

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARINA ROCHA E SILVA FRANCISCO

**METODOLOGIA DE SELEÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO
DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO NO SETOR DE BEBIDAS UTILIZANDO UMA
CERVEJARIA COMO ESTUDO DE CASO**

PONTA GROSSA

2025

MARINA ROCHA E SILVA FRANCISCO

**METODOLOGIA DE SELEÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO
DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO NO SETOR DE BEBIDAS UTILIZANDO UMA
CERVEJARIA COMO ESTUDO DE CASO**

**Methodology of selection criteria and business case for the applicability of a
cogeneration system in the beverage industry focused in a Brewery**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme

PONTA GROSSA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARINA ROCHA E SILVA FRANCISCO

**METODOLOGIA DE SELEÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO
DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO NO SETOR DE BEBIDAS UTILIZANDO UMA
CERVEJARIA COMO ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/janeiro/2025

Murilo Oliveira Leme
Titulação (Doutorado)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Miguel Holler
Titulação (Mestrado)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jean César Marinozi Vicentini
Titulação (Doutorado)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio nesta fase da minha vida, pelo incentivo e suporte aos meus sonhos mesmo que nesta trajetória peculiar que escolhi seguir, pois afinal, a vida é feita de pequenas escolhas que podem ser definidas como pontos em um universo infinito de possibilidades que resultam em retas com as mais diversas direções.

Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,
a eletricidade e a energia atômica: a vontade.
(Albert Einstein).

RESUMO

Implantar sistemas de cogeração, definido como um sistema que converte uma única entrada de combustível em duas ou mais energias finais, é uma importante estratégia que deve ser estudada e executada por grandes companhias. Por se tratar de um sistema que consome apenas uma fonte de combustível para a geração de duas ou mais formas de energia. A eficiência de uma usina de cogeração é em média 40% maior do que as de sistemas termelétricos, consumindo cerca de 48% menos combustível para este processo. Mas selecionar a cogeração que proverá maior performance para a Indústria selecionada nem sempre é uma tarefa simples.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma metodologia de seleção, análise de viabilidade e desempenho de cogeração dentro do ramo de bebidas, aplicando-a em uma Cervejaria que atualmente compra 100% da energia elétrica consumida e gera vapor através de caldeiras flamo-tubulares convencionais. Ao decorrer deste trabalho será possível verificar como a energia elétrica é produzida através dos processos convencionais de produção, qual o princípio de funcionamento de unidades de cogeração, as tecnologias mais utilizadas, quais as variáveis que devem ser avaliadas para se selecionar o processo de cogeração e por fim, toda esta metodologia será aplicada em um estudo de caso tendo como objetivo verificar, com dados e fatos, os benefícios de se utilizar este sistema para gerar eletricidade e vapor em uma indústria do ramo de bebidas.

Palavras-chave: cogeração; Fontes de energia; energia elétrica; vapor; Indústria de Bebidas.

ABSTRACT

Every industry requires essential forms of energy for its operation, including electrical power, steam, water, compressed air, and refrigeration. In the pursuit of optimizing industrial processes, cogeneration represents a crucial strategy that should be explored and implemented by major companies. Cogeneration systems utilize a single fuel source to generate two or more forms of energy, achieving an average efficiency improvement of approximately 40% compared to conventional thermal power systems, and consuming about 48% less fuel in the process. However, selecting the cogeneration system that will deliver the highest performance for a given industry is not always straightforward due to the multitude of variables involved. This thesis presents a methodology for the selection, feasibility analysis, and performance evaluation of cogeneration systems within the industrial sector. The methodology is applied to a beverage industry that currently relies on purchasing 100% of its electrical energy and generating steam through conventional fire-tube boilers. The study explores the production of electrical energy through conventional methods, the operating principles of cogeneration units, the most commonly used technologies, and the variables that must be assessed to select the optimal cogeneration process. Finally, the methodology is applied to a case study, demonstrating the benefits of utilizing cogeneration systems for generating electricity and steam in a beverage industry.

Keywords: Cogeneration; Energy Sources; Electrical Energy, Steam, Beverage Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Conversão de energia	17
Figura 2 Divisão da Demandas x Setor	18
Figura 3 Consumo Industrial x Segmento	18
Figura 4 Matriz Energética Brasileira	19
Figura 5 Ciclo de Brayton Ideal	24
Figura 6 Ciclo Rankine Ideal	25
Figura 7 turbina a gás e seus componentes	29
Figura 8 Esquemático de uma turbina a vapor	31
Figura 9 turbinas a vapor por condensação e contrapressão	32
Figura 10 Funcionamento de motor a combustão Interna	34
Figura 11 Etapa 1: Definição da Tecnologia de cogeração.....	46
Figura 12 Etapa 2: Seleção da Caldeira de recuperação	48
Figura 13 Etapa 3: Aplicação dos ciclos termodinâmicos	49
Figura 14 Etapa 4: Análise de viabilidade das Cogerações selecionadas.....	51
Figura 15 Etapa 5: Seleção final da cogeração a ser aplicada.....	53
Figura 16 Processo da Fabricação da Cerveja	39
Figura 17 Relação Pressão x Temperatura da Água e vapor	40
Figura 18 Caldeira Flamo-tubular.....	42
Figura 19 Caldeira Flamo-tubular Escocesa	43
Figura 20 Caldeira Aquatubular.....	44
Figura 21 Seleção da tecnologia de cogeração	55
Figura 22 Seleção da caldeira de recuperação	57
Figura 23 Aplicação da análise de viabilidade para a turbina MCT6000	62
Figura 24 Aplicação da análise de viabilidade para a turbina SGT 300	65
Figura 25 Aplicação da análise de viabilidade para a turbina Spirity 12.....	68
Figura 26 Aplicação da análise de viabilidade para a turbina THM1304.....	71
Figura 27 Seleção da turbina a gás mais eficiente a ser aplicada.....	72
Figura 28 Aplicação da análise de viabilidade para o motor MAN 35/44G.....	75
Figura 29 Aplicação da análise de viabilidade para o motor J920.....	77
Figura 30 Aplicação da análise de viabilidade para o motor B:35/40L	79
Quadro 1 Parâmetros de seleção de uma cogeração.....	48
Quadro 2 Dados da Caldeira de recuperação.....	60
Quadro 3 Ficha Técnica das turbinas Selecionadas.....	61
Quadro 4 Ficha Técnica dos motores a Combustão Interna selecionados.....	67
Quadro 5 Comparativo entre as Cogerações de maior eficiência.....	72
Gráfico 1 Consumo de energia elétrica.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Coef.	Coeficiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cogen	Associação da Indústria de cogeração de energia
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
IBGE	Índice Brasileiro de Geografia e Estatística
ANEEL	Agência Nacional de energia elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_{add}	Calor líquido adicionado
W	Trabalho realizado
W_t	Trabalho realizado pela turbina
W_c	Trabalho realizado pelo Compressor
W_b	Trabalho realizado pela bomba
Q_{re}	Calor líquido rejeitado
H	Entalpia
E'	Potência elétrica gerada
S'	Potência térmica gerada
H_e	Entalpia de entrada
H_s	Entalpia de saída
Q_{in}	Calor necessário na entrada
Q_{out}	energia de vapor produzida
E_{vapor}	Calor gerado pelos gases de exaustão
η_{Ciclo}	Eficiência do Ciclo termodinâmico
F_{up}	Fator de utilização
P_{Bruta}	Potência bruta
$P_{Instalada}$	Potência instalada
$E_{vapor\ gerado}$	energia do vapor Gerado
$E_{vapor\ Consumido}$	energia do vapor consumido
C	Consumo de combustível
n_{th}	Rendimento do térmico
Q_H	Calor gerado na combustão
Q_L	Calor rejeitado pelo sistema
η_{Global}	Eficiência global
η_{ee}	Rendimento elétrico equivalente
C_e	Autoconsumo de eletricidade
C_v	Autoconsumo de vapor
E_t	energia da Utilidade Calor
E_f	energia da Fonte Combustível
X	Fator de Compensação
$F_c\%$	Fator da cogeração
$CHPH_n$	Rendimento térmico da Instalação
$CHPH$	Calor útil gerado
$CHPE_n$	Rendimento elétrico da Instalação
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor
$\dot{W}$	Potência do eixo
$\dot{m}$	Vazão mássica
n_t	Rendimento global
C_s	Consumo específico
PCI	Poder Calorífico Inferior do Combustível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema Estudado.....	13
1.2	Delimitação do Tema.....	14
1.3	Objetivo Geral do Trabalho de Conclusão de Curso.....	14
1.4	Objetivos Específicos do Trabalho de Conclusão de Curso	14
2	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	16
2.1	Consumo Brasileiro de energia elétrica	17
2.1.1	Matriz elétrica Brasileira	19
2.2	cogeração Erro! Indicador não definido.	
2.3	A Teoria De Sistema De cogeração	22
2.3.1	Primeira Lei Da Termodinâmica	22
2.3.1.1	<u>Ciclos Termodinâmicos</u>	<u>23</u>
2.3.1.2	<u>Ciclo De Brayton.....</u>	<u>24</u>
2.3.1.3	<u>Ciclo De Rankine.....</u>	<u>25</u>
2.3.1.4	<u>Ciclo de Otto.....</u>	<u>27</u>
2.4	cogeração Aplicada.....	27
2.4.1	Turbina a Gás.....	28
2.4.2	Turbina a Vapor.....	30
2.4.3	Motor a Combustão Interna.....	32
2.4.4	Geradores Elétricos.....	35
2.4.5	Classificação e Seleção de Sistemas de cogeração	36
2.5	Consumo e produção de energias dentro de uma cervejaria.....	38
2.6	Energias vitais em uma cervejaria	39
2.6.1	Vapor.....	40
6.1.1	Geração de vapor industrial	41
2.6.1.1.1	<i>Caldeiras Flamo-tubulares</i>	<i>42</i>
2.6.1.1.2	<i>Caldeiras Aquatubulares</i>	<i>43</i>
2.6.1.1.3	<i>Caldeiras Mistas</i>	<i>44</i>
3	METODOLOGIA DE TRABALHO.....	44
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	51
4.1	Cenário De Aplicação Da cogeração.....	54
4.2	Seleção das tecnologias de cogeração	55
4.3	Seleção da Caldeira de recuperação	57

4.4	Sistema de cogeração por turbina a gás.....	58
4.4.1	Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo MGT 6000.	59
4.4.2	Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo SGT 300.	63
4.4.3	Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo Spirit 12.	66
4.4.4	Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo THM 1304.....	69
4.4.5	Definição da cogeração por turbina a gás de melhor Eficiência	72
4.5	Sistema de cogeração por motor a combustão.....	73
4.5.1	Cálculo de Eficiência motor a combustão Modelo MAN V35/44G	73
4.5.2	Cálculo de Eficiência motor a combustão Modelo J920	76
4.5.3	Cálculo de Eficiência motor a combustão Modelo Bergen B35:40L	78
4.5.4	Definição da cogeração por motor a combustão de melhor Eficiência..	80
4.6	Definição do sistema de cogeração maior Eficiência	80
5	CONCLUSÃO.....	79
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

A cogeração pode ser basicamente definida como um sistema que comumente gera energia térmica e elétrica a partir de uma mesma fonte combustível, sistema esse que apresenta benefícios significativos ao ser instalado dentro de um setor Industrial, ocasionando a economia de energia primária devido ao uso mais eficiente desta energia aproveitando fontes oriundas do próprio processo.

Há uma infinidade de tecnologias de cogeração disponíveis no mercado, como turbina a gás, turbina a vapor, motor por combustão Interna, ciclo combinado, entre outras. Contudo, realizar a seleção da tecnologia mais eficiente a ser instalada não é uma tarefa simples, uma vez que existem muitas variáveis que impactam nesta decisão.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de seleção que pode ser aplicada nos mais diversos ramos da indústria de bebidas. Para realizar a simulação desta metodologia e exemplificar o seu uso, aplicaremos os conhecimentos para o estudo da instalação de uma unidade de cogeração inserida em uma indústria brasileira do ramo de bebidas. Situando as necessidades do setor e suas estratégias além de justificar a partir da apresentação do cenário atual, que utiliza sistemas tradicionais na geração de energias vitais, quais tecnologias de cogeração são aplicáveis, verificando qual destas possui a maior eficiência, e, pesquisando dentro do mercado nacional e Internacional, sistemas de cogeração reais a serem instalados.

1.1 Problema Estudado

A aplicação eficaz de sistemas de cogeração no setor industrial enfrenta vários desafios. A escolha do sistema de cogeração mais adequado envolve uma análise complexa de múltiplas variáveis, como as características específicas da indústria, as fontes de energia disponíveis, e as tecnologias de cogeração apropriadas. Além disso, a performance desses sistemas deve ser avaliada cuidadosamente, de forma a garantir que os benefícios esperados sejam efetivamente alcançados.

A questão central é como desenvolver uma abordagem que permita avaliar de forma eficaz a viabilidade e o desempenho de diferentes sistemas de cogeração, considerando as particularidades operacionais e as necessidades energéticas específicas do processo industrial de bebidas.

1.2 Delimitação do Tema

A delimitação do tema neste trabalho de conclusão de curso foca na aplicação de uma metodologia específica para a seleção e análise de viabilidade de sistemas de cogeração no setor de bebidas que dependam de energia elétrica e vapor para os seus processos fabris. Uma cervejaria de médio porte instalada no estado do Rio de Janeiro será utilizada como exemplo de aplicação da metodologia aplicada.

1.3 Objetivo Geral do Trabalho de Conclusão de Curso

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é propor e aplicar uma metodologia factível para a seleção e análise de viabilidade de sistemas de cogeração de energia elétrica no setor de bebidas, com a aplicação de um estudo de casos para a validação do estudo.

1.4 Objetivos Específicos do Trabalho de Conclusão de Curso

Primeiramente, a pesquisa envolve a revisão dos princípios teóricos da cogeração e das leis termodinâmicas relevantes para entender como esses sistemas otimizam a eficiência energética, além de uma revisão bibliográfica das tecnologias de cogeração existentes e seu funcionamento e quais as referências no que tange a seleção de cogeração para a aplicação industrial.

Propor uma metodologia com procedimento claro dos passos a seguir e como ser implementada.

Selecionar uma Indústria do ramo de bebidas que utilize energia elétrica e vapor como as principais fontes de energia em seu processo fabril para aplicação como estudo de caso.

Aplicar a metodologia à Indústria selecionada, avaliando a metodologia através de um estudo de caso real com foco na viabilidade prática e o desempenho da cogeração no ramo de bebidas.

Verificar os resultados encontrados, permitindo comparar e analisar a performance e aplicabilidade das tecnologias de cogeração indicadas para o cenário proposto através destes principais indicadores: quantidade de vapor gerada, fator de utilização da cogeração, energia térmica total gerada, eficiência global, rendimento elétrico da instalação e rendimento térmico da instalação.

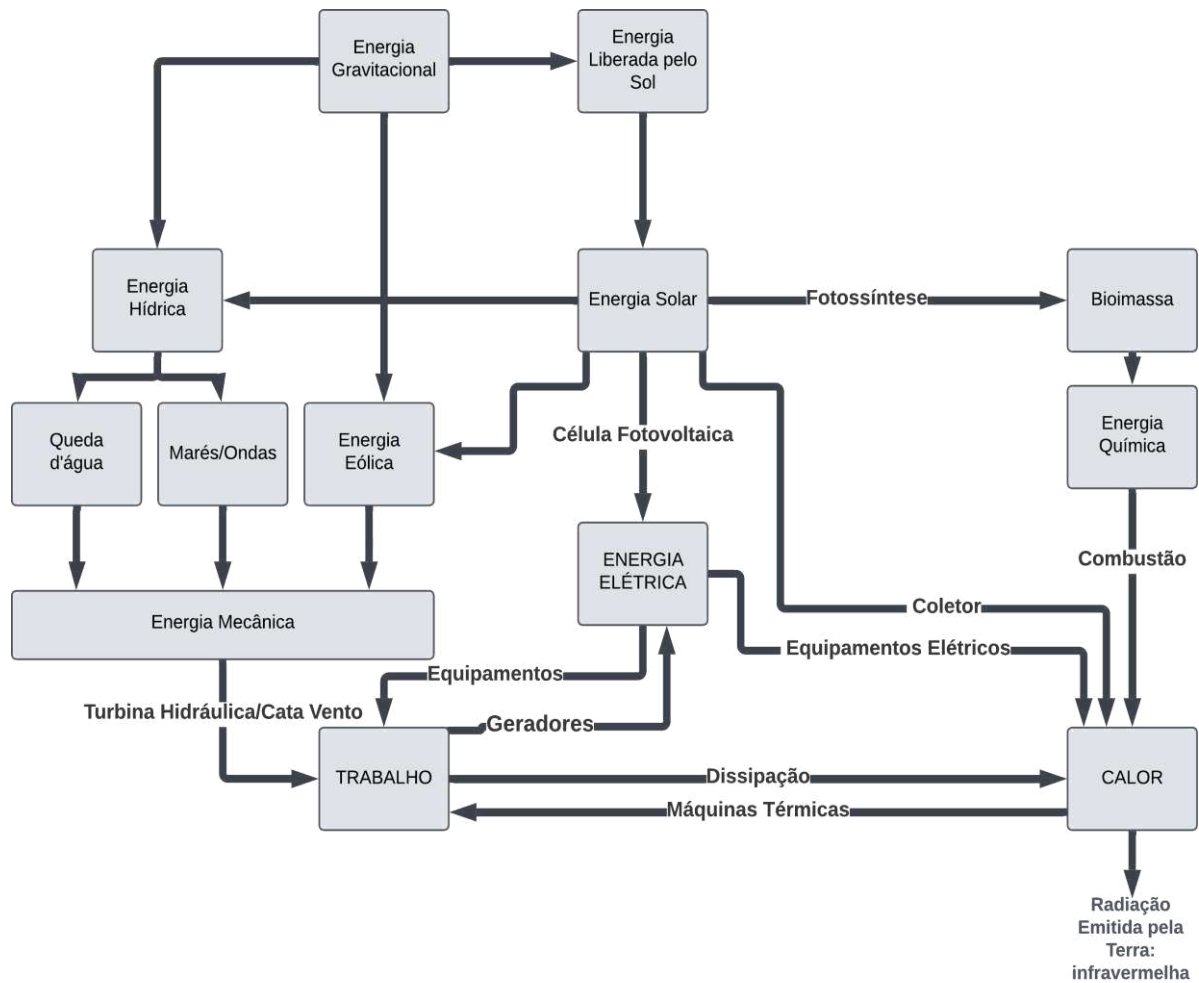
2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

energia pode ser definida como uma grandeza física que compreende a capacidade de um sistema produzir trabalho, e esta energia pode ser transferida e transformada nas mais diversas formas de trabalho, como mecânico, térmico, elétrico entre outros.

Dentre as diversas formas de energia, a energia elétrica possui papel fundamental para a sociedade atual, indo muito além do que apenas um insumo produtivo. Este papel de protagonismo da energia elétrica na matriz energética brasileira e mundial se deve principalmente a facilidade de transformação em outras modalidades de energia, tais como luz, calor e movimento. Além disso, a energia elétrica possui fácil transporte, menores perdas nos processos de geração, transmissão e distribuição (FREITAS, 2015).

A energia elétrica é classificada como uma fonte de energia secundária, ou seja, há a necessidade de uma fonte primária de energia para que a geração aconteça. O processo de geração é dividido em duas classificações: fontes renováveis e não renováveis.

Figura 1 Conversão de energia



Fonte: Adaptado de Lineu Reis (2011).

2.1 Consumo Brasileiro de Energia Elétrica

O consumo de energia elétrica teve um aumento de 4,4% no ano de 2023 (EPE, 2024), em relação ao ano anterior. O setor com maior demanda por energia elétrica é o Industrial (35,4%), seguido do residencial (31,0%) e do comercial (18,4%), conforme podemos observar na Figura 2 (EPE,2024).

Figura 2 Divisão da Demandas x Setor



Fonte: EPE (2024).

Dentro do setor industrial, os maiores consumos estão nos setores: metalúrgicos, produtos alimentícios e químicos, que somados consomem 49,8%, como pode ser analisado na Figura 3. Comparando os anos de 2021 e 2022 o setor que teve o maior aumento de consumo de energia elétrica foi o alimentício, com um aumento de 24,1%, fechando 2021 com 1,8% do consumo total de energia elétrica (EPE,2022).

