

### TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

#### Identificação da Produção Técnico-Científica

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: João Teles de Menezes Neto.

Matrícula: 20162011140114.

Título do Trabalho: Análise de viabilidade técnica e econômica da tecnologia de gaseificação como alternativa para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.

#### Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 15/10/2018

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

#### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, \_\_\_\_\_, 15 / 10 / 2018.  
Local Data

João Teles de Menezes Neto  
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
IFG CAMPUS GOIÂNIA  
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

João Teles de Menezes Neto

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA TECNOLOGIA DE  
GASEIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA O APROVEITAMENTO  
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Goiânia  
2018

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
IFG CAMPUS GOIÂNIA  
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

João Teles de Menezes Neto

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA TECNOLOGIA DE  
GASEIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA O APROVEITAMENTO  
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS- IFG) – Dissertação de Mestrado  
Profissional. Área de Concentração:  
Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.  
Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e  
Engenharia Econômica Aplicada.  
Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves  
Coorientadores: Prof. Dr. Elder Geraldo  
Domingues; Prof. Me. Vinícius Carvalhaes.

Goiânia  
2018

M543a Menezes Neto, João Teles de.

Análise de viabilidade técnica e econômica da tecnologia de gaseificação como alternativa para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos / João Teles de Menezes Neto. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.  
121 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

Coorientadores: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues, Prof. Msc. Vinícius Carvalhaes.

Dissertação de Mestrado – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Fontes alternativas de energia. 3. Biogás. I. Alves, Aylton José (orientador). II. Domingues, Elder Geraldo (coorientador). III. Carvalhaes, Vinícius (coorientador). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. V. Título.

CDD 363.7285

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740  
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



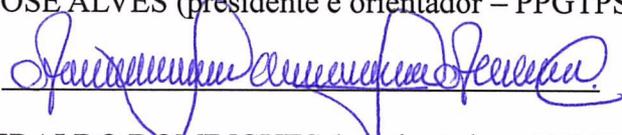
**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**IFG CÂMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

**João Teles de Menezes Neto**

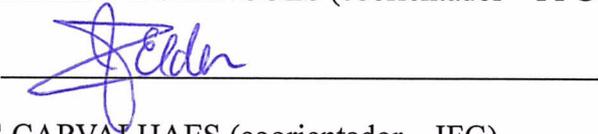
**“ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA  
TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS”**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Prof(a). Dr(a). AYLTON JOSÉ ALVES (presidente e orientador – PPGTPS IFG)

Assinatura 

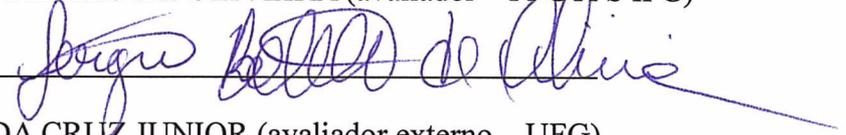
Prof(a). Dr(a). ELDER GERALDO DOMINGUES (coorientador – PPGTPS IFG)

Assinatura 

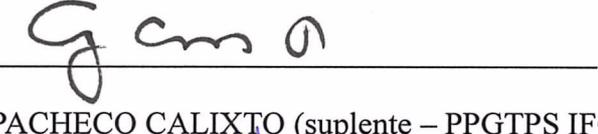
Prof(a). Me(a). VINÍCIUS CARVALHAES (coorientador – IFG)

Assinatura 

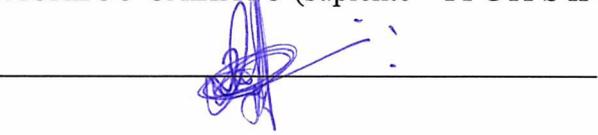
Prof(a). Dr(a). SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA (avaliador – PPGTPS IFG)

Assinatura 

Prof(a). Dr(a). GELSON DA CRUZ JUNIOR (avaliador externo – UFG)

Assinatura 

Prof(a). Dr(a). WESLEY PACHECO CALIXTO (suplente – PPGTPS IFG)

Assinatura 

Aprovado em: 15/10/2018

Dedico este estudo à pesquisa, ao pensamento, à consciência, à educação, à importância do pensamento crítico, formado, claro e dirigido. Ao que ainda não conheço.

Dedico ao meu desejo de ver um país baseado na solidez do conhecimento, no respeito às ideias, que no campo democrático podem parecer contraditórias, mas são, na verdade, complementares.

Dedico a minha família, por respeito a tudo que me proporcionaram, em especial, a minha irmã, pelo suporte e amor incondicional.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Furnas Centrais Elétricas, pela possibilidade de aprimoramento no exercício da profissão e pela disponibilização de dados e recursos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Goiás, pela possibilidade de pesquisa e desenvolvimento em processos sustentáveis.

Aos professores, alunos e funcionários do programa de mestrado em Tecnologias de Processos Sustentáveis, pela possibilidade da vivência de debates e ideias.

Ao meu orientador José Aylton Alves e aos coorientadores Elder Geraldo Domingues e Vinícius Carvalhaes, pela orientação e serviço à pesquisa comigo compartilhados.

Aos meus amigos João Luiz Moreira e Manoela Barbosa, pela companhia, entusiasmo e suporte no tempo de desenvolvimento deste trabalho.

A minha irmã Gisele Menezes, pela primeira e mais duradoura parceria da vida, pela admiração, amor e inspiração que nos dedicamos. Aos meus pais, com meu profundo respeito.

“Creio nos milagres da ciência  
e na descoberta de uma profilaxia  
futura dos erros e violências  
do presente”

**Cora Coralina**

## RESUMO

Este trabalho realiza estudos de viabilidade técnica e econômica de aplicação da tecnologia de gaseificação como alternativa para destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU) em uma planta industrial, na qual o gás obtido será usado para a geração de energia elétrica em ciclo Rankine. A viabilidade técnica foi analisada do ponto de vista da caracterização do resíduo, da eficiência do processo de gaseificação através de testes realizados em uma planta piloto e da estimativa de geração de energia. A viabilidade econômica se deu a partir da estimativa do fluxo de caixa oriundo da instalação e operação da usina, aplicando os indicadores Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Payback Descontado. Foi realizada uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros que influenciam o fluxo de caixa e sua viabilidade econômica, considerando a Taxa Mínima de Atratividade, a tarifa de energia, o custo de operação e manutenção, o custo unitário, o reinvestimento na planta e a vida útil do projeto. Os resultados apontaram para a viabilidade técnica considerando a adequação do resíduo para o processo assim como nos testes de gaseificação, que alcançaram uma eficiência de 62% permitindo, dadas as características e disponibilidade do resíduo, chegar a uma potência elétrica estimada de 1.462,45kW. Foi constatada a viabilidade econômica para as condições estudadas, no entanto, esta se mostrou sensível à variação de alguns parâmetros considerados no fluxo de caixa que podem ser influenciados por fatores internos ou externos ao projeto, afetando sua viabilidade. Este último resultado sugere que a implementação da tecnologia precisa ser acompanhada de políticas públicas justificáveis uma vez considerados os benefícios sociais e ambientais de sua consolidação.

Palavras-chave: análise de sensibilidade; caracterização físico química; eficiência do gás frio; fonte alternativa de energia.

## ABSTRACT

This work performs technical and economic feasibility studies of the application of gasification technology as an alternative for the final destination of municipal solid waste (MSW) in an industrial plant, in which the obtained gas will be used for the generation of electric energy in Rankine cycle. The technical feasibility was analyzed from the point of view of the residue characterization, the efficiency of the gasification process through tests carried out in a pilot plant and the estimation of energy generation. The economic viability was based on the estimation of cash flow applying the feasibility indicators Net Present Value, Internal Rate of Return and Discounted Payback. A sensitivity analysis of the main parameters influencing cash flow and economic feasibility of project implementation was performed, namely: Minimum Attractiveness Rate, energy tariff, operation and maintenance costs, unit cost, plant reinvestment and the project useful life. The results pointed to the technical feasibility considering the suitability of the waste for the process, the gasification tests achieved an efficiency of 62%, which, given the characteristics and availability of the residue, reached an estimated electric power of 1,462,45kW. It was verified the economic viability for the studied conditions, however, this one was sensitive to the variation of some parameters considered in the cash flow that can be influenced by factors internal or external to the project, affecting its viability. This last result suggests that the implementation of the technology needs to be accompanied by justifiable public policies once considered the social and environmental benefits of its consolidation.

**Keywords:** Sensitivity analysis. Physicochemical characterization. Cold gas efficiency. Alternative energy source.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Evolução percentual na geração de RSU e crescimento populacional brasileiro dos últimos cinco anos .....	29
<b>Figura 2.2</b> – Saneamento básico.....	31
<b>Figura 2.3</b> – Problemas do RSU .....	32
<b>Figura 2.4</b> – Gaseificador de leito fixo contracorrente ou fluxo ascendente .....	41
<b>Figura 2.5</b> – Gaseificador de leito fixo concorrente ou fluxo descendente .....	42
<b>Figura 2.6</b> – Gaseificador de fluxo cruzado .....	43
<b>Figura 2.7</b> – Gaseificador de leito fluidizado .....	45
<b>Figura 2.8</b> – Representação esquemática do ciclo de Carnot .....	50
<b>Figura 2.9</b> – Representação esquemática do ciclo de Rankine .....	52
<b>Figura 2.10</b> – Representação do diagrama de fluxo de caixa.....	55
<b>Figura 3.1</b> – Fluxograma de realização da metodologia proposta .....	60
<b>Figura 3.2</b> – Pontos de coleta no aterro de Boa Esperança .....	61
<b>Figura 3.3</b> – Um dos pontos aleatórios de coleta de amostra no aterro .....	61
<b>Figura 3.4</b> – Resíduo proveniente de coleta de rua descarregado pelo caminhão .....	62
<b>Figura 3.5</b> – Primeira etapa de trituração da amostra em campo .....	63
<b>Figura 3.6</b> – Segunda etapa de trituração da amostra .....	63
<b>Figura 3.7</b> – Quarteamento da amostra .....	64
<b>Figura 3.8</b> – Planta piloto da Carbogas, Guarulhos/SP .....	65
<b>Figura 3.9</b> – Vista superior da esteira de alimentação de CDR .....	66
<b>Figura 3.10</b> – Esquema ilustrativo da obtenção de potência elétrica em ciclos a vapor .....	71
<b>Figura 4.1</b> – Amostras enviadas para laboratório, granulometria média final de 10 mm .....	76
<b>Figura 4.2</b> – Chama na fornalha indicando a presença do gás produzido .....	79
<b>Figura 4.3</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função da TMA .....	88
<b>Figura 4.4</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função da TMA .....	88
<b>Figura 4.5</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da tarifa de energia ....	90
<b>Figura 4.6</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações da tarifa de energia .....	90
<b>Figura 4.7</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da potência elétrica ....	92
<b>Figura 4.8</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações da potência elétrica .....	92
<b>Figura 4.9</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo de O&M .....	94

<b>Figura 4.10</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo de O&M .....	95
<b>Figura 4.11</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo unitário .....	96
<b>Figura 4.12</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo unitário.....	96
<b>Figura 4.13</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo de reinvestimento na linha de processamento de RSU .....	98
<b>Figura 4.14</b> – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo de reinvestimento na linha de processamento de RSU .....	98
<b>Figura 4.15</b> – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da vida útil do projeto .....	100
<b>Figura A.1</b> – Localização do município de Boa Esperança no mapa territorial brasileiro e do estado de Minas Gerais .....	113
<b>Figura A.2</b> – Imagens do vertedouro a céu aberto ou lixão e terreno onde será implantada a usina.....	114
<b>Figura A.3</b> – Ilustração esquema geral da usina .....	115
<b>Figura A.4</b> – Planta de processamento de RSU .....	117
<b>Figura A.5</b> – Planta de gaseificação de CDR .....	119
<b>Figura A.6</b> – Esquema da planta termoelétrica .....	120

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Composição Gravimétrica Média do RSU Brasileiro .....	33
<b>Tabela 3.1</b> – Parâmetros de Realização dos Testes de Gaseificação .....	67
<b>Tabela 3.2</b> – Modelo de Fluxo de Caixa Adotado.....	72
<b>Tabela 4.1</b> – Caracterização do RSU de Boa Esperança/MG.....	77
<b>Tabela 4.2</b> – Caracterização do CDR Resíduo Fornecedor .....	80
<b>Tabela 4.3</b> – Caracterização do Gás Produzido .....	81
<b>Tabela 4.4</b> – Parâmetros Estimados na Modelagem do Fluxo de Caixa .....	87
<b>Tabela 4.5</b> – Fluxo de Caixa do Projeto de Implantação da Usina.....	85
<b>Tabela 4.6</b> – Indicadores de Viabilidade Econômica .....	86
<b>Tabela 4.7</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função da TMA .....	89
<b>Tabela 4.8</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função da Tarifa de Energia .....	91
<b>Tabela 4.9</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função da Potencia Elétrica Disponível.....	93
<b>Tabela 4.10</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função do Custo de O&M .....	95
<b>Tabela 4.11</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função do Custo Unitário .....	97
<b>Tabela 4.12</b> – <i>Payback</i> Descontado em Função do Custo de Reinvestimento na Linha de Processamento de RSU.....	99
<b>Tabela A.1</b> – Características da Planta de Tratamento de RSU .....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	Ao ano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIG	Banco de Informações de Geração
CAPEX	Custo de Investimento
CAPM	<i>Capital Asset Pricing Model</i>
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CMPC	Custo Médio Ponderado de Capital
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
FC	Fluxo de caixa
$FCN_t$	Fluxos de caixa negativos no ano $t$
$FCP_t$	Fluxos de caixa positivos no ano $t$
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas
GEE	Gás(es) de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IFG	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LTDA	Limitada
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
O&M	Custo de Operação e Manutenção
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	Custo de Operação
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIS	Programas de Integração Social

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGTPS-IFG	Programa de Pós-graduação em Tecnologias de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás
RSU	Resíduo(s) Sólido(s) Urbano(s)
S.A.	Sociedade Anônima
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SP	São Paulo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TIRM	Taxa Interna de Retorno Modificada
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
VPL	Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

bar	Unidade de pressão atmosférica
C	Carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propano
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butano
Cl	Cloro
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
°C	Grau Celsius
d	Dia
h	Hora
H	Hidrogênio
H <sub>2</sub>	Gás Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
<i>i</i>	Taxa mínima de atratividade
<i>i<sub>r</sub></i>	Taxa de imposto de renda efetiva
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kg/h	Unidade de vazão mássica
kg/m <sup>3</sup>	Unidade de vazão mássica
kJ	QuiloJoule
kmol	Quilomol
kW	QuiloWatt
kWh	QuiloWatt hora
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligrama
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MW	MegaWatt

N	Nitrogênio
n	Número de períodos de tempo
N <sub>2</sub>	Gás nitrogênio
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
Nm <sup>3</sup> /h	Unidade de vazão mássica do gás
O	Oxigênio
O <sub>2</sub>	Gás oxigênio
PCI <sub>CDR</sub>	Poder calorífico inferior do CDR
PCI <sub>gás</sub>	Poder calorífico inferior do gás
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
R <sub>a</sub>	Taxa de aplicação de recursos
R <sub>d</sub>	Taxa de captação de recursos
r <sub>a</sub>	Custo de capital próprio
r <sub>d</sub>	Custo de capital de terceiros
r <sub>f</sub>	Taxa de retorno do ativo livre de risco
$r_m - r_f$	Prêmio de risco do mercado de referência
r <sub>B</sub>	Prêmio do risco país
R\$	Real
S	Entropia
Σ	Somatório
T	Temperatura
T <sub>FP</sub>	Tarifa de energia fora do horário de ponta
T <sub>m</sub>	Tarifa média ponderada de energia
T <sub>P</sub>	Tarifa de energia no horário de ponta
t	Enésimo período de investimento do dinheiro no tempo
tCH <sub>4</sub>	Tonelada de metano
tCO <sub>2e</sub>	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
U\$	Dólar americano
W <sub>disponível</sub>	Potência elétrica disponível
W <sub>elétrica</sub>	Potência elétrica
W <sub>gás</sub>	Potência térmica do gás
β	Beta do setor regulado
η	Rendimento

$\eta_{EGF}$	Eficiência do Gás Frio
$\eta_{global}$	Eficiência global para usinas geradoras de potência elétrica
$\lambda$	Fração de capital obtida de terceiros
$v_{CDR}$	Vazão mássica de CDR
$v_{gás}$	Vazão mássica do gás
%	Porcentagem
$1-\lambda$	Fração de capital próprio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>PRINCIPAIS TECNOLOGIAS APLICADAS AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU..</b>	<b>33</b>
2.2.1	Processos Bioquímicos de Aproveitamento Energético .....	34
2.2.1.1	Gás de Aterro.....	34
2.2.1.2	Biogás .....	35
2.2.2	Processos Termoquímicos de Aproveitamento Energético .....	35
2.2.2.1	Pirólise .....	36
2.2.2.2	Incineração.....	37
2.2.2.3	Gaseificação.....	38
<b>2.3</b>	<b>PROCESSO TERMOQUÍMICO DE GASEIFICAÇÃO .....</b>	<b>38</b>
2.3.1	Classificação e Tipos de Gaseificadores .....	40
2.3.2	Termoquímica e Termodinâmica da Gaseificação .....	46
2.3.3	Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos .....	48
<b>2.4</b>	<b>PRODUÇÃO DE POTÊNCIA A PARTIR DE CALOR.....</b>	<b>49</b>
2.4.1.	Ciclo de Carnot.....	50
2.4.2.	Ciclo Rankine .....	51
<b>2.5</b>	<b>ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>52</b>
2.5.1	Fluxo de Caixa.....	55
2.5.2	Método do Valor Presente Líquido .....	55
2.5.3	Métodos da Taxa Interna de Retorno e Taxa Interna de Retorno Modificada .....	56
2.5.4	Método do Payback Descontado .....	57
2.5.5	Análise de Sensibilidade.....	58
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA DO TRABALHO.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>AMOSTRAGEM DE RSU .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3</b>	<b>PREPARO DE CDR.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>TESTE DE GASEIFICAÇÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>3.5</b>	<b>AVALIAÇÃO TÉCNICA .....</b>	<b>67</b>
3.5.1	Análises de Caracterização.....	67
3.5.2	Eficiência do Gás Frio .....	68
3.5.3	Potência Elétrica Estimada .....	69

<b>3.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....</b>	<b>71</b>
3.6.1 Modelagem do Fluxo de Caixa.....	71
3.6.2 Análise de Sensibilidade.....	73
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1 AVALIAÇÃO TÉCNICA .....</b>	<b>75</b>
4.1.1 Análises de Caracterização.....	75
4.1.1.1 Caracterização do RSU de Boa Esperança/MG .....	76
4.1.1.2 Caracterização do CDR Resíduo Fornecedor.....	79
4.1.1.3 Caracterização do Gás Produzido em Teste de Gaseificação a partir da Amostra Resíduo Fornecedor.....	80
4.1.2 Eficiência do Gás Frio .....	82
4.1.3 Potência Elétrica Estimada .....	82
<b>4.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....</b>	<b>83</b>
4.2.1 Fluxo de Caixa.....	85
4.2.2 Indicadores de Viabilidade Econômica .....	86
4.2.3 Análise de Sensibilidade.....	87
4.2.3.1 Sensibilidade à TMA .....	87
4.2.3.2 Sensibilidade à Tarifa de Energia Elétrica .....	89
4.2.3.4 Sensibilidade ao Custo de O&M .....	93
4.2.3.5 Sensibilidade ao Custo Unitário .....	95
4.2.3.6 Sensibilidade ao Custo de Reinvestimento na Linha de Processamento de RSU .....	97
4.2.3.7 Sensibilidade ao Tempo de Vida Útil do Projeto .....	99
<b>4.3 ANÁLISES .....</b>	<b>100</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>104</b>
<b>5.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A – DESCRIÇÃO GERAL DA USINA DE GASEIFICAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU .....</b>	<b>113</b>
A.1 Caracterização da Usina .....	114
A.1.1 Planta de Processamento de RSU .....	116
A.1.2 Planta de Gaseificação de CDR.....	118
A.1.3 Planta Termoelétrica em Ciclo Rankine .....	120

**APÊNDICE B – RESUMO DO CURRÍCULO LATTES..... 121**

## 1 INTRODUÇÃO

As transformações ocorridas no século XVIII iniciaram o processo que levou a humanidade à urbanização, visto que o índice de menos de 5% da população que vivia em aglomerados urbanos (PHILIPPI JUNIOR et al., 1999) elevou-se para pouco mais da metade da população mundial habitando as áreas urbanas (ONU, 2014).

Essas mudanças foram mais expressivas no século XX, quando, determinadas pelas atividades humanas, de uma forma nunca vista na história, ocorre a multiplicação do número de cidades, do tamanho das populações, das áreas ocupadas e dos impactos sobre o meio ambiente onde tais atividades vieram a se estabelecer (PHILIPPI JUNIOR et al., 1999).

A cidade pode ser definida como uma projeção da sociedade no espaço através de uma estrutura urbana, compreendida como o resultado da interação entre a população, o meio ambiente, a tecnologia e a organização social. Constitui-se por formações humanas com características e processos de desenvolvimento próprios, concentra histórias, especificidades, potencialidades e características locais, formando assim identidade e morfologia próprias (MARTINS; CANDIDO, 2015).

No Brasil, o processo de urbanização se deu entre as décadas de 1940 e 1980 (SILVA; ROMERO, 2014). Segundo censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), em 1960, o país era formado por 2.766 municípios com 45,1% da população vivendo em áreas urbanas. Esse número saltou para 84,4% em 2010 e 5.565 municípios. Neste período, enquanto a população total do país triplicou, a população urbana cresceu cinco vezes.

Com esse crescimento rápido e, de maneira geral, desordenado, o espaço urbano sofreu uma grande alteração no fluxo de materiais e energia, absorvendo novos caminhos e dinâmicas para sua história (PHILIPPI JUNIOR et al., 1999). Nas cidades, água e alimentos iniciam um fluxo de um lado, que gera resíduos e efluentes no outro (muitas vezes sem o devido tratamento); transporte e consumo de energia circulando enquanto geram poluentes, na maioria das vezes, em escalar maior que o meio ambiente pode absorver; indústria e comércio se expandindo e tornando o espaço mais complexo, com números cada vez maiores de consumidores e trabalhadores.

Dada a complexidade gerada por essas transformações, alternativas para gerenciar essas dinâmicas, promover a cidadania e o bem-estar da população, equilibradas à preservação do meio ambiente e às opções futuras de desenvolvimento são necessárias. Cabe às cidades, enquanto executam seus planos de expansão e desenvolvimento, a administração

do planejamento ambiental, do saneamento básico, de soluções industriais e soluções de transporte, do comércio e prestação de serviços, a criação e manutenção de áreas verdes, a resolução de conflitos com a vizinhança, entre outras medidas. Essas características e necessidades inerentes ao ambiente urbano criam o argumento para discutir o papel das cidades na manutenção do desenvolvimento sustentável (PHILIPPI JUNIOR et al., 1999).

Mas parece um tanto contraditório falar de cidades sustentáveis, considerando que, de acordo com MESJASZ-LECH (2014), áreas urbanas são os ecossistemas afetados pelas maiores mudanças de origem nas atividades humanas.

Entender sustentabilidade urbana não é uma tarefa simples, dada à subjetividade do conceito e às diferentes maneiras de monitorar e operar a sustentabilidade. Podemos afirmar, no entanto, que essa avaliação considera necessariamente os subsistemas ambiental, urbanístico, demográfico, socioeconômico, a infraestrutura de saneamento, de transporte, de habitação e questões políticas e de gestão, sem esgotar todas as possibilidades.

Nesse caso, a noção de cidade sustentável deve ser entendida através da discriminação de fatores que inviabilizam sua duração desejável, no que diz respeito à qualidade e às condições de sua duração (MARTINS; CANDIDO, 2015), e através da promoção de ações que possibilitem o equilíbrio moral, ético, social, ambiental, cultural, empresarial e econômico (JARA, 2016).

Para ser sustentável, os fluxos internos em uma cidade devem ter pouca ou nenhuma influência sobre o ambiente ao redor (SILVA; ROMERO, 2014).

Diferentes autores propõem, em suas respectivas teorias, modelos de cidades contemporâneas com menor impacto em seu entorno ou meio ambiente, através de medidas de redução do consumo por meio de aplicações tecnológicas ambientais; mudança de hábitos e promoção de programas de educação ambiental; redução de resíduos e poluentes; estabilização das populações e promoção de um modelo eficaz de utilização de recursos e energia (SILVA; ROMERO, 2014).

A necessidade de um conjunto de ações que permita a administração desses fatores insere, na questão do desenvolvimento sustentável de cidades, a base da governança, aliada às questões ambientais, sociais e econômicas (SILVA; ROMERO, 2014).

No contexto das ações de sustentabilidade das cidades emergem questões relacionadas aos resíduos nelas gerados, como parte inerente ao funcionamento de comunidades urbanas. A geração, a coleta e a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), oriundos de rejeitos domésticos e limpeza pública (BRASIL, 2010) além de outros, são parte dos problemas graves no metabolismo urbano, causando preocupações não apenas

do ponto de vista da quantidade gerada, mas também dos métodos utilizados em sua neutralização (MESJASZ-LECH, 2014).

Da ideia de diminuir os impactos dos centros urbanos em seu entorno surge a necessidade de propor ações e medidas que desviem os resíduos gerados e descartados nas cidades do meio ambiente natural, conferindo um destino adequado a estes.

Como parte dessas medidas, verifica-se ainda a necessidade de opções tecnológicas adequadas e acessíveis que promovam a correta gestão dos resíduos urbanos de maneira criativa, com competência e visão de mundo sustentável, viabilizada entre empresas, governos e sociedade civil. Tal observância proporciona inovações sustentáveis que ensejam o estímulo a visões alternativas de mundo, com aplicação na cadeia produtiva, criando ou melhorando plataformas tecnológicas já existentes, de maneira a garantir a sustentabilidade dos aglomerados urbanos (ALMEIDA, 2007).

Essas inovações fazem parte do processo de melhoria do bem-estar humano para as presentes e futuras gerações, sendo um dos requisitos para o desenvolvimento sustentável (ANADON, 2017).

Segundo ARAUJO et al. (2013), o crescimento dos padrões de consumo e variedade de produtos leva à geração de volumes cada vez maiores e mais diversificados de resíduos. A obsolescência cada vez mais crescente dos produtos, forçada pela sociedade industrial e pela presença de produtos não biodegradáveis, interrompem ciclos biológicos naturais, acarretando consequências tanto locais quanto globais.

A destinação inadequada de RSU é responsável por poluição e degradação ambiental, emissão de gases do efeito estufa, disseminação de doenças e vulnerabilidade social, entre outros problemas (AZEVEDO et al., 2015). PRADO FILHO e SOBREIRA (2007) contribuem com essa ideia ao afirmar que os RSU caracterizam-se como agentes causadores de degradação do ambiente urbano e natural, podendo ser meio para proliferação e desenvolvimento de vetores de doenças infecciosas.

Segundo MESJASZ-LECH (2014), esses efeitos negativos podem ser minimizados através de sistemas de gerenciamento de resíduos, que, além dos ganhos ambientais, podem conferir vantagens econômicas e sociais.

Estima-se, hoje, a produção de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos no mundo anualmente. Espera-se que, por volta do ano 2025, este valor alcance o patamar de 2,2 bilhões de toneladas (MOYA et al., 2017).

No mundo, as principais formas de destinação final dos RSU são os aterros sanitários, a compostagem e a incineração. Os aterros sanitários, mais populares,

correspondiam a 77% deste total, segundo dados de 2010. A compostagem, apesar de apresentar vantagens, tais como a tecnologia barata, a operação simples, os baixos custos de investimento e operação, correspondia a menos de 10% desse total naquela época (SONTAG et al., 2014).

A incineração possui vantagens em comparação aos aterros sanitários, uma vez que demanda menores áreas, reduz o volume de matéria para disposição final e o calor gerado pode ser reciclado ou utilizado para outros fins. No entanto, causam maior preocupação, pois possuem altos custos de investimento e operação, além de geração de substâncias tóxicas nos gases de exaustão. Este procedimento tem sido amplamente utilizado entre os países desenvolvidos, correspondendo, nesse mesmo período, a 16% da destinação final nos Estados Unidos da América; 75%, no Japão; de 40% a 50%, na Alemanha e na França; de 9% a 10%, na Inglaterra e 5% a 6%, no Canadá (SONTAG et al., 2014).

Dados obtidos pela ABRELPE (2012) mostravam a distribuição em números de usinas de tratamento de RSU com recuperação de energia ao redor do mundo, contabilizando, à época, 869 usinas de incineração, 31 usinas de gaseificação e 15 usinas cujo método empregado era a pirólise.

Dados mais recentes (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016) dão conta de aproximadamente 500 usinas de incineração nos países da Europa; 75 nos Estados Unidos da América; mais de 1.200 no Japão e 150 plantas entre China e Coreia do Sul. O governo chinês apoia investimentos na incineração associada à recuperação de energia, porque vê um grande potencial mercadológico para o futuro. Na Suécia e Taiwan, a tecnologia de incineração tem monopólio no mercado de disposição final de resíduos, com recuperação de energia a partir de RSU, pois materiais combustíveis são proibidos em aterros sanitários.

Ainda segundo INTHARATHIRAT e SALAM (2016), outra forma de aproveitamento de energia de RSU – o biogás de aterros sanitários – cresce a taxas de 20-30% ao ano, com mercados mais desenvolvidos na Alemanha, Dinamarca e Áustria.

Objeto de estudo desse trabalho, as usinas de gaseificação, tecnologia relativamente nova se comparada à incineração, foram contabilizadas pelos autores em um número total de 100 usinas ao redor do mundo, estando a maioria delas no Japão.

INTHARATHIRAT e SALAM (2016) relatam ainda que a China lidera o desenvolvimento mundial de tecnologias de gaseificação, tidas como a próxima geração de sistemas de conversão térmica usados na geração de energia elétrica a partir de resíduos.

Apesar do crescimento do número de usinas nesse período, em seu trabalho, os autores identificaram que essas usinas operam em condições ainda não comerciais e que o

principal desafio da tecnologia é a solução de problemas técnicos e econômicos relacionados à alta heterogeneidade do RSU. Assim, a tecnologia carece de avanço na aplicação comercial, o que seria conquistado, sobretudo, a partir de investimento em estudos, para atingir maiores eficiências na conversão de energia e permitir a limpeza do gás de síntese a custos mais econômicos (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). Para MATSAKAS et al. (2017), comparada à incineração de RSU, a gaseificação envolve processos mais complexos de conversão e ainda se encontra em estágio de desenvolvimento técnico.

