

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME SCARAFIZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ECONÔMICA ENTRE PLANTAS DE INCINERAÇÃO E  
GASEIFICAÇÃO PARA O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE UBERLÂNDIA**

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

**GUILHERME SCARAFIZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ECONÔMICA ENTRE PLANTAS DE INCINERAÇÃO E  
GASEIFICAÇÃO PARA O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Solidônio R. de Carvalho

Coorientador: Dr. Cassius Ricardo N. Ferreira

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S285  
2023

Scarafiz, Guilherme, 1994-  
Análise comparativa econômica entre plantas de  
incineração e gaseificação para o processamento de  
resíduos sólidos urbanos [recurso eletrônico] /  
Guilherme Scarafiz. - 2023.

Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.  
Coorientador: Cassius Ricardo Nascimento Ferreira.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio  
Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Ferreira, Cassius  
Ricardo Nascimento, 1974-, (Coorient.). III.  
Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em  
Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

**GUILHERME SCARAFIZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ECONÔMICA ENTRE PLANTAS DE INCINERAÇÃO E  
GASEIFICAÇÃO PARA O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 23 de fevereiro de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho

---

Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, que tornou possível a realização e conclusão deste curso, sempre sonhado por mim, que acreditaram e me apoiaram durante essa jornada. Agradeço também a minha namorada que esteve ao meu lado durante todos esses anos de graduação, e aos amigos que fiz nesse caminho.

Agradeço aos professores da Universidade, que se dedicaram a transmitir seus conhecimentos, de extrema qualidade, aos seus alunos. Em especial ao orientador Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho e ao coorientador Dr. Cassius Ricardo N. Ferreira, por toda dedicação, disponibilidade e apoio no decorrer deste projeto; e à Professora Dra. Núbia dos Santos Saad por toda sua dedicação para com os alunos do curso, sempre realizando um trabalho exemplar.

E a toda Universidade que não apenas ensina conhecimentos específicos relacionados ao curso, mas também proporciona ensinamentos que nos transformam positivamente.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar a viabilidade técnica econômica entre tecnologias de incineração e gaseificação como alternativa para destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU). A viabilidade técnica foi analisada do ponto de vista da caracterização do resíduo e da estimativa de geração de energia elétrica, para cada tonelada de resíduo processada na planta de incineração e gaseificação, por meio do Ciclo Rankine. A viabilidade econômica se deu a partir da estimativa do fluxo de caixa para cada tecnologia, analisando os indicadores Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *Payback* Descontado. Foi realizada a análise de sensibilidade nos principais parâmetros que influenciam o fluxo de caixa e a viabilidade econômica dos projetos, como taxa de juros do financiamento, preço de venda da energia elétrica gerada, custo para implementação das plantas e custos para operação e manutenção delas. Os resultados demonstram que quando as plantas possuem a mesma capacidade de processamento diário, a gaseificação é mais vantajosa economicamente, apresentando Taxa Interna de Retorno maior e *Payback* Descontado menor, em comparação com plantas de incineração. Foi constatada a viabilidade econômica para plantas de gaseificação desde que a capacidade de processamento seja superior a 150 toneladas de resíduos diárias, e o financiamento do empreendimento seja isento de juros. Para a incineração, o empreendimento se torna viável economicamente quando a capacidade de processamento da planta supera 440 toneladas por dia e com financiamento isento de juros.

**Palavras-chave:** Incineração; Gaseificação; Análise de Sensibilidade; Recuperação Energética de Resíduos; Taxa Interna de Retorno; Valor Presente Líquido.

## ABSTRACT

This work aimed to compare the technical and economic feasibility between incineration and gasification technologies as an alternative for the final disposal of municipal solid waste (MSW). Technical feasibility was analyzed from the point of view of waste characterization and the estimate of electricity generation for each ton of waste processed in the incineration and gasification plant, through the Rankine cycle. Economic feasibility was given from the estimate of the cash flow for each technology, analyzing the indicators Net Present Value, Internal Rate of Return and Discounted Payback. Sensitivity analysis was carried out on the main parameters that influence the cash flow and the economic feasibility of the projects, such as the interest rate of financing, the price of the generated electricity, the cost for the implementation of the plants, the costs for the operation and maintenance of the plants. The results show that when the plants have the same daily processing capacity, gasification is economically advantageous, presenting a higher Internal Rate of Return and a lower Discounted Payback, compared to incineration plants. Economic feasibility for gasification plants was discovered when the processing capacity is above 150 tons of waste per day, and the financing of the venture is interest-free. For incineration, the venture becomes economically viable when the plant's processing capacity exceeds 440 tons per day and with interest-free financing.

**Keywords:** Incineration, Gasification; Sensitivity Analysis; Waste to Energy; Net Present Value; Internal Rate of Return.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Produção de lixo anual no Brasil .....	18
Figura 2.2 – Coleta de lixo anual no Brasil .....	18
Figura 2.3 – Composição do lixo brasileiro .....	21
Figura 2.4 – Composição do lixo global. ....	22
Figura 2.5 – Esquema de uma planta de incineração .....	23
Figura 2.6 – Incinerador de combustão em grelha .....	27
Figura 2.7 – Incineradores de câmara rotativa .....	28
Figura 2.8 – Diagrama do processo de gaseificação. ....	30
Figura 2.9 - Esquema de um gaseificador contracorrente.....	34
Figura 2.10 - Esquema de um gaseificador concorrente.....	35
Figura 2.11 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante. ....	36
Figura 3.1 – Ilustração do gráfico de TIR. ....	41
Figura 4.1 – Cenários para a geração de energia elétrica através de RSU .....	46
Figura 4.2 – Representação do ciclo Rankine.....	53
Figura 4.3 – Componentes do Ciclo Rankine.....	54
Figura 5.1 – Diagrama de processamento de RSU em CDR .....	65
Figura 5.2 – <i>Payback</i> descontado para incineração de 1900 t/dia .....	71
Figura 5.3 – <i>Payback</i> descontado para gaseificação de 1900 t/dia .....	75
Figura 5.4 – Incineração: TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	77
Figura 5.5 – Incineração: VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	79
Figura 5.6 – Incineração: TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX.....	80
Figura 5.7 – Incineração: VPL em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX.....	81
Figura 5.8 – Incineração: TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX.....	82
Figura 5.9 – Incineração: VPL em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX.....	83
Figura 5.10 – Gaseificação: TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	84
Figura 5.11 – Gaseificação: TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	86
Figura 5.12 – Gaseificação: TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX .....	87
Figura 5.13 – Gaseificação: TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX.....	88
Figura 5.14 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU .....	90
Figura 5.15 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU .....	91
Figura 5.16 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9% .	92
Figura 5.17 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19% .....	93
Figura 5.18 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9% .	95

Figura 5.19 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%	96
.....	
Figura 5.20 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU.....	97
Figura 5.21 – Gaseificação: VPL em Função do Fluxo de RSU.....	98
Figura 5.22 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%99	
Figura 5.23 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%	100
.....	
Figura 5.24 – Gaseificação: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%	101
.....	
Figura 5.25 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%	102
.....	

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
CEMPRE	Compromisso Empresarial Para a Reciclagem
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CSLL	Contribuição Social sobre Lucro Líquido
FCD	Fluxo de Caixa Descontado
FCLA	Fluxo de Caixa Livre para os Acionistas
FCLE	Fluxo de Caixa Livre para a Empresa
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IR	Imposto de Renda
IRPJ	Imposto de Renda da Pessoa Jurídica
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PIS	Programa de Integração Social
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RFB	Receita Federal do Brasil
RSS	Resíduos de Serviço da Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TIR	Taxa Interna de Retorno
TLP	Taxa de Longo Prazo
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UTGE	Usina Termoquímica de Geração de Energia
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS: DEFINIÇÃO .....	17
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS: GESTÃO NO BRASIL .....	17
2.3	PODER CALORÍFICO DE COMBUSTÍVEIS .....	18
2.4	RESÍDUOS SÓLIDOS: COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA .....	20
2.5	COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS .....	22
2.6	INCINERAÇÃO .....	23
2.6.1	<b>TIPOS DE INCINERADORES</b> .....	25
2.6.1.1	Incineradores de combustão em grelha. ....	25
2.6.1.2	Incineradores de câmara rotativa .....	27
2.7	GASEIFICAÇÃO .....	28
2.7.1	<b>TIPOS DE GASEIFICADORES</b> .....	32
2.7.1.1	Gaseificadores de leito fixo .....	32
2.7.1.1.1	Gaseificadores contracorrentes (“ <i>updraft</i> ”) .....	33
2.7.1.1.2	Gaseificadores concorrente (“ <i>downdraft</i> ”) .....	34
2.7.1.2	Gaseificador de leito fluidizado .....	35
3	<b>ENGENHARIA FINANCEIRA</b> .....	38
3.1	TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE .....	39
3.2	VALOR PRESENTE LÍQUIDO .....	39
3.3	TAXA INTERNA DE RETORNO .....	40
3.4	PAYBACK DESCONTADO .....	42
3.5	FLUXO DE CAIXA .....	42
3.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	43
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	45
4.1	PCS DO RSU .....	47
4.2	FLUXO MÁSSICO DE CDR, ÁGUA RETIRADA DO RSU, E PCI DO CDR .....	47
4.3	ENERGIA NECESSÁRIA PARA TRANSFORMAÇÃO DO RSU EM CDR ..	50
4.4	PCI SYNGAS .....	51
4.5	EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO .....	51
4.6	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE CICLOS TÉRMICOS .....	52
4.7	MODELAGEM DO FLUXO DE CAIXA .....	55
4.7.1	<b>RECEITA BRUTA</b> .....	55
4.7.2	<b>DEPRECIAÇÃO ANUAL</b> .....	55
4.7.3	<b>TAXA DE JUROS DO FINANCIAMENTO</b> .....	56

4.7.4	<b>IMPOSTOS</b> .....	58
4.7.5	<b>CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO</b> .....	59
5	<b>RESULTADOS</b> .....	63
5.1	ANÁLISE DO RSU E CDR .....	63
5.2	ENERGIA NECESSÁRIA PARA TRANSFORMAR CADA TON DE RSU EM CDR .....	64
5.3	QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR TON DE CDR	65
5.3.1	<b>INCINERAÇÃO</b> .....	66
5.3.2	<b>GASEIFICAÇÃO</b> .....	66
5.4	EXEMPLO DE USINAS COM CAPACIDADE DE 1900 TON/DIA .....	67
<b>5.4.1</b>	<b>PREMISSAS</b> .....	67
<b>5.4.2</b>	<b>INCINERAÇÃO</b> .....	68
5.4.2.1	Simulação do financiamento .....	68
5.4.2.2	Fluxo de Caixa.....	69
5.4.2.3	<i>Payback</i> Descontado.....	70
5.4.2.4	Indicadores de Viabilidade Econômica.....	71
<b>5.4.3</b>	<b>GASEIFICAÇÃO</b> .....	72
5.4.3.1	Simulação do financiamento .....	72
5.4.3.2	Fluxo de Caixa.....	73
5.4.3.3	<i>Payback</i> Descontado.....	74
5.4.3.4	Indicadores de viabilidade econômica.....	75
5.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	76
<b>5.5.1</b>	<b>INCINERAÇÃO: CAPACIDADE 1900 ton/dia</b> .....	76
5.5.1.1	TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	76
5.5.1.2	VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	78
5.5.1.3	TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX....	79
5.5.1.4	VPL em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX...	81
5.5.1.5	TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX .....	81
5.5.1.6	VPL em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX .....	83
<b>5.5.2</b>	<b>GASEIFICAÇÃO: CAPACIDADE 1900 ton/dia</b> .....	83
5.5.2.1	TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	83
5.5.2.2	VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX .....	85
5.5.2.3	TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX....	86
5.5.2.4	TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX .....	88
<b>5.5.3</b>	<b>ANÁLISE PARA DIFERENTES FLUXO DE RSU EM T/DIA</b> .....	89
5.5.3.1	TIR em Função do Fluxo de RSU para incineração .....	89
5.5.3.2	VPL em Função do Fluxo de RSU para incineração .....	91
5.5.3.3	TIR em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração .....	92
5.5.3.4	VPL em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração .....	94
5.5.3.5	TIR em Função do Fluxo de RSU para gaseificação.....	96
5.5.3.6	VPL em Função do Fluxo de RSU para gaseificação.....	98

5.5.3.7	TIR em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para gaseificação .....	99
5.5.3.8	VPL em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração .....	101
5.6	FLUXO MÍNIMO DE RSU PARA VIABILIDADE DOS PROJETOS .....	102
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	104
7	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo acelerado e desordenado de urbanização, associado ao crescimento populacional e de renda, provoca um aumento do consumo de produtos e bens descartáveis, gerando um grande desafio de infraestrutura e de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) de modo ambientalmente correto.

No contexto global, cidades com altas densidades demográficas são as maiores produtoras de resíduos. Em 2012 foram produzidos cerca de 1,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, passando para 2,01 bilhões de toneladas em 2016, demonstrando um expressivo aumento na produção de RSU. Nesta perspectiva, acredita-se que a geração de resíduos cresça para 3,40 bilhões de toneladas por ano até 2050 (Kaza S et al, 2018).

De todo o lixo produzido no mundo, cerca de 38% são descartados em aterros sanitários, tornando-o o método mais utilizado. No entanto, o percentual que passam por reciclagem e compostagem é de aproximadamente 19%. O lixo descartado a céu aberto chega a 33% enquanto apenas 11% são usados para recuperação energética (Kaza S et al, 2018).

Esta variação percentual depende das condições socioeconômicas a qual o país se encontra. O descarte em lixões em países de baixa renda, onde os aterros e tecnologias mais complexas não estão disponíveis alcança até 93%, incluindo descarte em rios, ruas e queima do lixo a céu aberto. Comparativamente em países de alta renda este percentual atinge apenas 2%, predominando a reciclagem, o tratamento térmico e a compostagem, que juntos alcançam quase 57% do tratamento final do RSU. (Kaza S et al, 2018).

De acordo com Carvalho (2019), o aumento do poder aquisitivo da população e o rápido desenvolvimento econômico em países de baixa renda, na maioria das vezes, não vem acompanhado de imediato por avanços tecnológicos, que incluem melhorias nos processos de gestão do RSU. Este cenário causa dificuldades no gerenciamento dos resíduos. Sem infraestrutura adequada e com um avanço lento nos processos e tecnologias de reciclagem, tratamento térmico e compostagem, os lixões se tornam um importante método de disposição final dos resíduos.

Uma gestão adequada dos RSUs tem impactos diretos e importantes na economia, meio ambiente e a saúde da população. Em sua maioria, os custos para remediar ou corrigir estes impactos são superiores aos custos para evitá-los, por meio de uma correta gestão dos resíduos.

No Brasil, a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos é pautada em uma variedade de legislações estaduais e municipais, incluindo a Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605/1998) que proíbe o descarte de resíduos em lixões, mas na prática a legislação não obteve tanto resultado em relação a esse tipo de disposição. Um segundo passo foi dado com A Lei de Diretrizes Nacionais de Saneamento Básico (Lei 11.445/2007), mas foi somente em 2010, com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que foi promulgada uma legislação adequada às necessidades brasileira (Carvalho, 2019).

A PNRS estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos no país e tem como objetivo principal promover a gestão adequada dos resíduos sólidos, priorizando a prevenção, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final adequada dos resíduos, impondo a necessidade de substituir os lixões a céu aberto por alternativas como aterros sanitários e recuperação energética dos resíduos.

O art. 54 do PNRS estabelece que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, deveria ser implantada em até 4 anos após a data de sua publicação. Decretando, em teoria, o fim dos lixões no Brasil até o ano de 2014 e sua substituição por aterros sanitários em todos os municípios brasileiros.

Entretanto, em aterros, durante o processo de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, ocorre a formação e liberação de gás metano, com potencial de ser 21 vezes mais prejudicial que o gás carbônico em relação ao efeito estufa (Foster et al, 2007), sendo necessário o seu armazenamento ou queima para que ele não atinja o meio ambiente. No processo de decomposição da matéria orgânica também ocorre a formação de efluentes líquidos (chorume) que podem contaminar, solo, rios e lençóis freáticos.

O impacto ambiental, somado à limitação de áreas disponíveis para a destinação final de rejeitos em aterros sanitários encontra dificuldades cada vez maiores, tornando-se inevitável a busca por novas soluções.

A recuperação energética de resíduos, mostra-se uma alternativa frente a esses problemas e, no Brasil, é amparada Política Nacional de Resíduos Sólidos que

menciona em seu artigo 3º que a destinação final ambientalmente adequada inclui a recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos, desde que se comprove sua viabilidade técnica e ambiental, e ocorra a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Com o uso de equipamentos mais recentes e tecnológicos a recuperação energética de resíduos através da incineração e gaseificação podem apresentar vantagens, em termos ambientais, ao ser comparada com outros meios de disposição, como aterros.

Para que um projeto de recuperação energética de resíduos seja de fato viável, além a viabilidade técnica e vantagens sobre outros meios de disposição, ele também deve ser viável economicamente.

A análise econômico-financeira desses projetos dependem de inúmeras variáveis, como: composição e poder calorífico do resíduo; capacidade de geração de energia elétrica, legislação local, uma vez que esta implica diretamente nos custos de tratamento dos gases de exaustão; custo da mão de obra; número de funcionários e função atribuída a cada um deles; preço de venda da energia elétrica; eficiência da usina; taxa de juros; taxa paga pelo município para a usina para que esta receba os resíduos, chamada de *gate fee*; custo de construção da usina, etc.

Todas essas variáveis impactam diretamente no fluxo de caixa do empreendimento, e conseqüentemente na viabilidade econômica do projeto.

Diante deste cenário, considerando os resíduos como uma fonte renovável para a geração de energia, onde projetos de gaseificação e/ou incineração apresentam viabilidade econômica e técnica, estas tecnologias são uma alternativa não só para a correta gestão de resíduos, mas também para diversos outros desafios: complementação da matriz energética com a produção de energia limpa e renovável, prolongamento da vida útil de aterros e a redução da emissão de gases de efeito estufa.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a comparação da viabilidade econômica entre as tecnologias de gaseificação e incineração, para recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, comparando plantas com mesmas

capacidades de processamento diário de resíduos com o objetivo de avaliar qual trará mais retorno sobre o investimento.

As análises foram baseadas considerando o potencial de geração de energia elétrica para cada tonelada processada de um determinado resíduo; os custos de implantação, operação e manutenção são estimados através de dados obtidos na literatura, para as duas tecnologias.

Com as receitas previstas com a venda de energia, materiais recicláveis e taxa paga para entrada de resíduos; e da estimativa das despesas com investimentos, operação e manutenção, impostos etc. é possível estimar o fluxo de caixa para cada empreendimento.

As análises baseiam-se em indicadores econômicos como Taxa Interna de Retorno, Valor Presente Líquido e *Payback* Descontado. Os indicadores são analisados sobre diversos cenários como: diferentes taxas de juros de financiamento; diferentes preços para venda de energia elétrica; diferentes custos operacionais etc.

O trabalho também tem como objetivo estimar o fluxo mínimo de resíduo que deverá ser processado pela planta, para cada tecnologia, para que o empreendimento não dê prejuízos. Além de analisar como cada parâmetro estudado influencia no retorno financeiro do investimento.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica contendo dados sobre a destinação dos resíduos no Brasil e no mundo; tecnologias de recuperação energética de resíduos, benefícios e desvantagens de cada uma. Além da contextualização da análise gravimétrica e sua influência no poder calorífico destes resíduos.

No Capítulo 3 apresentou-se os indicadores econômicos utilizados neste trabalho e como são formulados e interpretados.

No Capítulo 4 foi apresentada a metodologia utilizada para chegar aos resultados, abordando formulações, estruturação do fluxo de caixa, estimativas de custos e geração de energia, além da estimativa do gasto energético para a transformação do resíduo *in natura* em combustível derivado de resíduos.

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados teóricos referente a geração de energia para cada tonelada de resíduo processada nas plantas de incineração e gaseificação, realizou-se a comparação econômica entre plantas com mesma capacidade de processamento diário. Além da análise sensitiva de como os parâmetros como: custos de implementação, custos de manutenção, taxa de juros do financiamento etc. influenciam nos resultados financeiros. Também foi estimado o fluxo mínimo de resíduos necessário que deve ser processado diariamente, em diferentes cenários, para que o projeto seja viável economicamente.

No sexto capítulo foi reunido as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS: DEFINIÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são definidos como os resíduos domiciliares, ou seja, os de origem doméstica urbana, além dos resíduos de limpeza urbana, por exemplo, os de origem proveniente da varrição e vias públicas. Segundo a PNRS, os RSU deverão ter a destinação final ambientalmente adequada por meio da reciclagem, compostagem e recuperação e aproveitamento energético.

### 2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS: GESTÃO NO BRASIL

A Constituição Federal de 1988 determina que à União e Estados cabe a gestão dos resíduos sólidos urbanos, o que abrange as atividades relacionadas a decisões estratégicas com relação aos aspectos institucionais, legais, financeiros, operacionais, administrativo e ambientais.

Cabe aos municípios, então, executar o gerenciamento dos resíduos, que engloba o conjunto de ações que visam coordenar, implementar, controlar e fiscalizar os objetivos definidos na gestão. Portanto, tem uma abrangência mais local e direta para coletar, tratar e dispor os resíduos os RSUs.

A PNRS determinou que até 2014 os municípios deveriam se adequar em relação a disposição ambientalmente adequada dos resíduos, permitindo o encaminhamento apenas de rejeitos aos aterros sanitários, que são os resíduos restantes após esgotamento de todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos e economicamente viáveis, que não apresentam outra possibilidade a não ser a disposição final. Determinação, esta, que não conseguiu ser cumprida por muitos municípios.

No entanto, a coleta do RSU está longe de ser o problema principal, a dificuldade encontra-se principalmente em dispor de forma adequada estes resíduos coletados. Em 2020, por exemplo, foram gerados no Brasil aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sendo que 92,2% desta quantidade foram, de fato, coletados, como exibe as Figuras 2.1 e 2.2. Entretanto, cerca de 40% dos resíduos coletados tiveram disposição inadequada. Aos 60% restantes foi dado um fim

ambientalmente adequado sendo que a maior parte deste percentual foi enviada para aterros sanitários que, mesmo sendo praticamente depósitos de RSU, permitem a coleta de chorume e gases gerados pela decomposição da matéria orgânica (ABRELPE, 2021).

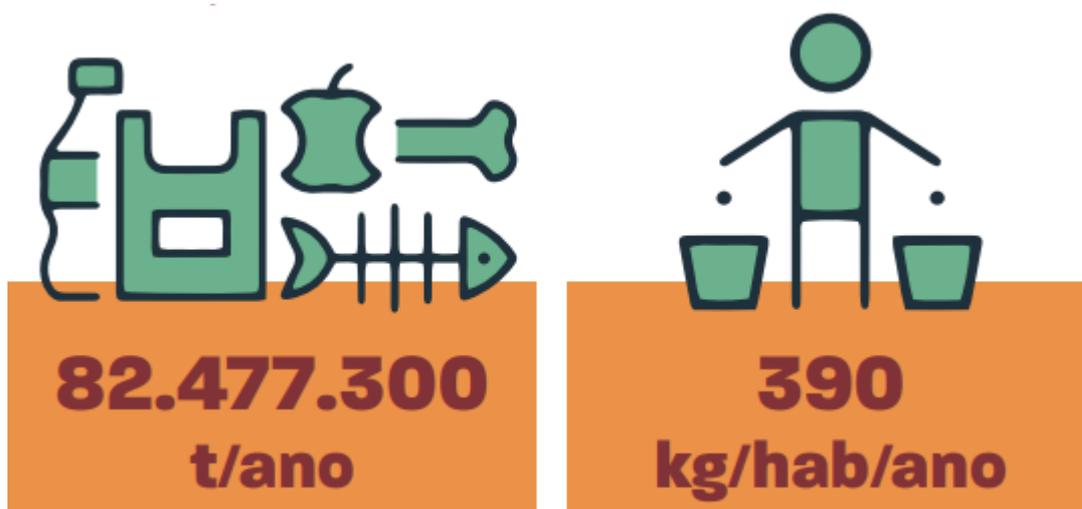


Figura 2.1 – Produção de lixo anual no Brasil

Fonte: Abrelpe (2021).



Figura 2.2 – Coleta de lixo anual no Brasil

Fonte: Abrelpe (2021).

### 2.3 PODER CALORÍFICO DE COMBUSTÍVEIS

Em projetos de aproveitamento energético a determinação da energia líquida gerada através da queima de um determinado combustível (biomassa, RSU *in natura*, CDR, óleos residuais etc.) ou do gás de síntese produzido a partir dele, é fator

preponderante, diretamente relacionada com receita gerada com a venda de energia elétrica ou térmica.

Para Ferreira (2021), a característica mais importante, para qualquer tipo de combustível, é o Poder Calorífico (PC), que se refere à quantidade de energia contida no combustível, sempre expressos em termos de unidades de Energia [cal, kcal, J, kJ, kWh, BTU etc.], divididas por unidades de Massa [kg, lb, etc.].

De acordo com Potter e Scott (2007), se os produtos da reação de combustão completa contêm água na fase líquida, a entalpia de combustão é chamada de poder calorífico superior (PCS). A definição de poder calorífico inferior (PCI) é similar à de PCS, porém os produtos contêm água na fase gasosa. Desta forma, o poder calorífico superior pode ser considerado como a soma do PCI + a energia liberada na condensação da água.

O poder calorífico de um material pode ser determinado a partir da diferença de valores de entalpia de formação ( $\Delta H$ ), uma vez que o calor de combustão de uma substância é igual à diferença entre as entalpias de formação dos produtos de combustão e as entalpias de formação dos reagentes, como mostra a Equação 2.1.

$$\Delta H^{\circ}f = \sum \Delta H^{\circ}f(\text{produtos}) - \sum \Delta H^{\circ}f(\text{reagentes}) \quad (2.1)$$

De acordo com Barbosa et al (2008), o poder calorífico pode ser calculado com boa aproximação pela Equação 2.2, para combustíveis sólidos e líquidos, em que PCS representa o poder calorífico superior (kJ/kg), C o teor de carbono do combustível (kg/kg), H o teor de hidrogênio do combustível (kg/kg), S o a porcentagem de enxofre do combustível (kg/kg) e o teor de oxigênio do combustível (kg/kg).

$$\text{PCS} = 33900 C + 141800 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 9200 S \quad (2.2)$$

O PCI pode ser encontrada subtraindo do PCS o calor latente de vaporização da água (fórmula de Dulong). O vapor produzido é resultante da reação do hidrogênio (H, kg/kg) com o oxigênio e da umidade (W, kg/kg) presente no combustível.

$$PCI = PCS - 2440(9H + W) \quad (2.3)$$

Há outra metodologia para determinação do PCI de um combustível, ensaiando separadamente cada componente (sem umidade) que compõe a gravimetria do combustível em um calorímetro, ou assumindo referências da literatura. Após a coleta do PCS de cada componente, faz-se uma somatória [% em massa seca do componente x PCS do componente da gravimetria]. Deste modo, o PCI é calculado utilizando a Equação 2.3, desde que seja conhecido o teor de umidade (W) e hidrogênio (H) da amostra (POLI, 2013).

## 2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS: COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A composição gravimétrica dos resíduos revela o percentual da massa de cada componente em relação à massa total. Conhecer qual a quantidade e que tipo de material é descartado torna-se necessário para que haja melhor gestão de resíduos, uma vez que é possível definir melhor a política municipal de resíduos, a partir destes dados e, estimar a energia que poderá ser gerada a partir da recuperação energética, quanto de material poderá ser reciclado e quanto será a redução de massa nos aterros. (FRICKE et al., 2015).

Nas formulações do PCI o teor de umidade e composição dos resíduos são fatores determinantes, e é justamente o PCI um dos principais parâmetros para fins de projetos de incineração e gaseificação. O PCI permite avaliar o resíduo em relação a sua viabilidade para aproveitamento energético, uma vez que ele é diretamente relacionado à produção de energia elétrica gerada.

No contexto da recuperação energética, onde o resíduo é matéria-prima do processo, é necessário que haja completo e preciso domínio da composição e qualidade dos resíduos que alimentam os equipamentos, para que os produtos gerados (emissões e energia) correspondam ao esperado.

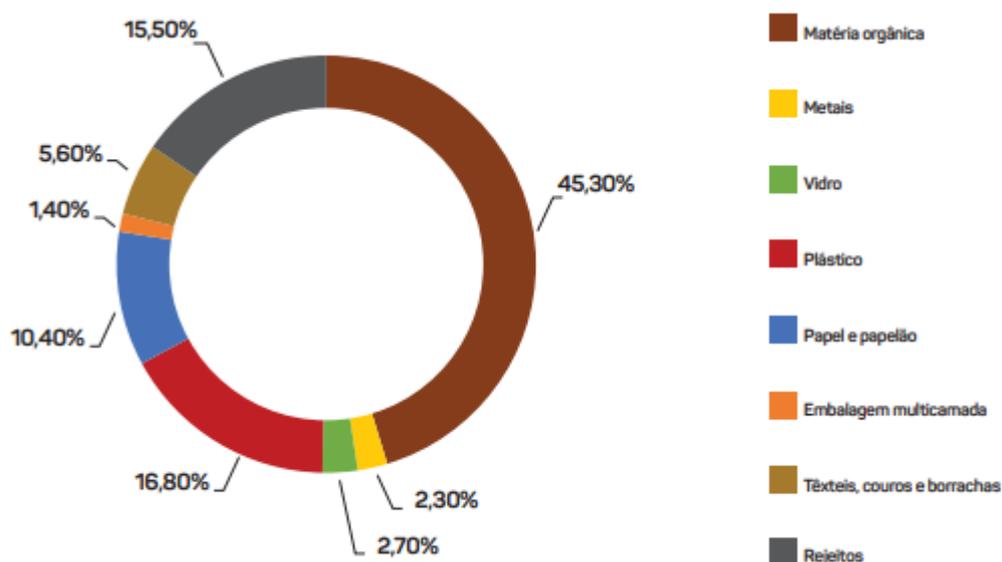


Figura 2.3 – Composição do lixo brasileiro

Fonte: Abrelpe (2020).

Para o Brasil, a Figura 2.3 apresenta que aproximadamente 45% do RSU brasileiro é composto por matéria orgânica. Além disso, a parte composta por matéria orgânica, plástico, papel e papelão alcança 72%.

Este percentual pode ser convertido em energia térmica através do processo de recuperação energética do RSU, sendo possível constatar o grande potencial que os resíduos apresentam ao serem destinados como matéria prima para geração de energia utilizando tecnologias de gaseificação e/ou incineração.

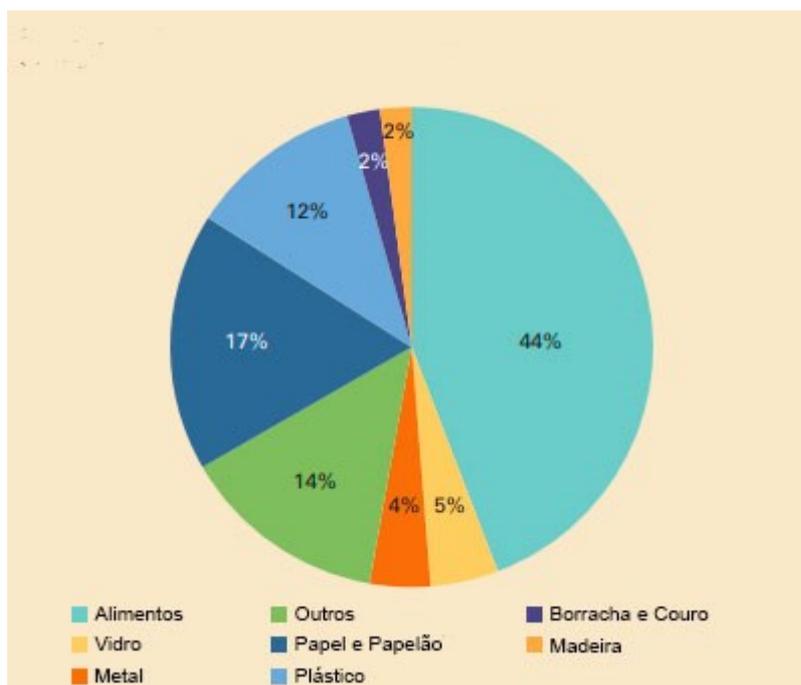


Figura 2.4 – Composição do lixo global.

Fonte: Adaptado de Kaza S et al. (2018).

A Figura 2.4 mostra a composição gravimétrica dos resíduos produzidos no mundo, próxima a composição gravimétrica dos resíduos do Brasil, onde 44% do resíduo é composto de matéria orgânica e 75% (composto por matéria orgânica, plásticos, papéis etc.) podem passar por processos de recuperação energética.

## 2.5 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS

Os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) podem ser definidos como os produtos dos RSU após sofrerem processos de triagem, moagem e secagem com a finalidade de serem utilizados em alguma forma de recuperação energética (Ferreira, 2021). De acordo com Norma ASTM (2006) os CDR devem ser isentos de materiais metálicos, vidro e outros materiais inorgânicos, com 95% do particulado de dimensões inferior a 5  $\mu\text{m}$ .

