N/A
		URE	0,949	<b>-R\$ 26.599,14</b>	2,0%
	<b>50%</b>	AS	0,766	R\$ 14.706,52	28,3%
		URE	0,95	<b>-R\$ 26.498,80</b>	2,0%

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; N/A – Não se aplica; TIR – Taxa Interna de Retorno; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos; VPL – Valor Presente Líquido.

**Fonte:** HIDROBR, 2021

**Tabela 8 – Análise de sensibilidade do VPL para R\$ 150,00 por tonelada de resíduo**

	Recuperação dos Resíduos	Tecnologia	Índice	VPL (x1.000)	TIR
<b>R\$ 150,00/t</b>	<b>20%</b>	AS	0,186	-R\$ 44.875,08	N/A
		URE	0,94	-R\$ 45.323,21	-3,0%
	<b>30%</b>	AS	0,282	-R\$ 35.097,20	N/A
		URE	0,947	-R\$ 44.753,53	-2,8%
	<b>40%</b>	AS	0,516	-R\$ 14.201,67	N/A
		URE	0,949	-R\$ 44.590,76	-2,7%
	<b>50%</b>	AS	0,766	R\$ 1.255,51	10,5%
		URE	0,95	-R\$ 44.509,38	-2,7%

**Legenda:** AS – Aterro sanitário; N/A – Não se aplica; TIR – Taxa Interna de Retorno; URE – Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos; VPL – Valor Presente Líquido.

**Fonte:** HIDROBR, 2021

É mostrado nessa análise que a alternativa por aterramento será economicamente viável para a empresa gestora e competitiva frente à gaseificação, caso a recuperação dos resíduos seja da ordem de grandeza de 30 ou 40% do total. Caso esse percentual não seja atingido, a remuneração será consideravelmente reduzida a ponto de o VPL ser negativo. Outra opção é que, caso aumente o valor unitário do resíduo aterrado para compensar a perda da remuneração, a URE começa a se apresentar mais favorável.

#### 4.4 Análise de Sensibilidade da Geração de Energia

Inicialmente, adotou-se a taxa de conversão energética com o valor mais conservador encontrado na literatura. Agora, será apresentada uma análise de sensibilidade dessa taxa e a sua consequência no gasto com a concessionária de energia, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Para essa análise, foram consideradas duas premissas: a primeira com recuperação de 10% da massa total entregue e o restante sendo RSUE, resultando em um  $N_I$  de 0,915; a segunda<sup>1</sup> com recuperação de 10% da massa total, 50% de RSUE e 40% aterrado, resultando em um  $N_I$  de 0,538. Os incrementos para essas análises de sensibilidade são de 50 kWh por tonelada de resíduo, de 0 a 500 kWh/t.

<sup>1</sup> Não foi considerada uma redução no custo para essa premissa, como seria de se esperar, já que a URE seria menor, e o valor por resíduo aterrado também seria menor.

Os valores do gasto por prefeitura em cada linha da tabela são referentes ao total gasto pelo empreendimento da gestão de resíduos sólidos subtraída da economia na respectiva conta de luz. Na medida em que a taxa de conversão aumenta, mais energia pode ser gerada, maior a economia proporcionada e, conseqüentemente, menor o total gasto. Os valores negativos significam que a economia com a energia é maior que o custo com a URE.

Estão apresentados nas Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 os valores a serem pagos pelos municípios adotados como exemplo para cada incremento da taxa de conversão da produção de energia por tonelada de resíduo. Por fim, mostra-se na Figura 5 o decaimento do custo total em um gráfico de linhas, com o valor fixado do aterro sanitário<sup>2</sup>, e na Figura 6 o custo percentual do empreendimento se comparado a um aterro sanitário.

