

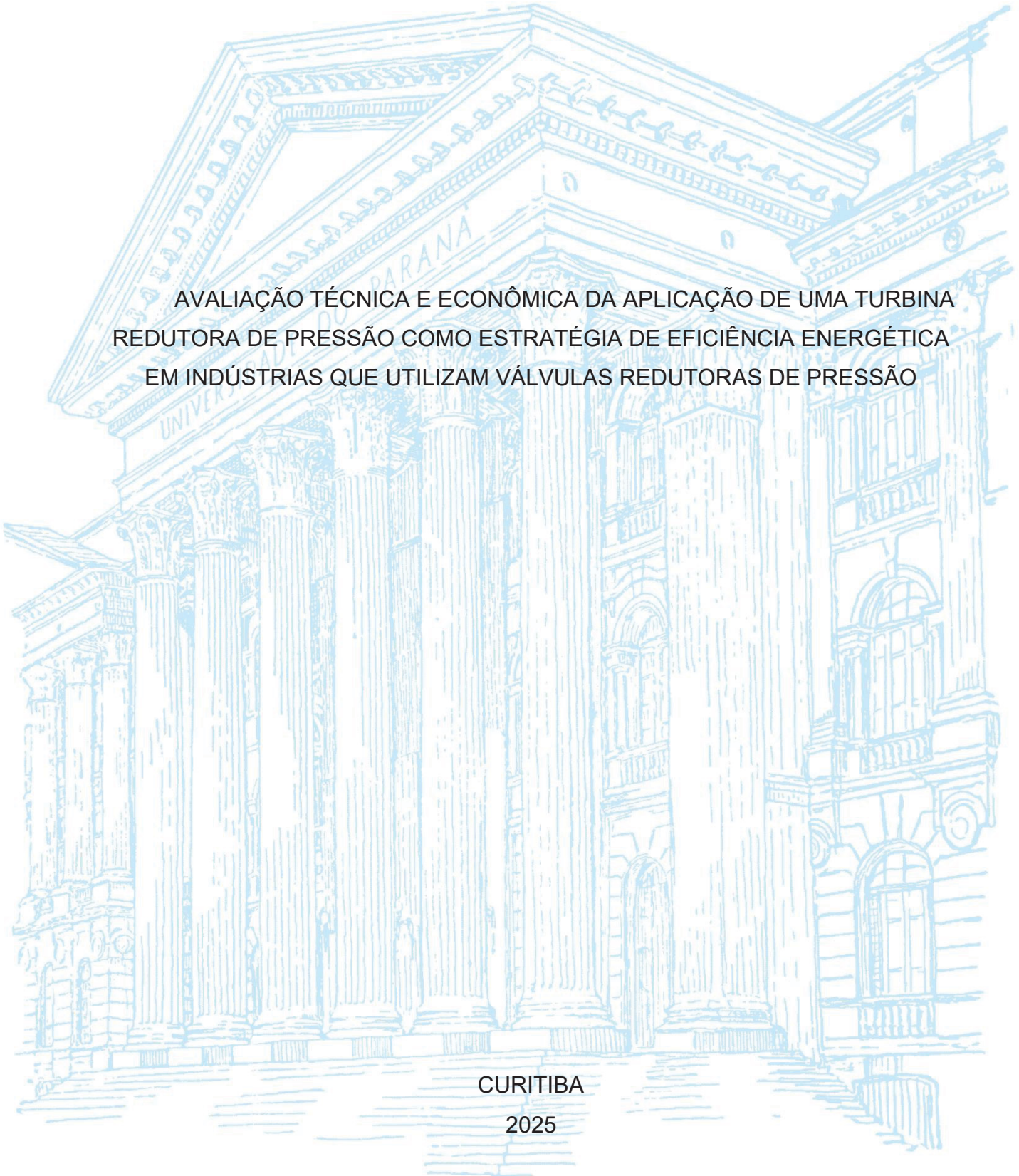
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÁRIO VINÍCIUS TOREGIANI

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE UMA TURBINA
REDUTORA DE PRESSÃO COMO ESTRATÉGIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM INDÚSTRIAS QUE UTILIZAM VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

CURITIBA

2025



MÁRIO VINÍCIUS TOREGIANI

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE UMA TURBINA
REDUTORA DE PRESSÃO COMO ESTRATÉGIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM INDÚSTRIAS QUE UTILIZAM VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista, Curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. MSc. Rafael Gentilini

Coorientador: Prof. Dr. João da Silva Dias

CURITIBA

2025

RESUMO

No contexto da busca por eficiência energética, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da instalação de uma turbina redutora de pressão (TRP) em paralelo à válvula redutora de pressão (VRP), utilizadas em processos industriais que operam com vapor saturado. A proposta busca recuperar parte da energia na etapa de redução de pressão, convertendo-a em energia elétrica, sem comprometer o fornecimento de vapor ao processo final. O estudo foi desenvolvido com base em um caso real de uma indústria alimentícia localizada no estado do Paraná, Brasil, que utiliza VRPs para redução de pressão em diferentes etapas do processo produtivo. A análise envolveu o levantamento de dados operacionais, simulação termodinâmica e projeções econômico-financeiras. Os resultados indicaram que o projeto de implantação da TRP é economicamente viável, apresentando um VPL de R\$6,74 milhões, uma TIR de 42% e *payback* descontado de 3,56 anos. Adicionalmente, a análise de sensibilidade demonstrou que o custo da energia elétrica é a variável de maior influência sobre a atratividade do projeto, dentre as variáveis consideradas. Conclui-se que a utilização de turbinas em paralelo às VRPs representa uma alternativa promissora para a cogeração de energia em plantas industriais, promovendo sustentabilidade, economia e eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência energética; Turbina de contrapressão; Válvula redutora de pressão; Geração de energia; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

In the context of the pursuit of energy efficiency, this study aims to evaluate the technical and economic feasibility of installing a backpressure turbine (BPT) in parallel with a pressure reducing valve (PRV), used in industrial processes that operate with saturated steam. The proposal seeks to recover part of the energy dissipated during the pressure reduction stage, converting it into electrical energy, without compromising the steam supply to the end-use process. The study was based on a real case in a food industry located in the state of Paraná, Brazil, which uses PRVs to reduce steam pressure in different stages of its production process. The analysis involved the collection of operational data, thermodynamic simulation, and economic-financial projections. The results indicated that the implementation of the BPT is economically viable, with a Net Present Value (NPV) of BRL 6.74 million, an Internal Rate of Return (IRR) of 42%, and a discounted payback period of 3.56 years. Additionally, the sensitivity analysis showed that the electricity cost is the most influential variable on the project's attractiveness among those considered. The conclusion is that the use of a turbine in parallel with PRVs represents a promising alternative for energy cogeneration in industrial plants, promoting sustainability, cost savings, and energy efficiency.

Keywords: Energy efficiency; Backpressure turbine; Pressure reducing valve; Power generation; Economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DIAGRAMA ($h - s$) PARA ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE	30
FIGURA 2 - CONCEITO DE COGERAÇÃO.....	34
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO.....	40
FIGURA 4 – VAZÃO MÉDIA DIÁRIA DE VAPOR.....	41
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA COM INSTALAÇÃO DA TRP.....	43
FIGURA 6 – VOLUME DE CONTROLE NA TRP.....	46
FIGURA 7 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (VPL).....	53
FIGURA 8 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (TIR).....	53
FIGURA 9 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (PAYBACK DESCONTADO)	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES NA ENTRADA VRP-2.....	44
TABELA 2 – PROPRIEDADES NA SAÍDA VRP-2.....	45
TABELA 3 – PROPRIEDADES NA SAÍDA TRP	46
TABELA 4 – FLUXO DE CAIXA PARA OS 2 PRIMEIROS ANOS	48
TABELA 5 – ÍNDICES DE VIABILIDADE	49
TABELA 6 – VARIAÇÃO VALORES	50
TABELA 7 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO A VAZÃO	51
TABELA 8 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO O CUSTO ENERGIA	51
TABELA 9 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO O CUSTO COMBUSTÍVEL.....	52
TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO	59

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FC	Fluxo de Caixa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
NR	Norma Regulamentadora
PCI	Poder Calorífico Inferior
PROCEL	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
SI	Sistema Internacional
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRP	Turbina Redutora de Pressão
VPL	Valor Presente Líquido
VRP	Válvula Redutora de Pressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 A UTILIZAÇÃO DO VAPOR NA INDÚSTRIA	19
2.2 PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA	20
2.2.1 Pressão	20
2.2.2 Temperatura.....	21
2.2.3 Energia	21
2.2.4 Calor.....	22
2.2.5 Trabalho	23
2.2.6 Primeira lei da termodinâmica	23
2.2.7 Entalpia	25
2.2.8 Análise de energia em sistemas sob regime permanente	26
2.2.9 Entropia.....	27
2.2.10 Exergia	30
2.3 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO	31
2.4 TURBINAS A VAPOR	32
2.5 COGERAÇÃO E O USO DE TURBINA EM PARALELO À VÁLVULAS REDUTORAS.....	32
2.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	35
2.6.1 Payback simples	36
2.6.2 Payback descontado	36
2.6.3 Valor presente líquido (VPL)	36
2.6.4 Taxa interna de retorno (TIR)	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	38
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
4 ANÁLISE	40

4.1 SELEÇÃO DA EMPRESA.....	40
4.2 ANÁLISE TÉCNICA	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1 ANÁLISE TERMODINÂMICA NA VRP-2	44
5.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA CONSIDERANDO A TRP	45
5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE	47
5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE 1 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO	59

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por eficiência energética e redução de desperdícios tem sido um tema relevante para indústrias de diversos setores. A crescente preocupação com sustentabilidade e o aumento da competitividade, aliada ao aumento dos custos energéticos e que os recursos energéticos do mundo são limitados, tem impulsionado a adoção de tecnologias para melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Entre as diversas oportunidades de otimização energética, um aspecto frequentemente negligenciado é a perda de energia térmica em processos que utilizam válvulas redutoras de pressão (VRP) para controle da distribuição de vapor.

O vapor saturado é amplamente empregado em processos industriais devido à sua alta capacidade de transferência de calor e facilidade de transporte (PROCEL, 2005). Entretanto, em muitas aplicações do processo industrial, a pressão do vapor precisa ser reduzida antes de sua utilização. Esse processo, normalmente realizado por meio de válvulas redutoras de pressão, gera uma dissipação de energia que poderia ser convertida em eletricidade. Uma alternativa para minimizar essas perdas é a instalação de uma turbina redutora de pressão (TRP), que permitem a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético na redução de pressão do vapor.

Diante desse cenário, este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma TRP em paralelo às válvulas redutoras de pressão. A adoção desse sistema pode trazer benefícios como redução de custos operacionais, maior eficiência energética e até mesmo na contribuição para os processos de certificação de selos verdes, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e competitividade industrial (MOREIRA, 2021).

1.1 JUSTIFICATIVA

A motivação para este estudo surge da necessidade crescente das indústrias em reduzir custos energéticos e melhorar sua eficiência operacional. Atualmente, muitas empresas desconhecem o potencial de aproveitamento energético das suas operações, especialmente em processos térmicos que necessitam utilizar rebaixamento da pressão de vapor. A implementação de um sistema de recuperação de energia, como a TRP, poderia não apenas reduzir o desperdício, mas também

agregar valor econômico ao processo industrial, tornando a operação mais sustentável e competitiva.