Para a produção do CDR, são utilizados resíduos constituídos, majoritariamente, de plástico, papel, borracha, madeira, panos, além de produtos que teoricamente poderiam ser reciclados, mas tecnicamente são rejeitados em processos de reciclagem (por motivos como contaminação e/ou inviabilidade de triagem, por exemplo).

O resíduo sólido *in natura* é passível de ser queimado sem a necessidade de combustíveis auxiliares, dependendo de sua umidade. Porém, para potencializar sua eficiência e melhorar a qualidade do combustível, é necessário que estes resíduos sejam processados, para diminuir umidade, controlar granulometria e retirar a fração de materiais inertes, uma vez que umidade e materiais inertes não contribuem para o poder calorífico do combustível (McDOUGALL et al., 2001).

## 2.6 INCINERAÇÃO

A incineração é um processo que consiste na combustão do RSU, na presença de oxigênio em temperaturas superiores a 850 °C para converter o RSU em cinzas, gases e vapor de água. Algumas das vantagens da incineração são a redução de volume e massa do RSU em 90 % e 75 % respectivamente, eliminação de patógenos e geração de calor, que pode ser utilizado para gerar eletricidade e/ou aquecimento de residências. (LINO e ISMAIL, 2018). A Figura 2.5 exibe a esquematização de uma planta de incineração.

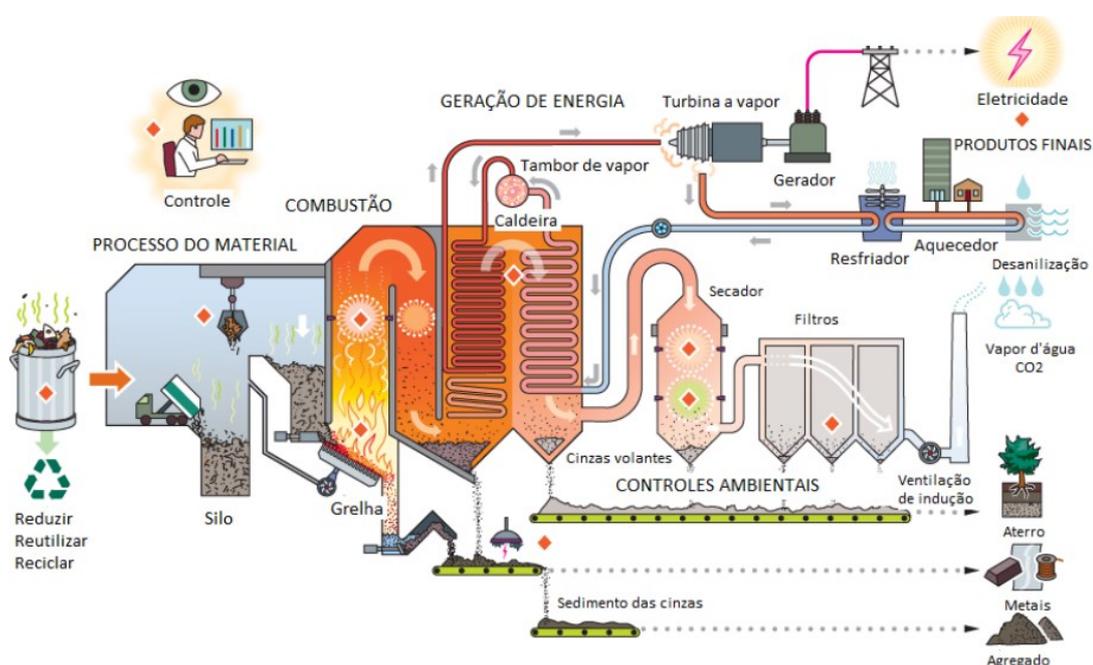


Figura 2.5 – Esquema de uma planta de incineração

Fonte: Adaptado de Delta Way Energy (2017).

Esse é o método mais utilizado em países desenvolvidos e ganhou sua popularidade desde a década de 1960 pois é um processo barato e rápido para

redução de resíduos (BEHREND e KRISHNAMOORTHY., 2017). Entretanto, a incineração de lixo urbano, por conter grande diversidade de produtos, necessita de um rigoroso controle de emissões, devido a presença de dioxinas, furanos, óxidos de nitrogênio e enxofre, além da possibilidade de poluição do solo e da água causadas por metais pesados nas cinzas (KUMAR e SAMADDER, 2017).

Na incineração de resíduos destacam-se algumas vantagens, tais como:

- Esterilização dos resíduos: as altas temperatura atingidas no incinerador permitem a eliminação bactérias, vírus e outros patógenos, totalmente desejável e necessário no tratamento resíduos de serviço da saúde (RSS);
- Possibilidade de redução do impacto ambiental comparado com aterros sanitários, por não contribuir com a geração de chorume e metano;
- Possibilidade de recuperar parte da energia presente nos resíduos para geração de vapor e geração de energia elétrica, contribuindo para a redução de emissão de gás carbônico na atmosfera devido à grande parte da matéria orgânica contida nos resíduos ser de origens renováveis, diminuindo a necessidade de combustíveis fósseis;
- Grande redução da massa e volume dos resíduos, diminuindo a necessidade de aterros.

Atrelada às estas vantagens, as tecnologias de limpeza atualmente disponíveis, juntamente com a implementação de sistemas monitoramento e controle, além da compreensão de como são formados os poluentes no processo de incineração, permitem reduzir significativamente a contaminação do meio ambiente, atingindo padrões de emissão muito baixos.

Considerando que a maior fração orgânica do RSU é composta por sobras de alimentos, papéis e papelões, pedaços de madeira etc. considerados de origens renováveis e, pressupondo-se que as instalações de incineração sejam projetadas e construídas com sistemas de limpeza eficientes, a incineração destes materiais não contribui para a elevação da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, reduzindo os impactos ambientais.

Porém, na incineração de resíduos algumas desvantagens também se destacam como:

- Elevado custo de investimento, de manutenção, de operação e monitoramento;
- Podem necessitar de combustível auxiliar;
- Necessidade de um rigoroso controle de emissões.

## 2.6.1 TIPOS DE INCINERADORES

Existem duas modalidades de incineração que são as mais utilizadas as quais são classificadas de acordo com a existência ou não de tratamento prévio do RSU. A primeira é ainda a mais utilizada e conhecida como *mass burn*, onde o RSU a ser incinerado não passa por nenhum tipo de pré-tratamento, ou seja, são encaminhados *in natura* para a câmara de combustão. Já a segunda modalidade utiliza combustível derivado de resíduos (CDR) como combustível, onde os resíduos são previamente tratados, fazendo a remoção do material reciclável e parte da umidade além de tornar o material a ser incinerado o mais homogêneo possível (BRANCHINI, 2015).

Há diversos de tipos de incineradores utilizados para queimar uma grande variedade de resíduos e dentre os quais pode-se destacar:

### 2.6.1.1 Incineradores de combustão em grelha.

Os incineradores com combustão em grelha podem incinerar RSU no estado bruto ou combustível derivado de resíduos (CDR).

A Figura 2.6 exibe a representação de um incinerador de combustão em grelha, onde uma grelha inclinada móvel, desloca o resíduo pela câmara de combustão, expondo-o às regiões de alta temperatura. Durante este deslocamento, o material vai se aquecendo e perdendo umidade, compostos voláteis, além de ocorrer a oxidação de compostos orgânicos. Ao sair da câmara de combustão ainda há uma pequena quantidade de material orgânico, na forma de carvão (CEMPRE, 2018).

Neste incinerador uma parte do ar utilizado para oxidar o RSU é injetado por baixo da grelha e auxilia na secagem do resíduo e resfriamento da grelha. O restante do ar é introduzido por cima da grelha em alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover a sua mistura com os gases e vapores combustíveis gerados durante a decomposição térmica do resíduo (CEMPRE, 2018).

Os gases gerados pela combustão a alta temperatura, ao saírem desta região, cedem calor para trocadores de calor, para geração de vapor.

O vapor gerado pode ser utilizado exclusivamente para geração de energia elétrica através de ciclos termodinâmicos, como o Ciclo Rankine. Esse vapor além de ser utilizado exclusivamente para geração de energia elétrica, também pode ser utilizado para aquecimento de processos industriais. Neste segundo caso, o processo é conhecido como cogeração.

Na cogeração, energia disponibilizada pelo combustível é aproveitada primeiramente para a geração de energia elétrica através do Ciclo Rankine, por exemplo, e em seguida o calor rejeitado pela turbina é aproveitado em processos produtivos (BARJA, 2006).

Na combustão do RSU, além do vapor de água e dióxido de carbono, também podem se formar gases extremamente corrosivos, como: ácido clorídrico, cloro, ácido fluorídrico etc. (STEAM, 2005). Desta forma, as tubulações metálicas próximas às grelhas são revestidas com material refratário e as temperaturas de superaquecimento de vapor são limitadas a 420°C. Temperaturas maiores podem ser atingidas, porém necessitam que os superaquecedores sejam revestidos com ligas metálicas resistentes aos gases ácidos como o inonel (CEMPRE, 2018).

Após a combustão, os gases são direcionados para os sistemas de tratamento de poluição onde os gases ácidos, material particulado, dioxinas e furanos e metais pesados eventualmente presentes são removidos ou filtrados.

Na extremidade da grelha, além da pequena fração de carvão há uma fração predominantemente inorgânica, chamada cinza de fundo. Estas cinzas são resfriadas e, posteriormente são enviadas para disposição final em aterros.

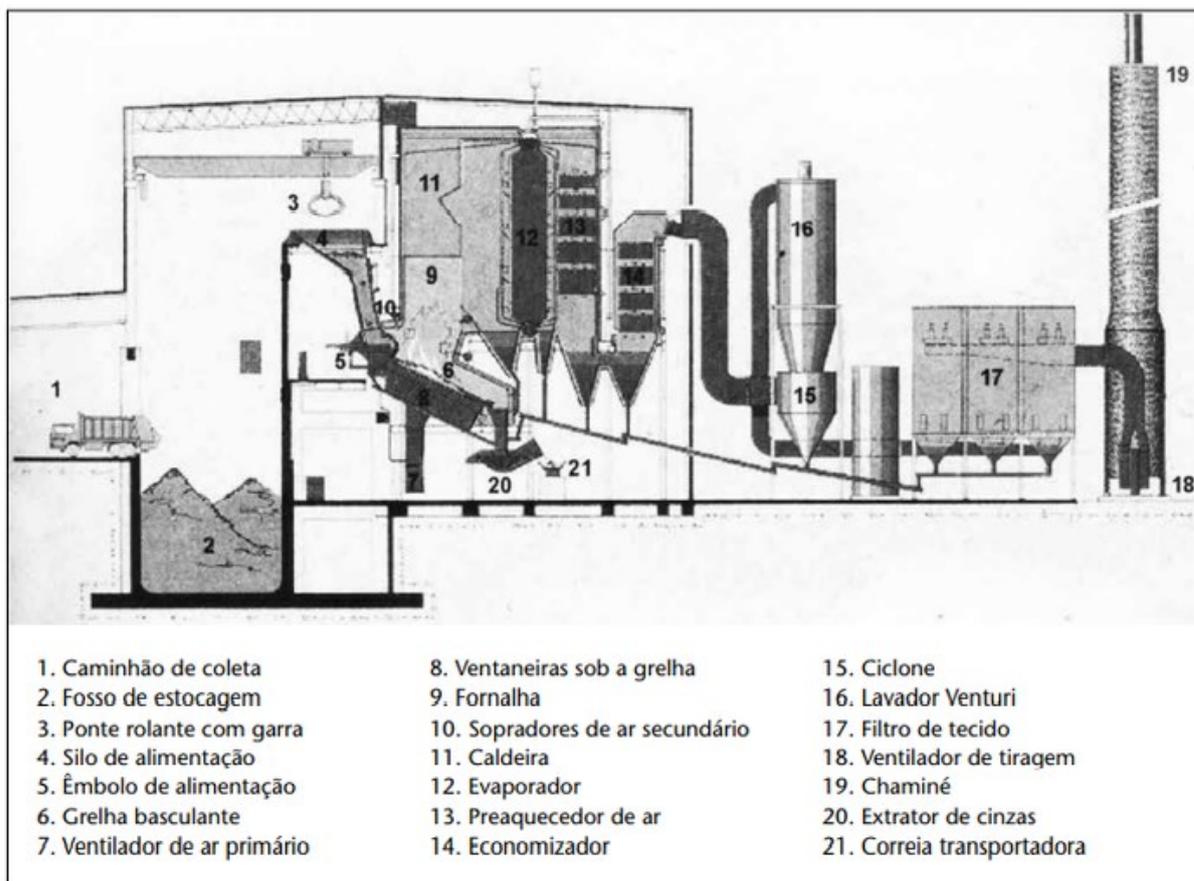


Figura 2.6 – Incinerador de combustão em grelha

Fonte: CEMPRE (2018).

### 2.6.1.2 Incineradores de câmara rotativa

Os incineradores de câmara rotativa, são os mais versáteis, pois podem incinerar além dos resíduos sólidos, também os semissólidos e líquidos. O forno rotativo consiste em uma câmara cilíndrica, levemente inclinada e revestida de material refratário. A rotação da carcaça auxilia o transporte do resíduo através do forno e favorece a mistura do resíduo com o ar de combustão (Dempsey e Oppelt, 1993).

Nos incineradores rotativos, os fornos operam em temperaturas entre 800 e 1600°C. A função primária do forno rotativo é converter parte dos resíduos sólidos em gases, através da volatilização, destilação destrutiva e reações parciais de combustão. Tipicamente, há uma câmara de pós-combustão ligada diretamente na extremidade de saída do forno, com a finalidade de completar as reações de combustão dos gases que saem do forno. As câmaras de pós-combustão operam em temperaturas entre 1000 e 1600°C. Tanto a câmara de combustão, quanto o forno

são, geralmente, equipados com sistema de queima de combustível auxiliar para atingir e controlar a temperatura desejada (Dempsey e Oppelt, 1993). A representação deste tipo de incinerador é representada pela Figura 2.7.

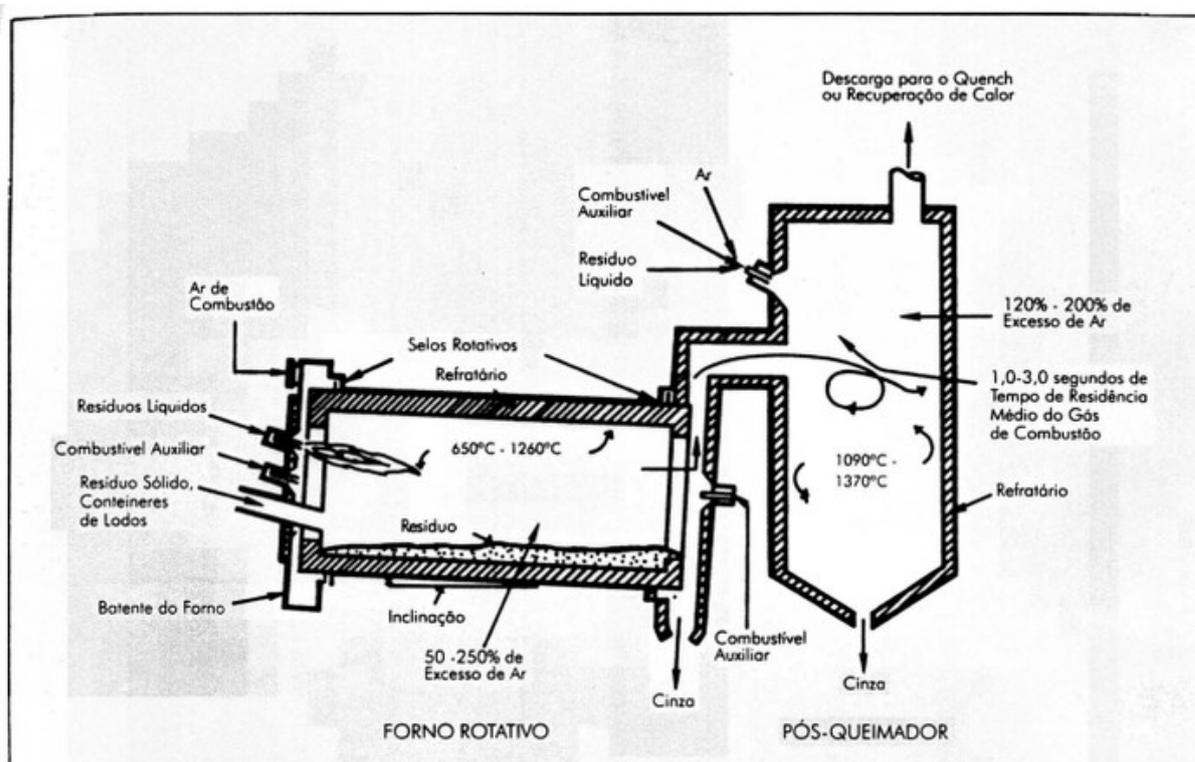


Figura 2.7 – Incineradores de câmara rotativa

Fonte: Dempsey e Oppelt (1993).

## 2.7 GASEIFICAÇÃO

Enquanto na incineração ocorre a queima direta de diversos tipos de combustíveis (RSU *in natura*, biomassa, óleos etc.), na gaseificação há a necessidade de que o combustível apresente propriedades mais controladas, como granulometria, teor de umidade, PCI etc. Destaca-se ainda que a principal diferença entre os dois processos é que a gaseificação, diferentemente da incineração não promove a combustão direta do combustível.

De acordo com Lora et al. (2012) a gaseificação é um processo de conversão termoquímica de um material, que contém carbono, através da oxidação parcial em temperaturas entre 800 e 1.100°C, em um gás de síntese que pode ser usado como combustível, composto principalmente por hidrogênio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A composição e poder calorífico do gás de síntese é determinado por diversas variáveis como temperatura, pressão, características da matéria prima (composição e umidade) e teor de oxigênio no agente oxidante. O oxidante usado pode ser ar, vapor de água, dióxido de carbono, oxigênio puro ou combinação destes (Basu, 2006).

O ar, por ser um oxidante barato, é muito utilizado, porém, os gaseificadores que o utilizam como oxidante produzem um gás combustível contendo concentrações relativamente elevadas de nitrogênio, como o nitrogênio não é um gás combustível, sua participação no gás de síntese faz com que o PCI seja diminuído para a ordem de 4 – 6 MJ/m<sup>3</sup> (Basu, 2006).

Os gaseificadores que usam oxigênio puro geram produtos gasosos contendo altas concentrações de hidrogênio e CO, que são combustíveis, utilizando oxigênio puro, o poder calorífico destes gases alcançam a faixa de 12 – 18 MJ/m<sup>3</sup>. Porém, os custos para utilizar este oxidante aumenta muito devido ao custo de produção do insumo (O<sub>2</sub>) (Basu, 2006).

Segundo Molino; Chianese; Musmarra (2016), as etapas que fazem parte do processo de gaseificação são:

- Secagem (estágio endotérmico).
- Pirólise (estágio endotérmico).
- Redução (estágio endotérmico).
- Oxidação (estágio exotérmico).

As principais reação que precedem a gaseificação são endotérmicas e necessitam de fornecimento de energia para ocorrer. Esta energia, geralmente, é fornecida pela reação de oxidação. O diagrama do processado de gaseificação é representado pela Figura 2.8.

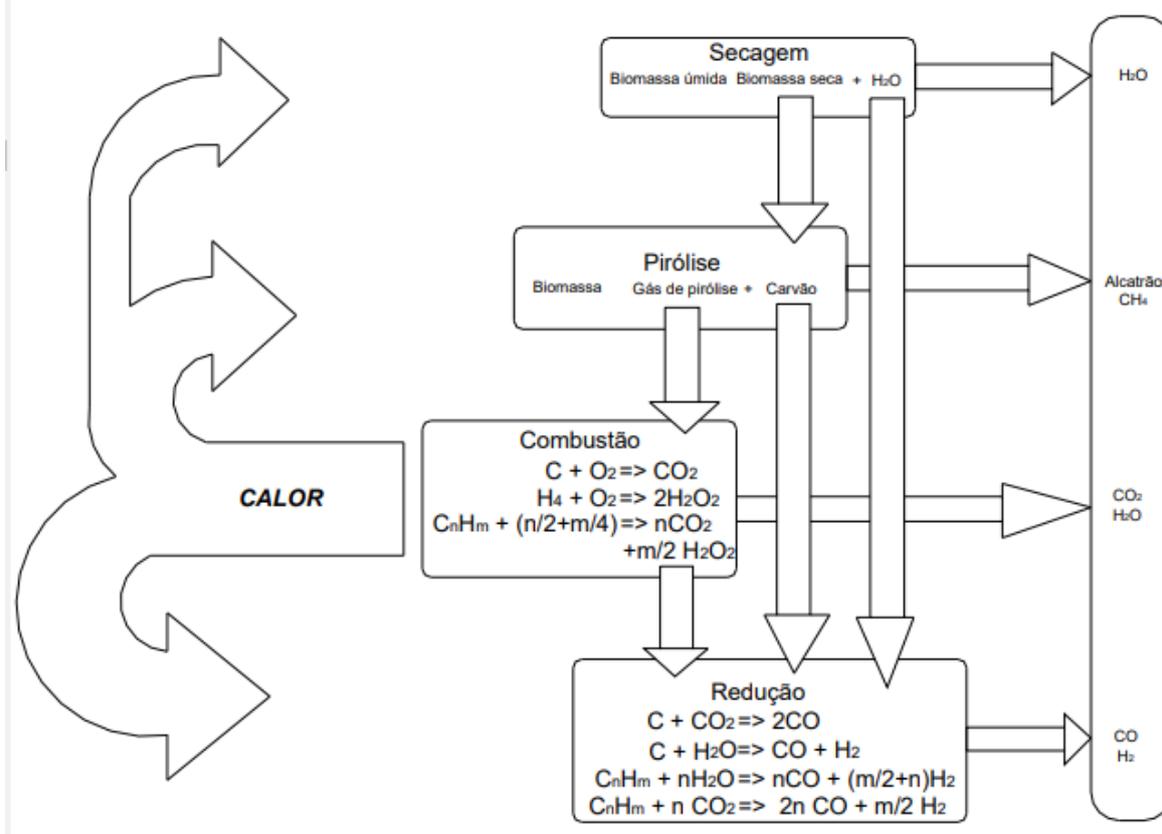


Figura 2.8 – Diagrama do processo de gaseificação.

Fonte: Andrade (2007).

A secagem consiste no aquecimento do CDR para diminuir sua umidade. Esta etapa requer uma quantidade considerável de energia. Tipicamente uma amostra de biomassa contém entre 30 e 60% de umidade em massa. Para a gaseificação o teor de umidade deve ser entre 10 e 15% (NÁSNER, 2015).

O controle inadequado da umidade é um dos principais motivos para o fracasso na produção do gás de síntese (BASU, 2010). A gaseificação de uma biomassa muito úmida gera um gás de síntese com baixa qualidade, acarretando problemas operacionais como por exemplo a produção de muita fumaça e gás com baixo poder calorífico (RODRIGUES, 2008).

De acordo com Cardoso (2014) a velocidade de secagem também é um parâmetro muito importante nesse processo, pois ela indica a eficiência de desumidificação. A velocidade pode ser definida em função de diversas variáveis como a umidade e a área de superfície da biomassa. Nos sólidos, quanto maior a superfície de contato dos reagentes, maior o número de moléculas reagindo, aumentando a

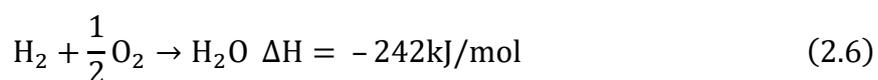
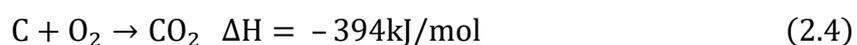
velocidade de reação e diminuindo o tempo de secagem. Portanto, é essencial que o combustível sólido seja colocado com a granulometria adequada para a melhorar a eficiência do processo. Após a secagem, a biomassa segue para a zona de pirólise.

A pirólise é o processo que ocorre com ausência de agente oxidante, ou com um fornecimento limitado de oxigênio, para que seja inibido o processo de gaseificação. Este processo é feito em temperaturas relativamente baixas, próximas de 400 a 800 °C, em comparação aos 800 a 1.100 °C empregados na gaseificação (Bridgwater e Bridge, 1991).

Durante o processo de pirólise o calor absorvido provoca aumento da temperatura das partículas, ocasionando o início das reações responsáveis pela saída de voláteis do material que está sendo pirolisado. O resultado desse processo são produtos sólidos rico em carbono, como o carvão vegetal, além de líquidos e gases pirolíticos (DALVI, 2015). A fração gasosa é composta fundamentalmente pelos gases leves, ou seja, pelo dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano. Há também pequenas quantidades de gás hidrogênio e outros hidrocarbonetos.

As proporções entre sólido, líquido e gasoso gerados pela pirólise dependem do material que é pirolisado e das variáveis do processo. Por ser endotérmico, a pirólise também necessita de uma fonte externa de energia (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016).

A oxidação, por se tratar de uma reação exotérmica, fornece a energia necessária para a etapa de secagem, pirólise e redução. A oxidação ocorre com falta de oxigênio em relação a razão estequiométrica para que não ocorra a oxidação total do combustível. Considerando apenas a oxidação do hidrogênio e da parte sólida, as reações são descritas a seguir (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016).



A zona de redução apresenta temperaturas de trabalho entre 800°C e 1.100°C (QUITETE; SOUZA, 2014) e está relacionada à etapa responsável pela gaseificação, por meio das reações que conduzem à formação do gás combustível (RODRIGUES, 2008).

### 2.7.1 TIPOS DE GASEIFICADORES

Segundo LORA et al. (2012), o gaseificador é o reator no qual acontece a conversão termoquímica da matéria prima em gás de síntese. Existem três tipos principais de gaseificadores: gaseificador de leito fixo, gaseificador de leito fluidizado e gaseificador por plasma. Neste trabalho serão abordados os gaseificadores de leito fixo e fluidizado. As principais diferenças dos reatores de gaseificação de leito fixo e fluidizado são apresentadas na Tabela 2.1.

<b>Downdraft</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Construção Simples	Requer baixa umidade do combustível a ser utilizado
Alto potencial para conversão de carbono	Restrição de granulometria
Alta eficiência de conversão	Possibilidade de fusão das cinzas
<b>Updraft</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixa temperatura dos gases de saída	Gás produzido com alta concentração de impurezas e alcatrão
Alta eficiência térmica	
Alta conversão de carbono	
Pouco arraste de cinzas	
<b>Leito Fluidizado</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Tolera variações da qualidade do combustível	Sistema de alimentação
Melhor distribuição de temperatura do leito	Problemas com aglomeração de bolhas no leito
Possibilita processo catalítico no leito	
Alta eficiência de conversão	

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens por tipo de gaseificador

Fonte: Adaptado de REPORT e SAHOO (2012).

#### 2.7.1.1 Gaseificadores de leito fixo

Os gaseificadores de leito fixo são os mais utilizados em plantas de pequenas escalas e apresentam elevada eficiência energética. Os gaseificadores de leito fixo são divididos em contracorrente, concorrente e fluxo cruzado (NÁSNER, 2015).

#### 2.7.1.1.1 Gaseificadores contracorrentes (“*updraft*”)

Nos gaseificadores contracorrentes, representados pela Figura 2.9, o fluxo entrada do fluido gaseificante é contrário à alimentação de biomassa, enquanto o material sólido é alimentado pela parte superior do equipamento, o fluido é introduzido pela parte inferior do reator.

O material sólido é convertido em gás de síntese a medida em que ele percorre a trajetória para a parte inferior do reator. Durante esta trajetória ocorre a sequência de reações: Secagem, pirólises, redução e combustão (oxidação). Na zona de combustão é onde se atinge a maior temperatura, próxima a 1200 °C (Belgiorno et al. 2003).

Este tipo de gaseificador possui alta eficiência térmica, devido aos gases, provenientes da região de combustão, trocarem calor com combustível que será utilizado, proporcionando o pré-aquecimento do combustível e resfriamento do gás de síntese.

Porém, como desvantagem, apresentam problemas relacionados com a eliminação dos líquidos condensados, que contêm alcatrões resultantes das operações de limpeza do gás. (FAO, 1986).

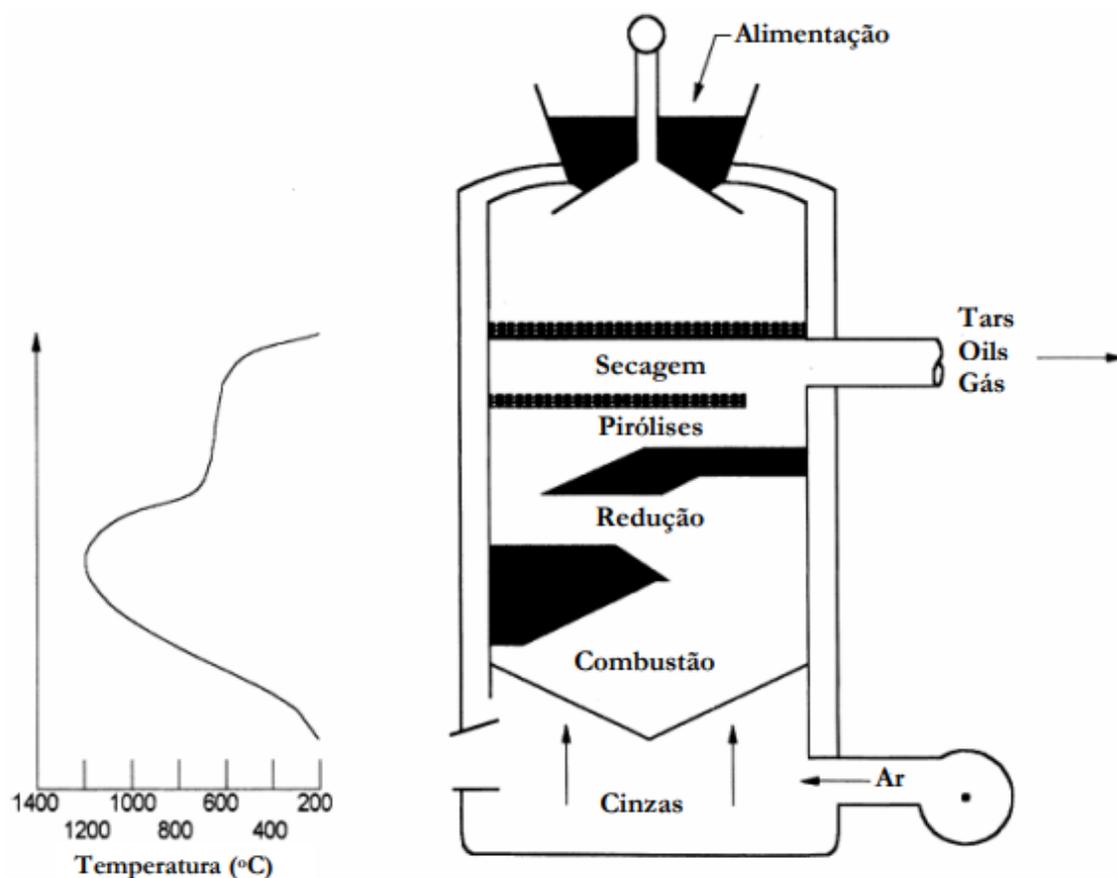


Figura 2.9 - Esquema de um gaseificador contracorrente.

Fonte: Adaptado de McKendry (2002).

#### 2.7.1.1.2 Gaseificadores concorrente ("downdraft")

Neste tipo de gaseificador, representado pela Figura 2.10, a biomassa é alimentada pela parte superior do reator e o ar também é fornecido, por cima, ou pode ser também lateralmente. O gás de síntese gerado é direcionado para parte inferior do equipamento, passando por regiões de alta temperatura que possibilita o craqueamento do alcatrão que é arrastado.

A disposição das zonas de reação, nesse tipo de reator, é bem definida como no gaseificador contracorrente, porém sua disposição é diferente, onde inicialmente a biomassa passa pela região de secagem, seguindo para a região de pirólise, posteriormente é encaminhada para zona de combustão e finalmente a redução (Midilli et al. 2001; Drogu et al. 2002; Jayah et al. 2003; Di Blasi, 2000; FAO, 1986; Klein, 2002; Belgiorno et al. 2003; McKendry, 2002), como é mostrado na Figura 2.11.

