

QUANTIFICAÇÃO E VIABILIDADE DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS POLÍMEROS RECICLADOS

Arcangelo Peruzzo Bernasconi¹

Rodrigo Konrath²

Keila Daiane Ferrari Orso³

RESUMO

O estudo aborda a problemática ambiental decorrente do descarte inadequado de resíduos plásticos na indústria e propõe uma solução inovadora ao explorar a viabilidade econômica e eficiência na reutilização desses polímeros como combustível em caldeiras. Ao focar a gaseificação de polímeros reciclados, a pesquisa busca otimizar a geração de vapor e energia, essenciais para processos industriais. A análise abrange aspectos teóricos, como eficiência energética e poder calorífico do plástico, além de considerações práticas, incluindo a caracterização da caldeira e análise financeira. Os resultados indicam que em sete trimestres há retorno financeiro, e apontam o comparativo de eficiência entre regime teórico e prático de noventa por cento em comparação, apesar de desafios operacionais e climáticos, o projeto apresenta potencial para se tornar financeiramente viável a longo prazo, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica da indústria.

Palavras-chave: Resíduos plásticos; Gaseificação; Caldeira; Viabilidade econômica

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de plásticos na indústria tem desencadeado a produção em massa de resíduos, culminando em sérios problemas ambientais devido à inadequação no descarte. Muitas vezes, o plástico é misturado a outros materiais recicláveis, como papel, na tentativa de sua separação nas indústrias de papel, mas frequentemente, esse resíduo plástico é encaminhado para aterros sanitários, perdendo seu potencial de reutilização, (Bidone, 2017).

O avanço tecnológico tem proporcionado a criação de métodos e alternativas para mitigar o impacto do descarte de plástico, visando sua reutilização em diferentes finalidades, incluindo a conversão em energia. O plástico, intrinsecamente, possui um considerável potencial energético, que frequentemente não é aproveitado devido a desafios ambientais relacionados ao seu tempo de decomposição e à forma de reutilização como combustível, que em muitos casos se revela quimicamente tóxica.

Nesse contexto, a reutilização do plástico na forma de combustível surge como uma estratégia que busca viabilidade econômica e energética. Essa abordagem pode contribuir para

¹ Graduando em Engenharia Mecânica (UCEFF, 2023). E-mail: apbernasconi@gmail.com.

² Mestre em Física, E-mail: konrath@uceff.edu.br.

³ UCEFF Faculdades. E-mail: keilaorso@uceff.edu.br.

a redução dos custos de operação na indústria, ao mesmo tempo em que almeja criar uma vantagem econômica dentro do processo.

Este artigo visa explorar a viabilidade da reutilização do plástico como combustível, considerando seus aspectos econômicos e energéticos. A questão central a ser respondida é: "É viável o uso de resíduos plásticos para geração de vapor e energia dentro de uma indústria?". Para abordar essa questão, serão realizados estudos para quantificar e analisar o processo de gaseificação de polímeros reciclados, avaliando sua eficiência e seu potencial para uma indústria implementar um sistema de reaproveitamento de resíduos.

A pesquisa também abordará aspectos como o potencial calorífico do resíduo plástico, a quantificação energética, a análise do payback do investimento inicial e a viabilidade do projeto. Em suma, este estudo busca apresentar dados comparativos entre a eficiência e quantificação energética em projeto e prática, também demonstrar em quanto tempo há retorno financeiro, também tem como resultado contribuir para uma compreensão mais profunda das implicações e possibilidades da reutilização do plástico como uma fonte de energia sustentável e economicamente viável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POLUIÇÃO POR ATERROS

Os aterros sanitários são aglomerados de resíduos sólidos que geram grande volume de lixiviado, em céu aberto, esses passíveis de receber chuvas, e após essas precipitações pluviométricas, após o contato dessa água com o chorume gerado pela massa, gera vários tipos de poluentes, compostos orgânicos biodegradáveis e não degradáveis, além disso compostos nitrogenados, sólidos em suspensão, e também metais pesados em alguns casos (Bidone, 2017).

2.2 TIPOS DE ENERGIA

Existem três principais fontes de energia: fóssil, nuclear e renovável, sendo esta última a mais ecologicamente amigável, pois não emite gases poluentes. Dentro dessas categorias, são aplicados métodos para promover a reutilização de resíduos, aproveitando materiais descartados, muitas vezes provenientes de aterros de plástico em indústrias de papel. Isso é alcançado por meio da manufatura, visando a redução de resíduos e a geração sustentável de

energia limpa, utilizando o processo de gaseificação de biomassa, que se destaca pela sua maior eficiência energética quando comparado ao processo de pirólise em caldeiras (Oliveira, 2017).