Figura 3 Consumo Industrial x Segmento

CONSUMO INDUSTRIAL POR SEGMENTO			
10 MAIORES DE 2023		PARTICIPAÇÃO	GWh
	METALÚRGICO	25,8%	47.585
	PRODUTOS ALIMENTÍCIOS	13,8%	25.533
	QUÍMICO	10,2%	18.835
	PRODUTOS MINERAIS NÃO METÁLICOS	7,6%	14.031
	EXTRAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS	7,5%	13.795
	BORRACHA E MATERIAL PLÁSTICO	5,5%	10.199
	PAPEL E CELULOSE	5,1%	9.466
	AUTOMOTIVO	3,6%	6.581
	TÊXTIL	3,3%	6.031
	PRODUTOS METÁLICOS (EXCETO MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS)	2,3%	4.328
TOTAL		84,7%	156.385

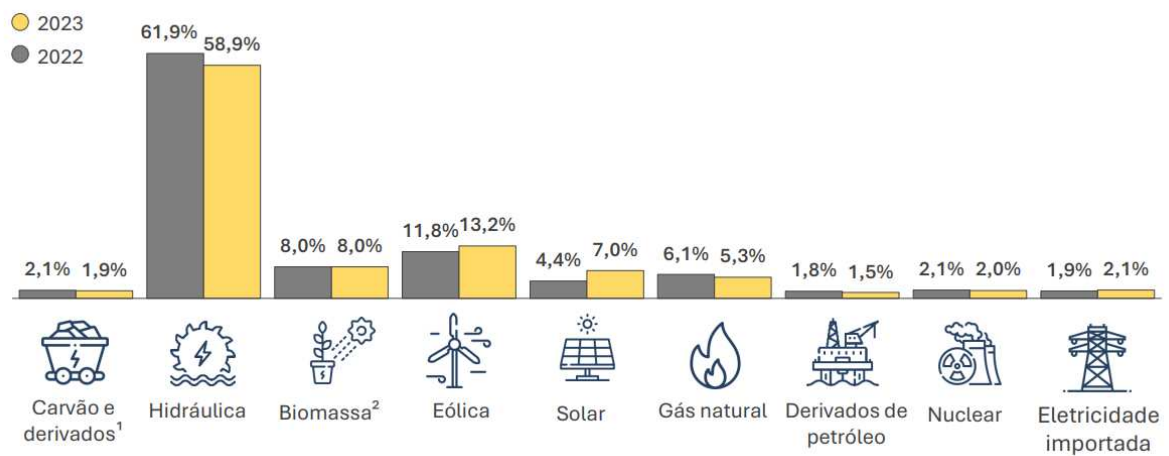
Fonte: IPE (2024).

Tendo em vista os impactos ambientais com o aumento de 113,2% de uso de petróleo como fonte para a geração de energia elétrica (EPE,2022), e um aumento de cerca de 45% de emissão de gases de efeito estufa provenientes da geração de energia elétrica em relação ao ano de 2020 (EPE,2022), atrelados à escassez hídrica, classificada como a mais severa dos últimos 90 anos, pode-se verificar a importância de reduzir a dependência direta de energia elétrica comprada, principalmente dentro do Setor Industrial, pois conforme visto, em casos de crise hídrica, há uma mudança drástica na Matriz Energética Brasileira, que normalmente é bem distribuída e renovável. E tomando como base o alto crescimento no consumo de energia elétrica pelo setor Industrial, faz-se necessário o estudo e aplicação de formas alternativas mais eficientes de geração de energia, como é o caso dos sistemas de cogeração.

2.1.1 Matriz Elétrica Brasileira

O Brasil possui uma matriz elétrica bem diversificada, sendo a maior contribuição gerada por hidrelétricas, no ano de 2023 houve uma redução de 3% em relação a 2022, devido a uma redução dos reservatórios, totalizando 58,9% da matriz elétrica em 2023. Na Figura 4 é verificado é a divisão da matriz elétrica brasileira no ano de 2023, observando a soma dos crescimentos de fontes eólica e solar (BEN,2024).

Figura 4 Matriz Energética Brasileira



Fonte: BEN (2024).

2.2 Cogeração

Segundo a Associação da Indústria de cogeração de energia - COGEN, cogeração pode ser definido como: “produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível”, o resultado desta produção resulta em calor e energia mecânica que na maioria das vezes são convertidas em energia elétrica (ANEEL,2006). Atualmente o sistema de cogeração mais difundido e utilizado são os realizados a partir do gás natural e/ ou biomassa em energia elétrica e térmica (COGEN, 2022).

A Agência Nacional de energia elétrica -ANEEL, estabelece os requisitos básicos para qualificar os sistemas de cogeração de energia no Brasil. A resolução normativa Aneel nº 1.031, de 26 de julho de 2022, indica as seguintes exigências para que novos sistemas sejam classificados como “cogeração Qualificada”:

“I - estar regularizada perante a ANEEL, conforme o disposto na legislação específica e na Resolução no 112, de 18 de maio de 1999; e

II – preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações a seguir:

a) $\frac{Et}{Ef} \geq 15\%$

b) $\left(\frac{Et}{Ef}\right) \div X + \frac{Ee}{Ef} \geq Fc\%$

§ 1º Os valores de “X” e “Fc” das fórmulas de que trata o inciso II deverão ser aplicados em função da potência elétrica instalada na central de cogeração e da respectiva fonte, obedecida a seguinte tabela:

Fonte/Potência elétrica Instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, gás natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,5	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,6	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

§ 2º No caso de queima alternada ou mesclada de diferentes fontes, os valores de “X”(Fator de ponderação) e “Fc” (Fator de cogeração), representativos dessa situação, serão obtidos por ponderação dos valores contidos na tabela de que trata o

parágrafo anterior, segundo a participação energética de cada fonte.

§ 3º Poderão candidatar-se à qualificação os blocos de cogeração pertencentes a uma central termelétrica contendo blocos de geração pura, desde que se distingam os primeiros dos segundos, e os blocos de cogeração apresentem medições perfeitamente individualizadas que permitam o cômputo das suas energias E_f (energia do combustível), E_e (energia elétrica útil gerada) e E_t (energia térmica útil gerada) e a sua fiscalização.”(ANEEL,2022)

Internacionalmente há legislações que definem critérios diferentes para determinar a eficiência e aplicabilidade de sistemas de cogeração. O Parlamento Europeu, por exemplo, decretou a Diretiva 2004/8/CE que determina regras para a produção, geração, transporte, distribuição e o fornecimento de energia elétrica. A normativa determina:

“Para efeitos de determinação da eficiência da cogeração nos termos do anexo III, a Comissão deve estabelecer valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade e de calor, nos termos do nº2 do artigo 14.o, até 21 de Fevereiro de 2006. valores de referência harmonizados em matéria de eficiência consistem numa matriz de valores diferenciados por fatores pertinentes, incluindo o ano de construção e os tipos de combustíveis, e devem ter por base uma análise bem documentada que tenha, designadamente, em conta os dados operacionais de utilização em condições reais e o comércio transfronteiriço de eletricidade, a estrutura de combustíveis, as condições climáticas, bem como as tecnologias de cogeração aplicadas nos termos dos princípios estabelecidos no anexo III” (JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA,2004).

O processo de cogeração não é algo novo, há relatos de sistemas em funcionamento desde os primórdios do século XX onde ainda não havia tecnologia que permitisse o uso de usinas centralizadas de geração de energia com qualidade, fazendo com que as pessoas tivessem que instalar sua própria central. Com o passar dos anos e o desenvolvimento tecnológico, o setor energético evoluiu, permitindo a geração centralizada bem como a transmissão de energia elétrica de modo eficiente e com baixo custo (COGEN,2022). Esta evolução fez com que o uso de usinas de cogeração entrasse em desuso. Apenas nas últimas décadas, após uma constante crescente nos preços de compra de energia elétrica devido a crises sistêmicas no setor energético é que o uso de sistemas de cogeração voltou a ser de interesse da população e grandes empresas (COGEN,2022).

Com a alta procura por sistemas que fossem mais eficientes e com um menor custo, investiu-se em desenvolvimento de novas tecnologias para os sistemas de cogeração, tornando o mercado competitivo e os sistemas mais adaptáveis. Sendo

as principais tecnologias, segundo a Associação da Indústria de cogeração de energia:

“motores a combustão (ciclo Otto ou Diesel), caldeiras que produzem vapor para as turbinas a vapor, turbinas a gás natural, caldeiras de recuperação e trocadores de calor, geradores elétricos, transformadores e equipamentos elétricos associados, sistemas de chillers de absorção, que utilizam calor (vapor ou água quente) para produção de frio (ar condicionado), sistemas de ciclo combinado (turbinas a vapor e gás natural) numa mesma central, e, equipamentos e sistemas de controle de geração e de uso final de energia” (COGEN, 2022).

Implantar sistemas de cogeração podem ser bastante eficientes se comparados a tecnologia de geração tradicional, já que podem chegar a ter 40% mais eficiência energética do que sistemas termelétricos, consome uma média de 48% menos combustíveis para a geração de energia e não necessitam de grandes investimentos na infraestrutura de transmissão e distribuição por se tratar de uma forma de geração não centralizada (COGEN, 2022).

2.3 A Teoria De Sistema De Cogeração

Sistemas de cogeração têm por base conceitos fundamentais da Termodinâmica para o seu funcionamento e dimensionamento, o mais importante deles é a Primeira Lei da Termodinâmica ou princípio da conservação de energia (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018).

2.3.1 Primeira Lei Da Termodinâmica

A primeira Lei da Termodinâmica basicamente define que a energia não pode ser criada ou perdida e sim transformada em outras formas de energia, concluindo assim como a energia térmica é transformada em outras formas de energia (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018). Em termos matemáticos, a primeira lei da Termodinâmica pode ser representada conforme (1).

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

Onde:

ΔU : energia interna do material que depende de seu estado (temperatura, pressão e volume)

Q: Calor adicionado ao sistema;

W: Trabalho realizado;

Porém quando aplicamos a Primeira Lei da Termodinâmica na engenharia, o foco é o estudo de ciclos onde as características mudam constantemente, conforme (2), onde a diferencial inexata δ representa que tanto calor como trabalho são funções de linha.

$$\int \delta Q = \int \delta W \quad (2)$$

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica em regime permanente temos:

$$-\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s (h_s + ec_s + ep_s) - \sum \dot{m}_e (h_e + ec_e + ep_e) \quad (3)$$

Onde:

$\dot{Q}$: Taxa de transferência de calor;

$\dot{W}$: Potência do eixo;

$\dot{m}$: Vazão mássica;

Os subscritos “e” e “s” representam as equações de entrada e saída de cada equipamento.

Desprezando as variações das energias cinéticas (ec) e potenciais (ep), temos (4), que é amplamente utilizada na indústria para realizar a avaliação de sistemas e suas perdas térmicas através do balanço de massa.

$$-\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad (4)$$

2.3.1.1 Ciclos Termodinâmicos

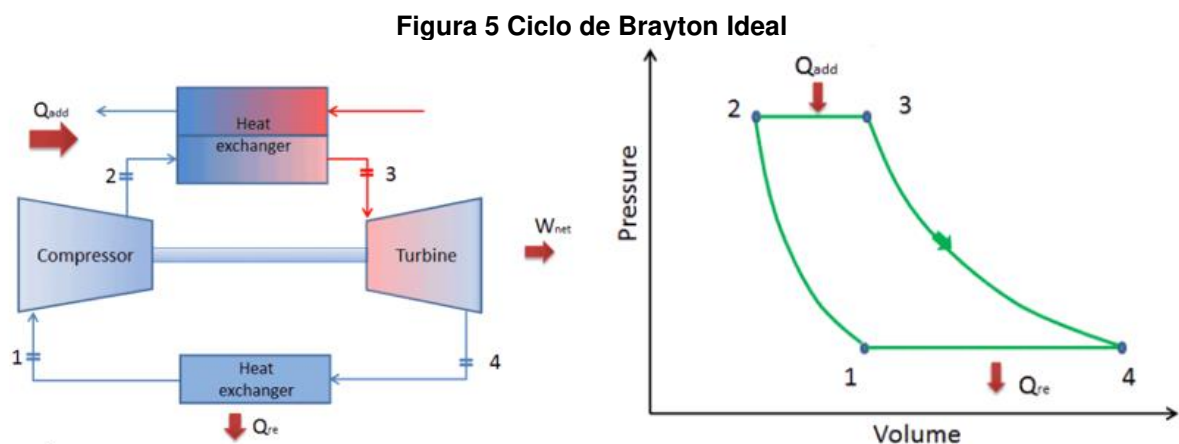
Um ciclo termodinâmico é um sistema onde se transfere calor e trabalho, variando pressão, temperatura ou outras variáveis de forma cíclica em que, de tempos em tempos as características finais desse sistema se igualam as do estado inicial (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018). Podemos classificar os ciclos termodinâmicos em duas grandes classes: ciclos de bomba de calor, onde se transfere calor através de uma entrada de trabalho mecânico, refrigeradores e aquecedores são os principais equipamentos que aplicam esta classe de ciclos. A outra grande classe é a de ciclos de energia, onde se converte uma entrada de calor em trabalho mecânico, motores e geradores de energia se encontram dentro desta classe (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018).

Dentro da classe Ciclos de energia, existem diversos ciclos termodinâmicos, estes são definidos de acordo com seus processos termodinâmicos constituintes. Dentre os ciclos mais aplicados nas tecnologias encontradas, podemos citar: Ciclo de Carnot, Ciclo de Otto, Diesel, Brayton e Rankine.

2.3.1.2 Ciclo De Brayton

O Ciclo de Brayton parametriza o funcionamento de motores térmicos de pressão constante (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018), como é o caso de turbinas a gás ou aviões. Em um ciclo de Brayton ideal, é constituído por quatro etapas cíclicas: dois processos isentrópicos, onde a entropia do fluido ou gás permanece constante (adiabáticos reversíveis), alternados com dois processos isobáricos, processo este onde a pressão do sistema permanece constante.

A primeira etapa do ciclo, é a compressão isentrópica, onde o fluido de trabalho é comprimido de forma adiabática, aumento sua temperatura (energia interna) e sua pressão. No segundo momento acontece a adição de calor isobárico, onde acontece a transferência de calor, com pressão constante, para o gás a partir de uma fonte externa. Neste momento acontece o processo de expansão isentrópica, ou seja, o gás previamente comprimido e aquecido se expande, movimentando as turbinas, perdendo assim energia em forma de trabalho. Na última etapa do ciclo, o gás perde calor, retornando assim ao seu estado inicial. A Figura 5, representa o funcionamento do Ciclo de Brayton Ideal, indicando os quatro processos indicados anteriormente.



Fonte: F.J. Gutiérrez Ortiz (2018).

O rendimento térmico obtido em Ciclos de Brayton, pode ser definido conforme (5):

$$\eta_{th} = \frac{\text{Trabalho}}{\text{Entrada de Calor}} = \frac{W_T - W_C}{Q_{in}} = \frac{C_P(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (5)$$

2.3.1.3 Ciclo De Rankine

O Ciclo de Rankine é um ciclo termodinâmico que caracteriza um motor térmico de pressão constante que por finalidade converte calor em trabalho mecânico. O calor necessário é fornecido externamente ao circuito fechado onde se realiza o ciclo. Normalmente o fluido de trabalho utilizado é a água, por ser um fluido abundante e de fácil uso, por não ser tóxica ou reativa, ter calor específico alto e calor de vaporização alto, tornando assim um fluido de arrefecimento eficaz (F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ, 2018). Diferentemente do Ciclo de Brayton, o fluido utilizado no Ciclo de Rankine sofre mudança de fase líquida para gasosa (vapor) retornando novamente ao seu estado inicial, ao final do processo.

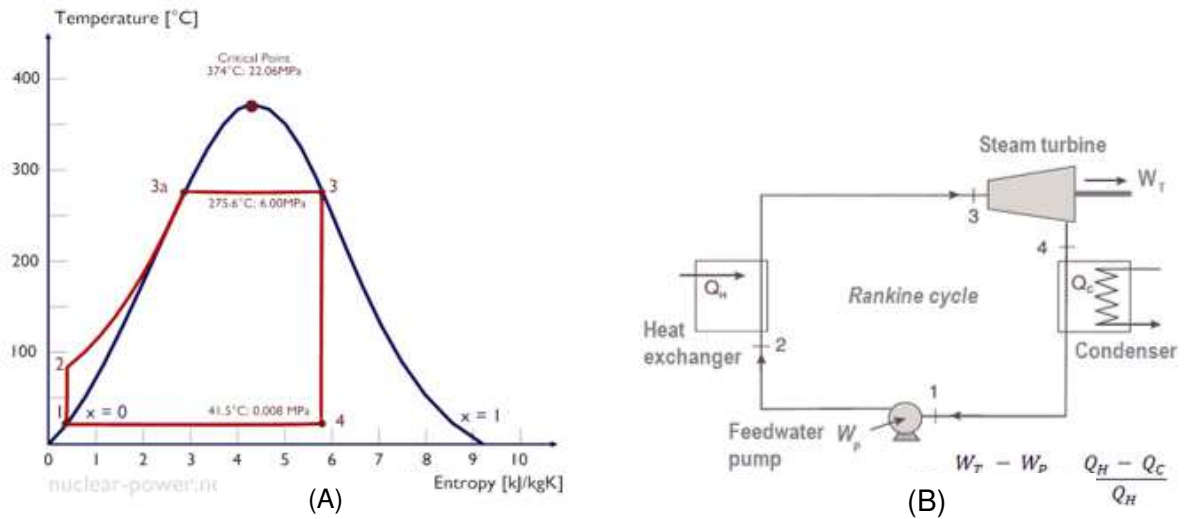
O Ciclo de Rankine consiste basicamente em quatro etapas: duas isobáricas (pressão constante) e duas fases isentrópicas (entropia constante). A Figura 6-A demonstra o esquema de um ciclo de Rankine ideal. No gráfico de temperatura versus entropia, representado na Figura 6-A percebemos que nos instantes 1 a 2 o fluido ainda em estado líquido é comprimido de maneira isentrópica, durante este processo há o aumento da entalpia e da pressão do fluido, porém a entropia do fluido permanece constante.

Entre o estado 2 e 3, realiza-se uma transferência de calor a pressão constante para o fluido até o seu estado de ebulição (3ª) e em seguida acontece a evaporação (3ª -3).

No intervalo entre os estados 3 e 4 acontece a expansão isentrópica, onde o vapor se expande adiabaticamente produzindo trabalho o que gera uma redução da entalpia proporcional ao trabalho gerado pelo sistema, novamente a entropia permanece constante.

Na última etapa do Ciclo de Rankine (4-1), aplica-se uma pressão constante no qual o calor é reduzido pelo vapor parcialmente condensado, havendo assim uma transferência de calor do vapor para a água de resfriamento

Figura 6 Ciclo Rankine Ideal



Fonte: Fonte: F.J. Gutiérrez Ortiz (2018).

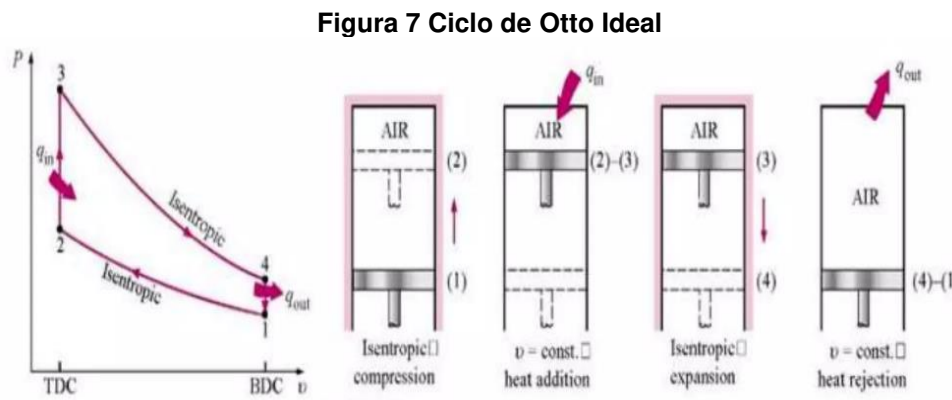
Na prática, o Ciclo de Rankine pode ser ilustrado no circuito da Figura 6-b, onde a primeira etapa ocorre na bomba centrífuga, geralmente por bombas de condensação e depois bombas de alimentação de água, o trabalho realizado pelo compressor é dado por: $W = H_2 - H_1$. Após, o condensado líquido é enviado para a caldeira de alta pressão, onde acontece uma transferência do calor de pressão constante para o condensado líquido de uma fonte externa, tendo em vista que a câmara permite fluxo de entrada e saída, logo a água de alimentação proveniente de um circuito secundário é aquecida até o ponto de ebulição e depois é evaporada na caldeira. O calor líquido adicionado é representado como $Q_{add} = H_3 - H_2$. O vapor fornecido pela caldeira é enviado diretamente para a turbina a vapor onde produz trabalho no rotor e perde entalpia. O trabalho realizado pela turbina é dado por $W_t = H_4 - H_3$. Na etapa final, o vapor já parcialmente condensado é enviado ao condensador onde troca calor com uma água de resfriamento até que o mesmo seja totalmente condensado. O calor líquido rejeitado é dado por $Q_{Rej} = H_4 - H_1$.

A eficiência térmica, em termos de entalpias específicas no ciclo de Rankine é definida conforme (6):

$$\eta_{th} = \frac{\text{Trabalho}}{\text{Calor de entrada}} = \frac{W_T - W_P}{Q_{in}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} = 1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad (6)$$

2.3.1.4 Ciclo de Otto

O ciclo de Otto, idealizado pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto no século XIX, representa um modelo teórico fundamental para a análise do desempenho e eficiência dos motores de combustão interna de quatro tempos. Este ciclo é composto basicamente por quatro etapas, sendo elas: admissão, compressão, combustão e expansão, conforme apresentado na Figura 7.



Fonte: Cengel (2006)

A primeira fase é a admissão, representada pelo processo 1-2 da figura 7, nesta etapa acontece a compressão adiabática da mistura ar-combustível, isto ocorre através do movimento do pistão do motor. Já no processo 2 ocorre a compressão, na etapa 3 acontece a ignição, neste ponto acontece uma transferência de calor para a mistura, esta é provocada pela vela, resultando em rápida expansão dos gases e no movimento descendente do pistão, gerando trabalho mecânico. Entre os pontos 3 e 4 acontece a expansão adiabática da mistura e por fim ocorre a exaustão do queimado, retornando assim ao estado inicial (1) do ciclo.

