



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JOÃO PAULO MALHEIROS OLIVEIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
APLICADO À UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

**OURO PRETO, MG
2018**

JOÃO PAULO MALHEIROS OLIVEIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
APLICADO À INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professora orientadora: Elisângela Martins Leal, Ph.D.

**Ouro Preto, MG
2018**

O482a Oliveira, João Paulo Malheiros.
Análise Energética de um Sistema de Cogeração aplicado à uma Indústria
Cervejeira [manuscrito] / João Paulo Malheiros Oliveira. - 2018.

viii,62f.: il.: color; graf.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Cogeração. 2. Energia. 3. Análise Energética. I. Leal, Elisângela Martins.
II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 7 dias do mês de dezembro de 2018, às 13h30min, na sala 16, localizada na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, foi realizada a defesa de monografia do aluno João Paulo Malheiros Oliveira, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia, Prof. MSc. Marcelo Teodoro Assunção e Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à uma indústria cervejeira”**, sob orientação da Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado.

Ouro Preto, 7 de dezembro de 2018.

Profa. DSc. Elisângela Martins Leal

Professora Orientadora

Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia

Professor Avaliador

Prof. MSc. Marcelo Teodoro Assunção

Professor Avaliador

João Paulo Malheiros Oliveira

Aluno

Dedico mais esta conquista com todos que já passaram por minha vida, principalmente aqueles que permaneceram.

Aos meus pais e irmão, pelo suporte e incentivo.

A Ouro Preto, por ser tão especial.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, por toda dedicação e contribuição para disseminar o conhecimento e compartilhar experiências e sabedorias com os alunos.

Em especial à minha orientadora Elisângela Martins Leal, que além da orientação exemplar, foi além da relação cordial aluno-professor, tendo muito carinho e paciência para me guiar nessa etapa final.

À Ouro Preto, cidade que encanta, que trouxe ótimos momentos, ótimos amigos que viraram companheiros para a vida e que permitiu que eu continuasse sonhando alto.

Ao meu irmão, pessoa exemplar na minha vida, por todo o carinho, suporte e conselhos. Obrigado por estar sempre tão presente, essa conquista também é sua.

Por último, porém mais importante, aos meus pais, vô e vó, que sempre me deram força, incentivo e apoio, em todas as decisões tomadas.

Invictus

*Out of the night that covers me
Black as the Pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul.*

*In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud
Under the bludgeoning's of chance
My head is bloody, but unbowed.*

*Beyond this place of wrath and tears
Looms but the Horror of the shade,
And yet the menace of the years
Finds and shall find the unafraid.*

*It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul.*

William Ernest Henley

RESUMO

OLIVEIRA, João Paulo Malheiros. Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à uma indústria cervejeira. 2018. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

O trabalho presente busca propor uma configuração de um sistema de cogeração para uma indústria cervejeira de pequena escala. Cogeração consiste basicamente em aproveitar duas formas de energia (elétrica e térmica) produzidas a partir de um mesmo combustível, a ser determinado de acordo com a máquina térmica trabalhada. Para este trabalho foram analisados sistemas de cogeração utilizando motores de combustão interna e turbinas a vapor. Para os casos dos motores, o combustível a ser queimado é o óleo diesel, e os gases de exaustão do motor são direcionados para um trocador de calor que irá pré-aquecer a água que entra na caldeira, para a produção de vapor a ser utilizada na unidade de processo. A energia elétrica produzida pelo motogerador será aproveitada também no processo. Para os casos das turbinas a vapor, o fluido de trabalho a ser utilizado no processo é o vapor e a potência elétrica gerada neste ciclo será utilizada no processo. Considerando os parâmetros necessários pela unidade de processo, principalmente a demanda térmica e elétrica, e realizando os cálculos considerando paridade térmica para os sistemas de cogeração foram obtidos resultados para os cenários propostos. O cenário composto por motogerador Kohler modelo KV550OUC2 (cenário 2) foi o mais vantajoso seguido do cenário 3 (motogerador Himoina modelo HSW-725 T6B). Os cenários utilizando turbina a vapor foram semelhantes e apresentaram uma eficiência de cogeração de 86% mas com uma produção de potência elétrica em torno de 120 kW. Por fim, este trabalho mostra que os sistemas de cogeração propostos mostraram viabilidade técnica.

Palavras-Chave: Energia, Cogeração, Demanda Energética, Máquinas Térmicas, Indústria Cervejeira, Análise energética.

ABSTRACT

OLIVEIRA, João Paulo Malheiros. Energy analysis of a cogeneration system applied to a brewing industry. 2018. Monograph. (Bachelor degree in Mechanical Engineering). Federal University of Ouro Preto.