No Brasil, os sistemas de disposição final de resíduos estão sobrecarregados e um dado ainda mais preocupante mostra que 12,4 milhões de toneladas de RSU ainda são depositadas em lixões, causadores de poluição ambiental e diversos problemas de saúde (ABRELPE, 2017).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010, prevê medidas de redução, reuso, reciclagem e aproveitamento energético desses resíduos antes que eles sejam dispostos em aterros sanitários.

A redução envolve esforços preventivos na geração de resíduos; o reuso é o processo pelo qual o material é reaproveitado sem que haja transformação do mesmo; a reciclagem dá-se pela transformação dos resíduos por meio de processos industriais; o aproveitamento energético agrega valor econômico ao resíduo através da extração de materiais ou energia; e, por fim, a disposição final seria entendida como uma solução final, esgotadas todas as outras possibilidades (MASSARINI; MURARO, 2015).

Para MASSARINI e MURARO (2015), as ações governamentais deveriam considerar alternativas que garantissem os melhores resultados ambientais, investindo em soluções tecnológicas que, por um lado, maximizem ações preventivas na redução de resíduos e, por outro, minimizem a disposição final em aterros.

Isso mostra que, no caso do Brasil, mesmo os aterros sanitários – que possuem o conjunto de medidas para proteção do meio ambiente – ainda estão sendo usados inadequadamente, pois recebem todo tipo de resíduo que poderia ser reaproveitado conforme a orientação da PNRS.

No país, iniciativas de coleta seletiva são registradas em 69,6% das cidades, no entanto, os índices de reciclagem permanecem estagnados há alguns anos. O país ainda registra ausência de iniciativas consolidadas para aproveitamento e recuperação da fração orgânica (ABRELPE, 2017).

Conforme dados do Banco de Informações de Geração (BIG), existem 19 usinas termelétricas em operação que exploram a energia de biogás de aterros sanitários, perfazendo

uma potência instalada de 131.931kW, que corresponde a 0,08% da capacidade de geração do país (MME, 2018).

Esses dados demonstram que a PNRS, em vigor há oito anos, ainda carece de aplicação prática em vários pontos.

No contexto da discussão da sustentabilidade das cidades no cenário brasileiro, a inovação tecnológica ocupa papel importante para a promoção do desenvolvimento sustentável nos processos de governança, conferindo alternativas para a gestão de seus conflitos.

A tecnologia de gaseificação, em atendimento às medidas previstas na PNRS, pode proporcionar o aproveitamento energético de RSU como parte das soluções tecnológicas inovadoras.

Por meio dessa tecnologia é possível dar aos resíduos urbanos, antes passivos ambientais, uma destinação econômica ambiental e socialmente responsável. Isso demonstra alinhamento às necessidades atuais de intervenção das cidades nas questões relacionadas ao meio ambiente e cidadania, no que diz respeito ao gerenciamento de RSU, conferindo rota tecnológica para destinação final e aproveitamento energético destes resíduos, contribuindo assim para a geração distribuída e diversificação da matriz energética.

Benefícios como a diminuição de emissão de gases do efeito estufa (GEE), a eliminação de pontos de poluição de solo e águas, com riscos de proliferação de doenças, podem ser constatados em decorrência da intervenção tecnológica em questão (MATSAKAS et al., 2017).

Nesta pesquisa é explorada a hipótese de inovação tecnológica com perspectiva de aplicação comercial, permitindo que os RSU passem de passivo ambiental a fonte alternativa para geração de energia. Em um contexto histórico, no qual a preocupação ambiental com impactos negativos das emissões de GEE oriundos da dependência da queima de combustíveis fósseis, por exemplo, exige o olhar sobre a necessidade de recursos alternativos renováveis para geração de energia (LA VILLETTA et al., 2017).

A tecnologia de gaseificação é apresentada como proposta de desenvolvimento deste trabalho e alternativa para o aproveitamento energético de RSU, possibilitando o tratamento e valorização econômica destes resíduos através da geração de energia distribuída. O objetivo geral é estudar a viabilidade técnica e econômica de aplicação desta tecnologia, analisando o caso de implantação de uma usina real.

Os objetivos específicos, do ponto de vista técnico, pretendem:

- i. Analisar as características e propriedades do RSU local e atestar seu potencial para exploração energética;
- ii. Avaliar a eficiência do processo de gaseificação através de testes realizados em uma planta piloto com amostras provenientes de RSU;
- iii. Estimar a geração de energia com base nas características e disponibilidade do resíduo.

Do ponto de vista econômico:

- iv. Estimar o fluxo de caixa para implantação da usina de gaseificação e geração de energia a partir de RSU;
- v. Avaliar o desempenho econômico através de indicadores econômicos de viabilidade;
- vi. Realizar análise de sensibilidade dos principais parâmetros que influenciam o fluxo de caixa do projeto e analisar a influência dos mesmos na viabilidade da tecnologia.

Este trabalho acompanha o desenvolvimento de uma planta industrial real, em estágio de implantação na cidade de Boa Esperança/MG. É resultado da execução do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado “Aproveitamento Energético e Geração de Energia Elétrica de Resíduos Sólidos Urbanos a partir de Reator Termoquímico”, de Código ANEEL PD-0394-1602/2016, executado pela concessionária de energia Furnas Centrais Elétricas S.A. (Furnas) no âmbito dos projetos de P&D regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)<sup>1</sup>. O referido projeto propõe usar tecnologia de gaseificação baseada em reator termoquímico de leito fluidizado circulante para geração de gás, a partir dos RSU gerados no município, a ser posteriormente utilizado em caldeira para queima e geração de vapor de água, que acionará uma turbina gerando energia elétrica em ciclo Rankine.

De forma a proporcionar a compreensão do tema abordado nesta pesquisa, esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, além deste capítulo de introdução, como se descreve na sequência:

- i. Capítulo 2: Referencial Teórico – introduz a definição de RSU no contexto do trabalho, apresentando alternativas tecnológicas de tratamento e os

---

<sup>1</sup> Mais detalhes da planta de gaseificação e geração de energia elétrica a partir de RSU estão descritos no Apêndice A deste trabalho.

conhecimentos necessários para as análises de viabilidade técnica e econômica dessas alternativas;

- ii. Capítulo 3: Metodologia – apresenta os métodos utilizados para as análises de viabilidade técnica e econômica, segundo propõem os objetivos deste trabalho;
- iii. Capítulo 4: Resultados e Análises – apresentação e discussão dos resultados obtidos, uma vez aplicada a metodologia proposta;
- iv. Capítulo 5: Conclusões – apresenta os argumentos adquiridos através da análise dos resultados, sugestões de trabalhos futuros e as contribuições desta pesquisa já publicadas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo discorre-se acerca dos resíduos sólidos urbanos como consequência inerente ao metabolismo dos centros urbanos. Ocorre que, sem o devido tratamento, estes resíduos representam perigos ao meio ambiente e à saúde humana. Como alternativas de solução são apresentadas as tecnologias para aproveitamento energético dos mesmos enquanto rota de valorização econômica e ambiental, como fonte alternativa e distribuída de energia. Também são apresentadas as opções técnicas e econômicas que serão utilizadas para a análise de viabilidade da aplicação da tecnologia no projeto piloto de instalação de uma usina, com finalidade de aproveitamento energético dos resíduos no município de Boa Esperança, no estado de Minas Gerais.

### 2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Oriundos das atividades humanas, principalmente após intenso processo de urbanização e elevado padrão de consumo, os resíduos são compostos por uma grande variedade de substâncias que se apresentam no estado sólido ou semissólido (AZEVEDO et al., 2015).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define (BRASIL, 2010):

[...] resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Para efeitos da PNRS, os resíduos sólidos se classificam da seguinte forma:

- i. Quanto à origem: resíduos domiciliares ou aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas; resíduos de limpeza urbana originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana; resíduos sólidos urbanos (RSU), que englobam os dois anteriores; resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, que são aqueles gerados nessas atividades, exceto os RSU; resíduos de serviços de saúde, ou seja, gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente

(Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS); resíduos da construção civil gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, inclusos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis; resíduos de serviços de transportes originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários, ferroviários e passagens de fronteira; resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços que são gerados nessas atividades, exceto todos aqueles mencionados anteriormente; resíduos agrossilvopastoris de atividades agropecuárias e silviculturais, inclusos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades; resíduos de mineração oriundos de atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios; e resíduos industriais, provenientes de processos produtivos e instalações industriais.

- ii. Quanto à periculosidade: resíduos perigosos são aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica. Resíduos não perigosos são todos aqueles que não se enquadram nessa definição .

O RSU é uma matéria heterogênea composta por uma complexa mistura de diferentes estruturas químicas e propriedades físicas. Seus principais constituintes são papel e papelão, resíduos de alimentos, plásticos, metais, borracha, couro e têxteis, vidro, entre outros (NÁSNER, 2015).

Dados mais recentes do Brasil, de 2016, mostram que 78,3 milhões de toneladas de RSU foram geradas nesse ano. Deste total, 71,3 milhões foram coletadas, o que revela que aproximadamente 9% de todo RSU gerado não possui coleta e disposição final adequadas, permanecendo no local onde foram gerados; ou seja, tiveram destinação imprópria. De todo RSU coletado, 58,4% são destinados a aterros sanitários, enquanto os outros 41,6% são dispostos inadequadamente no meio ambiente, em lixões ou aterros controlados que não possuem sistemas de medidas adequadas à proteção do meio ambiente contra danos e degradação (ABRELPE, 2017).

Do total de municípios brasileiros, 3.331 ainda enviam milhões de toneladas de resíduos para lixões ou aterros controlados. Esses dados demonstram uma piora, se comparados ao ano anterior.

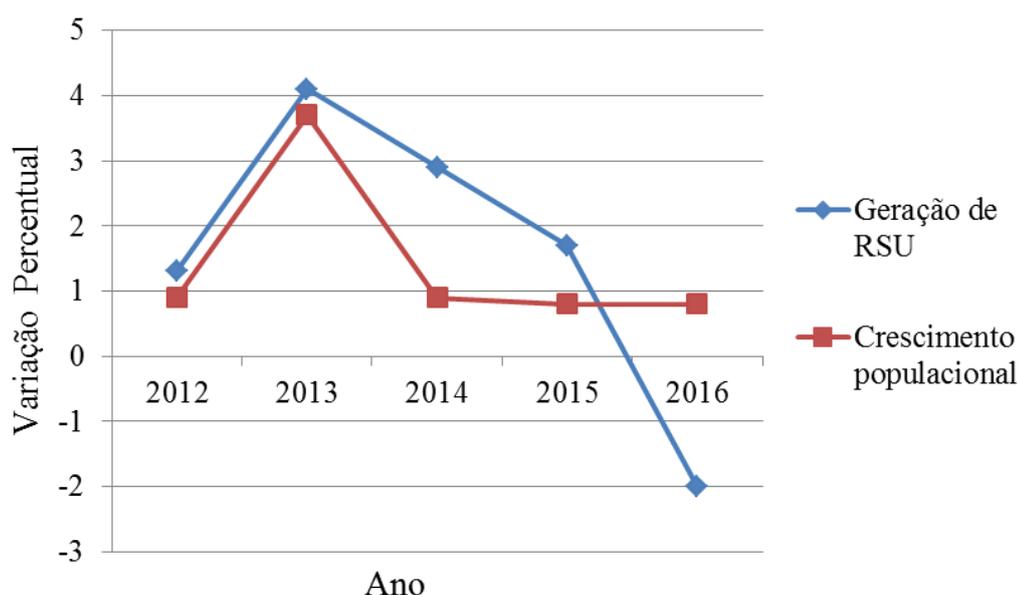
Segundo a PNRS (BRASIL, 2010), a disposição final deveria ser adotada após se esgotarem todas as possibilidades de diminuição da geração, recuperação ou reciclagem do RSU.

Os lixões constituem a pior opção para destinação de RSU e uma forma inadequada de disposição, pois não possuem qualquer tipo de tratamento que evite danos ambientais (GONÇALVES et al., 2013).

OBLADEN et al. (2009) esclarecem que o termo “aterros controlados” é utilizado para designar aterros não sanitários, pois apresentam alguma falta ou falha na impermeabilização do fundo, não recolhimento e tratamento de percolado, não coleta de gases produzidos, não recobrimento com camada final de terra, entre outros aspectos.

Aterros sanitários configuram técnica de disposição final dos resíduos sólidos urbanos no solo, prevendo princípios de engenharia para confinar esses resíduos e reduzi-los ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou o menor intervalo de tempo possível. É considerada uma forma ambientalmente correta de disposição final, minimizando os impactos ambientais sem causar danos à saúde pública e a sua segurança, e podem possuir coleta e tratamento de chorume, assim como sistema de drenagem e queima de biogás (ABNT, 1992).

No gráfico da Figura 2.1, com dados consolidados a partir de trabalhos da ABRELPE, mostra-se a evolução percentual na geração de RSU e crescimento populacional nos últimos cinco anos no Brasil.



**Figura 2.1** – Evolução percentual na geração de RSU e crescimento populacional brasileiro dos últimos cinco anos (ABRELPE, 2014, 2015a, 2016, 2017 e 2018, consolidado pelo autor).

No gráfico pode ser observado que, exceto pelo último ano, o crescimento percentual na geração de RSU é sempre maior que o crescimento da população, dado que mostra um aumento consistente no padrão de consumo da população e, logo, na geração de resíduo. Fica claro o efeito necessário da educação e cidadania no controle e tratamento de resíduos gerados nos aglomerados urbanos. Obviamente, não se pretende, com estes dados, abordar todas as investigações e conclusões que podem ser feitas sobre o padrão de consumo e descarte de resíduos nesse período, mas eles revelam o importante indício de que o padrão de crescimento no consumo tem se mostrado maior que o padrão de crescimento da população, ou até mesmo da economia.

Posto que a geração *per capita* e a composição de RSU estão diretamente ligados ao desenvolvimento econômico de um país (CAMPOS, 2012), podemos inferir que a alternância de tendência das curvas no ano de 2016 – quando o aumento percentual na geração de RSU é superado pelo crescimento populacional, ao contrário dos anos anteriores – pode estar relacionada à recessão econômica observada em 2015 e 2016, momento em que a economia apresentou recuos anuais de 3,5% (BRASIL, 2018).

A destinação inadequada de RSU é responsável por poluição e degradação ambiental, emissão de GEE, disseminação de doenças e vulnerabilidade social, entre outros problemas. Mesmo os aterros sanitários, que configuram uma alternativa ambientalmente correta de disposição final, com o passar do tempo acabam se tornando alternativas caras de manutenção, além de serem responsáveis pela desvalorização de áreas e competirem por terreno com alternativas econômicas (NOGUEIRA, 2011).

Na tentativa de ilustrar parte da problemática que se cria em torno da geração e manejo de RSU, são apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), os mapas mentais do saneamento básico e dos resíduos sólidos urbanos, respectivamente (UFRRJ, [201-?]).

O mapa mental, ou mapa sistêmico, é uma ferramenta utilizada para análise ambiental, que permite comunicar, interpretar e imaginar conhecimentos ambientais como caricaturas científicas dos fenômenos que eles representam, através de uma simulação da realidade, na qual se pode visualizar pontos de partida para pesquisas (OLIVEIRA, 2006). Por meio dessa ferramenta é possível conhecer um problema e proceder a um diagnóstico, a fim de apontar soluções.

Os mapas mentais das Figuras 2.2 e 2.3, quaisquer que sejam os problemas relacionados à falta de saneamento básico, dão uma ideia da questão apresentada, com destaque à disposição final adequada de RSU, e permitem apontar soluções que abordam o

principal argumento para desenvolvimento deste trabalho. Nesse contexto, eles ajudam a ilustrar parte do problema relacionado à disposição final inadequada dos RSU, alternativas de correção e, portanto, corroboram à relevância do tema.

A ideia, ao apresentar esses mapas, é ressaltar o fato de que as questões relacionadas ao manejo de RSU não estão em um sistema fechado, mas fazem parte de um fluxo no qual são afetadas pelo ambiente (padrão de consumo) e afetam também o ambiente ao redor (descarte após uso), ou seja, o contexto no qual estão inseridos. Por isso, seu conhecimento e adequado gerenciamento é de grande importância. Nesse ponto, é importante retomar a ideia de cidades sustentáveis, aquelas que causam menores impactos no seu entorno, para compreender a problemática por trás do manejo de resíduos sólidos.

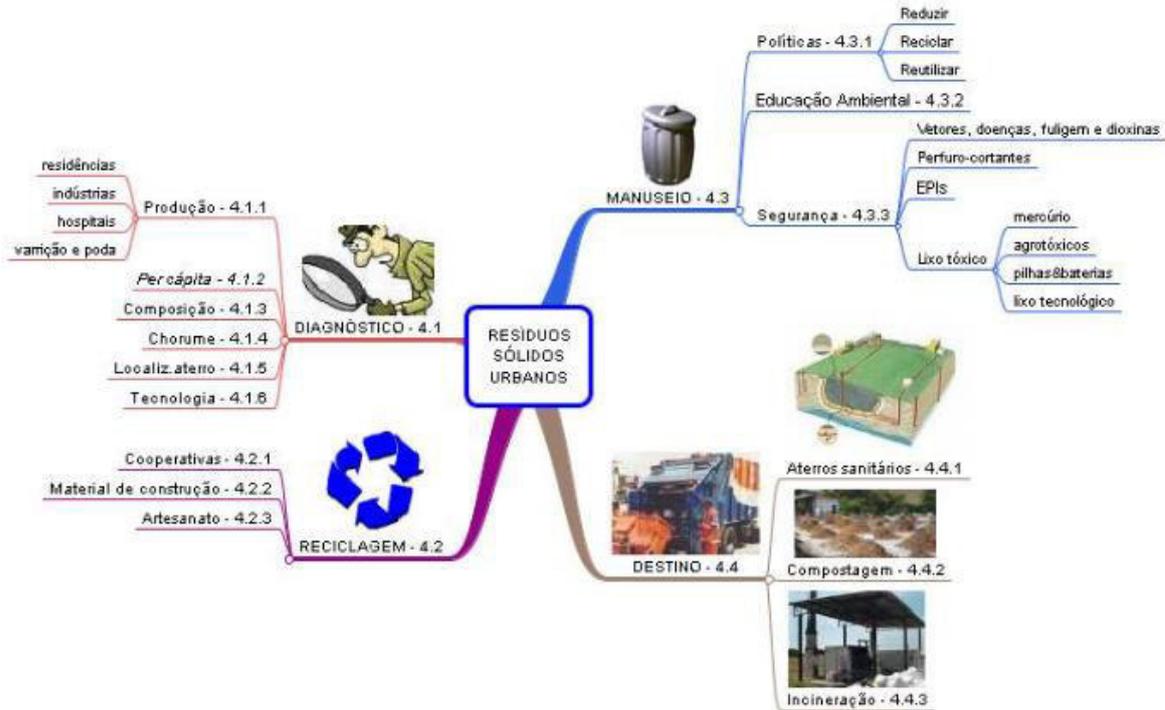
Na Figura 2.2, colocado o saneamento básico como questão central, podemos perceber que qualquer falha ou falta em uma de suas rotinas acarreta consequências que podem reverberar sobre qualquer dos pontos concernentes ao saneamento, além de outras disciplinas das cidades, como meio ambiente e saúde pública.



**Figura 2.2** – Saneamento básico (UFRRJ, 2017, adaptado pelo autor).

A Figura 2.3 permite tornar essa análise mais específica quando destaca das rotinas do saneamento básico as questões relacionadas à administração dos resíduos sólidos urbanos. Uma vez diagnosticadas suas origens e composição, conhecendo as medidas de gerenciamento, é possível prever ações e recursos a serem aplicados de maneira que o RSU não tenha impacto sobre questões políticas de segurança e meio ambiente, por exemplo. É interessante lembrar que os mapas em análise apresentam as questões relacionadas ao gerenciamento apenas. Um exercício semelhante poderia ser feito, de outra forma, para a

disposição inadequada de RSU, apresentando os impactos negativos dessa prática.



**Figura 2.3** – Problemas do RSU (UFRRJ, 2017).

Como pode ser observado na Figura 2.3, devido às suas características, o reuso, a reciclagem, a compostagem e a recuperação energética seriam opções frente à destinação final de RSU (ZAMBRA, 2016). Tais possibilidades, além de dirimir problemas resultantes da disposição final inadequada, aliviariam pressões nas produções industriais e de alimentos, além de possibilitarem reduções na poluição e dependência da extração de recursos fósseis não renováveis (KINTO et al., 2002).

A quantidade e composição dos RSU variam de acordo com a sociedade que o produz (NÁSNER, 2015), sendo o fator renda um dos principais determinantes dessas características. De uma maneira geral, seu aspecto pode ser descrito em termos de geração per capita, composição gravimétrica, massa específica, teor de umidade e suas propriedades químicas, tais como potencial hidrogeniônico (pH) e composição elementar.

A composição gravimétrica média do RSU brasileiro, que mostra a fração dos diferentes materiais na composição do resíduo, bem como a quantidade gerada por tipo de material, é apresentada na Tabela 2.1 (ABRELPE, 2012). Os dados indicam o potencial de exploração econômica através da possibilidade de reaproveitamento desses resíduos, em opções que vão desde processos de reciclagem ou reuso até o uso energético do material, este último, objeto de estudo deste trabalho.

A composição gravimétrica como observada na Tabela 2.1 dá uma ideia das possibilidades de destinação e usos para os RSU, na medida em que evidencia os diferentes materiais presentes em sua composição.

**Tabela 2.1** – Composição Gravimétrica Média do RSU Brasileiro

Material	%	t/ano
Metais	2,9	1.610.499,0
Papel, papelão e Tetrapak	13,1	7.275.012,0
Plástico	13,5	7.497.149,0
Vidro	2,4	1.332.827,0
Matéria orgânica	51,4	28.554.702,0
Outros	16,7	9.274.251,0
Total	100,0	55.534.440,0

Fonte: (ABRELPE, 2012).

Como item de análise importante na realização dessa pesquisa, pode-se destacar uma variedade de materiais carbonosos, como plásticos (13,5%), matéria orgânica (51,4%) e papéis (13,1%), cuja composição guarda energia que pode ser transformada e recuperada através da aplicação de tecnologia adequada.

## 2.2 Principais Tecnologias Aplicadas ao Aproveitamento Energético de RSU

Dadas as suas características, o aproveitamento energético configura uma das soluções ambientalmente adequadas para a destinação final de RSU, possibilitando a redução dos resíduos dispostos e o prolongamento da vida útil de aterros existentes, além de uma diminuição da poluição em solos e águas (ABRELPE, 2015b).

De acordo com a ABRELPE (2012), a recuperação energética é uma das soluções para a destinação final de RSU recomendada pelo IPCC/ONU<sup>2</sup>, pois reduz emissões de GEE dos aterros sanitários, possibilita o aproveitamento de resíduos inutilizados ou subutilizados, ao passo que também configura uma alternativa às fontes fósseis de energia, que podem ser instaladas próximas aos locais de geração de resíduos e consumo de energia. O termo denota

<sup>2</sup> O IPCC é o órgão internacional responsável por sintetizar e divulgar conhecimento científico sobre mudanças climáticas, seus impactos, riscos futuros e opção de mitigação para formulação de políticas de enfrentamento.

aplicação de métodos e processos industriais que permitam recuperar a energia contida no RSU, total ou parcialmente.

A partir das tecnologias de aproveitamento, conforme ABRELPE (2015b), é possível a obtenção do biogás, de eletricidade e do calor, com uma variada possibilidade de aplicação comercial. Outro potencial mercado seria a comercialização de créditos de carbono, provenientes da diminuição de emissões de GEE (CENBIO, 2002).

As principais tecnologias de aproveitamento energético de RSU são o gás de aterro sanitário, a digestão anaeróbica, a incineração, a gaseificação e a pirólise (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). Os dois primeiros tratam-se de processos de conversão biológica, enquanto os demais constituem tecnologias de tratamento térmico de resíduos (TORRES; BAJAY, 2015).

### 2.2.1 Processos Bioquímicos de Aproveitamento Energético

Em processos bioquímicos de conversão ocorre a transformação de resíduos da fração orgânica da biomassa em líquidos ou gases combustíveis mediante a decomposição por microrganismos (PAVAN, 2010; MATSAKAS et al., 2017). Esses processos, também conhecidos como tratamento biológico, fazem uso da ação de microrganismos para intensificar a biodegradabilidade da matéria orgânica, seguida de aproveitamento energético do biogás procedente da biometanização de resíduos em reatores anaeróbicos ou em aterros sanitários (TORRES; BAJAY, 2015).

#### 2.2.1.1 Gás de aterro

O gás de aterro é obtido a partir da fermentação de resíduos orgânicos de aterros subterrâneos. A tecnologia para sua obtenção caracteriza-se pela facilidade de implementação a custos relativamente baixos. O gás produzido pode ser utilizado para geração de energia elétrica ou aquecimento direto e possibilita a valorização de áreas inutilizadas pela disposição de resíduos (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016) e redução de emissões de GEE (MOYA et al., 2017).

Entre as desvantagens podem ser destacadas: a possibilidade de poluição de águas subterrâneas, solo e ar; necessita grandes extensões de áreas, que normalmente devem ser distantes devido à baixa aceitação popular, incorrendo em custos com o transporte de RSU;

ocorrências de explosões espontâneas devido ao acúmulo de gás metano; os custos de tratamento do gás produzido podem ser significativos (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

Segundo MOYA et al. (2017), 75 bilhões  $\text{Nm}^3$  de gás<sup>3</sup> são produzidos em aterros sanitários ao redor do mundo, e menos de 3% deste potencial é explorado na geração de energia elétrica e calor.

#### 2.2.1.2 Biogás

O biogás produzido a partir da fermentação anaeróbica é obtido em sistemas completamente fechados, o que possibilita que ele seja todo coletado, reduzindo, com isso, impactos ambientais e emissão de GEE. A digestão anaeróbia é um processo no qual algumas espécies de bactérias – em ausência de oxigênio e através de uma cadeia de degradações sucessivas – transformam a matéria orgânica complexa em diversas substâncias químicas, enquanto obtém energia e substâncias necessárias para seu crescimento. Esse processo tem como produto uma mistura gasosa rica em metano e dióxido de carbono (MOURA, 2012).

A tecnologia permite que, além do RSU, resíduos industriais e agrícolas sejam processados em conjunto. Livre de odores ruins, poluição visual e rejeição popular, a tecnologia necessita de pequenas áreas para ser implantada e pode ser aplicada em pequena escala. Como desvantagens, pode-se destacar o fato de não ser aplicável em resíduos com baixo teor de matéria orgânica e necessitar segregação prévia de material para melhorar a eficiência do processo de digestão (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

#### 2.2.2 Processos Termoquímicos de Aproveitamento Energético

Segundo RAZA et al. (2012), a conversão termoquímica é uma tecnologia essencial, que pode ser largamente utilizada para gerar energia com potencial de baixo impacto na poluição ambiental. Os processos de conversão térmica transformam a composição química da biomassa em combustíveis sólidos ou líquidos. Os meios térmicos podem ser espontâneos, em alguns casos, ou necessitar de considerável energia externa para causar as mudanças, em outros. Tipicamente, apresentam alto rendimento e podem ser aplicados em qualquer forma de biomassa (REEDS; DAS, 1981).

---

<sup>3</sup> Normal metro cúbico ( $\text{Nm}^3$ ): unidade de volume do gás a  $0^\circ\text{C}$  e 1 atm (WENZEL, 2013; NÁSNER, 2015).

Tais processos são caracterizados por elevada temperatura e taxas de conversão mais rápidas quando comparados com os processos bioquímicos de conversão (MATSAKAS et al., 2017).

As tecnologias termoquímicas de recuperação energética dividem-se basicamente em dois grupos (ABRELPE, 2012):

- i. daquelas que ocorrem em excesso de oxigênio – incineração;
- ii. daquelas que ocorrem com déficit de oxigênio – gaseificação/pirólise.

REEDS e DAS (1981) descrevem os processos, que envolvem algum ou todos os métodos mencionados anteriormente, da seguinte forma:

- i. Pirólise: biomassa e calor, resultando em carvão, óleo e gás;
- ii. Gaseificação: biomassa e suprimento limitado de oxigênio, gerando gás combustível;
- iii. Incineração: biomassa e quantidade estequiométrica<sup>4</sup> de oxigênio, gerando produtos da combustão térmica.

#### 2.2.2.1 Pirólise

A pirólise é um processo termoquímico de degradação, que ocorre na ausência total de um agente oxidante quando se aplica calor a uma substância ou material, portanto, um processo endotérmico (LORA et al., 2012 ; MOYA et al., 2017) que dá origem a uma grande variedade de produtos, através de uma série de reações complexas (SANCHEZ et al., 2011).

Como produto da pirólise, obtém-se três frações: sólida, gasosa e líquida. A fração sólida consiste em cinzas e carbono, podendo ser utilizada como combustível ou na fabricação de carvão ativado. A fase gasosa também é um combustível, contendo principalmente H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). A fase líquida, também chamada de bio-óleo, é uma mistura de diferentes componentes com capacidade calorífica equivalente à metade daquela de combustíveis convencionais (SANCHEZ et al., 2011). A proporção relativa dos diferentes produtos da pirólise está relacionada às características físico-químicas do material processado e às condições nas quais ocorre o processo de transformação (SANCHEZ et al., 2011; LORA et al., 2012).

---

<sup>4</sup> A quantidade estequiométrica de agente oxidante é o mínimo teórico para queimar todo o combustível (LORA et al., 2012).

As principais preocupações estão relacionadas à qualidade do combustível produzido que, devido à corrosividade e à viscosidade, demandam custos para refino, estocagem, transporte e queima, não sendo viável a baixos custos devido à maturidade em que se encontra a tecnologia (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016; LA VILLETTE et al., 2017).

#### 2.2.2.2 Incineração

A incineração é um processo de combustão que utiliza excesso de oxigênio ou outro gás para a queima. Através dela, a energia armazenada em ligações químicas é transformada em calor quando um combustível entra em contato com um agente oxidante (NÁSNER, 2015).

Trata-se de uma tecnologia de combustão convencional, na qual o resíduo necessita pouco ou nenhum tratamento prévio e que pode reduzir o volume de RSU a patamares de 75% do peso e 90% do volume. Processa-se de maneira estável e adequadamente controlável, podendo ser aplicada a todo tipo de resíduos (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

Por meio da incineração, o RSU é transformado em três diferentes produtos: cinzas, gases da combustão e calor. A cinza convertida apresenta cerca de 10% do volume inicial (NOGUEIRA, 2011; NÁSNER, 2015).