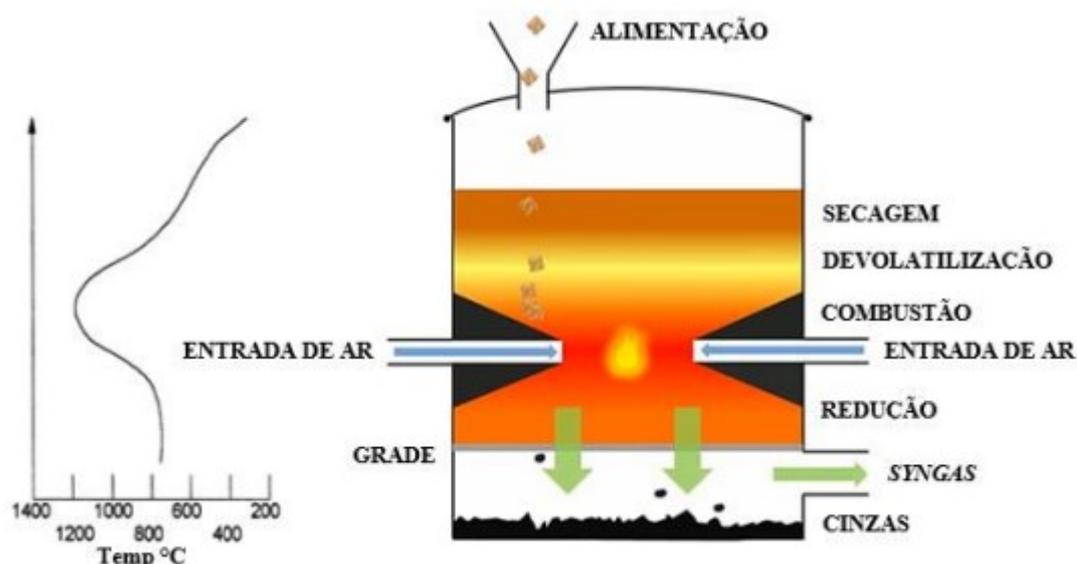


Figura 2.10 - Esquema de um gaseificador concorrente.

Fonte: Azevedo de Oliveira (2016).

A principal vantagem deste tipo de reator está na possibilidade de produzir um gás com baixa concentração de alcatrões que é apropriado para ser utilizado em motores de combustão interna, o que não ocorre nos reatores contracorrente. Porém, antes de adentrar o reator o combustível sólido precisa ser briquetado, e materiais de baixa densidade podem ocasionar problemas internos de circulação no reator (FAO, 1986; Klein, 2002).

O gás de síntese produzido durante o processo de gaseificação em um reator concorrente depende de diversos parâmetros operacionais, tais como condições de reação na zona de pirólises; velocidade de aquecimento; temperatura, taxa de umidade da biomassa; tamanho das partículas briquetadas; composição da atmosfera no reator; pressão e tempo de residência no reator (Midilli et al. 2001).

As desvantagens deste tipo de gaseificador se dá principalmente pela alta influência dos parâmetros de entrada no resultado do gás de síntese. Sendo necessário um controle preciso da granulometria e umidade do insumo que será gaseificado, além da possibilidade de fusão das cinzas (REPORT e SAHOO, 2012).

#### 2.7.1.2 Gaseificador de leito fluidizado

Neste tipo de gaseificador utiliza-se um elemento inerte como a areia para servir de leito, o qual será aquecido e mantido em suspensão (fluidizado) pelo fluxo ascendente de um fluido, que pode ser o ar, criando condições favoráveis de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara da reação (Resende, 2003). A representação de um gaseificador de leito fluidizado é exibida pela Figura 2.11.

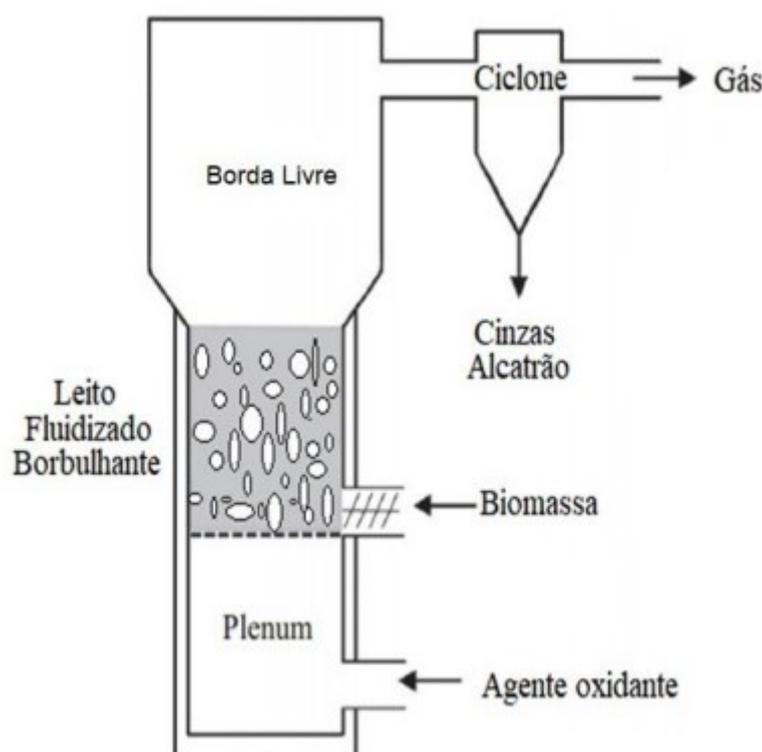


Figura 2.11 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante.

Fonte: Adaptado de MOTTA et al. (2018).

A fluidização promove um excelente contato entre sólidos e gases, assim como uma vigorosa mistura das partículas. Isso resulta em altas taxas de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme no leito (Fernandez, 2004).

A eficiência desse tipo de reator é aproximadamente cinco vezes maior que um reator de leito fixo (Belgiorno et al. 2003), mas assim como nos reatores de leito fixo depende das características da biomassa que é utilizada, do agente oxidante, bem como, dos parâmetros de operação do reator, como: temperatura do leito, velocidade superficial, pressão do reator e carga de biomassa.

Por possuíres capacidade de operar com materiais de granulometria fina sem a necessidade de serem briquetados e devido ao fácil controle para manter uma temperatura abaixo do ponto de fusão das cinzas, a principal vantagem destes gaseificadores é a flexibilidade quanto ao material que será gaseificado. No entanto, as temperaturas de operação limitadas podem ocasionar alto teor de alcatrões no gás e combustão incompleta do carvão (FAO, 1986; Fernandez, 2004).

### 3 ENGENHARIA FINANCEIRA

Para a implementação de um projeto de recuperação energética, é necessário analisar os investimentos e benefícios econômicos que o empreendimento poderá proporcionar. A análise da engenharia financeira possibilita avaliar a viabilidade econômico-financeira de projetos de engenharia, levando em consideração aspectos financeiros, tributários, legais e ambientais de tais investimentos. Mediante aos métodos de análise que a engenharia financeira possibilita, a avaliação e tomada de decisões podem ser realizadas a fim de reduzir custos e ampliar resultados.

As ferramentas matemáticas de análise econômica servem para auxiliar o investidor na tomada de decisão de um projeto ser economicamente viável ou não. Neste trabalho será utilizado o *Payback* Descontado, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Estes indicadores são ferramentas fundamentais da engenharia econômica para a avaliação da viabilidade de um projeto e segundo Souza (2007), o VPL e a TIR são os indicadores mais utilizados pelas empresas na análise de investimento.

Para realizar a avaliação econômica de um projeto é necessário obter o levantamento das receitas, do custo do investimento, dos custos operacionais, e dos outros custos que compõem o fluxo de caixa. A partir do fluxo de caixa, podem ser avaliados os indicadores de VPL, TIR e *Payback* descontado.

Conforme Mayer et al. (2009), devem ser estudados os custos dos seguintes itens para a instalação de uma central geradora:

- Terreno;
- Construção civil: instalações necessárias para a implantação da termoelétrica, que compreende o prédio para o gerador e caldeira;
- Máquinas e equipamentos: engloba os valores referentes aquisição da caldeira, turbina, gerador, painéis de controle e materiais eletromecânicos utilizados na montagem e interligação entre os equipamentos;
- Montagem: recursos para serviços de montagem e instalação dos equipamentos;
- Seguros referentes às garantias contra um eventual prejuízo durante a instalação da termoelétrica;

- Transporte dos equipamentos do local de fabricação até o local de montagem e instalação;

- Imprevistos: reserva de recursos financeiros para eventuais despesas não programadas durante a fase de projeto;

A análise operacional de uma usina também compreende custos considerados fixos como: salários; depreciação e manutenção dos equipamentos; impostos; legalização do empreendimento.

Existem também os custos variáveis que englobam compra de matérias-primas e insumos, como gastos com o tratamento de água da caldeira e tratamento de poluentes; demanda suplementar de energia, necessária para assegurar o fornecimento de energia elétrica previsto em contrato se houver problemas na planta; gastos relacionados ao consumo de eletricidade da rede quando o consumo for maior que a geração.

### 3.1 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é um conceito financeiro que se refere à menor taxa de retorno que um investidor ou empresa considera atrativa para realizar um investimento, trata-se de uma taxa de juros que representa o mínimo que o investidor se propõe a ganhar quando aplica seus recursos (Santos, 2009).

Isso significa que, se a taxa de retorno oferecida for menor do que a taxa mínima atrativa, o investidor ou empresa provavelmente não fará o investimento.

A TMA pode variar de acordo com o investidor ou empresa e pode ser afetada por diversos fatores como os riscos associados ao investimento, o capital disponível para investir, a tendência geral de surgimento de aplicações mais rentáveis (Hess, 1992).

### 3.2 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O Valor Presente Líquido (VPL) analisa o valor do dinheiro no tempo e é um dos métodos mais conhecidos e aplicados na análise de projetos de investimentos (BRASIL, 2002; DAMODARAN, 2010a).

O VPL trata-se da diferença entre o valor presente das entradas futuras de caixa e o valor presente das saídas futuras de caixa, a uma determinada taxa de desconto (Kassai et al, 2000).

O objetivo do VPL é estimar o lucro futuro com o investimento e, ao converter o retorno em dinheiro para o presente, o investidor consiga decidir se vale a pena ou não investir em tal projeto.

De acordo com Damodaran (2010), nesta análise a Taxa Mínima de Atratividade é utilizada como taxa de desconto no cálculo do valor presente das entradas e saídas de caixa. As possibilidades para o VPL são descritas a seguir:

VPL > 0: significa que o valor presente das entradas de caixa é maior que o presente das saídas de caixa, portanto o investimento do projeto é considerado economicamente viável.

VPL = 0: significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o retorno esperado do projeto é iguala à TMA exigida pelos investidores.

VPL < 0: significa que o valor presente das entradas é menor do que o valor presente das saídas, logo o investimento não é considerado economicamente atrativo. o VPL pode ser calculada através da Equação 3.1.

$$VPL = I + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (3.1)$$

Onde,  $FC_t$  e o fluxo de caixa no período  $t$ ;  $N$  é e o número de períodos durante a vida útil do projeto;  $i$  é taxa de desconto (geralmente a TMA).

### 3.3 TAXA INTERNA DE RETORNO

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa de remuneração recebida por um investimento (Atkinson et al, 2000). A TIR também faz com que o valor presente líquido seja igual a zero, ou seja, a TIR é a taxa de desconto que faz com que o valor presente de entrada de caixa seja igual ao valor presente de saída, como demonstra a Figura 3.1 (DAMODARAN, 2010a).

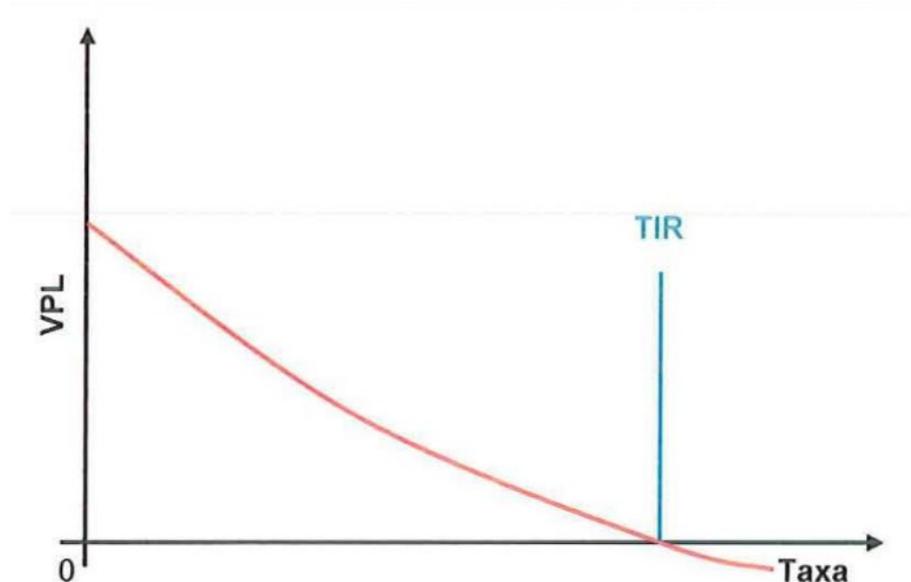


Figura 3.1 – Ilustração do gráfico de TIR.

Fonte: Souza e Clemente. (2001).

A TIR pode ser utilizada pelo investidor para tomar decisões entre diferentes opções de investimento. Para isso, determina-se a TMA e TIR de cada uma das alternativas. Considera-se o melhor investimento o que possuir a maior TIR, desde que ela seja maior que a TMA deste investimento.

A seguir são descritas as possibilidades para a TIR:

TIR > TMA: o investimento é economicamente viável, pois a taxa de retorno esperada é maior que a taxa mínima de atratividade exigida para a implantação do projeto.

TIR = TMA: a taxa de retorno do projeto é igual à taxa mínima de atratividade, logo, o investimento é considerado atrativo.

TIR < TMA: a taxa de retorno esperada é inferior à taxa mínima de atratividade desejada pelos investidores.

A Equação 3.2 representa o cálculo da TIR:

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (3.2)$$

Onde,  $VPL$  é o valor presente líquido;  $I$  representa o investimento inicial;  $t$  período de tempo;  $FC_t$  o fluxo de caixa no período  $t$  e  $TIR$  é a taxa interna de retorno.

### 3.4 PAYBACK DESCONTADO

Para indicar o tempo necessário que um empreendimento irá recuperar o investimento inicial, pode-se utilizar o *Payback* simples ou descontado.

O primeiro método é o mais simples para se analisar a viabilidade econômica de um determinado projeto e é calculado dividindo o investimento inicial pelo fluxo de caixa anual esperado (BRASIL, 2002; DAMODARAN, 2010a).

No entanto, o *Payback* simples não traz para o presente a receita gerada ao longo do tempo, ou seja, não leva em consideração a taxa de juros ou de retorno esperada, e por isso é considerado uma medida de rentabilidade insuficiente (Kassai et al, 2000).

Ao contrário do primeiro método, o *Payback* descontado leva em conta os fluxos de caixa futuros calculando seus valores no presente, ou seja, é o tempo de recuperação do investimento, remunerado pela taxa de desconto representada pela TMA e poder ser calculado pela Equação 3.3 (BRASIL, 2002; DAMODARAN, 2010a).

Ao trazer seus valores futuros para o presente, o *Payback* descontado permite uma avaliação mais precisa da rentabilidade do investimento ao longo do tempo (Kassai et al, 2000).

A análise deste indicador considera que quanto menor o *Payback* menos arriscado é o investimento, pois mais rápido ele será recuperado. Se o tempo de *payback* for menor que o prazo máximo estabelecido pelos investidores, o projeto deverá ser considerado viável, caso contrário, deverá ser rejeitado.

$$PD = \sum_{k=1}^j \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (3.3)$$

Onde,  $PD$  é o *Payback* descontado;  $FC_t$  o fluxo de caixa no ano  $t$ ;  $TMA$  é a taxa mínima de atratividade.

### 3.5 FLUXO DE CAIXA

A determinação do valor da empresa é de fundamental importância para avaliação do investimento e pode ser calculado em função da expectativa de geração de lucros futuros (DAMODARAN, 2010a).

Há diversos métodos para mensurar o valor de uma empresa, que mesmo partindo de diferentes premissas, compartilham de características comuns, mas que podem resultar em valores diferentes para a mesma empresa (DAMODARAN, 2010a).

O método do Fluxo de Caixa Descontado (FCD), avalia o valor de mercado atual de uma empresa, calculando suas projeções de fluxo de caixa futuros e é considerado o mais completo dentre os métodos existentes, pois exige informações detalhadas do projeto (DAMODARAN, 2010b).

Utilizando o FCD, há duas possibilidades de avaliação do projeto: a que consiste em avaliar a empresa como um todo e outra que consiste em avaliar a participação do acionista (DAMODARAN, 2010b). Na primeira possibilidade, avalia-se o Fluxo de Caixa Livre para a Empresa (FCLE) e no segundo avalia-se o Fluxo de Caixa Livre para os Acionistas (FCLA). Os dois métodos produzirão estimativas sólidas de valor, desde que adotem o mesmo conjunto de premissas (DAMODARAN, 2010b). Neste trabalho será utilizado o método FCLA.

### 3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A Análise de sensibilidade é uma técnica utilizada para avaliar o impacto de uma decisão no investimento, levando em conta as incertezas e variações nos parâmetros de entrada. Ela permite analisar como pequenas variações em determinadas variáveis podem afetar o resultado do projeto (VANNUCCI, 2013).

Segundo Torres (2006), esta análise consiste em avaliar como o fluxo de caixa será afetado por variações em uma ou mais variáveis do projeto, enquanto se mantém as demais em seu valor de referência.

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 deste parâmetro. Exemplos de variáveis que podem ser analisadas são: custos fixo e variáveis, receitas, taxas de juros, custos de operação e manutenção, entre outros. Caso a variação no indicador de viabilidade

seja pequena, diz-se que a decisão é insensível à variação do parâmetro testado (HIRSCHFELD, 2000).

Por meio dessa análise é possível determinar quais parâmetros são mais sensíveis, ou seja, causam maior variação no fluxo de caixa e conseqüentemente nos resultados e, portanto, necessitam mais atenção por parte dos tomadores de decisão.

## 4 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo comparativo da viabilidade econômico-financeira entre a implantação de uma Usina Termoquímica de Geração de Energia – UTGE, por meio de gaseificação e de incineração.

Para tal estudo, é necessário determinar a capacidade de processamento diário de resíduos das usinas, uma vez que o potencial de geração de energia do empreendimento está ligado à sua capacidade; poder calorífico do RSU; e eficiência dos processos presentes entre a transformação do RSU *in natura* em energia elétrica, tanto para incineração quanto para gaseificação; estimativa de custos para a implementação das usinas, custos operacionais, taxa de juros do financiamento do empreendimento; etc.

Diante da estimativa dos custos e receitas geradas pela UTGE, é elaborado o fluxo de caixa em que será baseado o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica VPL, TIR e *Payback*, a partir de uma TMA definida, determinando-se assim os resultados.

Uma vez que o estudo trata da comparação entre duas tecnologias para recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (com mesma capacidade de processamento ton/dia) simuladas no mesmo local físico, será suprimido da análise: os custos com terreno, transporte dos resíduos e implementação da linha de transmissão, pois se tratando de um mesmo local físico e capacidade de processamento de RSU, estes custos são iguais e seriam anulados na análise.

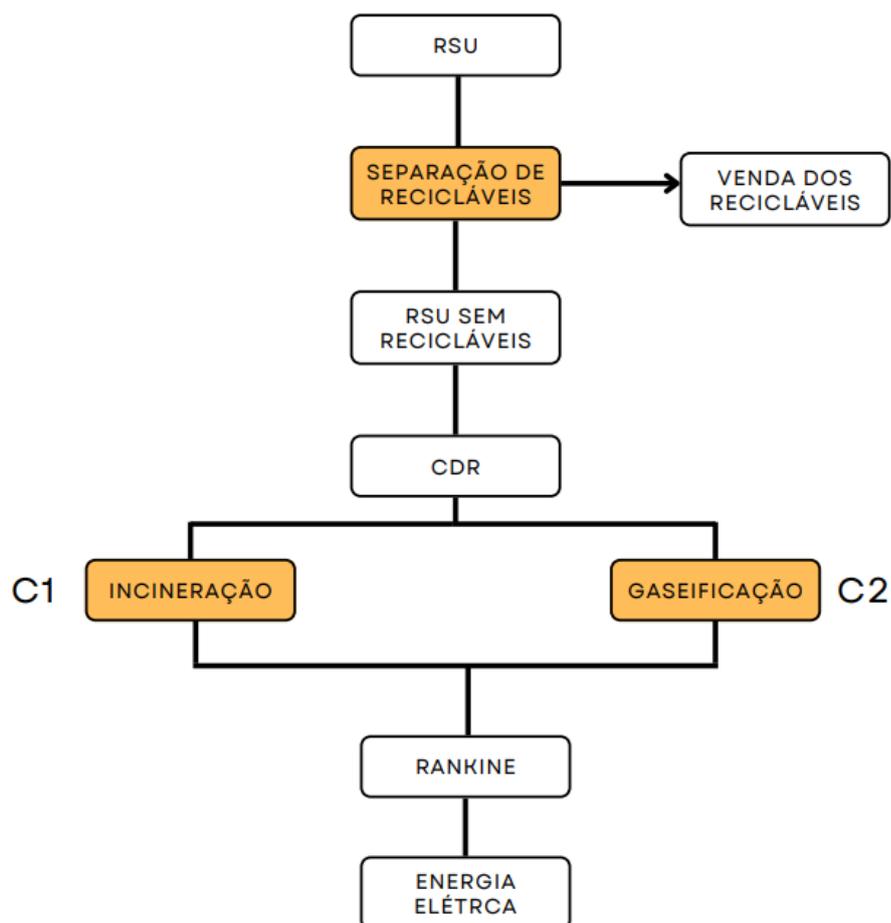


Figura 4.1 – Cenários para a geração de energia elétrica através de RSU  
 Fonte: O autor (2022).

A Figura 4.1, mostra dois cenários (C1 e C2) que serão analisados para a geração de energia através do RSU.

Em ambos os cenários o RSU passa por um processo de triagem para separar a parte reciclável, uma vez que a legislação brasileira não permite a incineração ou gaseificação do resíduo *in natura*.

Considerando como recicláveis apenas vidros e metais, devido à dificuldade de separar, por exemplo, plásticos, papéis, papelões etc., uma vez que o grande fluxo de RSU que passa pela planta exigiria enorme quantidade de pessoas trabalhando diretamente em contato com o resíduo *in natura*. Além de que, mesmo que viável esta triagem manual, grande parte deste material, teoricamente reciclável, não poderia ser, a exemplo de fraldas, papéis higiênicos, sacolas plásticas rasgadas em pequenos pedaços, papéis contaminados com chumbo etc.

Após o processo de separação de metais e vidros, o resíduo úmido passa pelo processo de secagem, até atingir a umidade de 15% em massa, gerando o CDR.

Apesar de ser tecnicamente possível a incineração do RSU *in natura* neste trabalho não será feita esta análise, uma vez que a legislação brasileira não permite que o RSU seja incinerado sem antes ser processado em CDR.

Sendo assim, serão analisados dois cenários. No primeiro, o CDR é incinerado, enquanto no segundo o CDR passa pelo processo de gaseificação. O calor gerado pela combustão do CDR, no cenário 1 ou pela combustão do gás de síntese, no cenário 2, é utilizado para gerar vapor no ciclo Rankine. A turbina do ciclo Rankine, é acoplada à um gerador de energia, responsável por transformar a energia mecânica da turbina em energia elétrica.

#### 4.1 PCS DO RSU

A análise gravimétrica dos resíduos que serão destinados às usinas deverá ser feita para determinar seu PCS. Uma vez conhecida sua gravimetria o PCS do RSU sem umidade poderá ser calculado através da Equação 4.1.

$$PCI_{RSU_{seco}} = \sum_i^n \%Parcela_i * PCS_i \quad (4.1)$$

Onde:

$PCI_{RSU_{seco}}$  - PCI do RSU sem umidade (ou PCS) (kcal/kg).

$\% Parcela_i$  - Porcentagem em massa do componente  $i$  presente na análise gravimétrica.

$PCS_i$  - PCS do componente  $i$  presente na análise gravimétrica.

$n$  - Número de componentes presente na análise gravimétrica.

#### 4.2 FLUXO MÁSSICO DE CDR, ÁGUA RETIRADA DO RSU, E PCI DO CDR

Para determinar o fluxo mássico e PCI do CDR, uma vez que se tem conhecimento do PCI do RSU sem umidade (ou PCS); percentual de umidade do RSU e fluxo mássico do RSU, define-se  $U$  e  $Y$  como sendo a porcentagem de umidade presente no CDR e RSU, respectivamente. Considerando  $U < Y$ , e utilizando o balanço

de massa que entra e sai da linha de processamento de resíduo sólidos, obtêm-se a Equação 4.2.

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{sai} \quad (4.2)$$

Onde:

$\dot{m}_{entra}$  - Fluxo mássico do RSU com Y% de umidade em massa (kg/h) sem os recicláveis e inertes.

$\dot{m}_{sai}$  - Fluxo mássico do CDR com U% de umidade em massa (kg/h) + Fluxo mássico de água retirada do RSU para que o CDR alcance U% de umidade.

Considerando  $\dot{m}_{RSU_{seco}}$  sendo igual a parcela sem umidade do Fluxo mássico do RSU com Y% de umidade e  $\dot{m}_{CDR_{seco}}$  sendo igual a parcela sem umidade do Fluxo mássico do CDR com U% de umidade, a Equação 4.2 pode ser reescrita de acordo com a Equação 4.3.

$$\dot{m}_{RSU_{seco}} + \dot{m}_{\acute{a}guaIN} = \dot{m}_{CDR_{seco}} + \dot{m}_{\acute{a}guaOUT} + \dot{m}_{\acute{a}guaEVA} \quad (4.3)$$

Logo:

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{RSU_{seco}} + \dot{m}_{\acute{a}guaIN} \quad (4.4)$$

$$\dot{m}_{sai} = \dot{m}_{CDR_{seco}} + \dot{m}_{\acute{a}guaOUT} + \dot{m}_{\acute{a}guaEVA} \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_{CDRU} = \dot{m}_{CDR_{seco}} + \dot{m}_{\acute{a}guaOUT} \quad (4.6)$$

Onde  $\dot{m}_{\acute{a}guaEVA}$  é a massa de água evaporada.

Como não há adição e nem perda de água durante o processo, o balanço de massa para água pode ser representado pela Equação 4.7.

$$\dot{m}_{\acute{a}guaIN} = \dot{m}_{\acute{a}guaOUT} + \dot{m}_{\acute{a}guaEVA} \quad (4.7)$$

Como a massa seca do resíduo se mantém constante, ou seja, não há acréscimo e nem perdas de material durante o processo de secagem, a Equação 4.8 pode ser determinada, substituindo 4.7 em 4.3.

$$\dot{m}_{RSU_{seco}} = \dot{m}_{CDR_{seco}} \quad (4.8)$$

Definido anteriormente U igual a porcentagem de umidade em massa do CDR, e Y igual a porcentagem de umidade em massa do RSU, então, pela definição.

$$\left(\frac{\dot{m}_{\acute{a}guaIN}}{\dot{m}_{entra}}\right) = Y; \left(\frac{\dot{m}_{\acute{a}guaOUT}}{\dot{m}_{CDRU}}\right) = U \quad (4.9)$$

Utilizando as Equações 4.6 e 4.9, a parte seca do CDR pode ser representada através da Equação 4.10.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CDR_{seco}} &= \dot{m}_{CDRU} - \dot{m}_{\acute{a}guaOUT} \\ \dot{m}_{CDR_{seco}} &= \dot{m}_{CDRU} - \dot{m}_{CDRU} * U \\ \dot{m}_{CDR_{seco}} &= \dot{m}_{CDRU} * (1 - U) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Utilizando as equações 4.4 e 4.9, a parte seca do RSU pode ser representada através da Equação 4.11.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{RSU_{seco}} &= \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{\acute{a}guaIN} \\ \dot{m}_{RSU_{seco}} &= \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{entra} * Y \\ \dot{m}_{RSU_{seco}} &= \dot{m}_{entra} * (1 - Y) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Substituindo as Equações 4.11 e 4.10 em 4.8, o fluxo mássico de CDR pode ser determinado pela Equação 4.12.

$$\dot{m}_{CDRU} = \frac{\dot{m}_{entra} * (1 - Y)}{(1 - U)} \quad (4.12)$$

Finalmente o fluxo mássico de água retirado do RSU pode ser encontrado pela Equação 4.13, substituindo na Equação 4.3,  $\dot{m}_{entra}$  e  $\dot{m}_{CDRU}$ , encontrados anteriormente pelas equações 4.4 e 4.12, respectivamente.

$$\dot{m}_{\acute{a}guaEVA} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{CDRU} \quad (4.13)$$

Já o PCI do CDR com U% de umidade pode ser determinado pela Equação 4.14.

$$PCI_{CDR_U} = PCI_{RSU_{seco}} * (1 - U) \quad (4.14)$$

Onde:

$PCI_{RSU_{seco}}$  - PCI do RSU sem umidade (kcal/kg).

$PCI_{CDR_U}$  - PCI do CDR com U% de umidade (kcal/kg).

O RSU pode apresentar diferentes níveis de umidade, em média de 50% (INFIESTA et al., 2019). Neste trabalho, será utilizado umidade do RSU (Y) = 50% e umidade do CDR (U) = 15%.

### 4.3 ENERGIA NECESSÁRIA PARA TRANSFORMAÇÃO DO RSU EM CDR

Uma vez que o processamento do RSU em CDR necessita de energia, é necessário estimar o quanto será gasto de energia neste processo, uma vez que esta energia gasta impactará diretamente na energia líquida produzida pelas usinas.

Será considerado, neste trabalho, apenas a energia necessária para secagem do RSU com 50% de umidade em massa até que o CDR alcance 15% de umidade em massa, sendo desconsiderado a energia necessária para moagem e triagem do resíduo.

Para que ocorra a evaporação da água presente no resíduo, é necessário que o resíduo úmido (massa de resíduo seco + massa de água) alcance 100 °C, temperatura em que a água evapora à pressão de 1 atm.

A energia, teórica, necessária para elevar a temperatura do RSU e da água contida no RSU, e evaporar parte da água do RSU para que seja alcançada a umidade de U%, pode ser aproximada como sendo a energia necessária para aquecer o RSU com Y% de umidade até 100°C + a energia necessária para vaporizar a água extraída do RSU ( $\dot{m}_{\text{águaEVA}}$ ).

Através da equação fundamental da calorimetria, a energia necessária para secagem do RSU pode ser aproximada através da Equação 4.15.

$$\dot{Q} = (\dot{m}_{entra} * C_p(100 - T_0) + \dot{m}_{\text{águaEVA}} * L) * \eta \quad (4.15)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a energia necessária para secagem do RSU (kW) até a umidade  $U\%$ ,  $C_p$  o calor específico do RSU (kJ/kg°C),  $T_0$  a temperatura inicial do RSU (°C) e  $L$  o calor latente da água (kJ/kg), os fluxos mássicos de água e RSU devem estar em kg/s.

Segundo Ferreira (2021), o calor específico do RSU em 0,9637 kJ/kg°C.

Como a secagem não se trata de um processo com 100% de eficiência, devido as perdas de calor para o ambiente externo, por exemplo, é de bom senso utilizar um coeficiente de segurança para o processo.

Neste trabalho será utilizado um coeficiente de segurança de  $\eta = 1,2$  para o secador; calor específico do RSU = 0,9637 kJ/kg°C; temperatura inicial do RSU = 25 °C; calor latente da água = 2260 kJ/kg.

Esta energia poderá ser fornecida totalmente ou parcialmente pelos gases de exaustão.

#### 4.4 PCI SYNGAS

O PCI do *syngas* depende de fatores como o PCI do CDR, tipo de gaseificador e variáveis no processo de gaseificação, como por exemplo, o tipo de atmosfera, pressão e temperatura presentes no gaseificador (Couto et al., 2013). Segundo Begum et al. (2014), o processo de gaseificação pode produzir gás de síntese com PCI de 4 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Ferreira (2021), em seu trabalho estimou um PCI para o *syngas* de aproximadamente  $4,6 \pm 0,3$  MJ/kg e a massa específica em  $1,18 \pm 0,1$  kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.5 EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A eficiência do processo de gaseificação, ou eficiência do gás frio é a relação entre o PCI do gás de síntese produzido e PCI do CDR utilizado com matéria prima para produção do *syngas*, de acordo com a Equação 4.16 (SHABBAR, et al., 2012). A eficiência do gás frio trata-se de um importante fator para comparar tipos diferentes de gaseificadores e decidir sobre os melhores parâmetros a serem utilizados no processo de gaseificação.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{syngas} * PCI_{syngas}}{\dot{m}_{CDR} * PCI_{CDR}} \quad (4.16)$$

Onde:

$\dot{m}_{syngas}$  - Fluxo mássico do gás de síntese (kg/h).

$PCI_{syngas}$  - Poder calorífico inferior do gás de síntese (kJ/kg).

$\dot{m}_{CDR}$  - Fluxo mássico do CDR (kg/h).

$PCI_{CDR}$  - Poder calorífico inferior do CDR (kJ/kg).

Tipicamente a eficiência de gaseificação varia entre 60 a 90%, de acordo com Reed & Das (1981) e depende das condições de gaseificação, como temperatura, pressão, características da matéria prima (Basu, 2006).

A Equação 4.16 permite encontrar o fluxo mássico do *syngas* ao estimar a eficiência do gaseificador, uma vez que as outras variáveis já foram determinadas anteriormente. Será utilizado a eficiência de 75%, neste trabalho.

#### 4.6 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE CICLOS TÉRMICOS

Segundo Paro (2011), quase a totalidade de centrais de geração ou cogeração termoelétrica no Brasil utilizam o ciclo de Rankine. Para usinas que utilizam RSU, CDR ou *syngas* como combustível isto também ocorre. O ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico de potência a vapor (ÇENGEL, et al., 2006).