**Tabela 9 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão de 90% de RSUE (de 0 a 200 kWh/t)**

Município	Taxa de Conversão				
	0	50	100	150	200
<b>Araçaí</b>	R\$ 10.852,91	R\$ 9.196,91	R\$ 7.540,91	R\$ 5.884,91	R\$ 4.228,91
<b>Buenópolis</b>	R\$ 51.118,76	R\$ 43.318,76	R\$ 35.518,76	R\$ 27.718,76	R\$ 19.918,76
<b>Corinto</b>	R\$ 114.977,89	R\$ 97.433,89	R\$ 79.889,89	R\$ 62.345,89	R\$ 44.801,89
<b>Curvelo</b>	R\$ 392.906,67	R\$ 332.954,67	R\$ 273.002,67	R\$ 213.050,67	R\$ 153.098,67
<b>Diamantina</b>	R\$ 249.144,98	R\$ 211.128,98	R\$ 173.112,98	R\$ 135.096,98	R\$ 97.080,98

Fonte: HIDROBR, 2021

**Tabela 10 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 90% de RSUE (de 250 a 500 kWh/t)**

Município	Taxa de Conversão					
	250	300	350	400	450	500
<b>Araçaí</b>	R\$ 2.572,91	R\$ 916,91	-R\$ 739,09	-R\$ 2.395,09	-R\$ 4.051,09	-R\$ 5.707,09
<b>Buenópolis</b>	R\$ 12.118,76	R\$ 4.318,76	-R\$ 3.481,24	-R\$ 11.281,24	-R\$ 19.081,24	-R\$ 26.881,24
<b>Corinto</b>	R\$ 27.257,89	R\$ 9.713,89	-R\$ 7.830,11	-R\$ 25.374,11	-R\$ 42.918,11	-R\$ 60.462,11
<b>Curvelo</b>	R\$ 93.146,67	R\$ 33.194,67	-R\$ 26.757,33	-R\$ 86.709,33	-R\$ 146.661,33	-R\$ 206.613,33
<b>Diamantina</b>	R\$ 59.064,98	R\$ 21.048,98	-R\$ 16.967,02	-R\$ 54.983,02	-R\$ 92.999,02	-R\$ 131.015,02

Fonte: HIDROBR, 2021

<sup>2</sup> Valor mínimo por um aterro sanitário. Ou seja, coeficiente de eficiência  $N_1=1,0$



**Tabela 11 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 50% de RSUE (de 0 a 200 kWh/t)**

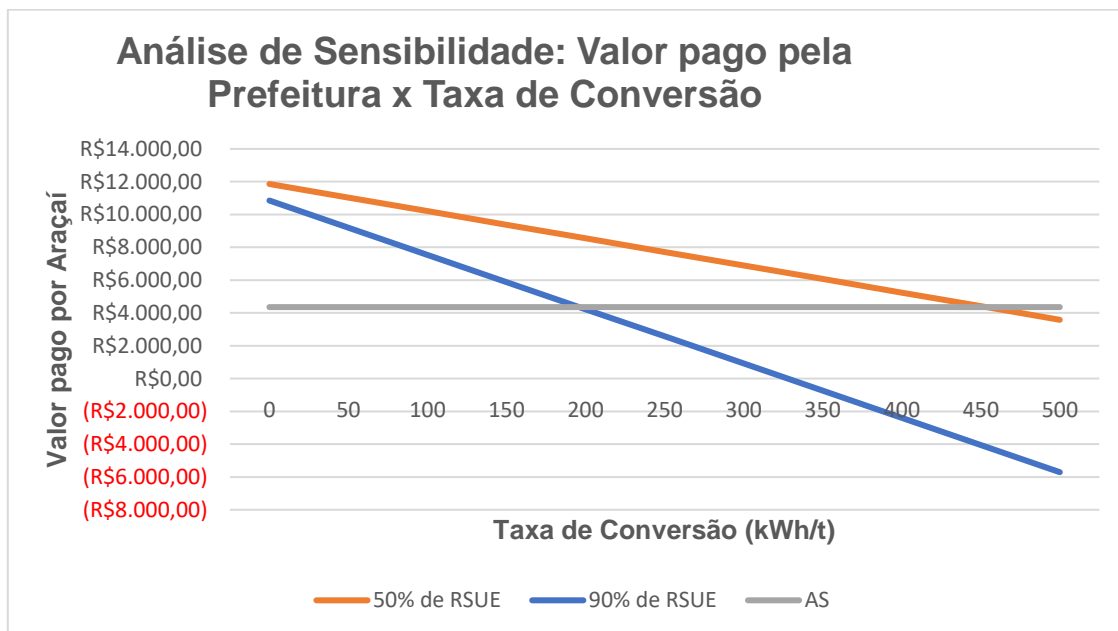
Município	Taxa de Conversão				
	0	50	100	150	200
<b>Araçaí</b>	R\$ 11.861,82	R\$ 11.033,82	R\$ 10.205,82	R\$ 9.377,82	R\$ 8.549,82
<b>Buenópolis</b>	R\$ 55.870,87	R\$ 51.970,87	R\$ 48.070,87	R\$ 44.170,87	R\$ 40.270,87
<b>Corinto</b>	R\$ 125.666,48	R\$ 116.894,48	R\$ 108.122,48	R\$ 99.350,48	R\$ 90.578,48
<b>Curvelo</b>	R\$ 429.432,10	R\$ 399.456,10	R\$ 369.480,10	R\$ 339.504,10	R\$ 309.528,10
<b>Diamantina</b>	R\$ 272.306,02	R\$ 253.298,02	R\$ 234.290,02	R\$ 215.282,02	R\$ 196.274,02