As cinzas são constituídas de compostos inorgânicos presentes nos resíduos e sua correta destinação é um dos maiores desafios da tecnologia, sendo normalmente enviada para aterros sanitários. JONES (2010) destaca a possibilidade de recuperação de elementos metálicos presentes em sua composição. Áspera e abundante, ela adere à superfície dos equipamentos, causando problemas de corrosão.

O gás produzido deve ser tratado antes de ser liberado na atmosfera ou utilizado na recuperação de energia, pois apresenta concentração de alguns gases poluentes e material particulado. Esse aspecto é um dos que mais atrai críticas, além de enfrentar oposição de grupos ambientalistas e, por se tratar de um combustível heterogêneo ao longo do tempo, demanda monitoramento contínuo do processo de combustão.

A função mais importante do processo de incineração é a destruição de microrganismos, por isso é comum sua aplicação mesmo sem mecanismos de recuperação de energia. Para NOGUEIRA (2011), a incineração tem também como função primordial o saneamento básico e a geração de energia como subproduto.

NÁSNER (2015) destaca que é um processo que oferece um destino para o RSU com a possibilidade de recuperação energética. Contudo, cabe ainda estudar formas de melhorar sua sustentabilidade, impacto ambiental e consequente confiabilidade. Apresenta concentração de metais tóxicos na emissão de cinzas e particulados, além de outros compostos perigosos, tal como os compostos clorados; por isso, denota altos custos de operação e manutenção, baixa eficiência em pequenas escalas e, de certa forma, pode desencorajar a reciclagem (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

### 2.2.2.3 Gaseificação

Por meio deste processo termoquímico é possível obter gás combustível através da oxidação parcial de sólidos ou líquidos carbonosos (SANCHEZ et al., 2011; LORA et al., 2012; WENZEL, 2013). A transformação do material se dá pelo fornecimento de calor na presença de um agente oxidante, em quantidade inferior à quantidade estequiométrica, ou seja, de forma que nem todo carbono do combustível seja oxidado (RODRIGUES, 2008).

A gaseificação pode ser desenvolvida em pequenas e médias escalas, gerando um gás de fácil manipulação, medição, controle e queima, que pode ser utilizado para obtenção de combustíveis e produtos químicos de alta qualidade. O controle de poluição da tecnologia é mais fácil, mas o condicionamento e limpeza do gás podem ser mais custosos e o material a ser processado precisa de pré-tratamento (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

Ocorre de maneira relativamente mais rápida que a pirólise, permitindo que uma quantidade maior de resíduo seja tratada em um tempo menor, transformando toda a matéria-prima sólida em um gás combustível com poder calorífico aproveitável, ao passo que gera menos gases poluentes que o processo de incineração (LORA et al., 2012).

Por se tratar de processo mais importante, do ponto de vista de aplicação desse trabalho, este tema será melhor desenvolvido em item subsequente.

## 2.3 Processo Termoquímico de Gaseificação

A produção de energia através da gaseificação de biomassa possui mais de cem anos de existência, mas foi esquecida ao longo do tempo devido à competição com o baixo preço dos combustíveis fósseis. O Brasil esteve inserido no rol de desenvolvimento internacional dessas tecnologias, estando bastante avançado em gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar, folhas e resíduos de madeira (KINTO et al., 2002).

LORA et al. (2012) explicam a gaseificação como um processo de conversão termoquímica de um material sólido ou líquido – que contém carbono em sua composição – em um combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas, entre 800 e 1.100°C, e pressão atmosférica ou maior, até 33bar. WENZEL (2013) corrobora ao afirmar que é um processo que não permite a oxidação completa do carbono e do hidrogênio presentes no combustível, dando origem a compostos gasosos combustíveis.

A gaseificação se dá por meio de diferentes etapas que se sobrepõem, não havendo um limite claro entre elas: (i) secagem da matéria-prima; (ii) pirólise; (iii) oxidação parcial; e (iv) redução ou gaseificação (NÁSNER, 2015).

Na zona de secagem ocorre a remoção da umidade, quando parte da energia térmica, que não pode ser recuperada, é utilizada para vaporizar a água (MELO, 2008; NÁSNER, 2015). A quantidade de umidade que se transfere do resíduo para o gás tem influência no poder calorífico e na eficiência térmica do gaseificador (RODRIGUES, 2008), sendo, portanto, necessário que o material seja secado antes de entrar no gaseificador, de maneira a atingir um teor de umidade entre 10 e 15%, mais adequados ao processo (NÁSNER, 2015). Ocorre a temperaturas de até 150°C (QUITETE; SOUZA, 2014).

Após a secagem do combustível sólido, ocorre o processo de degradação térmica da pirólise, resultando na formação de alcatrões, voláteis e sólidos (MELO, 2008; RODRIGUES, 2008; LORA et al., 2012; NÁSNER, 2015). Nesta etapa, transfere-se calor para a matéria, produzindo um aumento de temperatura, enquanto se realizam as reações de pirólise a taxas que dependem da temperatura interna do reator (RODRIGUES, 2008). Ocorre em temperaturas de 200°C até 700°C (QUITETE; SOUZA, 2014).

Na zona de oxidação, o carbono do material sólido entra em contato com o oxigênio do fluido de gaseificação, dando origem a produção de CO<sub>2</sub> e vapor (MELO, 2008). Esta etapa, caracterizada pelo processamento de reações exotérmicas (MELO, 2008), permite atingir o nível de temperatura adequado para o desenvolvimento das fases de pirólise, e para a gaseificação dos produtos gerados nela (LORA et al., 2012; NÁSNER, 2015). Todo o oxigênio é consumido na zona de oxidação (RODRIGUES, 2008). Apresenta temperaturas típicas entre 700°C e 2.000°C (QUITETE; SOUZA, 2014).

A zona de redução está relacionada à etapa de desenvolvimento da gaseificação, que resulta na maioria das reações que conduzem à formação do gás combustível (RODRIGUES, 2008). Apresenta temperaturas de trabalho entre 800°C e 1.100°C (QUITETE; SOUZA, 2014).

O gaseificador é o reator no qual a transformação termoquímica da biomassa em gás ocorre (LORA et al., 2012). Uma variedade de gaseificadores é utilizada em processos de gaseificação e devido às suas características podem ser agrupados em diferentes categorias, segundo a pressão de trabalho e o tipo de leito (MELO, 2008), podendo ser classificados, conforme MOURA (2012), por:

- i. Tipo de fluido de gaseificação<sup>5</sup>: ar atmosférico, vapor de água ou oxigênio;
- ii. Pressão de trabalho: baixa pressão (atmosférica) ou pressurizados (Até 3 MPa);
- iii. Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação: leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente), leito em movimento a fluxo direto com o gás (concorrente), leito em movimento perpendicular ao fluxo do gás (fluxo cruzado) e leito fluidizado.

### 2.3.1 Classificação e tipos de gaseificadores

A classificação mais comumente utilizada está relacionada à direção do movimento relativo da biomassa e do fluido de gaseificação (SANCHEZ et al., 2011), dividindo os gaseificadores em: gaseificação em leito fixo, gaseificação em leito fluidizado e gaseificação assistida por plasma.

#### 2.3.1.1 Gaseificação em leito fixo

Essa tecnologia apresenta vantagens para conversão de biomassa em pequena escala e apresenta elevada eficiência energética. No leito fixo, a matéria a ser gaseificada se move por ação da gravidade, ou seja, apresenta um movimento descendente no interior do reator. Os gaseificadores de leito fixo são divididos em contracorrente, concorrente e fluxo cruzado (NÁSNER, 2015).

Nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6, adaptadas de SANCHEZ et al. (2011), são apresentados os diferentes tipos de gaseificadores de leito fixo encontrados; nelas, destaca-se a direção do combustível e do fluido de gaseificação durante a operação do equipamento.

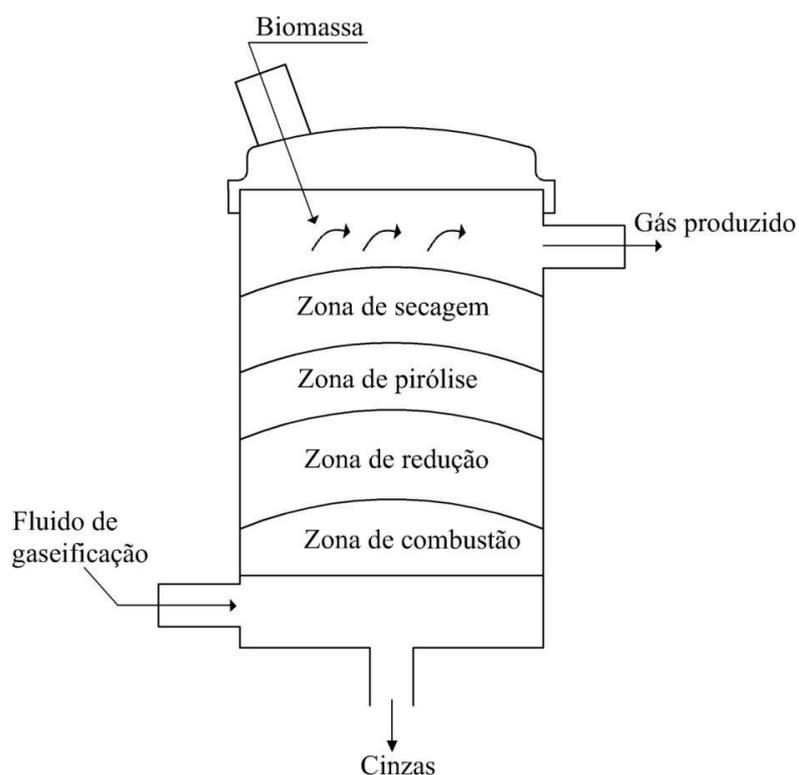
##### 2.3.1.1.1 Gaseificador contracorrente

---

<sup>5</sup> No processo de gaseificação, o fluido de gaseificação reage com o material sólido carbonoso convertendo-o em gases de baixo peso molecular (NÁSNER, 2015).

Os gaseificadores contracorrente são tecnologia antiga e relativamente simples. Apresentam elevada eficiência térmica, no entanto, necessitam de sistemas de limpeza mais eficientes devido à produção de um gás de baixa qualidade, apresentando altos teores de alcatrão e particulados (SANCHEZ et al., 2011). A matéria é alimentada por um silo na parte superior e flui para o fundo onde o fluido de gaseificação é injetado. O gás produzido é extraído na parte superior do gaseificador, com temperaturas entre 250°C e 400°C.

Como pontos favoráveis, destacam-se a configuração simples e a possibilidade de trabalhar com diferentes tipos de biomassa, alta eficiência térmica e de conversão de carbono e baixa geração de cinzas e alcatrão. Em contrapartida, esses gaseificadores são suscetíveis a entupimento, que podem criar bolsões de oxigênio em seu interior, condição que aumenta as chances de explosão (NÁSNER, 2015).



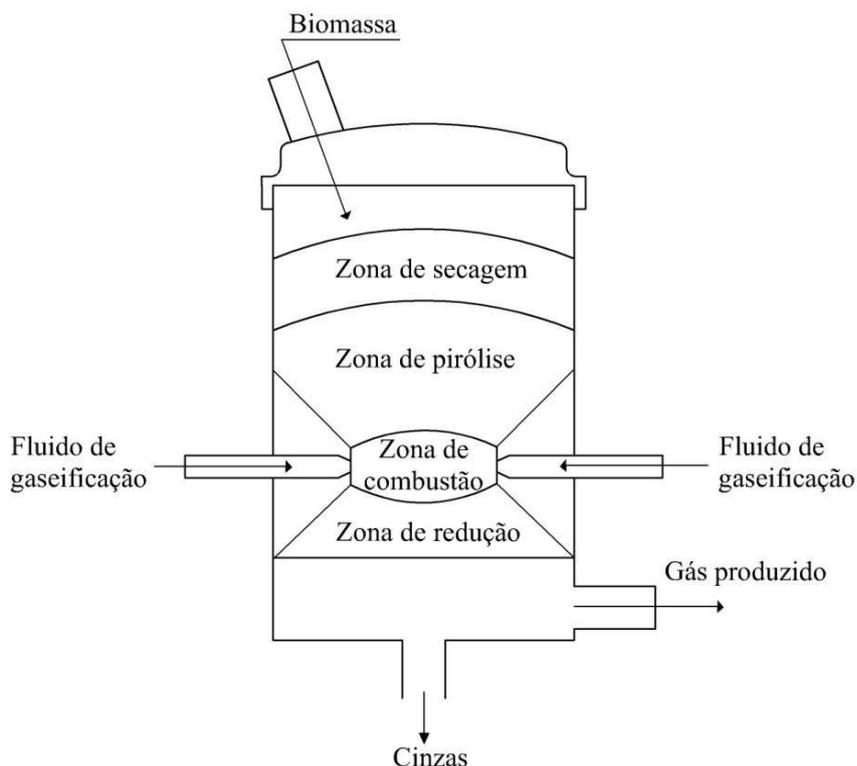
**Figura 2.4** – Gaseificador de leito fixo contracorrente ou fluxo ascendente (SANCHEZ et al., 2011).

#### 2.3.1.1.2 Gaseificador concorrente

No gaseificador concorrente, a alimentação do reator ocorre de maneira semelhante ao contracorrente, porém o fluido de gaseificação é introduzido pela lateral ou pelo topo dos reatores e o gás produzido é extraído pela parte inferior a temperaturas

próximas de 700°C (PASSOLONGO, 2011); ou seja, o fluxo de combustíveis e fluido de gaseificação estão no mesmo sentido (RODRIGUES, 2008).

Apresentam distribuição uniforme de temperatura, baixo custo de operação e alta eficiência no craqueamento de alcatrão<sup>6</sup>. Devido à elevada eficiência no processo de craqueamento, produz um gás de melhor qualidade.



**Figura 2.5** – Gaseificador de leito fixo concorrente ou fluxo descendente (SANCHEZ et al., 2011).

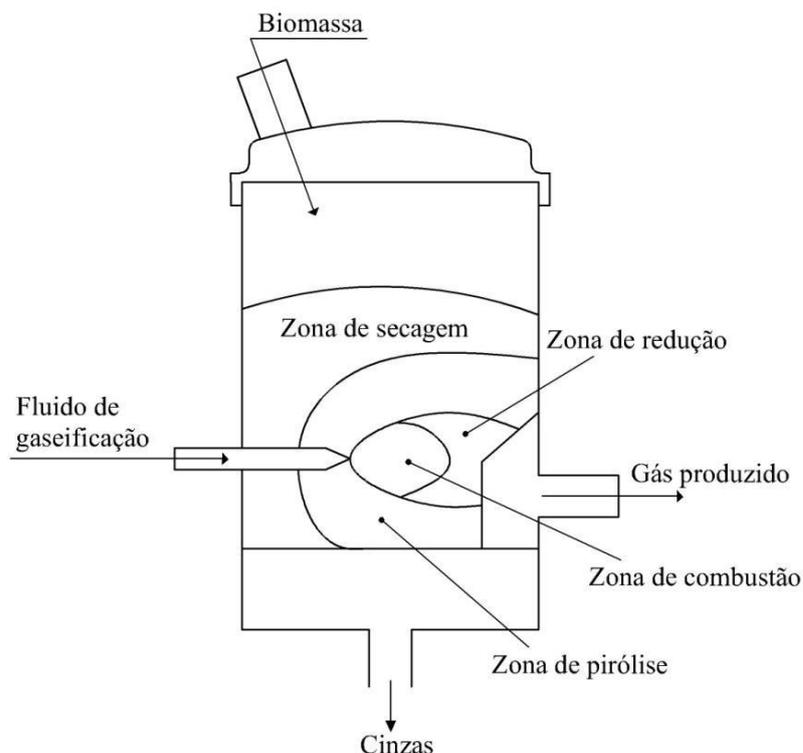
Essa configuração permite que os voláteis passem necessariamente pela zona de redução, formando compostos de menor massa molar, eliminando quase que totalmente alcatrões e condensáveis (RODRIGUES, 2008; NÁSNER, 2015).

#### 2.3.1.1.3 Gaseificador de fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado a alimentação do reator ocorre de maneira semelhante às anteriores, e a injeção do fluido de gaseificação, no lado oposto ao de extração do gás produzido, extraído em temperaturas próximas a 900°C. O gás produzido possui baixo

<sup>6</sup> O alcatrão é definido como um grupo de hidrocarbonetos, constituído por compostos aromáticos, cujo peso molecular é maior que o do benzeno. Craqueamento é o processo pelo qual o alcatrão é decomposto, formando compostos mais simples como monóxido de carbono e hidrogênio (QUITETE; SOUZA, 2014).

poder calorífico e grande quantidade de voláteis (PASSOLONGO, 2011). Este gaseificador está esquematizado na Figura 2.6, que segue:



**Figura 2.6** – Gaseificador de fluxo cruzado (SANCHEZ et al., 2011)

### 2.3.1.2 Gaseificação em leito fluidizado

O gaseificador em leito fluidizado foi desenvolvido antes da Segunda Guerra Mundial para aplicação na gaseificação de carvão, tendo sido posteriormente adaptado para as indústrias química e petroquímica (CENBIO, 2002).

A tecnologia providencia um ambiente no qual o material sólido, quando em contato com o fluido de gaseificação, calor e um leve aumento na pressão, assume o comportamento de um fluido, enquanto as reações de transformação acontecem (MENDOZA, 2009).

Neste tipo de gaseificador, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes, que podem ser de areia, cinzas ou alumina, criando melhores condições de transferência de calor e homogeneidade de temperatura na câmara de reação (CENBIO, 2002 ; SANCHEZ et al., 2011). Segundo MENDOZA (2009), a base do suporte de um leito fluidizado é normalmente formada por areia, responsável pela composição de um reservatório térmico, que atenua grandes variações de umidade por longos períodos.

QUITETE e SOUZA (2014) acrescentam que, além de material inerte, o leito pode ser composto de material catalítico, como minerais de dolomita e olivina, ou uma mistura dos dois.

KINTO et al. (2002) explicam que o material de composição do leito arrasta o sólido, aumentando o contato deste com o elemento oxidante e, conseqüentemente, aumentando a taxa de reação.

A gaseificação em leito fluidizado é mais adequada a uma quantidade maior de biomassa, por ser mais flexível quanto às características dos insumos (CENBIO, 2002), permitindo o processamento de material com umidade de até 40%, granulometria uniforme entre 10 e 100mm e teor de cinzas de até 20% (QUITETE ; SOUZA, 2014). SANCHEZ et al (2011) concordam ao afirmar que a gaseificação em leito fluidizado aceita uma variabilidade maior de umidade, granulometria, baixa massa específica e outras propriedades, quando comparado a outros métodos de gaseificação.

O calor pode ser oferecido ao sistema de forma direta ou indireta. No fornecimento direto, o calor requerido para a gaseificação vem da queima do combustível dentro do reator. No modo indireto, o combustível é queimado em um recipiente separado. A vantagem dessa última opção é que os subprodutos da queima do combustível não se misturam com os produtos da gaseificação (PASSOLONGO, 2011; LA VILLETТА et. al., 2017).

SANCHEZ et al.(2011) descrevem o leito fluidizado como um leito de partículas onde, quando aumentado o fluxo do gás, sucessivas fases ocorrem, passando por leito fixo, leito fluidizado incipiente, leito fluidizado borbulhante e, finalmente, transporte pneumático de partículas, quando o sistema fluido/partícula se comporta como um fluido. Nesse ponto, a velocidade superficial do fluido é denominada velocidade mínima de fluidização.

A velocidade mínima de fluidização acontece quando a força peso das partículas se iguala à força de arraste do gás, e se caracteriza pelo momento no qual as partículas começam a se deslocar uma das outras e, suspensas no leito, passam a se comportar como um líquido (CENBIO, 2002).

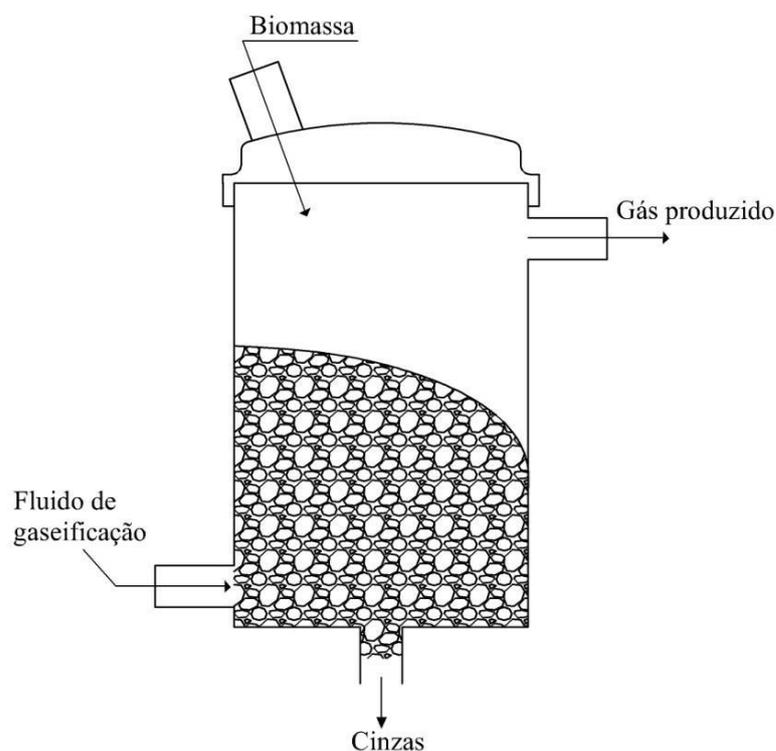
Na Figura 2.7, adaptada de KINTO et al. (2002), é esquematizado o gaseificador de leito fluidizado, com destaques para alimentação do combustível e do fluido de gaseificação e saída do gás produzido.

Como se pode constatar na Figura 2.7, os gaseificadores de leito fluidizado não possuem zonas distintas de reação. O leito é isotérmico, operando com temperaturas entre 700

e 900°C, abaixo das temperaturas máximas de gaseificadores de leito fixo (RODRIGUES, 2008; LORA et. al., 2012).

Estes gaseificadores podem ser do tipo borbulhante ou circulante, distinguindo-se basicamente pela velocidade com a qual o material atravessa o leito, sendo de 1 m/s, no primeiro caso, e de 7 a 10 m/s, em leito fluidizado circulante (CENBIO, 2002).

O gaseificador de leito fluidizado borbulhante possui baixa conversão de carbono e menor eficiência de processo se comparado aos gaseificadores de leito circulante. Estes últimos são mais eficientes devido à recirculação das partículas sólidas no interior do reator, possibilitando maior tempo de residência dessas partículas no reator e, portanto, maior taxa de conversão de carbono (MELO, 2008).



**Figura 2.7** – Gaseificador de leito fluidizado (KINTO et al., 2002)

Em leito fluidizado circulante, uma variedade maior de matéria-prima pode ser aplicada. No entanto, como as temperaturas de operação são mais baixas, cargas mais reativas são preferidas (QUITETE; SOUZA, 2014).

Nesse tipo de leito, a velocidade do gás é alta o suficiente para transportar todos os sólidos, alcançando maior grau de mistura e transferência de calor (LA VILLETTE, et al., 2017). Um ciclone separa do gás o carbono não convertido, que circula novamente pelo leito,

umentando a eficiência do processo de conversão de carbono, que chega a ser superior a 95% (GÓMEZ, 1996).

No âmbito de desenvolvimento do trabalho de P&D executado por Furnas, esta última alternativa é a que será implantada no escopo de construção da usina de gaseificação e geração de energia a partir de RSU a ser instalada em Boa Esperança/MG.

### 2.3.1.3 Gaseificação assistida por plasma

O plasma constitui um meio gasoso ionizado, portanto, se diferencia do meio gasoso neutro pela presença de espécies eletricamente carregadas. Essa característica dá ao meio a capacidade de transportar corrente elétrica e absorver potência elétrica a partir de uma fonte externa, além de torná-lo mais reativo devido à presença de elétrons e à geração de íons no meio reacional (SANCHEZ et al., 2011).

A gaseificação assistida por plasma é aquela em que parte da energia injetada no sistema é fornecida por uma tocha de plasma, objetivando a geração de um gás combustível ou gás de síntese. A alta eficiência que o sistema permite na conversão de energia elétrica em energia térmica possibilita a obtenção de altas temperaturas e densidades de energia, que acarretam alguns benefícios para o processo, tais como: rápido aquecimento do reator; instalações menores para uma quantidade específica de material; fusão de materiais resistentes à alta temperatura; possibilidade de desacoplar a geração de calor do fluxo de oxidante, uma vez que a energia injetada pela tocha independe de reações exotérmicas ocorridas no reator, pois o provimento de energia é externo (rede elétrica); e maior controle do processo (SANCHEZ et al., 2011).

Apesar das vantagens, o procedimento ainda esbarra em problemas, por conta do alto custo da energia elétrica (SANCHEZ et al., 2011).

### 2.3.2 Termoquímica e Termodinâmica da Gaseificação

A gaseificação consiste em uma série de processos exotérmicos e endotérmicos que, dependendo dos parâmetros, resulta principalmente na formação de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) (SANCHEZ et al., 2011).

O estudo teórico da gaseificação pode ser realizado do ponto de vista da abordagem termodinâmica (também conhecida como abordagem estequiométrica) e da

abordagem cinética. O primeiro caso permite obter informação sobre a concentração do gás produzido e suas variáveis, tais como: poder calorífico, potência, eficiência e outras, a partir de dados referentes à composição do combustível e do agente de gaseificação. Pela via cinética, é possível calcular a velocidade das reações envolvidas e a determinação das taxas de formação dos produtos. As duas abordagens são importantes do ponto de vista do desenvolvimento teórico da modelagem destes processos, quando é possível estimar a composição dos gases ou o comportamento do leito no qual ocorrem as reações de gaseificação (LORA et. al., 2012).

As principais reações químicas no sistema de gaseificação estão apresentadas na relação de equações de (2.1) a (2.10), que seguem (SANCHEZ et al., 2011; LORA et. al., 2012):

i. Pirólise



ii. Oxidação do carbono



iii. Reações heterogêneas<sup>7</sup>

a. Reação de Boudouard



b. Reação de gás-d'água



c. Formação de metano



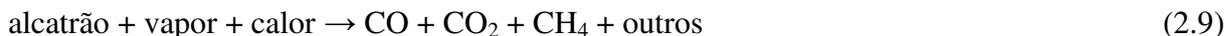
iv. Reações homogêneas<sup>8</sup>



<sup>7</sup> Considera a presença de duas fases no sistema de reações, neste caso, fases sólida e gasosa (LORA, et. al., 2012).

<sup>8</sup> Todas as substâncias envolvidas na reação encontram-se em uma mesma fase, neste caso, fase gasosa (LORA, et. al., 2012).

## v. Craqueamento do alcatrão



## vi. Oxidação de parte dos produtos da pirólise



Os fatores que afetam a composição dos gases são a temperatura, a pressão, a umidade do combustível, o teor de oxigênio no agente gaseificador e o tipo de combustível (SANCHEZ et al., 2011).

As equações (2.2) e (2.3) mostram reações de oxidação fortemente exotérmicas, rápidas e consideradas irreversíveis (SANCHEZ et al., 2011 ; QUITETE; SOUZA, 2014). O agente oxidante é consumido nessas reações e mantém a temperatura do leito que alimenta as etapas endotérmicas (LORA et. al., 2012). As reações (2.4) e (2.6) são endotérmicas e ocorrem em todo o leito, independente da presença de agente oxidante. As reações (2.5) e (2.7) são favorecidas na presença de vapor de água como fluido de gaseificação. A reação (2.9) mostra porque reatores com maiores temperaturas de operação apresentam menores teores de alcatrão (SANCHEZ et al., 2011). As equações (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8) são reações típicas da zona de redução, processo endotérmico para obtenção de gases combustíveis (QUITETE ; SOUZA, 2014).

### 2.3.3 Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos

Por ser uma matéria-prima mais complexa para processos de tratamento térmicos associados à recuperação de energia, o uso de RSU *in natura* pode acarretar problemas operacionais e baixa qualidade do produto final (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). MATSAKAS et al. (2017) identificam os RSU como uma mistura complexa, cujos diferentes compostos que se formam variam largamente em características físicas e químicas, necessitando de sistemas de pré-tratamento. Os objetivos das etapas de pré-tratamento seriam: melhorar a combustibilidade dos resíduos e recuperar, tanto quanto possível, os diferentes materiais recicláveis.

Como alternativa à alta complexidade dos RSU e seus efeitos nos sistemas de gaseificação utiliza-se como matéria-prima o combustível derivado de resíduo (CDR), pelas vantagens de conter maior poder calorífico, ser de fácil manuseio, estocagem e transporte (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016; ZHAO et al., 2016).

O pré-tratamento de resíduos sólidos urbanos foi desenvolvido a partir da década de 1970 para aplicação como combustível suplementar em caldeiras a carvão, posteriormente, tendo sido desenvolvidos sistemas totalmente dedicados a sua aplicação (BIZZO, 2011).

A legislação da comunidade europeia define o CDR como um combustível sólido produzido a partir de resíduos não-perigosos, que pode ser utilizado em plantas de incineração ou co-incineração (MASSARINI; MURARO, 2015). Os CDR tipicamente consistem em papéis, plásticos, produtos têxteis, madeira e matéria orgânica (ZHAO et al., 2016; BRÁS et al, 2017).

Para obtenção do CDR a partir do RSU fresco existem basicamente duas rotas: o tratamento mecânico-biológico, com o qual é possível obter um material com alto poder calorífico devido a maior concentração de papel, plástico e resíduo orgânico estabilizado; e o processo de manufatura, que consiste em etapas de triagem, trituração, redução de granulometria, classificação, separação, secagem, adensamento e estocagem. Esta última será aplicada na usina que é objeto de estudo do presente trabalho. Adicionalmente, ressalta-se que essas tecnologias ainda precisam ser importadas para países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016; MATSAKAS et al., 2017).

## **2.4 Produção de Potência a Partir de Calor**

A energia química dos combustíveis é uma importante fonte energética, que depende da queima de um combustível para liberação de calor, que, em seguida, é convertido parcialmente em trabalho. Dentre os principais meios de produção de trabalho a partir da queima de combustíveis, destacam-se: (i) a combustão interna ou externa e (ii) os processos baseados na queima dos combustíveis em caldeira e na consequente produção de vapor, que será o propulsor de uma turbina para, dessa forma, produzir trabalho (SMITH et al., 2007).