2.3 PIROLISE

A pirolise é um processo de degradação térmica da matéria que ocorre em um ambiente sem a presença de um agente oxidante, como o oxigênio, e abaixo do ponto estequiométrico de combustão. Os primeiros experimentos com a pirolise remontam a 1926, na Alemanha. Nos Estados Unidos, o US Bureau of Mines iniciou o desenvolvimento de um protótipo para a carbonização do carvão, dando início à obtenção de um gás de alto poder calorífico a partir da queima de pneus, que foi o primeiro material a ser submetido ao processo de pirolise. Posteriormente, a pirolise foi estendida para a transformação de plásticos e resíduos de curtumes (Aires, 2003).

Um sistema de pirólise consiste basicamente em um reator onde o plástico é aquecido na ausência de oxigênio, gerando a decomposição térmica do material em produtos gasosos, líquidos e sólidos. Existem diferentes tipos de reatores para a pirólise, mas a maioria deles tem alguns componentes comuns como o reator de pirólise que é onde ocorre a decomposição térmica do plástico. Geralmente, é um recipiente fechado, sem ar, onde o plástico é aquecido a temperaturas elevadas (normalmente acima de 400 °C) (Yin & Rosendahl, 2010).

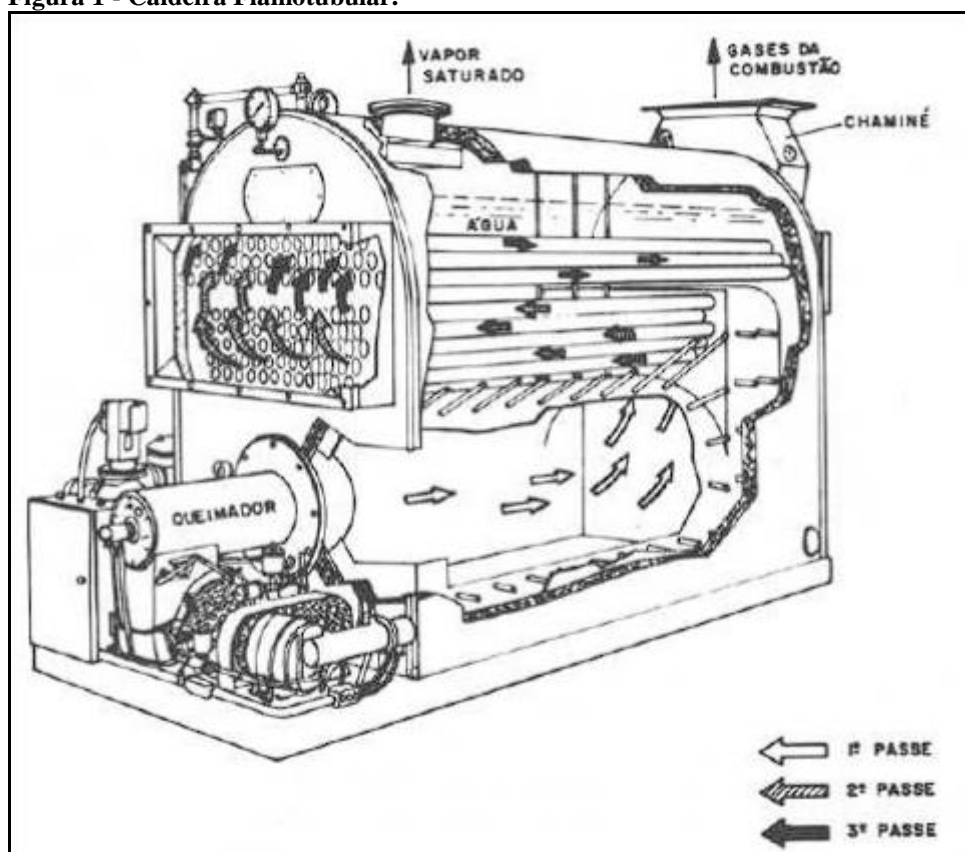
2.4 GASEIFICAÇÃO DO PLÁSTICO

O processo de gaseificação do plástico envolve diversas etapas e equipamentos que transformam o plástico em gases combustíveis, como hidrogênio, metano e monóxido de carbono. Inicialmente, o plástico é separado e fragmentado em pedaços menores, que são armazenados temporariamente em uma tremonha. Em seguida, ocorre a secagem para reduzir o teor de umidade. Os pedaços de plástico são então alimentados em uma câmara de gaseificação, onde são aquecidos a altas temperaturas em uma atmosfera controlada e com baixo teor de oxigênio, resultando na decomposição térmica do plástico em gases combustíveis. Os gases gerados são posteriormente limpos em um sistema que remove impurezas e contaminantes, como partículas, ácido clorídrico e compostos orgânicos voláteis. Finalmente, os gases limpos são queimados em uma caldeira flama tubular para gerar vapor e eletricidade (Bridgwater, A.V. 2012).