Além disso, a geração de eletricidade a partir da recuperação de energia térmica pode contribuir na obtenção de selos verdes, como a política de créditos de carbono, agregando benefícios financeiros e ambientais à indústria. Dessa forma, este estudo se justifica pela possibilidade de demonstrar a viabilidade de uma solução de recuperação de energia que alia eficiência energética, redução de custos e impacto ambiental positivo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

No contexto da busca por eficiência energética, este projeto tem como objetivo avaliar, por meio de um estudo de caso, a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma turbina redutora de pressão de vapor saturado instalada em paralelo a uma válvula redutora de pressão convencional, amplamente utilizada em ambientes industriais que exigem um rebaixamento de pressão entre a fonte geradora e o ponto de consumo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) quantificar a energia desperdiçada pela VRP na redução de pressão do vapor saturado no processo industrial selecionado;
- b) estimar os custos de implantação e operação de uma turbina redutora de pressão em paralelo à válvula redutora de pressão;
- c) simular e avaliar cenários de aplicação do sistema através de análise de sensibilidade, avaliando os impactos técnicos e econômicos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos principais, além das seções preliminares e dos Anexos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, abordando o contexto energético industrial, a motivação para o estudo, o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa, bem como esta descrição da estrutura adotada no desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo traz a fundamentação teórica necessária para compreensão dos conceitos abordados. São tratados temas como o uso do vapor na indústria, princípios básicos da termodinâmica, funcionamento das válvulas redutoras de pressão e das turbinas a vapor, conceitos de cogeração, além dos métodos utilizados para análise de viabilidade econômica de projetos.

No terceiro capítulo, são descritos os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, caracterizando o tipo de estudo, a abordagem de dados, os critérios de seleção da empresa analisada, bem como os métodos de coleta, análise técnica e avaliação econômica.

O quarto capítulo apresenta a análise técnica do sistema de vapor da empresa estudada. São discutidas as condições operacionais da planta, as propriedades termodinâmicas envolvidas e a proposta de instalação da TRP em paralelo à VRP.

O quinto capítulo reúne os resultados obtidos e as discussões pertinentes. Inclui a análise termodinâmica detalhada, a estimativa da energia recuperável, os custos envolvidos, os indicadores de viabilidade e a análise de sensibilidade frente a variáveis econômicas e operacionais.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, com base nas conclusões obtidas ao longo da pesquisa, além de recomendações para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma sintética, os conceitos teóricos e fundamentos técnicos necessários para a compreensão do estudo desenvolvido. Inicialmente, são abordados temas relacionados à utilização do vapor na indústria, seguidos pelos princípios fundamentais da termodinâmica, que sustentam a análise energética realizada. Nesta seção, são definidas as propriedades termodinâmicas básicas, além dos aspectos da primeira lei da termodinâmica e da análise de energia em sistemas sob regime permanente.

Na sequência, apresentam-se os principais equipamentos e tecnologias diretamente relacionados ao estudo e como estes podem ser correlacionados dentro do conceito de cogeração. Por fim, são descritos os critérios e indicadores empregados na análise de viabilidade econômica da solução proposta, entre eles o payback (simples e descontado), o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR).

2.1 A UTILIZAÇÃO DO VAPOR NA INDÚSTRIA

Conforme explica Filho (2014), o setor industrial utiliza basicamente três formas de energia: energia elétrica, aquecimento direto e o vapor. Em termos globais, estima-se que a demanda energética no setor industrial se distribui da seguinte forma: eletricidade (19%), combustível (47%) e vapor (34%). A energia elétrica é utilizada para acionamento de motores, iluminação, processos eletroquímicos e térmicos e alimentação de sistemas eletrônicos. O aquecimento direto utiliza-se de fornos, fornalhas ou aquecedores que se valem da queima de combustíveis. Por fim, o vapor é produzido em geradores de vapor ou em caldeiras.

De acordo com a NR-13 (2022), uma caldeira é um equipamento destinado a produzir e acumular vapor sob pressão maior que a atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. O gerador de vapor, apesar de possuir a mesma finalidade, distingue-se da caldeira pelo fato de que não há acúmulo de vapor no interior do equipamento e não se aplica os códigos de vaso de pressão em seu dimensionamento.

Segundo explica Barros, Borelli e Gedra (2015) esses equipamentos possuem o papel de gerar calor a partir de uma fonte primária de energia, que por sua vez

transfere energia para um fluido, geralmente água, com o propósito de que ele evapore, produzindo assim o vapor. Quanto às fontes primárias pode ser utilizados uma gama grande de combustíveis renováveis ou não.

Barros, Borelli e Gedra (2015) citam vários benefícios da utilização do vapor: aquecimento rápido e uniforme, elevado coeficiente de transferência térmica e facilidade no transporte. Ainda, há uma aplicação vasta em diversos segmentos de indústrias tais como: alimentos, bebidas, têxtil, química, papel e celulose, entre outras. Entre as aplicações do vapor destaca-se: movimentação de máquinas, aquecimento, atividades de limpeza e esterilização.

2.2 PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos técnicos relativos à disciplina de termodinâmica que se faz necessário para compreender a evolução do trabalho.

2.2.1 Pressão

Borgnakke e Sonntag (2018) definem pressão como a componente normal da força por unidade de área. Ainda, pode-se dizer que a pressão em um ponto de um fluido em repouso será a mesma em todas as direções e é dada pela equação (1):

$$P = \lim_{\partial A \rightarrow \partial A'} \frac{\partial F_n}{\partial A} \quad (1)$$

onde:

P = pressão [N/m²];

∂F_n = componente normal da força [N];

∂A = uma área pequena [m²];

$\partial A'$ = menor área para a qual existe um valor definido da razão [m²].

A unidade de pressão pelo Sistema Internacional (SI) é o pascal e corresponde à força de 1 newton agindo em uma área de um metro quadrado, conforme mostra a equação (2):

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \quad (2)$$

O *bar* é uma unidade que não faz parte do SI, porém, é utilizado em larga escala no meio industrial. Inclusive, essa será a escala utilizada neste trabalho e a relação entre *bar* e *pascal* é dada pela equação (3):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} \quad (3)$$

2.2.2 Temperatura

De acordo com Incropera (2008), a temperatura em nível microscópico, é definida como a energia associada ao movimento de translação aleatório, assim como os movimentos internos de rotação e de vibração das moléculas. Segundo Filho (2020), a temperatura é a propriedade que indica se há equilíbrio térmico entre um sistema e seu entorno. Esse equilíbrio ocorre quando, após um longo período de contato por meio de uma superfície que permita a transferência de calor, não há mais troca de energia térmica entre as partes envolvidas.

Esta definição é a formulação da lei zero da termodinâmica, que diz: se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, eles também estão em equilíbrio térmico entre si. A igualdade de temperatura é a única exigência para o equilíbrio térmico (ÇENGEL e BOLES, 2013).

2.2.3 Energia

Borgnakke e Sonntag (2018) definem que uma massa macroscópica pode possuir energia na forma de energia interna, inerente a sua estrutura interna, energia cinética, em decorrência de seu movimento e energia potencial, associadas às forças externas que atuam sobre ela. A energia total pode ser escrita conforme equação (4):

$$E = U + EC + EP \quad (4)$$

onde:

E = energia total [kJ];

U = energia interna [kJ];

EC = energia cinética [kJ];

EP = energia potencial [kJ].

A energia total de um sistema com base em uma unidade de massa é indicada pela equação (5):

$$e = \frac{E}{m} = u + ec + ep = u + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (5)$$

onde:

e = energia total específica [kJ/kg];

m = massa do sistema [kg];

u = energia interna específica [kJ/kg];

ec = energia cinética específica [kJ/kg];

ep = energia potencial específica [kJ/kg];

V = velocidade do sistema em relação a um referencial fixo [m/s];

g = aceleração gravitacional [m/s²];

z = elevação do centro de gravidade do sistema em relação a algum nível de referência escolhido arbitrariamente [kJ/kg].

2.2.4 Calor

Calor é definido como a forma de energia transferida entre dois sistemas (ou entre um sistema e sua vizinhança) em virtude da diferença de temperaturas. Em outras palavras, somente haverá transferência de calor entre dois sistemas que não estejam na mesma temperatura. Ainda, calor é energia em trânsito, ou seja, transferência de calor (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A transferência de calor por unidade de massa de um sistema é expressa pela equação (6):

$$q = \frac{Q}{m} \quad (6)$$

onde:

q = transferência de calor por unidade de massa [kJ/kg];

Q = quantidade de calor transferida [kJ/kg];

m = massa do sistema [kg].

Por convenção formal de sinais, define-se que a transferência de calor para um sistema é positivo enquanto a transferência de calor de um sistema é negativo.

2.2.5 Trabalho

Çengel e Boles (2013) definem que trabalho é a transferência de energia associada a uma força que age ao longo de uma distância. Da mesma forma que o calor, o trabalho é uma forma de transferência de energia entre um sistema e sua vizinhança.

O trabalho realizado por unidade de massa de um sistema é expresso pela equação (7):

$$w = \frac{W}{m} \quad (7)$$

onde:

w = trabalho realizado por unidade de massa [kJ/kg];

W = trabalho realizado [kJ];

m = massa do sistema [kg].

O trabalho realizado por unidade de tempo é chamado de potência e é indicado como \dot{W} e a unidade de potência é kJ/s ou kW.

Por convenção formal de sinais, define-se que o trabalho realizado por um sistema é positivo enquanto o trabalho realizado sobre um sistema é negativo.

2.2.6 Primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação da energia, enuncia que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; ela pode apenas mudar de forma (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Com isso, surge o termo balanço de energia que é expresso pela equação (8):

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sistema} \quad (8)$$

onde:

E_{ent} = energia total entrando no sistema [kJ];

E_{sai} = energia total saindo do sistema [kJ];

$\Delta E_{sistema}$ = variação de energia do sistema [kJ].

Conforme explica Çengel e Boles (2013), a energia pode ser transferida para ou de um sistema sob três formas: calor, trabalho e fluxo de massa. As duas primeiras formas já foram definidas em seções anteriores. O fluxo de massa correlaciona-se com a energia do sistema: quando há entrada de massa, a energia aumenta; inversamente, quando há saída, a energia diminui, pois a massa que sai leva consigo uma quantidade de energia. Com isso a equação (8) pode ser reescrita originando a equação (9):

$$\Delta E_{sistema} = (Q_{ent} - Q_{sai}) + (W_{ent} - W_{sai}) + (E_{massa_{ent}} - E_{massa_{sai}}) \quad (9)$$

onde:

Q_{ent} = quantidade de calor transferida para o sistema [kJ];

Q_{sai} = quantidade de calor retirada do sistema [kJ];

W_{ent} = quantidade de trabalho realizado sobre um sistema [kJ];

W_{sai} = quantidade de trabalho realizado por um sistema [kJ];

$E_{massa_{ent}}$ = energia em virtude do fluxo mássico entrando no sistema [kJ];

$E_{massa_{sai}}$ = energia em virtude do fluxo mássico saindo do sistema [kJ].

Para sistemas adiabáticos o calor transferido Q é zero, o trabalho realizado W é zero para sistemas que não envolvem interações de trabalho e nos sistemas que não há escoamento através de suas fronteiras (sistemas fechados) a energia transportada com a massa E_{massa} é zero (ÇENGEL E BOLES, 2013).