Os métodos de produção de trabalho a partir de plantas a vapor estão baseados em um sistema no qual o fluido de trabalho escoar, em estado estacionário e de modo cíclico, através de uma bomba, de uma caldeira, de uma turbina e de um condensador, sem ter contato direto com a fonte de calor (SMITH et al., 2007).

O vapor é o meio inerte para o qual o calor é transferido, a partir da queima de um combustível ou de um reator nuclear.

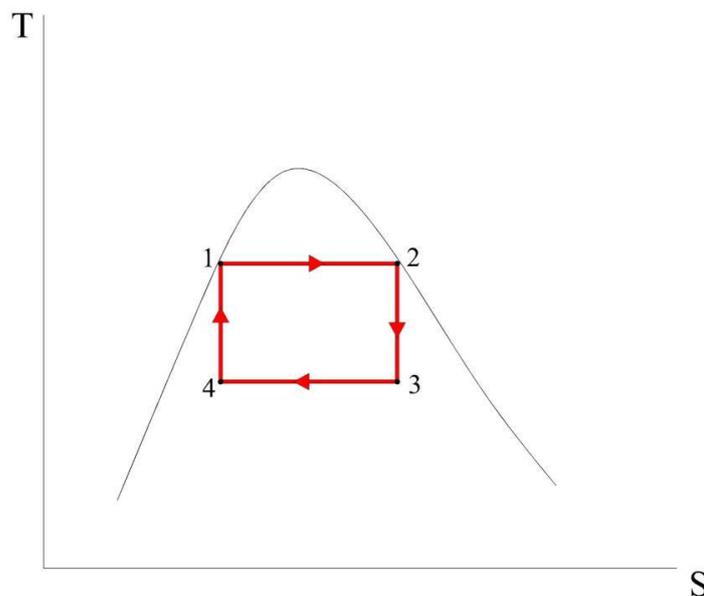
O ciclo Rankine é a via termodinâmica que mais representa o processo de geração de energia a partir do vapor d'água. Contudo, outros fluidos também podem ser utilizados em aplicações especiais – como na geração geotérmica (SMITH et al., 2007) – e tem como

vantagens a facilidade de construção e utilização de gás sem tratamento de limpeza prévio (CARVALHAES, 2013). É uma versão prática proposta para o ciclo teórico de Carnot (ÇENGEL; BOLES, 2006), cujo objetivo é a realização de trabalho, admitindo calor de uma fonte quente e rejeitando calor através de uma fonte fria, de acordo com a 2ª Lei da Termodinâmica.

#### 2.4.1. Ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot é tido como o provável ciclo ideal a operar usinas de potência a vapor, visto que é o mais eficiente entre dois limites de temperatura especificados. No entanto, trata-se apenas de um modelo adequado aos ciclos de potência, já que dificuldades de ordem prática estão associadas a ele.

A Figura 2.8 (ÇENGEL; BOLES, 2006) traz a representação esquemática do ciclo de Carnot.



**Figura 2.8** – Representação esquemática do ciclo de Carnot (ÇENGEL; BOLES, 2006).

No ciclo de Carnot, como mostrado na Figura 2.8, o fluido de trabalho é aquecido de forma reversível e isotérmica em uma caldeira (1→2), expandido de forma isoentrópica em uma turbina (2→3), condensado de forma reversível e isotérmica em um condensador (3→4) e comprimido de forma isoentrópica em um compressor até o estado inicial (4→1).

Como esquematizadas na Figura 2.8, as etapas (1→2) e (3→4) podem ser razoavelmente bem reproduzidas em caldeiras e condensadores reais, uma vez que a

transferência de calor isotérmica entre um sistema bifásico não é difícil de ser realizada na prática. Entretanto, limitar um processo de transferência de calor a um sistema bifásico, limita por sua vez a temperatura máxima a ser utilizada no ciclo e, logo, a eficiência térmica.

Com respeito à etapa (2→3), como mostrada na Figura 2.8, é possível dizer que pode ser satisfatoriamente aproximada por uma turbina bem projetada; no entanto, a turbina precisaria processar vapor com alto índice de umidade para o fluido não se condensar em sua expansão, e a umidade constitui fonte de desgaste e erosão na turbina.

Outras duas dificuldades relacionadas à etapa (4→1) da Figura 2.8 seriam a de controlar o processo de condensação, de modo a ter o conteúdo de umidade desejado, e o fato de não ser prático projetar um compressor que processe duas fases.

Dadas essas dificuldades, entende-se que o ciclo de Carnot não pode ser reproduzido por dispositivos reais, não sendo assim um modelo realista para ciclos de potência a vapor (ÇENGEL; BOLES, 2006).

O ciclo Rankine elimina os problemas práticos do ciclo de Carnot, superaquecendo o vapor d'água na caldeira e condensando-o completamente no condensador, e, desse modo, representa o ciclo ideal às usinas de potência a vapor (ÇENGEL; BOLES, 2006).

#### 2.4.2. Ciclo Rankine

No ciclo Rankine, a produção de potência a partir do calor se dá em quatro etapas, representadas pela Figura 2.9, de ÇENGEL e BOLES (2006): (1→2) bombeamento adiabático e reversível do líquido até a pressão da caldeira; (2→3) processo de aquecimento por pressão constante em uma caldeira; (3→4) expansão adiabática e reversível do vapor em uma turbina até chegar à pressão do condensador; (4→1) produção de líquido em um condensador, operando em temperatura e pressão constantes.

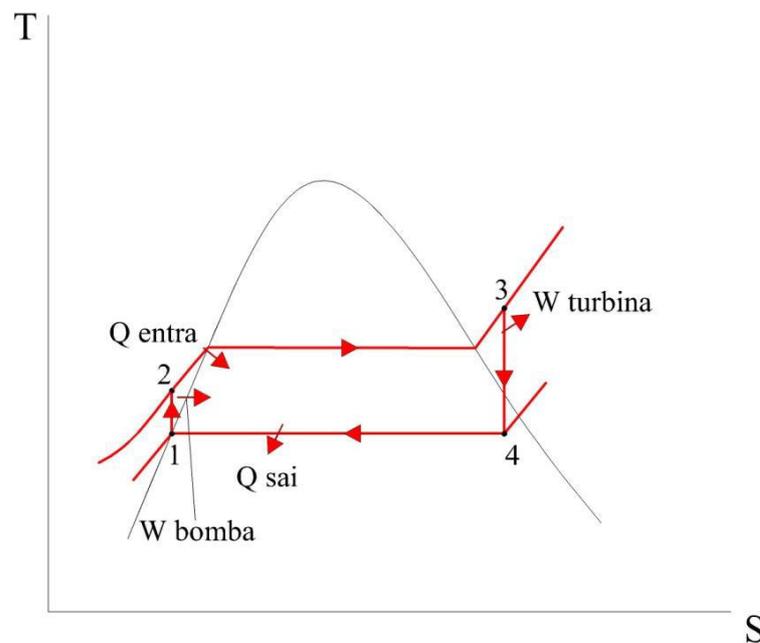
É importante lembrar, no entanto, que o ciclo real de potência a vapor difere do ciclo de Rankine ideal, devido às irreversibilidades em vários componentes, particularmente bomba e turbina, que terminam por ocasionar maior consumo de trabalho do ciclo em alguns pontos (bomba) e produção de menos trabalho em outros (turbina), diminuindo a eficiência do ciclo real (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Uma das fontes de perda, o atrito entre os diversos componentes e o fluido, causa queda de pressão na caldeira, no condensador e nas tubulações, de maneira que a pressão do fluido na entrada da turbina é menor que aquela na saída da caldeira. Para compensar a queda

de pressão, deve-se elevá-la no bombeamento da água, necessitando para isso uma bomba maior, o que consome mais trabalho (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Outra fonte de irreversibilidade é a perda de calor do vapor à medida que este escoia através dos diversos componentes. A eficiência do ciclo diminui uma vez que é preciso transferir mais calor para o vapor da caldeira, de maneira a compensar as perdas de calor para as vizinhanças (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Outras possíveis perdas devem ser consideradas na análise dos ciclos reais de potência a vapor, quando se trata da avaliação global de desempenho de uma usina. Elas podem se dar pelo atrito entre as partes móveis dos equipamentos, por vazamento de vapor durante o ciclo, pela entrada de ar externo no interior do sistema e pela potência consumida em equipamentos auxiliares (ÇENGEL; BOLES, 2006).



**Figura 2.9** – Representação esquemática do ciclo de Rankine (ÇENGEL; BOLES, 2006).

## 2.5 Análise de Viabilidade Econômica

Uma avaliação econômica permite conhecer os resultados obtidos através dos fluxos monetários de um projeto de investimento, dado por toda aplicação monetária que proporciona retorno a um negócio, podendo ser desde uma simples aplicação financeira até processos produtivos de bens e serviços através de tecnologias inovadoras (TARQUIM; BLANK, 2008).

A avaliação é realizada por métodos de análise que permitem expressar uma alternativa econômica de investimento em termos quantitativos, e desta forma, subsidia processos decisórios. Avaliar um projeto de investimento significa, então, conhecer todos os valores envolvidos no escopo do investimento, assim como a escala de tempo do projeto, e se constata sua viabilidade quando o valor retornado for superior ao valor total investido, levando em consideração uma taxa percentual periódica mínima que se deseja ganhar (VANNUCCI, 2013).

Em VANNUCCI (2013), observa-se que essa comparação entre retorno e investimento deve ser feita em um mesmo instante do tempo, podendo ser adotado qualquer momento dentro do intervalo de tempo entre o investimento inicial e o último retorno monetário obtido, para que se proceda tal avaliação. Nesse sentido, é utilizada uma taxa para corrigir os valores envolvidos a um mesmo instante do tempo. Essa taxa representa uma expectativa de ganho mínimo que se pretende em determinadas condições de mercado e, por isso, é chamada de taxa de expectativa ou taxa mínima de atratividade (TMA).

Segundo SULLIVAN et al. (2009), a TMA é normalmente definida por políticas da alta administração de uma empresa e leva em consideração questões como a quantidade de dinheiro disponível para investimento, os fundos de origem desse capital e os custos de obtenção, o número de projetos disponíveis para investimento e seus propósitos, o risco percebido associado a cada um desses projetos de investimento e o tipo de organização em questão. A TMA é, em tese, utilizada para maximizar os ganhos econômicos de uma organização, uma vez observados tais fatores.

Não é incomum que as empresas considerem duas ou mais TMA, de acordo com a categoria de risco dos investimentos. Seu valor é determinado de acordo com um piso, baseado no custo médio ponderado de capital (CMPC) relativo à escassez de fundos de investimento e às diferenças de riscos.

O CMPC é o custo de capital, calculado pela ponderação da participação de fontes específicas de financiamento de capital de longo prazo e da participação de custos de capital próprio da empresa depois do imposto de renda e resultados, obedecendo à participação percentual de cada uma dessas fontes na composição da estrutura do capital. Pode ser calculado pela Equação (2.11) de SULLIVAN et al. (2009):

$$CMPC = \lambda \cdot (1 - i_r) \cdot r_d + (1 - \lambda) \cdot r_a \quad (2.11)$$

Em que,  $\lambda$  é a fração do capital obtida de terceiros;  $(1 - \lambda)$  é a fração do capital obtido de capital próprio;  $i_r$  é a taxa de imposto de renda efetiva;  $r_d$  é o custo de capital de terceiros; e  $r_a$  o custo de capital próprio.

O capital de terceiros e o capital próprio compõem a estrutura de capital utilizada por um investidor em um investimento específico. O primeiro é o passivo oneroso da organização, enquanto o segundo é dado pela diferença entre o primeiro e o ativo imobilizado líquido da empresa. A estrutura ótima de capital é dada de acordo com os interesses do investidor mediante as devidas análises (BRASIL, 2014).

Para determinação dos custos de capital próprio e de terceiros, de ativos de geração de energia elétrica, recomenda-se a utilização da metodologia da ANEEL, intitulada Custo de Capital da Geração do Submódulo dos Procedimentos de Regulação Tarifária (BRASIL, 2014).

O custo de capital próprio pode ser determinado pelo método de risco/retorno, que procura eliminar riscos de um investimento através da diversificação da carteira de investimentos, ao passo que os remunera.

O custo de capital de terceiros segue metodologia semelhante, adicionando à taxa livre de riscos os prêmios exigidos pelo empréstimo do dinheiro.

Custo de capital próprio e custo de capital de terceiros são dados pelo modelo de precificação de ativo de capital CAPM (do inglês, *Capital Asset Pricing Model*), conforme as equações (2.12) e (2.13), respectivamente:

$$r_a = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) + r_B \quad (2.12)$$

Em que,  $r_f$  é a taxa de retorno do ativo livre de risco;  $\beta$  é o beta do setor regulado<sup>9</sup>;  $(r_m - r_f)$  é o prêmio de risco do mercado de referência; e  $r_B$  é o prêmio do risco país.

$$r_d = r_f + r_c + r_B \quad (2.13)$$

Em que,  $r_c$  é o prêmio de risco de créditos.

---

<sup>9</sup> No CAPM, o  $\beta$  captura todo o risco de mercado medido em relação a uma carteira que em teoria inclui todos os ativos negociados mantidos em proporção ao seu valor de mercado (DAMODARAN, 2007).

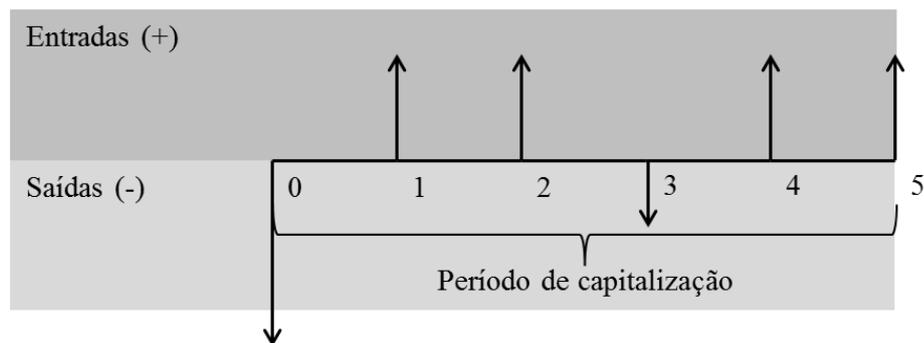
### 2.5.1 Fluxo de Caixa

Todas as empresas possuem dinheiro a receber, receitas e rendimentos, despesas, desembolsos e custos de operação e manutenção. Essas movimentações são respectivamente chamadas de entradas e saídas de caixa. Entradas e saídas de dinheiro compõem o fluxo de caixa, que ocorre durante um período específico de tempo para uma empresa, podendo tratar-se de estimativas ou valores observados (TARQUIM; BLANK, 2008).

O diagrama de fluxo de caixa de um projeto consiste na representação em escala horizontal – demarcados os períodos de tempo que devem coincidir com o período de capitalização da taxa de juros considerada – na qual setas para cima representam entradas de caixa e setas para baixo, saídas de caixa, conforme a Figura 2.10.

As entradas ou influxos de caixa podem ser receitas, reduções de custos operacionais, valor recuperado de um ativo, recebimento do principal de empréstimo, deduções de imposto de renda, venda de títulos e ações, economias de custo, poupança ou retorno de fundos de capital (CASAROTTO FILHO; KOPITTKE, 2010).

As saídas ou despesas podem ser originadas da aquisição de ativos, custo de projetos, custos operacionais e de manutenção, juros e pagamentos de empréstimos, imposto de renda e outros. Nos dois casos, a natureza dessas entradas ou saídas depende da natureza e do tipo de negócio em questão.



**Figura 2.10** – Representação do diagrama de fluxo de caixa (DO AUTOR, 2018)

Por se tratar de uma estimativa difícil e inexata, a modelagem do fluxo de caixa determina a qualidade da análise e as conclusões econômicas de uma alternativa estudada.

### 2.5.2 Método do Valor Presente Líquido

Valor presente líquido (VPL) é o valor equivalente do fluxo de caixa no instante inicial de um projeto de investimento calculado, com base em uma taxa de expectativa, quando todos os valores monetários do fluxo de caixa são levados ao instante presente (VANNUCCI, 2013).

É uma técnica que considera o fluxo de caixa descontado e é dado pela Equação (2.14), de VANNUCCI (2013):

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (2.14)$$

Em que,  $FC_t$  é o fluxo de caixa no período  $t$ ;  $t$  é o  $n$ ésimo período de investimento do dinheiro no tempo;  $n$  é o número de períodos  $t$ ; e  $i$  é a taxa mínima de atratividade do projeto.

Se o VPL de um projeto resultar positivo ( $VPL > 0$ ), significa que os valores recebidos no futuro, equivalentes à data inicial, superam o valor do investimento; portanto, o projeto é viável, dada a taxa de expectativa ou ganho mínimo esperado, a TMA. Quanto maior o valor do VPL, tanto melhor é o projeto de investimento (VANNUCCI, 2013).

### 2.5.3 Métodos da Taxa Interna de Retorno e Taxa Interna de Retorno Modificada

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa que torna nulo o valor do VPL, ou seja, anula o saldo dos valores de um fluxo de caixa no instante inicial para o projeto de investimento considerado (LEMES JUNIOR et al., 2016).

A TIR não avalia a viabilidade de um projeto de investimento em termos monetários, mas através da taxa percentual periódica que produz o investimento. Por meio dela, é possível determinar uma única taxa de retorno que sintetiza os méritos de um projeto de investimento. É chamada de interna porque considera apenas os fluxos de caixa do projeto e não de taxas oferecidas pelo mercado. A TIR é dada pela Equação (2.15) (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2010):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (2.15)$$

Para determinar a viabilidade de um projeto de investimento através da TIR, esta é comparada com a taxa mínima de atratividade; se  $TIR > TMA$ , então o projeto resulta economicamente viável.

Esse método é válido para fluxos de caixas convencionais, quando se tem saídas seguidas de entradas ao longo da vida do projeto. No entanto, para fluxos de caixa não convencionais, quando há mais de uma inversão de sinal na duração do fluxo de caixa, o projeto pode apresentar mais de uma TIR. Para eliminar esse complicador, utiliza-se a taxa interna de retorno modificada (TIRM), conforme sugere LEMES JUNIOR et al. (2016).

A TIRM iguala o valor futuro dos fluxos de caixa positivos no último ano da vida útil do projeto ao valor presente das saídas, capitalizados pelo custo de capital da empresa.

A TIRM opera com duas taxas – de financiamento, referente à captação de recursos a ser aplicada no fluxo de caixa negativo, e de investimento, referente à aplicação de recursos aos fluxos de caixa positivos – e é estabelecida por (2.16):

$$\sum_{t=0}^n \frac{FCN_t}{(1+R_d)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{FCP_t(1+R_a)^{n-t}}{(1+TIRM)^n} \quad (2.16)$$

Em que,  $TIRM$  é a taxa interna de retorno modificada;  $FCP_t$  representa os fluxos de caixa positivos no ano  $t$ ;  $FCN_t$  representa os fluxos de caixa negativos no ano  $t$ ;  $R_a$  é a taxa de reinvestimento para aplicação de recursos;  $R_d$  é a taxa de financiamento para captação de recursos.

Assim como para a TIR, o projeto é viável quando o valor da TIRM é superior ao valor da TMA.

#### 2.5.4 Método do Payback Descontado

O *Payback* Simples é o período de tempo necessário para recuperar um investimento feito, obtido por técnica simples de orçamentação de capital e muito utilizado como critério de descarte de projetos (LEMES JUNIOR et al., 2016).

Através dessa técnica, um projeto é aceitável quando o retorno do capital investido se dá em tempo igual ou inferior a um padrão estabelecido pela empresa. Esse método tem como vantagens a simplicidade de entendimento, o favorecimento da liquidez e a consideração das incertezas do fluxo de caixa mais distantes. Porém, ignora o valor do

dinheiro no tempo e os fluxos de caixa pós-*payback*, o período limite normalmente é arbitrado e penaliza projetos de longo prazo (LEMES JUNIOR et al., 2016).

O *Payback* Descontado corrige falhas técnicas do *Payback* Simples, considerando o valor do dinheiro no tempo. Essa técnica consiste em trazer todos os fluxos de caixa da empresa para o momento inicial, descontados do custo de capital da empresa. Pode ser definido, então, como o período necessário para recuperar um investimento, considerando os fluxos de caixa descontados (LEMES JUNIOR et al., 2016).

### 2.5.5 Análise de Sensibilidade

Essa análise demonstra a variação de um valor em função da variação de seus parâmetros componentes (VANNUCCI, 2013). Segundo TORRES (2006), é um procedimento que consiste em variar um ou mais parâmetros que influenciam o fluxo de caixa do projeto, enquanto se mantém os demais em seu nível de referência, calculando-se, desta forma, qual o efeito dessa variação no critério de decisão. Por meio dessa análise é possível determinar quais parâmetros são mais sensíveis, ou seja, causam maior variação nos resultados e, portanto, necessitam mais atenção por parte dos tomadores de decisão.

Quando uma pequena variação em um parâmetro produz uma grande alteração no valor do indicador de viabilidade, representativo do fluxo de caixa, diz-se que a decisão a ser tomada é sensível à variação do parâmetro considerado. No caso da variação no indicador de viabilidade ser pequena, diz-se que a decisão é insensível à variação do parâmetro considerado (HIRSCHFELD, 2000).

Neste trabalho será utilizada análise de sensibilidade univariada, quando apenas um parâmetro por vez é variado, possibilitando averiguar a sensibilidade do modelo ao parâmetro específico selecionado para análise (VANNI et al., 2009).

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada para avaliação do desempenho da usina de gaseificação e geração de energia a partir de RSU, a ser instalada no município de Boa Esperança/MG, sob a ótica da viabilidade técnica e econômica.

Do ponto de vista técnico, verifica-se a adequação de uso energético do RSU por meio de sua caracterização, analisa-se a eficiência do processo de gaseificação, com base nos resultados de uma planta piloto de gaseificação de 1 MW térmico de potência instalada, e estima-se a geração de energia, com base na especificação da usina a ser construída, suas características e disponibilidade do resíduo. Na perspectiva econômica, indicadores de viabilidade são estudados por técnicas de avaliação determinística. Por fim, através de análise de sensibilidade, é possível indicar quais parâmetros são mais sensíveis na determinação do fluxo de caixa.

#### **3.1 Fluxograma de Metodologia do Trabalho**

A avaliação de aplicação da tecnologia de gaseificação no aproveitamento energético de RSU é considerada neste trabalho sob a perspectiva de sua viabilidade técnica e econômica.

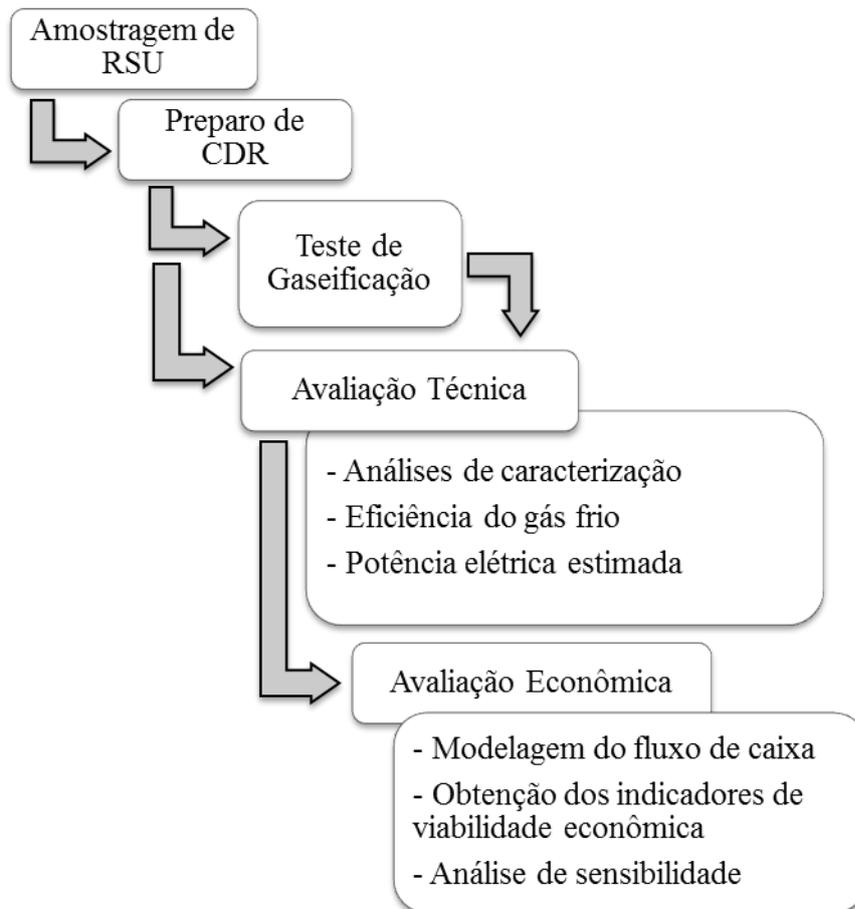
A viabilidade técnica é analisada com base nas características do resíduo, na eficiência do processo de gaseificação, por meio de testes realizados em uma planta piloto e pela estimativa de geração de energia elétrica em ciclo Rankine, e a partir também de referencial encontrado na literatura, extrapolado para o dimensionamento da usina. Para esta estimativa, considera-se a disponibilidade e as características do RSU, e assume-se que tais características, bem como a composição do gás produzido, permaneçam constantes durante toda a operação da usina.

A viabilidade econômica de implantação da usina é considerada com base em análises de indicadores de viabilidade econômica, a partir de estudo determinístico. Na sequência, uma análise de sensibilidade univariada é aplicada, de maneira a determinar quais parâmetros utilizados na modelagem do fluxo de caixa são mais sensíveis e necessitam maior atenção, pois têm maiores influências sobre os resultados econômicos da alternativa observada.

Para que estes estudos fossem realizados, foram necessárias etapas sequenciais de coleta, preparo e caracterização do CDR produzido a partir do RSU e do gás originado em

planta piloto de gaseificação. O objetivo era identificar as propriedades de cada um desses materiais, de modo a possibilitar uma avaliação do processo de gaseificação, bem como determinar potencial e arranjo da usina, através do balanço de massa e energia.

O fluxograma geral de execução da metodologia aplicada neste trabalho é apresentado na Figura 3.1. Segue a discriminação de cada uma das etapas, para esclarecimento:



**Figura 3.1** – Fluxograma de realização da metodologia proposta (Do autor, 2018).

### 3.2 Amostragem de RSU

As amostras de RSU foram coletadas, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 10007 – Amostragem de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004), no aterro<sup>10</sup> utilizado atualmente pela cidade, e são provenientes das atividades de coleta de rua.

<sup>10</sup> Para fins deste estudo, o vertedouro a céu aberto, ou lixão, foi tratado por aterro. No entanto, é preciso deixar claro que nenhum sistema de tratamento e/ou confinamento dos resíduos é atualmente aplicado, tratando-se do pior cenário de disposição final, porque é ambientalmente inadequado. O termo lixão será evitado porque

As amostras recolhidas no aterro foram obtidas a partir de cinco pontos aleatórios distintos, a uma profundidade de 1,50m, conforme indicados na Figura 3.2. Já as amostras de rua foram selecionadas em um percurso de coleta que abrange variados bairros, contemplando áreas tanto residenciais como comerciais, a fim de se obter uma representação da diversidade dos resíduos e padrões de consumo e descarte na cidade.



**Figura 3.2** – Pontos de coleta no aterro de Boa Esperança (FURNAS; CARBOGAS, 2016, adaptado pelo autor).

A Figura 3.3 registra o momento de coleta de amostras em um dos pontos aleatórios do aterro:



**Figura 3.3** – Um dos pontos aleatórios de coleta de amostra no aterro (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

---

carrega em si uma percepção do RSU como algo sem valor ou inservível, contrária à perspectiva que se procura criar com a realização deste trabalho.

A Figura 3.4 mostra o resíduo proveniente das coletas de rua, do qual foram retiradas as amostras para análises e gaseificação.



**Figura 3.4** – Resíduo proveniente de coleta de rua descarregado pelo caminhão (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

### 3.3 Preparo de CDR

Esta fase do projeto é dedicada ao preparo das amostras de RSU para adequação às análises físico-químicas de caracterização em laboratório, através de sua conversão em um CDR, também encaminhado aos testes de gaseificação em planta piloto.

As Figuras 3.5 a 3.7 ilustram os diferentes procedimentos de preparação das amostras para os ensaios laboratoriais e testes na planta piloto. Na sequência, podem ser vistas a primeira etapa de trituração (Figura 3.5), a segunda etapa de trituração (Figura 3.6), e, por fim, a etapa de quarteamento<sup>11</sup> das amostras após homogeneização dos materiais (Figura 3.7). A partir deste ponto, as amostras estão preparadas para as etapas subsequentes da pesquisa,

---

<sup>11</sup> Quarteamento é o processo de divisão de uma amostra pré-homogeneizada em quatro partes iguais, que funiconna pela escolha de duas partes opostas, que são misturadas completamente e homogeneizadas, para compor uma nova amostra, a ser dividida em quatro partes iguais. As amostras não escolhidas são descartadas e o processo de quarteamento segue até que se obtenha uma amostra com o volume desejado (ABNT, 2004).

quais sejam, o teste de gaseificação em planta piloto e as análises de caracterização físico-químicas.

Após a coleta, as amostras foram trituradas em um triturador tipo Shredder (Figura 3.5) para atingir a granulometria de  $60\text{mm}$ , tendo sido submetidas a três etapas de trituração sequenciais, devido à alta heterogeneidade de granulometria dos resíduos.



**Figura 3.5** – Primeira etapa de trituração da amostra em campo (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

Para estarem adequadas aos ensaios de laboratório, as amostras foram novamente submetidas à trituração, em um triturador monoaxial tipo faca (Figura 3.6), para atingir a granulometria final de  $10\text{mm}$ .



**Figura 3.6** – Segunda etapa de trituração da amostra (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

Após a trituração final, as amostras foram separadas e identificadas em três grupos: (i) provenientes do aterro, (ii) provenientes da coleta em rua; (iii) composta pela mistura das duas anteriores (rua + aterro), na proporção de 50% de massa de cada. Apenas esse último foi testado na gaseificação em planta piloto, uma vez que é mais representativo do ponto de vista de operação da usina no futuro (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Quarteamento da amostra (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

### 3.4 Teste de Gaseificação

Amostras de RSU de duas diferentes origens foram utilizadas no teste de gaseificação. Uma proveniente de amostragem em Boa Esperança/MG, conforme descrito no item 3.3, com o objetivo de avaliar sua aplicação em processos de aproveitamento energético, atestando a produção de gás como resultado do método de gaseificação em leito fluidizado circulante. Devido à limitação de orçamento e ao cronograma do projeto, o gás produzido a partir dessa amostra não pode ser coletado para análise. Uma investigação mais acurada será realizada posteriormente, em etapa de execução do “Projeto Reator Termoquímico” de Furnas, na fase de comissionamento da usina.