Este ciclo funciona conforme a 2ª lei da termodinâmica e a produção de potência a partir do calor se dá em quatro etapas, representadas pela Figura 4.2, de Çengel e Boles (2006): (1→2) Compressão isentrópica na bomba; (2→3) Adição de calor em pressão constante na caldeira; (3→4) Expansão isentrópica na turbina até chegar à pressão do condensador; (4→1) Rejeição de calor a pressão constante em um condensador para condensação do vapor.

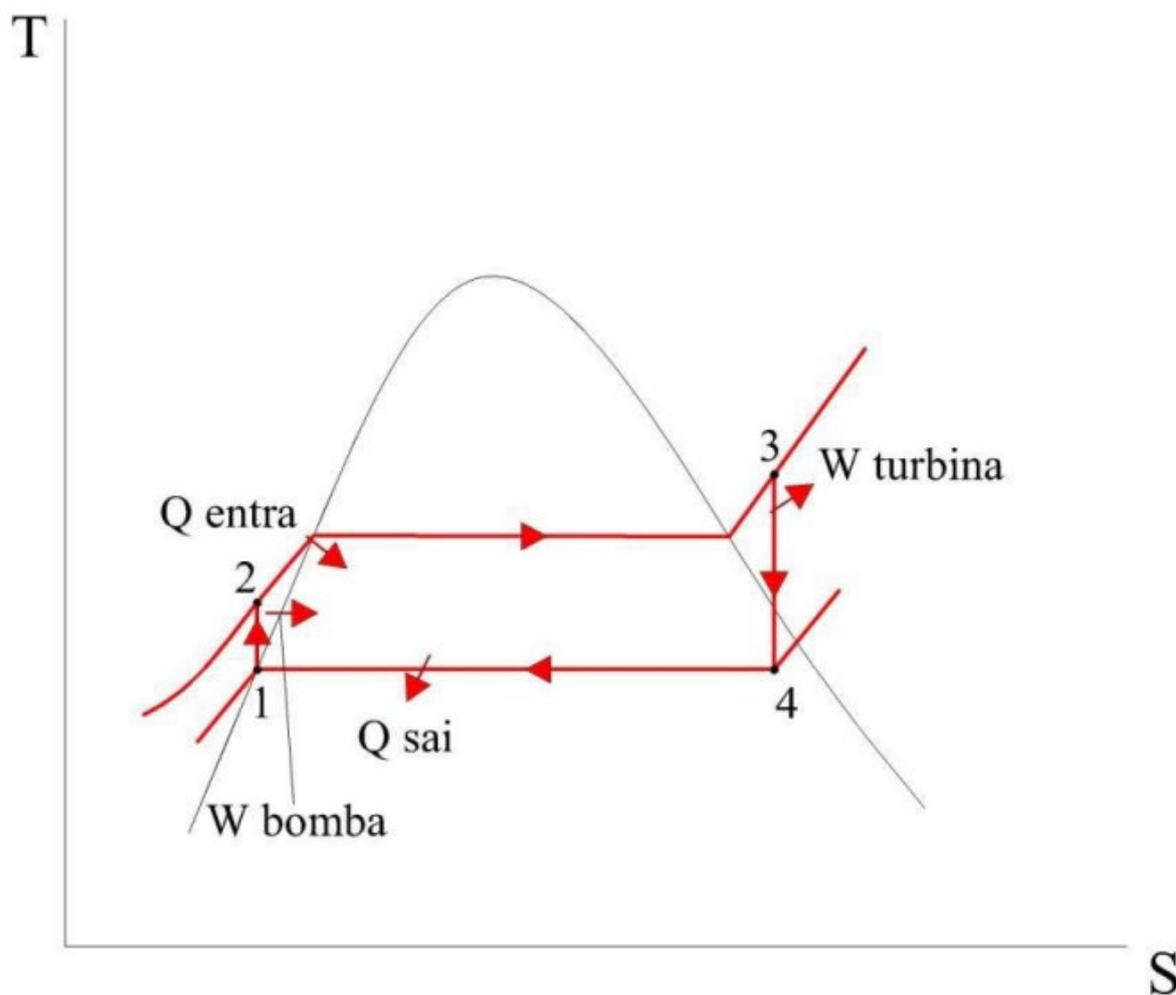


Figura 4.2 – Representação do ciclo Rankine.

Fonte: ÇENGEL e BOLES (2006).

No ciclo real de potência a vapor há, há diferenças do ciclo de Rankine ideal, devido às irreversibilidades em vários componentes, 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).

Outra fonte de irreversibilidade é a perda de calor do vapor à medida que este escoava através do equipamento. A eficiência do ciclo diminui pois é preciso transferir mais calor da caldeira para o vapor, para que se compensem as perdas (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Um estudo realizado em Singapura, apurou que a energia térmica é convertida em eletricidade por uma turbina a vapor utilizando o ciclo Rankine com 35% de eficiência (JONES, 2010). Será utilizado a eficiência de 35% neste trabalho.

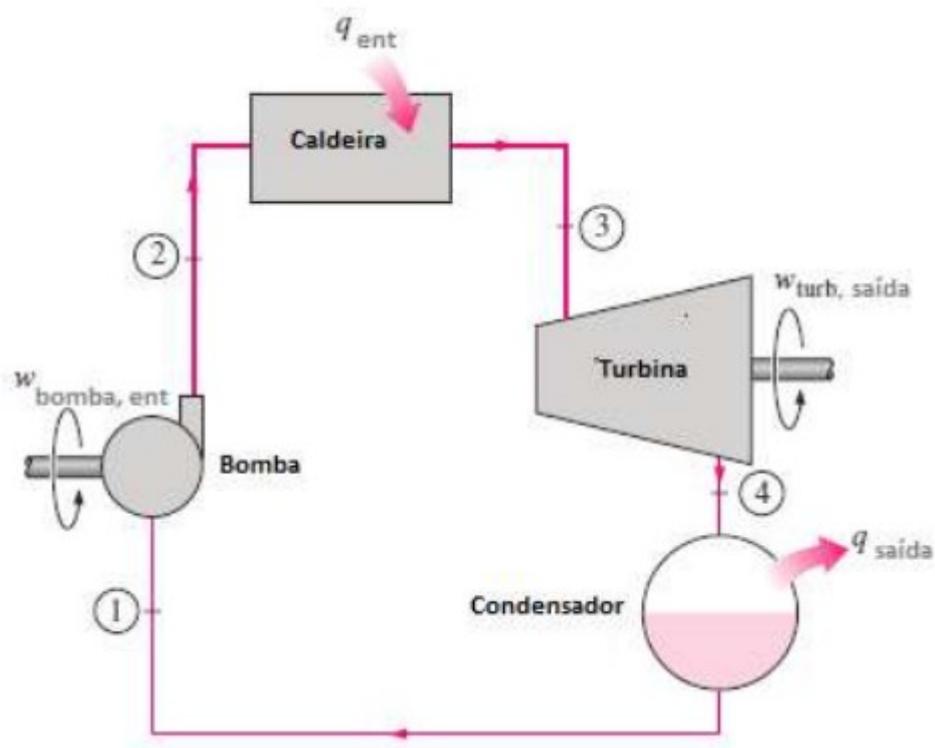


Figura 4.3 – Componentes do Ciclo Rankine

Fonte: ÇENGEL e BOLES (2006).

A potência elétrica é gerada por meio de um gerador acoplado no eixo de saída da turbina a vapor.

No caso dos geradores de energia elétrica, que é acoplado no eixo da turbina a vapor, será definido arbitrariamente um rendimento de 95%.

Desta forma a potência elétrica gerada na planta simulada é dada pela Equação 4.17.

$$\dot{W}_{elétrica} = PCI_{combustível} * \dot{m}_{combustível} * \eta_{rankine} * \eta_{gerador} \quad (4.17)$$

Onde:

$\dot{W}_{elétrica}$  - Energia elétrica produzida pelo ciclo (kW).

$PCI_{combustível}$  - PCI do combustível utilizado no ciclo (kJ/kg).

$\dot{m}_{combustível}$  - Fluxo mássico do combustível (kg/s)

$\eta_{rankine}$  - Eficiência do ciclo Rankine (%).

$\eta_{gerador}$  - Eficiência do gerador (%).

Para a geração de energia através do Ciclo Rankine, os combustíveis utilizados na simulação do presente trabalho serão: CDR e syngas.

## 4.7 MODELAGEM DO FLUXO DE CAIXA

O fluxo de caixa é um indicador financeiro que mede a entrada e saída de dinheiro de uma empresa. Ele é usado para avaliar a “saúde” financeira da empresa e sua capacidade de gerar caixa para suas atividades operacionais, investimentos e pagamentos de dívida. O modelo utilizado neste trabalho segue a estrutura básica definida por Damodaran (2010b) e é apresentado na Tabela 4.1.

---



---

(+) GANHOS COM ENTRADA DE RESÍDUOS
(+) VENDA DE ENERGIA
(+) VENDA DE RECICLÁVEIS
<b>(=) RECEITA BRUTA</b>
(-) IMPOSTOS SOBRE A RECEITA BRUTA
PIS/PASEP
COFINS
(-) DESPESAS OPERACIONAIS
<b>(=) LUCRO OPERACIONAL</b>
(-) DEPRECIAÇÃO
(-) JUROS FINANCIAMENTO
<b>(=) LUCRO OPERACIONAL TRIBUTÁVEL (LT)</b>
(-) IMPOSTO DE RENDA (IRPJ)
(-) CSLL
<b>(=) LUCRO OPERACIONAL LÍQUIDO</b>
(+) DEPRECIAÇÃO
<b>(=) FLUXO OPERACIONAL LÍQUIDO</b>
(-) AMORTIZAÇÃO DE FINANCIAMENTO
(-) INVESTIMENTO
(+) FINANCIAMENTO
<b>(=) FCLA</b>

---



---

Tabela 4.1 – Modelo do Fluxo de Caixa

Fonte: O autor (2022).

### 4.7.1 RECEITA BRUTA

A receita bruta do empreendimento será composta pela receita gerada com a venda de energia elétrica (R\$/MWh), somada à receita gerada pela taxa paga pelos municípios para descarte de resíduos (R\$/ton) e a venda dos materiais recicláveis separados do RSU.

### 4.7.2 DEPRECIAÇÃO ANUAL

A depreciação é definida pelo custo total de um empreendimento (capex) pelo tempo em que ele se mantém operante.

A depreciação anual do empreendimento é calculada a partir da Equação 4.18.

$$\frac{\text{Custo Total}}{\text{Anos de Funcionamento}} \quad (4.18)$$

Onde o *Custo total* é o custo total para a construção da usina e *Anos de funcionamento* é o tempo em que ela irá operar produzindo energia.

#### 4.7.3 TAXA DE JUROS DO FINANCIAMENTO

Considerando que o financiamento seja realizado pelo BNDES a taxa de juros sobre a valor financiado pode ser calculada pela Equação 4.19, segundo o BNDES - Finen.

$$TJ = TLP * RemBNDES \quad (4.19)$$

Onde:

*TJ* – Taxa de Juros ao ano (%).

*TLP* - Taxa de Longo Prazo (%).

*RemBNDES* - Remuneração do BNDES (%).

Para financiamento de usinas de recuperação energética de resíduos sólidos, a Remuneração do BNDES é de 1,1% ao ano. A TLP é calculada pela Equação 4.20.

$$TLP = (1 + IPCA) * (1 + TLP_{pré}) - 1 \quad (4.20)$$

Onde, o IPCA corresponde à variação percentual do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo, acumulado em 12 meses. Detalhes do cálculo da TLP podem ser vistos no Manual da Taxa de Longo Prazo (TLP), disponibilizado pelo BNDES.

Tendo como referência o período de dezembro de 2022 com IPCA acumulado de 5,91%, e o TLP pré-fixado de 5,23%, a taxa de juros do financiamento (TJ) pode ser representada pela Equação 4.21.

$$TJ = 1,01 * ((1 + 0,0591) * (1 + 0,0523) - 1) = 11,56\% \quad (4.21)$$

A Tabela 4.2 exibe o histórico, de janeiro de 2018 a agosto de 2022, do IPCA acumulado,  $TLP_{pré}$  e o cálculo da  $TLP$  composta por esses dois índices.

Mês de Referência	Taxa Pré - BNDES (% a.a.)	(*)IPCA para 12 meses (% a.a.)	Fator TLP(% a.a.) = (1 + IPCA) x (1+ TLP_Pré)-1
jan/18	2,70%	3,77%	6,57%
fev/18	2,74%	3,95%	6,80%
mar/18	2,71%	3,93%	6,75%
abr/18	2,62%	3,84%	6,56%
mai/18	2,55%	4,06%	6,71%
jun/18	2,58%	4,35%	7,04%
jul/18	2,78%	4,70%	7,61%
ago/18	3,00%	3,73%	6,84%
set/18	3,13%	3,63%	6,87%
out/18	3,17%	4,10%	7,40%
nov/18	3,10%	4,05%	7,28%
dez/18	2,98%	3,44%	6,52%
jan/19	3,19%	3,65%	6,96%
fev/19	2,98%	4,00%	7,10%
mar/19	2,84%	3,97%	6,92%
abr/19	2,70%	4,01%	6,82%
mai/19	2,67%	3,72%	6,49%
jun/19	2,64%	3,80%	6,54%
jul/19	2,53%	3,80%	6,43%
ago/19	2,25%	3,80%	6,14%
set/19	2,03%	3,43%	5,53%
out/19	1,91%	3,59%	5,57%
nov/19	1,80%	3,59%	5,45%
dez/19	1,68%	3,59%	5,33%
jan/20	1,78%	4,04%	5,89%
fev/20	1,79%	3,40%	5,25%
mar/20	1,83%	3,19%	5,08%
abr/20	1,98%	3,19%	5,23%
mai/20	2,12%	1,97%	4,13%
jun/20	2,26%	1,55%	3,85%
jul/20	2,06%	1,63%	3,72%
ago/20	1,78%	1,63%	3,44%

Mês de Referência	Taxa Pré - BNDES (% a.a.)	(*)IPCA para 12 meses (% a.a.)	Fator TLP(% a.a.) = (1 + IPCA) x (1+ TLP_Pré)-1
set/20	1,53%	1,77%	3,33%
out/20	1,49%	2,05%	3,57%
nov/20	1,64%	3,02%	4,71%
dez/20	1,83%	3,54%	5,43%
jan/21	2,10%	4,38%	6,57%
fev/21	2,09%	3,53%	5,69%
mar/21	2,08%	3,87%	6,03%
abr/21	2,33%	4,81%	7,25%
mai/21	2,65%	5,04%	7,82%
jun/21	2,87%	5,31%	8,33%
jul/21	2,99%	5,97%	9,14%
ago/21	3,03%	6,79%	10,03%
set/21	3,28%	7,27%	10,79%
out/21	3,54%	8,45%	12,29%
nov/21	3,83%	9,17%	13,35%
dez/21	4,10%	10,15%	14,67%
jan/22	4,63%	10,02%	15,11%
fev/22	4,75%	5,38%	10,39%
mar/22	4,77%	5,60%	10,64%
abr/22	4,94%	6,97%	12,25%
mai/22	4,95%	7,89%	13,23%
jun/22	5,01%	8,73%	14,18%
jul/22	4,99%	8,27%	13,67%
ago/22	5,19%	7,15%	12,71%
set/22	5,23%	6,70%	12,28%
out/22	5,27%	5,74%	11,31%
nov/22	5,17%	5,61%	11,07%
dez/22	5,23%	5,91%	11,45%

Tabela 4.2 – Fator TLP de 2018 a 2022

Fonte: TLP (2023).

#### 4.7.4 IMPOSTOS

De acordo com a RFB (2015), a alíquota do imposto de renda para pessoa jurídica (IRPJ), na data do presente trabalho, é de 15% sobre o lucro operacional tributável de até R\$ 240.000. E a alíquota de 25% é exercida sobre o excedente do lucro operacional tributável. A Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido (CSLL) é de 9%. Os tributos Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para

Financiamento da Seguridade Social (COFINS) incidem sobre a receita bruta. Na data do presente trabalho, a alíquota é de 1,65% e 7,60% para PIS e COFINS, respectivamente.

<b>Impostos</b>	
PIS	1,65% da Receita Bruta
COFINS	7,60% da Receita Bruta
CSLL	9% Sobre a Base de Cálculo do LT
IRPJ	Faixa 1: 15% até R\$ 240 mil / ano; Faixa 2: 25% sobre o excedente (sobre LT)

Tabela 4.3 – Alíquotas para tributação do Lucro Real  
Fonte: Elaboração própria de acordo com a RFB.

#### 4.7.5 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

O custo de implementação para o projeto é considerado como sendo o valor gasto para construir e colocar em funcionamento as atividades e objetivos estabelecidos por ele. Este custo inclui despesas com materiais, mão de obra, equipamentos, consultorias etc. e variam dependendo do tipo de tecnologia utilizada e da capacidade da instalação.

Conhecendo o custo  $C_1$  para implementação de uma usina com capacidade de processamento  $Cap_1$ , pode-se estimar o custo de implementação  $C_2$  de uma usina com capacidade de processamento  $Cap_2$  através Equação 4.22.

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{Cap_2}{Cap_1} \right)^n \quad (4.22)$$

Onde  $n$  é o expoente de fator de escala.

Quando  $n = 1$  o custo cresce linearmente conforme a capacidade de processamento aumenta. Quando  $n > 1$  o custo cresce de forma mais rápida que o aumento da capacidade de processamento, ou seja, de forma exponencial. E quando  $n < 1$  o custo aumenta de maneira mais lenta em relação à capacidade de processamento.

De acordo com Holmegren et al. (2015), valores típicos para  $n$ , nestes tipos de usinas variam entre 0,6 e 0,8.

Pode-se reescrever a Equação 4.22, resultando na Equação 4.23.

$$C_2 = k * Cap_2^n \quad (4.23)$$

Onde:

$$k = \frac{C_1}{Cap_1^n}$$

O custo para implementação e operação de uma usina de incineração de resíduos sólidos urbanos, segundo Kaza S et al. (2018), pode ser estimado através da Tabela 4.4.

<b>Incineração</b>		
	CAPEX (U\$/tonelada anual)	OPEX (U\$/ton)
Europa	600\$ - 1000\$	25\$ - 30\$
Estados Unidos	600\$ - 830\$	44\$ - 55\$
China	190\$ - 400\$	12\$ - 22\$

Tabela 4.4 – CAPEX e OPEX para usinas de incineração

Fonte: Kaza S et al. (2018).

Gergel (2015) estima os custos de operação e manutenção de uma planta de incineração como sendo de 5 a 10% dos custos de implementação, enquanto os custos de implementação podem ser estimados através da Equação 4.24.

$$C = 2,3507 * Cap^{0,7753} \quad (4.24)$$

Onde:

$C$  - Custos para implementação da planta em milhões de dólares.

$Cap$  - Capacidade de processamento da planta em milhares de toneladas por ano.

Através da Equação 4.24, os custos para implementação, a exemplo de comparação, de duas plantas de incineração, sendo a primeira com capacidade de processamento de 40.000 ton/ano e a segunda com capacidade de processamento de 250.000 ton/ano de resíduos sólidos, os custos seriam respectivamente: 41,05 e 169,95 milhões de dólares.

Sendo assim, o custo por tonelada de processamento anual estaria entre U\$ 680 e U\$ 1040. Estes valores são próximos aos estimados por Kaza S et al. (2018), e o valor do expoente de fator de escala, de 0,7753 está de acordo com o proposto por

Holmegren et al. (2015). Portanto, para o calcular o custo da implementação de uma usina de incineração, neste trabalho, será utilizada a Equação 4.24.

Para a gaseificação, os custos da implementação de uma usina com capacidade de processamento de 250.000 toneladas por ano de RSU, são estimados entre 80 e 120 milhões de euros (Mutz et al. 2017). Segundo Mutz et al. (2017), os custos de operação e manutenção de usinas de incineração, são aproximadamente 2,2 vezes superiores aos da gaseificação.

Desrosier (1979) estimou os custos para implementação de três usina com capacidades de processamento de 400, 800 e 1600 t/dia, conforme a Tabela 4.5.

Gaseificação			
Capacidade (t/dia)	400	800	1600
Custo (USD)	\$ 9.274.000,00	\$ 14.768.000,00	\$ 24.291.000,00

Tabela 4.5 – CAPEX para diferentes capacidades de usinas de gaseificação

Fonte: Elaboração própria de acordo com Desrosier (1979).

Apesar destes custos serem defasados devido a inflação, o interesse nos dados apresentados por Desrosier (1979) se dá pela possibilidade de encontrar o expoente de fator de escala para o processo de gaseificação. Com os dados da Tabela 4.5 é possível encontrar o expoente de fator de escala  $n = 0,6946$ , coerente com o estimado por Holmegren et a. (2015).

Considerando o valor de 120 milhões de euros para implementação de um projeto de gaseificação com capacidade de processamento de 250.000 t/dia e o expoente de fator de escala  $n = 0,6946$ , através da substituição e rearranjo da Equação 4.22 é possível determinar uma equação geral para o custo de implementação de uma usina de gaseificação em função da sua capacidade de processamento, representada pela Equação 4.25.

$$C_2 = 2,5916 * Cap_2^{0,6946} \quad (4.25)$$

Onde,  $C_2$  é o custo em milhões de euros para implementação da usina, e  $Cap_2$  é a capacidade de processamento de RSU em milhares de toneladas por ano.

Será utilizada a Equação 4.25 para determinar os custos de implementação de uma usina de gaseificação com a capacidade  $Cap_2$ .

Neste trabalho, foi utilizado a conversão de moedas como sendo 1 Dolar = 5,30 Reais = 1,05 Euros.

Definido o modelo do fluxo de caixa nesta Seção, é possível calcular seu resultado a partir dos dados de entrada como: taxa de juros do financiamento; capacidade e processamento da usina; capex; opex; preço de venda da energia elétrica; vida útil da usina etc. e a partir dele é analisado os indicadores VPL, TIR e *Payback* descontado.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DO RSU E CDR

A composição do RSU utilizado nas análises foi o mesmo que Ferreira (2021) cita em seu trabalho. A Tabela 5.1 exibe seus componentes; porcentagem em massa; poder calorífico superior do RSU (4.435,29 kcal/kg); poder calorífico inferior do RSU quando ele se encontra com 50% de umidade (2.217,6 kcal/kg).

UNIDADE DE RECEBIMENTO DO RSU					ENTRADA NO SECADOR (RSU) COM UMIDADE DE 50%		SAÍDA DO SECADOR (CDR) COM UMIDADE DE 15%		ÁGUA EVAPORADA (kg)	
COMPOSIÇÃO RSU	RECICLÁVEL?	FRAÇÃO MÁSSICA	PCS DE CADA COMPONENTE (kcal/kg)	PCS * FRAÇÃO MÁSSICA	Massa de RSU (kg) com umidade de	Massa de RSU (kg) com umidade de	PCI (kcal/kg) com umidade de	PCI (kcal/kg) com umidade de	Massa de CDR (kg) com umidade de	Abatimento Umidade
					50%	50%	50,0%	15,0%	Secador	
					50,0%	Entrada Secador	Entrada Secador	Saída Secador		15%
MATÉRIA ORGÂNICA	NÃO	35,2%	4521,0	1591,4	352,0	352,0	795,7	1352,7	207,1	144,9
FINOS	NÃO	3,0%	4521,0	135,6	30,0	30,0	67,8	115,3	17,6	12,4
PAPEL	NÃO	6,4%	3575,0	230,6	64,5	64,5	115,3	196,0	37,9	26,6
PAPELÃO	NÃO	6,0%	3795,0	227,7	60,0	60,0	113,9	193,5	35,3	24,7
COMPLEX	NÃO	8,7%	5005,0	437,9	87,5	87,5	219,0	372,2	51,5	36,0
TÊXTIL	NÃO	10,0%	4542,0	454,2	100,0	100,0	227,1	386,1	58,8	41,2
TÊXTIL DE SAUDE	NÃO	12,3%	4518,0	555,7	123,0	123,0	277,9	472,4	72,4	50,6
PLASTICOS	NÃO	8,8%	7957,8	700,3	88,0	88,0	350,1	595,2	51,8	36,2
NÃO CLASSIFICADOS	NÃO	1,3%	4278,0	55,6	13,0	13,0	27,8	47,3	7,6	5,4
VIDRO	SIM	1,4%	0,0	0,0	14,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0
METAIS	SIM	5,2%	0,0	0,0	52,0	52,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NÃO CLASSIFICADOS	SIM	0,5%	0,0	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
OUTROS	NÃO	1,1%	4203,0	46,2	11,0	11,0	23,1	39,3	6,5	4,5
<b>TOTAL</b>		<b>100%</b>		<b>4.435,3</b>	<b>1.000,0</b>	<b>929,00</b>	<b>2.217,6</b>	<b>3.770,0</b>	<b>546,5</b>	<b>382,5</b>

Tabela 5.1 – Parâmetros do RSU e CDR.

Fonte: Adaptado de Ferreira (2021).

A transformação do RSU em CDR é baseada nas formulações descritas na Seção 4.2. As características do CDR produzido a partir do RSU estudado são descritas na Tabela 5.1.

O PCI do CDR com umidade de 15% encontrado é de 3.770 kcal/kg. É possível observar, também, que nestas condições, 1 tonelada de RSU é capaz de produzir

545,6 kg de CDR, para isto é necessário a evaporação de 382,5 kg de água do RSU, além da separação de 71 kg de material reciclável.

## 5.2 ENERGIA NECESSÁRIA PARA TRANSFORMAR CADA TON DE RSU EM CDR

Utilizando a Equação 4.15 é possível encontrar a quantidade de energia por unidade de tempo (kJ/s) desde que a massa de água e de resíduos também sejam representadas por unidade de tempo (kg/s). Para encontrar a energia necessária para transformar 1 ton de RSU em CDR independentemente do tempo em que cada tonelada de resíduo é processada, ajusta-se a Equação 4.15 para a Equação 5.1.

$$q \text{ [kJ]} = m_{entra} \text{ [kg]} * C_p \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] (100 - T_0) \text{ [}^\circ\text{C]} + m_{\acute{a}guaEVA} \text{ [kg]} * L \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (5.1)$$

Onde  $q$  é a energia necessária (kJ) para secagem da massa  $m_{entra}$  de RSU até a umidade  $U\%$ ,  $C_p$  o calor específico do RSU (kJ/kg $^\circ\text{C}$ ),  $T_0$  a temperatura inicial do RSU ( $^\circ\text{C}$ );  $L$  o calor latente da água (kJ/kg), e  $m_{\acute{a}guaEVA}$  é a massa de água a ser evaporada.

Utilizando os dados da Tabela 5.1 e a Equação 5.1, a energia necessária para secagem dos 929 kg de RSU (que já se encontram sem o material reciclável) com 50% de umidade de até que o CDR atinja 15% de umidade é calculada a seguir. É considerado que esta energia é cedida pelos gases quentes de exaustão da usina.

$$\begin{aligned} q &= (m_{entra} * C_p(100 - T_0) + m_{\acute{a}guaEVA} * L) * \eta \\ q &= (929 * 0,9637(100 - 25) + 382,5 * 2260) * 1,2 \\ q &= 1.117.915 \text{ kJ (ou } 310,6 \text{ kWh)} \end{aligned}$$

O processo de transformação de RSU em CDR pode ser esquematizado através da Figura 5.1.

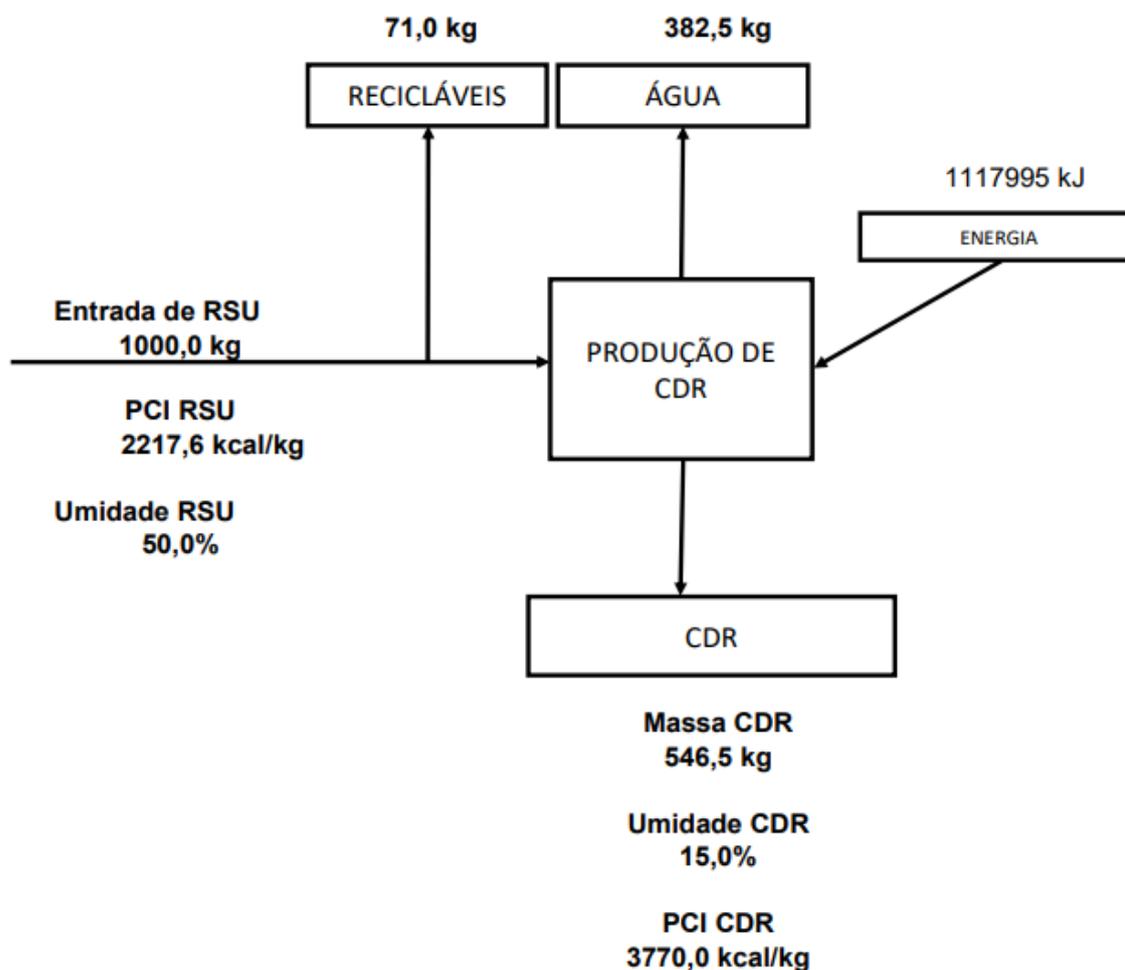


Figura 5.1 – Diagrama de processamento de RSU em CDR

Fonte: O autor (2022).

### 5.3 QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR TON DE CDR

Para efeito de comparação entre a energia gerada no Cenário 1 e Cenário 2, onde a principal diferença é que no Cenário 1 o CDR é incinerado e a energia liberada pela incineração é usada como fonte de calor para a caldeira do Ciclo Rankine, enquanto no Cenário 2 o CDR passa primeiramente pelo processo de gaseificação e então o gás de síntese é quem é usado como combustível para aquecimento da caldeira, é possível estimar a energia elétrica gerada a cada tonelada de RSU que é processado pela usina adaptando a Equação 4.17 para que novamente a massa não seja representada por unidade de tempo, resultando na Equação 5.2.

$$W_{elétrica}[kJ] = PCI_{combustível} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] * m_{combustível} [kg] * \eta_{rankine} * \eta_{gerador} \quad (5.2)$$

### 5.3.1 INCINERAÇÃO

Para o processo de incineração, o combustível é o próprio CDR. Será multiplicado seu PCI pela constante 4,184 para transformar kcal/kg em kJ/kg, portanto, a energia elétrica gerada por meio do processo de incineração para cada tonelada de RSU é aproximadamente:

$$W_{elétrica} = PCI_{combustível} * m_{combustível} * \eta_{rankine} * \eta_{gerador}$$

$$W_{elétrica} = (3770 * 4,184) * 546,5 * 0,35 * 0,95$$

$$W_{elétrica} = 2.866.255 \text{ kj (ou } 796,2 \text{ kWh)}$$

### 5.3.2 GASEIFICAÇÃO

Para o processo de gaseificação, o combustível é o gás de síntese, adaptando a Equação 4.16, para que as massas de *syngas* e CDR não sejam representadas por unidade de tempo, é possível escrever a Equação 5.3.

$$\eta = \frac{m_{syngas} * PCI_{syngas}}{m_{CDR} * PCI_{CDR}} \quad (5.3)$$

Utilizando a eficiência de 75% para o processo de gaseificação, e o PCI do gás de síntese, gerado pelo RSU descrito na Tabela 5.1, de 4600 kJ/kg (Ferreira, 2021), a massa do gás de síntese pode ser aproximada pela Equação a seguir.

$$0,75 = \frac{m_{syngas} * 4600}{546,5 * (3770 * 4,184)}$$

$$m_{syngas} = 1405,5 \text{ kg}$$

Através da Equação 5.2, a energia elétrica gerada no Cenário 2, para cada tonelada de RSU processado é aproximadamente:

$$W_{elétrica} = PCI_{combustível} * m_{combustível} * \eta_{rankine} * \eta_{gerador}$$

$$W_{elétrica} = 4600 * 1405,5 * 0,35 * 0,95$$

$$W_{elétrica} = 2.149.712 \text{ kj (ou } 597,1 \text{ kWh)}$$

Diante da capacidade de geração de energia elétrica para cada tonelada de RSU que é processada pela usina, é evidente que o processo de gaseificação tem menor potencial de geração de energia para cada tonelada de RSU processada, em comparação com a incineração. Porém será analisado a viabilidade econômica de ambos os processos, uma vez que a implementação e custos operacionais são menores na gaseificação.