2.4.1 Caldeira flamotubular

Uma caldeira flamotubular é um tipo de caldeira que possui tubos cilíndricos atravessando sua câmara de combustão, permitindo que a chama e os gases de combustão aqueçam a água que circula ao redor dos tubos. Seus componentes fundamentais incluem a câmara de combustão, onde ocorre a queima do combustível, os tubos de fogo expostos às chamas e aos gases de combustão, tambores para receber a água aquecida e separar o vapor gerado, um queimador para fornecer o combustível, e um sistema de controle que monitora e ajusta o processo para garantir eficiência e segurança (Kirsch, 2014).

Figura 1 - Caldeira Flamotubular.



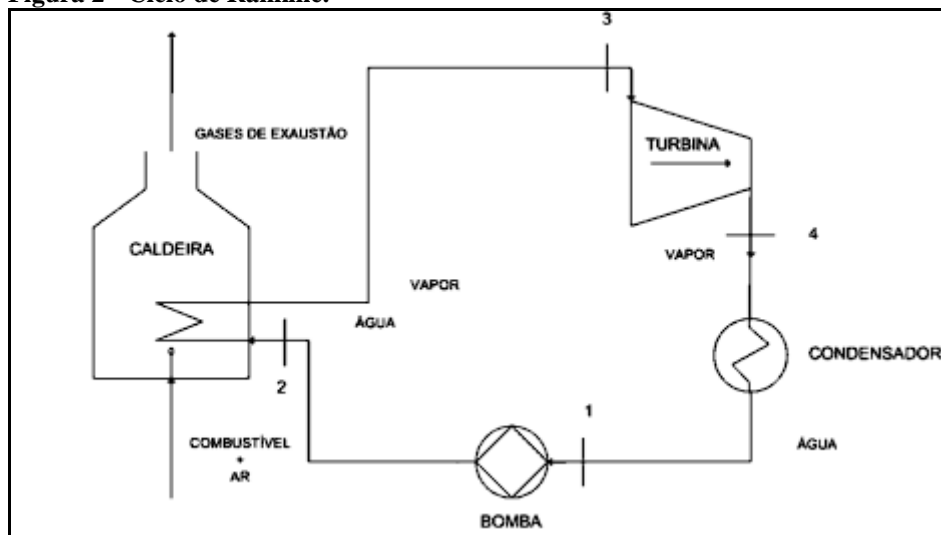
Fonte: Bega (2003).

2.5 CONVERSÃO DE ENERGIA

Conforme descrito por Smith (2007), uma turbina é composta por conjuntos alternados de bocais e pás giratórias. Além disso, a turbina é equipada com paletas, hélices, lâminas ou cubos dispostos ao redor de sua circunferência. Por meio desses componentes, vapor ou gás flui em um processo de expansão em estado estacionário. O resultado global desse processo é a

conversão da energia interna de uma corrente a alta pressão em trabalho no eixo. Quando o vapor d'água é utilizado como agente motriz, como em uma planta de potência, o dispositivo é denominado turbina. Utiliza-se o ciclo de Rankine para demonstração do processo de produção de energia elétrica através da conversão do vapor em energia mecânica pela turbina conforme Figura 2:

Figura 2 - Ciclo de Rankine.



Fonte: Smith (2007).

2.6 MATERIAL COMBUSTÍVEL

Os polímeros, macromoléculas compostas por unidades repetitivas, apresentam propriedades intrínsecas que os tornam candidatos promissores como combustíveis alternativos. Sua estrutura molecular permite a manipulação de propriedades como ponto de fusão, inflamabilidade e densidade. O polipropileno é um polímero termoplástico amplamente utilizado, caracterizado por sua fórmula molecular C_3H_6 (Pessoa Filho, 2020).