Outra amostra disponibilizada pela executora do projeto, identificada aqui como Resíduo Fornecedor, resultou na produção e coleta de gás após os testes de gaseificação, possibilitando a determinação de suas características e, portanto, a avaliação da eficiência deste processo.

Para os testes de gaseificação em planta piloto, os CDR, em sacos de aproximadamente 200kg, foram içados e inseridos por um sistema de alimentação, composto de três roscas alimentadoras e um parafuso infinito no interior do gaseificador em leito fluidizado.

O procedimento foi realizado a uma temperatura média de aproximadamente 825°C, em planta piloto de um 1MW térmico de potência instalada, localizada no município de Guarulhos/SP e de propriedade da Carbogas, fornecedora dos equipamentos e executora do projeto de instalação da usina. Uma fotografia do reator termoquímico é apresentada na Figura 3.8<sup>12</sup>:



**Figura 3.8** – Planta piloto da Carbogas, Guarulhos/SP (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

Durante 37 horas, ao longo de quatro dias – 18, 19, 21 e 22 de julho de 2016 – foram realizados os testes de gaseificação, perfazendo um total aproximado de nove horas diárias de operação no processamento de 4.109kg de CDR.

---

<sup>12</sup> Mais detalhes da planta podem ser conhecidos em INFIESTA (2015).

Com os testes, pode-se observar a geração do gás de síntese a partir de CDR. Apenas o gás produzido no dia 19 de julho de 2016, obtido a partir da amostra Resíduo Fornecedor, foi coletado e enviado para análises de caracterização. Nos demais dias, observou-se a formação constante de um gás conduzido a uma fornalha e *flare* para ser queimado.

A Figura 3.9 registra a válvula de alimentação e entrada de CDR no interior do reator termoquímico:



**Figura 3.9** – Vista superior da esteira de alimentação de CDR (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

Os parâmetros de realização dos testes estão apresentados na Tabela 3.1. A determinação das descargas do fluido de gaseificação, do gás produzido e do CDR são necessárias para a execução dos balanços de massa e energia.

A descarga do fluido de gaseificação é medida por meio de uma placa de orifício instalada a montante do primeiro trocador regenerativo. Já o gás produzido é medido na saída do segundo trocador regenerativo, por meio de um Venturi. E a alimentação de CDR é regulada por um software específico, de propriedade da empresa detentora e fornecedora da tecnologia, que regula o fluxo do combustível levando em consideração a produção do gás e as características do combustível.

Os dados apresentados nesta tabela, junto aos resultados das análises de caracterização do gás produzido e CDR, são necessários para a determinação da eficiência do processo de gaseificação, conforme será descrito no item 4.1.2, no capítulo sobre resultados.

**Tabela 3.1** – Parâmetros de Realização dos Testes de Gaseificação.

Parâmetro	Valor	Unidade
Descarga média de CDR	111,0	kg/h
Descarga média de fluido de gaseificação	111,0	kg/h
Descarga média de gás produto úmido	221,0	kg/h
Vazão média de gás produto úmido	180,0	Nm <sup>3</sup> /h
Temperatura média do leito	825,0	°C
Temperatura final do gás	40,0	°C

Fonte: Furnas e Carbogas (2016).

### 3.5 Avaliação Técnica

A análise de viabilidade técnica na aplicação da tecnologia se dá por meio da constatação de adequabilidade do resíduo ao processo de gaseificação, verificada por caracterização físico-química e resposta ao ensaio de gaseificação; pela eficiência do processo de gaseificação, ensaiada em uma planta piloto; e, pela estimativa de geração de energia.

#### 3.5.1 Análises de Caracterização

Com a análise de caracterização é possível determinar qualitativamente a composição de misturas complexas de resíduos sólidos e avaliar seu potencial como fonte de energia, possibilitando o dimensionamento do sistema de combustão, a identificação de processos de limpeza dos gases de exaustão necessários (JOSÉ; BORK, 2011) e avaliar impactos ambientais decorrentes de sua queima (LORA et al., 2012).

A composição do resíduo e do gás produzido é dada pela análise elementar, que é um parâmetro importante para a determinação do balanço de massa e de energia dos processos de conversão termoquímica e identifica a concentração de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O) (JOSÉ; BORK, 2011).

Para a execução deste trabalho, o principal objetivo na caracterização dos materiais é: (i) avaliar a adequabilidade do resíduo a processos de gaseificação e (ii) determinar o poder calorífico de maneira que, dadas as condições de realização do processo de gaseificação, seja possível determinar sua eficiência.

Têm-se, para a caracterização, dois grupos diferentes de análise: (i) daquelas aplicadas ao RSU e/ou CDR para determinação de suas propriedades e (ii) daquelas utilizadas na investigação da composição do gás produzido.

Os RSU e CDR são submetidos a análises físico-químicas e termogravimétricas para determinação do poder calorífico, da composição elementar, além do teor de cinzas e umidade. A definição do poder calorífico, assim como nitrogênio, hidrogênio, carbono e oxigênio, se dá conforme método ASTM-5865; cinzas, segundo NBR-8289; umidade, conforme NBR-8293.

Ambas as amostras, provenientes de Boa Esperança/MG e do Resíduo Fornecedor, foram submetidas às análises de caracterização.

O gás produzido é coletado e destinado às análises de caracterização. A composição química do gás é determinada através de cromatografia gasosa, com detector de condutividade térmica e análise contínua, realizada por infravermelho não disperso, para determinação de CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e outras substâncias químicas, além de condutividade térmica, para determinação de H<sub>2</sub> e poder calorífico.

### 3.5.2 Eficiência do Gás Frio

A eficiência indica o grau de sucesso relativo ao processo de transferência ou conversão de energia (CENGEL; BOLES, 2006).

A eficiência do procedimento de gaseificação é estudada com base nas leis da termodinâmica, que determinam que toda energia é transformada de uma forma para outra, mas sem que, no entanto, esteja livre de perdas (REED; DAS, 1981). Seguindo essa lógica, a eficiência do processo, conhecida por eficiência do gás frio, é admitida pela razão entre a energia química do gás e a energia química do combustível (RAZA; JANAJREH; GHENAI, 2012) e é dada pela Equação (3.1), de LA VILLETТА et al. (2017):

$$\eta_{EGF} = 100 \cdot \frac{(v_{gás} \cdot PCI_{gás})}{(v_{CDR} \cdot PCI_{CDR})} \quad (3.1)$$

Em que,  $\eta_{EGF}$  é a eficiência de gás frio;  $v_{gás}$  é a descarga média ou vazão mássica de gás úmido, em kg/h;  $PCI_{gás}$  é o poder calorífico inferior de gás úmido, em MJ/kg;  $v_{CDR}$  é a

descarga média ou vazão mássica de CDR, em kg/h; e  $PCI_{CDR}$  é o poder calorífico inferior do CDR, em MJ/kg.

A eficiência do processo é o principal parâmetro na decisão de viabilidade do sistema de gaseificação (JOSÉ; BORK, 2011), sendo medida em termos de valor energético do gás produzido e valor energético do combustível, levando-se em consideração o poder calorífico de cada um dos termos analisados.

O poder calorífico é a quantidade de calor liberado por unidade de massa ou volume de um combustível, quando submetido à combustão completa, e é a propriedade que influencia o dimensionamento das instalações de tratamento térmico (NÁSNER, 2015). Trata-se da quantidade de energia interna disponível no combustível para realização de trabalho (JOSÉ; BORK, 2011).

A energia presente, tanto no combustível sólido como no gás produto, é determinada com base em ensaios de caracterização físico-química, realizados em laboratório, de modo a identificar em cada um o poder calorífico e a composição elementar.

Através do produto das vazões de material – verificado durante a realização dos testes de gaseificação no reator termoquímico pelo poder calorífico inferior – determina-se a energia presente no sistema, tanto na entrada de combustível sólido como na saída do gás produzido e, desta forma, obtém-se a eficiência do processo, de acordo com Equação 3.1.

### 3.5.3 Potência Elétrica Estimada

A estimativa de energia elétrica gerada objetiva extrapolar os dados das análises experimentais para as condições de operação da usina, com o intuito de avaliar a eficiência de operação da planta real, do ponto de vista energético; ou seja, a fim de verificar se a energia produzida é maior que aquela necessária para manutenção de todas as etapas de operação, que envolvem o recebimento e o processamento do RSU, a gaseificação do CDR e por fim a geração de energia elétrica.

A potência elétrica gerada em ciclo Rankine é estimada com base na potência térmica disponível no gás e limitada pela eficiência de projeto do ciclo de potência e pela eficiência do conjunto gerador.

Esta avaliação tem como objetivo mostrar o potencial de geração de energia elétrica através da gaseificação de RSU, considerando os dados de projeto planejados para a indústria a ser instalada no município de Boa Esperança, no Estado de Minas Gerais. Não se trata da análise de uma planta real.

Em caldeira, o gás produzido pelo reator termoquímico será consumido para geração de vapor de água, que acionará um conjunto turbina/gerador para produção de energia elétrica.

O gerador é o dispositivo responsável por converter a energia mecânica, proveniente do eixo da turbina, em energia elétrica, e sua efetividade depende: (i) da eficiência do gerador, que é a relação entre a potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada; (ii) da eficiência térmica, dada pela razão entre o trabalho líquido produzido pelo eixo da turbina e o calor fornecido ao fluido de trabalho; (iii) e de outros efeitos, tal como a razão entre a potência elétrica produzida e a taxa com a qual é suprida a energia do combustível (ÇENGEL; BOLES, 2006). Esses três fatores levam ao entendimento de uma eficiência global do ciclo de potência, da qual se extrai a estimativa de potência elétrica disponível no sistema, dada a potência térmica presente no gás. Essa relação está expressa na Equação (3.2), conforme CARVALHAES (2013).

$$W_{elétrica} = \eta_{Rankine} \cdot \eta_{gerador} \cdot v_{gás} \cdot PCI_{gás} \quad (3.2)$$

Em que:

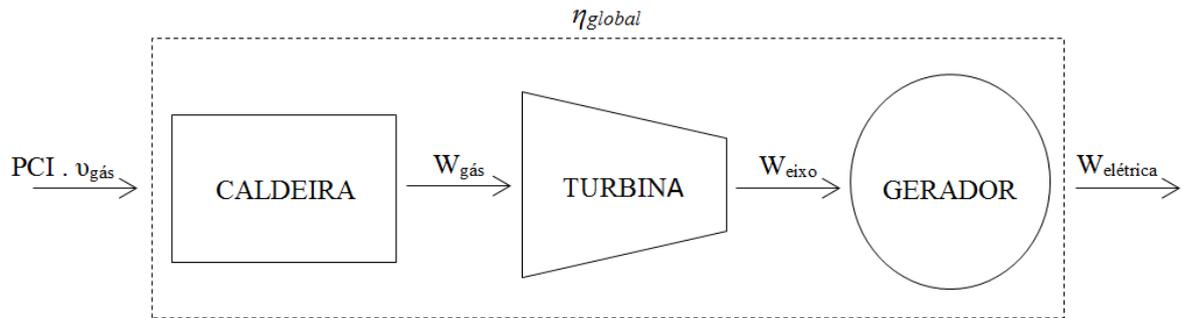
- i.  $W_{elétrica}$  é a potência elétrica, em kW;
- ii.  $\eta_{Rankine}$  é a eficiência do ciclo Rankine;
- iii.  $\eta_{gerador}$  é a eficiência do gerador;
- iv.  $v_{gás}$  é a vazão mássica do gás, em kg/s.
- v.  $PCI_{gás}$  é o poder calorífico inferior do gás, em MJ/kg;

As eficiências globais típicas para grandes usinas geradoras de energia elétrica são da ordem de 40% a 60% (ÇENGEL; BOLES, 2006). Neste trabalho, é adotada a eficiência de 35% para o ciclo Rankine e, para o gerador, um rendimento médio de 95%, semelhante àqueles adotados por CARVALHAES (2013) em seu estudo.

O fornecimento de calor para geração de energia elétrica está esquematizado na Figura 3.10. A potência elétrica na saída é uma função do rendimento global do ciclo Rankine e do conjunto gerador, de acordo à potência térmica fornecida pelo gás na entrada do sistema.

Inicialmente, dá-se a conversão da energia química do combustível em energia térmica ou calor, o que se pode ver, na figura, pela potência do gás –  $W_{gás}$ ; a energia térmica é

então transformada em energia potencial presente no vapor superaquecido; a energia potencial, por sua vez, é convertida em energia mecânica de rotação nas pás da turbina, representada, na figura, pela potência de eixo –  $W_{\text{eixo}}$ ; por fim, a energia mecânica é convertida em energia eletromagnética no gerador elétrico. A energia eletromagnética, ou eletricidade –  $W_{\text{elétrica}}$ , é a forma final de uso da energia (LORA; NASCIMENTO, 2004).



**Figura 3.10** – Esquema ilustrativo da obtenção de potência elétrica em ciclos a vapor (Do autor, 2018)

A geração média anual de energia elétrica, em kWh, é estimada pela Equação (3.3), considerando que a usina opera em um regime de 24 horas, ao longo de 365 dias do ano, perfazendo um total de 8.000 horas de operação e 760 horas de manutenção preventiva anuais, de acordo com dados do fornecedor.

$$\text{Geração anual de energia} = W_{\text{elétrica}} \cdot 8000 \quad (3.3)$$

### 3.6 Avaliação Econômica

A análise econômica determinística para a implantação da usina é dada a partir da estimativa de geração de energia encontrada no estudo técnico e nos aspectos operacionais da planta industrial, tendo em conta um horizonte de planejamento de 20 anos, prazo de operação da usina.

O fluxo de caixa para o período de operação da usina é obtido a partir da estimativa de custos e receitas decorrentes de sua implantação, e permite conhecer os resultados da proposta analisada por meio de indicadores determinísticos de viabilidade econômica. A modelagem do fluxo de caixa está descrita no item subsequente.

#### 3.6.1 Modelagem do Fluxo de Caixa

A estruturação do fluxo de caixa exige informações detalhadas do projeto e é estabelecida a partir da aplicação de um modelo que mensure seu valor econômico. Neste trabalho, o fluxo de caixa é utilizado na avaliação econômica do projeto de instalação da usina.

Os modelos de fluxos de caixa podem seguir uma estrutura básica, apontada em DAMODARAN (2007), na qual este é encontrado ao serem abatidos os impostos e necessidades de reinvestimento do lucro contábil. Neste trabalho, porém, esse modelo é adaptado conforme estudo realizado em BRASIL (2016), quando a receita proveniente do fluxo de caixa do projeto é considerada como o custo evitado, pois não se consome energia elétrica da concessionária. Uma vez que não há venda da energia gerada, não há incidência de impostos. O modelo adotado está apresentado na Tabela 3.2 e considera que tanto o fluxo de caixa como a TMA assumidos não contemplam o efeito da inflação ao longo do tempo de estudo.

**Tabela 3.2** – Modelo de Fluxo de Caixa Adotado.

(+)	Receita (Custo anual evitado)
(-)	OPEX
(-)	CAPEX
(=)	Fluxo de Caixa

Fonte: Do autor (2018).

A receita anual é calculada a partir da obtenção do custo anual evitado. Considerou-se aqui que a usina opera ao longo das 24 horas diárias, durante 365 dias no ano, tendo este intervalo um total de 8.000 horas de operação anuais. A receita anual é dada pela Equação (3.4).

$$Receita = T_m \cdot W_{disponível} \cdot 8000 \quad (3.4)$$

Em que,  $T_m$  é a tarifa média ponderada, em  $R\$/kWh$ ;  $W_{disponível}$  é a potência disponível para exportação para a rede elétrica após consumo da planta.

A tarifa média ponderada é determinada de acordo com a Equação (3.5), seguindo a metodologia adotada em BRASIL (2016).

$$T_m = \frac{780.T_P + 7980.T_{FP}}{8760} \quad (3.5)$$

Em que,  $T_P$  é a tarifa da ponta<sup>13</sup>, em  $R\$/kWh$ ; e  $T_{FP}$  é a tarifa fora de ponta<sup>14</sup>, em  $R\$/kWh$ .

O OPEX inclui as despesas operacionais que são:

- i. O&M linha de processamento de RSU;
- ii. O&M planta de gaseificação e geração de energia elétrica;
- iii. Seguro da usina;
- iv. Encargos setoriais (TUSD).

O CAPEX diz respeito ao investimento inicial e compreende:

- i. Projeto de engenharia com especificação técnica dos equipamentos – projeto executivo;
- ii. Análise do *RSU* da região;
- iii. Aquisição e implantação de toda planta industrial;
- iv. Obras civis e de infraestrutura;
- v. Comissionamento da planta industrial;
- vi. Custo de conexão a rede elétrica;
- vii. Treinamento da mão-de-obra para operação da planta e operação assistida.

### 3.6.2 Análise de Sensibilidade

Esta análise tem o intuito de identificar quais parâmetros são mais sensíveis à viabilidade econômica e que, portanto, exigem maior cuidado em sua mensuração. A avaliação consiste em variar os fatores um a um, ou seja, por meio de uma análise univariada, e observar seu impacto nas variáveis de decisão, que são, neste estudo, o VPL e o *Payback* Descontado.

---

<sup>13</sup> É o período de três horas diárias consecutivas, exceto sábados, domingos e feriados, no qual a demanda de energia elétrica tende a ser maior e, portanto, com preços mais elevados para algumas modalidades tarifárias (BRASIL, 2015).

<sup>14</sup> Corresponde às demais horas do dia que não do horário de ponta e cuja demanda de energia elétrica é menor (BRASIL, 2015).

Para tanto, são escolhidos aqueles fatores cuja determinação tenha gerado maior dúvida na mensuração, ou aqueles que se tenha interesse em investigar. Aqui são analisadas as variações da TMA, da tarifa de energia elétrica, da potência elétrica disponível, dos custos de O&M, do custo unitário, do valor de reinvestimento na linha de processamento de resíduos e do período de vida útil. Dessa forma, estuda-se como a variação desses parâmetros dentro de um intervalo de valores definidos afeta a viabilidade econômica do projeto. Para tal, estabelece-se que:

- i. A TMA é variada em um intervalo entre 0 e 20%;
- ii. A tarifa de energia é variada no intervalo de R\$ 0,20/kWh a R\$ 0,90/kWh;
- iii. A potência é variada desde 600 kW até o valor dimensionado no estudo;
- iv. O custo de O&M é variado em consideração aos valores encontrados na literatura e o intervalo abrange custos de R\$ 0,17/kWh a R\$ 0,27/kWh (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016);
- v. O custo unitário é variado em um intervalo de R\$ 12 milhões/MW a R\$ 22 milhões/MW.
- vi. O valor de reinvestimento aplicado no 16º ano para a linha de processamento de RSU, cuja vida útil é de quinze anos, é variado desde 30% a 100% do investimento inicial;
- vii. O período de vida útil da usina é variado de quinze a vinte anos de operação.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Uma vez aplicada a metodologia proposta no capítulo anterior, neste capítulo, procura-se relacionar os resultados e análises obtidos ao desempenho operacional e econômico da usina. A partir desses resultados, é possível traçar os caminhos para aplicação da tecnologia e propor alternativas de melhoria, otimização e comercialização.

### 4.1 Avaliação Técnica

A avaliação técnica investigou o potencial de exploração energética dos RSU de Boa Esperança/MG baseado em sua caracterização, eficiência do processo de gaseificação aplicado a RSU e potência elétrica estimada para a usina, considerando as características e disponibilidade do gás e a especificação técnica da usina a ser instalada. Os resultados estão demonstrados nos itens que seguem.

#### 4.1.1 Análises de Caracterização

O aproveitamento de RSU como fonte alternativa de energia requer o conhecimento de suas propriedades e composição química, de maneira que seja possível projetar o sistema de destinação final dos resíduos sólidos, assim como limpeza e tratamento de gases de exaustão (JOSÉ; BORK, 2011). Para tanto, as análises de caracterização permitem a identificação dos resíduos, segundo suas características, o que possibilita a elaboração de uma proposta adequada de tratamento.

A correta caracterização do material é um passo necessário e fundamental, quando se pretende dimensionar um sistema para recuperação energética de RSU, conforme relatado por JOSÉ; BORK (2011). No entanto, é importante lembrar que a composição do material pode alterar durante o período de vida útil do projeto em consequência de modificações nos hábitos de consumo da população.

A caracterização dá uma ideia da qualidade do gás a ser produzido, a partir da composição elementar do combustível, do teor de cinzas e da umidade e também do poder calorífico inferior ou energia disponível no gás (JOSÉ; BORK, 2011). Essa análise também é importante para avaliar a eficiência do processo de gaseificação, pois tão melhor é quanto menos energia se dispersa durante o procedimento e mais energia esteja presente no gás disponível para realização de trabalho.

No escopo deste trabalho, as análises de caracterização se deram com intuito de avaliar a adequabilidade dos resíduos de Boa Esperança/MG para aplicação em processo de gaseificação. Em paralelo, a partir da amostra Resíduo Fornecedor, faz-se um estudo da eficiência do processo de gaseificação com os dados de caracterização do resíduo e gás produzido, e estimam-se as condições de operação da usina no que diz respeito à geração de energia elétrica.

#### 4.1.1.1 Caracterização do RSU de Boa Esperança/MG

A composição do RSU dá uma ideia do padrão de consumo e descarte da população. Conhecendo essa composição, é possível entender os principais problemas ambientais que podem advir da disposição inadequada e quais rotas de manejo podem ser adequadas à neutralização.

A Figura 4.1 revela o aspecto final da amostra enviada para o laboratório de análises físico-químicas, com destaque à granulometria média final do material (10mm). É importante observar que essa granulometria apresenta o tamanho ideal das partículas para o procedimento de análises laboratoriais. Na planta de gaseificação, a granulometria média final do material submetido ao processo de gaseificação será de 20mm.



**Figura 4.1** – Amostras enviadas para laboratório, granulometria média final de 10 mm (FURNAS; CARBOGAS, 2016).

Segundo ZHAO et al. (2016), o resíduo é teoricamente viável para a combustão sem combustível auxiliar quando: (i) sua umidade é menor que 50%; (ii) seu teor de cinzas é menor que 60%; e (iii) o teor de C é maior que 25%. Estes parâmetros podem ser aqui entendidos e utilizados para uma avaliação teórica da aplicação do resíduo em estudo em processos de gaseificação. Uma síntese dos resultados da caracterização dos resíduos está apresentada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Caracterização do RSU de Boa Esperança/MG

Parâmetro	Aterro	Rua	Rua + Aterro	Unidade
Nitrogênio	0,8	0,8	1,0	% massa
Hidrogênio	7	8	7	% massa
Oxigênio	45	33	35	% massa
Carbono	47	58	57	% massa
Cinzas	27,0	15,0	26,0	% massa
Umidade	9,9	25,0	15,0	% massa
PCS	16,3	14,9	17,2	MJ/kg
PCI	14,8	13,2	15,8	MJ/kg

Fonte: Furnas e Carbogas (2016).

O teor de carbono (C) dá uma ideia da possibilidade de recuperação energética do RSU e mostra a vocação do material para a produção de monóxido de carbono (CO) quando gaseificado (RAZA; JANAJREH; GHENAI, 2012). Os resultados das análises de caracterização para este elemento apresentaram uma variação entre 47% e 58% nas amostras estudadas demonstrando viabilidade para gaseificação, segundo apontado por ZHAO et al. (2016). Em seu estudo, os autores consideram alto o teor de carbono em amostras de resíduos cuja a composição apresenta valores entre 32% e 92%. Aliado ao conteúdo moderado de hidrogênio, entre 4% e 14%, para eles, o alto conteúdo de carbono denota um bom potencial energético. As análises de caracterização também indicaram conteúdo moderado de hidrogênio, com resultados entre 7% e 8%, o que demonstra, conforme critérios dos autores, a viabilidade do potencial energético observada nas amostras de RSU de Boa Esperança/MG.

O menor índice de carbono no material proveniente do aterro (47%) pode ser explicado pela decomposição de parte da matéria orgânica ao longo dos anos de deposição, o que justifica também o maior teor de cinzas e menor teor de umidade dessa amostra (9,9%),

que pode estar relacionado à evaporação de água de parte do material. A amostra apresentou maior índice de umidade no resíduo coletado na rua (25%), talvez pela presença de resíduo doméstico fresco.

Os teores de cinzas e umidade têm grande influência no poder calorífico da amostra, de modo que o menor índice de umidade das amostras coletadas no aterro, ou oriundas da mistura entre aterro e rua (15%), pode explicar os maiores poderes caloríficos apresentados. No segundo caso, este efeito ainda pode ter sido compensado pelo menor percentual das cinzas (26%), se comparado ao resíduo do aterro.

NÁSNER (2015), baseado em dados da literatura de referência, define uma composição média para RSU, considerando: (i) 40 a 50% de C; (ii) 5 a 7% de H; (iii) 25 a 35% de O; (iv) umidade entre 20 e 40%; e (v) cinzas entre 15 e 30%. De maneira geral, como constatado nos dados da Tabela 4.1, o RSU de Boa Esperança está dentro dessa faixa percentual, sem ignorar obviamente o fato de que a composição deste tipo de resíduo, como já mencionado, está estritamente relacionada a hábitos e poder de consumo nas diferentes regiões, e pode, portanto, variar seus valores fora dos limites propostos, como ocorreu no teor de C.

Uma análise análoga pode ser feita para o PCI da amostra – outro importante fator na determinação da adequabilidade do material para o uso energético – apresentando valores que variaram de 13,2 MJ/kg a 15,8 MJ/kg, faixa que abrange o valor esperado pela literatura referencial, que sugere valores não inferiores a 15 MJ/kg (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). Para aqueles valores abaixo do esperado, cabe ressaltar que o preparo do CDR não passou pela etapa de secagem para retirada de umidade, o que pode ter prejudicado esse resultado. O abatimento da umidade se deu apenas pelos esforços físicos de trituração no preparo da amostra.

Em laboratório, é determinado o PCS do material, que considera a energia recuperada na condensação da água ao final do processo experimental. O PCI, neste caso, pode ser determinado matematicamente, empiricamente ou experimentalmente e desconsidera a energia recuperada com a condensação da água (JOSÉ; BORK, 2011; NÁSNER, 2015). Este dado é o mais importante do ponto de vista prático para a avaliação dos resultados, uma vez que na maioria dos sistemas térmicos a temperatura final de operação não permite a condensação da água, que pode ser inclusive prejudicial em estado líquido.

De maneira geral, os valores apresentam coerência e os resultados das análises laboratoriais sobre a mistura das amostras estão em posição intermediária em relação às amostras puramente da rua ou puramente do aterro. Este mesmo comportamento, no entanto,

não pode ser atribuído ao poder calorífico, pois maiores valores foram encontrados justamente nas amostras provenientes da mistura. Este resultado deve ser explicado pela alta heterogeneidade das amostras.

O material utilizado nos testes de gaseificação foi obtido da mistura das amostras coletadas no aterro e na rua em mesma proporção, considerando que essa condição representa melhor o período de operação da usina, quando serão utilizados parte do passivo presente no aterro existente e todo o material das coletas diárias de RSU da cidade.

A produção de um gás combustível foi constatada no *flare*, através da produção de uma chama constante no momento de sua combustão ao final do processo, o que pode ser observado na Figura 4.2:



**Figura 4.2** – Chama na fornalha indicando a presença do gás produzido (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

#### 4.1.1.2 Caracterização do CDR Resíduo Fornecedor

A caracterização do material permite avaliar suas propriedades e, portanto, a viabilidade de sua aplicação em processos de recuperação energética, assim como a eficiência do processo de gaseificação, quando comparada às propriedades e características do gás produzido.

O material identificado como Resíduo Fornecedor foi caracterizado e ensaiado em planta piloto, com o intuito de se estimar a eficiência do processo de gaseificação. Os resultados das análises de caracterização do CDR estão apresentados na Tabela 4.2:

**Tabela 4.2** – Caracterização do CDR Resíduo Fornecedor

Parâmetro	Valor	Unidade
Nitrogênio	0,87	% massa
Hidrogênio	5,7	% massa
Oxigênio	30,4	% massa
Carbono	48,7	% massa
Cinzas	8,4	% massa
Umidade	4,7	% massa
PCS	17,0	MJ/kg
PCI	15,8	MJ/kg

Fonte: Furnas e Carbogas (2016).

O elevado teor de carbono (48,7%) aponta uma vocação do material para geração de um gás passível de queima e obtenção de energia. O poder calorífico reforça essa informação (PCI de 15,8 MJ/kg), estando de acordo com a literatura referencial (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016). A mesma análise ocorre com a umidade, da qual se espera conteúdo inferior a 25%, para uso no dimensionamento previsto para a usina.

Esta análise objetivou principalmente o conhecimento do PCI para estimativa da eficiência do processo de gaseificação. Além disso, a semelhança entre as amostras, constatada nos resultados das Tabelas 4.1 e 4.2, dão uma ideia sobre o desempenho do processo de gaseificação, considerando o RSU de Boa Esperança/MG.

#### 4.1.1.3 Caracterização do Gás Produzido em teste de gaseificação a partir da amostra Resíduo Fornecedor

A eficiência de um gaseificador é definida pela sua capacidade de converter um material sólido, e a energia nele contida, em um gás (ZHANG et al., 2017). De acordo com BEGUM et al. (2014), através de processos de gaseificação é possível a obtenção de um gás com PCI de 4 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup>, com possibilidade de queima para geração de energia elétrica.

REED e DAS (1981) dizem ainda que, para a maioria das aplicações, o gás precisa apresentar um conteúdo energético superior a  $4 \text{ MJ/Nm}^3$ .

SANCHEZ et al. (2011) classificam os gases da seguinte forma:

- i. Baixo poder calorífico, até  $5 \text{ MJ/Nm}^3$ ;
- ii. Médio poder calorífico, de 5 a  $10 \text{ MJ/Nm}^3$ ;
- iii. Alto poder calorífico, acima de  $10 \text{ MJ/Nm}^3$  e abaixo  $40 \text{ MJ/Nm}^3$ .