#### 5.4 EXEMPLO DE USINAS COM CAPACIDADE DE 1900 TON/DIA

Para início da análise financeira, é feito um estudo com duas usinas de recuperação de energia, ambas com capacidade de processamento diário de 1900 toneladas por dia, escolhida arbitrariamente, apenas para efeito de comparação.

São definidas as premissas comuns (juros do financiamento, preço de venda da energia elétrica, capacidade de processamento etc.) e particulares (custo de implementação, custo de operação e manutenção etc.) dos projetos, exibidas na Tabela 5.2. Estas premissas são utilizadas para simular o financiamento do investimento e o fluxo de caixa ao longo dos anos, necessários para encontrar a TIR, VPL e *payback* descontado para cada projeto e compará-los financeiramente.

##### 5.4.1 PREMISSAS

As premissas usadas para incineração e gaseificação são descritas na Tabela 5.2; os custos de implementação são calculados pelas Equações 4.24 e 4.25 para a incineração e para a gaseificação, substituindo nestas Equações a capacidade de processamento por 1900 t/d e fazendo a conversão do valor para reais; custos de

operação e manutenção como sendo 7,5% do capex para a incineração e 5% do capex para gaseificação; consumo de energia da planta como sendo 14% do total produzido para a incineração e 20% do total produzido para a gaseificação.

	INCINERAÇÃO	GASEIFICAÇÃO	Unidade
CUSTO DA PLANTA	R\$ 1.986.718.800,44	R\$ 1.277.632.505,39	R\$
TEMPO DE CONSTRUÇÃO	2	2	ANOS
OPEX	R\$ 149.003.910,03	R\$ 61.381.625,27	R\$/ANO
CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO	1900	1900	t/dia
PCI DO RSU	2.217,6	2.217,6	kcal/kg
PCI DO CDR	3.770	3.770	kcal/kg
PIS	7,60%	7,60%	%
COFINS	1,65%	1,65%	%
VIDA ÚTIL	20	20	ANOS
CSLL	9%	9%	%
IR	15-25%	15-25%	%
% DO CAPEX - CAPITAL PRÓPRIO	20%	20%	%
% DO CAPEX - FINANCIADO	80%	80%	%
JUROS DO FINANCIAMENTO (a.a.)	6%	6%	%
CARÊNCIA DO FINANCIAMENTO	2	2	ANOS
PRAZO DE AMORTIZAÇÃO	20	20	ANOS
GATE FEE	130	130	R\$/t
PREÇO DE VENDA DE RECICLÁVEIS	100	100	R\$/t
TAXA MÍNIMA ATRATIVA	8	8	%
PREÇO DE VENDA DE ENERGIA	610	610	R\$/MWh
CONSUMO DA PLANTA	14%	20%	%
PCI DO GÁS DE SÍNTESE	NÃO UTILIZA	4600	kJ/kg

Tabela 5.2 – Variáveis de entrada para a simulação do fluxo de caixa para incineração e gaseificação

Fonte: O autor (2022).

## 5.4.2 INCINERAÇÃO

### 5.4.2.1 Simulação do financiamento

A simulação do financiamento é importante pois permite ao tomador de decisão planejar suas finanças futuras, considerando o quanto sairá do caixa e o impacto destas saídas. Além de permitir avaliar os riscos e benefícios de cada opção de financiamento, levando em conta aspectos como taxas de juros, prazos de pagamento, garantias exigidas e juros pagos ao final do financiamento.

Nas simulações de financiamento deste trabalho será utilizado o sistema PRICE, onde as parcelas (juros + amortização) são fixas. Para um determinado período, os juros são calculados sobre a dívida do empréstimo ao início deste mesmo

período. A diferença entre o valor da parcela e os juros respectivos corresponde a amortização, sendo que o saldo devedor é igual ao saldo devedor do período anterior menos a amortização do respectivo período.

A simulação do financiamento para incineração, onde 80% do capex é financiado e os juros são fixados em 6% ao ano, é apresentada na Tabela 5.3. Sendo pago o total de R\$ 1.182.004.134,91 referente a juros para o financiador.

<b>TABELA DE FINANCIAMENTO</b>	<b>JUROS (R\$)</b>	<b>AMORTIZAÇÃO (R\$)</b>	<b>PAGAMENTO (R\$)</b>	<b>DÍVIDA (R\$)</b>
VALOR FINANCIADO		(R\$)		1.589.375.040,36
ANO 3	-95.362.502,42	-43.206.456,34	-138.568.958,76	1.546.168.584,01
ANO 4	-92.770.115,04	-45.798.843,72	-138.568.958,76	1.500.369.740,29
ANO 5	-90.022.184,42	-48.546.774,35	-138.568.958,76	1.451.822.965,94
ANO 6	-87.109.377,96	-51.459.580,81	-138.568.958,76	1.400.363.385,14
ANO 7	-84.021.803,11	-54.547.155,66	-138.568.958,76	1.345.816.229,48
ANO 8	-80.748.973,77	-57.819.984,99	-138.568.958,76	1.287.996.244,49
ANO 9	-77.279.774,67	-61.289.184,09	-138.568.958,76	1.226.707.060,39
ANO 10	-73.602.423,62	-64.966.535,14	-138.568.958,76	1.161.740.525,25
ANO 11	-69.704.431,52	-68.864.527,25	-138.568.958,76	1.092.875.998,01
ANO 12	-65.572.559,88	-72.996.398,88	-138.568.958,76	1.019.879.599,12
ANO 13	-61.192.775,95	-77.376.182,82	-138.568.958,76	942.503.416,31
ANO 14	-56.550.204,98	-82.018.753,79	-138.568.958,76	860.484.662,52
ANO 15	-51.629.079,75	-86.939.879,01	-138.568.958,76	773.544.783,51
ANO 16	-46.412.687,01	-92.156.271,75	-138.568.958,76	681.388.511,76
ANO 17	-40.883.310,71	-97.685.648,06	-138.568.958,76	583.702.863,70
ANO 18	-35.022.171,82	-103.546.786,94	-138.568.958,76	480.156.076,76
ANO 19	-28.809.364,61	-109.759.594,16	-138.568.958,76	370.396.482,60
ANO 20	-22.223.788,96	-116.345.169,81	-138.568.958,76	254.051.312,79
ANO 21	-15.243.078,77	-123.325.880,00	-138.568.958,76	130.725.432,80
ANO 22	-7.843.525,97	-130.725.432,80	-138.568.958,76	0,00

Tabela 5.3 – Simulação do financiamento da usina de incineração 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.2.2 Fluxo de Caixa

O Fluxo de Caixa para a incineração é calculado de acordo com modelo proposto na Tabela 4.1, seguindo as premissas definidas na Tabela 5.2 e calculando a receita bruta conforme descrito a Seção 4.7.1 (somatório da receita com entrada de resíduos, venda de energia elétrica e venda de material reciclável), o fluxo de caixa pode ser resumido conforme a Tabela 5.4.

ANO	RECEITA BRUTA (R\$)	LUCRO OPERACIONAL (R\$)	LUCRO OPERACIONAL TRIBUTÁVEL (R\$)	LUCRO OPERACIONAL LÍQUIDO (R\$)	FLUXO OPERACIONAL LÍQUIDO (R\$)	FCLA (R\$)
1					-198.671.880,04	-198.671.880,04
2					-198.671.880,04	-198.671.880,04
3	379.452.154,57	195.348.920,24	650.477,79	453.315,34	99.789.255,37	56.582.799,02
4	379.452.154,57	195.348.920,24	3.242.865,17	2.164.291,01	101.500.231,04	55.701.387,31
5	379.452.154,57	195.348.920,24	5.990.795,80	3.977.925,23	103.313.865,25	54.767.090,90
6	379.452.154,57	195.348.920,24	8.903.602,26	5.900.377,49	105.236.317,51	53.776.736,71
7	379.452.154,57	195.348.920,24	11.991.177,11	7.938.176,89	107.274.116,91	52.726.961,26
8	379.452.154,57	195.348.920,24	15.264.006,45	10.098.244,25	109.434.184,28	51.614.199,28
9	379.452.154,57	195.348.920,24	18.733.205,54	12.387.915,66	111.723.855,68	50.434.671,59
10	379.452.154,57	195.348.920,24	22.410.556,59	14.814.967,35	114.150.907,37	49.184.372,23
11	379.452.154,57	195.348.920,24	26.308.548,70	17.387.642,14	116.723.582,16	47.859.054,92
12	379.452.154,57	195.348.920,24	30.440.420,33	20.114.677,42	119.450.617,44	46.454.218,56
13	379.452.154,57	195.348.920,24	34.820.204,27	23.005.334,82	122.341.274,84	44.965.092,02
14	379.452.154,57	195.348.920,24	39.462.775,24	26.069.431,66	125.405.371,68	43.386.617,89
15	379.452.154,57	195.348.920,24	44.383.900,46	29.317.374,31	128.653.314,33	41.713.435,32
16	379.452.154,57	195.348.920,24	49.600.293,20	32.760.193,51	132.096.133,54	39.939.861,78
17	379.452.154,57	195.348.920,24	55.129.669,51	36.409.581,88	135.745.521,90	38.059.873,84
18	379.452.154,57	195.348.920,24	60.990.808,39	40.277.933,54	139.613.873,56	36.067.086,62
19	379.452.154,57	195.348.920,24	67.203.615,61	44.378.386,30	143.714.326,32	33.954.732,17
20	379.452.154,57	195.348.920,24	73.789.191,26	48.724.866,23	148.060.806,25	31.715.636,45
21	379.452.154,57	195.348.920,24	80.769.901,45	53.332.134,95	152.668.074,98	29.342.194,98
22	379.452.154,57	195.348.920,24	88.169.454,25	58.215.839,80	157.551.779,82	26.826.347,03

Tabela 5.4 – Resumo do fluxo de caixa para incineração de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.2.3 Payback Descontado

O *Payback* descontado fornece uma medida do tempo necessário para que o investimento se torne rentável, ou seja, indica quando o fluxo de caixa futuro do projeto começa a superar o investimento inicial.



Figura 5.2 – *Payback* descontado para incineração de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

O *Payback* descontado representado pela Figura 5.2 utiliza o fluxo de caixa apresentado na Tabela 5.4, trazendo para o valor presente seus valores para uma TMA de 8% ao ano. O eixo horizontal do gráfico indica o ano em que o projeto se encontra e o eixo vertical indica o valor de dinheiro que foi acumulado até este ano.

A Figura 5.2 considera que o valor total do projeto é desembolsado no início de sua construção, e o saldo negativo permanece constante durante a fase pré-operacional de dois anos. Após dois anos inicia-se a fase operacional, onde iniciam-se as receitas com o projeto.

Durante a fase operacional o fluxo de caixa futuro supera o custo do projeto após 18,3 anos do seu início, ou 20,3 anos se for considerada também a fase pré-operacional. Portanto o *Payback* descontado para a fase de operação é menor que a vida útil do projeto estimada em 20 anos, e o empreendimento pode ser considerado viável economicamente.

#### 5.4.2.4 Indicadores de Viabilidade Econômica

A tomada de decisão baseada em indicadores econômicos é uma abordagem que utiliza dados quantitativos para avaliar a viabilidade econômica de um projeto ou investimento. Os indicadores econômicos utilizados neste trabalho são a TIR, o VPL e o *Payback* descontado que foram descritos anteriormente.

Estes indicadores demonstram o desempenho do empreendimento utilizando a tecnologia de incineração e considerando as premissas adotadas na Tabela 5.2, são apresentados na Tabela 5.5, para uma TMA de 8,0% ao ano.

Parâmetro	Valor	Unidade
VPL	53.172.929,35	R\$
TIR	9,90%	% a.a.
<i>Payback</i> Descontado	20,3	Anos

Tabela 5.5 – Indicadores de viabilidade econômica para incineração de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

Diante de todos os indicadores de viabilidade econômica analisados, o projeto é considerado viável, uma vez que o VPL encontrado é maior que zero, ou seja a diferença entre as entradas e saídas de caixa, considerando estes valores no presente é positiva, retornando o lucro de aproximadamente 53 milhões de reais; a TIR de 9,90% ao ano é maior que a TMA de 8,0% ao ano, portanto, supera o retorno mínimo esperado pelo investidor; e o *Payback* descontado é de 20,3 anos considerando a fase pré-operacional ou 18,3 anos considerando apenas a fase operacional, sendo assim, o investimento é retornado antes do fim da vida útil do projeto, considerada de 20 anos.

### 5.4.3 GASEIFICAÇÃO

#### 5.4.3.1 Simulação do financiamento

A importância e metodologia utilizada para simular o financiamento descrito na Seção 5.5.2.1 são consideradas também nesta Seção, para a gaseificação. A simulação do financiamento para o projeto de gaseificação, onde 80% do capex é financiado e os juros são fixados em 6% ao ano, é apresentada na Tabela 5.6. Sendo pago o total de R\$ 730.383.533,49 referente a juros para o financiador.

TABELA DE FINANCIAMENTO	JUROS (R\$)	AMORTIZAÇÃO (R\$)	PAGAMENTO (R\$)	DÍVIDA (R\$)
VALOR FINANCIADO				982.106.004,31
ANO 3	-58.926.360,26	-26.698.116,63	-85.624.476,89	955.407.887,68
ANO 4	-57.324.473,26	-28.300.003,63	-85.624.476,89	927.107.884,05
ANO 5	-55.626.473,04	-29.998.003,85	-85.624.476,89	897.109.880,20
ANO 6	-53.826.592,81	-31.797.884,08	-85.624.476,89	865.311.996,12
ANO 7	-51.918.719,77	-33.705.757,12	-85.624.476,89	831.606.239,00
ANO 8	-49.896.374,34	-35.728.102,55	-85.624.476,89	795.878.136,45
ANO 9	-47.752.688,19	-37.871.788,70	-85.624.476,89	758.006.347,75
ANO 10	-45.480.380,86	-40.144.096,03	-85.624.476,89	717.862.251,72
ANO 11	-43.071.735,10	-42.552.741,79	-85.624.476,89	675.309.509,94
ANO 12	-40.518.570,60	-45.105.906,29	-85.624.476,89	630.203.603,64
ANO 13	-37.812.216,22	-47.812.260,67	-85.624.476,89	582.391.342,97
ANO 14	-34.943.480,58	-50.680.996,31	-85.624.476,89	531.710.346,66
ANO 15	-31.902.620,80	-53.721.856,09	-85.624.476,89	477.988.490,57
ANO 16	-28.679.309,43	-56.945.167,46	-85.624.476,89	421.043.323,11
ANO 17	-25.262.599,39	-60.361.877,50	-85.624.476,89	360.681.445,61
ANO 18	-21.640.886,74	-63.983.590,15	-85.624.476,89	296.697.855,46
ANO 19	-17.801.871,33	-67.822.605,56	-85.624.476,89	228.875.249,89
ANO 20	-13.732.514,99	-71.891.961,90	-85.624.476,89	156.983.288,00
ANO 21	-9.418.997,28	-76.205.479,61	-85.624.476,89	80.777.808,39
ANO 22	-4.846.668,50	-80.777.808,39	-85.624.476,89	0,00

Tabela 5.6 – Simulação do financiamento da usina de gaseificação 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.3.2 Fluxo de Caixa

O Fluxo de Caixa para a gaseificação é calculado de acordo com modelo proposto na Tabela 4.1, seguindo as premissas definidas na Tabela 5.2 e calculando a receita bruta conforme descrito a Seção 4.7.1 (somatório da receita com entrada de resíduos, venda de energia elétrica e venda de material reciclável), o fluxo de caixa pode ser resumido conforme a Tabela 5.7.

	RECEITA BRUTA (R\$)	LUCRO OPERACIONAL (R\$)	LUCRO OPERACIONAL TRIBUTÁVEL (R\$)	LUCRO OPERACIONAL LÍQUIDO (R\$)	FLUXO OPERACIONAL LÍQUIDO (R\$)	FCLA (R\$)
1					-122.763.250,54	-122.763.250,54
2					-122.763.250,54	-122.763.250,54
3	293.085.065,98	204.593.072,10	84.285.086,58	55.652.157,14	117.033.782,41	90.335.665,78
4	293.085.065,98	204.593.072,10	85.886.973,58	56.709.402,56	118.091.027,83	89.791.024,20
5	293.085.065,98	204.593.072,10	87.584.973,79	57.830.082,70	119.211.707,97	89.213.704,13
6	293.085.065,98	204.593.072,10	89.384.854,02	59.018.003,66	120.399.628,92	88.601.744,85
7	293.085.065,98	204.593.072,10	91.292.727,07	60.277.199,87	121.658.825,13	87.953.068,01
8	293.085.065,98	204.593.072,10	93.315.072,50	61.611.947,85	122.993.573,12	87.265.470,57
9	293.085.065,98	204.593.072,10	95.458.758,65	63.026.780,71	124.408.405,98	86.536.617,27
10	293.085.065,98	204.593.072,10	97.731.065,97	64.526.503,54	125.908.128,81	85.764.032,78
11	293.085.065,98	204.593.072,10	100.139.711,73	66.116.209,74	127.497.835,01	84.945.093,23
12	293.085.065,98	204.593.072,10	102.692.876,24	67.801.298,32	129.182.923,59	84.077.017,29
13	293.085.065,98	204.593.072,10	105.399.230,62	69.587.492,21	130.969.117,48	83.156.856,81
14	293.085.065,98	204.593.072,10	108.267.966,26	71.480.857,73	132.862.483,00	82.181.486,69
15	293.085.065,98	204.593.072,10	111.308.826,04	73.487.825,18	134.869.450,45	81.147.594,36
16	293.085.065,98	204.593.072,10	114.532.137,40	75.615.210,69	136.996.835,95	80.051.668,50
17	293.085.065,98	204.593.072,10	117.948.847,45	77.870.239,32	139.251.864,59	78.889.987,08
18	293.085.065,98	204.593.072,10	121.570.560,10	80.260.569,67	141.642.194,93	77.658.604,78
19	293.085.065,98	204.593.072,10	125.409.575,51	82.794.319,84	144.175.945,10	76.353.339,54
20	293.085.065,98	204.593.072,10	129.478.931,84	85.480.095,02	146.861.720,29	74.969.758,39
21	293.085.065,98	204.593.072,10	133.792.449,56	88.327.016,71	149.708.641,98	73.503.162,37
22	293.085.065,98	204.593.072,10	138.364.778,33	91.344.753,70	152.726.378,97	71.948.570,58

Tabela 5.7 – Resumo do fluxo de caixa para gaseificação de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.3.3 Payback Descontado

O *Payback* descontado para o projeto de gaseificação é exibido pela Figura 5.3 e utiliza o fluxo de caixa apresentado na Tabela 5.7, trazendo para o valor presente seus valores para uma TMA de 8% ao ano. O eixo horizontal do gráfico indica o ano em que o projeto se encontra e o eixo vertical indica o valor de dinheiro que foi acumulado até este ano.

A Figura 5.3 considera que o valor total do projeto é desembolsado logo no início de sua construção, e o saldo negativo permanece constante durante a fase pré-operacional de dois anos. Após dois anos inicia-se a fase operacional, onde ocorre as receitas com o projeto.

Durante a fase operacional o fluxo de caixa futuro supera o custo do projeto após 6,7 anos do seu início, ou 8,7 anos se for considerada também a fase pré-operacional. Portanto o *Payback* descontado para a fase de operação é menor que a vida útil do projeto estimada em 20 anos, e o empreendimento pode ser considerado viável economicamente.

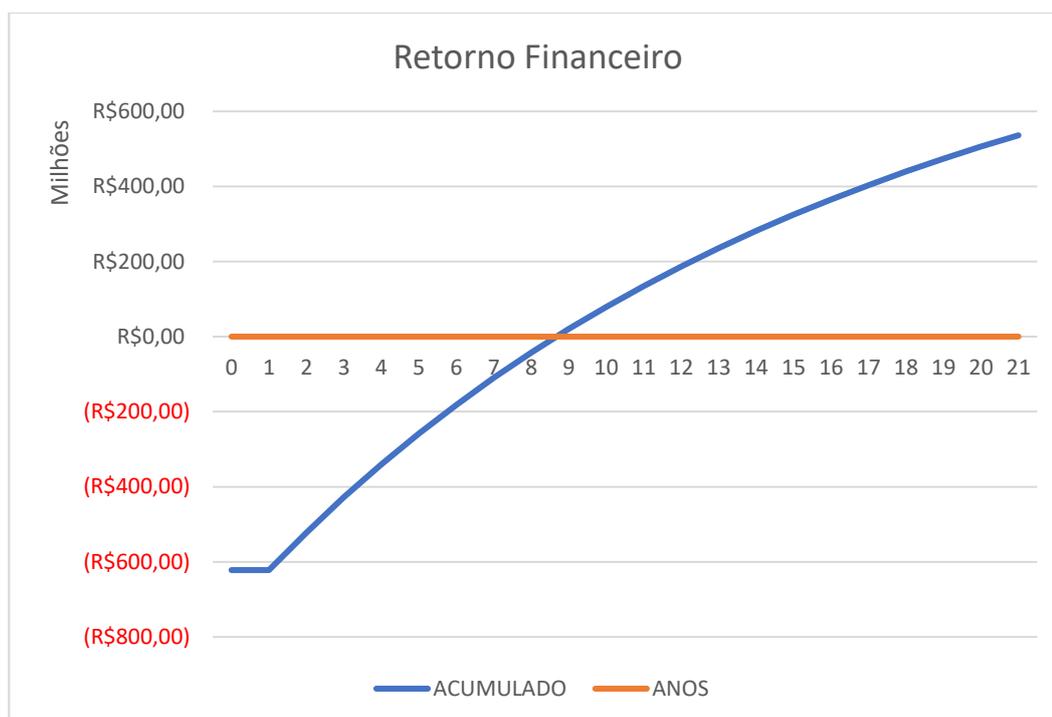


Figura 5.3 – *Payback* descontado para gaseificação de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.3.4 Indicadores de viabilidade econômica

Os indicadores de viabilidade econômica demonstram o desempenho do empreendimento através da tecnologia de gaseificação, considerando as premissas adotadas na Tabela 5.2, e são apresentados na Tabela 5.8, para uma TMA de 8,0% ao ano.

Parâmetro	Valor	Unidade
VPL	536.237.056,04	R\$
TIR	30,99%	% a.a.
<i>Payback</i> Descontado	8,7	Anos

Tabela 5.8 – Indicadores de viabilidade econômica para incineração de 1900 t/dia

Fonte: O autor (2022).

Diante de todos os indicadores de viabilidade econômica analisados, o projeto é considerado viável, uma vez que o VPL encontrado é maior que zero, ou seja a diferença entre as entradas e saídas de caixa, considerando estes valores no presente é positiva, retornando o lucro de aproximadamente 536 milhões de reais; a TIR de 30,99% ao ano é maior que a TMA de 8,0% ao ano, portanto, supera o retorno mínimo esperado pelo investidor; e o *Payback* descontado é de 8,7 anos considerando a fase pré-operacional ou 6,7 anos considerando apenas a fase operacional, sendo assim, o investimento é retornado antes do fim da vida útil do projeto, considerada de 20 anos.

## 5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O estudo da análise de sensibilidade é exibido nesta seção, onde ocorre a variação de uma ou duas variáveis do projeto, como opex, capex, taxa de juros do financiamento etc. variáveis estas, exibidas e citadas nas Figuras. Sendo as outras variáveis mantidas constantes de acordo com as premissas definidas na Tabela 5.2.

Para definir o melhor cenário, diante dos resultados da análise de sensibilidade, considera-se sempre como melhor os cenários que apresentam as maiores TIRs e VPLs.

### 5.5.1 INCINERAÇÃO: CAPACIDADE 1900 ton/dia

#### 5.5.1.1 TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX

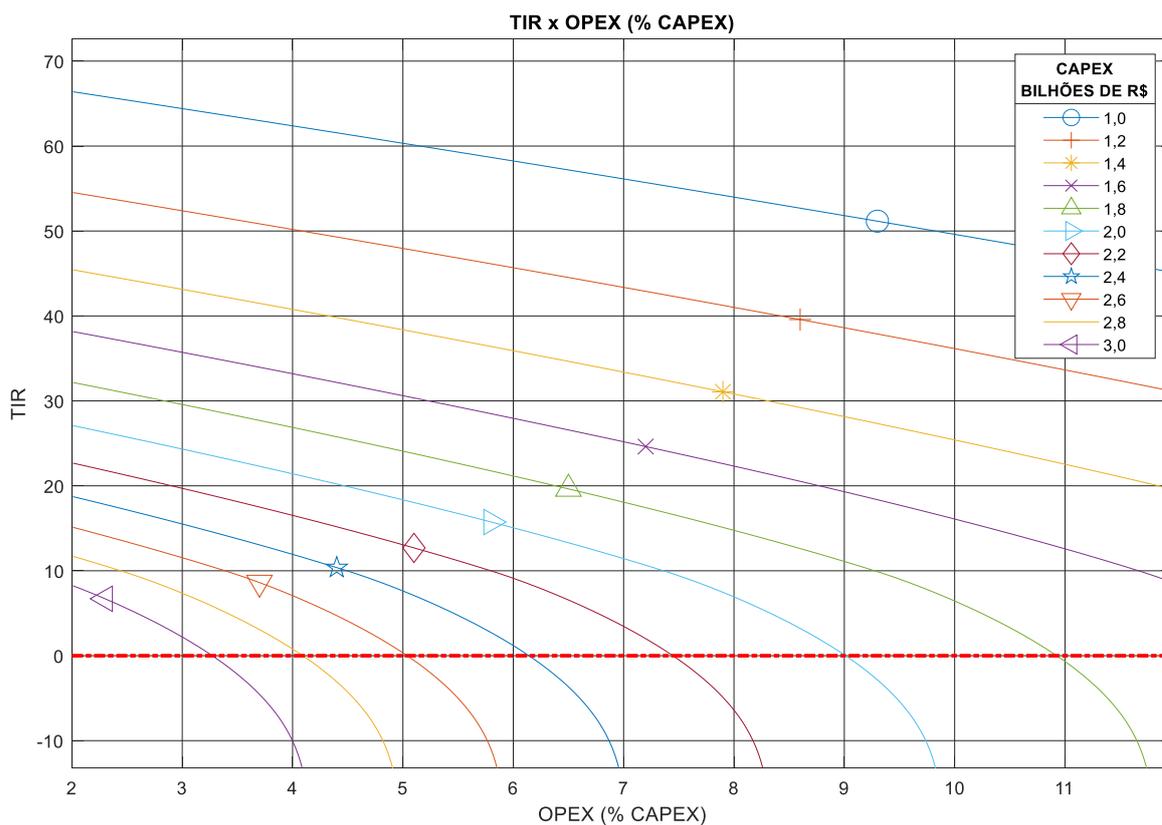


Figura 5.4 – Incineração: TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

Uma vez que o capex e opex de um projeto de incineração é um valor estimado, pois depende de diversas variáveis, torna-se necessário analisar quanto a TIR e o VPL do projeto são afetados quando esses valores sofrem alterações.

Para a incineração, as análises são feitas com o capex do projeto variando em R\$ 1 bi e R\$ 3 bi. Estes valores são definidos pois representam aproximadamente 50% a menos e a mais do capex definido pela Equação 4.24, proporcionando uma boa margem para análise. Enquanto o opex anual é analisado com valores entre 2 e 12% do total investido no projeto.

A Figura 5.4 permite encontrar a TIR de um projeto de incineração quando se conhece seu capex e opex.

Através da interseção de uma linha vertical que passa pelo valor do opex (presente no eixo horizontal) com a curva de “capex x opex”, define-se um ponto. Em seguida, a interseção de uma linha horizontal com este ponto e o eixo vertical do gráfico indica a TIR que o projeto retornará.

Para o projeto ser viável, a TIR deve ser maior que a TMA e o VPL maior que zero. A análise da Figuras 5.4 traz, por exemplo, que para capex menores que R\$ 2 bi a TIR é maior que 8% para todo opex menor que 7,7%. Sendo assim, pode-se considerar o projeto viável quando capex < R\$ 2 bi e opex < 7,7%.

A Figura 5.4 é resumida conforme a Tabela 5.9, onde o são analisados 3 cenários para o capex, determinando qual o valor máximo que o opex pode atingir para que o projeto seja viável (TIR > TMA).

CENÁRIO CAPEX	CAPEX	OPEX MÁXIMO	TIR
OTIMISTA	R\$ 1 bi	25,01%	8%
ESTIMADO	R\$ 2 bi	7,70%	8%
PESSIMISTA	R\$ 3 bi	2,05%	8%

Tabela 5.9 – Opex máximo para 3 cenários distintos de capex - Incineração

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 5.10 exibe 3 cenários para opex e determina qual o valor máximo que o capex pode atingir para que o projeto seja viável (TIR>TMA).

CENÁRIO OPEX	OPEX	CAPEX MÁXIMO	TIR
OTIMISTA	2,00%	R\$ 3.015.000.000	8%
ESTIMADO	7,50%	R\$ 2.035.000.000	8%
PESSIMISTA	12,00%	R\$ 1.607.000.000	8%

Tabela 5.10 – Capex máximo para 3 cenários distintos de opex - Incineração

Fonte: O autor (2022).

A análise de sensibilidade do opex e capex, demonstra que a viabilidade do projeto é muito sensível a estas duas variáveis, alterando significativamente a TIR e VPL em função delas.

#### 5.5.1.2 VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX

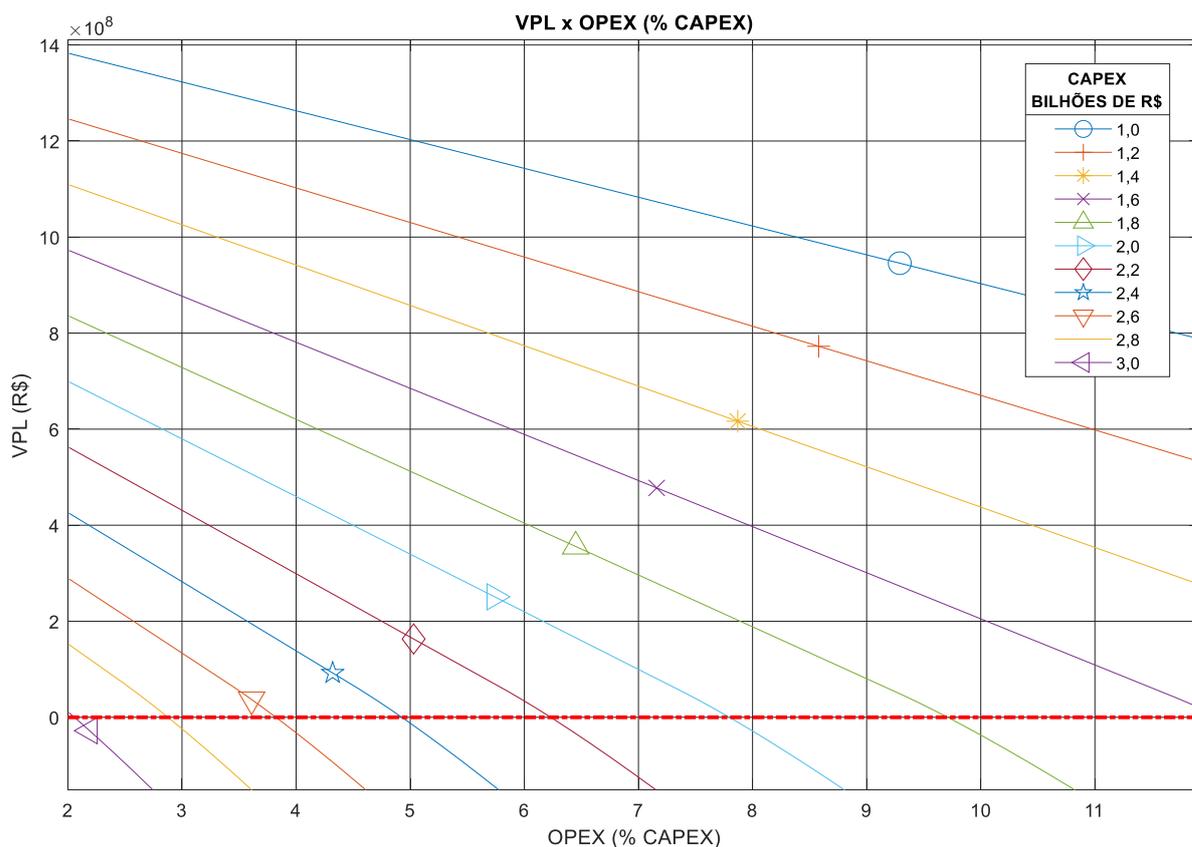


Figura 5.5 – Incineração: VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A Figura 5.5 pode ser analisada seguindo a mesma metodologia da Figura 5.4, com a diferença que é encontrado o VPL ao invés da TIR. O VPL é calculado para TMA igual a 8% ao ano.