Fonte: HIDROBR, 2021

**Tabela 12 – Análise de sensibilidade do gasto, por Prefeitura, por taxa de conversão para 50% de RSUE (de 250 a 500 kWh/t)**

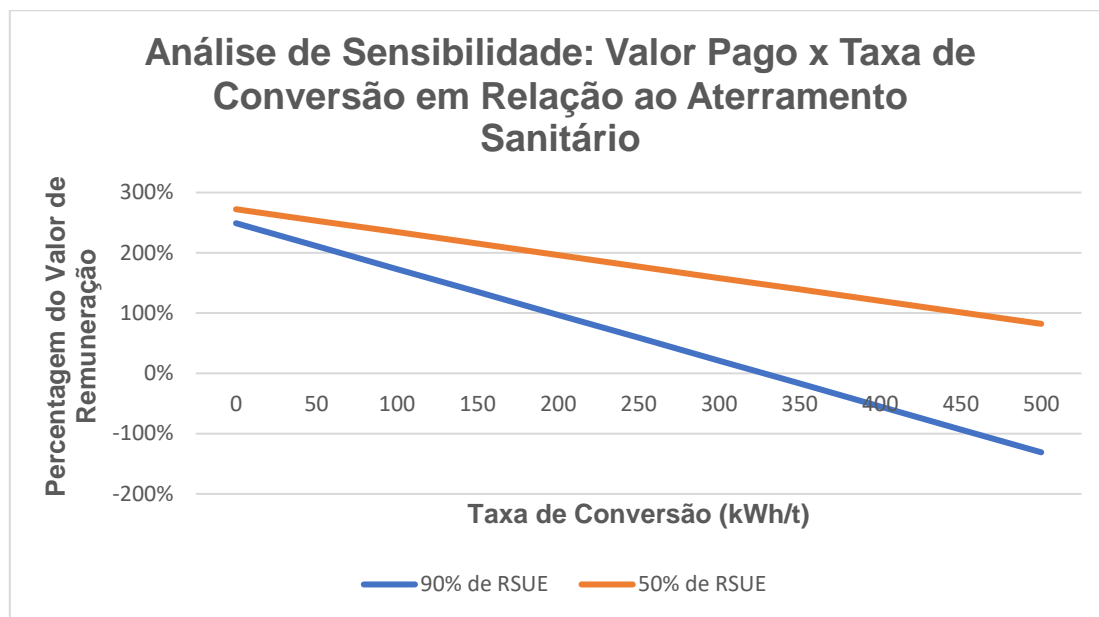
Município	Taxa de Conversão					
	250	300	350	400	450	500
<b>Araçaí</b>	R\$ 7.721,82	R\$ 6.893,82	R\$ 6.065,82	R\$ 5.237,82	R\$ 4.409,82	R\$ 3.581,82
<b>Buenópolis</b>	R\$ 36.370,87	R\$ 32.470,87	R\$ 28.570,87	R\$ 24.670,87	R\$ 20.770,87	R\$ 16.870,87
<b>Corinto</b>	R\$ 81.806,48	R\$ 73.034,48	R\$ 64.262,48	R\$ 55.490,48	R\$ 46.718,48	R\$ 37.946,48
<b>Curvelo</b>	R\$ 279.552,10	R\$ 249.576,10	R\$ 219.600,10	R\$ 189.624,10	R\$ 159.648,10	R\$ 129.672,10
<b>Diamantina</b>	R\$ 177.266,02	R\$ 158.258,02	R\$ 139.250,02	R\$ 120.242,02	R\$ 101.234,02	R\$ 82.226,02