A Tabela 4.3 mostra os resultados de caracterização do gás. Na coluna contínua estão apresentados os resultados obtidos através de análise contínua, realizada por infravermelho não disperso e condutividade térmica; na coluna cromatográfica, aqueles obtidos através de cromatografia gasosa; e, na coluna média, tem-se a média dos resultados obtidos pelos dois diferentes métodos analíticos. Estes valores médios foram usados para realização dos cálculos posteriores.

**Tabela 4.3** – Caracterização do Gás Produzido

Parâmetro	Contínua	Cromatográfica	Média	Unidade
CH <sub>4</sub>	6,58	5,09	5,84	% vol. úmido
H <sub>2</sub>	3,38	4,68	4,03	% vol. úmido
CO	11,68	9,54	10,61	% vol. úmido
CO <sub>2</sub>	11,68	12,23	11,96	% vol. úmido
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		0,24	0,24	% vol. úmido
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		2,14	2,14	% vol. úmido
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		0,74	0,74	% vol. úmido
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		0,08	0,08	% vol. úmido
H <sub>2</sub> O	7,98		7,98	% vol. úmido
N <sub>2</sub>	58,71	57,28	56,39	% vol. úmido
PCS	5,69	5,13	5,41	MJ/kg úmido
PCI	5,19	4,65	4,92	MJ/kg úmido
Massa Molar	27,6	27,5	27,5	Kg/kmol úmido

Fonte: Furnas e Carbogas (2016).

Considerando a literatura de referência, é possível afirmar que se trata de um gás de médio poder calorífico e passível de queima, conforme constatado no *flare* durante os testes de gaseificação. O PCI encontrado ( $4,92 \text{ MJ/kg} = 6,04 \text{ MJ/Nm}^3$ ) está coerente com

aquele indicado pela literatura, levando em conta o fluido de gaseificação utilizado no processo de gaseificação, ou seja, o ar atmosférico. Segundo INTHARATHIRAT e SALAM (2016), admite-se PCI entre 4 e 7 MJ/Nm<sup>3</sup>, para gases obtidos de processos que utilizam ar atmosférico como agente de gaseificação. Para processos que utilizam oxigênio; o PCI pode variar entre 10 e 18 MJ/Nm<sup>3</sup>, e, entre 15 e 20 MJ/Nm<sup>3</sup>, em processos cujo vapor é utilizado como fluido de gaseificação.

A composição química evidencia também a presença de uma série de gases combustíveis, tais como metano, hidrogênio, monóxido de carbono e outros gases orgânicos, mostrando que é possível a obtenção de uma mistura de gases com possibilidade de exploração energética.

O percentual de gás nitrogênio na amostra (56,39%) – um gás inerte que influencia negativamente no PCI final do gás (4,92 MJ/kg) – pode ser explicado pelo uso do ar atmosférico como fluido de gaseificação. Esse percentual poderia ser alterado, aumentando o poder calorífico do gás com a aplicação de diferentes fluidos de gaseificação, como vapor d'água e gás oxigênio, por exemplo. No entanto, é preciso considerar os impactos econômicos da utilização dessas alternativas.

#### 4.1.2 Eficiência do gás frio

A eficiência do processo de gaseificação, dada pela aplicação dos valores de PCI (Tabela 4.2 e Tabela 4.3) e vazões de realização dos testes de gaseificação (Tabela 3.1) na Equação (3.1), resultou em um valor médio de 62%, dentro do intervalo estimado na literatura para processos de gaseificação, ou seja, entre 60 e 90%, segundo REED e DAS (1981). Já QUITETE e SOUZA (2014) tornam esse valor mais específico, entre 60 e 70%, englobando ainda assim os teores aqui apresentados, o que classifica o processo como altamente eficiente.

#### 4.1.3 Potência Elétrica Estimada

O gás produzido no reator termoquímico será queimado em caldeira para geração de vapor de água, que acionará uma turbina para geração de energia elétrica em ciclo Rankine.

A potência elétrica gerada em ciclo Rankine, dada pela Equação (3.2), foi estimada com base na potência térmica disponível no gás (dada pela multiplicação da vazão de projeto, Tabela A.1 do Apêndice A, pelo PCI do gás, que consta na Tabela 4.3),

considerando as especificações do projeto de construção da planta, limitada pela eficiência do ciclo de potência e do conjunto gerador, conforme literatura.

A potência elétrica bruta foi estimada em 1.462,45kW, que, descontada da potência necessária para funcionamento da planta, igual a 259,66kW, é suficiente para garantir a operação de toda a planta industrial e ainda disponibilizar potência líquida de 1.202,79kW para injeção na rede elétrica da distribuidora.

Considerando-se que a potência acima está disponível para um ciclo de trabalho de 24 horas, 365 dias no ano, perfazendo um total anual de 8.000 horas de operação, descontadas as horas de parada devido à manutenção preventiva, estima-se uma média anual de geração de energia de 11.699.593,27kWh/ano, conforme cálculo da Equação (3.3), disponível para exportação à rede básica.

## 4.2 Avaliação Econômica

As premissas técnicas e econômicas para realização de avaliação determinística estão apresentadas na Tabela 4.4:

**Tabela 4.4** – Parâmetros Estimados na Modelagem do Fluxo de Caixa

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência elétrica disponível	1.202,79	<i>kW</i>
Vida útil do projeto	20	<i>Anos</i>
Investimento	26.372.683,76	<i>R\$</i>
Tarifa de energia	0,55	<i>R\$/kWh</i>
Custo Médio Ponderado de Capital ( <i>CMPC</i> )	7,16	<i>% a.a.</i>
Taxa de aplicação de recursos ( <i>R<sub>a</sub></i> )	9,63	<i>% a.a.</i>
Taxa de captação de recursos ( <i>R<sub>d</sub></i> )	8,35	<i>% a.a.</i>
<i>O&amp;M</i> linha de processamento de <i>RSU</i>	13,49	<i>% de investimento na linha de processamento</i>
<i>O&amp;M</i> planta de gaseificação e geração de energia	5,57	<i>% de investimento na planta de gaseificação e geração de energia elétrica</i>
Seguro da usina	0,30	<i>% de investimento</i>
Tarifa de uso do sistema de distribuição ( <i>TUSD</i> )	6,61	<i>R\$/kW</i>

Fonte: Do autor (2018).

A potência disponível resulta da potência gerada, que é o resultado da manipulação de dados e aplicação das fórmulas descritas no item 3.5.3 e foi demonstrada no item 4.1.3 deste quarto capítulo, subtraída da potência elétrica média consumida pela planta, que foi determinada pela empresa projetista, com base na potência de demanda de cada equipamento do arranjo dimensionado para a usina (APÊNDICE A).

A vida útil da usina segue a especificação do fornecedor de equipamentos. No 16º ano de operação da usina, é considerado um valor de reinvestimento na planta de processamento de *RSU*, cujos equipamentos têm vida útil de quinze anos. Esse valor é equivalente a 30% do investimento inicial nessa linha, estimado por engenheiros da empresa de maneira análoga à metodologia usada na análise de projetos de energia alternativa.

O investimento inicial foi obtido por tomada de preços através de edital público para participação em projetos de P&D, diretamente dos executores do projeto e fornecedores dos equipamentos. Apenas o custo de conexão a rede, que também compõe o investimento, foi tomado de orçamento de uma empresa com experiência na instalação de subestações elevadoras, que restou no valor de R\$ 220.000,00.

A tarifa de energia adotada neste estudo é estabelecida pela tarifa média ponderada horo-sazonal – verde A4, para a faixa de tensão de 2,3 a 25kV, de julho de 2018, da Companhia Energética de Minas Gerais (*CEMIG, 2018*), considerando a tributação com as alíquotas de *ICMS* (18%) e *PIS/COFINS* (3,65%) e produção constante de energia, ao longo de 780 horas de ponta (tarifa 1,54R\$/kW) e 7.980 horas fora de ponta (0,32R\$/kW), no ano.

O CMPC, a taxa de aplicação de recursos e a taxa de captação de recursos são dados por BRASIL (2014). A TMA no estudo é considerada igual à taxa de aplicação de recursos, estipulada como custo de capital próprio, pois no fluxo de caixa não é considerado financiamento, apenas recursos próprios.

O *O&M* da linha de processamento de *RSU* e da planta de gaseificação e geração de energia foi considerado com base no trabalho de INFIESTA (2015). Os custos de *O&M* abrangem custos com manutenção, custos indiretos, consumíveis e custos com mão-de-obra administrativa e operacional, contemplando encargos, benefícios e outras despesas. O consumo de energia elétrica foi desconsiderado, pois assume-se que a planta é autossuficiente em energia, com base na potência elétrica estimada. Também não se considera o período de comissionamento da usina, quando será necessário consumo da rede para dar partida a ela.

O seguro da usina foi adotado, conforme estudo de PINHEIRO NETO (2017) para outras usinas, a partir de fontes alternativas.

Foi estipulado, no custo de operação, desconto de 50% da tarifa de uso do sistema de distribuição (*TUSD*), observando o benefício dado aos empreendimentos de fontes alternativas, cuja capacidade instalada seja inferior a 30MW (BRASIL, 2006). O valor da alíquota segue a tarifa adotada pela CEMIG (2018).

Uma vez determinado o fluxo de caixa do projeto, pode-se avaliar o desempenho econômico esperado na implantação da tecnologia, por meio dos indicadores de viabilidade econômica *VPL*, *TIR* e *Payback* Descontado.

#### 4.2.1 Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa estimado pelo projeto, como consequência da implantação da usina, é apresentado na Tabela 4.5:

**Tabela 4.5** – Fluxo de Caixa do Projeto de Implantação da Usina

Ano	CAPEX [R\$]	OPEX [R\$]	Receita - custo evitado [R\$]	Fluxo de Caixa [R\$]
0	26.372.683,76	-		-26.372.683,76
1		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
2		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
3		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
4		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
5		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
6		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
7		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
8		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
9		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
10		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
11		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
12		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
13		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
14		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
15		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36

Ano	CAPEX [R\$]	OPEX [R\$]	Receita - custo evitado [R\$]	Fluxo de Caixa [R\$]
16	-3.120.937,42	-2.048.341,47	5.299.242,83	129.963,94
17		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
18		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
19		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36
20		-2.048.341,47	5.299.242,83	3.250.901,36

Fonte: Do autor (2018).

A coluna “CAPEX” diz respeito aos investimentos feitos. O desembolso inicial (ano 0), no valor de R\$ 26.152.683,76, equivale ao montante investido no projeto. No 16º ano, há o valor a ser reinvestido na recuperação da linha de processamento de RSU.

A coluna “OPEX” refere-se aos custos e despesas com operação e manutenção da usina, considerando a linha de processamento de RSU e as plantas de gaseificação e geração de energia, seguro da usina e encargos setoriais.

A coluna “Receita – custo evitado” traz o resultado que se espera pelo custo evitado com a compra de energia elétrica da rede.

Já a coluna “Fluxo de Caixa” representa o resultado operacional da usina, dado pelo somatório das colunas anteriores.

O fluxo de caixa é dito convencional, pois não há inversão de sinal nos fluxos de caixas futuros.

#### 4.2.2 Indicadores de Viabilidade Econômica

Os indicadores de viabilidade econômica sintetizam o desempenho da opção estudada, considerando as premissas adotadas no desenvolvimento do trabalho, e estão apresentados na Tabela 4.6, para uma TMA de 9,63% a.a.

**Tabela 4.6** – Indicadores de Viabilidade Econômica

Parâmetro	Valor	Unidade
VPL	1.300.838,77	R\$
TIR	10,36	% a.a.
<i>Payback</i> Descontado	17,7	Anos

Fonte: Do autor (2018).

Do ponto de vista do VPL, a análise de viabilidade econômica indicou a viabilidade do projeto, uma vez que o VPL foi maior que zero (R\$ 1.300.838,77).

Por apresentar fluxo de caixa convencional, utilizou-se o método da TIR como indicador de desempenho interno do projeto, chegando-se a um resultado de 10,36% a.a., o que torna o projeto viável, visto que o resultado foi maior que a TMA adotada (9,63% a.a.).

O *Payback* Descontado também indicou a viabilidade do projeto, dado que o tempo de retorno do investimento (aproximadamente 17 anos e 8 meses) foi inferior ao período de vida útil da usina (20 anos).

#### 4.2.3 Análise de Sensibilidade

Neste item, é apresentado o efeito da variação dos principais parâmetros considerados na modelagem do fluxo de caixa e que afetam a viabilidade econômica do projeto, segundo os indicadores VPL e *Payback* Descontado. A TIR, por incorrer em mudança de metodologia de cálculo da TIR para TIRM em alguns casos, não será abordada.

O caso base, com o qual se estabelece comparação dos resultados oriundos da análise de sensibilidade, é aquele apresentado no Item 4.2.2 que resulta da modelagem de fluxo de caixa obtida a partir deste trabalho.

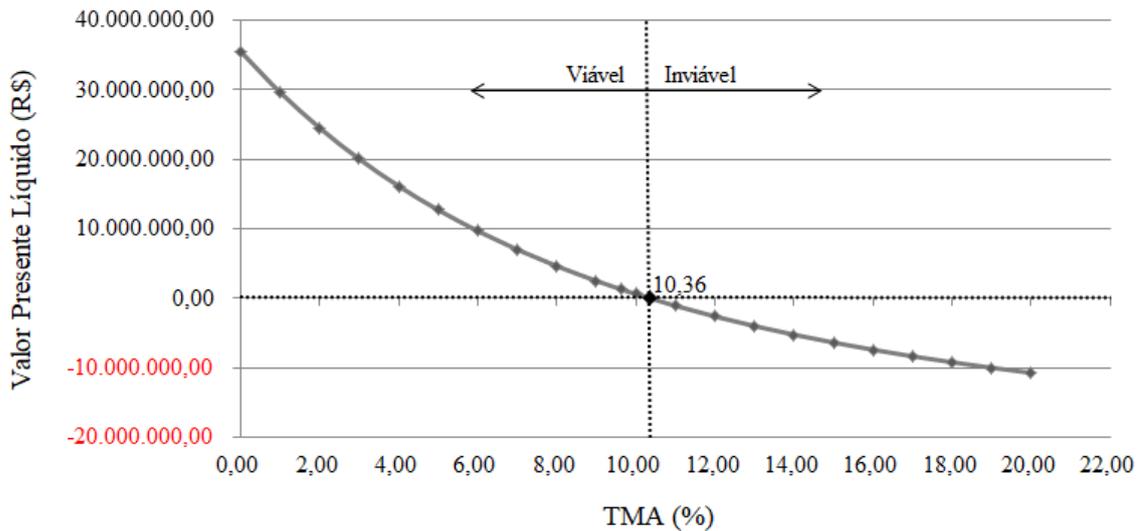
##### 4.2.3.1 Sensibilidade à TMA

O comportamento do VPL em função de variações da TMA está apresentado no gráfico da Figura 4.3. Pode-se observar que o VPL do projeto decresce à medida que a taxa de desconto aumenta, ou seja, a rentabilidade do projeto diminui.

No intervalo analisado, o VPL variou de R\$ 35.524.405,97 para uma TMA igual a zero, de -R\$ 10.710.965,32 para uma TMA de 20%.

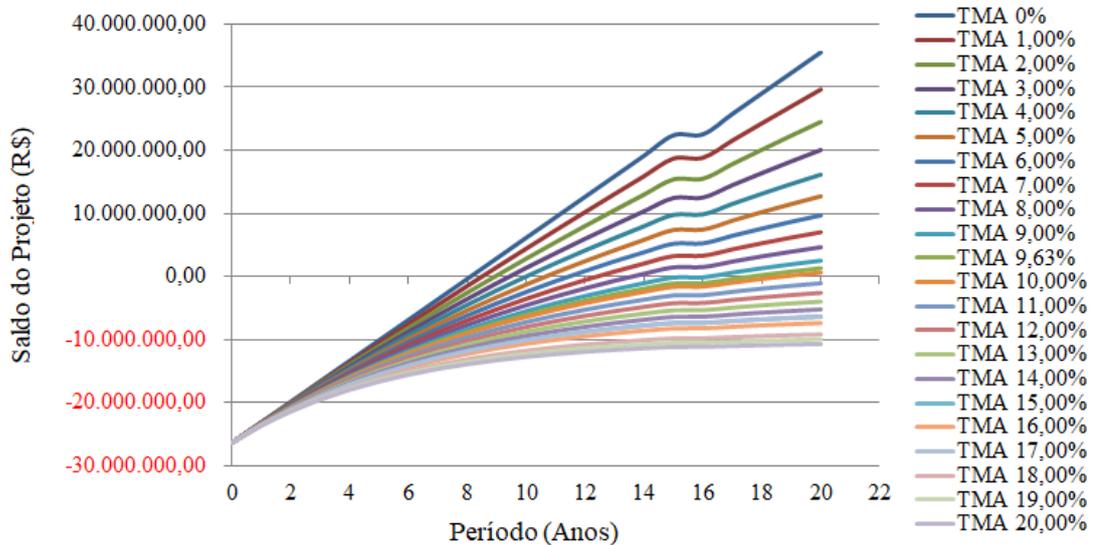
A partir dessas análises, podemos concluir que o VPL mostra-se sensível a alterações na TMA, portanto, ela deve ser bem estimada a fim de evitar perdas na rentabilidade do projeto.

Ainda no gráfico, pode-se verificar que o ponto no qual o VPL deixa de ser positivo e passa a ser negativo, coincide com o valor da TIR do projeto, como esperado.



**Figura 4.3** – Análise de Sensibilidade: VPL em função da TMA (DO AUTOR, 2018).

Na Figura 4.4, as curvas traçadas ilustram o saldo ajustado do projeto, ao longo dos anos de operação da usina, para diferentes valores da TMA. O *Payback* Descontado representa o momento em que o saldo do projeto se iguala a zero; portanto, é possível avaliar no gráfico a tendência no comportamento do *Payback* Descontado, e verificar para quais valores de TMA o projeto é viável, ou seja, quando o saldo ajustado torna-se positivo em período inferior à vida útil do projeto, garantindo assim o retorno do investimento.



**Figura 4.4** – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função da TMA (DO AUTOR, 2018).

No gráfico é possível observar que o período de retorno do investimento aumenta à medida que a TMA também aumenta, tornando o projeto menos rentável. No melhor cenário, do ponto de vista do *Payback* Descontado, o retorno do investimento se dá em 8,1 anos para uma TMA igual a zero.

A Tabela 4.7 mostra o período de retorno do investimento para os diferentes valores de TMA, conforme estudados nesta análise. Pode-se constatar que, para valores de TMA superiores a 10%, o retorno do projeto se dá em período maior do que a vida útil de operação da usina, tornando o projeto inviável.

**Tabela 4.7** – *Payback* Descontado em Função da TMA

TMA [% a.a.]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]	TMA [% a.a.]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
0	8,1	10,00	18,7
1,00	8,5	11,00	>20
2,00	8,9	12,00	>20
3,00	9,4	13,00	>20
4,00	10,0	14,00	>20
5,00	10,7	15,00	>20
6,00	11,5	16,00	>20
7,00	12,4	17,00	>20
8,00	13,6	18,00	>20
9,00	16,2	19,00	>20
<b>9,63</b>	<b>17,7</b>	20,00	>20

Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.3.2 Sensibilidade à tarifa de energia elétrica

Nas Figuras 4.5 e 4.6 estão apresentados o comportamento do VPL e *Payback* Descontado, respectivamente, em função de variações na tarifa média ponderada de energia elétrica. Esta análise é importante na previsão de desempenho da usina, já que o preço da tarifa pode sofrer alterações devido às condições de operação e de mercado.

A variação do VPL tende a elevar-se com o aumento da tarifa média ponderada de energia elétrica e diminui conforme a tarifa também é reduzida.

Uma redução de 3,6% no valor da tarifa, ou seja, de 0,55 R\$/kWh, no caso base para 0,53 R\$/kWh, é suficiente para mudar o cenário de viabilidade, tornando o VPL negativo. Este dado é preocupante, pois, nas condições estudadas, indica que o projeto é viável apenas para tarifas superiores a 0,53 R\$/kWh, valor muito superior àquele pago por consumidores de baixa tensão, por exemplo. Assim, para este parâmetro, existe uma margem

pequena para flutuações, mostrando a fragilidade do ponto de vista de operação comercial da tecnologia; o que, de uma maneira geral, não está divergente das observações apontadas na literatura.

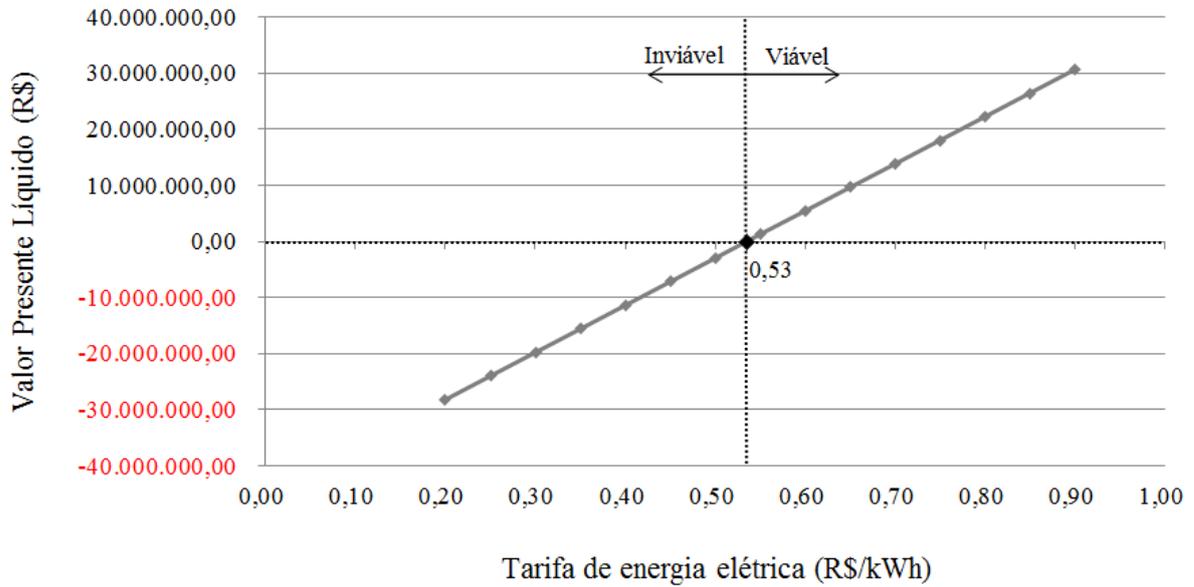


Figura 4.5 – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da tarifa de energia (DO AUTOR, 2018).

As análises demonstram que, tanto em hipótese mais otimista quanto em hipótese mais pessimista, uma variação de 64% no valor da tarifa provoca variação de 2.256% no VPL, indicando, assim, que o VPL é muito sensível a variações na tarifa de energia praticada.

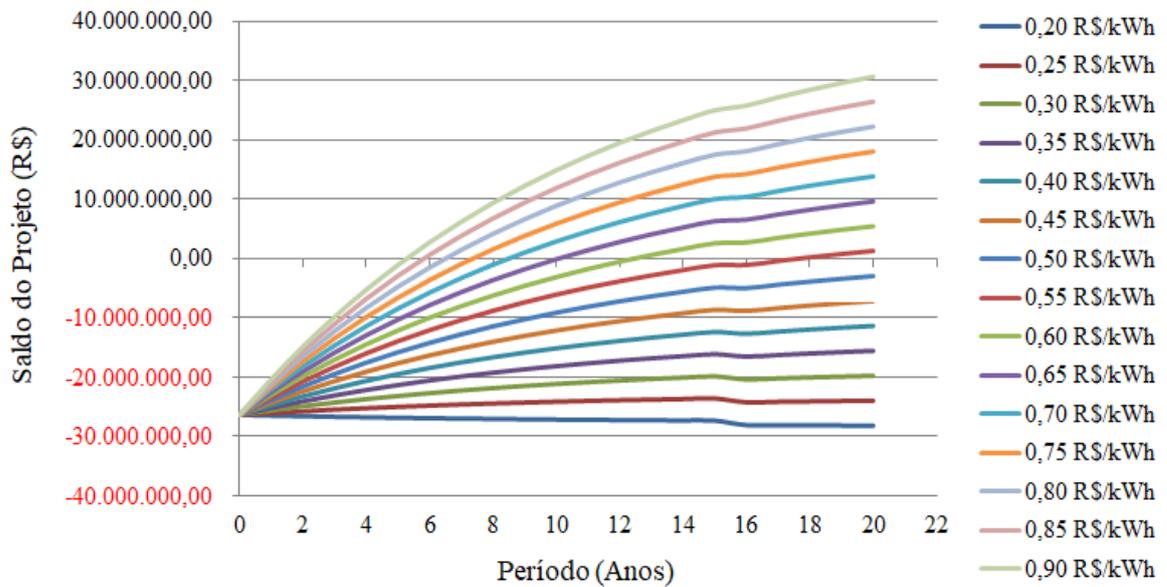


Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações da tarifa de energia elétrica (DO AUTOR, 2018).

O período de recuperação do investimento se torna tão melhor – ou seja, recupera-se em menor tempo – quanto maior é a tarifa, como pode ser observado na Figura 4.6, que mostra a evolução do saldo reajustado do projeto para diferentes tarifas de energia:

O comportamento do *Payback* Descontado está descrito na Tabela 4.8. Conforme se observa, saldos positivos aparecem antes do vigésimo ano de operação para tarifas superiores a 0,50 R\$/kWh.

**Tabela 4.8** – *Payback* Descontado em Função da Tarifa de Energia Elétrica

Tarifa [R\$/kWh]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
0,20	>20
0,25	>20
0,30	>20
0,35	>20
0,40	>20
0,45	>20
0,50	>20
<b>0,55</b>	<b>17,7</b>
0,60	12,5
0,65	10,1
0,70	8,5
0,75	7,4
0,80	6,5
0,85	5,8
0,90	5,3

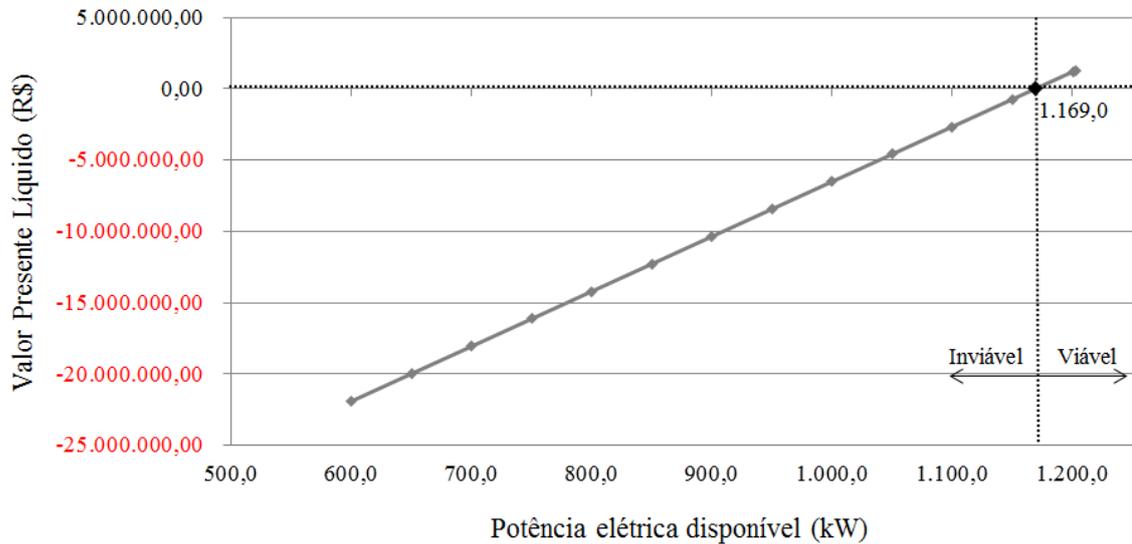
Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.3.3 Sensibilidade à potência elétrica disponível

A potência elétrica também foi variada com o intuito de se estudar seus impactos nos indicadores de viabilidade econômica. Os efeitos sentidos no VPL e *Payback* Descontado estão demonstrados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

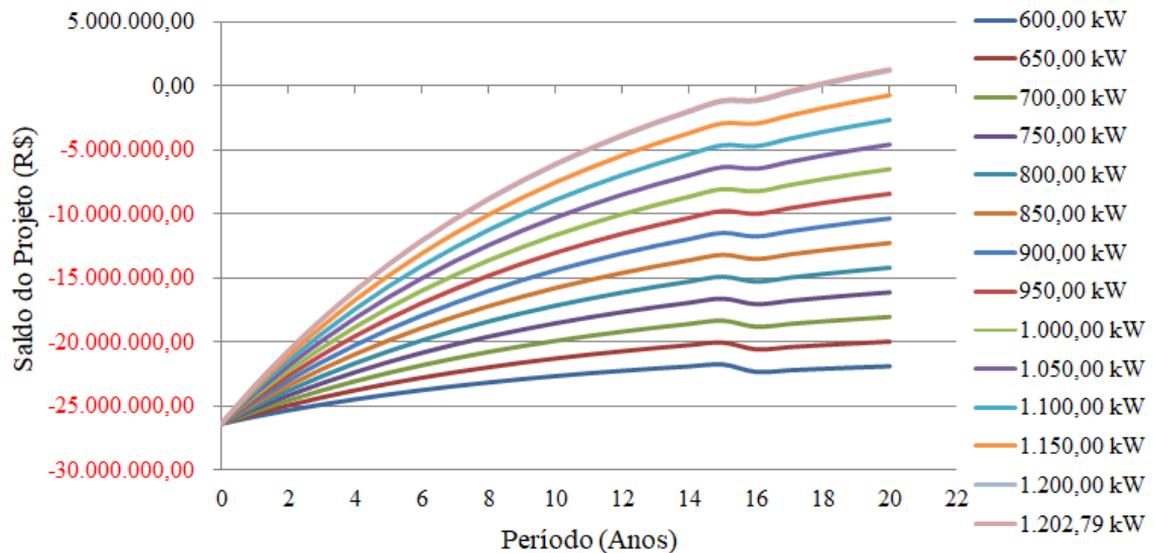
Como se pode constatar na Figura 4.7, o VPL aumenta à medida que a potência disponível também aumenta, melhorando o resultado econômico do projeto. Nas condições

estudadas, a viabilidade se dá diante de potências elétricas superiores a 1.169 kW, um dado alarmante, já que permite pequenas variações de potência em relação ao caso base, da ordem de 3%, sem que altere a viabilidade do projeto.