A equação (8) também pode ser escrita em forma de taxa originando a equação (10):

$$E_{ent}^{\cdot} - E_{sai}^{\cdot} = \frac{dE_{sistema}}{dt} \quad (10)$$

Para um sistema fechado executando um ciclo, os estados inicial e final são idênticos e, portanto, a variação de energia do sistema ($\Delta E_{sistema}$) é igual a zero. Assim, o ciclo de um sistema pode ser simplificado como mostra a equação (11):

$$E_{ent}^{\cdot} = E_{sai}^{\cdot} \quad (11)$$

Considerando que em um sistema fechado não envolve nenhum fluxo de

massa através de suas fronteiras, o balanço de energia de um ciclo pode ser expresso em termos de interações de calor e trabalho como mostra a equação (12):

$$W_{liq_{sai}} = Q_{liq_{entra}} \quad (12)$$

ou seja, o trabalho líquido que sai ($W_{liq_{sai}}$) é igual ao calor líquido que entra ($Q_{liq_{entra}}$).

2.2.7 Entalpia

A entalpia é a combinação de outras propriedades conforme descrito pela equação (13):

$$h = u + Pv \quad (13)$$

onde:

h = entalpia [kJ/kg];

u = energia interna específica [kJ];

P = pressão do sistema [kPa];

v = volume específico do sistema [m³/kg].

Çengel e Boles (2013) definem que a parcela Pv da equação (13) representa o trabalho de fluxo por unidade de massa e traduz a quantidade de trabalho necessária para empurrar a massa para dentro ou para fora do volume de controle. Esta energia de escoamento faz-se necessária para a manutenção de um escoamento contínuo através do volume de controle.

Com isso, a energia total por unidade de massa (θ) de um fluido escoando é dado pela equação (14):

$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ec + ep) \quad (14)$$

Juntando-se a equação (13) com a (14) chega-se na equação (15):

$$\theta = h + ec + ep = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (15)$$

Na equação (15) a entalpia (h) substitui a energia interna (u) para representar um fluido em escoamento e não se faz necessário preocupar com o trabalho de fluxo. Em outras palavras, a entalpia leva em conta automaticamente a energia necessária para empurrar o fluido para dentro ou para fora do volume de controle (ÇENGEL E BOLES, 2013).

2.2.8 Análise de energia em sistemas sob regime permanente

Sistemas que estão sob regime permanente é um sistema cujas propriedades do fluido podem mudar de um ponto para outro dentro do volume de controle, mas em qualquer ponto fixo elas permanecem constantes durante todo o processo. Em outras palavras, regime permanente significa sem variação no tempo (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Ainda de acordo com Çengel e Boles (2013), durante um regime permanente nenhuma propriedade dentro do volume de controle muda com o tempo. Assim, o volume, a massa e o conteúdo de energia total (E) do volume de controle permanecem constantes. Logo, o trabalho de fronteira é nulo e a massa ou a energia que entra no volume de controle deve ser igual à massa ou à energia que sai.

Considerando, portanto, que a energia pode ser transferida apenas por calor, trabalho e fluxo de massa, o balanço de energia pode ser escrito conforme equação (16):

$$Q_{ent} + W_{ent} + \sum_{ent} \dot{m}\theta = Q_{sai} + W_{sai} + \sum_{sai} \dot{m}\theta \quad (16)$$

onde:

\dot{m} = quantidade de massa que escoar através de uma seção transversal de área por unidade de tempo, denominada vazão mássica [kg/s].

Substituindo o termo da energia total por unidade de massa (θ), representado pela equação (15), na equação (16), chega-se na equação (17):

$$Q_{ent} + W_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = Q_{sai} + W_{sai} + \sum_{sai} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (17)$$

2.2.9 Entropia

Çengel e Boles (2013) definem a entropia de um sistema, também chamada de entropia total, como uma propriedade extensiva, ou seja, aquela que dependem do tamanho ou extensão do sistema. Em contrapartida, a entropia específica (s), que representa a entropia por unidade de massa, é uma propriedade intensiva, ou seja, independente da massa de um sistema, e é expressa em unidades de [kJ/kg.K]. Essa propriedade termodinâmica, descoberta por Clausius em 1865, é descrita pela equação (18):

$$dS = \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_{int rev} \quad (18)$$

onde:

dS = diferencial de entropia [kJ/K];

∂Q = quantidade de calor transferido entre o sistema e a vizinhança [kJ];

T = temperatura termodinâmica na fronteira [K];

$int rev$ = indica que o processo é internamente reversível.

Um processo internamente reversível é aquele que não atua nenhum fator que o leve a ser considerado irreversível. Os fatores são: atrito, expansão não resistida, mistura de dois fluidos, transferência de calor com uma diferença de temperatura finita, resistência elétrica, deformação inelástica de sólidos e reações químicas (ÇENGEL E BOLES, 2013).

A variação da entropia de um sistema durante um processo pode ser determinada pela integração da equação (18) entre os estados inicial e final resultando na equação (19):

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_{int rev} \quad (19)$$

Se for considerado um ciclo formado por dois processos: o processo 1-2, que é arbitrário (reversível ou irreversível), e o processo 2-1, que é internamente reversível. Partindo-se da desigualdade de Clausius, chega-se na equação (20):

$$\int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right) + \int_2^1 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_{int rev} \leq 0 \quad (20)$$

substituindo a equação (19) na equação (20) chega-se na equação (21):

$$\int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right) + S_2 - S_1 \leq 0 \quad (21)$$

a qual pode ser reescrita como:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right) \quad (22)$$

que reescrita na forma diferencial chega-se na equação (23):

$$S_2 - S_1 \geq \frac{\partial Q}{T} \quad (23)$$

onde vale a igualdade para um processo internamente reversível e a desigualdade para um processo irreversível. Ou seja, a variação de entropia de um sistema fechado durante um processo irreversível é maior que a integral $\partial Q/T$ avaliada para esse processo. E, para um processo reversível, esses dois valores tornam-se iguais (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Çengel e Boles (2013) explicam que o sinal de desigualdade das relações anteriores é uma lembrança constante de que a variação da entropia de um sistema fechado durante um processo irreversível é sempre maior que a transferência de entropia. Ou seja, a entropia é gerada ou criada durante um processo irreversível, e essa geração deve-se totalmente à presença de irreversibilidades. A entropia gerada durante um processo é chamada de geração de entropia (S_{ger}). Com isso define-se a equação (24):

$$\Delta S_{sistema} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + S_{ger} \quad (24)$$

onde a geração de entropia é sempre uma quantidade nula ou positiva. E como o valor depende do processo, não é uma propriedade do sistema. Ainda, essa equação pode gerar algumas interpretações importantes: a entropia de um sistema isolado durante um processo sempre aumenta ou, no caso limite de um processo reversível,

permanece constante. Ou seja, ela nunca diminui e isso é conhecido como o princípio do aumento da entropia.

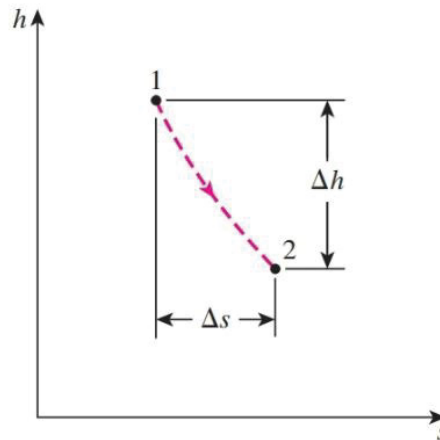
O desempenho de sistemas de engenharia é degradado pela presença de irreversibilidades, e a geração de entropia é uma medida das magnitudes das irreversibilidades presentes durante um processo. Quanto mais graves forem as irreversibilidades, maior será a geração de entropia. Assim, a geração de entropia pode ser usada como uma medida quantitativa das irreversibilidades associadas a um processo (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Um processo isentrópico é aquele cuja entropia de uma massa física permanece constante durante o processo. Este é um cenário aplicado para análises com turbinas, que é um processo essencialmente adiabáticos (não há transferência de calor) e que as irreversibilidades associadas ao processo, como o atrito, são minimizadas. Desta forma, um processo isentrópico (condição idealizada) permite definir eficiência de processos e comparar com o desempenho real de dispositivos (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Alguns diagramas que correlacionam propriedades são frequentemente utilizados em análises termodinâmicas de processos. Dois diagramas frequentemente utilizados que envolvem a entropia são a temperatura-entropia ($T - s$) e a entalpia-entropia ($h - s$), sendo este muito útil em análise de dispositivos em regimes permanentes, como a turbina.

O diagrama ($h - s$), também chamado de diagrama de Mollier, possui valores de entropia no eixo das abcissas e valores de entalpia no eixo das ordenadas. Ao analisar o escoamento em regime permanente de vapor de água através de uma turbina adiabática, FIGURA 1, a distância vertical (Δh) entre os estados de entrada e saída é uma medida de trabalho pela turbina, e a distância horizontal (Δs) é uma medida das irreversibilidades associadas ao processo (ÇENGEL E BOLES, 2013).

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DIAGRAMA ($h - s$) PARA ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE



FONTE: ÇENGEL E BOLES (2013)

2.2.10 Exergia

Çengel e Boles (2013) definem a exergia como uma propriedade que permite determinar o potencial de trabalho de um sistema em um ambiente especificado e representa a máxima quantidade de trabalho útil que pode ser obtida à medida que o sistema tende ao equilíbrio com o ambiente. Também é denominada como disponibilidade ou energia disponível.

Um sistema fornece o máximo possível de trabalho ao passar por um processo reversível do estado inicial especificado para o estado de equilíbrio termodinâmico com o ambiente, ou seja, estado morto. Não se pode interpretar a exergia como a quantidade de trabalho que um dispositivo que produz trabalho fornecerá após a sua instalação. Em vez disso, deve interpretá-la como o limite superior da quantidade de trabalho que um dispositivo pode produzir sem violar nenhuma das leis da termodinâmica (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Exceto para o caso limite de um processo reversível que a exergia permanece constante, para casos reais a exergia de um sistema isolado durante um processo sempre diminui. Em outras palavras, ela nunca aumenta e durante um processo real será sempre destruída. Tal fato é conhecido como o princípio da diminuição da exergia (ÇENGEL E BOLES, 2013).

Çengel e Boles (2013) escrevem que irreversibilidades tais como atrito, mistura, reações químicas, transferência de calor com diferença finita de temperaturas, e/ou expansão não resistida sempre geram entropia, e tudo que gera

entropia sempre destrói exergia. A exergia destruída é proporcional à entropia gerada e é expressa como:

$$X_{destruída} = T_0 S_{ger} \geq 0 \quad (25)$$

onde:

$X_{destruída}$ = exergia destruída [kJ];

T_0 = temperatura do ambiente que o sistema está inserido [K];

S_{ger} = entropia gerada [kJ/K].

Interpreta-se pela equação (25) que a exergia destruída é uma quantidade positiva para todo processo real e torna-se zero para um processo reversível. A exergia destruída representa o potencial de trabalho perdido e pode ser também denominada de irreversibilidade ou trabalho perdido.

2.3 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

As válvulas redutoras de pressão são dispositivos que restringem o escoamento do fluido e que, por consequência, geram uma queda de pressão entre o estado inicial e o final. Entretanto, produzem a queda de pressão sem produzir nenhum tipo de trabalho e destroem a exergia.

Conforme definem Çengel e Boles (2013), nas análises termodinâmicas envolvendo válvulas redutoras de pressão considera-se que o escoamento ocorre em regime permanente, uma vez que não há variação com o tempo em nenhum ponto. Além disso, o escoamento através da válvula é adiabático, pois a área de troca térmica é insuficiente para que ocorra uma transferência de calor significativa. Também, se desconsidera variações relevantes de energia potencial e cinética. Desta forma, a equação da conservação de energia por unidade de massa aplicada à VRP, resume-se a:

$$h_{ent} = h_{sai} \quad (26)$$

Com isso, pode-se dizer que o processo que ocorre na válvula pode ser considerado como isoentálpico, ou seja, que não há variação da entalpia entre o estado inicial e o final.