Tabela 1 - Poder calorífico de alguns plásticos e outros combustíveis

Material	Poder calorífico (MJ/KG)
Polietileno	43,3-46,5
Polipropileno	46,5
Poliestireno	41,9
Querosene	46,5
Gasolina	45,2
Petróleo	42,3
RSU	31,8

Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2012, p. 25).

2.6.1 Valor calorífico do material

O Poder Calorífico Inferior (PCI) obtido através do PCS, é uma medida da quantidade máxima de energia térmica liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa de uma substância, com a condição de que os produtos da combustão, incluindo a água, permaneçam no estado líquido. Em outras palavras, o PCI leva em conta apenas o calor liberado durante a combustão, sem incluir a energia latente de vaporização da água formada (Cortez, 2008).

$$Q_{total} = \text{Massa do plástico (kg)} \times \text{PCI (kJ/kg)}$$

- Q_{total} : Quantidade total liberada na combustão

2.6.2 Fatores que influenciam na geração de energia

Segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005) queima do plástico no processo de gaseificação é sensivelmente influenciada por uma variedade de fatores intrínsecos que exercem um impacto significativo na cinética e na eficiência dessa transformação termoquímica. A composição química do plástico desempenha um papel crucial, uma vez que diferentes polímeros possuem distintos pontos de fusão, temperaturas de decomposição e produção de espécies gasosas específicas durante a pirólise. A temperatura e pressão operacionais do reator de gaseificação também são fatores críticos, pois afetam a termodinâmica e a cinética das reações envolvidas, influenciando a taxa de conversão e a composição do produto gasoso.

A presença de catalisadores ou agentes de craqueamento pode ser empregada para modular as reações químicas, melhorando a eficiência da conversão de plástico em gases de síntese ou produtos químicos valiosos. Ademais, parâmetros como a umidade e impurezas no plástico de alimentação têm um impacto significativo na eficiência do processo e podem gerar subprodutos indesejados. Portanto, a otimização metódica desses fatores é essencial para a maximização do desempenho e minimização dos impactos ambientais da gaseificação de plásticos (Bizzo, 2003).

2.7 EFICIÊNCIA ENERGETICA

2.7.1 Calor útil/Calor total

A eficiência energética de uma caldeira é calculada pela relação entre o calor útil e o calor total, de acordo com a expressão:

$$EFICIÊNCIA\ ENERGETICA\ (\%) = (CALOR\ UTIL / CALOR\ TOTAL) \times 100$$

- Calor útil: é representado pela energia de saída da caldeira, que pode ser medida em unidades de energia, como quilowatts (kW) ou megawatts (MW). Para uma caldeira que produz vapor, por exemplo, o calor útil pode ser a energia contida no vapor gerado (Bazzo, 1995).
- Calor total: é representado pela energia de entrada na caldeira, geralmente medida em unidades de energia, como BTUs (British Thermal Units), joules (J) ou mega joules (MJ). É a quantidade total de energia disponível no combustível que a caldeira recebe (Bazzo, 1995).

2.7.2 Energia Útil Gerada

De acordo com Saint-Martin (2005) eficiência da caldeira é geralmente definida como a razão entre a energia útil gerada na forma de vapor e a energia contida no combustível. Assumindo que o processo é adiabático, sem perdas significativas. A eficiência da caldeira (η) é dada por:

$$\eta = (\text{Energia Contida no Combustível} / \text{Energia Útil Gerada})$$

A Energia Contida no Combustível (Q) é dada pelo Poder Calorífico Inferior (PCI) do material.

$$Q = PCI$$

A Energia Útil Gerada (W) é dada pela massa de vapor produzida (m) e pela entalpia do vapor (h). Podemos usar tabelas de vapor saturado para encontrar a entalpia do vapor a temperatura de trabalho correspondente (Saint-Martin 2005):

$$W = m \cdot h$$

2.8 PAYBACK (PERÍODO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO)

O Payback é o tempo necessário para recuperar o investimento inicial em um projeto por meio dos fluxos de caixa gerados. A fórmula básica para o Payback é:

$$Payback = (\text{Fluxo de Caixa Anual} / \text{Investimento Inicial})$$

O payback é uma medida útil para avaliar a viabilidade financeira de um projeto ou investimento, pois indica o tempo necessário para recuperar o capital investido e a partir de qual momento o investimento começa a gerar lucro. No entanto, o payback não leva em consideração o valor do dinheiro no tempo, ou seja, não considera a taxa de juros ou o custo de oportunidade do capital investido. Por essa razão, outras medidas financeiras como o Valor Presente Líquido (VPL) ou a Taxa Interna de Retorno (TIR) são frequentemente utilizadas em conjunto com o payback para uma análise mais completa da viabilidade do investimento (Vanucci, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão descritas as etapas para a realização deste estudo, concretizando os resultados a partir dos temas mostrados:

- Coleta de dados da quantidade de material utilizado
- Caracterização da caldeira utilizada para estudo
- Análise das perdas na geração e rendimento calorífico do material
- Análise financeira.