Fonte: HIDROBR, 2021



**Figura 5 – Gráfico do Valor pago por Araçaí x Taxa de Conversão**

Fonte: HIDROBR, 2021



**Figura 6 – Gráfico de Porcentagem Paga x Taxa de Conversão em Relação ao Aterramento Sanitário**

Fonte: HIDROBR, 2021

A partir das Figura 5 e Figura 6, percebe-se que, caso haja uma taxa de conversão de 200 kWh/t com 90% de RSUE, o custo entre a planta de gaseificação e o aterro sanitário se igualam. Caso seja 50% de RSUE, a taxa de conversão para os custos serem os mesmos é da ordem de 450 kWh/t. Caso não haja nenhuma receita ou economia com energia, a URE pode chegar a custar 2,5 vezes o valor que a solução por aterramento.

De acordo com a primeira premissa adotada para essa análise de sensibilidade, se a taxa de conversão do RSUE for de, aproximadamente, 328 kWh/t, significa dizer que o custo do município com a disposição final dos resíduos será igual à sua economia da conta de luz. Para a segunda premissa, esse valor seria de 716 kWh/t. Tem-se na literatura que a conversão pode chegar até 600 kWh/t (GLOBAL WTERT COUNCIL, 2021), o que justifica para ambas as premissas, uma análise mais pontual para verificar a real viabilidade<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Um ponto a ser considerado seria o teto da economia de luz proporcionada pela URE. Se a fonte da geração de energia estiver sob o mesmo CNPJ ou CPF de uma fonte consumidora de energia, o balanço é automático. Caso contrário, a energia gerada deverá entrar em processo de venda, o que pode alterar as receitas com esse item, e exigir uma análise mais contextualizada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias de recuperação energética dos resíduos sólidos ajudam a minimizar dois grandes problemas enfrentados atualmente pelos centros urbanos: a geração de energia e o passivo ambiental do aterramento sanitário. A possibilidade de produzir energia elétrica e ainda diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente na atmosfera é, definitivamente, uma alternativa a ser considerada em qualquer estudo de implantação de um modelo de gestão de resíduos sólidos.

Porém, essas tecnologias são mais robustas e muito novas no contexto brasileiro, portanto naturalmente apresentam investimentos maiores. Comparar exclusivamente o custo econômico e financeiro, a curto prazo, ao aterro sanitário, seria, de certa forma, equivocado. Mais equivocada ainda é a comparação se não se ponderarem as diferenças ambientais proporcionadas por uma URE.

Diante desses fatos, surge o desafio de como incorporar esse incremento na despesa que uma tecnologia mais apropriada traria às finanças de um município sem fazer com que outras frentes, também prioritárias, fiquem defasadas. A solução desse problema não é fácil. Principalmente se o período de análise for no espaço de tempo em que aos benefícios trazidos pela eventual recuperação energética ainda não compensarem o investimento mais elevado.

Um estudo em relação ao custo desse investimento foi, então, realizado nesse adendo. De acordo com os parâmetros e premissas conservadores apresentados neste texto, percebe-se que a remuneração final por uma URE sofre um aumento significativo se comparado ao aterramento. Todavia, se forem adotadas premissas mais otimistas, esse valor tende a, inclusive, ser mais vantajoso que a solução com o maior passivo ambiental.

Outro ponto para viabilizar o empreendimento é uma possível receita por crédito de carbono, que foi desconsiderada em todas as premissas. Somado a isso, há a possibilidade de aumento da quantidade de resíduo recebido pelo empreendimento com a adesão de novos municípios a esse modelo de gestão. É sabido que unidades mais robustas ganham com economia de escala, o que diminuiria ainda mais os custos por tonelada de resíduo.

A pensar de acordo com os preceitos defendidos pela PNRS, e ampliando o horizonte para os próximos trinta anos, é possível especular que haja algum incentivo fiscal para soluções que minimizem o passivo ambiental. Ou, algum incremento fiscal para dificultar aterros sanitários. Apesar de hoje não ter nenhum indicativo que o Estado vá influenciar uma alternativa em detrimento de outra, um olhar mais otimista leva a essa conclusão.