2.4 TURBINAS A VAPOR

Turbina a vapor é uma máquina térmica que converte a energia contida no vapor em trabalho útil. A transformação da energia ocorre através da queda de pressão do vapor nos bocais da turbina, acarretando queda de temperatura e entalpia, enquanto aumenta-se o volume específico e conseqüentemente a velocidade do vapor. Na saída dos bocais o vapor sai com velocidade elevada e atinge as palhetas móveis da turbina fazendo rotacionar seu eixo. Portanto, no bocal há conversão da energia potencial em energia cinética, que por sua vez é convertida em energia mecânica nas palhetas do rotor.

De acordo com Tanuma (2022), a geração de energia é uma das maiores aplicações para esse tipo de equipamento. A conversão da energia mecânica em energia elétrica é realizada pelo gerador elétrico, que está acoplado ao eixo da turbina, na maioria das vezes, através de um redutor de velocidades.

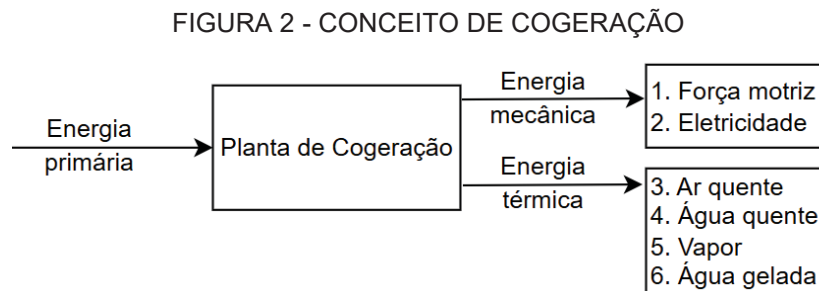
Segundo Tanuma (2022), as turbinas a vapor podem ser classificadas em algumas tipologias, como as de condensação (com e sem extração), as de pressão mista e as de contrapressão (também com ou sem extração). Dentro desta gama, este trabalho adotará a turbina de contrapressão sem extração. A escolha justifica-se por sua funcionalidade: além de gerar trabalho útil que pode ser convertido em eletricidade, o vapor expandido sai por um único ponto de exaustão e é direcionado ao processo industrial em uma pressão menor, apresentando uma característica operacional análoga à da VRP.

Esta escolha é reforçada por vantagens práticas. Comparadas aos demais modelos, as turbinas de contrapressão apresentam uma concepção mais simples, possuem menos estágios e seções de exaustão menores, o que resulta em equipamentos com menor custo de aquisição (TANUMA, 2022). O mesmo autor destaca que essa combinação de funcionalidade e custo justifica sua ampla utilização em segmentos industriais de alto consumo de vapor, como refinarias de petróleo, petroquímicas, papel e celulose e o setor alimentício.

2.5 COGERAÇÃO E O USO DE TURBINA EM PARALELO À VÁLVULAS REDUTORAS

De acordo com Moreira (2021), a cogeração é definida como a produção simultânea ou sequencial de duas ou mais formas de energia, como energia térmica e mecânica, a partir de um único combustível. Esse processo permite um aproveitamento energético elevado, podendo alcançar até 85% da energia contida no combustível, a qual pode ser transformada em energia mecânica na forma de força motriz, ou eletricidade, mais energia térmica na forma de ar quente, água quente, vapor e água gelada conforme ilustra a

FIGURA 2:



FONTE: MOREIRA (2021)

A proposta deste trabalho, que consiste na instalação de uma turbina de contrapressão em paralelo à VRP, caracteriza-se como um sistema de cogeração. Isso porque, além de atender às demandas térmicas do processo com vapor nas mesmas condições necessárias, o sistema permite a conversão de parte da energia do vapor em eletricidade, promovendo simultaneamente benefícios energéticos e econômicos.

A literatura consultada apresenta estudos que apoiam a viabilidade dessa solução. Al-Baghdadi (1993) investigou a aplicação de três turbinas de contrapressão em substituição a válvulas redutoras em uma planta integrada de energia e dessalinização. O estudo concluiu que a solução, além de aumentar a eficiência global da cogeração, proporcionaria uma redução expressiva nos custos de energia e água.

França e Soares (2005), em um estudo aplicado à indústria de papel e celulose, avaliaram a inserção de turbina em paralelo às VRPs operando em diferentes pressões. Com base nas premissas adotadas, que incluíram 8.760 horas anuais de operação, capacidade de geração de 8.000kW, utilização de vapor superaquecido, fator de operação de 99% e custo anual de operação e manutenção de apenas 1.500 USD, o estudo indicou um período de retorno do investimento inferior a 7 meses.

Harrell e Jendrucko (2003) demonstram que a aplicação de uma turbina de contrapressão em paralelo à VRP, embora exija uma vazão adicional de vapor e, conseqüentemente, um aumento no consumo de combustível para fornecer a mesma quantidade de energia térmica ao processo, resulta em uma economia significativa nos custos com energia elétrica, devido à geração própria de eletricidade.

O National Renewable Energy Laboratory (2012) também cita o fato da necessidade de aumentar a vazão na caldeira para suprir vapor com a mesma energia térmica ao instalar uma turbina de contrapressão em paralelo à VRP. Ainda, recomendam que turbinas de contrapressão devem ser instaladas quando a vazão de vapor na VRP supere 1.360 t/h e que a queda de pressão seja de pelo menos 6,89 bar.

Adicionalmente, segundo o National Renewable Energy Laboratory (2012), as turbinas de contrapressão operam com uma eficiência isentrópica de 20 a 70%. Quanto maior a eficiência, menor o consumo de combustível. Adicionalmente, as turbinas de contrapressão podem produzir energia a custos menores que 0,03 USD/kWh e que a economia com energia costuma ser suficiente para recuperar completamente o custo do investimento inicial em menos de 2 anos.

2.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

As empresas possuem recursos limitados para investimento e, portanto, faz-se necessário que haja uma escolha criteriosa dos projetos que serão implementados. Diversas técnicas podem ser utilizadas para determinar a viabilidade. As metodologias usadas para análise de projetos estão usualmente fundamentadas no fluxo de caixa projetado para os projetos em comparação (JÚNIOR, 2024).

A partir da distribuição de fluxos de caixa, vários índices de viabilidade em projetos podem ser calculados, entre eles: taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL), *payback* simples e *payback* descontado.

2.6.1 Payback simples

Segundo Ehrhardt e Brigham (2011), o *payback* simples representa o período, expresso em anos, necessário para que o fluxo de caixa operacional de um projeto recupere o investimento inicial realizado. Roos, Westerfield e Jaffe (2002) observam que essa metodologia é comumente aplicada por empresas em decisões de menor valor monetário e impacto estratégico, nas quais uma avaliação mais detalhada pode não ser considerada necessária.

2.6.2 Payback descontado

O método *payback* descontado se assemelha com o anterior, porém, conforme menciona Bordeaux-Rêgo et al. (2013), considera-se uma taxa especificada e a ideia do valor do dinheiro no tempo (adicionando o custo de capital da empresa ao método *payback* simples). Essa taxa, comumente chamada de taxa de desconto, retorno requerido, custo de capital ou custo oportunidade consiste no retorno mínimo que um projeto precisa proporcionar para manter inalterado o valor de mercado da empresa (GITMAN, 2010).

De acordo com Roos, Westerfield e Jaffe (2002), a diferença fundamental entre o *payback* simples e o *payback* descontado reside no fato de que o primeiro ignora o valor do dinheiro no tempo, sendo, portanto, mais adequado para decisões de menor magnitude, em termos de valor ou complexidade, e como um filtro inicial para seleção de projetos. Já o *payback* descontado corrige essa limitação teórica ao considerar os fluxos de caixa trazidos a valor presente antes de calcular o tempo de recuperação. Contudo, os autores destacam que, embora mais preciso, esse método perde a principal vantagem da simplicidade de cálculo e ainda mantém a limitação de desconsiderar os fluxos de caixa após o período de *payback*. Por esse motivo, grandes decisões de investimento costumam se basear em indicadores mais abrangentes, como o valor presente líquido (VPL).

2.6.3 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido, também conhecido como método do fluxo de caixa descontado, é definido como o valor presente das entradas de caixa de um projeto

menos o valor presente de seu custo, considerando determinada taxa de desconto nas avaliações (EHRHARDT e BRIGHAM, 2011). É definido conforme equação (27):

$$VPL = -FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (27)$$

onde:

FC_0 = investimento inicial;

FC_t = é o valor presente líquido das entradas no tempo t ;

r = taxa de custo de capital da empresa.

Levando em consideração o ponto de vista econômico, os critérios de decisão utilizando-se o método VPL, de acordo com Júnior (2024), são:

- a) $VPL > 0$, o projeto é viável;
- b) $VPL < 0$, o projeto é inviável;
- c) $VPL = 0$, o projeto é indiferente

2.6.4 Taxa interna de retorno (TIR)

Conforme define Júnior (2024), a Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de desconto ou taxa de custo de capital da empresa (r) que zera o VPL de um investimento, ou seja, o ponto em que o valor atual dos fluxos de caixa futuros se equipara ao investimento inicial. Efetuando-se a operação matemática na equação (27), chega-se à equação (28):

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = FC_0 \quad (28)$$

Quanto aos critérios de aceitação, tem-se:

- a) $TIR > r$, o projeto é viável;
- b) $TIR < r$, o projeto é inviável;
- c) $TIR = r$, o projeto é indiferente.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois busca solucionar um problema prático, o desperdício de energia na redução de pressão com utilização de VRP convencionais, por meio da avaliação da viabilidade técnica e econômica da instalação de uma TRP em paralelo à válvula.

Quanto ao propósito a pesquisa será descritiva e explicativa: descritiva no sentido de identificar e quantificar as perdas energéticas, e explicativa ao analisar o potencial de recuperação de energia e os fatores que influenciam a viabilidade da solução proposta.

Quanto à modalidade, a pesquisa será realizada por meio de um estudo de caso, selecionando uma empresa real que utiliza VRP em seu processo. A abordagem metodológica incluirá ainda pesquisa bibliográfica e documental para a fundamentação teórica.

Por fim, quanto à natureza dos dados será uma pesquisa quantitativa com cálculos termodinâmicos e análise econômica.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento da pesquisa será conduzido em três frentes principais: levantamento e análise de dados operacionais do sistema de vapor da empresa selecionada; dimensionamento e avaliação técnica de uma TRP instalada em paralelo à VRP existente; e, por fim, análise da viabilidade econômica da implementação do sistema proposto.

Inicialmente, proceder-se-á à seleção da empresa objeto do estudo, obedecendo a critérios de aderência ao tema, disponibilidade de informações técnicas, acesso a dados históricos de operação do sistema de vapor e dispor de condições técnicas que possibilite o sistema de recuperação. Para assegurar a consistência dos resultados, é fundamental que os dados relativos à pressão de entrada e saída, temperatura do vapor e vazão mássica sejam conhecidos ou, alternativamente, estimáveis a partir de parâmetros de projeto ou de medições de campo.

O levantamento de dados ocorrerá por meio de análise documental de plantas e fluxogramas de processo, coleta de dados operacionais históricos, além da realização de entrevistas técnicas com profissionais da área de operação ou manutenção da empresa. Os dados obtidos formarão a base para a análise termodinâmica do processo de redução de pressão.

Com base nos dados coletados, será realizada a análise técnica que envolverá o cálculo do potencial de energia elétrica que pode ser obtido no processo de redução de pressão com a instalação da TRP. Para isso, será utilizada a análise de energia em sistemas sob regime permanente, equação (17), considerando-se o vapor saturado como fluido de trabalho. Será feita uma modelagem termodinâmica em ambiente Microsoft Excel.