3.1 COLETA DE DADOS DA QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO.

Foram coletadas amostragens de quantidade de material inserido na caldeira, durante um período de tempo, onde durante esse período totalizou-se um somatório, considerando diversos períodos, e amostragem em dias diferentes, para obter-se uma melhor diversificação do material. A coleta se deu pela pesagem do material através de balança instalada na pá carregadeira responsável pela alimentação da caldeira.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA CALDEIRA UTILIZADA PARA ESTUDO

A caracterização se deu por meio de dados do projeto fornecido pela empresa, o qual foi fornecido pelo fabricante da mesma, em que segue a normas para construção do corpo gerador pela norma ASME I/13 e qualificadas segundo norma ASTM, e fornecido uma eficiência de 84% em projeto, e capacidade de 10.000 kg de vapor de água por hora, e 1400kg

de pré-secagem de material por hora, com um custo total aproximado de R\$ 18.000.000,00 (Fabricante, CCS Industrial, 2020).

3.3 ANÁLISE DAS PERDAS NA GERAÇÃO E RENDIMENTO CALORIFICO DO MATERIAL

3.3.1 Energia Disponível a partir do Plástico

A fórmula para calcular a energia disponível a partir do plástico foi utilizada, onde multiplicamos a massa do plástico pelo seu PCI, o qual foi considerado em estudo, 1.808 kcal/kg. Esse cálculo fornece a quantidade total de energia que pode ser potencialmente extraída do plástico quando submetido ao processo de gaseificação.

A eficiência da caldeira desempenha um papel crucial na conversão dessa energia disponível em vapor utilizável. Se a eficiência da caldeira for, 84%, isso significa que apenas 84% da energia disponível será convertida em vapor. A fórmula para calcular a energia útil leva em consideração essa eficiência, sendo o produto da energia disponível pela eficiência da caldeira.

3.3.2 Conversão de Energia para Vapor

A última etapa do processo considera a conversão da energia útil em vapor. Sabendo que a energia necessária para vaporizar 1 kg de água é aproximadamente 667 kcal, a quantidade de vapor produzida é calculada dividindo a energia útil pelo PCI do vapor. Essa etapa é crucial para entender quanto vapor prático podemos esperar gerar a partir da gaseificação do plástico.

3.4 ANÁLISE FINANCEIRA

Para a análise financeira foi considerado o método de payback simples, que contou com a análise da geração de energia da caldeira em comparação com a tarifa de energia elétrica média da concessionária, sendo assim a planilha, até a data em que o projeto começa obter rendimento. Não levando em considerações manutenções e outras variáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de viabilidade técnica para a instalação de uma caldeira geradora de energia elétrica foi executado na cidade de Vargem Bonita SC. Os dados sobre valores, projeto, e eficiência, foram fornecidos pela empresa participante no estudo.

Para o cálculo comparativo da viabilidade do projeto com estudo real do caso, se considerou PCI referência de material combustível de projeto.

Energia Útil = Massa do Material x PCI do Material x Eficiência da Caldeira

Energia Útil = 1kg x 1808 x 0,84

Energia Útil = 1518 kcal/kg

Sendo 1kcal = 4184kJ

1kg de material = 6351kJ

Com essas informações e pela entalpia da água em 360°C, que é a temperatura de operação da caldeira, tem valor de 2351,78 kJ/kg.

Para tal calculamos que 1kg de material gera 6351kJ.

Substituindo os valores, temos:

$$m = (2351\text{kJ/kg}) / 6351\text{kJ}$$

$$m = 0,370\text{kg}$$

Portanto, a massa de vapor produzida seria aproximadamente 0,370 kg para cada 1 kg de combustível com PCI de 1808 kcal (Bell, 2014).

Para determinar quantos quilogramas de vapor de água são necessários para gerar 1 watt (W) de potência, usa-se a seguinte fórmula:

$$m = 1 / h$$

Onde:

- m é a massa de vapor necessária em quilogramas.
- h é a entalpia do vapor saturado em kJ/kg.