Conhecendo o capex e opex do projeto, é possível definir qual será o VPL ao final dos 20 anos de operação. É possível também, para o investidor, encontrar o capex e opex máximos que o projeto deverá ter para que seja atingido o VPL desejado.

### 5.5.1.3 TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

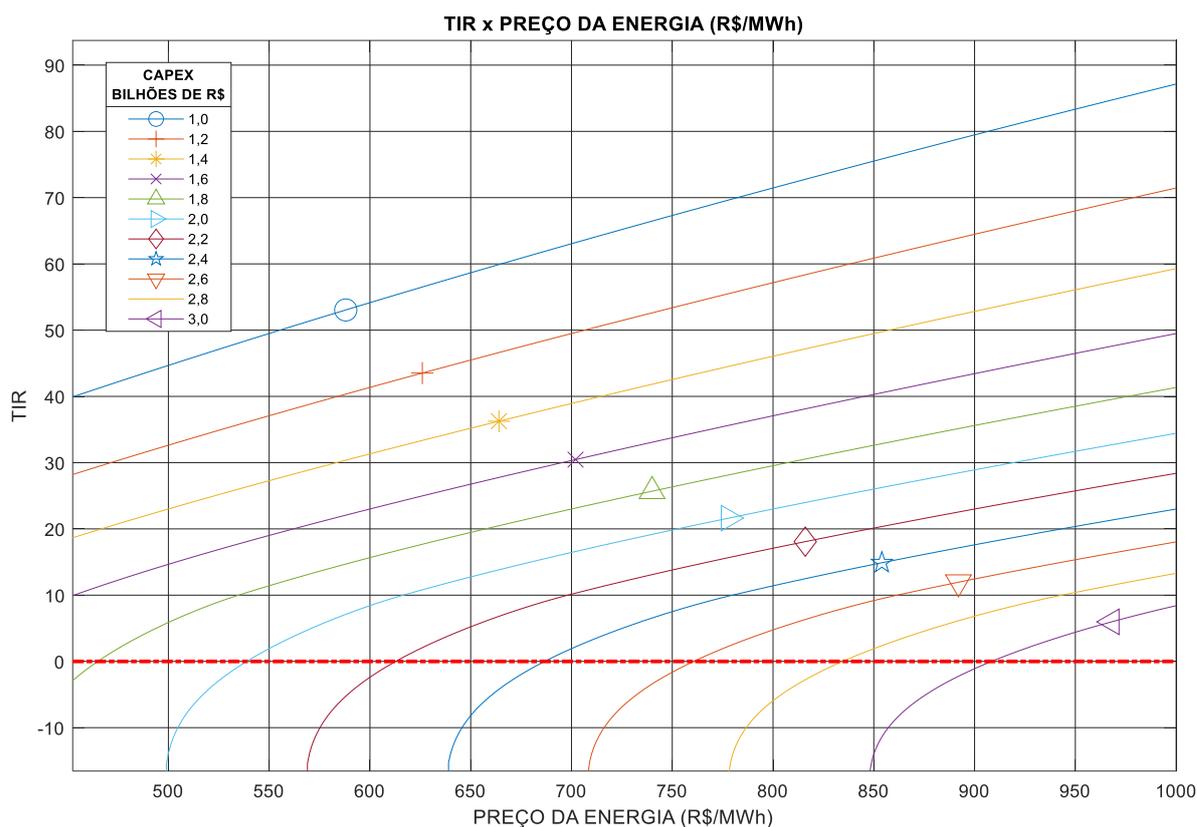


Figura 5.6 – Incineração: TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A análise da TIR em função do preço da energia elétrica que é vendida é necessária, uma vez que a variação do preço de venda da energia pode definir a viabilidade do projeto. A Figura 5.6 permite encontrar a TIR de um projeto para 11 cenários de capex que variam entre 1 e 3 bilhões e o preço da energia elétrica que é vendida varia, em cada cenário, entre 450 e 1000 R\$/MWh. Determinado o capex do projeto, é possível encontrar o preço mínimo que a energia elétrica deve ser vendida para que a TIR do projeto alcance a TMA desejada.

A exemplo de uma usina de incineração, com o custo de implementação de R\$ 2 bi (próximo ao calculado pela Equação 4.24), a TIR do projeto só é maior que 8% se o preço da energia elétrica vendida for maior que aproximadamente R\$ 600 por MWh. Enquanto em um cenário pessimista, uma planta com o custo de R\$ 3 bi, a TIR só ultrapassa a TMA se o preço da energia for próximo a R\$ 1.000 por MWh.

No último leilão de energia A-5, que ocorreu em 2022, e que permite a participação de empreendimentos de fontes hidrelétrica, carvão mineral nacional, gás natural, eólica, solar fotovoltaica, biomassa e recuperação energética de resíduos

sólidos urbanos, o preço de referência para venda de energia elétrica das usinas de recuperação de RSU foi de R\$ 603,56/MWh (CCEE, 2022).

Considerando este preço de referência do último Leilão A-5, o capex máximo para que o projeto de incineração seja viável deve ser de R\$ 2 bi.

#### 5.5.1.4 VPL em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

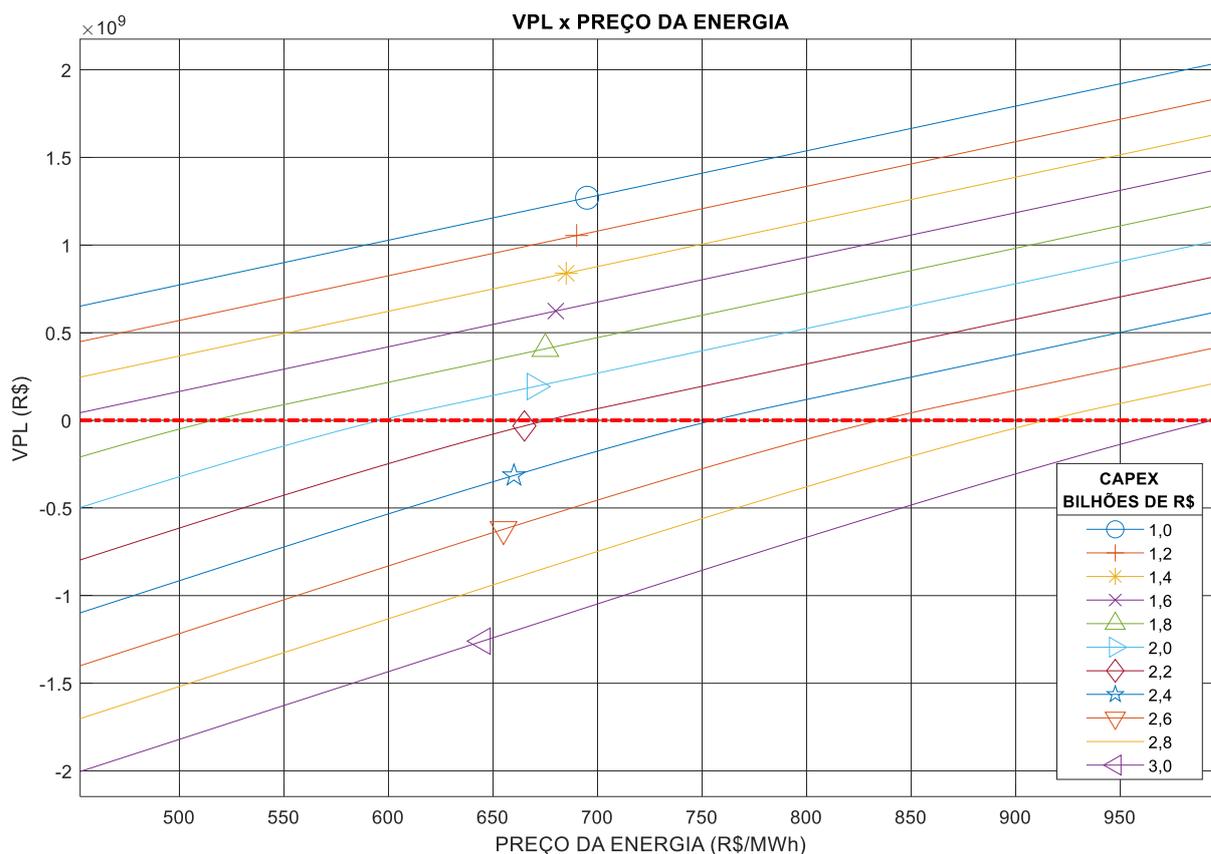


Figura 5.7 – Incineração: VPL em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A Figura 5.7 traz o VPL em função do preço da energia elétrica que é vendida para TMA de 8%. Ao estimar o capex para o projeto, é possível encontrar o preço que deverá ser vendido o MWh para que o VPL atinja o valor desejado. A análise da Figura 5.7 também permite encontrar o VPL do projeto quando o capex e valor da energia elétrica que é vendida são conhecidos.

#### 5.5.1.5 TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

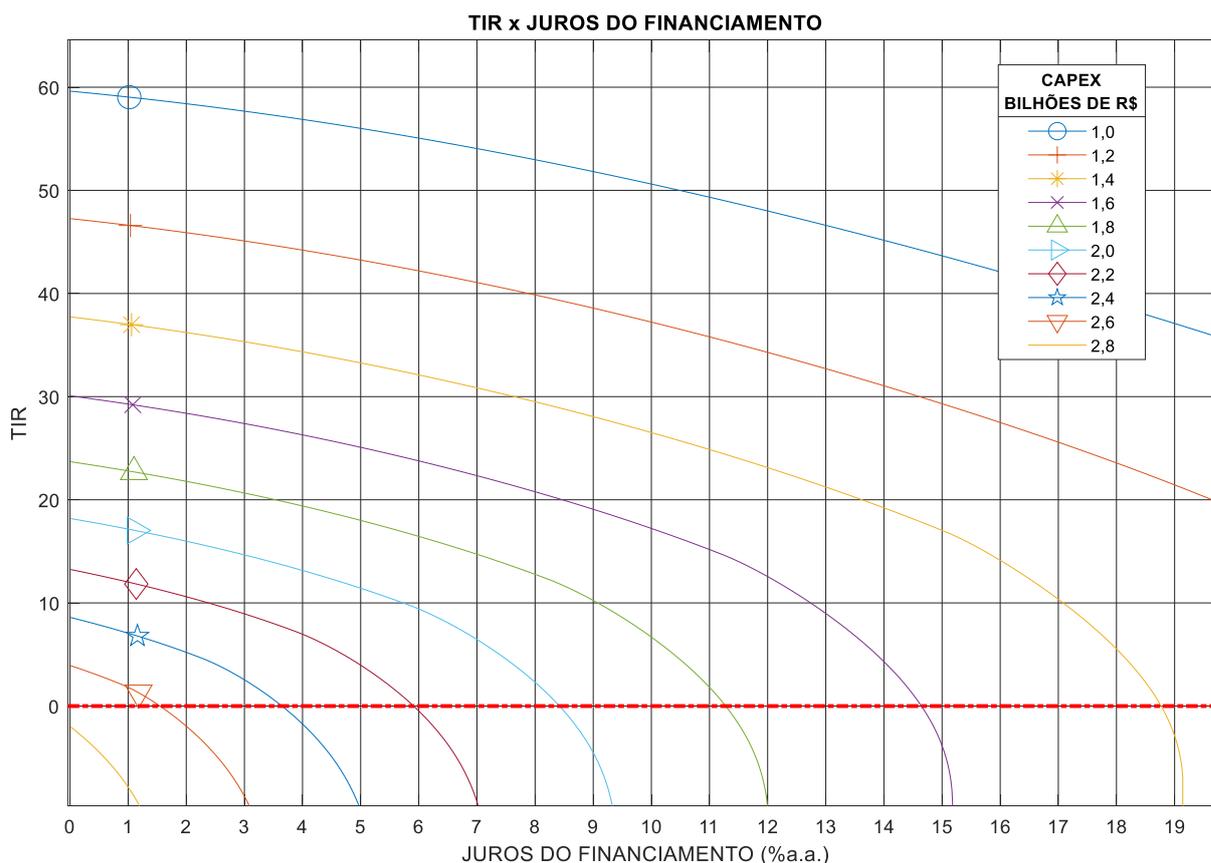


Figura 5.8 – Incineração: TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A análise de como os juros do financiamento afetam os resultados do projeto é de grande importância, uma vez que os juros podem sofrer grandes variações ao longo do tempo. A Tabela 4.2 exibe que de janeiro de 2018 a dezembro de 2022, a taxa de juros variou entre 3,33% ao ano (valor mínimo) e 15,11% ao ano (valor máximo).

O impacto da taxa de juros sobre a TIR é exibido na Figura 5.8. Definido o capex, é possível analisar o quanto a taxa de juros do financiamento afeta a TIR.

A viabilidade do projeto de incineração mostra-se altamente dependente dos juros do financiamento ao ano como exibe a Figura 5.8. A análise demonstra que uma pequena variação na taxa de juros causa grande variação na TIR.

A exemplo de uma usina com custo de R\$ 2 bi (muito próximo ao estimado pela Equação 4.24) com financiamento isento de juros, a TIR é próxima a 18%, enquanto para juros maiores que 9,3% ao ano, a TIR torna-se negativa.

Logo, as condições de financiamento devem ser analisadas e negociadas com atenção.

### 5.5.1.6 VPL em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

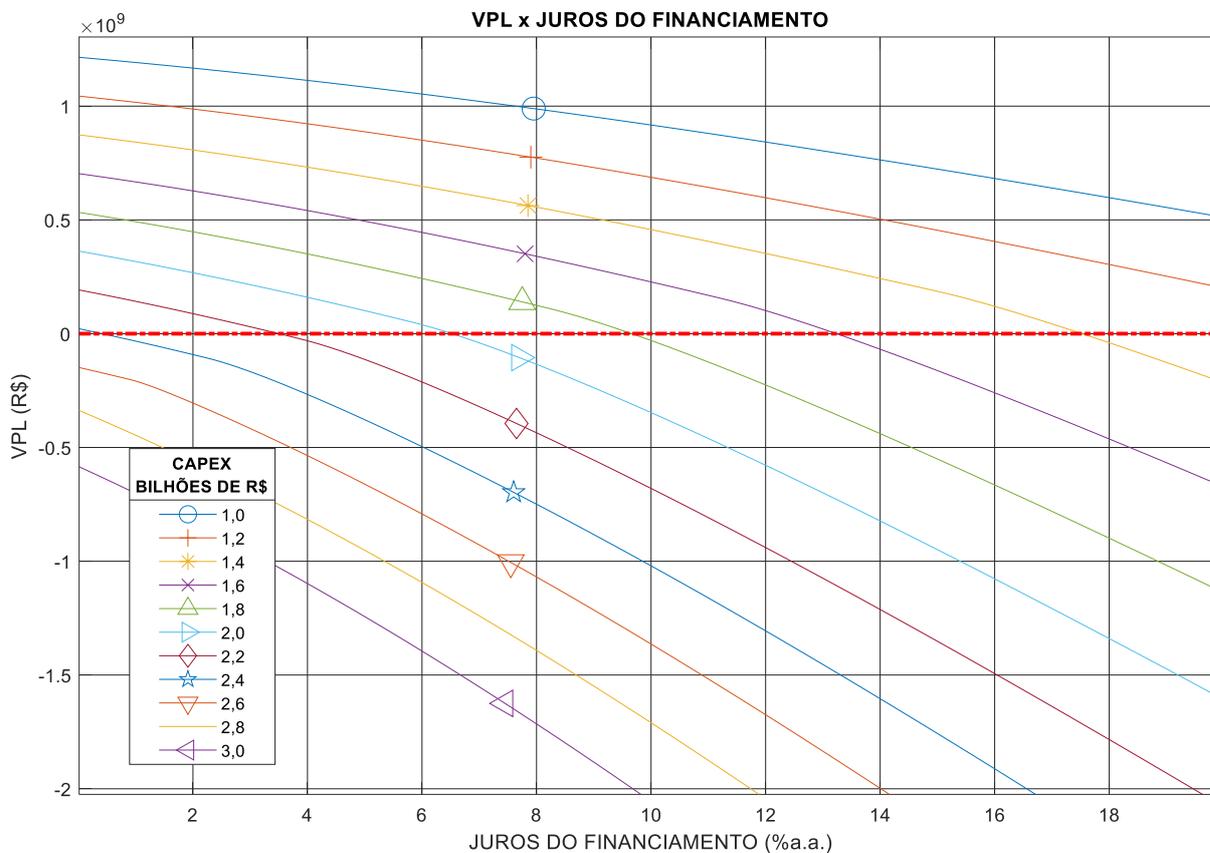


Figura 5.9 – Incineração: VPL em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A Figura 5.9 exibe o VPL para TMA de 8%, para capex variando discretamente entre 1 e R\$3 bi e taxa de juros do financiamento variando entre 0 e 20% ao ano. A Figura 5.9 evidencia, novamente, a dependência da taxa de juros do financiamento para a viabilidade do projeto, uma vez que pequenas variações na taxa de juros causam grandes variações no VPL do projeto.

## 5.5.2 GASEIFICAÇÃO: CAPACIDADE 1900 ton/dia

### 5.5.2.1 TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX

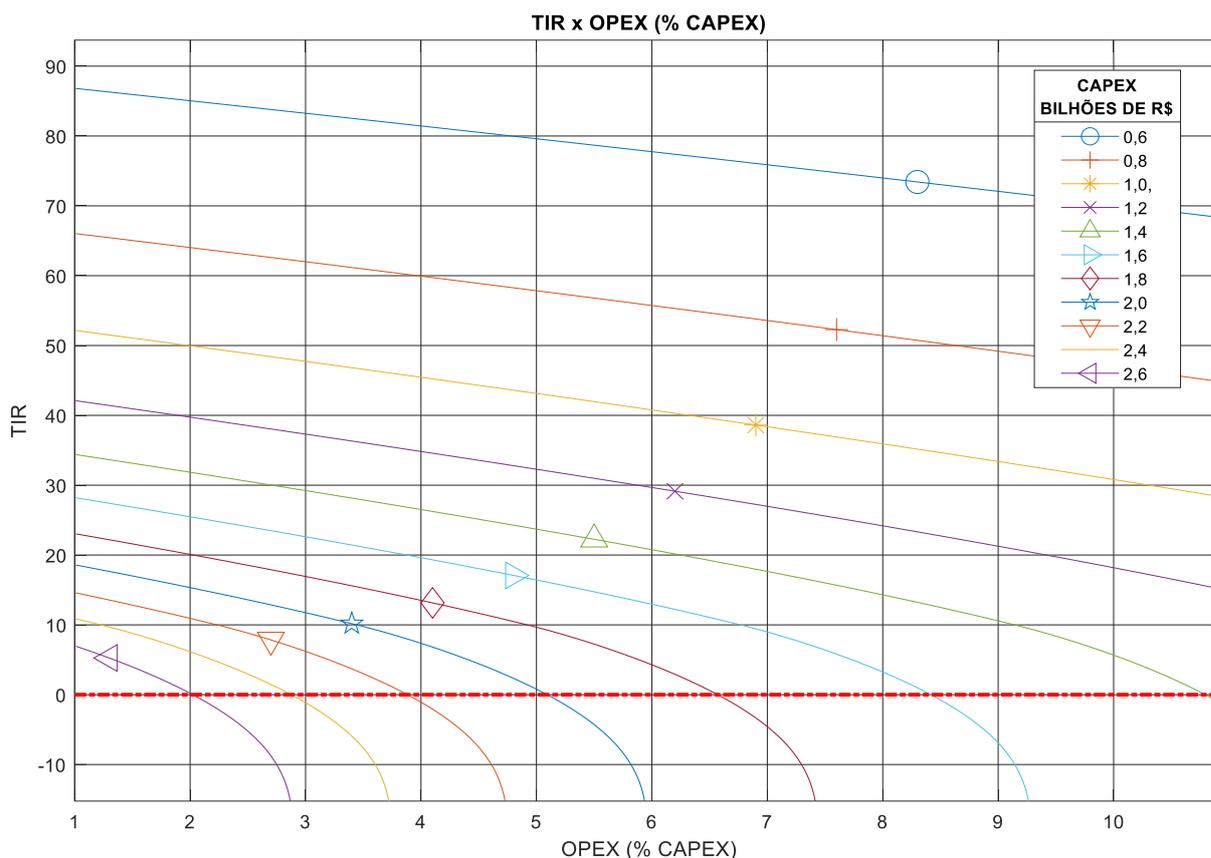


Figura 5.10 – Gaseificação: TIR em Função do OPEX para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

Uma vez que o capex e opex de um projeto de gaseificação é um valor estimado, pois também depende de diversas variáveis, torna-se necessário analisar quanto a TIR e VPL do projeto são afetados quando esses valores sofrem alterações.

Para a gaseificação, as análises são feitas com o capex do projeto variando em R\$ 0,5 bi e R\$ 2,5 bi. Estes valores são definidos pois representam aproximadamente 60% a menos e 100% a mais do capex definido pela Equação 4.25, promovendo uma boa margem para análise. Enquanto o opex anual é analisado com valores entre 1 e 11% do total investido no projeto.

A Figura 5.10 permite encontrar a TIR de um projeto de gaseificação quando se conhece seu capex e opex, seguindo a mesma metodologia da Seção 5.6.1.1.

Para o projeto ser viável, a TIR deve ser maior que a TMA e o VPL maior que zero. A análise da Figuras 5.10 traz, por exemplo, que para capex menores que R\$ 1,4 bi (próximo ao determinado pela Equação 4.25) a TIR é maior que 8% para todo opex menor que 9,5%. Sendo assim, pode-se considerar o projeto viável quando  $\text{capex} < \text{R\$ } 1,4 \text{ bi}$  e  $\text{opex} < 9,5\%$ .

A Figura 5.10 é resumida de acordo com a Tabela 5.11, onde o são analisados 3 cenários para o capex, e determinado qual o valor máximo que o opex pode atingir para que o projeto seja viável ( $TIR > TMA$ ).

CENÁRIO CAPEX	CAPEX	OPEX MÁXIMO	TIR
OTIMISTA	R\$ 0,7 bi	28,50%	8%
ESTIMADO	R\$ 1,4 bi	9,50%	8%
PESSIMISTA	R\$ 2,2 bi	2,60%	8%

Tabela 5.11 – Opex máximo para 3 cenários distintos de capex – Gaseificação

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 5.12 exhibe 3 cenários para opex e determina qual o valor máximo que o capex pode atingir para que o projeto seja viável ( $TIR > TMA$ ).

CENÁRIO OPEX	OPEX	CAPEX MÁXIMO	TIR
OTIMISTA	1,00%	R\$ 2.550.000.000	8%
ESTIMADO	5,00%	R\$ 1.843.000.000	8%
PESSIMISTA	8,00%	R\$ 1.526.500.000	8%

Tabela 5.12 – Capex máximo para 3 cenários distintos de opex - Gaseificação

Fonte: O autor (2022).

A análise de sensibilidade do opex e capex, demonstra que a viabilidade do projeto, assim como na incineração, é muito sensível a estas duas variáveis, alterando significativamente a TIR e VPL em função delas.

#### 5.5.2.2 VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX

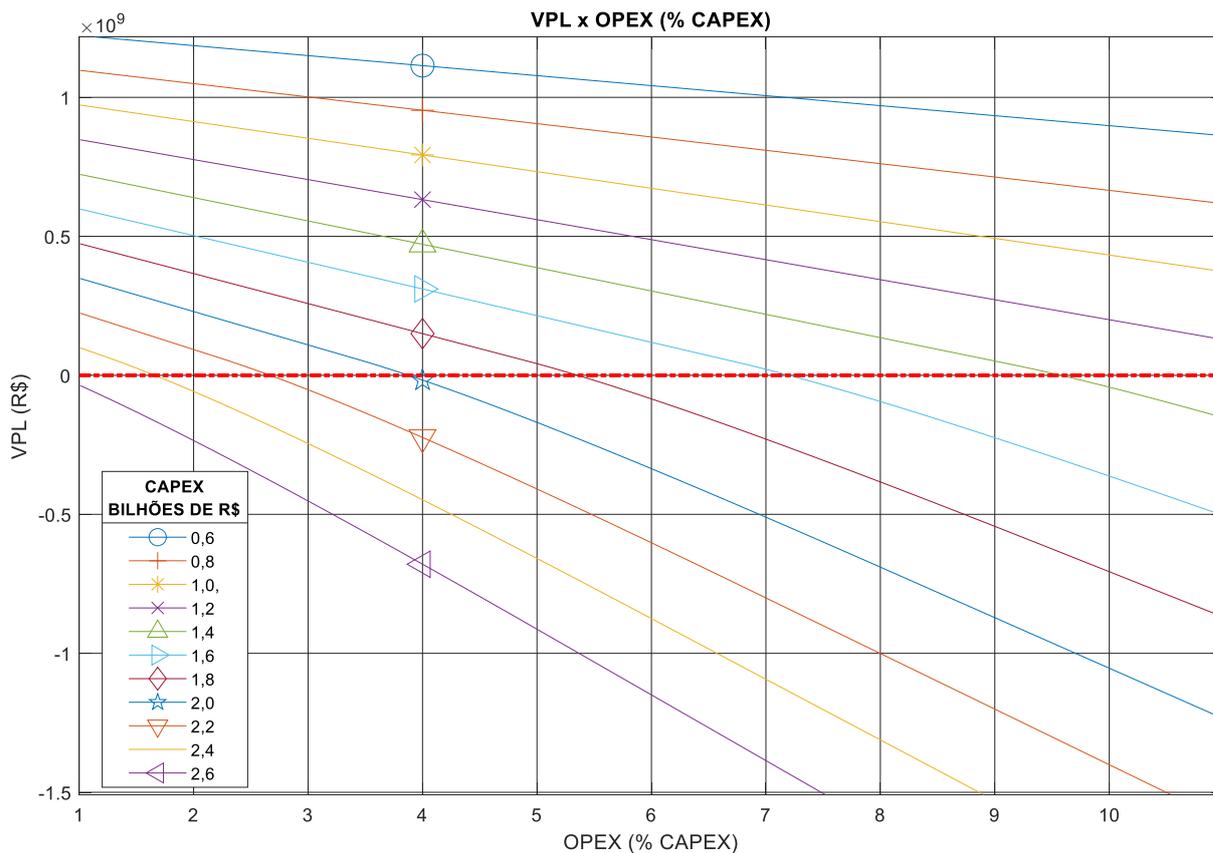


Figura 5.11 – Gaseificação: VPL em Função do OPEX para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

O VPL para o projeto de gaseificação para TMA de 8% é exibido pela Figura 5.11. Para que o projeto seja viável o VPL deverá ser maior que zero quando se conhece o capex e opex. Como exemplo, para um capex de R\$ 2 bi (aproximadamente 60% maior que o estimado pela Equação 4.25) o projeto ainda é viável se o opex anual for de até 4% do capex. Já para um capex de R\$ 1 bi, o opex pode exceder 11% que o projeto ainda será considerado viável.

### 5.5.2.3 TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

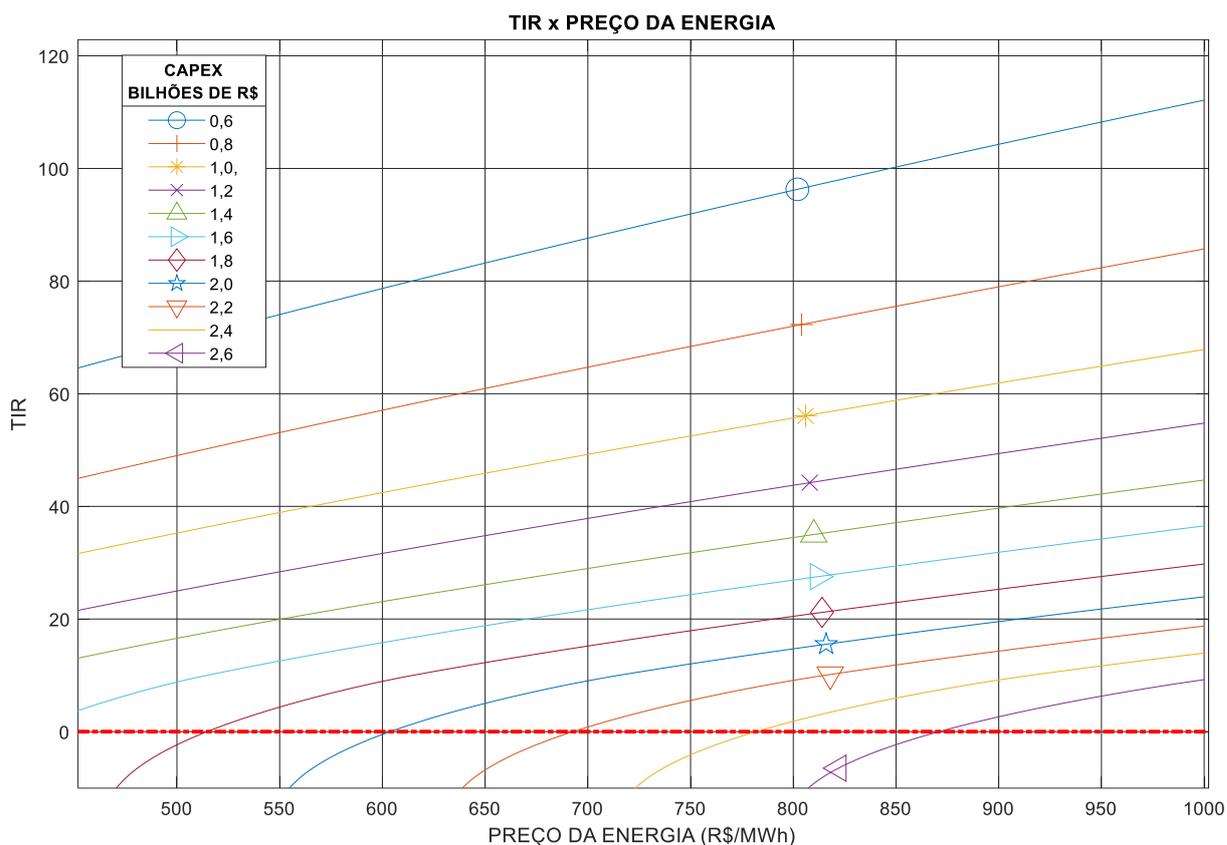


Figura 5.12 – Gaseificação: TIR em Função do preço da energia vendida para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

A análise da TIR em função do preço da energia elétrica que é vendida é necessária, uma vez que a variação do preço de venda da energia pode definir a viabilidade, também, do projeto de gaseificação. A Figura 5.12 permite encontrar a TIR de um projeto para 11 cenários de capex que variam entre 0,6 e 2,5 bilhões e o preço da energia elétrica que é vendida varia, em cada cenário, entre 450 e 1000 R\$/MWh. Determinado o capex do projeto, é possível encontrar o preço mínimo que a energia elétrica deve ser vendida para que a TIR do projeto alcance a TMA desejada.

A exemplo de uma usina de gaseificação, com o custo de implementação de R\$ 1,4 bi (próximo ao calculado pela Equação 4.25), a TIR do projeto é maior que 8% em todos os preços analisados para venda de energia.

Para um cenário pessimista na gaseificação, onde o capex é de 2,2 bi, a TIR é maior que 8% se o preço da energia elétrica vendida for maior que aproximadamente R\$ 780 por MWh. Enquanto para a incineração, em um cenário pessimista

com o custo de R\$ 3 bi, a TIR só ultrapassa a TMA se o preço da energia for próximo a R\$ 1.000 por MWh.

Esta análise demonstra como a gaseificação alcança a TMA desejada mais facilmente que a incineração, quando a variação percentual do capex (para mais ou para menos do estimado pelas Equações 4.24 e 4.25) são próximas para as duas tecnologias.