Posteriormente, será realizada a análise econômica do projeto, com a estimativa dos custos de aquisição, instalação, operação e manutenção da turbina. Serão considerados também os custos de adequações necessárias para a integração do sistema à infraestrutura existente. A viabilidade financeira será avaliada por meio do cálculo de indicadores como payback simples, payback descontado, VPL e TIR, utilizando parâmetros financeiros correntes.

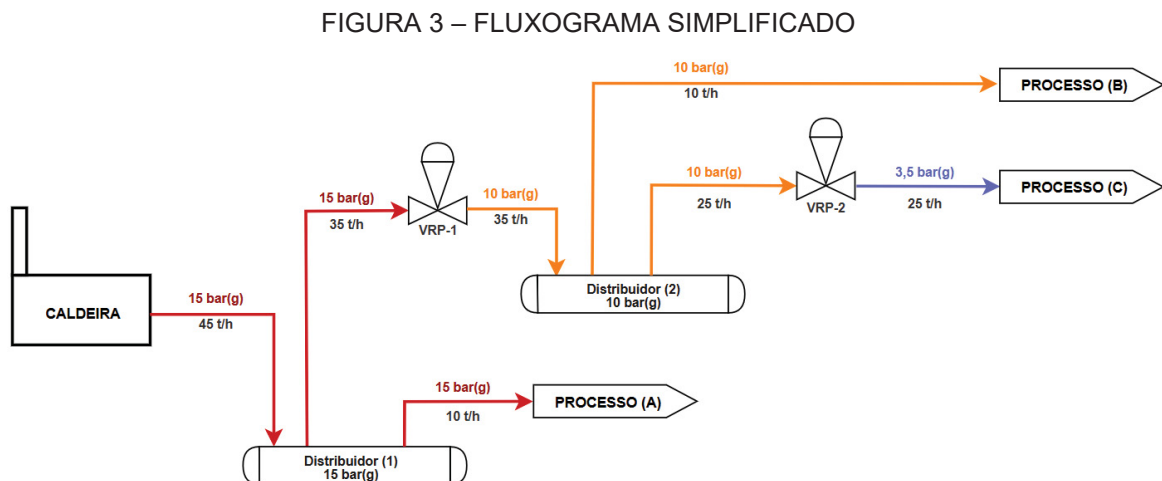
Por fim, com base nos dados levantados e nas análises realizadas, será testada a hipótese da pesquisa, verificando-se se a implementação do sistema proposto é tecnicamente viável e economicamente atrativa no contexto da empresa estudada.

4 ANÁLISE

A viabilidade de uma TRP está diretamente associada às condições operacionais específicas de cada processo industrial, como pressão, vazão de vapor e custo de energia. Neste capítulo, apresenta-se o estudo de caso adotado como base para esta pesquisa, iniciando pela seleção e caracterização da planta, de seus processos e do levantamento de dados operacionais que subsidiaram as simulações termodinâmicas e as análises técnica e econômica subsequentes.

4.1 SELEÇÃO DA EMPRESA

A empresa objeto de estudo deste trabalho é uma empresa alimentícia instalada no estado do Paraná. Atualmente a empresa possui instalada uma caldeira com capacidade de produção de 45 t/h de vapor saturado que opera a uma pressão de 15 bar(g). O vapor produzido é utilizado em três processos distintos, cada qual com sua respectiva pressão e vazão. A FIGURA 33 ilustra o fluxograma simplificado do processo desta empresa:



FONTE: O autor (2025)

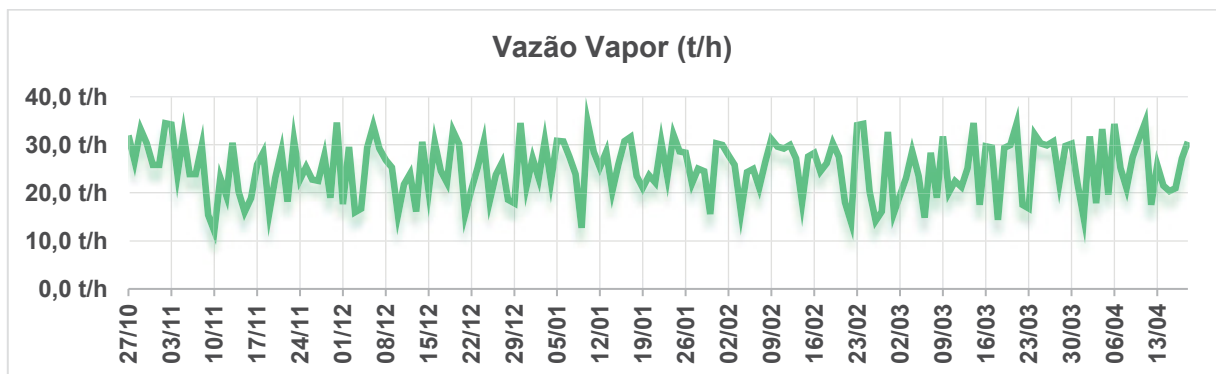
O vapor gerado na caldeira é conduzido ao distribuidor (1), que opera a uma pressão de 15 bar(g). A partir desse ponto, parte do vapor é direcionada para o processo (A), com consumo médio de 10 t/h. Outra fração segue para a VRP-1, responsável por reduzir a pressão antes de interligar ao distribuidor (2), que opera a

10 bar(g). Esse segundo distribuidor alimenta duas ramificações: uma delas supre o processo (B), cuja demanda média é de 10 t/h, enquanto a outra conduz o vapor até a VRP-2, onde ocorre nova redução de pressão para 3,5 bar(g) com uma vazão média de 25 t/h.

No trecho de tubulação que direciona o vapor para o processo (C), há um medidor de vazão responsável pelo monitoramento contínuo da quantidade de vapor que por ali flui. A partir dos dados históricos obtidos do sistema supervisório da planta, foi realizado um trabalho de coleta, filtragem e consolidação das informações, com o objetivo de obter valores representativos da vazão média diária de vapor. O período analisado compreendeu o intervalo entre 27 de outubro de 2024 e 18 de abril de 2025, totalizando quase seis meses de operação contínua.

Os dados coletados foram processados e organizados em forma de planilha, o que permitiu traçar um gráfico, apresentado na FIGURA 43, que ilustra o comportamento da vazão média diária de vapor ao longo do período avaliado.

FIGURA 4 – VAZÃO MÉDIA DIÁRIA DE VAPOR



FONTE: O autor (2025)

Essa etapa de levantamento e processamento das informações foi fundamental para a caracterização do perfil de consumo de vapor do processo em análise na unidade industrial, servindo de base para a definição da vazão de projeto da TRP e para a simulação termodinâmica do sistema proposto. Por fim, destaca-se que a precisão e a confiabilidade dos dados de vazão coletados impactam diretamente a qualidade dos resultados obtidos nas etapas subsequentes de modelagem, estimativas de geração elétrica e análise econômica, tornando essa fase de coleta e processamento de dados um elemento essencial para a robustez do estudo.

A caldeira utilizada na planta apresenta, conforme especificações do fabricante, uma eficiência térmica de 86% e utiliza como combustível o cavaco de madeira. De acordo com informações obtidas por meio de entrevista com os operadores, atualmente (data da obtenção dessa informação), o custo médio do cavaco é de R\$ 300,00 por tonelada. Considerando um teor de umidade de 40%, adota-se para este estudo um poder calorífico inferior (PCI) aproximado de 2.400 kcal/kg. É importante destacar que o teor de umidade impacta diretamente na eficiência de combustão e, conseqüentemente, na produção útil de vapor. Quanto maior a umidade, maior o consumo de combustível necessário para produzir a mesma quantidade de energia térmica.

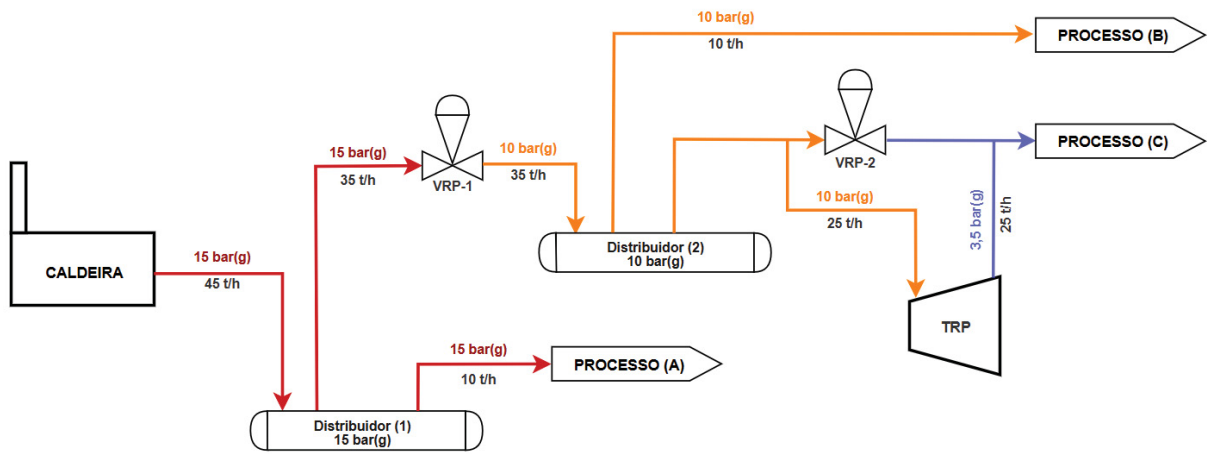
Adicionalmente, a unidade industrial apresenta uma disponibilidade média anual de 94,5% o que reflete em 8.280 horas de operação no ano. Esse elevado índice de disponibilidade é um fator positivo, pois assegura uma base operacional confiável para instalação de uma TRP, aumentando o potencial de geração elétrica contínua ao longo do ano.

No que se refere ao suprimento de energia elétrica, a empresa opera no ambiente de contratação livre (ACL), com contrato vigente de fornecimento a um custo médio de R\$ 0,35 por kWh.

4.2 ANÁLISE TÉCNICA

Observando a FIGURA 33 percebe-se que a empresa possui duas VRP em seu processo. A VRP-1 reduz 35 t/h de vapor de pressão de 15 barg para 10 barg e a VRP-2 reduz 25 t/h de vapor de uma pressão de 10 barg para 3,5 barg. Ou seja, em ambas há algum desperdício de energia e seria possível avaliar a viabilidade de implementação da TRP. Entretanto, não há espaço físico disponível para instalação de uma TRP em paralelo à VRP-1. Com isso, neste trabalho, apenas será analisada a viabilidade da instalação em paralelo à VRP-2. A proposta de instalação no fluxograma é ilustrada na FIGURA 5:

FIGURA 5 – FLUXOGRAMA COM INSTALAÇÃO DA TRP



FONTE: O autor (2025)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise técnica e econômica da implementação da TRP em paralelo à VRP, com base nos dados simulados para a indústria selecionada. Os resultados foram organizados conforme os eixos de análise do estudo: inicialmente, são discutidos os aspectos termodinâmicos associados à VRP seguido da TRP. Na sequência, apresentam-se os resultados da análise de viabilidade e, por fim, da análise de sensibilidade das variáveis analisadas.

5.1 ANÁLISE TERMODINÂMICA NA VRP-2

Com base na pressão de entrada conhecida e na condição de vapor saturado, a temperatura de entrada foi determinada por meio de interpolação nas tabelas de propriedades termodinâmicas. Para este trabalho, foram utilizadas as tabelas presentes na referência Moran e Shapiro (2006). A definição de duas propriedades intensivas permite a completa caracterização do estado termodinâmico na entrada da válvula. A TABELA 1 sumariza as propriedades termodinâmicas para a entrada da válvula.