Usando a formula de energia conversão de energia calorifica para trabalho em W, temos que 1kg de material se converte em:

$$0,370\text{kg} \times 2351\text{kJ} = 869 \text{ Watts}$$

A partir do observado acima usamos a Tabela 2 que são dados obtidos a partir de aferimento da geração de energia nos inversores pós geração da turbina provenientes da caldeira em estudo.

Tabela 2 – Coleta amostras

Amostra	kg de material		kW
ANAIS – Engenharia Mecânica - UCEFF		ISSN – 2594-4649	V.7, Nº 1 - 2024/2

1	753	611,43
2	812	656,83
3	879	703,17
4	734	593,15
5	806	651,73
6	752	609,45
7	878	702,31
8	719	581,40
9	827	669,84
10	792	640,58
11	731	591,01
12	885	715,62
13	704	570,27
14	857	693,89
15	743	601,14
16	869	703,64
17	798	645,22
18	764	619,82
19	711	575,83
20	884	715,11
21	722	585,41
22	834	675,02
23	897	726,01
24	710	575,05
25	745	603,08
26	856	693,02
27	769	622,73
28	703	570,27
29	865	700,62
30	721	584,33
Total	23.720 kg	19.186,97kW

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise constitui-se da quantidade de material utilizado, usado como início do processo, e cada amostra representa o acumulado de energia produzida no período de 1 hora, com a caldeira em prévio funcionamento.

Para analisar e quantificar o poder calorífico do resíduo plástico utilizou-se a mesma metodologia, de forma reversa, onde:

$$(19186970 \text{ W}) / 2351\text{kJ} = 8161,19\text{kg} = m$$

Com 8161,19 kg de vapor gerado, resultante de 23720 kg de material se obtém-se um valor de 0,344kg de vapor para cada kg de material alimentando a caldeira, observa-se em comparação com a teoria, 1 kg de material gerava 0,370kg gramas de vapor e na pratica 1kg consegue gerar 0,92% do teórico em projeto.

Algumas das causas possíveis da divergência do projeto com a eficiência dada em estudo são fatores climáticos, como temperatura ambiente, umidade do material em aterro.

Assim, alterando a eficiência da geração de energia, ocasionando diferença no tempo de pagamento do projeto.

O qual para o mesmo foi utilizado com fonte o custo do projeto total para empresa, bem como, a referencia da distribuidora de energia, e o custo médio do kWh.

Para isso considera-se uma produção media de 639,56 kwh, sendo que a caldeira não estava em operação a 100% da capacidade. A qual pode ser operada com até 1400kg/h de material combustível, devido à limitações físicas. Também se assim considerando-se payback em 3 variáveis:

1. Regime 100% e poder calorifico teórico
2. Regime 100% e poder calorifico calculado
3. Regime atual de trabalho com média de 790kg/h

Considerou-se para regime 1:

$$1400 \times 0,370 \times 2351 \times 24h \times 120d = 3.507.315,84 \text{ kW}$$

Considerou-se para regime 2:

$$1400 \times 0,344 \times 2351 \times 24h \times 120d = 3.260.855,80 \text{ kW}$$

Considerou-se para regime 3:

$$790 \times 0,344 \times 2351 \times 24h \times 120d = 1.840.054,35 \text{ kW}$$

O cálculo é feito a partir de uma tabela analisando o período de 15 trimestres considerando um reajuste da tarifa de energia anual de 6%. Onde se define a remuneração sendo o múltiplo do gerado pelo valor da tarifa da concessionária (CELESC-SC).

Tabela 3 - Regime 1.

Período	Tarifa com reajuste anual	Remuneração	Fluxo de caixa
0			-R\$ 18.000.000,00
1	R\$ 0,70	2.455.121,09	-R\$ 15.544.878,91
2	R\$ 0,74	2.602.428,35	-R\$ 12.942.450,56
3	R\$ 0,79	2.758.574,05	-R\$ 10.183.876,50
4	R\$ 0,83	2.924.088,50	-R\$ 7.259.788,01
5	R\$ 0,88	3.099.533,81	-R\$ 4.160.254,20
6	R\$ 0,94	3.285.505,84	-R\$ 874.748,36
7	R\$ 0,99	3.482.636,19	R\$ 2.607.887,82
8	R\$ 1,05	3.691.594,36	R\$ 6.299.482,18
9	R\$ 1,12	3.913.090,02	R\$ 10.212.572,20
10	R\$ 1,18	4.147.875,42	R\$ 14.360.447,62
11	R\$ 1,25	4.396.747,95	R\$ 18.757.195,56
12	R\$ 1,33	4.660.552,82	R\$ 23.417.748,39
13	R\$ 1,41	4.940.185,99	R\$ 28.357.934,38
14	R\$ 1,49	5.236.597,15	R\$ 33.594.531,53
15	R\$ 1,58	5.550.792,98	R\$ 39.145.324,51

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4 - Regime 2.