A eficiência térmica, em termos de entalpias específicas, deste ciclo é dada pela (7):

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (7)$$

2.4 Cogeração Aplicada

Entendemos que através da aplicação de ciclos termodinâmicos, há a conversão da entrada de calor em trabalho mecânico, mas se faz necessário

compreender como isto ocorre na prática e como é possível gerar energia útil ao aplicar estes ciclos. Para isto, primeiramente, deve-se conhecer quais as principais tecnologias existentes de cogeração e seus respectivos processos.

2.4.1 turbina a gás

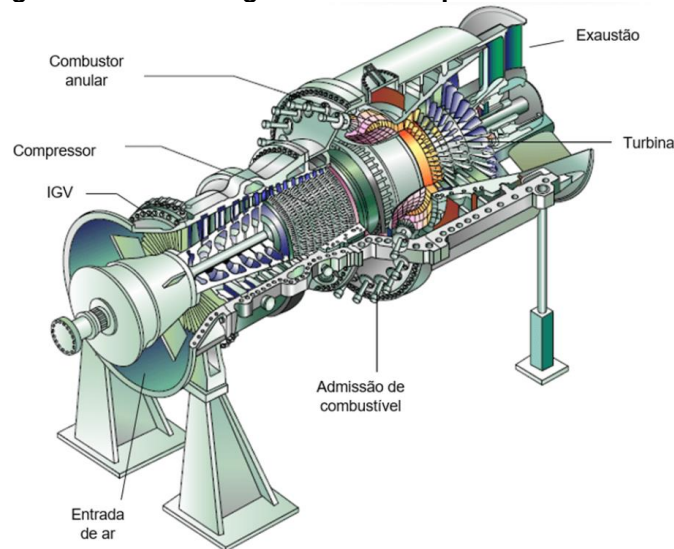
A primeira turbina a gás foi desenvolvida há aproximadamente 150 anos, com base no conhecimento acumulado na evolução dos motores térmicos. A turbina a gás é uma máquina térmica que converte diretamente a energia liberada pela combustão dos gases produzidos, que se expandem e atuam sobre as lâminas móveis de um rotor.

O significativo avanço tecnológico nas turbinas a gás ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, impulsionado pelas necessidades da aviação militar, que buscava aumentar a velocidade das aeronaves. Este progresso continuou no período pós-guerra, com a industrialização e a instalação de sistemas de potência a gás. Mas foi na década de 1950 que o uso de turbinas a gás para gerar energia elétrica se expandiu.

Nos últimos 30 anos, o desenvolvimento da metalurgia avançada permitiu a fabricação de materiais capazes de suportar temperaturas superiores a 500°C. Este avanço foi crucial para o aprimoramento das turbinas a gás modernas, possibilitando um desempenho mais eficiente e robusto das máquinas.

A turbina a gás utiliza o Ciclo de Brayton, apresentado anteriormente, como princípio do seu funcionamento, este ciclo ocorre dentro dos três componentes principais que constituem a turbina a gás, sendo eles: compressor, câmara de combustão e turbina, conforme pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 - Turbina a gás e seus componentes



Fonte: Siemens Energy (2023)

No compressor acontece o aumento da pressão do ar antes de sua entrada na câmara de combustão. A compressão ocorre por estágios, cada um deles é formado por um conjunto de rotor com paletas e um anel com aletas estatoras. O rotor realiza a aceleração do ar, funcionando como um ventilador, e o anel de aletas estatoras tem a finalidade de direcionar o fluxo de ar com um ângulo definido sobre as palhetas do próximo estágio rotor de forma a promover a desaceleração do fluxo de ar e, assim, aumentar a pressão do ar. Este componente é essencial para a eficiência da turbina, pois a alta pressão do ar melhora a eficiência da combustão e a geração de energia.

Na câmara de combustão, o ar comprimido é misturado com o combustível, como gás natural, querosene ou diesel, e inflamado. A combustão gera gases quentes e de alta pressão que se expandem rapidamente. Todo o processo de combustão ocorre de maneira contínua e a pressão constante. A câmara de combustão deve ser projetada para assegurar uma mistura homogênea, garantir o resfriamento correto da camisa, uma queima eficiente do combustível e baixa emissão de gases de poluentes como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

A turbina é constituída por um conjunto de lâminas montadas em um rotor. Os gases quentes e pressurizados que saem da câmara de combustão passam pelas lâminas da turbina, causando a rotação do rotor. A energia mecânica resultante da rotação do rotor é transferida para o gerador elétrico.

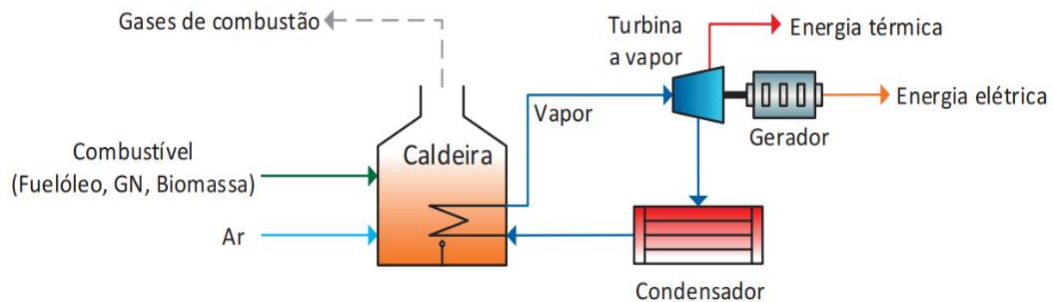
2.4.2 Turbina a Vapor

A primeira turbina a vapor documentada foi desenvolvida por Herão de Alexandria aproximadamente em 175 a.C. Conhecida como Aeolípila, a máquina consistia em uma esfera metálica montada sobre uma caldeira. O vapor produzido pela caldeira escapava por duas toberas localizadas nos polos da esfera, provocando sua rotação. Embora não tenha tido aplicações práticas na época, ela representou uma das primeiras tentativas de utilizar o vapor para gerar movimento rotacional. O desenvolvimento subsequente de turbinas a vapor ocorreu somente em 1629, quando Giovanni Branca implementou um jato de vapor para acionar uma roda de moinho d'água. No entanto, esta invenção não conseguiu ser aplicada de maneira eficaz em processos industriais. Mas foi apenas a partir do ano 1884 que o engenheiro britânico Sir Charles Parsons desenvolveu a primeira turbina a vapor moderna, que utilizava um design de múltiplos estágios para converter a energia térmica em energia mecânica com maior eficiência. Com o passar do tempo, e principalmente durante a Segunda Guerra Mundial, o uso de turbinas a vapor se difundiu mundialmente e sua tecnologia foi sendo aprimorada gerando assim maior eficiência no processo de geração de energia (CTGAS-ER).

A turbina a vapor é uma máquina térmica amplamente utilizada em sistemas de cogeração. Seu funcionamento tem por base o ciclo de Rankine onde há a introdução de vapor com temperatura e pressão específicas, de forma a movimentar as lâminas conectadas a um eixo rotor. Como parte da energia térmica é transformada em energia cinética, o vapor apresenta uma pressão e temperatura reduzidas na saída da turbina.

O design da turbina a vapor varia de acordo com os requisitos de potência e eficiência, mas, conforme demonstrado na Figura 9, há dois componentes cruciais para o seu funcionamento, são eles: caldeira e turbina.

Figura 9 - Esquemático de uma turbina a vapor



Fonte: Comissão Europeia (2009)

Na caldeira ocorre a queima do combustível que aquece de forma indireta o fluido de trabalho através de um trocador de calor localizado no interior da caldeira, o fluido é aquecido de forma a gerar vapor de elevadas temperaturas e pressão.

A turbina é uma câmara hermética formada por diversos conjuntos de lâminas de tamanhos e perfis variados em seu interior, sendo estas acopladas ao rotor ou ao estator da turbina. O vapor de alta temperatura e pressão oriundos da caldeira, é injetado na turbina, onde ocorre a expansão instantânea, transferindo energia para o rotor. Ao final desta expansão a temperatura e a pressão do fluido são reduzidas e direcionadas ao sistema de exaustão ou escape.

Um ponto crucial para a determinar a aplicação da turbina é sobre a pressão de vapor em sua saída, existem dois tipos principais, conforme demonstrado na Figura 10, sendo o de contrapressão, onde o vapor de escape é expelido da turbina com alta pressão, permitindo assim ser reutilizado em processos subsequentes, aproveitando a energia residual do vapor, o segundo tipo é a turbina por Condensação, neste caso o vapor de escape é condensado com água de resfriamento, proporcionando alta eficiência térmica mas inviabilizando o uso do vapor de escape para outros processos (CTGAS-ER).

Figura 10 - turbinas a vapor por condensação e contrapressão

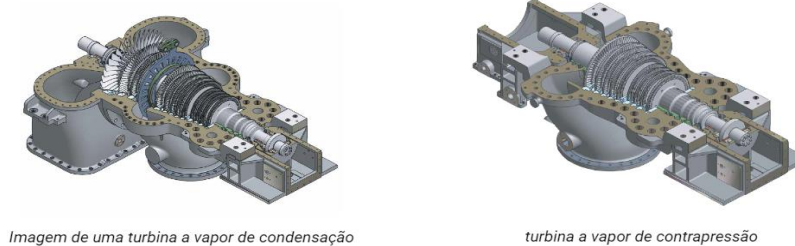


Imagem de uma turbina a vapor de condensação

turbina a vapor de contrapressão

Fonte: Trillium Flow Technologies(2023)

2.4.3 Motor a Combustão Interna

Os motores térmicos são dispositivos que utilizam princípios da termodinâmica para converter a energia química armazenada nos combustíveis em energia térmica. Esta energia térmica é então transformada em energia mecânica utilizável diretamente em um eixo rotativo. A combustão, uma reação química exotérmica, ocorre quando o combustível reage com o comburente, gerando calor.

Nos motores de combustão interna, a energia térmica resultante da queima do combustível nas câmaras de combustão é convertida em energia mecânica. Isso é feito ao mover o êmbolo do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). O êmbolo está conectado a uma biela, que por sua vez está ligada a um virabrequim, produzindo um movimento alternativo que é transformado em movimento rotativo. Assim, nesses motores térmicos, o próprio produto da combustão realiza o trabalho. A combustão ocorre no fluido operante, caracterizando esses motores como de combustão interna de movimento alternativo (NUNES, 2012).

motores a combustão Interna podem ser classificados de acordo com a forma de ignição e ciclo de operação, conforme:

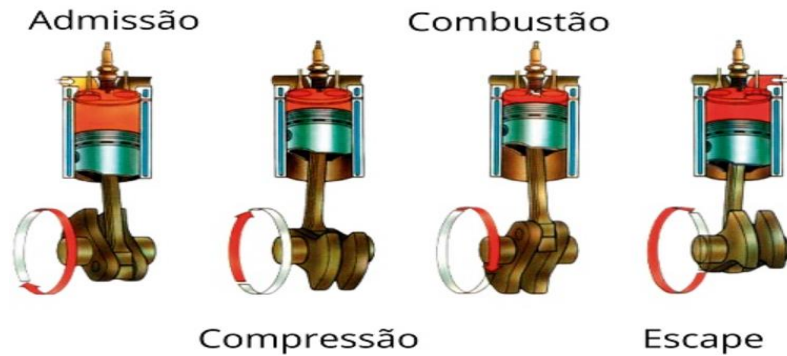
- Ignição por centelha;
- Ignição por compressão;
- Ciclo a 4 tempos;
- Ciclo a 2 tempos;

Os motores por ignição a centelha operam conforme ciclo de Otto e, para que isto ocorra, o motor utilizado geralmente é a quatro tempos, mas pode ser

aplicado, de forma reduzida, a motores de dois tempos (NUNES, 2012). A execução do processo cíclico, é representada na Figura 11, e descrita da seguinte forma:

- **Admissão:** Durante a fase de admissão, o pistão se move do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), aspirando uma mistura de ar e combustível através da válvula de admissão. Em alguns projetos de motores modernos, utiliza-se o sistema de injeção direta. Nesse sistema, durante a fase de admissão, apenas o ar é aspirado. O combustível é injetado diretamente na câmara de combustão no final do curso de compressão.
- **Compressão:** Com a energia armazenada do movimento, o pistão desloca-se do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS). No início desse movimento, a válvula de admissão é fechada, e o pistão inicia a compressão do ar e do combustível na câmara de combustão. O grau de compressão e a dinâmica do processo dependem do projeto específico do motor e do tipo de combustível utilizado.
- **Expansão:** Durante a fase de expansão, as válvulas de admissão e escape permanecem fechadas. Poucos graus antes de o pistão atingir o ponto morto superior (PMS), inicia-se a ignição da mistura ar-combustível, provocada por uma centelha gerada pelos eletrodos da vela de ignição. Nesta fase atinge-se a máxima temperatura e pressão do ciclo. A queima completa da mistura ocorre alguns graus após o PMS, dando início à fase de "força do motor". As fases anteriores são consideradas "passivas" pois consomem energia do ciclo. A força gerada empurra o pistão em direção ao ponto morto inferior (PMI), onde a energia é armazenada em contrapesos e um volante, que são projetados para liberar essa energia durante as fases passivas subsequentes, ajudando a equilibrar o sistema.
- **Descarga:** Antes que o pistão atinja o ponto morto inferior (PMI), que marca o início da quarta fase, a válvula de escape se abre, permitindo a liberação dos gases de combustão que estão sob pressão superior à atmosférica. À medida que o pistão se move em direção ao ponto morto superior (PMS), ele expulsa os gases residuais que não serão mais utilizados para a combustão. A presença de qualquer gás inerte restante poderia prejudicar o enchimento completo do cilindro com a nova mistura de ar e combustível. Assim, o ciclo de um motor de quatro tempos (4T) é completado com quatro fases distintas, correspondendo a 720° de rotação do virabrequim. Em contraste, o motor de dois tempos (2T) do ciclo Otto completa essas quatro fases em apenas dois movimentos, correspondendo a 360° de rotação do virabrequim.

Figura 11 - Funcionamento de motor a combustão Interna



Fonte: Oficina Brasil (2022)

Em contrapartida, os motores de ignição por compressão têm seu funcionamento baseado no ciclo de Diesel, este ciclo opera com funcionamento muito próximo ao ciclo de Otto, tendo apenas a diferença de no ciclo Otto, a mistura de ar e combustível, mesmo quando comprimida, requer uma centelha para iniciar o processo de combustão. Em contraste, nos motores diesel, a fase de admissão utiliza apenas ar puro, sendo adicionado o diesel apenas na fase de combustão, fazendo com que a compressão seja muito mais intensa do que nos motores otto. Essa alta compressão resulta em um aumento significativo da temperatura. Quando o combustível diesel é pulverizado na câmara de combustão através de jatos finos sob alta pressão, a combinação da elevada temperatura e a pulverização do Diesel provoca a combustão espontânea. Esse método evita o efeito de detonação, comum nos motores otto, e resulta em um aumento considerável do rendimento volumétrico dos motores diesel (NUNES, 2012).

Independentemente do tipo de ignição, Penido Filho (1991) e Dalbem (2008) determinam que o rendimento global de um motor a combustão Interna é calculado na (8), por:

$$n_T = \frac{3600}{C_S * PCI} \quad (8)$$

Onde:

n_T : Rendimento Global;

C_S : Consumo específico;

PCI: Poder Calorífico Inferior do Combustível;

2.4.4 Geradores Elétricos

Conforme visto, há diversas tecnologias de cogeração existentes, porém em todos os casos, há a necessidade de adicionar um gerador elétrico para que a conversão de energia mecânica resultante do sistema seja feita de maneira a gerar energia elétrica propriamente dita.

O gerador elétrico atua como a unidade secundária em um sistema motor-gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Ele é composto por duas partes principais: o estator, que é a parte fixa e responsável pela criação do campo magnético e pela localização dos polos do gerador, e o rotor, que é a parte móvel onde ocorre a geração da força eletromotriz (BERNSEN, 2007). O motor é acoplado ao gerador por meio de um acoplamento elástico, projetado para absorver pequenos desalinhamentos axiais e radiais, além de reduzir as vibrações resultantes de variações de carga e desbalanceamento (BERNSEN, 2007).

Os geradores, também conhecidos como alternadores, podem fornecer eletricidade em diferentes tensões, como 220/127 Vrms, 380/220 Vrms ou 440/254 Vrms, dependendo do tipo de conexão trifásica utilizado. A potência fornecida pelo gerador é a potência aparente, a qual é determinada conforme descrito por Niskier (2000), na (9):

$$P_a = \frac{\sqrt{3}V.I}{1000} \quad (9)$$

Onde:

P_a = Potencia Aparente em kVA;

V= Tensão elétrica;

I= Corrente elétrica;

Além disto, o Gerador Elétrico possui um fator de potência, que nada mais é do que a relação entre a potência ativa e a potência aparente, conforme visto na (10):

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{P_a} \quad (10)$$

Em que a Potência ativa por ser calculada conforme (11):

$$P = V.I.\cos \varphi \sqrt{3} \quad (11)$$

Todo o gerador Elétrico tem um rendimento que é a relação entre a energia mecânica absorvida pelo eixo do motor e a quantidade de energia elétrica produzida pelo gerador. Esta relação varia de acordo com cada tipo de gerador, variando entre 30% e 55% (Enel, 2023). O rendimento elétrico pode ser definido conforme (12):

$$\eta_g = \frac{P}{P_m} \quad (12)$$

Onde:

η_g = Rendimento do Gerador;

P= Potência do Ativa;

P_m = Potência Mecânica absorvida pelo eixo do motor;

2.4.5 Classificação e seleção de Sistemas de cogeração

Conforme visto neste capítulo, existem diversas tecnologias de cogeração inseridas no mercado, mas isto torna a decisão de qual a cogeração mais eficiente para cada aplicação, uma escolha complexa.

Leal Apud Petrecca (2016) define que os principais fatores técnicos a serem considerados são:

- Perfil da demanda térmica, incluindo os níveis de temperatura requeridos pelos usuários, os quais devem estar em conformidade com o nível de calor rejeitado pelo sistema de cogeração, bem como as flutuações típicas da demanda, tanto diárias, mensais quanto anuais;
- Perfil da demanda elétrica e suas flutuações típicas, as quais devem ser correlacionadas com o perfil térmico;
- Necessidade de compatibilidade entre as características de demanda do estabelecimento, como eletricidade, calor e combustível, e as características de capacidade de produção de eletricidade e recuperação de calor do sistema de cogeração escolhido;
- Horas trabalhadas por ano;
- Tamanho da usina de cogeração, considerando tanto as necessidades atuais quanto futuras do estabelecimento;
- Impactos ambientais.

Devki (2006), introduz fatores quantitativos, sendo o Heat-to-power ratio como o parâmetro técnico mais importante para a seleção de sistemas de cogeração, este parâmetro, definido como Beta (17), relaciona a potência elétrica necessária pela planta e a potência térmica requerida conforme (13).

$$Beta = \frac{kW_{th}}{kW_e} \quad (13)$$

Segundo Devki (2006), Se a relação calor/energia da indústria puder ser igualada as características do sistema de cogeração considerado, a otimização do sistema seria alcançado no sentido real. Seguindo este propósito e através dos estudos das principais características dos sistemas de cogeração existentes, Devki conseguiu relacionar o Beta com as tecnologias mais utilizadas, assim como suas margens de eficiência, esta relação é demonstrada no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros de seleção de uma cogeração

Sistema de cogeração	Beta	Potência de saída (como % da entrada do combustível)	Eficiência global (%)
turbina a vapor de contrapressão	4,0 – 14,3	14 – 28	84 – 92
turbina a vapor de extração condensação	2,0 – 10	22 – 40	60 – 80
turbina a gás	1,3 – 2,0	24 – 35	70 – 85
Ciclo Combinado	1,0 – 1,7	34 – 40	69 – 83
motor de Combustão Interna	1,1 – 2,5	33 – 53	75 – 85

Fonte: Adaptado de Devki Energy Consultancy (2006).

Este quadro é de suma importância pois, conhecendo o heat-to-power das necessidades industriais, é possível definir quais as melhores tecnologias de cogeração devem ser aplicadas, por exemplo, caso uma Indústria tenha a necessidade de 1000 kW de energia elétrica e 1000 kW de energia térmica, o valor de Beta encontrado seria de 1, sendo assim, o melhor sistema a ser implantado seria o de ciclo combinado.

O Quadro 1 é utilizado como uma das principais etapas da metodologia de seleção do sistema de cogeração mais eficiente a ser implantado em processos Industriais no setor de bebidas, e para demonstrar esta metodologia, à aplicaremos em um estudo de caso utilizando uma cervejaria de médio porte instalada no Estado do Rio de Janeiro – Brasil.

2.5 Consumo e Produção de Energias dentro de uma Cervejaria

A fabricação da cerveja se inicia com a preparação dos ingredientes e se encerra com o momento em que o produto é embalado/envasado e colocado à venda. Esse processo é dividido da seguinte maneira: Maltagem, brassagem, fervura, resfriamento, fermentação, condicionamento e envase (P & Q ENGENHARIA, 2019).

O malte recebido primeiramente é enviado a brassagem ou também conhecida como maceração, que constitui do processo de cozimento do malte com água quente, com múltiplas rampas/paradas de temperatura, essa técnica utiliza uma fonte de calor para aquecer o mosto em diversas rampas de temperaturas diferentes (Oliver, 2012), de forma a converter o amido presente nos grãos em maltose (LARA, 2017).