#### 5.5.2.4 TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

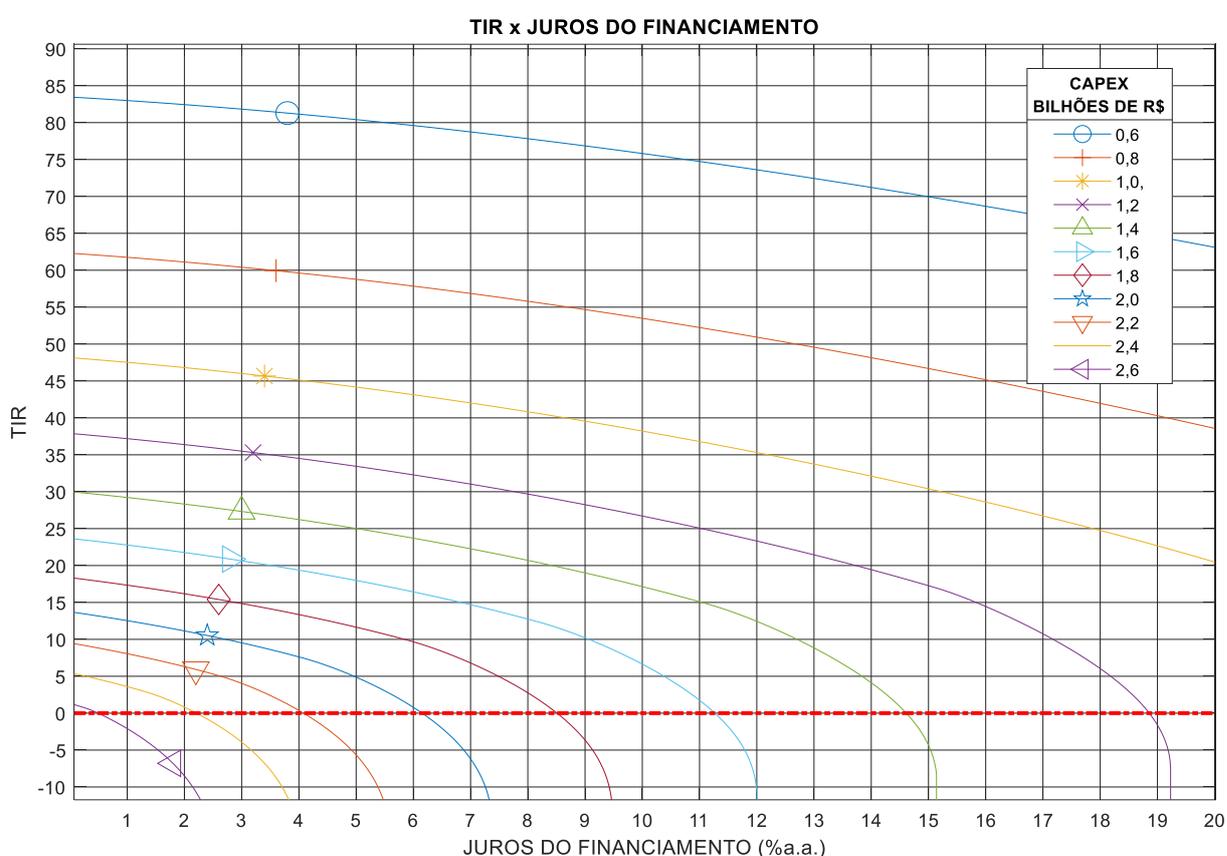


Figura 5.13 – Gaseificação: TIR em Função dos juros do financiamento para diferentes CAPEX

Fonte: O autor (2022).

Análise feita na Seção 5.6.1.5 também pode ser feita para a gaseificação. A viabilidade do projeto de gaseificação também é altamente dependente dos juros do financiamento ao ano, como exibe a Figura 5.13. Definido um capex para o projeto é possível analisar quanto a taxa de juros do financiamento afeta a TIR. A análise da Figura 5.13 evidencia como pequenas variações na taxa de juros causam grandes variações na TIR.

A exemplo de uma usina de gaseificação com custo de R\$ 1,2 bi (próximo ao estimado pela Equação 4.25), com financiamento isento de juros, a TIR é de 37%. Em comparação com a incineração, onde o empreendimento também isento de juros proporciona a TIR de 18%, a gaseificação mostra-se mais vantajosa.

Na gaseificação, juros maiores que 19% ao ano, tornam a TIR negativa, enquanto para a incineração a TIR torna-se negativa quando os juros ultrapassam 9,3% (para capex próximos ao estimados pelas Equações 4.24 e 4.25).

Portanto, mesmo sendo muito sensível a viabilidade do projeto à taxa de juros do financiamento, para a gaseificação há margens maiores para negociação dos juros do financiamento.

### **5.5.3 ANÁLISE PARA DIFERENTES FLUXO DE RSU EM T/DIA**

O objetivo das análises de sensibilidade para diferentes fluxos de RSU diário é determinar o fluxo mínimo que os projetos deverão ter para que a TIR alcance a TMA desejada ou que o VPL alcance o desejado pelo investidor.

Uma vez que os custos por tonelada de RSU processada decrescem com o aumento da capacidade da planta, já que o expoente de fator de escala é menor que 1 em ambas as tecnologias, o aumento da capacidade diminui o custo específico do projeto (R\$/ton).

Além do custo específico diminuir, com o aumento do fluxo de RSU há maior geração de receita, pois o aumento do fluxo de RSU permite mais geração de energia, além de maiores ganhos com a entrada de resíduos (*gate fee*) e com a venda dos recicláveis que é separado do RSU.

Desta forma, o fluxo de RSU nas plantas pode definir a viabilidade econômica dos projetos, quando outros parâmetros de projetos (juros, preço de venda da energia, opex, *gate fee* etc.) são mantidos constantes.

#### **5.5.3.1 TIR em Função do Fluxo de RSU para incineração**

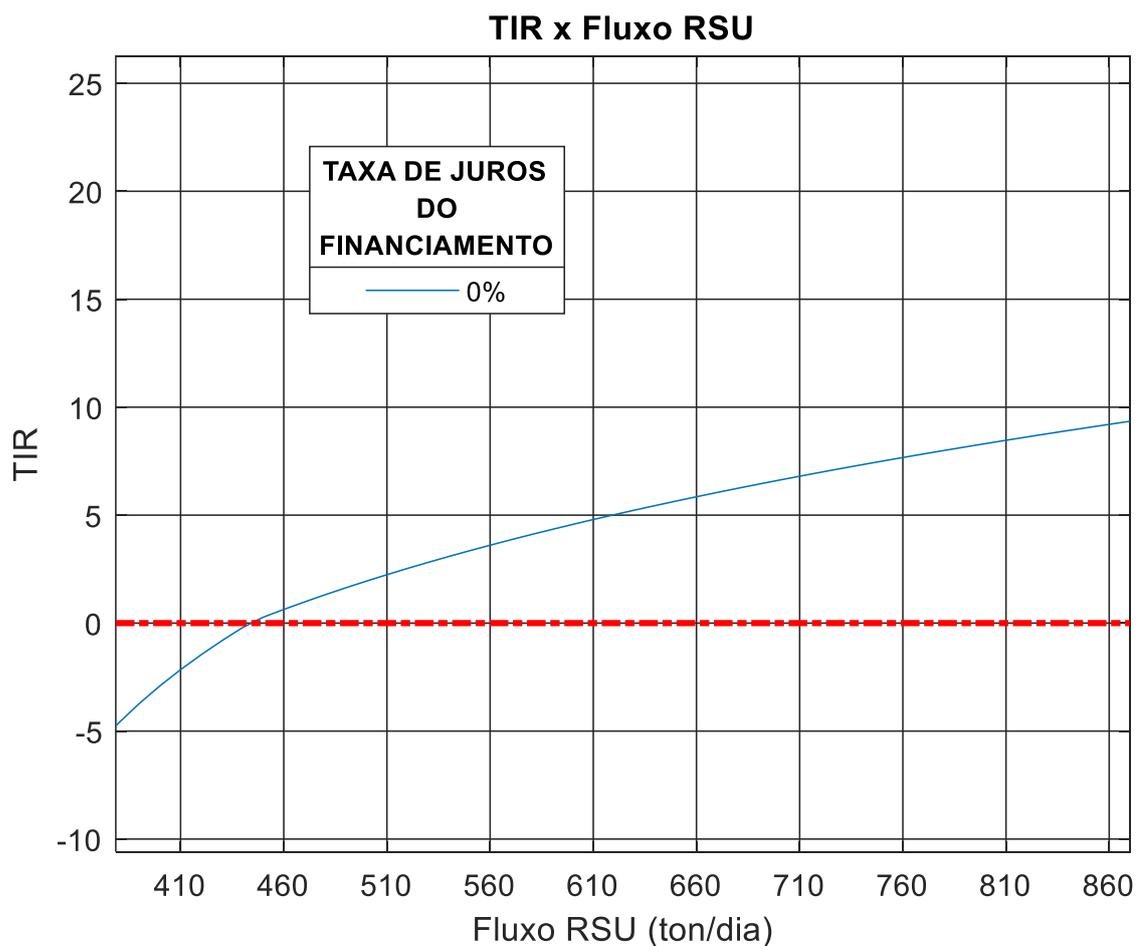


Figura 5.14 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU

Fonte: O autor (2022).

A Figura 5.14 traz a TIR em função do fluxo de RSU diário, para a situação hipotética onde os juros do financiamento são iguais a zero. O capex é calculado conforme a Equação 4.24, para cada fluxo de RSU presente no eixo horizontal da Figura 5.14.

A TMA de um projeto é definida subjetivamente pelo investidor, com base em diversos fatores como o capital disponível para investir, riscos do investimento etc. (Hess, 1992).

A análise desta Seção é importante pois possibilita encontrar o fluxo de RSU mínimo necessário para que a TIR do projeto supere a TMA determinada pelo investidor, além de descartar projetos inviáveis independentemente da taxa de juros do financiamento, uma vez que mesmo sem juros a TIR não alcançaria a TMA desejada.

Para todo fluxo de RSU menor que aproximadamente 440 t/dia o projeto de incineração é inviável, mesmo que o financiamento seja isento de juros, e deverá ser descartado, uma vez que a TIR será negativa.

### 5.5.3.2 VPL em Função do Fluxo de RSU para incineração

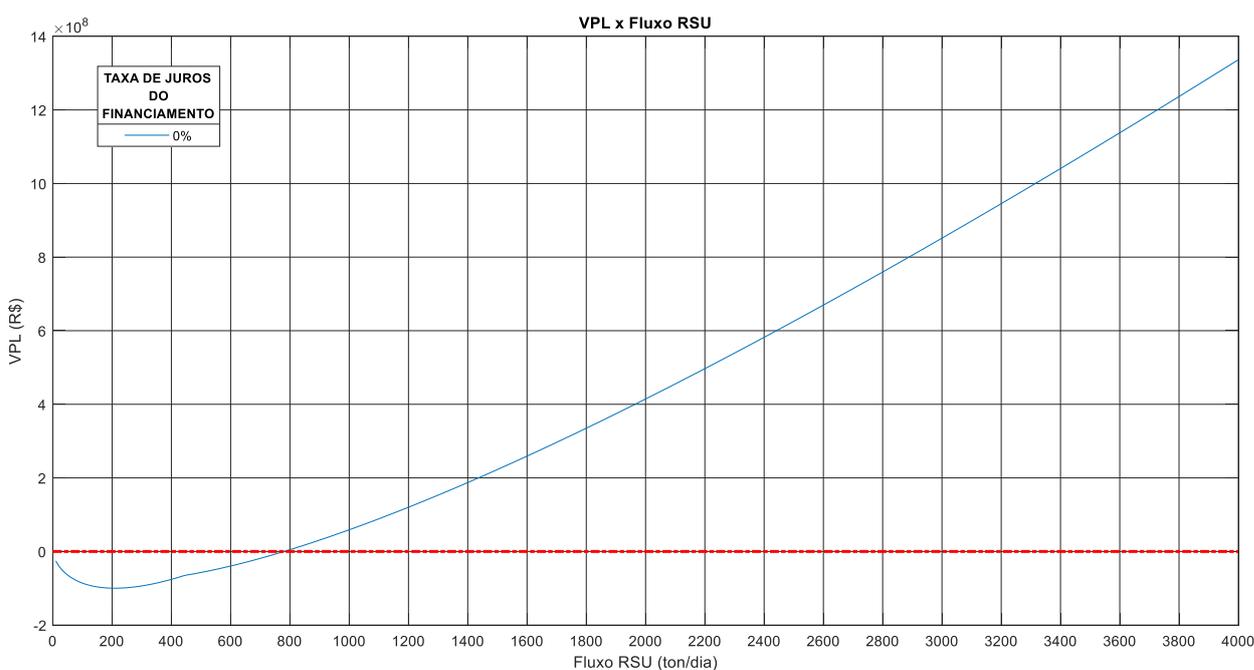


Figura 5.15 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU

Fonte: O autor (2022).

Assim como a TMA, o VPL de um projeto também é subjetivo ao investidor, e depende de fatores como o quanto ele está investindo, o tempo de retorno que o dinheiro irá retornar etc. Porém, para que o projeto seja viável economicamente, o VPL deverá ser maior que zero.

A Figura 5.15 mostra o VPL do projeto de incineração em função do fluxo de RSU quando a TMA é de 8% e o financiamento é isento de juros.

A análise desta Figura traz que: para que o projeto tenha VPL maior que zero, o fluxo mínimo de RSU deverá ser maior que 800 t/dia, em uma situação ótima onde não há juros. Portanto, para projetos com onde o fluxo de RSU diário é menor que 800 t/dia, ou que existem juros do financiamento, o VPL será negativo e projeto deverá ser rejeitado (para TMA de 8%).

### 5.5.3.3 TIR em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração

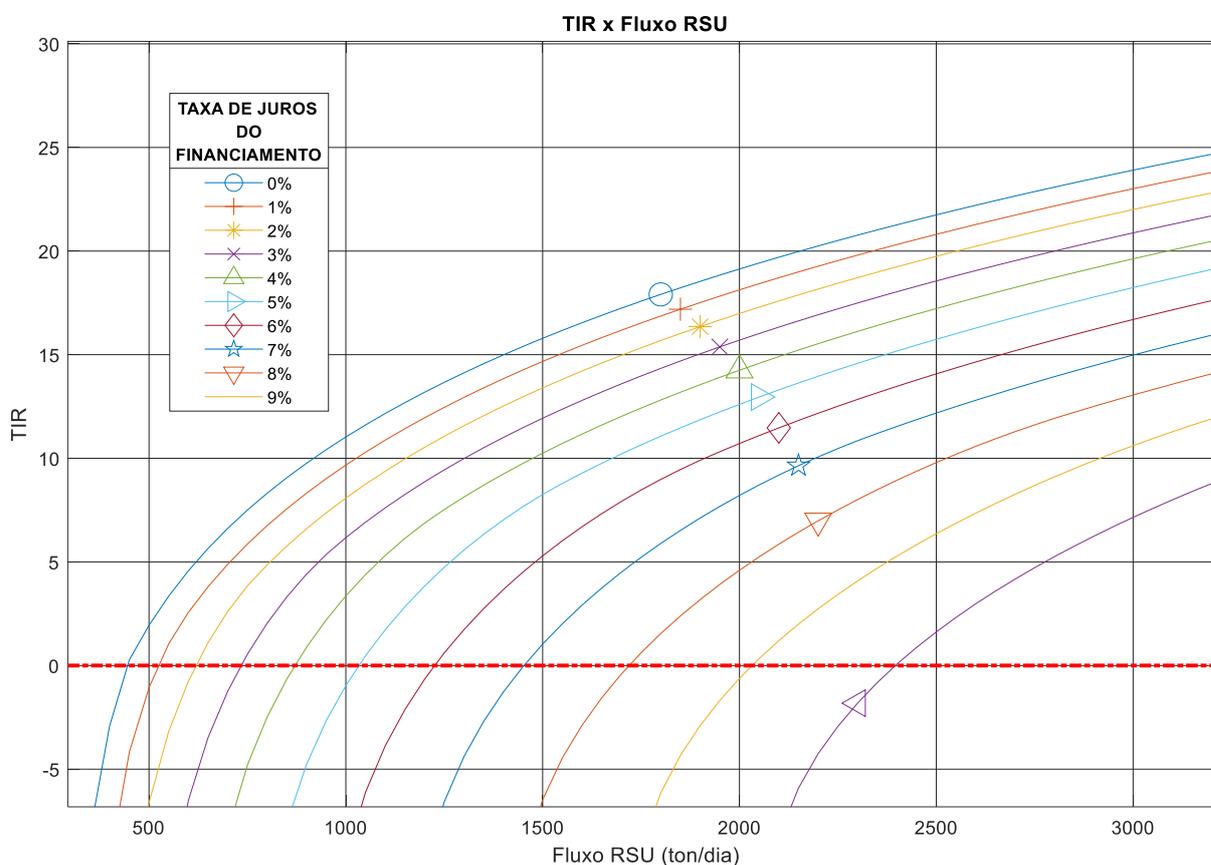


Figura 5.16 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%

Fonte: O autor (2022).

A análise feita na Seção 5.6.3.1, onde encontra-se o fluxo mínimo de RSU para que a TIR alcance uma TMA desejada quando não há juros de financiamento, é feita para situações em que há a incidência de juros, nesta Seção, com a mesma importância descrita anteriormente.

A TIR do projeto de incineração em função do fluxo de RSU, para situações em que incidem juros sobre o financiamento, são exibidas nas Figuras 5.16 e 5.17. Determinada a taxa de juros anual, é possível encontrar o fluxo mínimo de RSU para que a TIR do projeto alcance a TMA desejada.

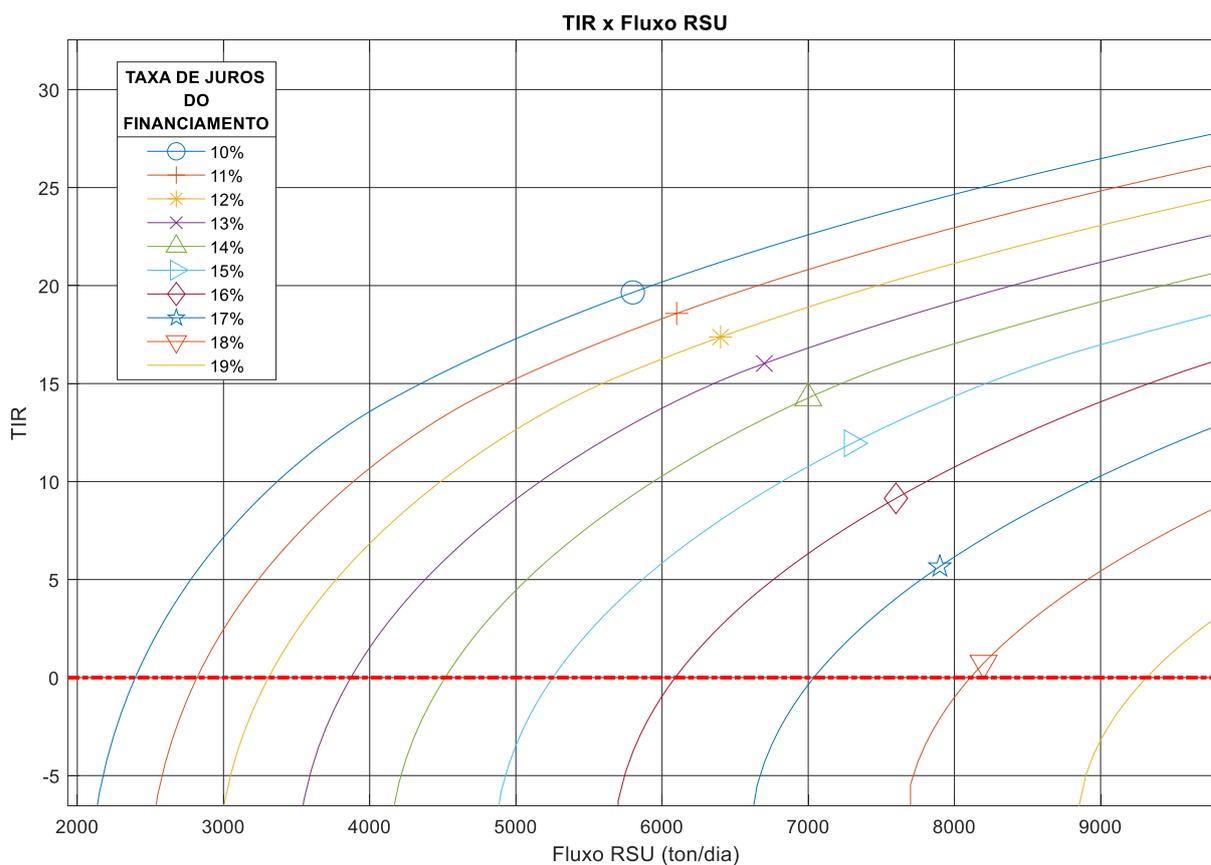


Figura 5.17 – Incineração: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 5.13 resume as Figuras 5.16 e 5.17 para a TMA de 0%, ou seja, para que o projeto não dê prejuízo, em função dos juros variando entre 0% e 19%.

Taxa de Juros	Fluxo Mínimo de RSU (t/dia)
0%	443
1%	523
2%	619
3%	733
4%	870
5%	1033
6%	1225
7%	1452
8%	1719
9%	2031
10%	2396
11%	2819
12%	3308
13%	3871

Taxa de Juros	Fluxo Mínimo de RSU (t/dia)
14%	4516
15%	5253
16%	6090
17%	7038
18%	8109
19%	9134

Tabela 5.13 – Fluxo mínimo de RSU para incineração para que TIR seja 0%  
Fonte: O Autor (2022).

Logo, pela tabela 5.13, é possível descartar, de imediato, projetos que darão prejuízo quando se conhece a taxa de juros do financiamento, para isto, descarta-se todo projeto com fluxo de RSU mínimo inferior ao determinado na Tabela 5.13 em função dos juros de financiamento.

Esta análise demonstra, novamente, como a viabilidade do projeto é fortemente dependente dos juros do financiamento, pois uma pequena variação na taxa de juros causa grandes variações na TIR.

#### 5.5.3.4 VPL em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração

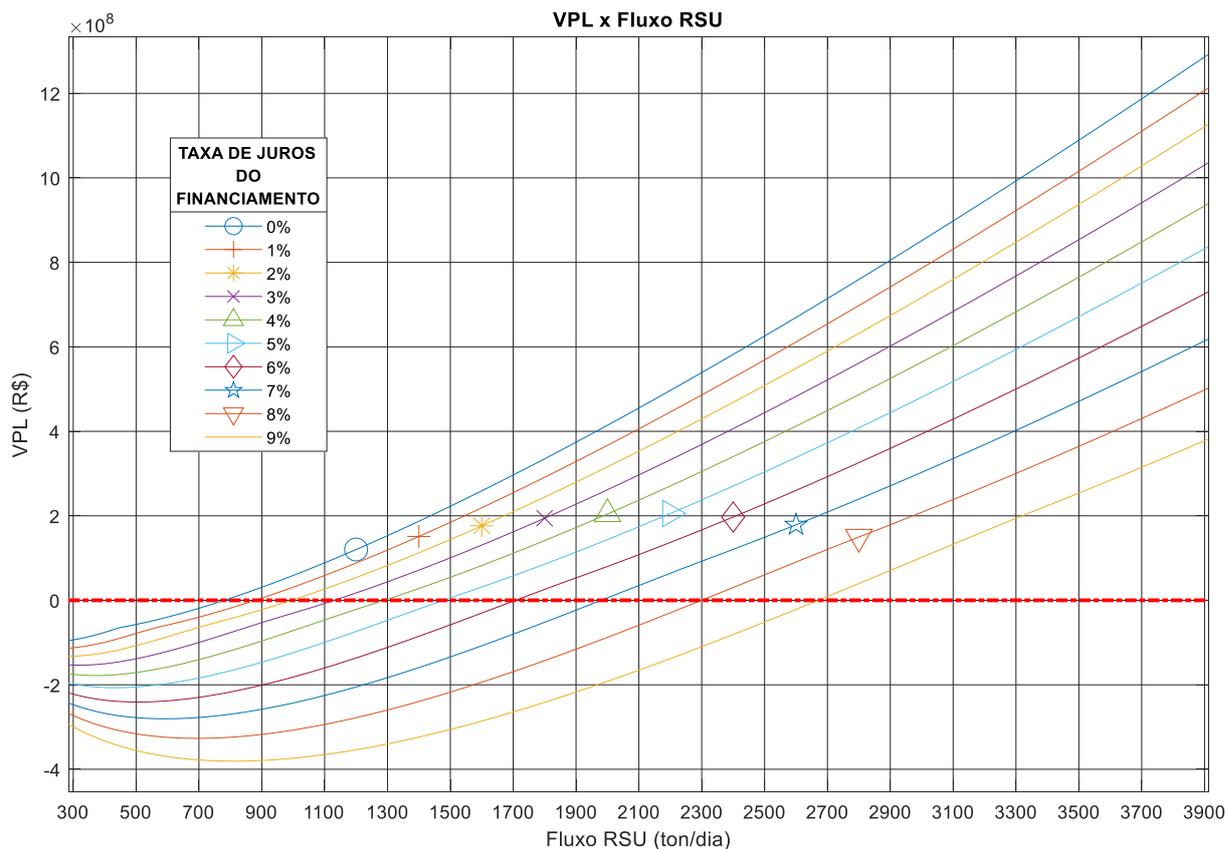


Figura 5.18 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%

Fonte: O autor (2022).

Para TMA de 8% as Figura 5.18 e 5.19 trazem o VPL do projeto de incineração em função do fluxo de RSU para taxas de juros variando discretamente entre 0 e 19% ao ano. O projeto é viável quando o VPL é maior que zero. Logo, determinada a taxa de juros, é possível encontrar o fluxo mínimo de RSU necessário para que o projeto seja viável.

Uma conclusão preliminar é que o projeto é praticamente inviável para o cenário brasileiro, quando a taxa de juros é maior que 17% e a TMA desejada é de 8%, pois o fluxo de resíduos necessário diariamente (8500 t/dia), para que o VPL não seja negativo, só estaria disponível nas maiores cidades do Brasil, mesmo considerando que toda a coleta de lixo da cidade seja destinada à usina.

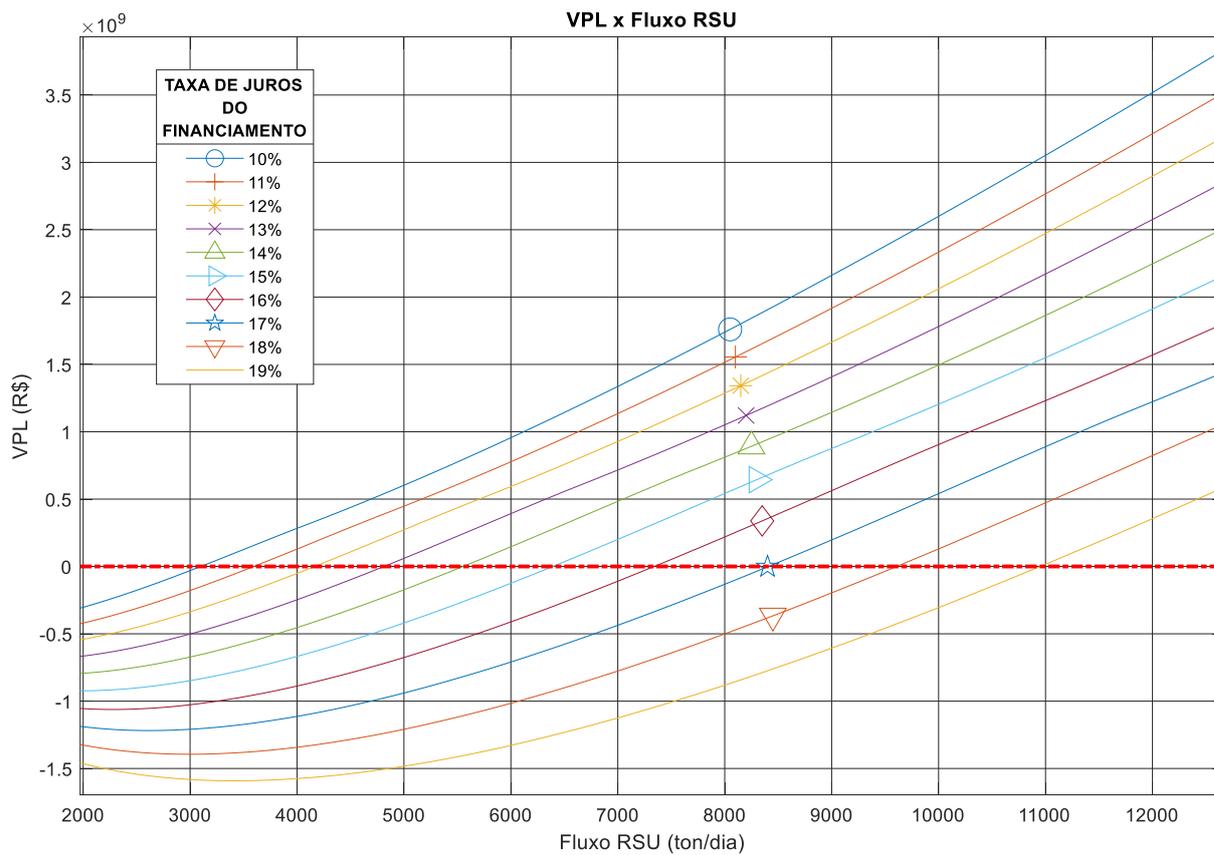


Figura 5.19 – Incineração: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%

Fonte: O autor (2022).

#### 5.5.3.5 TIR em Função do Fluxo de RSU para gaseificação

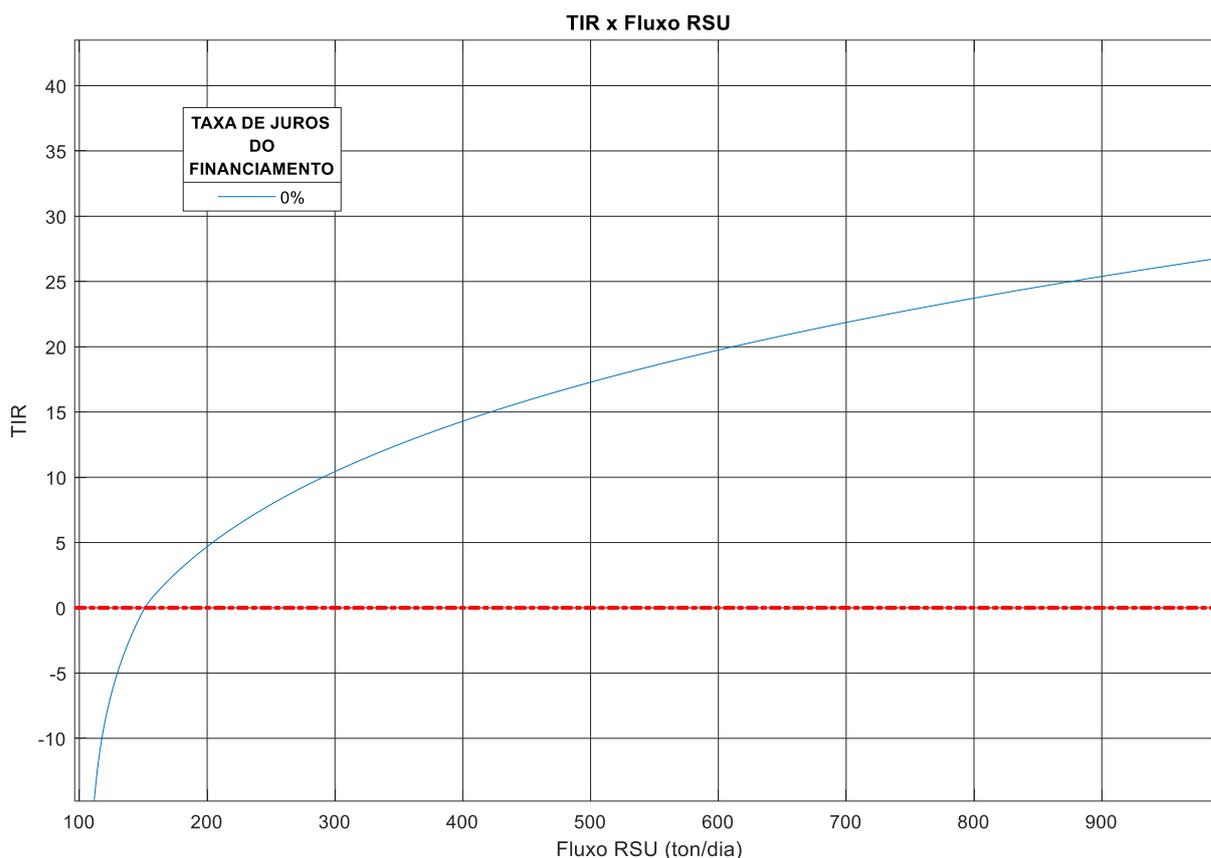


Figura 5.20 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU

Fonte: O autor (2022).

A mesma análise feita na Seção 5.6.3.1 é feita nesta Seção. A Figura 5.20 exhibe a TIR em função do fluxo de RSU diário, para a situação hipotética onde os juros do financiamento são nulos. O capex para a gaseificação em função do fluxo de RSU é calculado através da Equação 4.25, para cada fluxo de RSU presente no eixo horizontal da Figura 5.20.

Esta análise possibilita encontrar o fluxo de RSU mínimo necessário para que a TIR do projeto de gaseificação atinja a TMA desejada pelo investidor, além de descartar projetos inviáveis independentemente da taxa de juros do financiamento, uma vez que mesmo com financiamento isento de juros a TIR não alcançaria a TMA desejada.

Para todo fluxo de RSU menor que aproximadamente 150 t/dia o projeto de gaseificação é inviável, mesmo que o financiamento seja isento de juros, e deverá ser descartado pelo investidor.

Em comparação com projetos de incineração, o fluxo de RSU diário para que o projeto seja viável é aproximadamente 66% menor, possibilitando a viabilidade de projetos de gaseificação em pequenas cidades.