Posto isso, vale ressaltar que para o contexto dos municípios do CORESAB, um estudo mais preciso, com premissas mais realistas, valores de receitas e despesas mais próximas de uma possível realidade pode indicar que uma solução por recuperação energética seja tão ou mais economicamente viável que o aterramento da maior parte do resíduo. Mesmo que, após a contextualização mais regionalizada da tecnologia, o custo financeiro ainda seja maior, a diferença de gasto pode não ser significativa a ponto de inviabilizar o empreendimento pelos integrantes do consórcio.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ABREU, M. G. C. Viabilidade Econômica Relacionada ao Tratamento e à Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 41. 2019.

AGÊNCIA CANALENERGIA. CCEE: preço médio em 2019 deve ficar em R\$ 176/MWh. Canal Energia, 2019. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53106618/ccee-preco-medio-em-2019-deve-ficar-em-r-176mwh>>. Acesso em: 01 março 2021.

BENTO GONÇALVES. Edital de Chamamento Público nº 008/2017. Prefeitura Municipal de Bento Gonçalves, 2017. Disponível em: <[http://ppps.bentogoncalves.rs.gov.br/uploads/downloads/CHAMAMENTO\\_PUBLICO\\_008-2017\\_PMI\\_001-20171.pdf](http://ppps.bentogoncalves.rs.gov.br/uploads/downloads/CHAMAMENTO_PUBLICO_008-2017_PMI_001-20171.pdf)>. Acesso em: 13 fevereiro 2021.

BENTO GONÇALVES. Procedimento de Manifestação de Interesse nº 001/2017. Caderno III - Modelagem Econômico-Financeira. PLANEX S/A - Consultoria de Planejamento de Execução. Belo Horizonte, p. 22. 2017.

BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Lei 12.305/2010 Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 13 jun. 2019.

BRASIL. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 274, DE 30 DE ABRIL DE 2019. Diário Oficial da União, 2019. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>>. Acesso em: 24 fevereiro 2021.

CAIBRE, D. I. et al. Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 10, n. 2, p. 67-88, 2016.

CARBOGAS. Recuperação Energética de Resíduos Sólidos. Um futuro Sustentável. Carbogás Energia. [S.l.], p. 15. 2020.

EPE. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 77. 2008.

FEAM. Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais. 2ª. ed. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, v. II, 2010.

FEAM. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 163. 2012.

GLOBAL WPERT COUNCIL. Frequently Asked Questions (FAQs). Waste-to-Energy Research and Technology Council, 2021. Disponível em: <<https://gwcouncil.org/resources/frequently-asked-questions/>>. Acesso em: 24 fevereiro 2021.

IBGE. Portal Cidades. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/bento-goncalves.html>>. Acesso em: 13 fevereiro 2021.

LUZ, F. C. Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 256. 2013.

MINAS GERAIS. Decreto nº. 45.181, de 25 de setembro de 2009. Regulamenta a Lei nº. 18.031, de 12 de janeiro de 2009, e dá outras providências. Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=45181&comp=&ano=2009>>. Acesso em: 04 fevereiro 2021.

MINAS GERAIS. Decreto nº. 48.107, de 29 de dezembro de 2020. Altera o Decreto nº. 45.181, de 25 de setembro de 2009, que regulamenta a Lei nº. 18.031, de 12 de janeiro de

2009. Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2020. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=48107&comp=&ano=2020>>. Acesso em: 04 fevereiro 2021.

MINAS GERAIS. Lei nº. 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2020. Disponível em:

<<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=18031&comp=&ano=2009>>. Acesso em: 04 fevereiro 2021.

NOGUEIRA, Y. C. T. Viabilidade Técnica e Econômica de Usinas "Waste-to-Energy". Universidade de Brasília. Brasília, p. 85. 2015.

SANDER, I. Bento Gonçalves transformará lixo em energia a partir de 2020. Jornal do Comércio, 2019. Disponível em: <[https://www.jornaldocomercio.com/\\_conteudo/geral/2019/07/695520-bento-goncalves-transformara-lixo-em-energia-a-partir-de-2020.html](https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/geral/2019/07/695520-bento-goncalves-transformara-lixo-em-energia-a-partir-de-2020.html)>. Acesso em: 15 fevereiro 2021.

TSAI, W.-T. An Analysis of Operational Efficiencies in the Waste-to-Energy (WTE) Plants of Kaohsiung Municipality (Taiwan). MDPI. [S.l.], p. 13. 2019.