Outra etapa do processo de produção da cerveja é a fervura, na qual leva geralmente de 60 a 90 minutos, onde o mosto é colocado em uma temperatura de 100°C juntamente com o lúpulo, quando o processo da fervura se encerra, ocorre a filtração do mosto. Após a finalização da etapa de filtração, vem o momento de resfriamento do produto, o qual ocorre em trocadores de calor, onde o mosto passa de 80°C para 10°C. Inicia-se a fermentação da bebida, que é quando ocorre a mudança dos açúcares fermentáveis do mosto em álcool, gás carbônico e calor. Finalizando o processo na maturação, essa etapa também é conhecida como o envelhecimento da cerveja, esse processo pode durar de semanas a anos, dependendo do resultado que se espera obter.

Após a finalização do processo de fabricação, o líquido é enviado para o envase, onde é inserido na embalagem primária, lata, garrafa ou barril, em sequência esta embalagem é pasteurizada em um processo que onde as embalagens percorrem um túnel de pasteurização que contém trocadores de calor que elevam a temperatura em até 60 graus de forma a eliminar possíveis contaminações microbiológicas. Após este processo a embalagem é rotulada, empacotada e paletizada.

Para que o processo de produção seja melhor visualizado, optou-se por trazer a Figura 13, a qual demonstra de forma lúdica o desenvolvimento da fabricação desde a seleção dos grãos a serem utilizados até a distribuição para os pontos comerciais.

Figura 12 - Processo da Fabricação da Cerveja



Fonte: Micro Ambiental – Processo de Produção de Cerveja (2021).

Ao visualizar todo esse processo, traz-se a reflexão sobre o consumo de energias vitais para que o processo de produção da cerveja nunca cesse.

2.6 Energias Vitais em uma Cervejaria

Qualquer processo produtivo necessita de energias vitais para sua operação, a área de utilidades em uma indústria é responsável por gerir estes insumos chave como água de processo, vapor, sistema de refrigeração, ar comprimido, além é claro, da energia elétrica.

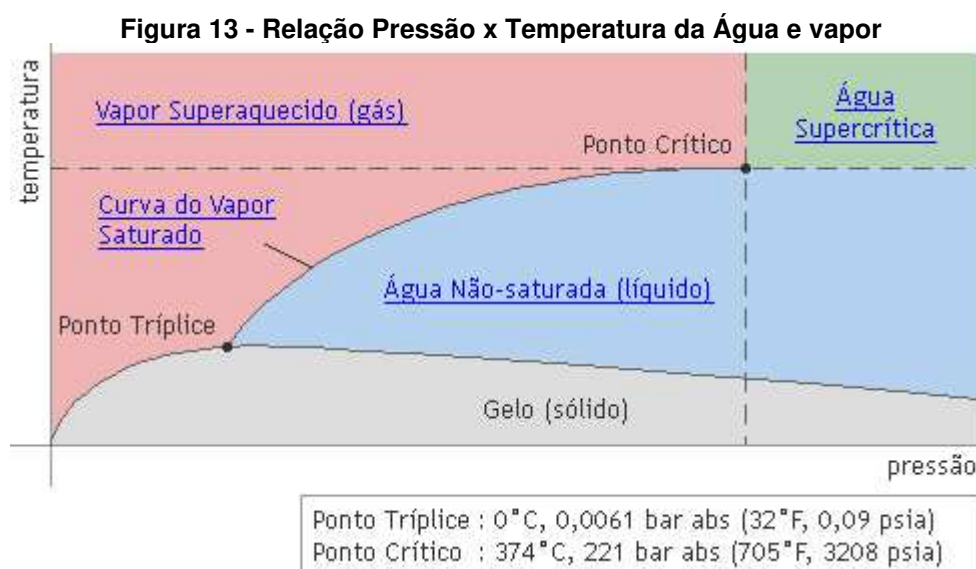
Cada uma das utilidades listadas tem papel fundamental em uma Indústria Cervejeira. Mas duas dessas energias se destacam em relação ao consumo e sua importância dentro de uma cervejaria, sendo elas: energia elétrica, que na maioria é inteiramente comprada e o vapor, que é gerado dentro das instalações.

2.6.1 Vapor

Durante a revolução industrial deu-se início ao uso do vapor como fonte de energia para movimentar máquinas e motores, graças aos aperfeiçoamentos de James Watt foi possível o início da automação industrial. Provendo dinamismo, aumentando a produtividade e agregando qualidade aos processos

(BOETTCHER,2015). Com o passar dos anos o uso do vapor na indústria foi evoluindo, possuindo hoje diversas aplicações.

O vapor é gerado pela na transformação física da água de estado sólido para gasoso. O vapor é classificado da seguinte forma: vapor saturado, vapor úmido e vapor superaquecido, a depender da sua pressão e temperatura (TLV, 2022).



Fonte: TLV- Tipos de vapor (2022).

Conforme pode-se verificar na Figura 13, a região de mistura líquido vapor ocorre nas faixas de pressão e temperatura onde se consegue obter líquido-vapor em diferentes quantidades de vapor. O calor saturado é comumente utilizado em sistemas de aquecimento, como trocadores de calor, por possuir um rápido aquecimento, ter um controle preciso e rápido de temperatura através da variação de pressão e alto coeficiente de calor (TLV, 2022).

Já o vapor saturado, é composto por moléculas de água não vaporizadas, este vapor no ambiente industrial não é utilizado como parte útil do processo, sendo assim descartado em forma de condensado.

O vapor superaquecido é gerado quando se adiciona calor ao vapor acima do ponto de saturação, produzindo assim um vapor com densidade mais baixa e temperatura mais elevada. Seu uso mais comum nas indústrias é em elementos propulsores. Sua maior vantagem é a não possibilidade de geração de condensado dentro dos equipamentos movidos a vapor, o que minimiza riscos de corrosão e

erosão significativamente. Devido as suas características, algumas desvantagens são atreladas ao seu uso pois necessita-se manter a temperatura sempre muito elevada mesmo se utilizar uma pressão constante.

2.6.1.1 Geração de Vapor Industrial

Nas indústrias de modo geral são empregados geradores de calor, chamados também de caldeiras, para realizar o fornecimento de vapor para as instalações. No Brasil, temos uma Norma Regulamentadora: NR13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO, onde se define caldeiras como : "Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se re-fervedores e similares." (BRASIL,2022). Esta geração de vapor acontece através da transferência de calor indireta proveniente de uma fonte combustível para a água que se encontra no interior da caldeira (BAZZO,1995), e é definida conforme (14) (BAZZO,1995)

$$Q_{in} = V_m (H_s - H_e) \quad (14)$$

Onde:

Q_{in} : Quantidade de calor requerida na entrada da caldeira;

V_m : vazão mássica;

H_s : Entalpia da saída;

H_e : Entalpia da entrada;

A Normativa Regulamentadora nº13, categoriza as caldeiras em duas classes: A e B, conforme sua pressão de trabalho e volume, conforme listado abaixo:

"a) caldeiras da categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²), com volume superior a 100 L (cem litros);

b) caldeiras da categoria B são aquelas cuja a pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1 960 kPa (19,98 kgf/cm²), volume interno superior a 100 L (cem litros) e o produto entre a pressão de operação em kPa e o volume interno em m³ seja superior a 6 (seis)."

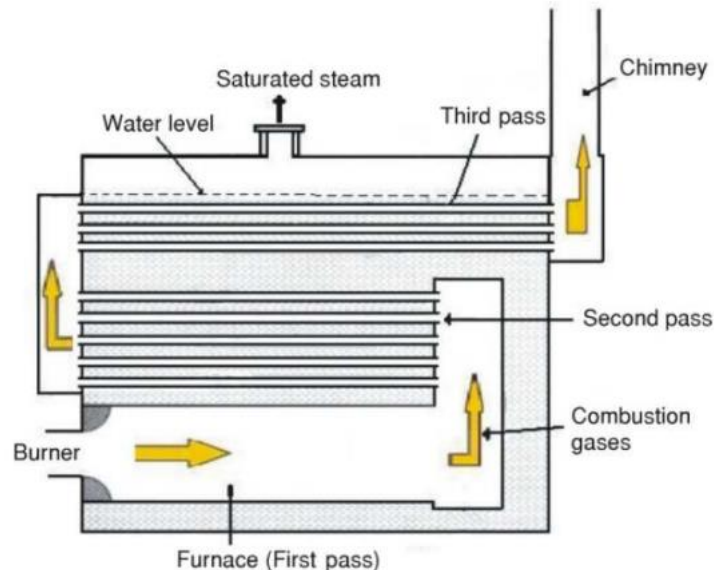
As caldeiras também podem ser classificadas de acordo com seu grau de automação, sendo: manuais, semiautomáticas e automáticas. E no tipo de energia implantada, sendo: combustível sólido, líquido, gasoso, caldeiras elétricas ou de recuperação (BRASIL,2022).

Tendo em vista sua construção e forma de trabalho, as caldeiras são divididas em dois tipos: caldeiras flamo-tubulares e aquatubulares (BRASIL,2022).

2.6.1.1.1 Caldeiras Flamo-tubulares

Caldeiras Flamo-tubulares, conforme representação da Figura 14, são assim denominadas devido sua característica construtiva, onde é composta por diversos tubos, por onde circula os gases de combustão. Esses tubos são circundados por água em sua totalidade. Esta troca indireta de calor, faz com que ocorra a geração de vapor nesse tipo de caldeira.

Figura 14 - Caldeira Flamo-tubular



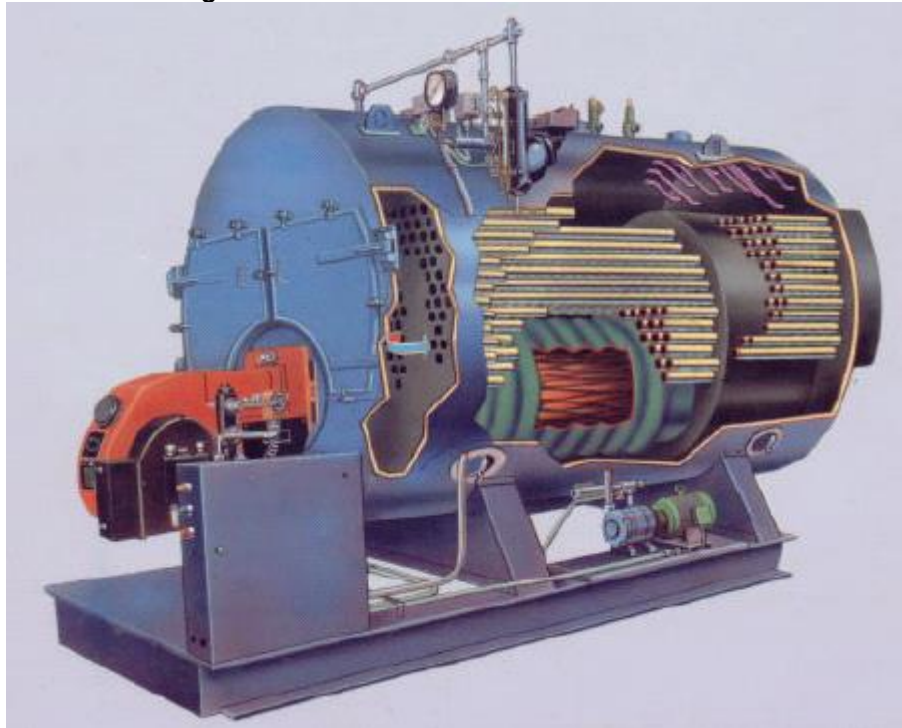
Fonte: F.J. Gutiérrez Ortiz (2011).

A água no interior da caldeira é de suma importância não só para a geração de vapor, mas também para a segurança do sistema, a Normativa Regulamentadora: NR13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO indica os parâmetros ideais de

qualidade de água que deve ser obrigatoriamente seguido (BRASIL,2022). A água é um refrigerante natural da caldeira, ela deve sempre estar acima do nível da tubulação (BAZZO, 1995). As caldeiras flamo-tubulares podem possuir fornalhas externas e internas, sendo nesse caso conhecidas como caldeiras escocesas.

As caldeiras escocesas, representadas na Figura 15, são projetadas, geralmente, para queimarem gás natural ou óleo. Elas possuem bom rendimento térmico, na ordem de 84%, porém devido as suas características construtivas, que necessitaria de uma estrutura muito grande, a geração de vapor e a pressão de trabalho devem ser limitadas. A produção de vapor por unidade de superfície de aquecimento pode variar de 30 a 40 kg/m²h (BAZZO, 1995).

Figura 15 - Caldeira Flamo-tubular Escocesa



Fonte: GB Técnica - Caldeiras (2011).

2.6.1.1.2 Caldeiras Aquatubulares

As caldeiras aquatubulares são construídas de forma oposta as flamo-tubulares, ou seja, os gases combustíveis circulam por fora das tubulações que se encontram, por sua vez, completamente preenchidas por água em seu interior, conforme ilustrado na Figura 16. Sua composição permite uma superfície de

aquecimento maior, proporcionando assim um maior rendimento na geração de vapor tendo em vista que caldeiras de maior porte chegam a valores na ordem de 200 kg/m²h (BAZZO,1995) e pressões de trabalho maiores.

Figura 16 - Caldeira Aquatubular



Fonte: GB Técnica - Caldeiras (2011).

2.6.1.1.3 Caldeiras Mistas

A caldeira mista é uma junção das características construtivas das caldeiras aquatubular e flamo-tubular. Utiliza-se a fornalha com parede revestida de tubos por onde circula a água, similar a uma caldeira aquatubular, e o tambor de vapor com tubos preenchidos por gases, semelhante a uma caldeira Flamo-tubular. Sua construção se deve por permitir o uso de combustíveis sólidos para caldeiras de pequeno porte.

Tendo vista a importância das energias para os processos industriais e principalmente, ciente do protagonismo do vapor e da energia elétrica para a produção da cerveja, atrelado ao cenário de consumo energético, descrito anteriormente, fica claro que a implantação de um sistema de cogeração pode ser estratégia chave para a otimização do consumo energético fabril. Mas para que esta estratégia seja eficiente, o processo de seleção e definição da tecnologia de

cogeração deve ser bem executado. A seguir, será apresentada uma proposta de metodologia para auxiliar neste processo.

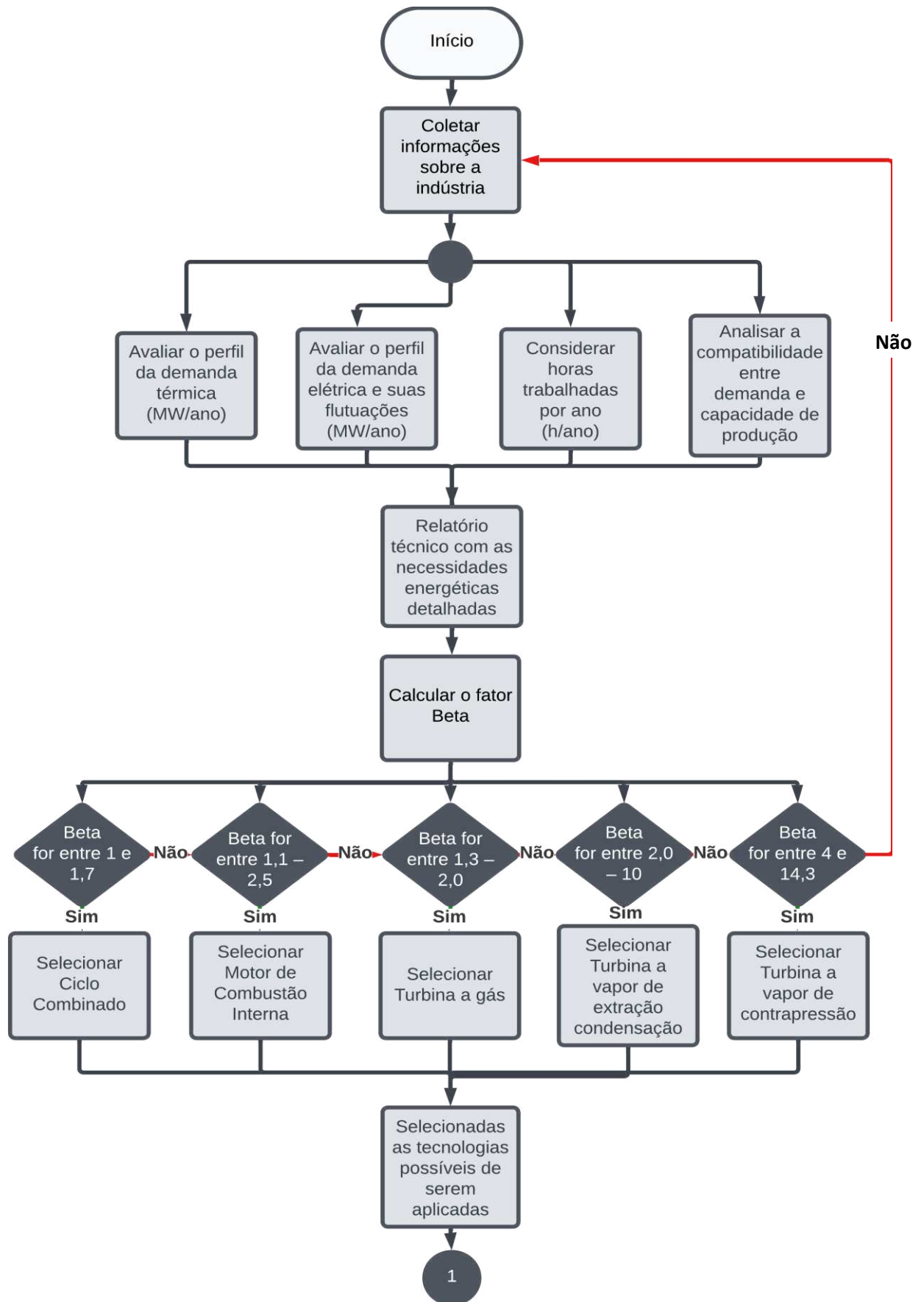
3 METODOLOGIA DE TRABALHO

Com o propósito de selecionar a cogeração mais eficiente para implementação por indústrias de diversos setores, é necessário considerar uma série de variáveis a fim de garantir que a decisão tomada seja a mais vantajosa. Este processo, contudo, não se mostra trivial. A fim de facilitar e aprimorar esta seleção, o presente trabalho propõe uma metodologia, com simples processos para a tomada de decisão. É necessário reforçar que a análise decisória não engloba os aspectos financeiros de se investir em cogerações, neste trabalho a avaliação do processo de cogeração será apenas técnica.

Primeiramente, deve-se conhecer e avaliar tecnicamente as necessidades energéticas da Indústria onde a cogeração será implementada, conforme apresentado no referencial teórico, os principais fatores são: Perfil da demanda térmica, perfil da demanda elétrica, compatibilidade entre as características de demanda do estabelecimento, horas trabalhadas por ano.

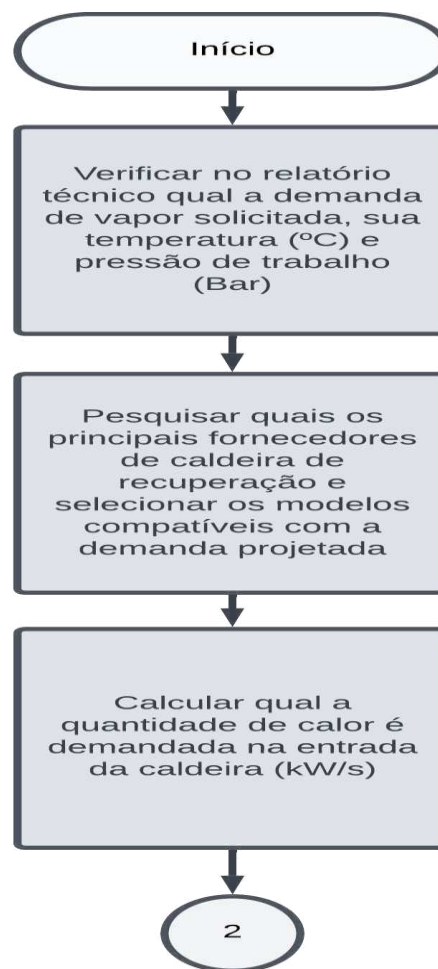
Após ter conhecimento total do cenário estudado, a segunda etapa é definir qual a tecnologia de cogeração será empregada. Para isto deve-se calcular o Beta, conforme (13) e verificar dentro do quadro 1 qual a tecnologia deve ser selecionada. O Fluxograma apresentado na Figura 17, retrata o passo a passo desta primeira etapa da metodologia.

Figura 17 - Etapa 1 da Metodologia: Definição da Tecnologia de cogeração



Em sequência da definição do tipo de cogeração melhor se aplica para a instalação estudada, é necessário realizar a análise sob o ponto de vista térmico. Para isto, faz-se a seleção da caldeira de recuperação a ser utilizada em série com a cogeração, é importante frisar que a energia térmica gerada pela cogeração precisa ser convertida em energia útil, ou seja, em vapor dentro da faixa de pressão e temperatura descritos na etapa inicial de avaliação de cenário. Ao selecionar modelos de mercado que possuam as características de saída compatíveis com as necessidades do processo industrial, verifica-se os dados de projeto desta caldeira e calcula-se a quantidade de calor que é demandada na entrada, ou seja, qual a quantidade de calor que os gases de exaustão da cogeração precisam fornecer, através da (14), o fluxograma apresentado na Figura 18, representa esta segunda etapa da metodologia de seleção.