Período	Tarifa com reajuste anual	Remuneração	Fluxo de caixa
0			-R\$ 18.000.000,00
1	R\$ 0,70	2.282.599,06	-R\$ 15.717.400,94
2	R\$ 0,74	2.602.428,35	-R\$ 13.114.972,59
3	R\$ 0,79	2.758.574,05	-R\$ 10.356.398,53
4	R\$ 0,83	2.924.088,50	-R\$ 7.432.310,03
5	R\$ 0,88	3.099.533,81	-R\$ 4.332.776,23
6	R\$ 0,94	3.285.505,84	-R\$ 1.047.270,39
7	R\$ 0,99	3.482.636,19	R\$ 2.435.365,80
8	R\$ 1,05	3.691.594,36	R\$ 6.126.960,15
9	R\$ 1,12	3.913.090,02	R\$ 10.040.050,17
10	R\$ 1,18	4.147.875,42	R\$ 14.187.925,59
11	R\$ 1,25	4.396.747,95	R\$ 18.584.673,54
12	R\$ 1,33	4.660.552,82	R\$ 23.245.226,36
13	R\$ 1,41	4.940.185,99	R\$ 28.185.412,35
14	R\$ 1,49	5.236.597,15	R\$ 33.422.009,50
15	R\$ 1,58	5.550.792,98	R\$ 38.972.802,48

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 5 - Regime 3.

Período	Tarifa com reajuste anual	Remuneração	Fluxo de caixa
0			-R\$ 18.000.000,00
1	R\$ 0,70	1.288.038,05	-R\$ 16.711.961,96
2	R\$ 0,74	2.602.428,35	-R\$ 14.109.533,60
3	R\$ 0,79	2.758.574,05	-R\$ 11.350.959,55
4	R\$ 0,83	2.924.088,50	-R\$ 8.426.871,05
5	R\$ 0,88	3.099.533,81	-R\$ 5.327.337,24
6	R\$ 0,94	3.285.505,84	-R\$ 2.041.831,41
7	R\$ 0,99	3.482.636,19	R\$ 1.440.804,78
8	R\$ 1,05	3.691.594,36	R\$ 5.132.399,14
9	R\$ 1,12	3.913.090,02	R\$ 9.045.489,16
10	R\$ 1,18	4.147.875,42	R\$ 13.193.364,58
11	R\$ 1,25	4.396.747,95	R\$ 17.590.112,52
12	R\$ 1,33	4.660.552,82	R\$ 22.250.665,34
13	R\$ 1,41	4.940.185,99	R\$ 27.190.851,33
14	R\$ 1,49	5.236.597,15	R\$ 32.427.448,49
15	R\$ 1,58	5.550.792,98	R\$ 37.978.241,47

Fonte: Dados da pesquisa.

Para estudo de caso observa-se que em todos os casos a partir do 7º trimestre o custo de investimento começa a ter retorno. Observa-se que os os custos de operação de uma caldeira podem variar significativamente dependendo de diversos fatores, incluindo o tipo de combustível utilizado, eficiência da caldeira, custos locais de energia, manutenção e outros custos associados. Abaixo estão alguns dos principais componentes que podem influenciar os custos de operação de uma caldeira:

Manutenção: custos associados à manutenção preventiva e corretiva da caldeira. A manutenção regular pode melhorar a eficiência e prolongar a vida útil da caldeira.

Operação e Monitoramento: custos associados à operação diária da caldeira, incluindo mão de obra, supervisão, monitoramento, e despesas com controle de processos.

Tratamento de Água: caldeiras requerem tratamento de água adequado para prevenir depósitos e corrosão. Os produtos químicos utilizados para o tratamento têm custos associados.

Custos de Capital e Financiamento: se a caldeira foi adquirida com financiamento, os custos associados ao pagamento do empréstimo ou ao retorno sobre o investimento podem ser considerados.