TABELA 1 – PROPRIEDADES NA ENTRADA VRP-2

Propriedade	Valor	Unidade
Pressão	10,00	bar(g)
Temperatura	183,58	°C
Entalpia	2.780,92	kJ/kg
Entropia	6,56	kJ/kg.K
Título	1,00	-

FONTE: O autor (2025)

Conforme mencionado na seção 2.3, o estrangulamento na VRP é um processo com escoamento em regime permanente, uma vez que não há variação ao longo do tempo e o balanço de energia em uma VRP resume-se na equação (26), ou seja, a entalpia na entrada é a mesma na saída. Com isso, tem-se definido duas propriedades na saída: pressão e entalpia. A partir destas consegue-se definir outras

propriedades termodinâmicas através de interpolação que estão resumidas na TABELA 2:

TABELA 2 – PROPRIEDADES NA SAÍDA VRP-2

Propriedade	Valor	Unidade
Pressão	3,50	bar(g)
Entalpia	2.780,92	kJ/kg
Temperatura	164,48	°C
Entropia	6,95	kJ/kg.K
Título	1,00	-

FONTE: O autor (2025)

A temperatura de saturação para pressão 3,5 bar(g), consultando a tabela de propriedades termodinâmicas, é de 147,9 °C. Comparando esse valor com a temperatura da TABELA 2, percebe-se que há um grau de superaquecimento no vapor na saída da válvula. Ainda, aplicando-se um balanço de entropia na válvula, tem-se que a entropia gerada por unidade de massa de vapor de água é de 0,3941 kJ/kg.K, onde o princípio do aumento de entropia foi satisfeito durante o processo.

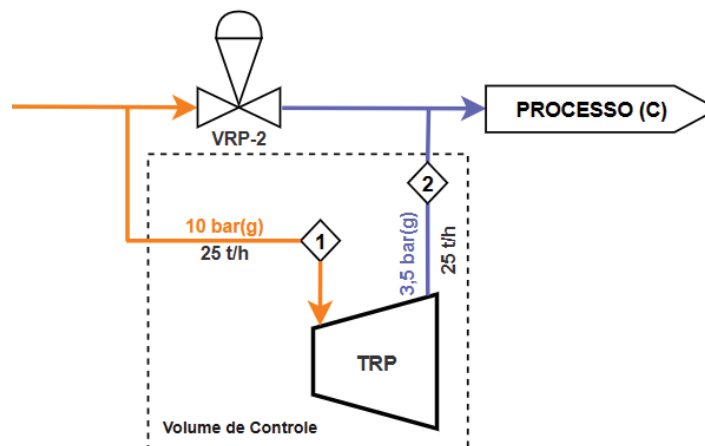
Fazendo-se um balanço de energia ao volume de controle no processo (C), pode-se obter a quantidade de calor fornecida ao processo utilizando-se a VRP-2. Ao final do processo (C) forma-se condensado a 80°C com uma entalpia de 334,91 kJ/kg. Aplicando-se o balanço de energia, conclui-se que a quantidade total de calor destinada ao processo é de 16.986,18 kW.

5.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA CONSIDERANDO A TRP

Nesta seção será calculado o potencial de geração considerando a instalação da TRP em paralelo à VRP. A análise termodinâmica foi feita estabelecendo um volume de controle sobre a TRP, FIGURA 6, onde apenas existe uma entrada e uma saída, logo a vazão mássica que entra no volume de controle é igual a que sai.

Além disso, as seguintes hipóteses foram assumidas: é um processo com escoamento em regime permanente, uma vez que não há variação com o tempo em nenhum ponto; a turbina é adiabática e, portanto, não há nenhuma transferência de calor; o processo é irreversível; por fim, que as energias cinéticas e potencial são desprezíveis.

FIGURA 6 – VOLUME DE CONTROLE NA TRP



FONTE: O autor (2025)

Os parâmetros de entrada da TRP são os mesmos da VRP-2 e estão resumidos na TABELA 1. As condições do vapor na saída da turbina, pelas hipóteses assumidas, podem ser determinadas pelas propriedades pressão e entropia, pois será feito o cálculo da potência isentrópica e depois corrigido pela eficiência isentrópica, que no caso será assumida em 55%, valor conservador médio em relação à faixa elencada pelo National Renewable Energy Laboratory (2012). A TABELA 3 resume os parâmetros na saída da TRP.

TABELA 3 – PROPRIEDADES NA SAÍDA TRP

Propriedade	Valor	Unidade
Pressão	3,50	bar(g)
Entropia	6,56	kJ/kg.K
Entalpia	2.618,20	kJ/kg
Temperatura	147,90	°C
Título	0,94	-

FONTE: O autor (2025)

Fazendo-se um balanço de energia no volume de controle que envolve a TRP, determina-se que a potência isentrópica é de 1.130,02 kW. Multiplicando-se essa potência pela eficiência isentrópica (55%), eficiência mecânica (98%) e eficiência do gerador (95%), chega-se a uma potência de 580,45 kW, que pode ser interpretada como a potência elétrica que a indústria é capaz de gerar com o rebaixamento de pressão com a instalação da TRP.

Fazendo-se um balanço de energia ao volume de controle no processo (C), pode-se obter a quantidade de calor fornecida ao processo utilizando-se a TRP. Considerando que ao final do processo (C) forma-se condensado a 80°C, tem-se que a entalpia do fluido é 334,91 kJ/kg. Aplicando-se o balanço de energia, conclui-se que a quantidade total de calor destinada ao processo é de 16.364,67 kW, ou seja, valor 3,66% menor que o calor fornecido pelo vapor que sai da válvula.

A diferença na energia térmica fornecida pela turbina é compatível com a análise feita por Harrell e Jendrucko (2003), pois a turbina converte parte da energia contida no vapor em energia de eixo e, portanto, o vapor que sai da turbina possui uma quantidade de energia menor comparada ao da VRP. Como resultado, quando a turbina estiver operando, a vazão mássica de vapor deve aumentar, considerando que a energia térmica fornecida pela VRP ou pela turbina deve ser igual.

Adotando a premissa anterior e aplicando-se um balanço de energia ao volume de controle no processo (C), para que a TRP forneça uma energia térmica de 16.986,18 kW, é necessário que pela turbina passe 25,95 t/h de vapor, ou seja, uma vazão 3,80% maior.

Assumindo que a caldeira possua capacidade para produzir essa demanda adicional de vapor, consegue-se determinar a quantidade adicional de combustível e quanto esse acréscimo representa em valores monetários considerando as premissas adotadas na seção 4.1. Fazendo-se os cálculos chega-se em um consumo adicional de combustível de 2.147,31 toneladas ao ano, o que representa um custo anual de R\$644.193,96.

Como a vazão total que passa na turbina aumentou para 25,95 t/h, por consequência haverá um acréscimo de potência gerada pelo sistema. Esse acréscimo é determinado fazendo-se um novo balanço de energia na TRP, resultando em 602,50 kW.

5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE

O estudo de viabilidade inicia-se determinando o quanto de energia consegue-se gerar no ano e quanto isso representa em valores monetários. Conforme discutido na seção 5.2, a potência elétrica capaz de ser gerada com a TRP é de 602,50 kW. Multiplicando-se essa potência pela quantidade total de horas que a indústria opera, quantidade essa atrelada a disponibilidade definida na seção 4.1, chega-se a um

montante de 4.988,69 MWh de energia. Multiplicando-se esse valor pelo custo da energia da empresa, chega-se a um montante de R\$1.746.040,76.

Para compor o custo do investimento inicial, estimou-se que o montante para aquisição do equipamento, custo com instalação mecânica, instalação elétrica e construção civil, acrescido de 5% de contingência, é de R\$2.835.000,00. Além disso, foi considerado um custo com operação e manutenção anual de R\$100.000,00.

Para a composição dos fluxos de caixas dos anos futuros, foi considerado a projeção de inflação na tarifa de energia elétrica de 6,3% (ANEEL, 2025). Adicionalmente, foi considerado que sobre o custo com operação e manutenção e o custo com o combustível incidirá uma taxa de 5,23% de inflação, que se refere ao IPCA acumulado compreendido entre agosto de 2024 até julho de 2025, segundo dados do (IBGE, 2025). Por fim, considerou-se que a taxa mínima de atratividade é de 15%, que corresponde à taxa Selic em julho de 2025.

A partir dos dados apresentados é possível estruturar o fluxo de caixa (FC) para o projeto. O FC para os dois primeiros anos é mostrado na TABELA 4. O FC considerando 20 anos é mostrado na TABELA 10 , no APÊNDICE 1 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO.

TABELA 4 – FLUXO DE CAIXA PARA OS 2 PRIMEIROS ANOS

	Ano 0	Ano 1	Ano 2
Investimento	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia	R\$ 0,00	R\$ 1.746.040,76	R\$ 1.856.041,32
Custo O&M	R\$ 0,00	R\$ 100.000,00	R\$ 105.230,00
Custo combustível	R\$ 0,00	R\$ 644.193,96	R\$ 677.885,31
FC período	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 1.001.846,79	R\$ 1.072.926,01
FC descontado	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 871.171,12	R\$ 811.286,21
FC descontado acumulado	-R\$ 2.835.000,00	-R\$ 1.963.828,88	-R\$ 1.152.542,67

FONTE: O autor (2025)

onde:

Economia com energia = é o valor anual economizado com a geração de energia a partir da TRP;

Custo O&M = custo com operação e manutenção;

Custo combustível = custo com o acréscimo do consumo de combustível;

FC período = Economia com energia deduzindo o custo O&M e o custo com combustível;

FC descontado = FC período trazido a valor presente;

FC descontado acumulado = FC descontado acumulado do período anterior somado ao FC descontado do período em análise.

Para o presente estudo, foi adotado um horizonte de análise de 20 anos para o fluxo de caixa do projeto, o que corresponde ao ciclo de vida econômico do sistema proposto. Essa escolha fundamenta-se no desempenho esperado dos principais componentes, especialmente da turbina de contrapressão e do gerador elétrico, que podem operar de forma segura e sem perda significativa de eficiência ao longo desse período, desde que submetidos a um plano de manutenção preventiva conforme as recomendações dos fabricantes.

O horizonte de 20 anos também reflete o ponto em que o investimento tende a perder competitividade frente à evolução tecnológica e ao aumento dos custos de operação e manutenção, marcando, portanto, o fim de sua vida econômica, ainda que a vida física dos equipamentos possa ser superior.

Por fim, optou-se por não considerar um valor residual ao término do período de análise, adotando assim uma abordagem conservadora, que desconsidera qualquer valor de revenda ou extensão operacional após o vigésimo ano. Diante dessas premissas, foram calculados os índices de viabilidade econômica, os quais estão resumidos na TABELA 5.

TABELA 5 – ÍNDICES DE VIABILIDADE

Índice	Valor	Unidade
VPL	R\$ 6.745.968,88	-
TIR	42%	-
Payback simples	2,83	anos
Payback descontado	3,56	anos

FONTE: O autor (2025)

O VPL de R\$ 6.745.968,88 indica que o projeto, com as premissas assumidas, gera um retorno financeiro positivo ao longo do período analisado, mesmo após o desconto dos fluxos futuros a valor presente. A TIR de 42% mostra um desempenho atrativo do investimento, superior à taxa mínima de atratividade considerada. O payback simples foi calculado em 2,83 anos, ou seja, o investimento inicial seria recuperado em menos de três anos considerando os fluxos nominais. Já o payback descontado, que considera o valor do dinheiro no tempo, apresentou retorno em 3,56 anos. Esses resultados confirmam a viabilidade econômica da instalação da TRP,

reforçando o potencial de geração de economia financeira a partir da recuperação de energia atualmente desperdiçada no processo de redução de pressão de vapor com válvulas convencionais.