Figura 18 - Etapa 2 da Metodologia: Seleção da Caldeira de recuperação



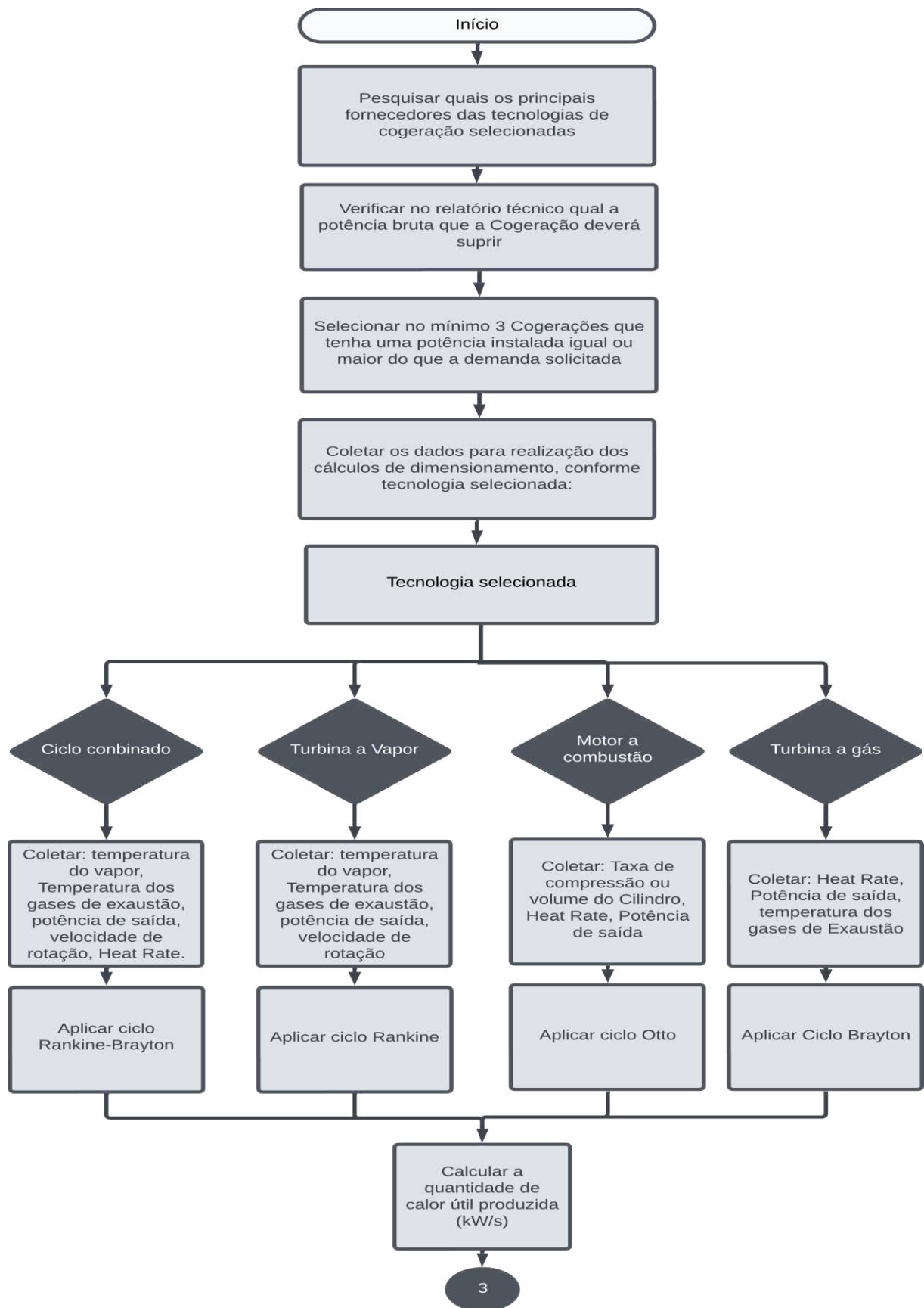
Fonte: Autoria própria (2024)

Ciente do calor demandado pela caldeira, demanda térmica e elétrica necessárias para validar a cogeração a ser implementada, realiza-se a busca de modelos de cogeração dos principais fornecedores e seleciona no mínimo três opções de cada uma das tecnologias selecionadas anteriormente.

Após realizar a seleção criteriosa dos modelos a serem estudados, aplica-se o ciclo termodinâmico compatível com a tecnologia selecionada, tendo por objetivo calcular as temperaturas, pressões e entalpia de cada um dos pontos do ciclo, a fim de determinar a energia térmica útil total produzida, conforme a (15). Para melhor ilustrar esta etapa de seleção, a Figura 19, ilustra o fluxograma desta terceira etapa da metodologia.

$$E_{Vapor} = Q_{Out} \times \eta_{Ciclo} \quad (15)$$

Figura 19 - Etapa 3 da Metodologia: Aplicação dos ciclos termodinâmicos



Fonte: Autoria própria (2024)

A partir deste dado, inicia-se a análise de viabilidade propriamente dita, utilizando os dados elétricos e térmicos da cogeração, conforme demonstra a Figura 20, primeiramente calculamos o fator de utilização (F_{up}), calor útil gerado ($HCPH$), rendimento elétrico equivalente (η_{ee}), eficiência global, rendimento elétrico da instalação ($CHPE_n$) e rendimento térmico da instalação ($CHPH_n$), conforme equações a seguir:

$$F_{up} = \frac{P_{Bruta}}{P_{Instalada}} \quad (16)$$

$$HCPH = \varepsilon_{Vapor\ gerado} - \varepsilon_{Vapor\ consumido} \quad (17)$$

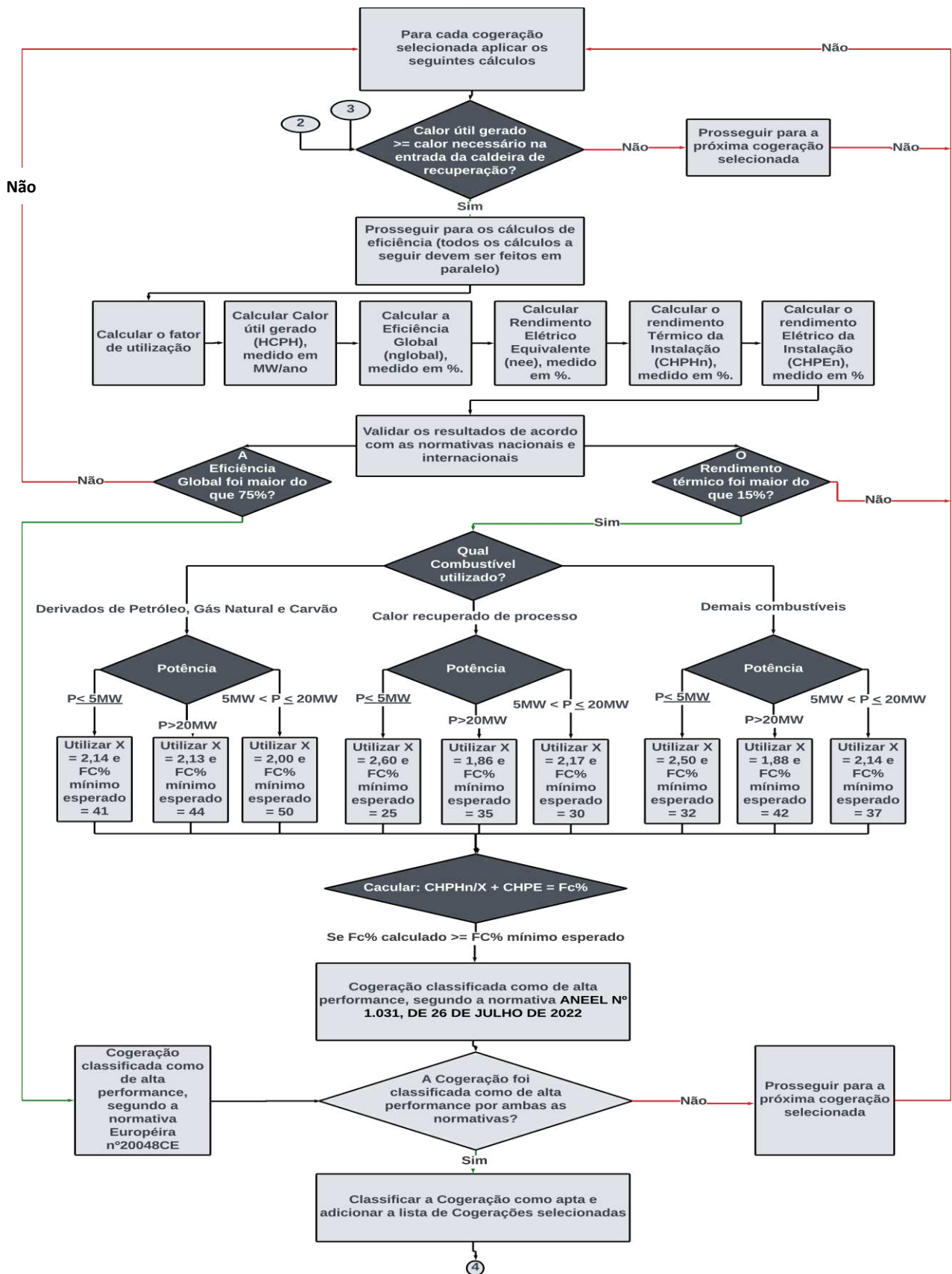
$$CHPE_n = \frac{P_{Bruta}}{C} \quad (18)$$

$$CHPH_n = \frac{HCPH}{C} \quad (19)$$

$$\eta_{global} = \frac{P_{Bruta} + CHPH}{C} \quad (20)$$

$$\eta_{ee} = \frac{\varepsilon_e}{(C - \frac{CHPH}{0,9})} \quad (21)$$

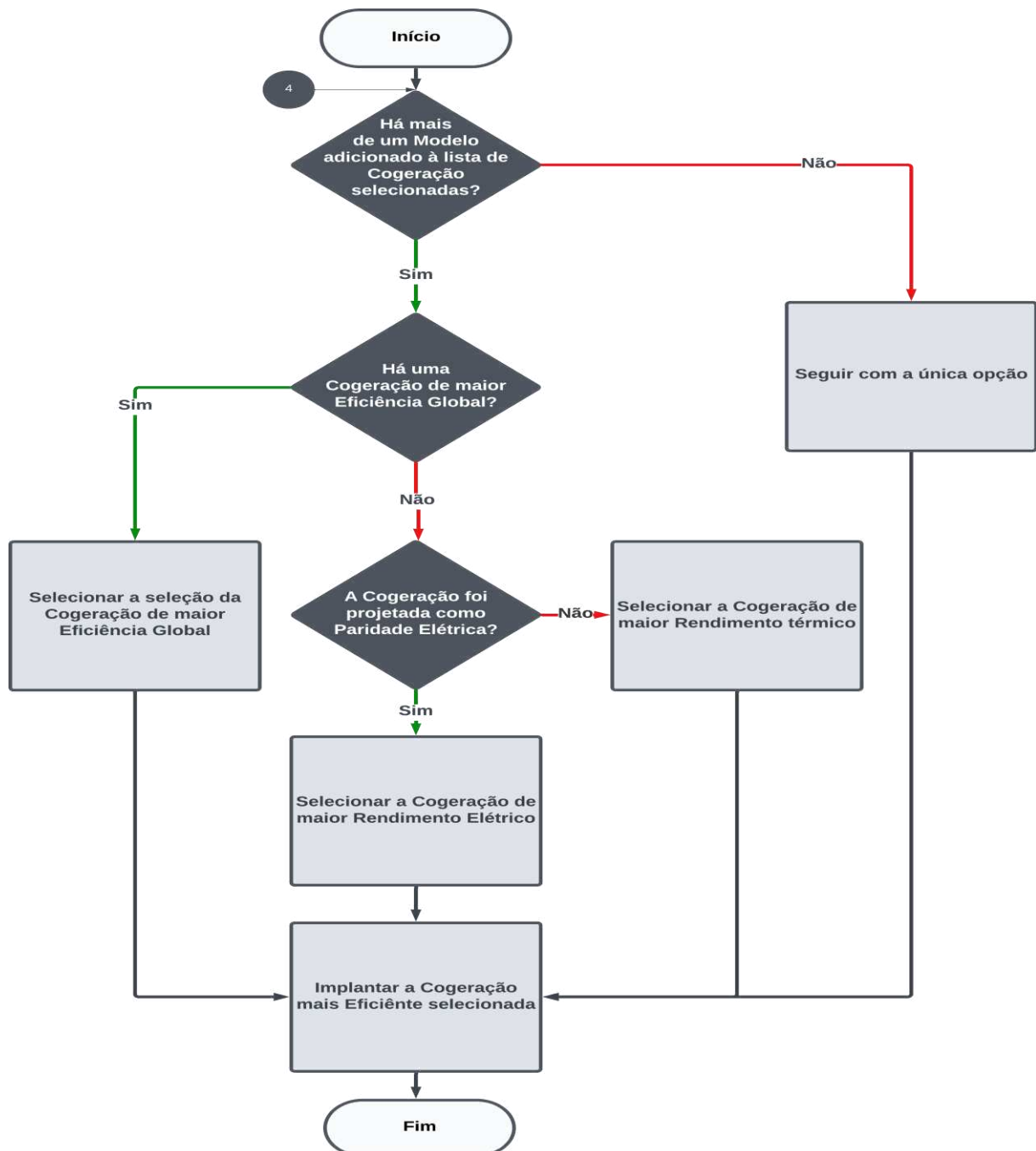
Figura 20 - Etapa 4 da Metodologia: Análise de viabilidade das Cogerações selecionadas



Fonte: Autoria própria (2024)

Mediante a estes dados, comparamos os valores obtidos com as normativas Aneel nº1031 (BRASIL, 2022) e a nº 20048CE (EUROPA, 2014) para definir tecnologia mais eficiente a ser escolhida para o cenário estudado, conforme critérios expostos no capítulo teórico desta dissertação, e ilustrados na Figura 21.

Figura 21 - Etapa 5 da Metodologia: Seleção final da cogeração a ser aplicada



Fonte: Autoria própria (2024)

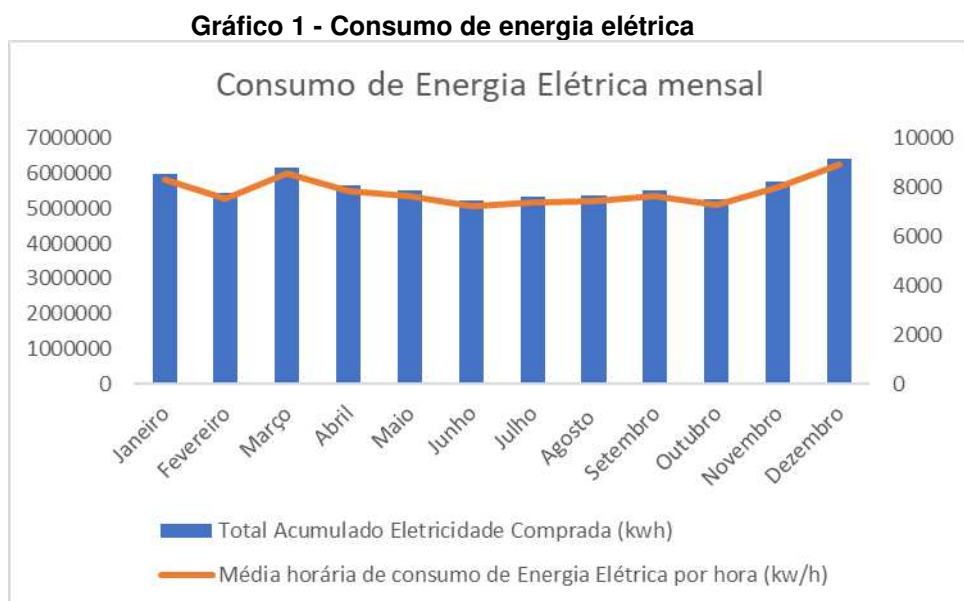
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta sessão será aplicado a metodologia apresentada no capítulo, a fim de verificar a viabilidade e performance de um cenário projetado utilizando uma cogeração para gerar eletricidade e vapor para alimentar os sistemas de uma cervejaria.

4.1 Cenário de Aplicação da Cogeração

O estudo que é elemento central desta dissertação será aplicado em uma cervejaria presente no estado do Rio de Janeiro, em que atualmente produz cerca de 50.000.000 l/mês, para isto possui um alto consumo de vapor e eletricidade.

A cervejaria utilizada como estudo deste trabalho possui uma demanda elétrica contratada de 6800 kW e funciona 24h por dia, todos os dias do ano. O Gráfico 1 representa o consumo mensal ao longo de um ano de produção desta cervejaria, onde é possível verificar picos de até 8920kW/h, tendo um consumo médio mensal de 5640MW. Ao analisar os dados, serão necessárias unidades de cogeração que forneçam uma produção bruta de 7013kW/h, ou seja 61433,88 MW/ano da energia elétrica total consumida, fornecendo assim 89,5% do consumo anual da cervejaria.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Analisando agora sob o ponto de vista de vapor, a cervejaria em questão possui quatro caldeiras flamo-tubulares a queima de gás natural, que são responsáveis por toda a produção de vapor necessária para os processos produtivos. O presente estudo tem por objetivo a produção de vapor na mesma proporção de uma das caldeiras flamotubulares, por tanto o valor projetado de produção de vapor é de 15 toneladas de vapor por hora, sob pressão de 10 kgf/cm² nas mesmas condições de pressão e temperatura do sistema existente e sem que haja a necessidade de utilizar outro combustível para a cogeração.

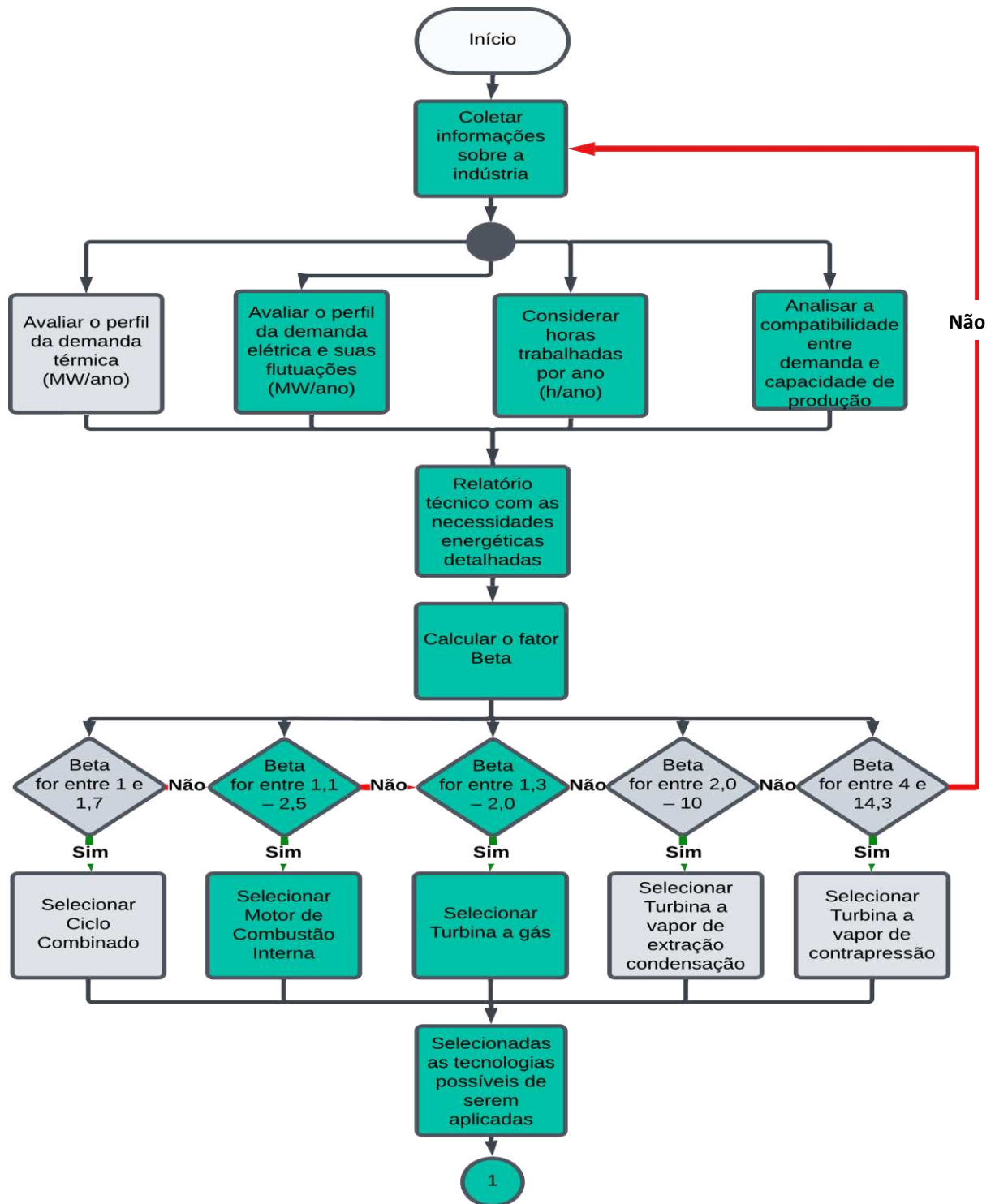
4.2 Seleção das Tecnologias de Cogeração

Tendo agora a Potência térmica média de 109553,93 MW/ano e a potência elétrica média de 61433,88 MW/ano necessárias, é possível calcular a razão térmica por elétrica (13), como sendo:

$$Beta = \frac{kW_{th}}{kW_e} = 1,78$$

Concluindo assim que a opção ideal de cogeração para esta aplicação é a turbina a gás e motor a combustão, conforme processo demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Seleção da tecnologia de cogeração



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.3 Seleção da Caldeira de Recuperação

Com foco de converter a energia térmica das tecnologias selecionadas em vapor útil dentro das especificações apresentadas anteriormente, faz-se necessário a adição de uma caldeira de recuperação em série com a turbina a gás ou com o motor a combustão interna. Para isso, após realizar uma pesquisa de mercado, utilizaremos em todos os casos a caldeira de recuperação modelo DP1-12 em série com a turbina a gás, considerando os dados básicos de projeto apresentados no Quadro 2:

Quadro 2 – Dados da Caldeira de recuperação

Caldeira de recuperação DP1-12	
Pressão da Caldeira (kPa):	1000
V _m -Vazão mássica de vapor (Ton/h):	15
V _m - (kg/s)	4,17
Temperatura de entrada (°C):	105
Temperatura de saída (°C):	180
Eficiência da caldeira	90%

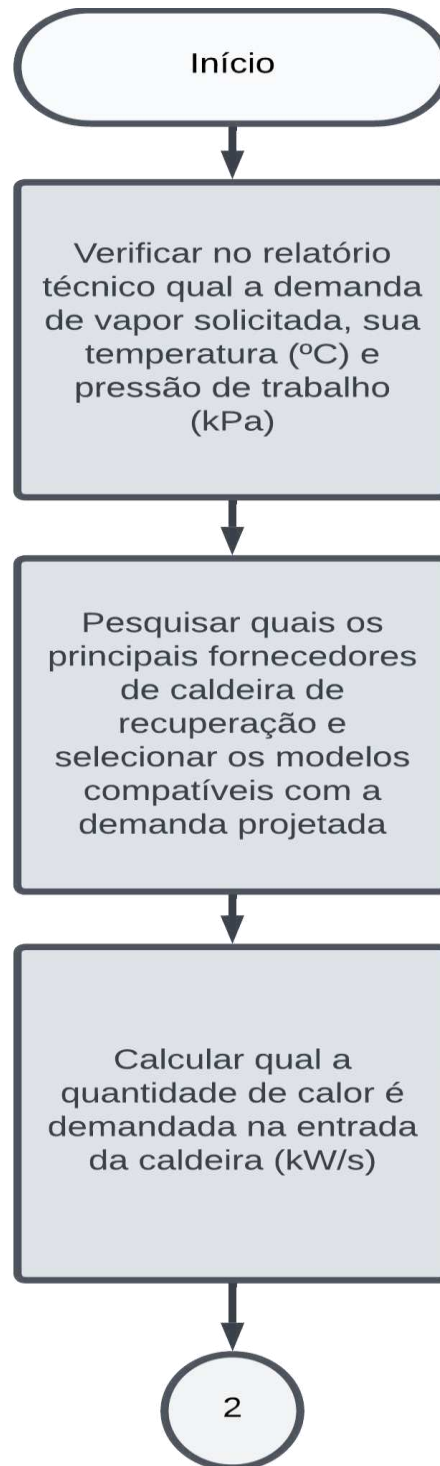
Fonte: Autoria Própria (2024).