### 5.5.3.6 VPL em Função do Fluxo de RSU para gaseificação

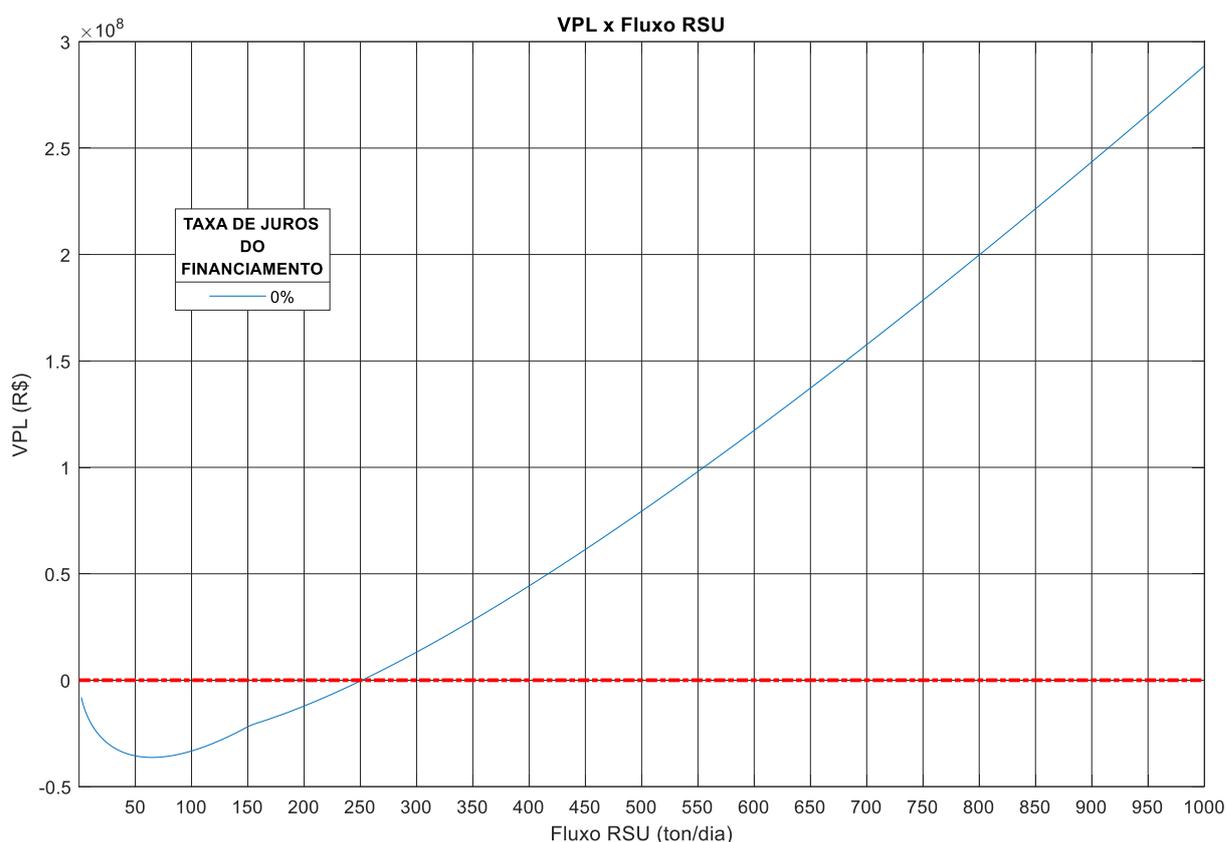


Figura 5.21 – Gaseificação: VPL em Função do Fluxo de RSU

Fonte: O autor (2022).

Como abordado anteriormente, o VPL de um projeto é subjetivo ao investidor, e depende de diversos fatores. Porém, para que o projeto seja viável economicamente, o VPL deverá ser maior que zero.

A Figura 5.21 mostra o VPL do projeto de gaseificação em função do fluxo de RSU, quando a TMA é de 8% e o financiamento é isento de juros.

A análise desta Figura traz que: para que o projeto tenha VPL maior que zero, o fluxo mínimo de RSU deverá ser maior que 250 t/dia, em uma situação ótima onde não há juros. Portanto, para projetos com onde o fluxo de RSU diário é menor que 250 t/dia, ou que existem juros do financiamento, o VPL será negativo e projeto deverá ser rejeitado (para TMA de 8%).

### 5.5.3.7 TIR em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para gaseificação

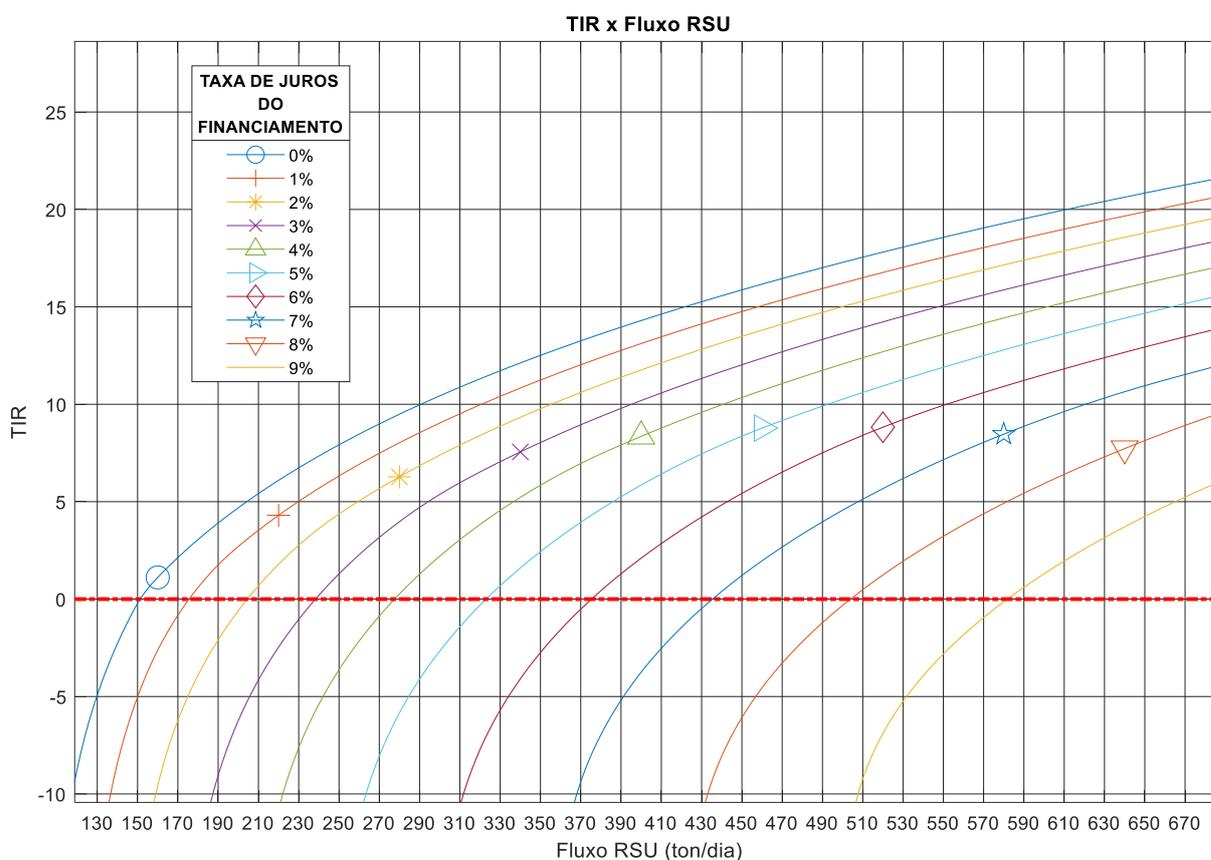


Figura 5.22 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%

Fonte: O autor (2022).

A análise feita na Seção 5.6.3.5, onde encontra-se o fluxo mínimo de RSU para que a TIR alcance uma TMA desejada quando não há juros de financiamento no projeto de gaseificação, é feita para situações em que há a incidência de juros, nesta Seção, com a mesma importância descrita anteriormente.

A análise da TIR do projeto de gaseificação em função do fluxo de RSU, para situações em que há juros de financiamento é exibida nas Figuras 5.22 e 5.23. Determinada a taxa de juros anual, é possível encontrar o fluxo mínimo de RSU para que a TIR projeto alcance a TMA desejada pelo investidor.

A exemplo de um financiamento com juros de 9% ao ano, o fluxo mínimo de RSU para que a TIR alcance 0% é de aproximadamente 581 t/dia. Comparativamente, na incineração, o fluxo de RSU para que a TIR atinja 0%, quando os juros do financiamento são de 9% ao ano, é de 2031 t/dia.

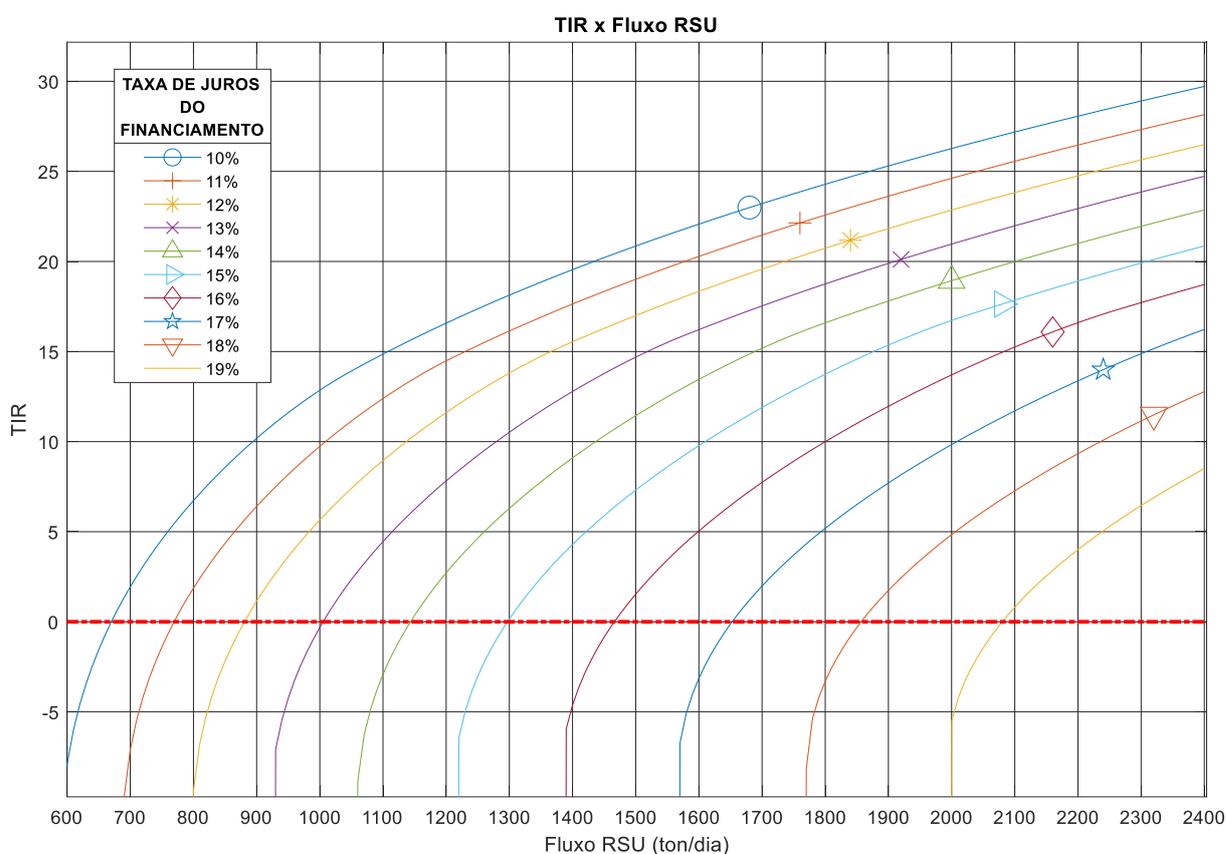


Figura 5.23 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%

Fonte: O autor (2022).

Esta análise demonstra como a viabilidade do projeto é fortemente dependente dos juros do financiamento, pois uma pequena variação na taxa de juros causa grandes variações na TIR.

Além disso, nota-se que a TIR de projetos de gaseificação é superior à TIR de projetos de incineração, em todos os casos em que há a mesma incidência de juros e o fluxo de RSU é igual para ambas as tecnologias.

### 5.5.3.8 VPL em Função do Fluxo de RSU com diferentes taxas de juros para incineração

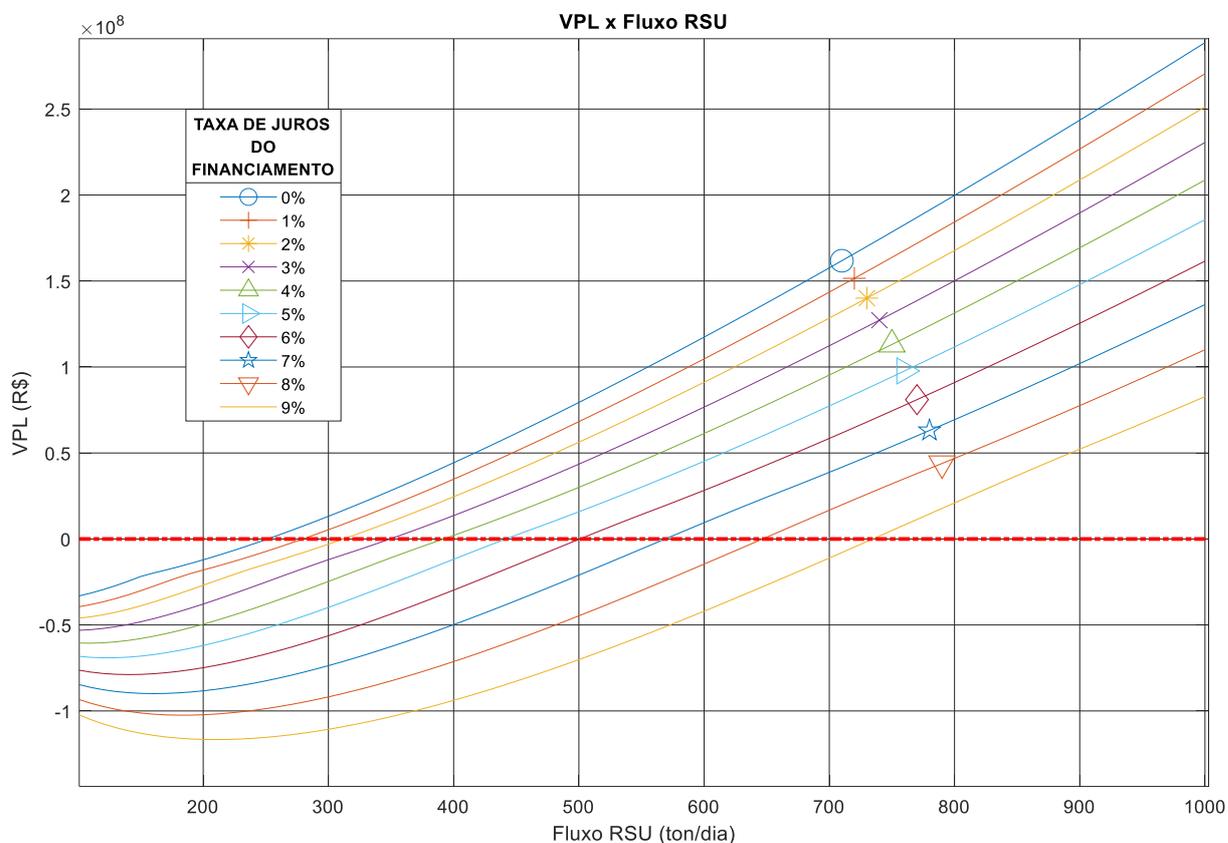


Figura 5.24 – Gaseificação: VPL em Função do Fluxo de RSU e juros entre 0 e 9%

Fonte: O autor (2022).

Para TMA de 8% as Figura 5.24 e 5.25 trazem o VPL em função do fluxo de RSU e taxas de juros do financiamento variando entre 0 e 19% ao ano para o projeto de gaseificação. O projeto é viável quando o VPL é maior que zero. Logo, determinada a taxa de juros, é possível encontrar o fluxo mínimo de RSU necessário para que o projeto seja viável economicamente.

Essa análise demonstra que o projeto pode ser viável mesmo com taxa de juros de financiamento superiores a 19%, enquanto para a incineração, o projeto é inviável no Brasil quando os juros ultrapassam 17%.

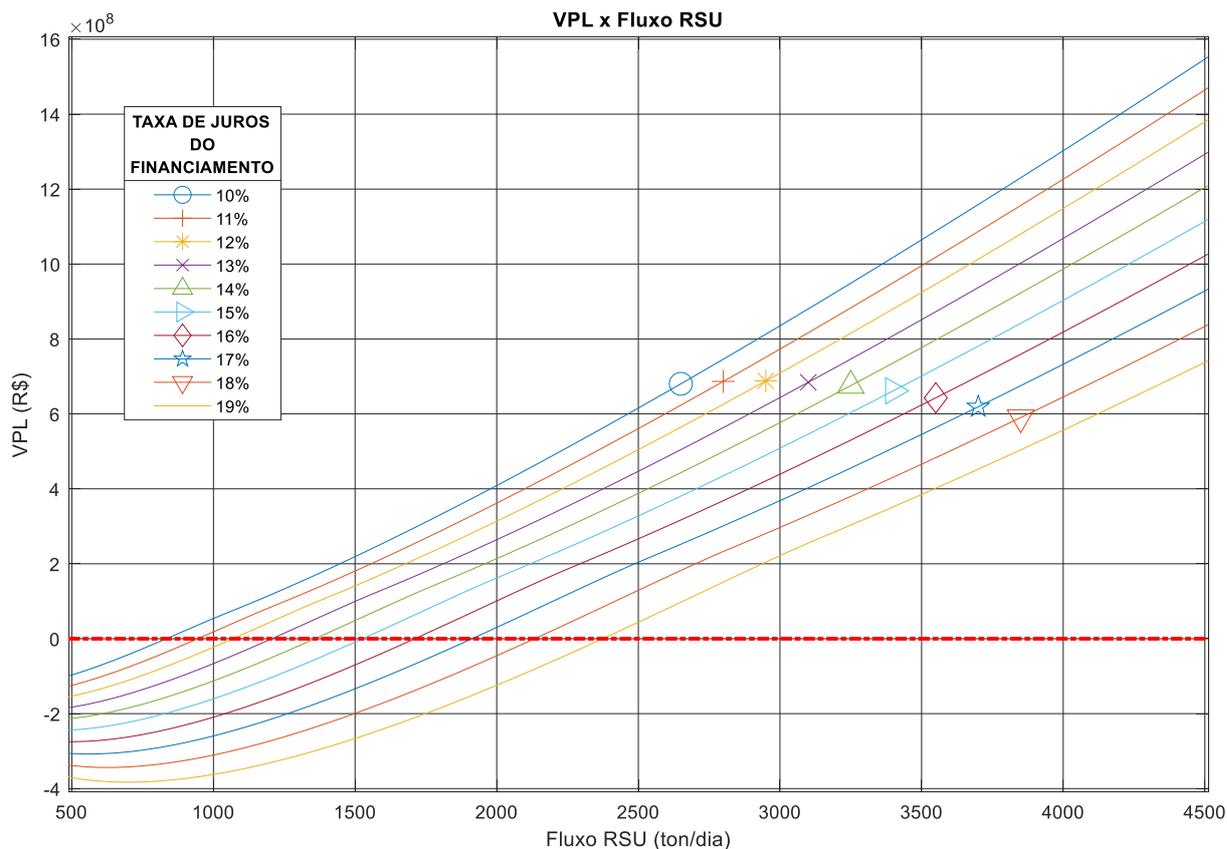


Figura 5.25 – Gaseificação: TIR em Função do Fluxo de RSU e juros entre 10 e 19%

Fonte: O autor (2022).

## 5.6 FLUXO MÍNIMO DE RSU PARA VIABILIDADE DOS PROJETOS

Como visto, um dos fatores mais importantes para a viabilidade dos projetos é a taxa de juros do financiamento.

Nesta Seção é abordado o fluxo mínimo de RSU em t/dia que os projetos de incineração e gaseificação necessitam, para que não ocorra prejuízo, ou seja, para que o retorno financeiro seja zero. As premissas são as mesmas definidas na Tabela 5.2, variando-se apenas a taxa de juros do financiamento e o capex de cada projeto em função do fluxo de RSU, de acordo com as Equações 4.24 e 4.25 para incineração e gaseificação, respectivamente.

A Tabela 5.14 resume as Figuras 5.16, 5.17, 5.22 e 5.23 e mostra o fluxo mínimo de RSU em t/dia para que o projeto atinja a TIR de 0%, ou seja, que não dê prejuízo.

Porém, nesta análise, apesar de não ocorrer prejuízo, não significa que o investimento será atrativo para um investidor, uma vez que o retorno seria nulo. O

objetivo desta análise é comparar os fluxos mínimos de resíduos para cada tecnologia, a fim de determinar qual a mais vantajosa financeiramente e possível de ser implementada nas cidades a depender do seu número de habitantes.

Taxa de Juros	Fluxo Mínimo de RSU (t/dia)	
	Incineração	Gaseificação
0%	443	151
1%	523	175
2%	619	204
3%	733	238
4%	870	277
5%	1033	323
6%	1225	376
7%	1452	435
8%	1719	504
9%	2031	581
10%	2396	669
11%	2819	769
12%	3308	880
13%	3871	1005
14%	4516	1143
15%	5253	1297
16%	6090	1466
17%	7038	1652
18%	8109	1857
19%	9134	2080

Tabela 5.14 – Fluxo mínimo de RSU para incineração e gaseificação para que TIR seja 0%  
Fonte: O Autor (2022).

## 6 CONCLUSÃO

As tecnologias de incineração e gaseificação demonstram grande potencial para atender as necessidades atuais de intervenção das cidades nas questões relacionadas ao meio ambiente, no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Além de oferecer alternativa tecnológica para destinação final, possibilita aproveitamento energético destes resíduos e diversificação da matriz energética.

No contexto da discussão sobre viabilidade econômica dos projetos de recuperação energética de resíduos através dos processos de incineração e de gaseificação, estas tecnologias apresentam-se promissoras.

No entanto, a análise de sensibilidade demonstra um caráter fortemente dependente das variáveis do projeto quanto à viabilidade, variáveis que muitas vezes podem ser difíceis de determinar ou projetar com exatidão e que afetam de maneira sensível alguns dos parâmetros dimensionados no fluxo de caixa, levando à inferência de uma conclusão equivocada.

Sendo assim, a conclusão sobre a viabilidade do projeto deve ser feita desde que se tenha confiança nas premissas do projeto.

Considerando as premissas apresentadas anteriormente, a gaseificação é inviável para fluxo de resíduos menores que 150 t/dia e a tecnologia não deverá ser implementada, mesmo que o financiamento do projeto seja isento de juros. Enquanto para a incineração, nas mesmas condições, o projeto é inviável para fluxo de resíduos menores que 440 t/dia. Isso ocorre devido ao menor capex e opex necessários para a gaseificação, que compensam o menor potencial de geração por ton de RSU e maior gasto energético da planta.

Considerando a produção de resíduos por habitante como 1 kg/dia, a incineração torna-se viável apenas para grandes cidades, com mais de 440 mil habitantes, enquanto a gaseificação necessita de cidades com populações maiores que 150 mil habitantes, quando se considera o financiamento isento de juros.

Porém, isso não significa que o número de habitantes de uma cidade seja um fator totalmente impeditivo para implementação destas tecnologias, pois há a possibilidade de pequenas cidades, ao serem próximas, destinarem seus resíduos a um único local que abriga a tecnologia de recuperação energética de resíduos.

Para financiamentos onde ocorre a incidência de juros, os juros anuais são determinantes para definir a viabilidade econômica do projeto.

Através da Tabela 5.14 é possível concluir que o processo de gaseificação necessita de um fluxo de RSU diário bem menor em comparação com incineração para que o projeto atinja a TIR de 0%, independentemente dos juros do financiamento, desde que eles sejam iguais para ambas as tecnologias, tornando a gaseificação mais vantajosa financeiramente.

Devido ao capex para projetos de incineração serem maiores que para projetos de gaseificação, os juros pagos durante o período de financiamento são superiores nos investimentos referentes a incineração, e isso impacta de maneira muito sensível no fluxo de caixa. As análises demonstram que a gaseificação apresenta a TIR sempre superior à da incineração, e *Payback* descontado sempre menor, quando se considera o mesmo fluxo de RSU diário e mesma taxa de juros do financiamento.

Quando as premissas: taxa de juros, prazo de amortização e tempo de carência do financiamento; preço de venda da energia elétrica; capacidade de processamento diário; impostos; composição e poder calorífico de RSU; *gate fee*; preço de venda dos recicláveis; taxa mínima atrativa; vida útil da planta; são as mesmas para a incineração e para a gaseificação. Tendo como diferença o capex; opex; consumo de energia da planta; capacidade de geração de energia por ton de RSU processado. Em todos os cenários analisados, a gaseificação se mostrou mais vantajosa, apresentando TIR maiores e *Payback* descontado menores, além de necessitar de menores fluxo de resíduos diários para que o empreendimento seja viável.

Como verificado nas análises, devido ao expoente de fator de escala ser menor que 1, o custo específico (capex/ton) diminui conforme a capacidade da usina aumenta. Sendo assim, em situações que seja necessário mais de uma unidade de gaseificação para que seja atingida a mesma capacidade de processamento que uma unidade de incineração, o cenário pode ser alterado, tornando a incineração tão ou mais atrativa que a gaseificação (por exemplo, 4 unidades com capacidades de processamento de 2500 t/dia, para gaseificação, e 1 unidade com capacidade de 10000 t/dia, para incineração, ambos projetos têm TIR muito próximas).

Além da limitação da capacidade de processamento das usinas que aumenta o custo específico, pode-se ainda fazer uma análise sobre a economia ao criar mais de uma unidade de maneira descentralizada, economia esta, que poderia compensar

a descentralização das unidades, uma vez que usinas com enormes capacidades como 10000 t/dia funcionando em um único lugar, acarretaria grandes gastos com logística, já que todo o resíduo de uma cidade inteira deve ser transportado até este local. Ao descentralizar as unidades, os resíduos podem ser transportados por menores distância até a sua unidade de recuperação energética, acarretando, possivelmente, economia em longo prazo.

Como sugestão para trabalhos futuros, para realizar uma análise mais precisa de comparação entre as duas tecnologias, deve-se analisando a capacidade de processamento máxima que uma unidade de gaseificação suporta. Verificar a influência da receita advinda da geração de hidrogênio e de crédito de carbono, na TIR, VPL, analisando a viabilidade para instalação em municípios com população menores que 150 mil habitantes para projetos de gaseificação.

## 7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, Rubenildo Vieira. Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental. 2007.

ATKINSON, A. A. et al. Contabilidade gerencial. São Paulo: Atlas, 2000.

Azevedo de Oliveira, Patricia. (2016). GASEIFICAÇÃO: PROCESSO ALTERNATIVO PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA E ELIMINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. 10.13140/RG.2.1.2468.7604.

BARBOSA, R.L., SILVA, F.M., SALVADOR, N. & VOLPATO, C. E. S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. Ciênc. agrotec., 32, 5, p. 1588-1593, 2008.

BARJA, G. J. A. A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico. Universidade de Brasília. Brasília , p. 157. 2006.

BASU, P. Combustion and gasification in fluidized beds. CRC press, 2006. ISBN 1420005154.

Begum, S., Rasul, M. G., Cork, D., & Akbar, D. (2014). An experimental investigation of solid waste gasification using a large pilot scale waste to energy plant. Procedia Engineering, 90, 718-724. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.802>

BELGIORNO, V.; FEO, G.; ROCCA, C. D.; NAPOLI, R. M. A. Energy from Gasification of Solid Wastes. Department of Civil Engineering, University of Salerno, Fisciano, Italy. Waste Management, vol.23, pp: 1-15, 2003.

BEHREND, P.; KRISHNAMOORTHY, B. Considerations for waste gasification as an alternative to landfilling in Washington state using decision analysis and optimization. Sustainable Production and Consumption. v. 2, p. 170-179, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.07.004>

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. MANUAL DA TAXA DE LONGO PRAZO (TLP). Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/3a3119a7-f04e-4281-8cfe-f3dae280f56b/manual-da-taxa-de-longo-prazo-tlp-novo.pdf> Acesso em: 22 nov. 2022.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. BNDES Finem - Geração de energia. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia> Acesso em 22 nov. 2022.

BRANCHINI, L. Waste-to-energy: advanced cycles and new design concepts for efficient power plants. Switzerland: Springer, 2015, 141 p.

BRASIL, H. G. Avaliação Moderna de Investimentos. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 222 p.

BRIDGWATER, A.; BRIDGE, S. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies. In: Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization. [S.l.]: Springer, 1991.

CARDOSO, M. T. Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.

CARVALHO, R. Q. et al Oportunidades enterradas | Geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos, 2019.

CCEE - Camara de Comercialização de Energia Elétrica - Resultados do Leilão - LEILÃO DE GERAÇÃO ANEEL Nº 004/2022- . Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resumo\\_vendedor\\_37len\\_a5.pdf/c85787d3-9e2f-4191-b77e-e83d47b83d2c](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resumo_vendedor_37len_a5.pdf/c85787d3-9e2f-4191-b77e-e83d47b83d2c)>. Acessado em: 05 fev. 2023.

CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: CEMPRE, 2018.

Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., Bouziane, K., 2013. Influence of thebiomass gasification processes on the final composition of syngas. Energy Procedia 236, 596–606, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>

DALVI, E. A. Gaseificação da biomassa fecal para produção de biocombustível: Estudo da conversão termoquímica e avaliação exergoecológica. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2015

DAMODARAN, A. Applied Corporate Finance. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 752 p.

DELTA WAY ENERGY. Waste-to-Energy: How It Works. 2017. Disponível em: <<https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. Incineration of Hazardous Waste: a Critical Review Update. Journal of the Air & Waste Management Association, v.43, n. 1, p. 25-73, Jan. 1993.

DESROSIERS, R, E. Process Designs and Cost Estimates for a Medium Btu Gasification Plant Using a Wood Feedstock, 1979.

FERREIRA, C. R. N. PROJETO DE LINHA INDUSTRIAL PARA O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS PARA A GASEIFICAÇÃO EM REATOR TERMOQUÍMICO: ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SYNGAS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

FOSTER, P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, S. et al. (Ed.). Climate Change 2007:the physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. Chap. 2, p. 129-234. (IPCC Fourth

Assessment Report, AR 4). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M. (Coords.). Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <[http://gsrsu.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://gsrsu.blogspot.com/p/blog-page_21.html)>. Acesso em: 12 jun. 2022.

GERGEL, Igor. Cost of incineration plant. Waste to Energy International, 2015. Disponível em: <<https://wteinternational.com/news/cost-of-incineration-plant>>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

HESS, Geraldo et alli. Engenharia Econômica. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1992.

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

HOLMGREN, Kristina et al. Perspectives on Investment Cost Estimates for GasificationBased Biofuel Production Systems. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, [s. l.], v. 45, 2015. DOI 10.3303/CET1545072. Disponível em: <https://www.aidic.it/cet/15/45/072.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2022.

JONES, J. C. 2010. Thermal processing of waste. s.l. : Jones & Ventus Publishing ApS, 2010. ISBN 978-87-7681-590-5.

KASSAI, J. R.; KASSAI, S.; SANTOS, A.; ASSAF NETO, A. Retorno de investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial. 2a. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

Kaza S et al. What a Waste 2.0 – A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. The World Bank Group 2018. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. Waste Management. v. 69, p. 407-422, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>

LINO, F. A. M; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 29, p. 19-25, 2018.

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.

MAYER, F. D. et al. Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termoelétrica avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do rio grande do sul. Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

MCDUGALL, F. et al. Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory. 2. ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001. 520 p.

MELO, B. A. de. Avaliação Computacional de um Sistema de Gaseificação em Leito Fluidizado utilizando o software CSFB. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2008.

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*. v. 25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

Motta, I.L., Miranda, N.T., Filho, R.M., Maciel, M.R.W., 2018. Biomass gasification fluidized beds: a review of biomass moisture content and operating pressure effects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 998–1023, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.042>

MUTZ, D. et al. Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2017.

PARO, A. d. C. Uma metodologia para gestão da eficiência energética de centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

POLI, D. et al. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. *Waste Management*. v. 8, n. 8, p. 09-31, 2013. *Revista de ciências Exatas e Tecnologia*

POTTER, M. C. & SCOTT, E. P. Ciências Térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão do calor. São Paulo: Thomson Learning, 277p, 2007.

Relatório Panorama dos Resíduos Sólidos 2021 – Abrelpe. Acessado em 27 de maio de 2022.

RFB - Receita Federal do Brasil – Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas – IRPJ. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/IRPJ>

RFB - Receita Federal do Brasil – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido – CSLL. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/CSLL>

Reed, T. B., & Das, A. (1981). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems* Washington: Solar Energy Research Institute.

REPORT, P.; SAHOO, S. FLUIDIZED BED REACTOR : DESIGN AND APPLICATION FOR ABATEMENT OF Bachelor of Technology ( Chemical Engineering ) By. 2012

RODRIGUES, R. Modelagem e simulação de um gaseificador em leito fixo para o tratamento térmico de resíduos sólidos da indústria calçadista. 2008.

SANTOS, José Alberto. Apostila do Curso de Análise de Investimento, Avaliação Econômica de Projetos. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP: Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir. Decisões Financeiras e Análise de Investimentos: Fundamentos, Técnicas e Aplicações. São Paulo. Atlas 2001.

STEAM, its generation and use. 2005. 41.ed. Barbeton, Ohio: The Babcock & Wilcox Company

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

TLP –Taxa Longo Prazo: Evolução – Gráfico e Tabela – Janeiro 2023. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.dicavalcantiassociados.com.br/noticias/tlp-taxa-longo-prazo>. Acesso em: 8 jan. 2023.

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