**Figura 4.7** – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da potência elétrica (DO AUTOR, 2018).

No horizonte mais pessimista, o VPL apresentou valor de -R\$ 21.892.132,97 para uma potência de 600 kW, isso significa que uma variação de aproximadamente 50% na potência provocou uma variação de 1.783% no VPL em comparação ao caso base, demonstrando que o indicador é bastante sensível ao parâmetro analisado. O melhor cenário é aquele do caso base, já que a potência máxima está limitada àquela dimensionada em estudo.



**Figura 4.8** – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações da potência elétrica disponível (DO AUTOR, 2018).

O *Payback* Descontado, como mostrado na Figura 4.8 pelas curvas de saldo reajustado do projeto para diferentes valores de potência disponíveis, segue a mesma tendência do indicador anterior, apresentando melhor desempenho à medida que a potência elétrica disponível aumenta.

Do ponto de vista do retorno do investimento, o projeto é viável a uma potência elétrica superior a 1.150 kW e sua evolução pode ser acompanhada pela Tabela 4.9:

**Tabela 4.9** – *Payback* Descontado em Função da Potencia Elétrica Disponível

Tarifa [kW]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
600	>20
650	>20
700	>20
750	>20
800	>20
850	>20
900	>20
950	>20
1.000	>20
1.050	>20
1.100	>20
1.150	>20
1.200	17,8
<b>1.202,79</b>	<b>17,7</b>

Fonte: Do autor (2018).

Os dois indicadores de viabilidade estudados mostraram-se bastante sensíveis a variações nesse parâmetro, admitindo uma margem pequena de erros em seu dimensionamento, portanto, trata-se de um item cuja mensuração deve ser bastante criteriosa.

#### 4.2.3.4 Sensibilidade ao custo de O&M

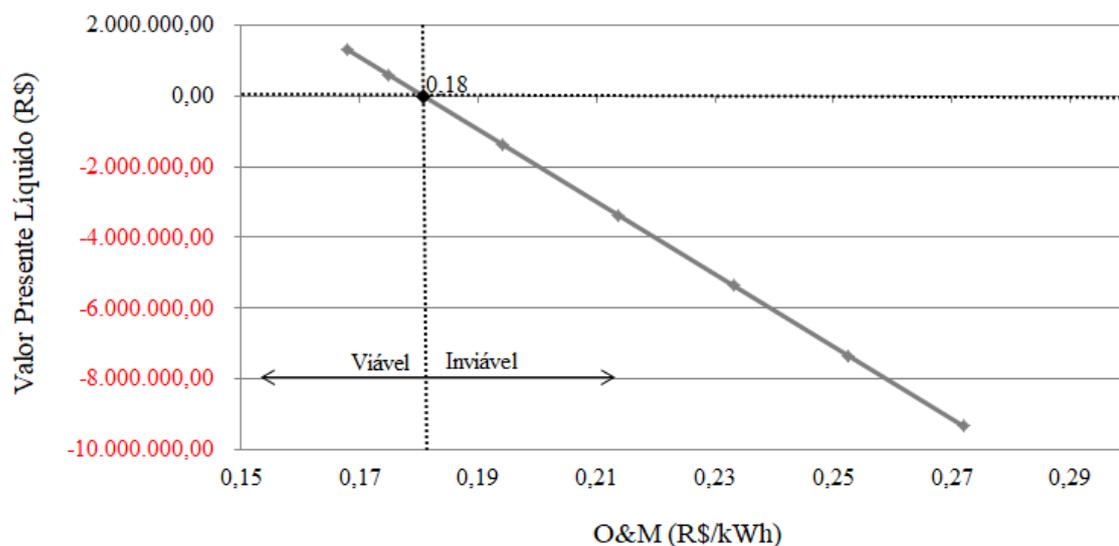
O intuito desta análise é verificar a influência dos custos de O&M na viabilidade econômica do projeto, considerando um intervalo de valores que abranja aqueles indicados

por diferente literatura, ou seja: 0,19 a 0,27 R\$/kWh (0,05 – 0,07 U\$/kWh), de INTHARATHIRAT e SALAM (2016), em comparação ao adotado neste estudo, de 0,17 R\$/kWh (0,04 U\$/kWh). Para a análise, considerou-se U\$ 1,00 igual a R\$ 3,8847005, segundo o Banco Central, em 19 de julho de 2018.

A Figura 4.9 mostra as variações do VPL, à medida que alterações são executadas nos valores de O&M dentro do intervalo citado no parágrafo anterior.

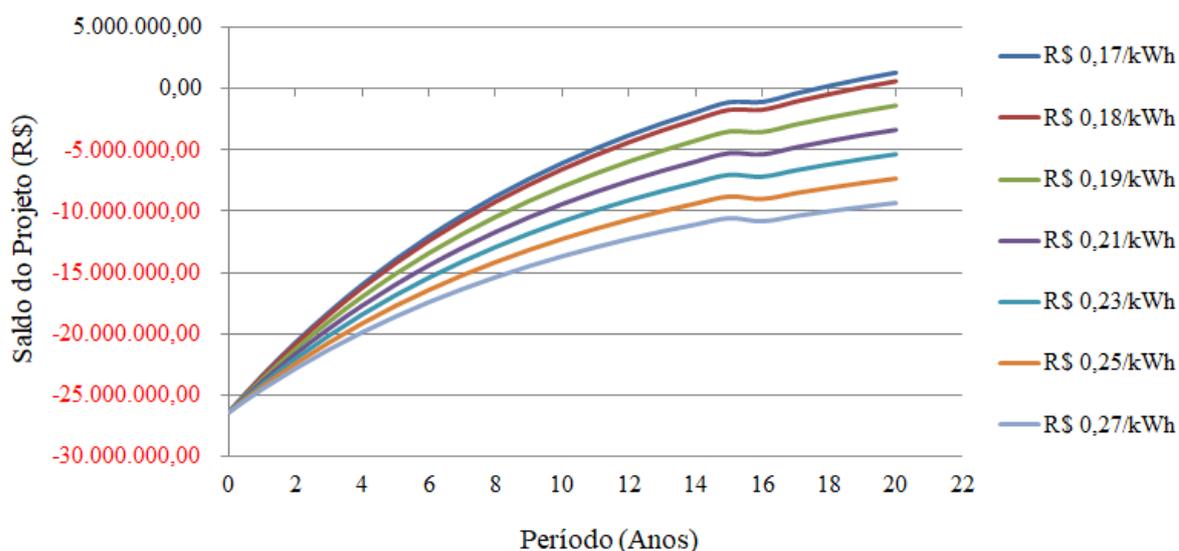
Conforme se pode observar, o VPL diminui à proporção que os custos com O&M aumentam, ou seja, diminuindo a rentabilidade do projeto. No cenário mais pessimista, para O&M de 0,27 R\$/kWh, o VPL apresenta valor de - R\$ 9.320.416,10, de modo que uma variação de 30% do parâmetro acarreta uma alteração de cerca de 800% do indicador.

Nesta análise, verificou-se o apontamento de inviabilidade do projeto quando pequenas variações foram simuladas nos custos de O&M, tornando-o impraticável com valores de O&M superiores a 0,18 R\$/kWh; ou seja, uma variação de 10,0% em relação ao caso base.



**Figura 4.9** – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo de O&M (DO AUTOR, 2018).

O aumento nos custos de O&M também reflete prejuízos no retorno do investimento, conforme demonstrado nas análises do *Payback* Descontado e de acordo com a Figura 4.10:



**Figura 4.10** – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo de O&M (DO AUTOR, 2018).

A Tabela 4.10 mostra o comportamento do *Payback* Descontado à medida que se aumentam os custos de operação e manutenção. De sua leitura, constata-se que o projeto é viável para custos de O&M inferiores a 0,19 R\$/kWh, mas se torna inviável para custos de aí em diante.

**Tabela 4.10** – *Payback* Descontado em Função do Custo de O&M

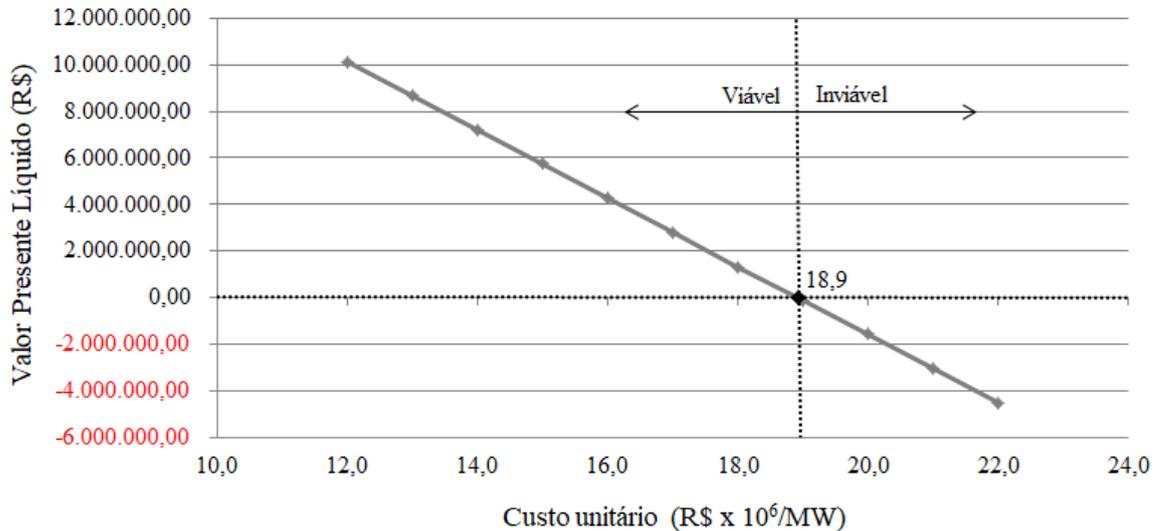
O&M [R\$/kWh]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
<b>0,17</b>	<b>17,7</b>
0,18	18,8
0,19	>20
0,21	>20
0,23	>20
0,25	>20
0,27	>20

Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.3.5 Sensibilidade ao custo unitário

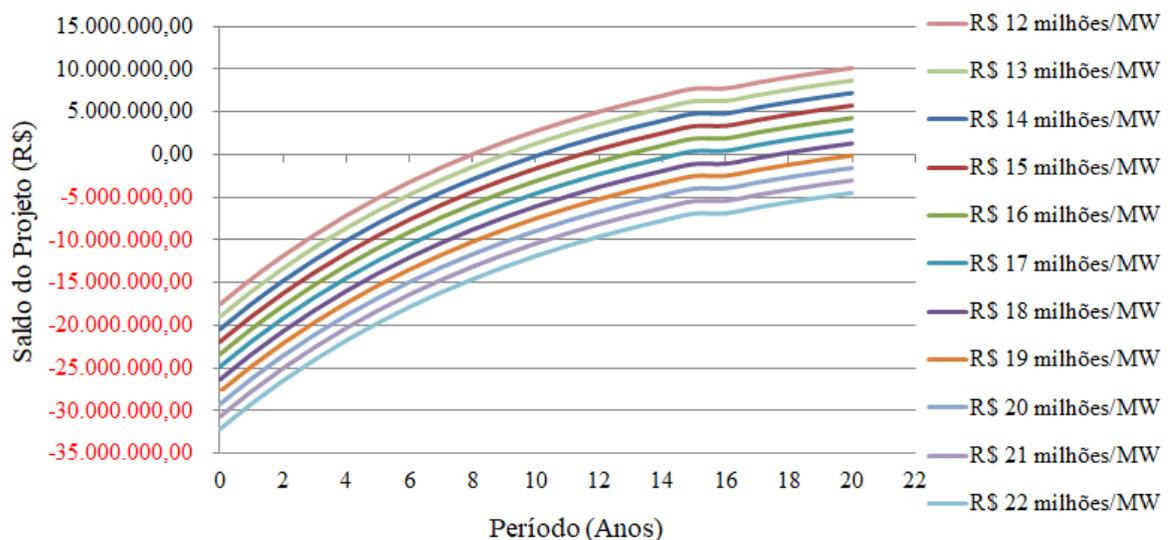
O custo unitário do projeto foi estimado em aproximadamente R\$ 18 milhões/MW. Nas Figuras 4.11 e 4.12, pode-se examinar a sensibilidade do VPL e *Payback* Descontado, respectivamente, em função de variações do custo unitário, entre R\$ 12

milhões/MW e R\$ 22 milhões/MW. A literatura sugere economia de escala, com aumento da capacidade instalada reduzindo o custo unitário do investimento (TORRES; BAJAY, 2015).



**Figura 4.11** – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo unitário (DO AUTOR, 2018).

O VPL do projeto decresce linearmente, em função do aumento do custo unitário. No gráfico da Figura 4.11, pode ser observado que o VPL assume valores menores que zero para custo unitário superior a R\$ 18,9 milhões/MW. No intervalo estudado, o VPL variou de R\$ 10.124.132,63 a - R\$ 4.500.358,96 à proporção que o custo unitário variou de R\$ 12 milhões/MW a R\$ 22 milhões/MW, respectivamente.



**Figura 4.12** – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo unitário (DO AUTOR, 2018)

A Tabela 4.11 mostra o comportamento do *Payback* Descontado para os diferentes valores de custos unitários considerados nessa análise.

**Tabela 4.11** – *Payback* Descontado em Função do Custo Unitário

Custo Unitário [R\$ x 10 <sup>6</sup> /MW]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
12	8,0
13	9,0
14	10,2
15	11,4
16	12,9
17	14,5
<b>18</b>	<b>17,7</b>
19	>20
20	>20
21	>20
22	>20

Fonte: Do autor (2018).

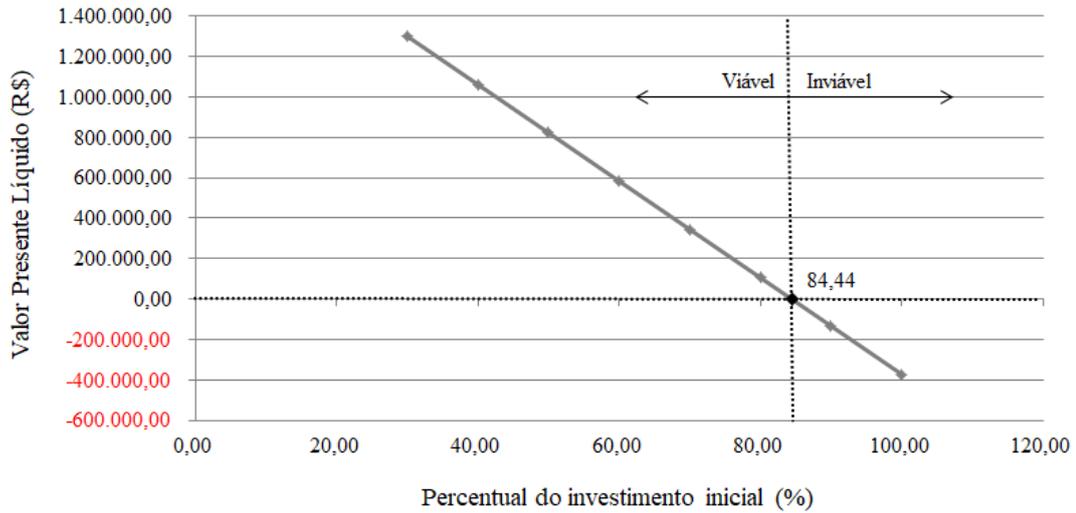
Do ponto de vista do *Payback* Descontado, o retorno do investimento também é prejudicado perante o aumento do custo unitário, revelando-se inviável para custos acima de R\$ 19 milhões/MW, quando o retorno do investimento se dá em período de tempo superior à vida útil do projeto.

#### 4.2.3.6 Sensibilidade ao custo de reinvestimento na linha de processamento de RSU

Segundo o fornecedor dos equipamentos, a linha de processamento de RSU possui um período de vida útil de quinze anos, inferior àquele da planta de gaseificação, de vinte anos. Desta forma, para que o planta opere pelo período máximo possível, foi previsto no estudo um valor de reinvestimento na linha de processamento de RSU para os anos adicionais.

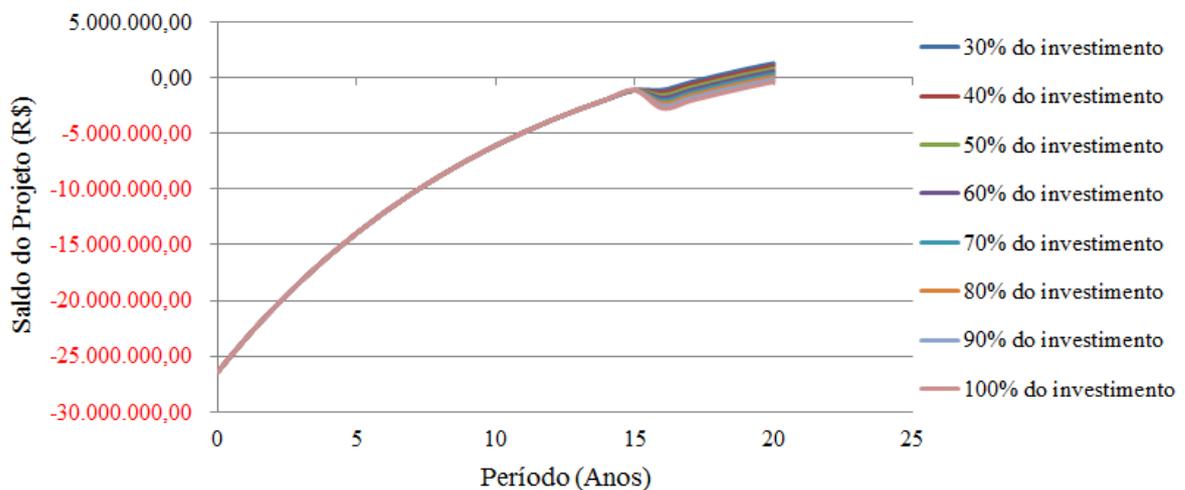
Este valor de reinvestimento foi definido em 30% do valor investido inicialmente na planta de processamento de RSU.

Devido à incerteza nessa estimativa, uma análise de sensibilidade foi realizada, a fim de se estudar os efeitos da variação desses custos no indicador de viabilidade econômica VPL, considerando gastos de até 100% do valor inicialmente investido na planta. A figura 4.13 mostra os efeitos dessa variação no VPL.



**Figura 4.13** – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações do custo de reinvestimento na linha de processamento de RSU (DO AUTOR, 2018).

O VPL cai, conforme o custo aumenta para a hipótese analisada, e se torna negativo, indicando inviabilidade do projeto, diante de percentuais mais altos que 84,44%, como pode ser constatado no gráfico da Figura 4.13. No entanto, pode-se entender que, para as condições analisadas, este parâmetro não demonstra grande preocupação no que diz respeito à viabilidade do projeto, apesar de seu potencial para diminuir os retornos esperados.



**Figura 4.14** – Análise de Sensibilidade: Saldo do projeto em função de variações do custo de reinvestimento na linha de processamento de RSU (DO AUTOR, 2018).

A influência deste parâmetro sobre o *Payback* Descontado pode ser vista, a partir da curva de saldos ajustados do projeto, no gráfico da Figura 4.14. As curvas para os diferentes percentuais de reinvestimento considerados apresentam diferenças apenas a partir do 16º ano, momento a partir do qual este valor incide no fluxo de caixa do projeto.

A Tabela 4.12 sintetiza o período de retorno do investimento para os diferentes percentuais de investimento na linha de processamento de RSU simulados. Os dados podem servir de base para negociação de valores com fornecedores, por exemplo.

**Tabela 4.12** – *Payback* Descontado em Função do Custo de Reinvestimento na Linha de Processamento de RSU

Percentual do investimento inicial [%]	<i>Payback</i> Descontado [Anos]
<b>30</b>	<b>17,7</b>
40	18,0
50	18,5
60	18,9
70	19,3
80	19,8
90	>20
100	>20

Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.3.7 Sensibilidade ao tempo de vida útil do projeto

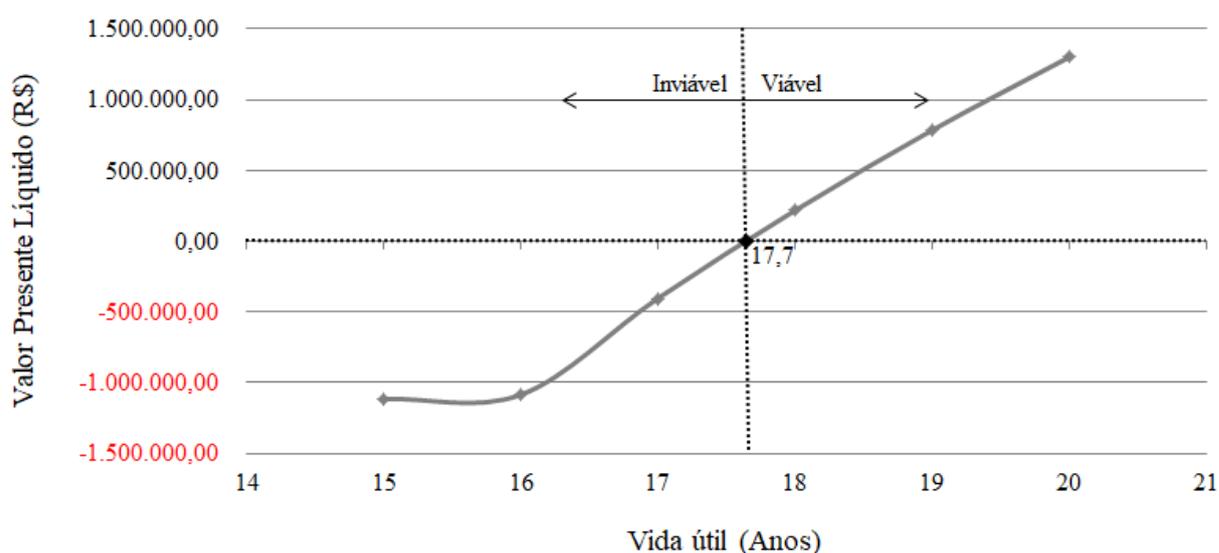
A vida útil do projeto foi variada de modo a analisar seus reflexos no VPL do projeto. Para tanto, fez-se uma análise da redução do período de operação ano a ano, até o período de vida útil da planta de processamento de RSU, que é de quinze anos. A figura 4.15 ilustra o comportamento do VPL diante da variação da vida útil do projeto.

O VPL apresenta uma melhora de desempenho à medida que o tempo de vida útil do projeto aumenta. Portanto, neste cenário, a melhor hipótese seria de operação da usina durante vinte anos.

É possível notar uma alteração no comportamento da curva de VPL a partir do 16º ano, pois neste momento ocorre o reinvestimento na linha de processamento de RSU, que acarreta uma entrada de caixa menor. Com isso, pouco impacto é causado no VPL do 16º ano

em relação àquele do 15º ano. Com a retomada de maiores entradas de caixa a partir do 17º ano, tem-se seus reflexos no cálculo do VPL conforme se constata no desempenho da curva.

O *Payback* Descontado torna-se inviável para vida útil de operação menor ou igual a dezessete anos e oito meses, pois as fontes de receita e despesas não retornam o valor do investimento para períodos inferiores a este. Nota-se também nesta análise que o *Payback* Descontado é o ponto no qual a viabilidade do projeto do ponto de vista do VPL é alterada.



**Figura 4.15** – Análise de Sensibilidade: VPL em função de variações da vida útil do projeto (DO AUTOR, 2018).

### 4.3 Análises

As análises de caracterização do RSU de Boa Esperança/MG revelaram a composição de um resíduo adequado para aplicação em processo termoquímico de gaseificação. O que foi posteriormente comprovado por testes bem sucedidos de gaseificação, realizados em planta piloto, através de uma chama constante proveniente da queima do gás presente no *flare*.

A caracterização do gás obtido a partir de RSU revelou um combustível gasoso de médio poder calorífico, passível de queima para geração de energia, como também pode ser constatado nos testes de gaseificação em planta piloto.

Os estudos de eficiência do processo de gaseificação chegaram a valores esperados pela literatura 62%, sem que, contudo, nenhum estudo para melhoria da eficiência do reator termoquímico tenha sido executado, constatando-se aí a possibilidade de melhoria no seu desempenho em estudos futuros.

Para a eficiência do processo, a potência elétrica estimada no estudo atingiu valores suficientes para manutenção da operação de toda a planta, além da possibilidade de exportação de energia para a rede elétrica 1.202,79kW, demonstrando a viabilidade da tecnologia, conforme observada na avaliação econômica determinística.

Apesar de constatada a viabilidade econômica da tecnologia, a análise de sensibilidade mostrou que alguns parâmetros sensibilizam os resultados mais que outros.

No tocante a variações na tarifa média ponderada da energia elétrica e na potência elétrica, notou-se que alterações de apenas 3,6 e 3,0% destes parâmetros, respectivamente, foram suficientes para tornar o projeto inviável, levando em conta os indicadores estudados. Esse dado é preocupante, pois a tarifa considerada no estudo está acima daquela ofertada aos consumidores finais de baixa tensão, tais como residenciais, rurais e prefeituras, que são atendidos pela mesma companhia de distribuição.

Variações na TMA e custos de O&M apresentaram um potencial intermediário para provocar alterações nos resultados, as quais, entre 7,6% e 10%, respectivamente, foram suficientes para afetar a viabilidade do projeto. Os custos de O&M apresentam mais uma preocupação, por estarem abaixo daqueles citados na literatura. No entanto, os textos encontrados não apresentam maiores detalhes sobre as tecnologias aplicadas ou mesmo relacionadas às particularidades regionais.

Outros fatores estudados, tais como a variação do horizonte de operação da usina, a manutenção da linha de processamento ao final de sua vida útil e o custo unitário, apresentaram efeitos menos impactantes à exequibilidade do projeto. Ainda assim foram igualmente importantes na análise de resposta da tecnologia a variações de mercado e internas, demonstrando o potencial para afetar os resultados do investimento.

## 5 CONCLUSÕES

No contexto da discussão sobre sustentabilidade de cidades, a inovação tecnológica ocupa um importante papel nos processos de governabilidade para a promoção do desenvolvimento sustentável, conferindo alternativas para a gestão de conflitos a estas inerentes.

Nas cidades, os problemas advindos da geração e má gestão de RSU, contraditórios aos objetivos do desenvolvimento sustentável, podem ser sanados ou dirimidos através da aplicação de inovações tecnológicas aliadas a sistemas de gestão, projetos de educação e promoção da cidadania.

Os RSU, oriundos de atividades domésticas, do comércio e serviços de varrição e limpeza pública nas cidades, têm sido alvo de preocupações relacionadas à sustentabilidade urbana no que concerne sua geração e neutralização, uma vez que representam fonte de problemas socioambientais, quando dispostos inadequadamente no meio ambiente.

Redução, reuso, reciclagem e uso energético são alternativas de destinação frente à disposição final em aterro sanitário. No entanto, este último ainda é largamente aplicado, muitas vezes sem as devidas medidas de proteção do meio ambiente e população. O aproveitamento energético confere uso econômico ambientalmente adequado para os RSU, como fontes alternativas de energia, por meio de tecnologias como a gaseificação em leito fluidizado circulante, que se baseia na conversão termoquímica do resíduo sólido em um combustível gasoso.

No Brasil, mesmo no caso de aterros sanitários, com todas as medidas de proteção necessárias ao meio ambiente, o RSU é descartado inadequadamente, visto que muitos materiais ali dispostos como medida final de tratamento poderiam ser reaproveitados. Tal inobservância contraria as normas já estabelecidas e evidencia a necessidade de maior adequação ao determinado pela PNRS, instituída em 2010.

A tecnologia de gaseificação demonstra alinhamento com as necessidades atuais de intervenção das cidades nas questões relacionadas ao meio ambiente e cidadania, no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Oferece rota tecnológica para destinação final e aproveitamento energético destes resíduos, contribui para a geração distribuída e para a diversificação da matriz energética.

Ainda que nenhum estudo sociológico ou ambiental tenha sido executado no escopo deste trabalho, a literatura relata que a redução no volume para disposição final de resíduos, a diminuição de emissão de gases do efeito estufa, a eliminação de pontos de

poluição de solo e águas e de riscos de proliferação de doenças são benefícios que podem ser observados, decorrentes da intervenção tecnológica em questão. Portanto, avaliações ambientais e sociológicas cabem como indicação para trabalhos futuros.

Do ponto de vista dos desempenhos técnico e econômico analisados no âmbito deste trabalho, a tecnologia mostra-se viável para as condições estudadas. As características do resíduo e do gás produzido revelaram um material apto para uso no processo de gaseificação, que, em testes realizados em planta piloto, mostraram uma eficiência tal suficiente para geração de energia elétrica que mantenha toda a planta industrial em operação além de exportar energia para a rede elétrica.

No entanto, para a avaliação econômica, uma análise de sensibilidade demonstrou um caráter frágil quanto à viabilidade, que no conjunto das respostas aos estudos realizados evidenciam que, apesar de constatada a viabilidade econômica de aplicação da tecnologia na usina do projeto experimental, dentro das condições estudadas, essa condição pode ser facilmente afetada, pois se mostrou bastante sensível a variações de alguns dos parâmetros dimensionados no fluxo de caixa, que podem ser influenciados tanto por fatores internos como externos ao projeto, levando à inferência de uma viabilidade ainda não consolidada.

Esta conclusão não é diferente daquelas encontradas na literatura, que observam um grande número de usinas operando em condições consideradas não comerciais. Nesse sentido, entende-se que, em um primeiro momento, a viabilidade de implantação da tecnologia deve ser acompanhada de incentivos, até que alcance a capacidade de se autossustentar.

Tais subsídios se referem, por exemplo, à isenção de impostos para aquisição de equipamentos, à criação de leilões de energia regionais ou com tarifas especiais, semelhante ao ocorrido no PROINFA, ações entre entidades públicas e privadas que incentivem o aumento da demanda e incentivos tarifários entre outros.

Outra hipótese de rendimento relacionada às receitas do projeto diz respeito ao ganho com a venda de materiais recicláveis, que poderia melhorar o desempenho do fluxo de caixa. No entanto, este ponto deve ser alvo de investigação mais acurada, pois envolve a comunidade de catadores que se desenvolveu em torno das oportunidades geradas pela inadequada disposição do RSU. Tal condição foi sustentada até que adequação relativa à disposição do RSU se tornasse uma preocupação ou obrigação legal das prefeituras, de acordo com os termos da PNRS.