Tendo por base os dados apresentados, calculamos então a entalpia de entrada e saída do sistema utilizando a tabela de termodinâmica do vapor saturado sendo, respectivamente, $H_e = 2380,7$ kJ/kg e $H_s = 2703,4$ kJ/kg. Com estas informações, podemos calcular quanto de calor é necessário na entrada da caldeira, conforme demonstrado (14) e fluxo representado na Figura 23, a fim de produzir 15 toneladas de vapor por hora, conforme mostra a Equação abaixo:

$$Q_{in} = V_m (H_s - H_e) = 1344 \text{ kW/s}$$

Portanto, para a produção de 15 toneladas de vapor, nas características de pressão e temperatura são necessários 1344 kW/s de calor na entrada da caldeira.

Figura 13 - Seleção da Caldeira de Recuperação



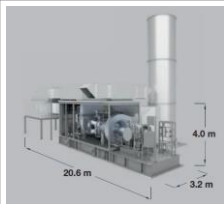
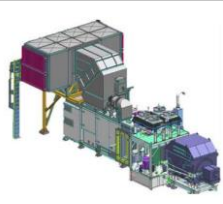
Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4 Sistema de Cogeração por Turbina a Gás

Com base nas demandas térmicas e elétricas apresentadas deste estudo de caso, foram selecionados quatro modelos de cogeração por turbina a gás que atendiam, inicialmente, os requisitos de potência especificados anteriormente, sendo

eles: MGT 6000 desenvolvida pela MAN Energy Solution, modelo SGT 300 projetada pela Siemens, Spirit 12 fabricada pela Combustion Associates Inc e a THM 1304 também fabricada pela MAN Energy Solution, seus principais dados técnicos são apresentados no Quadro 3

Quadro 3 - Ficha Técnica das turbinas Selecionadas

Turbinas a Gás	Quadro 3 - Ficha Técnica das turbinas selecionadas				
					
	Modelo	MGT6000	SGT-300	Spirit 12	THM 1304
	Fabricante	MAN Energy Solution	Siemens	Combustion Associates Inc	MAN Energy Solution
	Elétrical Output (Kj)	8300	7900	12300	10080
	Elétrical Efficiency (%)	35,0%	30,8%	35,0%	29,8%
	Heat Rate (kJ/kWh)	10290	11704	10187	12330
	Exhaust Mass Flow (kg/s)	30	30,2	41,5	46,5
	Exhaust Temperature (°F)	896	993	925	914

Fonte: Adaptado de MAN Energy, Siemens e Combustion Associates (2024).

A seguir, será aplicado o estudo de viabilidade de cada um destes, avaliando o atendimento ao cenário e aos requisitos das normas nacionais e internacionais e ao final, será realizado um comparativo entre os modelos descritos, concluindo, tecnicamente, o melhor modelo a ser implementado.

4.4.1 Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo MGT 6000.

Com o propósito de calcular a eficiência térmica da turbina MGT 6000, inicialmente aplicamos o ciclo de Brayton, obtendo assim a quantia de calor cedido através dos gases de exaustão, conforme (15), a fim de verificar se a turbina proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada. Os dados coletados foram:

$$Q_{out} = 1784,31 \text{ kW/s}$$

Conforme informado na metodologia de trabalho apresentada, a caldeira de recuperação necessita de no mínimo 1344kW/s para seu correto funcionamento, por

tanto, sob o ponto de geração de vapor, a turbina escolhida atende os requisitos mínimos de projeto.

Dando continuidade a metodologia sugerida, verificamos que a turbina modelo MGT 6000, possui uma potência instalada de 8,3 MW, tendo por tanto um fator de utilização calculado conforme (16):

$$F_{up} = F_{up} = \frac{P_{Bruta}}{P_{Instalada}} = 84\%$$

Dados da cogeração:

- Produção bruta de eletricidade (P_{bruta}): 61433,88 MW/ano
- Autoconsumo de eletricidade (C_e): 1454,16 MW/ano
- energia térmica gerada (E_{Vapor}): 131809,59 MW/ano
- Calor útil gerado ($CHPH$): 119946,73 MW/ano
- Consumo de gás natural (C): 219274,71 MW/ano

- Rendimento elétrico equivalente conforme (21) (η_{ee}):

$$\eta_{ee} = \frac{\varepsilon_e}{(C - \frac{CHPH}{0,9})} = 70\%$$

- Eficiência global conforme (20) (η_{global}):

$$\eta_{global} = \frac{P_{Bruta} + CHPH}{C} = 83\%$$

- Eficiência térmica da cogeração, conforme (19) ($CHPH_n$):

$$CHPH_n = \frac{CHPH}{C} = 55\%$$

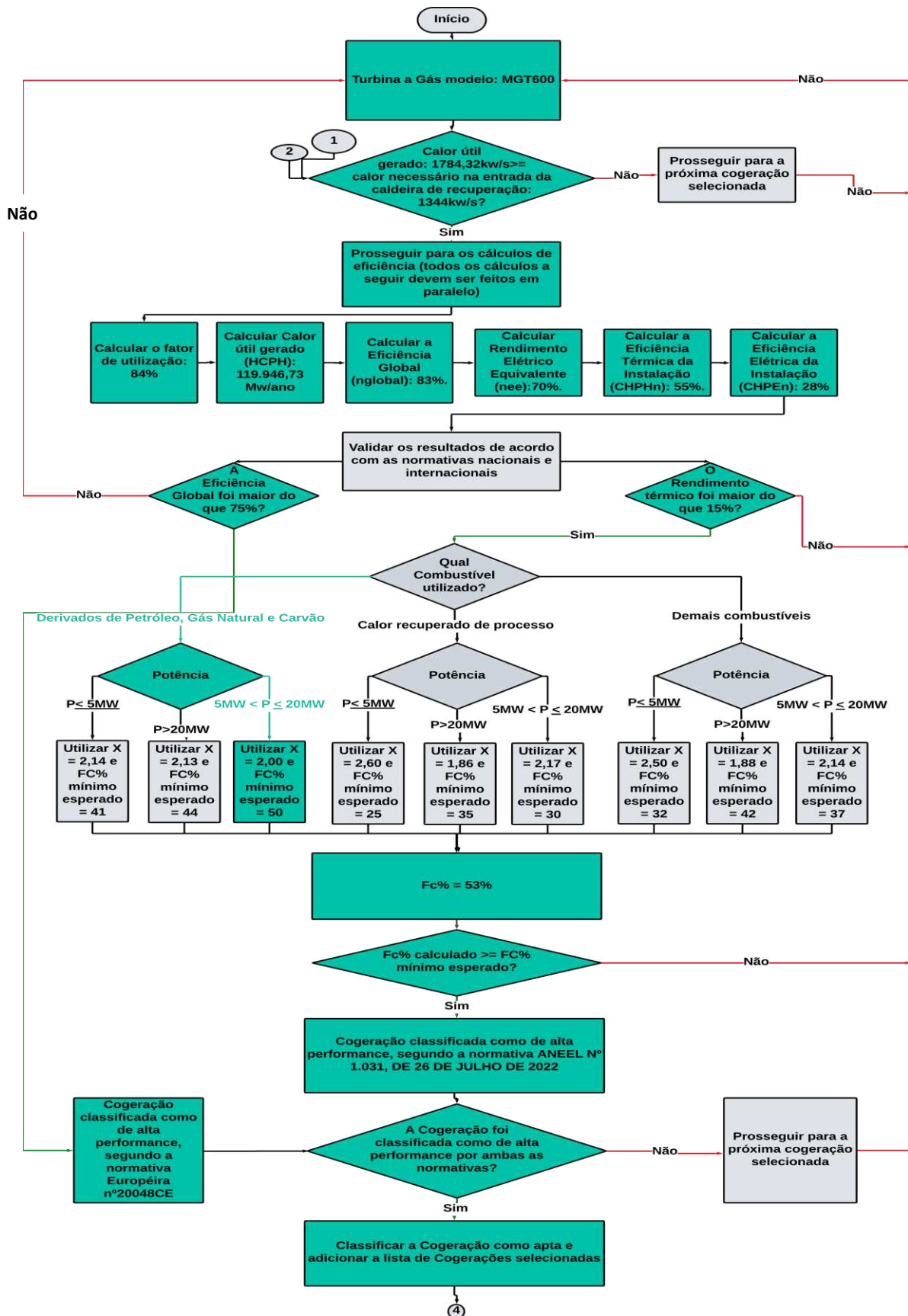
- Eficiência elétrica da cogeração, conforme (18) ($CHPE_n$)

$$CHPE_n = \frac{P_{Bruta}}{C} = 28\%$$

De acordo com os cálculos apresentados, a cogeração apresentada gera o vapor e a eletricidade definidas como meta para este estudo assim como é classificada como de altamente eficiente para o cenário proposto, tanto pelas diretrizes nacionais estipuladas pela Aneel nº 1031, quanto a Normativas

internacionais conforme Diretiva do Parlamento Europeu nº 2004/9/CE, este fluxo decisório é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Aplicação da análise de viabilidade para a turbina MCT6000



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4.2 Cálculo de eficiência de turbina a gás Modelo SGT 300.

Objetivando calcular a eficiência térmica da turbina SGT 300, inicialmente aplicamos o ciclo de Brayton, obtendo assim a quantia de calor cedido através dos gases de exaustão, conforme (15), a fim de verificar se a turbina proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada. Os dados coletados foram:

$$Q_{out} = 1786,97 \text{ kW/s}$$

Conforme informado na metodologia de trabalho apresentada, a caldeira de recuperação necessita de no mínimo 1344kW/s para seu correto funcionamento, portanto, sob o ponto de geração de vapor, a turbina escolhida atende os requisitos mínimos de projeto.

Continuando com a metodologia proposta, constatamos que a este modelo possui uma potência instalada de 9,1 MW, tendo por tanto um fato de utilização conforme calculado, aplicando a (16), a seguir:

$$F_{up} = F_{up} = \frac{P_{Bruta}}{P_{Instalada}} = 77\%$$

Dados da Cogeração:

- Produção bruta de eletricidade (P_{bruta}): 61433,88 MW/ano
- Autoconsumo de eletricidade (C_e): 1594,32 MW/ano
- energia térmica gerada (P_v): 154455,7 MW/ano
- Autoconsumo de vapor (C_v): 13901,01 MW/ano
- Consumo de gás natural (C): 233704,32 MW/ano

- Rendimento elétrico equivalente (η_{ee}) conforme (21):

$$\eta_{ee} = \frac{\varepsilon_e}{(C - \frac{CHPH}{0,9})} = 77\%$$

- Eficiência global (η_{global}) conforme (20):

$$\eta_{global} = \frac{P_{Bruta} + CHPH}{C} = 86\%$$

- Eficiência térmica da cogeração ($CHPH_n$), conforme (19):

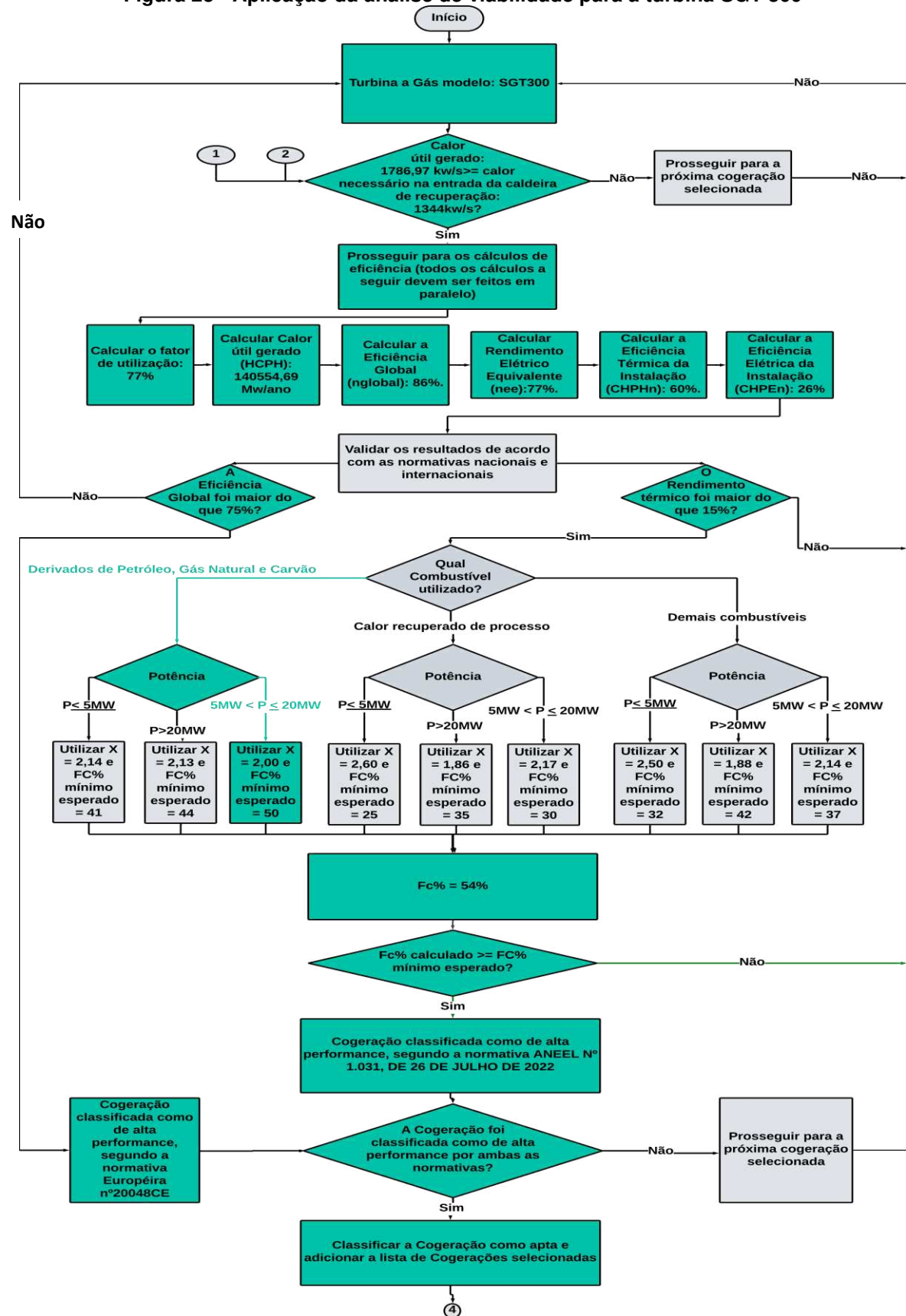
$$CHPH_n = \frac{HCPH}{C} = 60\%$$

- Eficiência elétrica da cogeração ($CHPE_n$), conforme (18):

$$CHPE_n = \frac{P_{Bruta}}{C} = 26\%$$

De acordo com os cálculos apresentados, a cogeração apresentada gera o vapor e a eletricidade definidas como meta para este estudo assim como é classificada como de altamente eficiente para o cenário proposto, tanto pelas diretrizes nacionais estipuladas pela Cogen na Resolução nº 235, quanto normativas internacionais conforme Diretiva 2004/9/CE do Parlamento Europeu, esta análise decisória é representada na Figura 25.

Figura 25 - Aplicação da análise de viabilidade para a turbina SGT 300



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4.3 Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo Spirit 12.

A fim de calcular a eficiência térmica da turbina selecionada, aplicamos o ciclo de Brayton, obtendo assim a quantia de calor cedido através dos gases de exaustão, conforme (15), a fim de verificar se a turbina proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada, o resultado calculado foi:

$$Q_{out} = 1747,19 \text{ kW/s}$$

Conforme informado na metodologia de trabalho apresentada, sob o ponto de geração de vapor, a turbina escolhida atende os requisitos mínimos de projeto.

Conforme informado pelo fabricante, este modelo de turbina possui uma potência instalada de 12,3 MW, tendo por tanto um fato de utilização aplicando a (16), a seguir:

$$F_{up} = \frac{P_{Bruta}}{P_{Instalada}} = 57\%$$

Dados da cogeração:

- Produção bruta de eletricidade (P_{bruta}): 61433,88 MW/ano
- Autoconsumo de eletricidade (C_e): 2154,96 MW/ano
- energia térmica gerada (P_v): 153251 MW/ano
- Autoconsumo de vapor (C_v): 13792,60 MW/ano
- Consumo de gás natural (C): 322012 MW/ano

- Rendimento elétrico equivalente (η_{ee}) conforme (21):

$$\eta_{ee} = \frac{\varepsilon_e}{(C - \frac{CHPH}{0,9})} = 35\%$$

- Eficiência global (η_{global}) conforme (20):

$$\eta_{global} = \frac{P_{Bruta} + CHPH}{C} = 62\%$$

- Eficiência térmica da cogeração ($CHPH_n$), conforme (19):

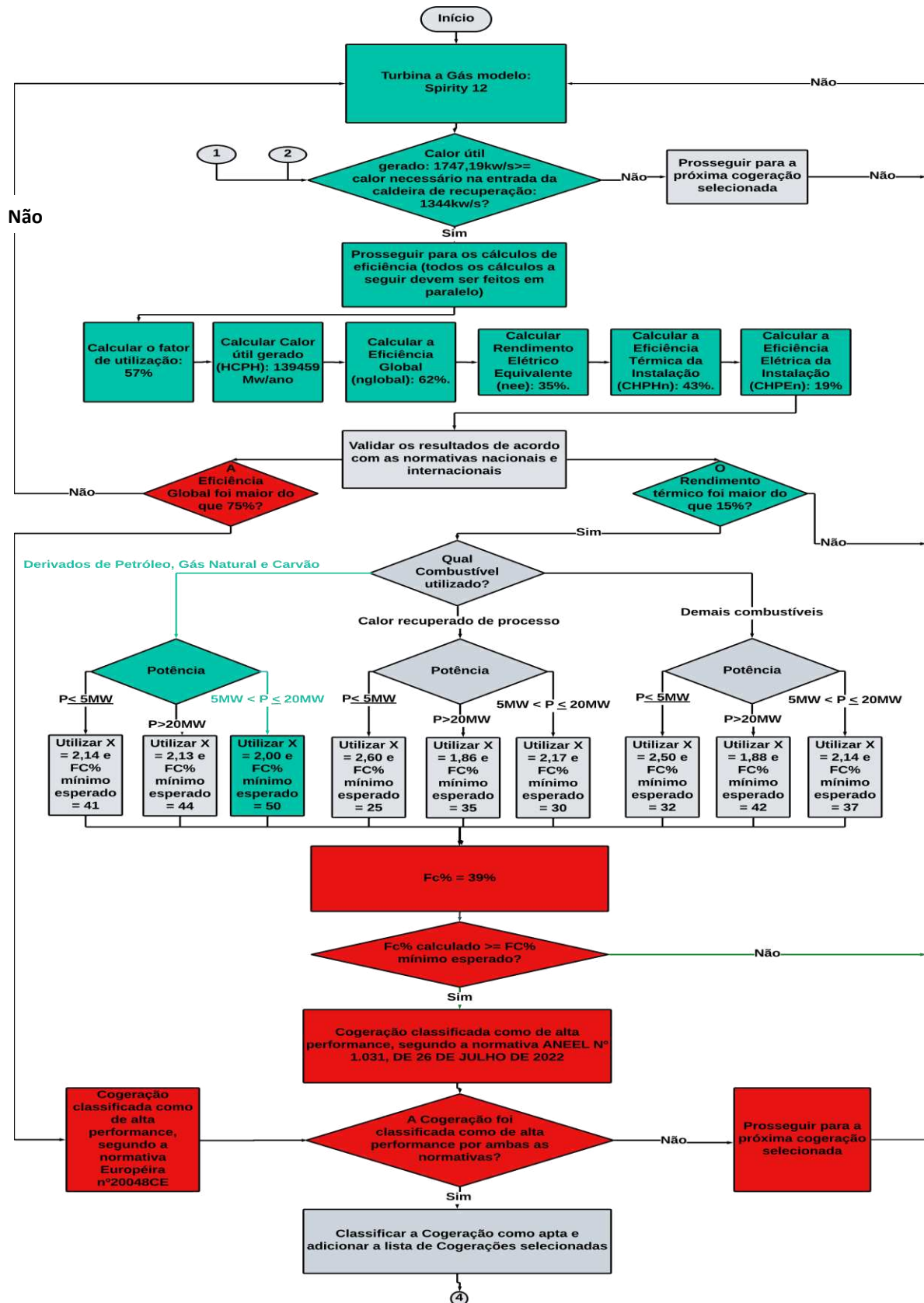
$$CHPH_n = \frac{HCPH}{C} = 43\%$$

- Eficiência elétrica da cogeração ($CHPE_n$), conforme (18):

$$CHPE_n = \frac{P_{Bruta}}{C} = 19\%$$

De acordo com os cálculos apresentados, a cogeração apresentada não é classificada como de altamente eficiente para o cenário proposto, tanto pelas diretrizes nacionais estipuladas pela Aneel nº 1031, assim como normativas internacionais conforme normativa 2004/9/CE do Parlamento Europeu, sendo assim descartada como opção de tecnologia a ser aplicada, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 26.