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de entender qual a influência de algumas variáveis nos índices de viabilidade foi executado uma análise de sensibilidade. As variáveis consideradas foram: vazão de vapor, custo da energia e custo do combustível. Embora a viabilidade deva ser analisada individualmente em cada caso, a escolha dessas variáveis visa oferecer uma base comparativa que possa ser útil a outras empresas do setor industrial com condições operacionais semelhantes.

Ao simular variações de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ em relação aos valores de referência, busca-se demonstrar como diferentes cenários podem afetar o retorno do investimento, permitindo que outras unidades industriais utilizem os resultados deste estudo como referência preliminar para avaliação de projetos similares. A TABELA 6 apresenta os cenários considerados na análise.

TABELA 6 – VARIAÇÃO VALORES

Variação	Vazão vapor	Custo energia	Custo Combustível
Valor (-10 %)	22,50 t/h	0,32 R\$/kWh	270,00 R\$/ton
Valor (-5%)	23,75 t/h	0,33 R\$/kWh	285,00 R\$/ton
Valor Base	25,00 t/h	0,35 R\$/kWh	300,00 R\$/ton
Valor (+5%)	26,25 t/h	0,37 R\$/kWh	315,00 R\$/ton
Valor (+10%)	27,50 t/h	0,39 R\$/kWh	330,00 R\$/ton

FONTE: O autor (2025)

Calculou-se o VPL, TIR e payback descontado para cada um dos cenários. A TABELA 7 resume os índices obtidos com a variação da vazão de vapor passando pela TRP e mantendo-se todas as demais parâmetros inalterados comparado a análise efetuada na seção 5.3.

TABELA 7 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO A VAZÃO

Vazão vapor (t/h)	VPL	Varição VPL em relação ao valor base	TIR	Varição TIR em relação ao valor base	Payback descontado	Varição payback em relação ao valor base
22,50	R\$ 5.702.853,49	-R\$ 1.043.115,39	38%	-4%	4,07	0,50
23,75	R\$ 6.224.411,18	-R\$ 521.557,69	40%	-2%	3,80	0,23
25,00	R\$ 6.745.968,88	R\$ 0,00	42%	0%	3,56	0,00
26,25	R\$ 7.267.526,57	R\$ 521.557,69	44%	2%	3,35	-0,21
27,50	R\$ 7.789.084,26	R\$ 1.043.115,39	46%	4%	3,17	-0,40

FONTE: O autor (2025)

Os resultados apresentados na TABELA 7 evidenciam a influência da vazão de vapor sobre os indicadores de viabilidade econômica do projeto. Observa-se que, ao aumentar a vazão de vapor que passa pela TRP em 10%, ocorre uma elevação de 15,5% no Valor Presente Líquido (VPL), um aumento de 8,9% na Taxa Interna de Retorno (TIR) e uma redução de 11,9% do payback descontado, quando comparados aos resultados para a vazão de 25 t/h.

Da mesma forma, foi calculado os índices de viabilidade considerando a variação do custo de energia pago pela indústria no ACL. A TABELA 8 resume os resultados obtidos.

TABELA 8 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO O CUSTO ENERGIA

Custo energia (R\$/kWh)	VPL	Varição VPL em relação ao valor base	TIR	Varição TIR em relação ao valor base	Payback descontado	Varição payback em relação ao valor base
0,32	R\$ 5.155.169,45	-R\$ 1.590.799,43	36%	-6%	4,43	0,87
0,33	R\$ 5.950.569,16	-R\$ 795.399,71	39%	-3%	3,95	0,38
0,35	R\$ 6.745.968,88	R\$ 0,00	42%	0%	3,56	0,00
0,37	R\$ 7.541.368,59	R\$ 795.399,71	45%	3%	3,24	-0,32
0,39	R\$ 8.336.768,30	R\$ 1.590.799,43	48%	6%	2,97	-0,59

FONTE: O autor (2025)

A TABELA 8 mostra o impacto do custo da energia elétrica nos indicadores de viabilidade do projeto. Como esperado, o aumento do valor da energia contratada no ACL resulta em melhorias expressivas no VPL e na TIR, ao passo que reduz o tempo de retorno do investimento. Quando o custo da energia varia de R\$ 0,35 para

R\$ 0,39, o VPL aumenta 23,6%, passando de R\$ 6,74 milhões para R\$ 8,33 milhões. Da mesma forma, a TIR aumenta de 42% para 48% e o payback descontado cai de 3,56 para 2,97 anos. Esses resultados reforçam que o projeto se torna ainda mais atrativo em cenários de energia mais cara, o que é comum em períodos de escassez hídrica ou alta demanda, para clientes fora do ACL, onde não possuem um contrato com valor fixo por determinado período.

Por fim, calculou-se os índices de viabilidade considerando a variação do custo do combustível. A TABELA 9 resume os resultados obtidos.

TABELA 9 – ÍNDICES VIABILIDADE VARIANDO O CUSTO COMBUSTÍVEL

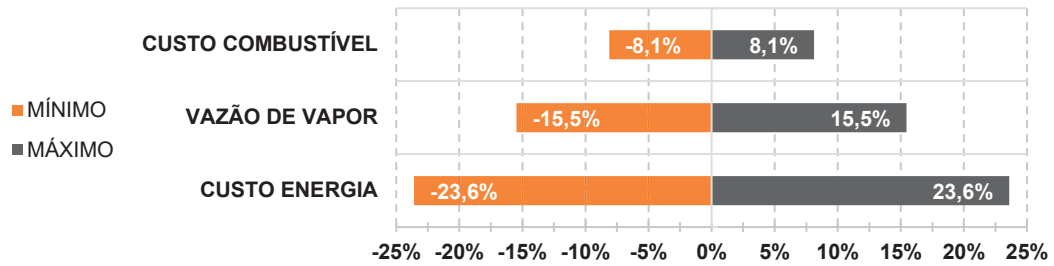
Custo combustível (R\$/ton)	VPL	Variação VPL em relação ao valor base	TIR	Variação TIR em relação ao valor base	Payback descontado	Variação payback em relação ao valor base
270,00	R\$ 7.293.652,92	R\$ 547.684,04	44%	2%	3,33	-0,24
285,00	R\$ 7.019.810,90	R\$ 273.842,02	43%	1%	3,44	-0,12
300,00	R\$ 6.745.968,88	R\$ 0,00	42%	0%	3,56	0,00
315,00	R\$ 6.472.126,86	-R\$ 273.842,02	41%	-1%	3,70	0,13
330,00	R\$ 6.198.284,84	-R\$ 547.684,04	40%	-2%	3,83	0,27

FONTE: O autor (2025)

A TABELA 9 apresenta os resultados da análise de sensibilidade em relação ao custo do combustível utilizado na caldeira, no caso, o cavaco de madeira. Observa-se que o aumento no preço da tonelada de combustível impacta negativamente os indicadores de viabilidade, uma vez que eleva o custo de geração de vapor necessário para alimentar a turbina. Quando o custo do cavaco varia de R\$ 270,00 para R\$ 330,00 por tonelada, o Valor Presente Líquido (VPL) sofre uma redução de aproximadamente R\$ 1,1 milhões, enquanto a Taxa Interna de Retorno (TIR) cai de 44% para 40%. O payback descontado, por sua vez, aumenta de 3,33 para 3,83 anos. Apesar dessas variações, o projeto permanece viável em todos os cenários simulados, o que indica uma boa resiliência econômica mesmo diante de oscilações no preço da biomassa.

Para cada índice de viabilidade foi calculado a relação entre a variação do índice em relação ao valor base e o valor do índice para o valor base. O resultados são mostrados para o VPL na FIGURA 7, para a TIR na FIGURA 8 e para o payback descontado na FIGURA 9.

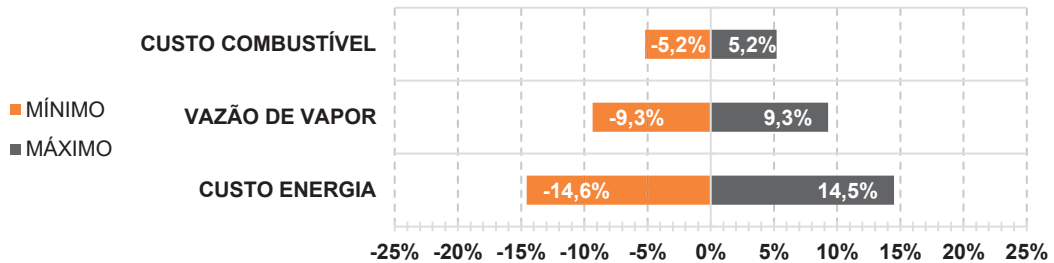
FIGURA 7 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (VPL)



FONTE: O autor (2025)

Pela FIGURA 7 percebe-se que o custo de energia possui uma maior sensibilidade que as demais variáveis, tanto para mais quanto para menos. Por exemplo, um aumento de 10% no custo da energia pode refletir em um aumento de 23,6% no VPL comparado ao cenário discutido na seção 5.3, uma vez que o cliente estaria gerando uma maior economia de energia.

FIGURA 8 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (TIR)

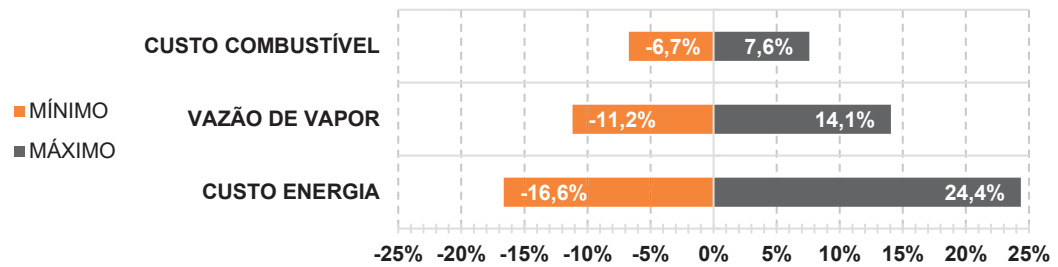


FONTE: O autor (2025)

Interpretando a FIGURA 8, os mesmos 10% de aumento no custo da energia refletiria em um aumento da TIR em 14,5%, enquanto um aumento do custo de combustível de 10% refletiria em uma diminuição da TIR em 5,2%. Isto se justifica, pois, o custo com combustível seria maior e conseqüentemente reduziria o fluxo de caixa do período.

Quanto ao payback descontado, analisando a FIGURA 9, novamente é possível perceber que a variável com maior sensibilidade no resultado financeiro do projeto é o custo da energia, onde um aumento de 10% no custo pago pelo cliente poderia representar um decréscimo de -16,6% no payback descontado.

FIGURA 9 – ANÁLISE SENSIBILIDADE (PAYBACK DESCONTADO)



FONTE: O autor (2025)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma turbina redutora de pressão de vapor saturado, instalando-a em paralelo à válvula redutora de pressão.

Foi selecionada uma indústria de alimentos situada no estado do Paraná que em um dos processos produtivos, neste trabalho denominado como processo (C), há instalada uma VRP que rebaixa 25 t/h de vapor saturado de 10 barg para 3,5 barg.