Tratando-se de tecnologia ambientalmente limpa, ainda sem aplicação comercial, o estímulo a sua consolidação traz, indiscutivelmente, ganhos sociais e ambientais que justificam sua adoção e incentivo.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de dar continuidade às pesquisas, ampliando e aprofundando o conhecimento do tema, sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- i. Análise do gás de síntese do RSU de Boa Esperança;
- ii. Estudo de “eficientização” do processo de gaseificação, alterando as variáveis que influenciam no processo, tais como o fluido de gaseificação, a temperatura do procedimento e os custos desses fatores;
- iii. Estudo dos impactos técnicos de conexão da planta à rede;
- iv. Os ganhos ambientais seriam maiores tanto quanto fosse a concentração de  $H_2$  no gás produzido, que, em sua combustão, não geraria GEE. Estudos para obtenção desse gás a partir de  $NH_4$  e CO ou  $CO_2$  podem ser desenvolvidos, de modo a propor rotas de tratamento do gás produzido que aumentassem seu percentual na composição final;
- v. Avaliação ambiental e sociológica dos impactos de implantação da usina;
- vi. Análise de viabilidade econômica considerando-se: (i) as variáveis de risco, físicas e financeiras, presentes nesse tipo de projetos de investimento; (ii) as diferentes alternativas de comercialização da energia elétrica e de modelos de negócios disponíveis no mercado; (iii) a inserção das flexibilidades operacionais por meio da Teoria das Opções Reais.

### 5.2 Contribuições do trabalho

Menezes Neto, J. T.; ALVES, A. J.; CARVALHAES, V. An Efficiency Study on the Urban Solid Gasification Process for Electric Power Generation. **Anais...** In: International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), XVIII, 2017, Kouty nad Desnou. Kouty nad Desnou, 2017.

Menezes Neto, J. T.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; CARVALHAES, V. Avaliação Técnico-Econômica de Planta Industrial para Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos e Geração de Energia Elétrica. **Anais...** In: Congresso Brasileiro de Automática, XXII, 2018, João Pessoa. João Pessoa, 2018.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. **Os desafios da sustentabilidade**: Uma ruptura urgente. 3. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2007, p. 167-171.

ANADON, L. D.; CHAN, G.; Harley, A. G.; MATUS, K.; MOON, S.; MURTHY, S. L.; CLARK, W. C. Making technological innovation work for sustainable development. **HKS Faculty Research Working Paper Series RWP15-079**, Harvard University, 2017.

ARAUJO, B. G. P.; OLIVA JUNIOR, E. F.; VIEIRA JUNIOR, A. S. Resíduos Sólidos Urbanos: Análise sobre situação do conjunto Albano Franco – Riachão do Dantas-SE. **Revista Eletrônica da Faculdade José Augusto Vieira**, v. 4, ed. especial, p. 45-58, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Caderno informativo Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2012.

Disponível em:

<[http://www.abrelpe.org.br/\\_download/informativo\\_recuperacao\\_energetica.pdf](http://www.abrelpe.org.br/_download/informativo_recuperacao_energetica.pdf)>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2015b. Disponível em:

<[http://www.abrelpe.org.br/arquivos/pub\\_estudofinal\\_2015.pdf](http://www.abrelpe.org.br/arquivos/pub_estudofinal_2015.pdf)>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 21 p.

AZEVEDO, P. B.; LEITE, J. C. A.; OLIVEIRA, W. S. N.; SILVA, F. M.; FERREIRA, P. M. L. Diagnóstico da degradação ambiental na área do lixão de Pombal – PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. v. 10, n. 1, p. 20 -34, 2015.

BEGUM, S.; RASUL, M.G.; CORK, D.; AKBAR, D. An experimental investigation of solid waste gasification using a large pilot scale waste to energy plant. **Procedia Engineering**. v. 90, p. 718-724, 2014.

BIZZO, W. A. Capítulo V: Sistemas de combustão de resíduos sólidos para geração de energia. In: Autores. **Escola de Combustão III**. Salvador: Rede Nacional de Combustão, 2011.

BRÁS, I.; SILVA, M. E.; LOBO, G.; CORDEIRO, A.; FARIA, M.; LEMOS, L. T. Refuse derived fuel from municipal solid waste rejected fractions – a case of study. **Energy Procedia**, v. 120, p. 349-356, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução normativa ANEEL nº 247, de 21 de dezembro de 2006**. Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500kW e dá outras providências. Brasília. 2006.

BRASIL. 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. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Submódulo dos procedimentos de regulação tarifária – PRORET: 12.3 – Custo de capital da geração**. Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Cartilha energia: como analisar gastos com energia**. Brasília, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogas. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília, 2016.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **O crescimento da economia brasileira 2018-2023**. 2018. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14760/1/Perspectivas%202018-2023\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14760/1/Perspectivas%202018-2023_P.pdf). Acesso em: 27 ago. 2018.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 171-180, 2012.

CARVALHAES, V. Análise do potencial energético de resíduo sólidos urbano para conversão em processos termoquímicos de gaseificação. **Dissertação** (Mestrado em Ciências

Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2013.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 11 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics**: an engineering approach. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, p. 445-453, 2006.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existente no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte**. São Paulo: CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2002. Disponível em: <[http://143.107.4.241/download/publicacoes/Estado\\_da\\_Arte.pdf](http://143.107.4.241/download/publicacoes/Estado_da_Arte.pdf)>.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Valores de Tarifas e Serviços**. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores\\_de\\_tarifa\\_e\\_servicos.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx)>. Acesso em: 19 de jul. 2018.

DAMODARAN, A. **Avaliação de empresas**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p. 22-54, 2007.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS; CARBOGAS. Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica. Relatório. Rio de Janeiro. 2016. Relatório. Mimeografado.

GÓMEZ, E. O. Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1996.

GONÇALVES, M. A.; TANAKA, A. K.; AMEDOMAR, A. A. A destinação final de resíduos sólidos urbanos: Alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**. v. 5, n. 1, p. 96-129, 2013.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 7 ed. São Paulo : Atlas. 2000, 386 p.

INFIESTA, L. R. Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema - Projeto CIVAP. **Monografia** (Especialização em Energias Renováveis) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico**: características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

INTHARATHIRAT, R.; SALAM, P. A. Valorization of MSW-to-energy in Thailand: Status, challenges and prospects. **Waste Biomass Valor**, v. 7, p. 31-57, 2016.

JARA, R. P. El marketing de ciudades y la gestión urbana socialmente responsable, caso ciudad de Chiclayo 2016-2035. **Contabilidad y Negocios**, v. 11, n. 21, p. 93-112, 2016.

JONES, J. C. **Thermal processing of waste**. Aberdeen: J. C. Jones & Ventus Publishing ApS, p. 20-60, 2010.

JOSÉ, H. J.; BORK, J. A. Capítulo II: Caracterização de resíduos. In: Autores. **Escola de Combustão III**. Salvador: Rede Nacional de Combustão, 2011.

KINTO, O. T.; GALVÃO, L. C. R.; GRIMONI, J. A. B.; UDAETA, M.E. M. **Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo**. GEPEA – USP, 2002. Disponível em:  
<[LA VILLETTA, M.; COSTA, M.; MASSAROTTI, N. Modeling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. \*\*Renewable and Sustainable Energy Reviews\*\*. v. 74, p. 71-88, 2017.](https://www.researchgate.net/publication/242759985_ENERGIA_DA_GASEIFICACAO_D E_BIOMASSA_COMO_OPcao_ENERGETICA_DE_DESENVOLVIMENTO_LIMPO.></a></p></div><div data-bbox=)

LEMES JUNIOR, A. B.; RIGO, C. M.; CHEROBIM, A. P. M. S. **Administração financeira**, 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 170-179, 2016.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica**: planejamento projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 2004, 103 p.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; LEITE, M. A. H.; ROCHA, M. H.; SALES, C. A. V. B.; MENDOZA, M. A. G.; CORAL, D. S. O. **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, p. 411-493, 2012.

MARTINS, M. F.; CANDIDO, G. A. Sistemas indicadores de sustentabilidade urbana: Os desafios do processo de mensuração, análise e monitoramento. **Sustentabilidade em debate**. v. 6, n. 2, p. 138-154, 2015.

MASSARINI, P; MURARO, P. RDF: from waste to resource – the Italian case. **Energy Procedia**. v. 81, p. 569-584, 2015.

MATSAKAS, L.; GAO, Q.; JANSSON, S.; ROVA, U.; CHRISTAKOPOULOS, P. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 26, p. 69-83, 2017.

MELO, B. A. Avaliação computacional de um sistema de gaseificação em leito fluidizado utilizando o software CSFB. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2008.

MENDOZA, M. A. G. Projeto e avaliação computacional do desempenho de leito fluidizado circulante para obtenção de gás de síntese a partir de bagaço de cana de açúcar. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2009.

MESJASZ-LECH, A. Municipal waste management in context of sustainable urban development. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 151, p. 244-256, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Capacidade de Geração no Brasil**. Brasília, 2018. Disponível em:  
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.

MOURA, J. P. Estudo das rotas tecnológicas para produção de biogás. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 6, n. 6, p. 1184-1197, 2012.

MOYA, D.; ALDÁS, C.; LÓPEZ, G.; KAPAJARU, P. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy by using waste-to-energy Technologies. *Energy Procedia*, v. 134, p. 286-295, 2017.

NÁSNER, A. M. L. Modelagem de uma planta piloto de gaseificação de combustível derivado de resíduos (CDR) em um sistema integrado a motor ciclo otto, utilizando o software Aspen Plus<sup>TM</sup>. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2015.

NOGUEIRA, M. F. M. Capítulo I: Introdução. In: Autores. **Escola de Combustão III**. Salvador: Rede Nacional de Combustão, 2011.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; BARROS, K. R. **Série de publicações temáticas do CREA-PR: Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos vol. 2**. CREA-PR, 2009.

OLIVEIRA, N. A. S. Educação ambiental e a percepção fenomenológica através de mapas mentais. **Revista Eletrônica Mestrado em Educação Ambiental**, vol. 16, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **2014 Revision of World Urbanization Prospects**. 2014. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/>>.

PASSOLONGO, R. Avaliação termodinâmica e econômica da integração de sistemas de gaseificação da biomassa em uma usina sucroalcooleira. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira. 2011.

PAVAN, M. C. O. Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: Avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil. **Tese** (Doutorado em Energia) – Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física, Universidade de São Paulo. 2010.

PHILIPPI JUNIOR, A.; MAGLIO, I. C.; COIMBRA, J. A. A.; FRANCO, R. M. **Municípios e meio ambiente: Perspectivas para a municipalização da gestão ambiental no Brasil**. São Paulo: Associação Nacional de municípios e meio ambiente, 1999, p. 19-31.

PRADO FILHO, J. F.; SOBREIRA, F. G. Desempenho operacional e ambiental de unidades de reciclagem e disposição final de resíduos sólidos domésticos financiadas pelo ICMS Ecológico de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 12, n. 1, 2007.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA. **Dados gerais**. 2013. Disponível em: <<http://www.boaesperanca.mg.gov.br/detalhe-da-materia/info/dados-gerais/6486>>.

QUITETE, C. P. B.; SOUZA, M. M. V. M. Remoção do alcatrão de correntes de gaseificação de biomassa: Processos e catalisadores. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p. 689-698, 2014.

RAZA, S. S.; JANAJREH, I.; GHENAI, C. Thermodynamics equilibrium analysis within the entrained flow gasifier environment. **International Journal of Thermal & Environmental engineering**, v. 4, n. 1, p. 47-54, 2012.

REED, T. B.; DAS, A. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. USA: Solar Energy Research Institute, 1981.

RODRIGUES, R. Modelagem e simulação de um gaseificador em leito fixo para o tratamento térmico de resíduos sólidos da indústria calçadista. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

SANCHES, C. G.; SANCHEZ, E. M. S.; MACIEL, H. S.; SAGÁS, J. C. Capítulo IV: Gaseificação e pirólise. In: Autores. **Escola de Combustão III**. Salvador: Rede Nacional de Combustão, 2011.

SILVA, G.; ROMERO, M. Sustentabilidade urbana aplicada: Análise dos processos de dispersão, densidade e uso e ocupação do solo para a cidade de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, Brasil. **EURE**, v. 41, n. 122, p. 209-237, 2014.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7. ed., Rio de Janeiro: LTC, p. 215-235, 2007.

SONTAG, A. G.; CRUZ, I. K. H.; BUTARELLI, F. P.; BERTOLINI, G. R. F. Análise de viabilidade para Sistema de tratamento de resíduo sólido urbano (RSU). **Anais...** In: Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, III, 2014, São Paulo. São Paulo, 2014.

SULLIVAN, W. G.; WICKS, E. M.; KOELLING, C. P. **Engineering Economy**, 14<sup>a</sup> ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, p. 190-234, 2009.

TARQUIM, A.; BLANK, L. **Engenharia econômica**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

TORRES, L.; BAJAY, S. Análise das políticas no aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Anais...** In: Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, X, São Paulo, 2015.

TORRES, O. F. **Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos**. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO. **Mapa mental do saneamento básico**. Rio de Janeiro: UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/mma30.htm>>.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO. **Mapa mental dos problemas do lixo**. Rio de Janeiro: UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/mma24.htm>>.

VANNI, T.; LUZ, P. M.; RIBEIRO, R. A.; NOVAES, H. M. D.; POLANCZYK, C. A. Avaliação econômica em saúde: aplicações em doenças infecciosas. **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 12, p. 2543-2552, 2009.

VANNUCCI, L. R. **Matemática financeira e engenharia econômica** – princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, p. 239-244, 2013.

WENZEL, B. M. Tratamento térmico de resíduos calçadistas: Estudo da gaseificação, tratamento dos gases e aproveitamento das cinzas. **Tese** (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

ZAMBRA, E. M.; SOUZA, P. A. R.; REINALDO, I. A.; PEREIRA, R. S. Gerenciamento municipal de resíduos sólidos urbanos: o papel estratégico de um centro de triagem em São Paulo. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 97-112, 2016.

ZHANG, X.; LI, H.; LIU, L.; BAI, C.; WANG, S.; ZENG, J.; LIU, X.; LI, N.; ZHANG, G. Thermodynamic and economic analysis of biomass partial gasification process. **Applied Thermal Engineering**. v. 129, p. 410-420, 2018.

ZHAO, L.; GIANNIS, A.; LAM, W. Y.; LIN, S. X.; YIN, K.; YUAN, G. A.; WANG, J. Y. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. **Sustainable Environment Research**. v. 26, p. 51-54, 2016.

**APÊNDICE**

## APÊNDICE A – Descrição Geral da Usina de Gaseificação e Geração de Energia Elétrica a partir de RSU

A usina para gaseificação de combustível derivado de RSU e geração de energia elétrica é um projeto experimental a ser realizado no município de Boa Esperança/MG pela concessionária de geração e transmissão de energia Furnas, no âmbito dos Projetos de P&D regulados pela ANEEL.

O projeto consiste na instalação de uma planta industrial de tratamento de RSU, composta por uma unidade de recebimento e tratamento dos resíduos gerados na cidade para produção de CDR; uma planta de gaseificação, na qual o CDR produzido será convertido em gás por meio de um reator termoquímico em leito fluidizado circulante; e uma planta de geração de energia, na qual o gás produzido é queimado para geração de eletricidade em ciclo Rankine.

O município, com 620 km<sup>2</sup> de área territorial, situa-se na microrregião do Baixo Sapucaí, sudoeste do estado de Minas Gerais, às margens do Lago de Furnas, portanto, em zona de influência da barragem da usina hidrelétrica que dá nome à empresa responsável pelo desenvolvimento do projeto.

A localização do município no mapa brasileiro pode ser vista na Figura A.1, elaborada pela Carbogas Energia LTDA., empresa fornecedora dos equipamentos e executora do projeto de instalação da usina.



**Figura A.1** – Localização do município de Boa Esperança no mapa territorial brasileiro e do estado de Minas Gerais (FURNAS; CARBOGAS, 2016)

A população, de 37.038 habitantes, segundo último recenseamento realizado (IBGE, 2010), conta hoje com um vertedouro a céu aberto, popularmente conhecido como lixão, para destinação final dos RSU coletados na cidade. A coleta segue rotina de trabalhos que acontecem nas segundas-feiras, terças-feiras, quartas-feiras, sextas-feiras e sábados, segundo informação da prefeitura.

Na Figura A.2, de autoria própria, registra-se o cenário atual de destinação dos RSU no município. No detalhe da imagem também aparece o local para futura instalação da usina, após obras de terraplanagem executadas pela prefeitura.



**Figura A.2** – Imagens do vertedouro a céu aberto, ou lixão, e terreno onde será implantada a usina (DO AUTOR, 2016)

### A.1 Caracterização da Usina

A usina de gaseificação e geração de energia elétrica a partir de RSU é baseada numa planta industrial ampla, composta por três diferentes etapas para desenvolvimento do processo; opera a partir de resíduos de classe II, inertes e não inertes, não perigosos, que podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (BRASIL, 2010). A Figura A.3 representa a planta industrial completa, com as três etapas mencionadas.

No detalhe: (i) é a planta de processamento de RSU; (ii), a planta de gaseificação de CDR; e, em (iii), a planta termoelétrica.



**Figura A.3** – Ilustração do esquema geral da usina (FURNAS; CARBOGAS, 2016, adaptado pelo autor)

As características técnicas de projeto da usina estão apresentadas na Tabela A.1 e se baseiam no dimensionamento proposto para o projeto, calculado pelos projetistas e fornecedores dos equipamentos e executado de acordo com o balanço de massa e energia.

**Tabela A.1** – Características da Planta de Tratamento de RSU

Parâmetro	Valor	Unidade
i. Linha de processamento de RSU		
Horas de operação	10	h
Vazão de entrada	5.500,0	kg/h
Granulometria do RSU	<i>In natura</i>	
Umidade inicial do RSU	50,0	% massa
Vazão de saída	3.005,6	kg/h
Granulometria final do CDR	25,0	mm
Umidade final do CDR	15,0	% peso
Densidade do CDR	250,0	kg/m <sup>3</sup>
ii. Reator termoquímico		
Consumo diário de CDR	30.055,9	kg
Horas de operação	24	h
Vazão mássica de CDR	1.252,3	kg/h
Vazão fluido de gaseificação	2300,9	kg/h

Parâmetro	Valor	Unidade
Consumo de calcário	5,2	kg/h
Volume de gás produzido	2.736,4	Nm <sup>3</sup> /h
Vazão de gás produzido	3.218,3	kg/h
Cinza + particulado + calcário	340,0	kg/h
iii. Geração de energia elétrica		
Capacidade instalada	1.000,0	kW
Eficiência da turbina	99,0	%
Fator de capacidade	95,0	%
Potência consumida em toda a planta	259,6	kW

Fonte: Furnas e Carbogas (2016).

A operação da usina envolverá o processamento e a gaseificação de todo o resíduo coletado na rua, junto ao passivo existente no aterro. Desta forma, estima-se que o aterro hoje existente seja completamente utilizado entre 15 e 20 anos de operação, período compatível com a vida útil da usina.

A planta de processamento de RSU estará preparada para consumir em torno de 55 toneladas diárias de RSU, com umidade de 50% a uma vazão de 5.500 kg/h, durante dez horas de operação. Ao final do processo, o CDR obtido apresentará aproximadamente 15% de umidade.

O reator termoquímico, operando em 24 horas, consumirá 30 toneladas de CDR a uma taxa de 1.252,3 kg/h e produzirá a massa de gás a uma taxa de 3.218,3 kg/h.

A potência consumida em toda planta foi obtida através do cálculo sobre a potência de consumo de cada equipamento individual e corresponde ao montante de energia necessário para operarem todos os equipamentos do processo. Para que seja energeticamente viável, a energia gerada pela planta precisa ser suficiente para alimentar todo o ciclo, desde o tratamento do RSU até a geração de energia. Este ponto será ainda um dos objetos de estudo desse trabalho.

#### A.1.1 Planta de processamento de RSU

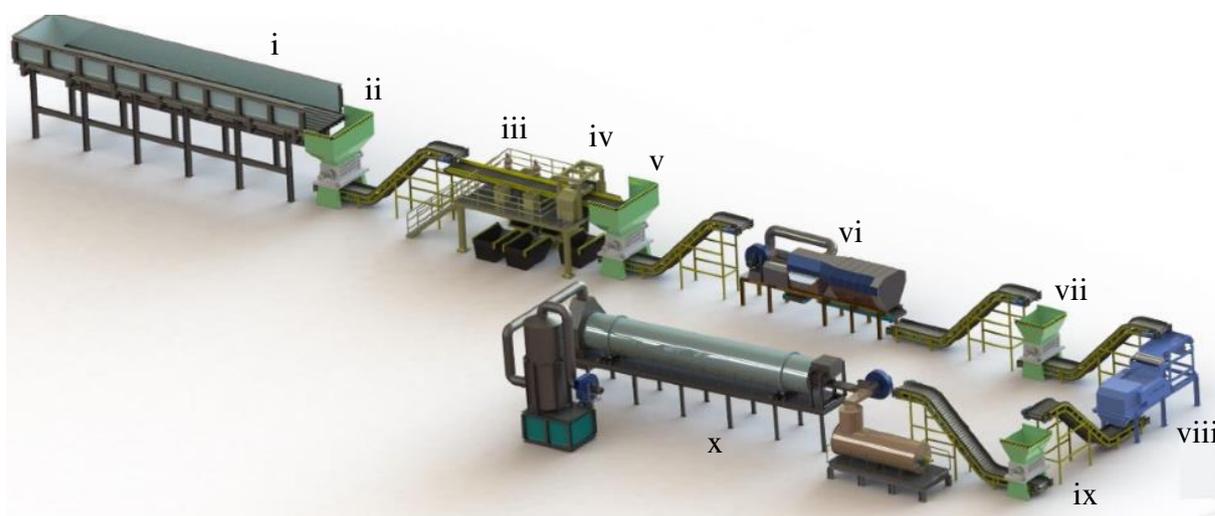
Não há necessidade de segregação do RSU na coleta, pois os esforços mecânicos pelos quais o resíduo passa na planta de processamento são suficientes para garantir que o

CDR gerado a partir dele chegue ao reator termoquímico com as características necessárias. Esse é um ponto positivo da tecnologia, uma vez que elimina do processo os riscos de não colaboração da população na segregação dos resíduos.

Na primeira etapa, os RSU coletados na cidade diariamente e aqueles obtidos no aterro existente passam por operações físicas que alteram sua composição gravimétrica para produção do CDR, com características que sejam admitidas ao processamento no reator termoquímico. BEGUM et al. (2014) consideram esta etapa inicial a mais importante em uma planta de gaseificação.

Nessa etapa, ocorre segregação do material que não pode entrar no reator, ou que possa ser aproveitado em outras destinações econômicas através de reciclagem. São removidos: (i) aço, sucata metálica, vidro, alumínio, plásticos limpos e todo material que possa ser reciclado, em caso um mercado viável; (ii) materiais abrasivos que reduzem a eficiência do processo, tais como pedras, concreto e vidro; (iii) lixo eletrônico, pois não são admitidos no reator, já que, devido a sua composição, aumentam a taxa de emissão de compostos indesejáveis (BEGUN et al., 2014).

Essas operações estão esquematizadas na Figura A.4, elaborada pela Carbogas e adaptada pelo autor:



**Figura A.4** – Planta de processamento de RSU (FURNAS; CARBOGAS, 2016, adaptado pelo autor).

- i. Na planta de processamento do RSU, o resíduo é recebido e pesado na moega de recepção do resíduo bruto;
- ii. após pesagem, é encaminhado para um triturador tipo “shredder”, onde é triturado, a fim de reduzir a granulometria do material ensacado para 80mm (etapa responsável por abrir os sacos de lixo);

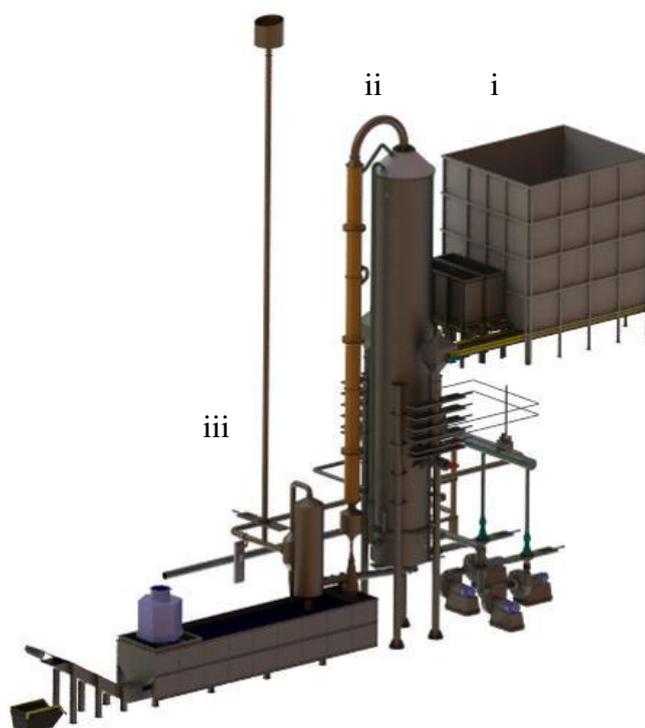
- iii. em seguida, uma esteira conduz o material para uma plataforma de catação, na qual o material reciclável pode ser recolhido manualmente por trabalhadores;
- iv. dando continuidade à linha, um separador magnético extrai o material metálico ferroso;
- v. novamente, o RSU é submetido a uma etapa de trituração, em triturador tipo “shredder”, que reduz sua granulometria para 60mm;
- vi. no curso, um separador aerólico faz a retirada de vidros e pedras;
- vii. uma nova etapa de trituração reduz a granulometria do material para 40mm, em triturador tipo “shredder”;
- viii. em sequência, um separador Eddy Current (separador magnético) retira os metais não ferrosos do material;
- ix. o material é encaminhado a uma nova etapa de trituração, reduzindo sua granulometria para 25mm, em triturador tipo “shredder”;
- x. por último, um secador rotativo realiza a secagem do material para redução da umidade (é importante destacar que também cada etapa de trituração retira parte da umidade do material devido ao calor gerado pelo atrito com as facas);
- xi. ao final de todas as etapas, temos o CDR pronto para alimentar o reator termoquímico, mas que também pode ser estocado por um período de até seis meses antes de ser encaminhado para a gaseificação.

#### A.1.2 Planta de gaseificação de CDR

A segunda etapa é constituída pela planta de gaseificação de CDR, quando o combustível sólido é transformado em combustível gasoso através de reações químicas.

A Figura A.5, de autoria da Carbogas, apresenta esquematicamente a planta de gaseificação a ser instalada como resultado do projeto de pesquisa e constitui-se de:

- i. Moega de recepção e alimentação de CDR;
- ii. Gaseificador em leito fluidizado;
- iii. Sistema de tratamento de gases em via úmida.



**Figura A.5** – Planta de gaseificação de CDR (FURNAS; CARBOGAS, 2016, adaptado pelo autor).

A moega é equipada com um sistema de correia transportadora, que leva o CDR a um sistema de três eclusas. Nas eclusas, o CDR é passado de uma para outra por gravidade e, por fim, um parafuso transportador insere o combustível no interior da câmara de reação.

O leito fluidizado promove a movimentação e mistura do CDR ao longo de seu volume, estabelecendo contato entre este e o fluido de gaseificação, que é inserido sob a grelha, passando ao leito por meio de injetores que uniformizam sua vazão no interior do equipamento.

O fluido de gaseificação é pré-aquecido, trocando calor com o gás produzido, de maneira que atinja temperatura aproximada de 550°C ao entrar no interior da câmara de gaseificação.

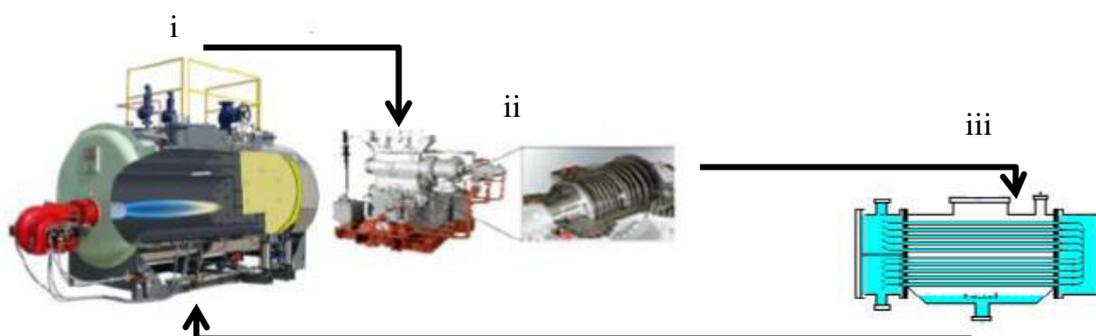
Ao sair da câmara de reação, o gás produzido passa por um ciclone interno, que retorna ao leito o material particulado mais pesado, e segue por dois trocadores de calor, onde é refrigerado. As cinzas formadas por esse particulado são coletadas periodicamente para manutenção da altura do leito e das condições de operação, através de válvulas e parafuso transportador pelo fundo da fornalha.

Um lavador tipo Venturi procede com o tratamento do gás, em via úmida, com temperaturas entre 100 e 200°C, removendo gases ácidos, particulados leves e seus

contaminantes orgânicos e metálicos. Esta etapa inclui a inserção de calcário para remover compostos sulfurosos presentes na mistura.

### A.1.3 Planta termoelétrica em ciclo Rankine

Por fim, uma planta para geração de energia elétrica, Figura A.6, é responsável pela queima do gás e geração de vapor d'água, produzindo energia termelétrica em ciclo Rankine:



**Figura A.6** – Esquema da planta termoelétrica (FURNAS; CARBOGAS, 2016, adaptado pelo autor).

De acordo com a Figura A.6, a planta é composta por:

- i. Caldeira, onde o gás produzido é queimado para gerar vapor;
- ii. Turbina a vapor, que utiliza o vapor do gás para mover o gerador elétrico;
- iii. Condensador, instalado na saída da turbina para condensar o vapor e reduzir a pressão.

Uma bomba é utilizada para enviar o condensado de volta para a caldeira.

## APÊNDICE B – Resumo Do Currículo Lattes

**Endereço para acessar** (<http://lattes.cnpq.br/2306107716242931>)

Possui curso Técnico em Química pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Campos/RJ – IFF (2003), graduação em Engenharia de Produção pelo Instituto Superior de Ensino do Centro Educacional Nossa Senhora Auxiliadora – ISE CENSA (2009). Atualmente é Engenheiro da Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil com vínculo efetivo em Furnas Centrais Elétricas S.A. É participante do Núcleo de Estudos e Pesquisas Experimentais – NExT do Instituto Federal de Goiás – IFG.