Figura 26 - Aplicação da análise de viabilidade para a turbina Spirit 12



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4.4 Cálculo de eficiência de turbina a gás modelo THM 1304.

Com o objetivo de calcular a eficiência térmica da turbina selecionada, aplicamos o ciclo de Brayton, obtendo assim a quantia de calor cedido através dos gases de exaustão, conforme Equação 15, a fim de verificar se a turbina proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada, o resultado calculado foi:

$$Q_{out} = 1459,87 \text{ kW/s}$$

Conforme informado na metodologia de trabalho apresentada, sob o ponto de geração de vapor, a turbina escolhida atende os requisitos mínimos de projeto.

Conforme informado pelo fabricante, este modelo possui uma potência instalada de 11,52 MW, tendo por tanto um fator de utilização, aplicando a (16), a seguir:

$$F_{up} = \frac{P_{Bruta}}{P_{Instalada}} = 61\%$$

Dados da cogeração:

- Produção bruta de eletricidade (P_{bruta}): 61433,88 MW/ano
- Autoconsumo de eletricidade (C_e): 2018,30 MW/ano
- energia térmica gerada (P_v): 107928 MW/ano
- Autoconsumo de vapor (C_v): 9713,54 MW/ano
- Consumo de gás natural (C): 357581 MW/ano

- Rendimento elétrico equivalente (η_{ee}) conforme (21):

$$\eta_{ee} = \frac{\varepsilon_e}{(C - \frac{CHPH}{0,9})} = 24\%$$

- Eficiência global (η_{global}) conforme (20):

$$\eta_{global} = \frac{P_{Bruta} + CHPH}{C} = 45\%$$

- Eficiência térmica da cogeração ($CHPH_n$), conforme (19):

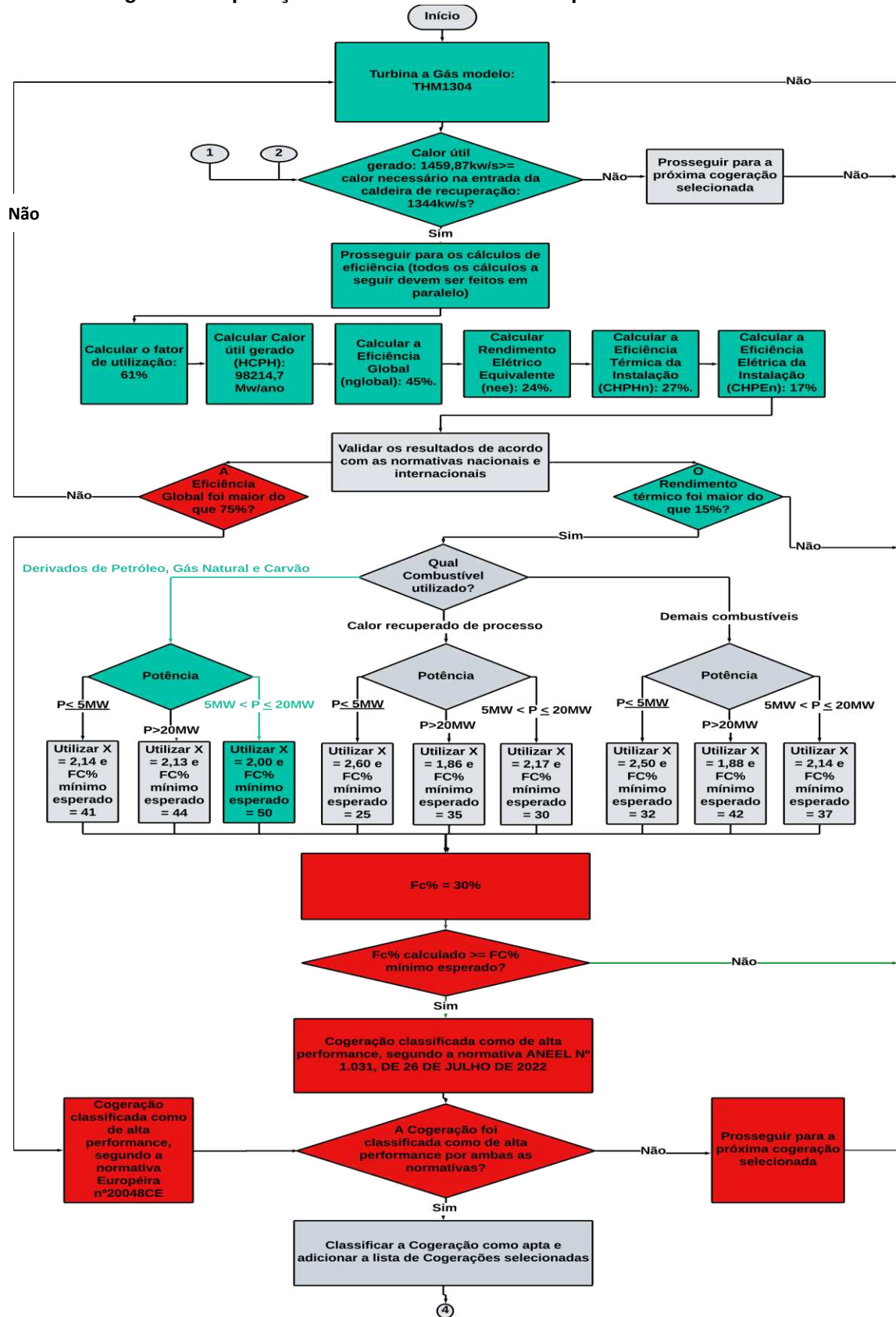
$$CHPH_n = \frac{HCPH}{C} = 27\%$$

- Eficiência elétrica da cogeração ($CHPE_n$), conforme (18):

$$CHPE_n = \frac{P_{Bruta}}{C} = 17\%$$

De acordo com os cálculos apresentados, a cogeração apresentada atende as necessidades de geração elétrica e de vapor, porém não é classificada como de altamente eficiente para o cenário proposto, tanto pelas diretrizes nacionais estipuladas pela Aneel nº 1031, como normativas internacionais conforme Diretiva 2004/9/CE do Parlamento Europeu, portando será descartada da análise, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 27.

Figura 27 - Aplicação da análise de viabilidade para a turbina THM1304

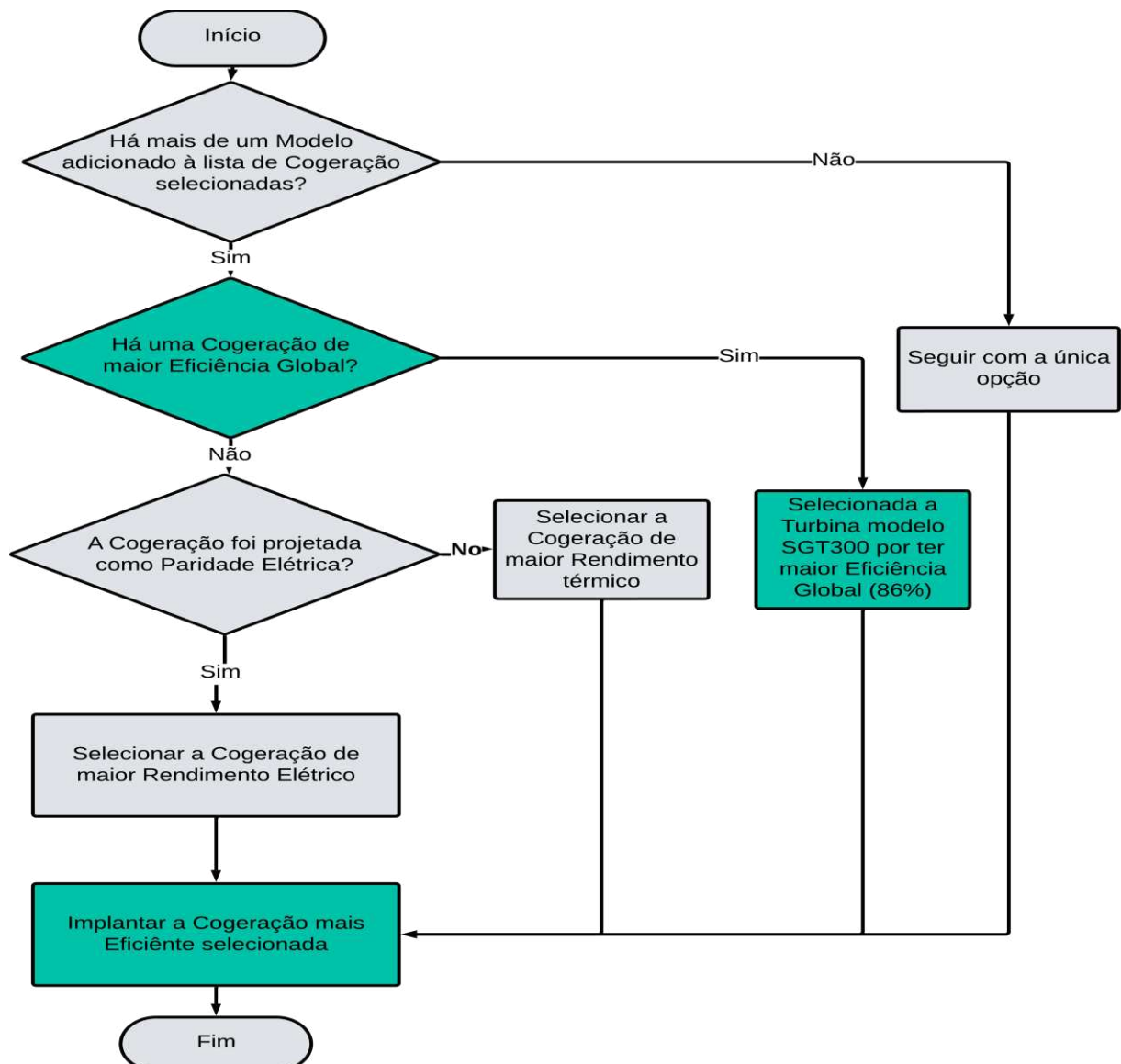


Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4.5 Definição da cogeração por turbina a gás de melhor Eficiência

Após analisar todos os dados apresentados e calculados, podemos concluir que a turbina a gás modelo SGT 300 é o mais apropriado para a Cervejaria em questão, por possuir maior Eficiência global quando comparado com os demais modelos escolhidos, conforme ilustrado na Figura 28. Na próxima sessão, serão apresentados os cálculos para os motores de Combustão Interna selecionados

Figura 28 - Seleção da turbina a gás mais eficiente a ser aplicada

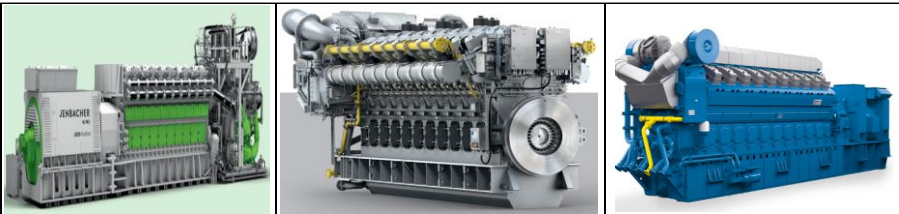


Fonte: Autoria Própria (2024).

4.5 Sistema de cogeração por motor a combustão

Visando o atendimento das demandas elétricas e térmicas apresentadas anteriormente, realizou-se uma busca entre os principais fabricantes de Sistemas de motor a combustão Interna com foco em cogeração. É necessário também acrescentar que a Fábrica utilizada como centro deste estudo não possui estrutura para recebimento de Diesel, por tanto apenas o gás natural foi considerado como combustível neste estudo de caso. A seguir é apresentado o estudo aprofundado de três modelos comerciais de motor a combustão Interna, sendo eles: MAN V35/44G, J920 e o Bergen B35:40L, os principais dados técnicos destes motores são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Ficha Técnica dos motores a Combustão Interna selecionados

Motores a Combustão Interna				
	Modelo	J920 Flextra	MAN V35/44G	Bergen 35:40V
	Fabricante	Jenbacher	MAN Energy Solution	Bergen Engines
	Eletrical Output (Kj)	9340	9945	7700
	Eletrical Efficiency (%)	50%	48,0%	30,0%
	Heat Rate (kJ/kWh)	7214	7508	7270

Fonte: Adaptado de Jenbacher, MAN Energy e Bergen Engines(2024).

4.5.1 Cálculo de Eficiência motor a combustão interna modelo MAN V35/44G

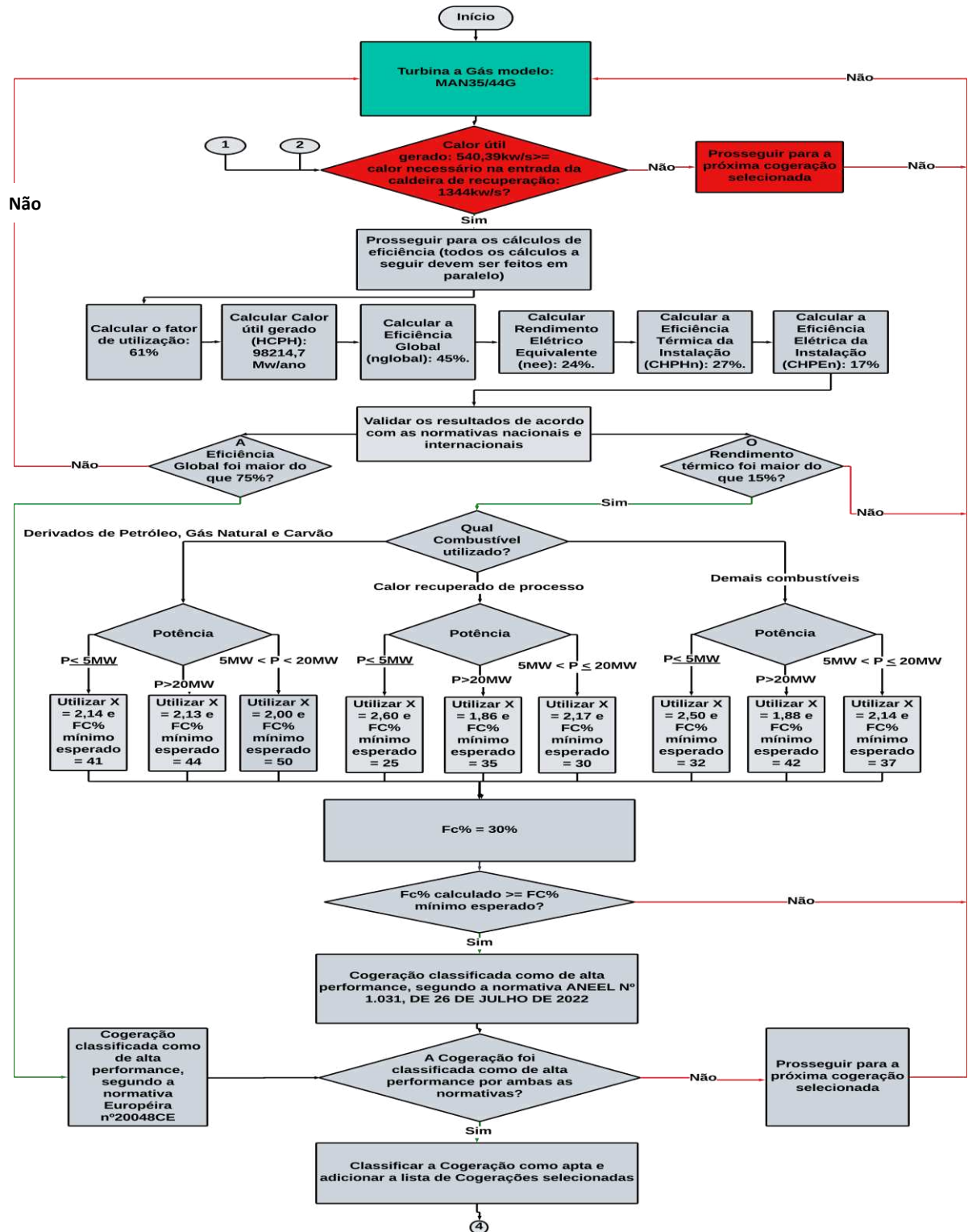
Assim como nos casos apresentados de turbina a gás como sistema de cogeração, no caso do uso de motor a combustão Interna, também deve-se adicionar uma caldeira de recuperação em série para gerar vapor a ser utilizado nos processos da cervejaria. Neste caso, aplicamos o ciclo de Otto ao motor MAN V35/44G, a fim de obter a quantidade de calor a ser enviada para a caldeira de recuperação. O resultado, aplicando (15), obtido foi:

$$Q_{out} = 540,39 \text{ kW/s}$$

Conforme metodologia de trabalho apresentada, a caldeira de recuperação necessita de no mínimo 1344kW/s de calor para gerar 15 ton/h de vapor, com o resultado obtido neste modelo, apenas 6 toneladas de vapor seriam geradas por

hora, por tanto, sob o ponto de geração de vapor, o motor a combustão Interna não atende os requisitos mínimos de projeto para atendimento da demanda de vapor da unidade, por tanto, conforme a metodologia apresentada na Figura 29, este modelo não se classifica para ser aplicado no cenário proposto.