Descarte de Resíduos: se o combustível ou a operação da caldeira gerar resíduos, os custos associados ao seu descarte podem ser relevantes.

Regulamentações e Conformidade: relacionados ao cumprimento de regulamentações ambientais e normas de segurança (Campos Botelho et al., 2015).

Algumas outras questões devem ser levadas em conta, como valor de mercado se vendido usado, também para uma análise detalhada do payback, analisa-se caso a caso o investimento. Neste caso em específico, observa-se a indicação de um estudo detalhado econômico, envolvendo parte de gestão e economia, pois a empresa trabalha com capital aberto, e venda de créditos de carbono, o qual a implementação teve algum impacto sobre tais áreas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a reutilização de resíduos plásticos, especialmente através da gaseificação em caldeiras, desponta como uma alternativa altamente promissora para enfrentar os desafios ambientais decorrentes do descarte inadequado desses materiais. Nessa análise econômica, embora reconheça obstáculos operacionais e climáticos, aponta para a potencial viabilidade financeira a longo prazo desse projeto. Destaca a importância de otimizar os processos envolvidos na gaseificação de polímeros reciclados, trazendo benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos, alinhando-se aos princípios da economia circular e do uso eficiente de recursos.

É crucial salientar que, embora o estudo ofereça uma visão superficial sobre a viabilidade econômica e eficiência no aproveitamento de resíduos de polímeros em caldeiras para geração de energia, se reconhece que uma abordagem mais abrangente pode ser necessária para compreender todos os aspectos econômicos envolvidos. No entanto, já se visualiza que a utilização de resíduos plásticos como fonte de energia, tanto em ambientes industriais quanto na gestão de resíduos urbanos, apresenta-se como uma proposta promissora. Acreditamos que, com uma melhor separação e armazenamento, não apenas ampliamos o alcance dessas práticas

sustentáveis, mas também maximizamos o retorno sobre o investimento, tornando o ciclo de vida dos plásticos verdadeiramente circular e economicamente vantajoso.

REFERÊNCIAS

AIRES, Raquel Dias et al. Pirólise. In: **III fórum de estudos contábeis**, 2003, Rio Claro, S.P. Disponível em: <http://www.observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-cientificas/pirolise.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023

BAZZO, E. **Geração de Vapor** / Edson Bazzo. 2 ed. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 216 p.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**. 3. ed. [S.l.]: Interciência, 2003. p. 37-37.

BELL, I. H. et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial and Engineering*

BIDONE, Ricardo Figueira. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso central de resíduos do recreio, em minas do leão/rs**. 2. ed. [S. L.]: Editora Blucher, 2017. 157 p.

BIZZO, W.A. Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor. Unicamp, 2003.

BRIDGWATER, A.V. (2012) Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. **Biomass Bioenergy**, p 38.

CAMPOS BOTELHO, Manuel Henrique et al. Operação de caldeiras: **gerenciamento controle e manutenção**. 2. ed. [S. l.]: Blucher, 2015. 102 p.

CELESC – SC. Concessionaria de energia do estado de Santa Catarina. <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>. Acesso em: 10/2023.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CORTEZ, L. A., LORA E. S., ALYARZA, J. A. C. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, 2008.

KIRSCH, L. **Handbook of biomass combustion and co-firing**. Taylor & Francis Group, 2014.

MEIRA, Ademar Alves de et al. **Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados**. *Custos e agronegócio*, Pato Branco, v. 9, n. 4, p.162-180, 17 dez. 2013.

OLIVEIRA, Luciana Simões et al. **o uso da gaseificação de biomassa como energia renovável**: uma revisão bibliográfica das motivações e aplicações. 2017. 5 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Sergipe Ufs, São Cristóvão Se, 2017

OLIVEIRA, C. B. R. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil**. 2012. 91 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PESSOA FILHO, José Silvío. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

SMITH, J. M., Van Ness, H. C. e Abbott, M. M., **Introdução à termodinâmica da engenharia química**, 7a Ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2007.

VANUCCI, Luiz Roberto. **Matemática financeira e engenharia econômica**: Princípios e aplicações. Brasil: Editora Blucher, 2017. p 321.

YIN, C.; KÆR, S. K.; ROSENDAHL, L.; HVID, S. L. Co-firing straw with coal in a swirl-stabilized dual-feed burner: Modelling and experimental validation. *Bioresource Technology*. v. 101. n. 11. p. 4169–4178. 2010.