As análises termodinâmicas feitas, levando em consideração o rebaixamento de pressão pela válvula redutora convencional, mostrou que o rebaixamento não produz nenhum tipo de trabalho, gera um aumento de entropia no sistema de 0,3941 kJ/kg.K e aumenta em aproximadamente 16,5°C a temperatura do vapor, tornando-o superaquecido. Além disso, que o montante de energia térmica fornecida ao processo, considerando o vapor nestas condições, é de 16.686,18 kW.

Com o objetivo de entender o quanto de energia é desperdiçada no rebaixamento de pressão, foi feita uma nova análise termodinâmica considerando a instalação da TRP em paralelo à VRP, ou seja, todo o vapor que antes era direcionado para a válvula seria agora direcionado para a turbina de contrapressão. Os resultados mostraram que para esta condição de rebaixamento de pressão a TRP é capaz de gerar 580,45 kW de potência elétrica.

Entretanto, a condição do vapor na exaustão da TRP ficou levemente diferente da VRP. Na análise feita neste trabalho, seguiu-se a premissa que para o processo (C) deveria ser fornecido a mesma quantidade de energia térmica (calor) fornecida pela VRP. Como resultado, uma quantidade adicional de vapor deveria passar pela TRP, o que levou a um acréscimo aproximado de 3,8% na vazão original.

Essa vazão adicional de vapor fornecida pela caldeira teve por consequência um acréscimo no consumo de combustível, que anualmente representa um aumento no custo de R\$644.193,96. Em contrapartida, uma vez que a vazão aumentou, a potência elétrica aumentou proporcionalmente, chegando em uma potência de 602,50 kW. Considerando essa potência, o custo de energia atualmente pago pela empresa no ambiente de contratação livre e a taxa de disponibilidade concluiu-se que a economia financeira anual com energia é de R\$1.746.040,76.

O investimento total foi estimado em R\$2.835.000,00 e um custo de operação e manutenção anual de R\$100.000,00 foi considerado. Além disso, para a

determinação do fluxo de caixa, foi assumido uma projeção da inflação na tarifa de energia de 6,3%, uma inflação de 5,2% incidindo sobre o custo de O&M e custo de combustível e que a taxa mínima de atratividade de 15% a.a.

A análise de viabilidade foi feita levando em consideração 20 anos de projeto e os resultados mostraram que a instalação de uma TRP em paralelo à VRP no estudo de caso analisado é viável, onde apresentou um VPL de R\$6.745.968,88, uma TIR de 42%, um payback simples de 2,83 anos e um payback descontado de 3,56 anos.

A análise de sensibilidade mostrou que variando-se $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ os valores iniciais considerados para as variáveis vazão de vapor, custo da energia e custo do combustível, a variável que mais interfere no resultado financeiro do projeto é custo da energia, seguido da vazão de vapor e custo de combustível. Um aumento em 10% no custo da energia pode fazer com que o VPL aumente 23,6%, a TIR aumente 14,5% e payback descontado caia 16,6% em relação aos resultados obtidos na análise inicial. Esse fato leva a conclusão de que o projeto se torna ainda mais viável quanto maior for o custo da energia da empresa em análise, desde que os outros parâmetros sejam semelhantes.

Nota-se que a implementação de turbinas redutoras de pressão ainda é desconhecida por empresas nacionais. E no estudo de caso considerado, a instalação da TRP além de não impactar tecnicamente o processo produtivo do cliente e apresentar um resultado positivo no que tange a viabilidade, agregaria valor econômico ao processo industrial e tornaria a operação mais sustentável e eficiente energeticamente.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entre as limitações do estudo estão a modelagem com base em alguns dados estimados como investimento total, custo com operação e manutenção, ausência de simulação dinâmica da variação de carga da turbina e perda de eficiência ao longo do tempo, a não consideração de aspectos tributários sobre a geração de energia elétrica e nem a inclusão da modalidade da empresa caso seja optante do mercado cativo. Recomenda-se que em trabalhos futuros aprofundem esses elementos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **infoTARIFA**. Ano I, n. 2, ago. 2025. Brasília, DF: ANEEL, 2025. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/Busca/Download?codigoArquivo=180410&tipoMidia=0>. Acesso em: 16 ago. 2025
- AL-BAGHDADI, Atef M. **Feasibility of installing back pressure turbine at Umm Al Nar East station, Desalination**. Volume 93, Issues 1–3, 1993, Pages 147-158. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001191649380101R>. Acesso em: 07 jun. 2025.
- BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo L. **Eficiência Energética - Técnicas de Aproveitamento, Gestão de Recursos e Fundamentos**. Rio de Janeiro: Érica, 2015.
- BORDEAUX-RÊGO, R.; PAULO, G. P.; SPRITZER, I. M. de P. A.; ZOTES, Luis Pérez. **Viabilidade Econômico-Financeira de Projetos**. 4. ed. Rio de Janeiro: FGV Management, 2013.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018.
- EHRHARDT, M.; BRIGHAM, E. F. **Financial Management: Theory and Practice**. 13 th ed. Mason, OH: South-Western Cengage Learning, 2011.
- FILHO, Guilherme Eugênio Filippo F. **Máquinas Térmicas Estáticas e Dinâmicas - 1ª edição - 2014**. Rio de Janeiro: Érica, 2014
- FILHO, Washington B. **Termodinâmica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2020
- FRANÇA, Geraldo Augusto Camplina; SOARES, Lis Nunes. **Análise Exergética de Válvulas Redutoras de Pressão Visando Cogeração**. Science & Engineering Journal, 15 (2), 1-6, 2005.
- GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2022. *E-book*. p.41. ISBN 9786559771653. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786559771653/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
- GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HARRELL, G.; JENDRUCKO, R. **Steam Turbine Versus Pressure Reducing Valve Operation**. Cogeneration and Competitive Power Journal, 18(2), 25-36, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor: IPCA e INPC - Julho 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/236/inpc_ipca_2025_jul.pdf. Acesso em: 16 ago. 2025.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JÚNIOR, Antonio Marques D. **Análise de investimentos em projetos - Viabilidade financeira e risco 2º**. 2. ed. São Paulo: Saint Paul Editora, 2024. *E-book*. p.25. ISBN 9786586407587. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786586407587/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MORAN, Michael J; SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons, Inc: 2006.

MOREIRA, José Roberto S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Replace Pressure-Reducing Valves with Backpressure Turbogenerators, Energy Tips: STEAM, Steam Tip Sheet #20 (Fact Sheet)**. Jan. 2012. Disponível em: <https://invenoeng.com/wp-content/uploads/2017/08/Energy-Tipsheet-Replacing-Pressure-Reducing-Valves-in-the-Steam-System.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2025.

NR, Normal Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego, **NR-13 Caldeiras e Vasos de Pressão**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-13-atualizada-2022-retificada.pdf>. Acesso em: 22 de mar. de 2025.

PROCEL, **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. Disponível em: https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf. Acesso em: 23 de mar. de 2025.

ROSS, S.; WESTERFIELD, R.; JAFFE, J. **Corporate Finance**. 6th ed. McGraw-Hill/Irwin, 2002

TANUMA, Tadashi. **Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants**. 2nd ed. Crambridge, MA: Elsevier, 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013

APÊNDICE 1 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 0	Ano 1	Ano 2
Investimento	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 0,00	R\$ 1.746.040,76	R\$ 1.856.041,32
Custo O&M (-)	R\$ 0,00	R\$ 100.000,00	R\$ 105.230,00
Custo combustível (-)	R\$ 0,00	R\$ 644.193,96	R\$ 677.885,31
FC período	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 1.001.846,79	R\$ 1.072.926,01
FC descontado	-R\$ 2.835.000,00	R\$ 871.171,12	R\$ 811.286,21
FC descontado acumulado	-R\$ 2.835.000,00	-R\$ 1.963.828,88	-R\$ 1.152.542,67

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 1.972.971,93	R\$ 2.097.269,16	R\$ 2.229.397,12
Custo O&M (-)	R\$ 110.733,53	R\$ 116.524,89	R\$ 122.619,14
Custo combustível (-)	R\$ 713.338,71	R\$ 750.646,33	R\$ 789.905,13
FC período	R\$ 1.148.899,69	R\$ 1.230.097,94	R\$ 1.316.872,84
FC descontado	R\$ 755.420,19	R\$ 703.312,49	R\$ 654.718,54
FC descontado acumulado	-R\$ 397.122,47	R\$ 306.190,02	R\$ 960.908,56

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 2.369.849,13	R\$ 2.519.149,63	R\$ 2.677.856,06
Custo O&M (-)	R\$ 129.032,13	R\$ 135.780,51	R\$ 142.881,83
Custo combustível (-)	R\$ 831.217,17	R\$ 874.689,82	R\$ 920.436,10
FC período	R\$ 1.409.599,84	R\$ 1.508.679,30	R\$ 1.614.538,13
FC descontado	R\$ 609.408,91	R\$ 567.168,43	R\$ 527.795,38
FC descontado acumulado	R\$ 1.570.317,47	R\$ 2.137.485,90	R\$ 2.665.281,28

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 9	Ano 10	Ano 11
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 2.846.560,99	R\$ 3.025.894,33	R\$ 3.216.525,67
Custo O&M (-)	R\$ 150.354,55	R\$ 158.218,09	R\$ 166.492,89
Custo combustível (-)	R\$ 968.574,91	R\$ 1.019.231,38	R\$ 1.072.537,18
FC período	R\$ 1.727.631,53	R\$ 1.848.444,86	R\$ 1.977.495,60
FC descontado	R\$ 491.100,71	R\$ 456.907,30	R\$ 488.806,67
FC descontado acumulado	R\$ 3.156.381,98	R\$ 3.613.289,29	R\$ 4.102.095,95

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 12	Ano 13	Ano 14
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 3.419.166,79	R\$ 3.634.574,30	R\$ 3.863.552,48
Custo O&M (-)	R\$ 175.200,47	R\$ 184.363,46	R\$ 194.005,67
Custo combustível (-)	R\$ 1.128.630,87	R\$ 1.187.658,27	R\$ 1.249.772,80
FC período	R\$ 2.115.335,44	R\$ 2.262.552,57	R\$ 2.419.774,02
FC descontado	R\$ 522.878,57	R\$ 559.268,39	R\$ 598.131,13
FC descontado acumulado	R\$ 4.624.974,52	R\$ 5.184.242,92	R\$ 5.782.374,05

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 4.106.956,29	R\$ 4.365.694,53	R\$ 4.640.733,29
Custo O&M (-)	R\$ 204.152,16	R\$ 214.829,32	R\$ 226.064,89
Custo combustível (-)	R\$ 1.315.135,91	R\$ 1.383.917,52	R\$ 1.456.296,41
FC período	R\$ 2.587.668,21	R\$ 2.766.947,69	R\$ 2.958.371,98
FC descontado	R\$ 639.632,01	R\$ 683.947,15	R\$ 731.264,31
FC descontado acumulado	R\$ 6.422.006,05	R\$ 7.105.953,20	R\$ 7.837.217,51

TABELA 10 – FLUXO DE CAIXA COMPLETO

(continua)

	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Investimento	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Economia com energia (+)	R\$ 4.933.099,48	R\$ 5.243.884,75	R\$ 5.574.249,49
Custo O&M (-)	R\$ 237.888,09	R\$ 250.329,64	R\$ 263.421,88
Custo combustível (-)	R\$ 1.532.460,71	R\$ 1.612.608,41	R\$ 1.696.947,82
FC período	R\$ 3.162.750,69	R\$ 3.380.946,71	R\$ 3.613.879,79
FC descontado	R\$ 781.783,60	R\$ 835.718,32	R\$ 893.295,81
FC descontado acumulado	R\$ 8.619.001,11	R\$ 9.454.719,43	R\$ 10.348.015,24

FONTE: O autor (2025)