Figura 29 - Aplicação da análise de viabilidade para o motor a combustão MAN 35/44G



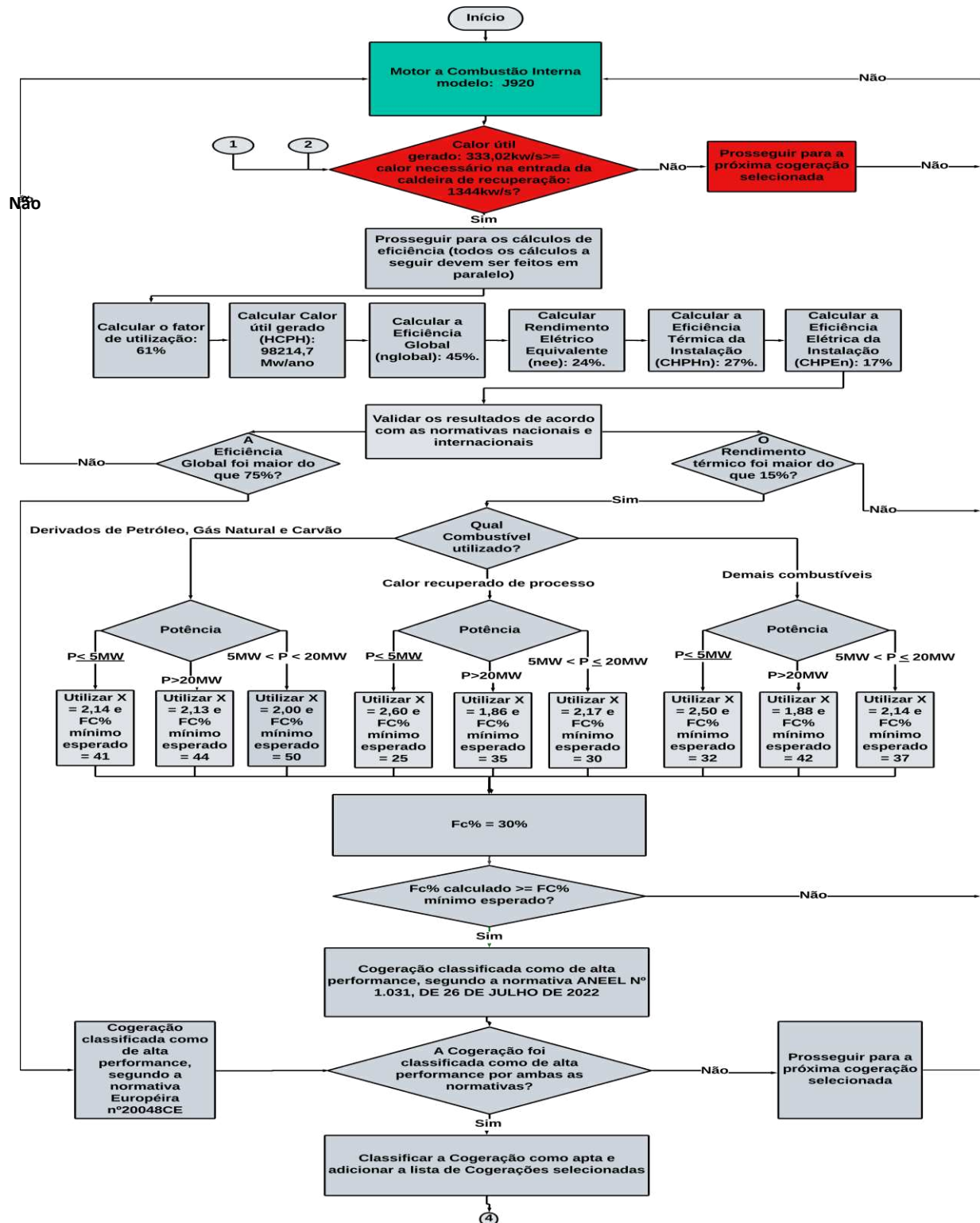
4.5.2 Cálculo de Eficiência motor a combustão interna modelo J920

Com o objetivo de calcular a eficiência térmica do motor selecionado, aplicamos o ciclo de Otto, obtendo assim a quantia de calor cedido através dos gases de exaustão, conforme (15), a fim de verificar se este proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada, o resultado calculado foi:

$$Q_{out} = 333,02 \text{ kW/s}$$

Conforme metodologia de trabalho apresentada, a caldeira de recuperação necessita de no mínimo 1344kW/s para gerar as 15 ton/h necessárias, com esta quantidade de calor apenas 3,7ton/h seriam geradas por este sistema, por tanto, sob o ponto de geração de vapor, o motor a combustão não atende os requisitos mínimos de projeto para atendimento da demanda de vapor da unidade, conforme a metodologia apresentada na Figura 30, este modelo não se classifica para ser aplicado no cenário proposto.

Figura 30 - Aplicação da análise de viabilidade para o motor a combustão J920



Fonte: Autoria Própria (2024).

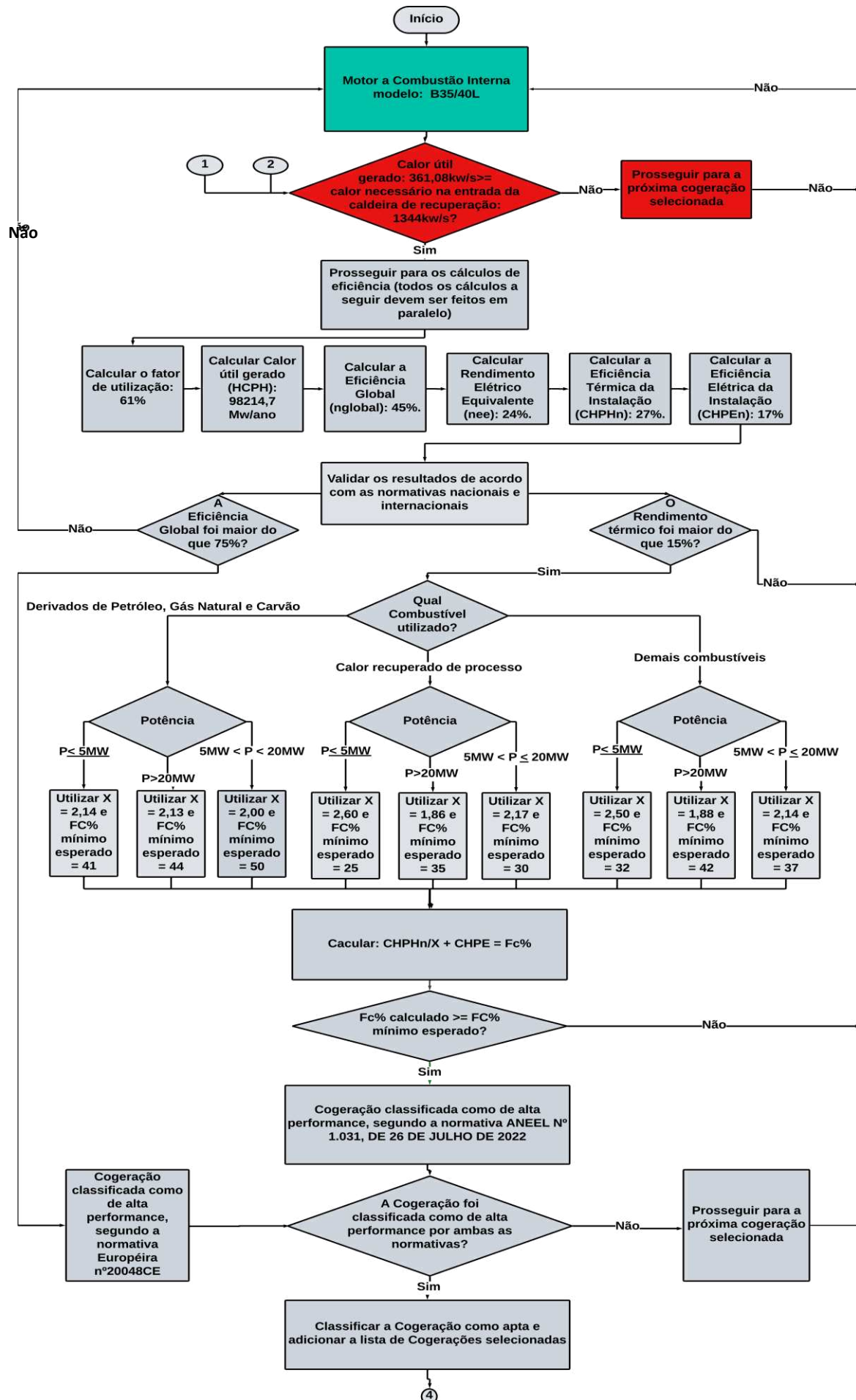
4.5.3 Cálculo de Eficiência motor a combustão interna modelo Bergen B35:40L

Tendo em vista calcular a eficiência térmica do motor selecionado, aplicamos o ciclo de Otto, obtendo assim a quantia de calor fornecido através dos gases de exaustão, conforme (15), a fim de verificar se este proverá energia suficiente para alimentar a caldeira de recuperação selecionada, o resultado calculado foi:

$$Q_{out} = 361,08 \text{ kW/s}$$

Conforme metodologia de trabalho apresentada, a caldeira de recuperação necessita de no mínimo 1344kW/s para seu correto funcionamento, neste caso seria gerado apenas 4,03 ton/h, sendo um valor muito menos do que o demandado, portanto, sob o ponto de geração de vapor, o motor a combustão Interna não atende os requisitos mínimos de projeto, conforme aplicação do fluxograma da Figura 31.

Figura 31 - Aplicação da análise de viabilidade para o motor a combustão B:35/40L



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.5.4 Definição da cogeração por motor de Combustão Interna de melhor Eficiência

Após analisar todos os dados apresentados e calculados, podemos concluir que nenhum dos modelos de motor a combustão Interna atendeu a demanda de geração de vapor, definida como requisito mínimo de projeto para o cenário de aplicação proposto, por tanto, mesmo que pelas normativas os motores MAN V35/44 e o Bergen B35:40L fossem classificados como eficientes, estes não se aplicam ao estudo de caso proposto.

4.6 Definição do sistema de cogeração maior Eficiência para o estudo de caso apresentado

Foram avaliados três modelos de motor a combustão Interna e turbina a gás e verificou-se que a turbina de modelo: SGT300 apresentara resultados mais eficientes para a aplicabilidade sugerida. Conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Cogeração de maior Eficiência global	
Dados	turbina
Modelo	SGT300
Quantidade de vapor Gerada (ton/h)	15
Fator de utilização (FUP)	77%
energia térmica total (MW/ano)	154455,70
REE = Rendimento elétrico equivalente	77%
Eficiência global	86%
Rendimento elétrico da instalação (CHPEn)	26%
Rendimento térmico da instalação (CHPHn)	60%

Fonte: Autoria própria (2024).

O motor a combustão interna com maior eficiência, não gera calor suficiente para a caldeira de recuperação, para a produção de 15 ton/h de vapor, com o calor produzido seria possível gerar apenas 6 ton/h de vapor, isso se deve a menor vazão mássica do gás de exaustão gerada, e, também por conta da menor temperatura

dos gases de exaustão gerados pelo motor a combustão interna do que as obtidas nos ciclos de turbina a gás.

Por tanto, tendo em vista os dados apresentados a tecnologia que melhor se apresenta para o estudo proposto é a turbina a gás modelo SGT300, por atender a todas as demandas estipuladas no estudo de cenário e por conta da alta eficiência global, térmica e elétrica.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso propôs e detalhou uma metodologia estruturada para apoiar a tomada de decisão na seleção da tecnologia de cogeração mais adequada para implantação em uma indústria do setor de bebidas. A pesquisa baseou-se em um estudo aprofundado dos fundamentos termodinâmicos, das tecnologias de cogeração existentes, e das normativas aplicáveis, aliado a um sólido entendimento das demandas energéticas e das características específicas do cenário proposto.

A aplicação prática da metodologia foi demonstrada por meio de um estudo de caso em uma cervejaria, cujo processo produtivo apresenta alta demanda de energia elétrica e vapor. A metodologia desenvolvida utiliza cinco principais etapas, onde cada uma delas auxilia na seleção da cogeração ideal a ser aplicada.

Na primeira etapa, foi realizada a definição das tecnologias de cogeração mais adequadas ao perfil de consumo da cervejaria, considerando os dados técnicos coletados de vapor e energia elétrica e suas demandas. O fator Beta demonstrou ser o indicador mais importante nesta etapa, direcionando que a seleção correta das tecnologias turbinas a gás e motores a combustão interna seriam as opções mais viáveis para o cenário estudado.

Na segunda etapa, foi selecionada a caldeira de recuperação modelo DP1-12, essa caldeira foi dimensionada para operar em série com as tecnologias de cogeração, garantindo a produção de vapor útil nas especificações e demandas exigidas pelos processos industriais da cervejaria.

Na terceira etapa, foram realizados cálculos detalhados para aplicação dos ciclos termodinâmicos, considerando as condições de entrada e saída de energia em cada tecnologia de cogeração. Nesse momento o importante foi verificar qual a quantidade de calor é enviada para caldeira, tendo por tanto a energia térmica produzida pela cogeração.

Na quarta etapa, foi realizada a análise de viabilidade, com cálculos de indicadores de desempenho, como fator de utilização, rendimento elétrico equivalente, eficiência global e rendimento térmico, com estes indicadores foi possível ter um cenário de comparação mais robusto entre as tecnologias estudadas, possibilitando assim uma clara análise entre elas. Outro fato importante, foi realizar a verificação quanto as normativas vigentes, nesta etapa concluiu-se que

alguns modelos, como o THM 1304 atendiam bem ao cenário proposto, mas não eram classificados como de alta performance pelas normativas, ou como no caso dos motores a combustão, não atendiam aos requisitos técnicos da planta, mostrando assim a importância de analisar as tecnologias de cogeração por ambos os aspectos.

Na última etapa, foi selecionado o sistema de cogeração mais eficiente, com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores. O modelo escolhido mostrou-se capaz de atender as necessidades térmicas e elétricas definidas no estudo de caso, tendo uma eficiência global de 86%. Esse resultado não apenas reduz a dependência de energia elétrica comprada, mas também contribui para uma maior eficiência energética e sustentabilidade do processo industrial.

Do ponto de vista técnico, este estudo evidenciou que a cogeração é uma solução mais eficiente para indústrias do ramo de bebidas em comparação aos sistemas convencionais de aquisição de energia elétrica e geração de vapor por caldeiras separadas. A eficiência energética é amplificada pela capacidade do sistema de produzir energia elétrica e vapor a partir de uma única fonte de combustível, otimizando o consumo energético e reduzindo perdas no processo.

Além disso, este trabalho estabelece uma base para futuros estudos que considerem aspectos econômicos e ambientais relacionados à implantação de sistemas de cogeração em indústrias de bebidas. Tais análises poderiam aprofundar a compreensão sobre a viabilidade financeira e os benefícios ambientais desses sistemas, contribuindo para decisões mais integradas e sustentáveis.

Outra perspectiva promissora é o desenvolvimento de metodologias adaptadas a indústrias com demandas energéticas distintas, que não dependam diretamente de vapor como insumo principal. A ampliação do escopo para outros setores industriais aumentaria a aplicabilidade da metodologia e sua contribuição para o avanço das soluções de cogeração.

Como conclusão, este trabalho reforça a importância da cogeração como ferramenta estratégica para otimização energética em indústrias do setor de bebidas. A metodologia desenvolvida oferece um caminho claro para identificar e selecionar tecnologias de cogeração adequadas a diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

AMBEV. **Os principais Ingredientes da Cerveja.** Disponível em: < <https://www.ambev.com.br/blog/categoria/cerveja/os-principais-ingredientes-da-cerveja/> > Acesso em 15 de mar. 2022.

BRASIL. Instrução Normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019. **Estabelece os padrões de identidade e qualidade para os produtos de cervejaria.** Diário oficial da União: seção 1, Página 31, Brasília, DF, Edição 239. > Acesso em: 21 agosto. 2023.

BRASIL. Norma Regulamentadora No. 13 (NR-13). **Regulamenta Caldeiras, Vasos De Pressão, Tubulações E Tanques Metálicos De Armazenamento.** 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: 09 abril 2023.

BERGEN ENGINES. B35:40V. Disponível em: < <https://www.bergenengines.com/engines/bergen-b3540v/> >. Acesso em: 26 maio. 2024

BOETTCHER, Maicon. **Revolução Industrial - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0.** Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>. > Acesso em:18 abril. 2024.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor.** Editora da UFSC – 1995. .> Acesso em: 13 mar. 2024.

CAFS ENGENHARIA. **O que são Caldeiras.** Disponível em: <https://www.cafs.eng.br/post/o-que-s%C3%A3o-caldeiras-1>. .> Acesso em: 09 out. 2023.

ÇENGEL, Yunus A., BOLES, Michael A **Thermodynamics: an engineering approach. 5ª Edição. S. Paulo: McGraw Hill.** – 2006

CREDER, HELIO. **Instalações elétricas.** Editora LTC – 2016.

COGEN. **Conceito e tecnologias.** Disponível em: <<https://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. **Documento Referência para melhor avaliação de Técnicas para a Eficiência Energética.** Disponível em: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-09/ENE_Adopted_02-2009corrected20210914.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

COMBUSTION ASSOCIATES. **Spirit 12- Gas Turbine Power Generation System.** Disponível em: <https://cai3.com/spirit-12-mw/>. Acesso em: 16 Jun. 2024.

CTGAS-ER. **Curso Básico de turbina a vapor.** SENAI – 2010.

DEVKI ENERGY CONSULTANCY PVT. LTD., **Best Practice Manual Of Cogeneration** -2006.

EUROMONITOR INTERNATIONAL. **Alcoholic Drinks in Brazil.** London: Euromonitor International, 2019.IPC, Maps. **COVID-19: Consumo de bebidas alcoólicas caiu durante a pandemia.** Disponível em:<<http://www.ipcbr.com/#:~:text=O%20IPC%20Maps%20%C3%A9%20o,de%20bairros%20em%20221%20munic%C3%ADpios.>> Acesso em: 29 novembro 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN - Balanço Energético Nacional.** Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. .> Acesso em: 26 set. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **FACT SHEET - Anuário Estatístico de energia elétrica 2022.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>. .> Acesso em: 28 mai. 2023.

FONSECA, RODRIGO. **Operações Unitárias Filtração - 2004.** Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/opsepara/filtraca.htm>> Acesso em: 23 abril. 2022.

F.J. GUTIÉRREZ ORTIZ. **Modeling of fire-tube boilers. Applied Thermal Engineering** – 2018.

FREITAS, MARCELO. **eletricidade.** Disponível em:<https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/c/c8/eletricidade_MarceloFreitasdaSilva_eTec.pdf> Acesso em: 17 maio 2023.

FREEDMANN,YOUNG. **Física IV e Física Moderna.** Editora Pearson – 2004.

GB TÉCNICA. **Novidades - Caldeiras.** Disponível em: <https://www.gbtecnica.com.br/index.php/novidades/caldeiras/>. .> Acesso em: 22 mai. 2023.

HAL **Archives Ouvertes.** Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00789870/document>. .> Acesso em: 07 mar. 2022.

INSTITUTO DA CERVEJA. **Afinal, o que o lúpulo faz realmente na cerveja?** Disponível em: < <https://www.institutodacerveja.com.br/blog/n145/dicas/afinal-o-que-o-lupulo-faz-realmente-na-cerveja>> Acesso em 15 dezembro 2023.

INNIO. **Jenbacher J920 Flextra.** Disponível em: <https://innio.com/pt/produtos/jenbacher/j920-flextra>. Acesso em: 10 jun. 2024

JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA. **DIRETIVA 2004/38/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO.** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:229:0035:0048:PT:PDF>>. Acesso em: 13 mai.2024

LARA, Carlos. **Brassagem de cerveja artesanal: tudo o que você precisa saber sobre esse processo.** Disponível em: <<https://www.hominilupulo.com.br/brassagem-avancada/>> Acesso em: 22 fevereiro 2024.

LINEU, Reis. **Geração de energia elétrica.** Editora Monole - 2011

MORESCO, Cristiano. **Fermentação - 2004.** Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/prcerea/cerveja/ferme.htm>> Acesso em 23 mar. 2023.

MAN ENERGY SOLUTION. **THM1304 Generator Drive.** Disponível em: <https://man-es.com/docs/default-source/document-sync/thm1304-eng.pdf?sfvrsn=732d3fc3_1>. Acesso em> 11 jun. 2024.

MAN ENERGY SOLUTION. **MAN V35/44G.** Disponível em: <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-v35-44g-eng.pdf?sfvrsn=732fa54_3>. Acesso em> 07 jun. 2024.

MOURA, Ailson. **Geração Hidroelétrica e Eolioelétrica.** Editora UFC – 2019

NUNES, GILSON. **motores a Combustão Interna Teoria e Prática.** Editora Labcet UFSC – 2012.

OLIVER, Garrett. **A Mesa do Mestre Cervejeiro. Descobrindo os prazeres das cervejas e das comidas verdadeiras.** Editora Senac SP – 2012.

PMKB. **Crescimento cervejeiro: o progresso que a gestão de projetos proporciona - 2018.** Disponível em: <<https://pmkb.com.br/artigos/crescimento-cervejeiro-gestao-de-projetos-proporciona/>> Acesso em 23 mar. 2022. .> Acesso em: 21 mar. 2024.

P & Q, ENGENHARIA, JR. **Produção De Cerveja: Etapas, Características E A Química Da Cerveja.** Disponível em: <<https://peqengenhariajr.com.br/processo-de-producao-de-cerveja/#:~:text=As%20etapas%20s%C3%A3o%20as%20seguintes,um%20repouso%20de%205%20dias.>> Acesso em: 21 mar. 2024.

REIS, Lineu. **Geração de energia elétrica.** Editora Manole 2011.

RESENDE, Paulo. **Câmara de combustão da turbina a gás**. Disponível em: <https://termoblog.com.br/camaras-de-combustao-de-uma-turbina-a-gas/>. Acesso: 07 de ago. 2024.

ROLIM. **Soluções em energia. ANEEL regula a Conta Escassez Hídrica**. Disponível em: <https://rolim.com/aneel-regula-a-conta-escassez-hidrica/#:~:text=Diante%20dos%20impactos%20financeiros%20no,energia%20el%C3%A9trica%2C%20que%20funcionam%20como.> .> Acesso em: 11 mar. 2022.

STEPHEN, UMANS. **Máquinas elétricas**. Editora AMGH - 2014.

SIEMENS. **SGT-300 Gas Turbine**. Disponível em: < <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/products-services/product/sgt-300.html#/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SIEMENS. SGT5-4000F Gas Turbine. Disponível em: <<https://siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgt5-4000f.html#/>> Acesso em: 10 set. 2024.

THERMAL ENGINEERING. **O que são Ciclos Termodinâmicos - Definição**. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-sao-ciclos-termodinamicos-definicao/>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

TLV. **Fundamentos do vapor**. Disponível em: <<https://www.tlv.com/pt-br/steam-info/steam-theory/steam-basics/how-to-read-a-steam-table>>. Acesso em: 04 abril 2023.

TRILLIUM FLOW TECHNOLOGIES. Steam Turbines. Disponível em: <https://www.trilliumflow.com/product/steam-turbines/>. Acesso em: 10 set. 2024.

VIANA, Fernando Luiz E. **Indústria de bebidas alcoólicas**. Caderno Setorial ETENE. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 5, n.117. jun. 2020. (Série Caderno Setorial ETENE, n.117). .> Acesso em: 21 jun. 2023.

WEG. **Características e especificações de geradores**. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> >. Acesso em Junho de 2024.