The present work seeks to propose a configuration of a cogeneration system for a small-scale brewing industry. Cogeneration consists of taking advantage of two forms of energy (electric and thermal) produced from the same fuel, to be determined according to the machined thermal machine. For this work, cogeneration systems were analysed using internal combustion engines and steam turbines. In the case of engines, the fuel to be burned is diesel oil, and the exhaust gases from the engine are directed to a heat exchanger that will preheat the water entering the boiler to produce steam to be used in the process unit. The electric energy produced by the motor-generator will also be used in the process. For steam turbine cases, the working fluid to be used in the process is steam and the electrical power generated in this cycle will be used in the process. Considering the parameters required by the process unit, mainly the thermal and electrical demand, and performing the calculations considering thermal parity for the cogeneration systems, results were obtained for the proposed scenarios. The scenario composed by Kohler model KV550OUC2 (scenario 2) was the most advantageous scenario 3 (Himoinsa model HSW-725 T6B). The scenarios using steam turbine were similar and presented a cogeneration efficiency of 86% but with a production of electric power around 120 kW. Finally, this work shows that the proposed cogeneration systems showed technical feasibility.

Keywords: *Energy, Cogeneration, Energetic Demand, Thermal Machines, Brewing Industry, Energetic Analysis*

LISTA DE ABREVIATURAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PIB	Produto Interno Bruto
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
GTD	Geração, Transmissão e Distribuição
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
Mapa	Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
COMGÁS	Companhia de Gás de São Paulo
CC	Câmara de Combustão
TG	Turbina a Gás
TV	Turbina a Vapor
MCI	Motor de Combustão Interna
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
COP	Coeficiente de Performance
GE	Gerador Elétrico
TWh	Tera-watt hora
PIS	Programa de Integração Social
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Trabalho [kW]
h_i	Entalpia no ponto “i” [kJ/kg]
T_i	Temperatura no ponto “i”[°C]
s_i	Entropia no ponto “i” [kJ/kg.K]
ds_i	Derivada de “i”
P_i	Pressão no ponto “i” [kPa]
v_i	Volume específico no ponto “i” [m ³ /kg]
q_x	Calor no processo “x” [kW]
η	Eficiência [%]
k	Coeficiente Isoentrópico
r_p	Razão de pressão
r_v	Relação de compressão
C_p	Calor específico à pressão constante [kJ/kg.K]
E	Potência elétrica consumida no segmento [kWe]
E'	Potência elétrica gerada pelo sistema de cogeração [kWe]
S	Potência térmica consumida no segmento [kWth]
S'	Potência térmica gerada pelo sistema de cogeração [kWth]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
ALFA	Razão entre a potência elétrica e a potência térmica consumida no segmento [kWe/kWth]
PCI	Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
m	Massa [kg]
NO _x	Óxido de nitrogênio
SO _x	Óxido de enxofre
BETA	Razão entre a potência térmica e a potência elétrica consumida no segmento [kWth/kWe]
C	Cilindrada [L]
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
Hz	Hertz

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2016	2
Figura 2 - Participação do Setor Cervejeiro no PIB	4
Figura 3 – Panorama do setor de cerveja em 2014 no Brasil	5
Figura 4 – Custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil	9
Figura 5 – Cerveja no Brasil	11
Figura 6 – Processo de Cogeração de Energia.....	14
Figura 7 – Cogeração de Energia a Gás Natural.....	14
Figura 8 – Esquema de uma configuração <i>Topping</i>	16
Figura 9 – Esquema de uma configuração <i>Bottoming</i>	17
Figura 10 – Esquema (a) e Diagrama T-s (b) de um Ciclo Rankine Simples	18
Figura 11 – Diagrama T-s Ciclo Rankine real.....	21
Figura 12 – Esquema simples de Ciclo Brayton.....	22
Figura 13 – Diagramas P-v e T-s do ciclo Brayton.	23
Figura 14 – Diagrama T-s do ciclo Brayton real.	25
Figura 15 – Exemplo de um esquema de Ciclo Combinado.	26
Figura 16 – Diagramas P-v e T-s do ciclo Diesel.....	27
Figura 17 – Ciclo de Refrigeração por absorção de amônia.....	30
Figura 18 – Fluxograma das etapas da monografia.	37
Figura 19 – Gráfico da Produção de Cerveja [litro/mês].....	41
Figura 20 – Gráfico do Consumo de Combustível [tonelada/mês].	42
Figura 21 – Gráfico da Demanda Térmica [tonelada/mês].	43
Figura 22 – Gráfico da Demanda Elétrica [kW].....	44
Figura 23 – Gráfico da Demanda Térmica da Refrigeração [kW].	45
Figura 24 – Gráfico da Demanda Elétrica da Refrigeração [kW].	45
Figura 25 – Esquema proposto de sistema de cogeração utilizando motor de combustão interna.	47
Figura 26 – Modelos de Moto geradores selecionados.	48
Figura 27 – Esquema proposto de sistema de cogeração utilizando turbina a vapor.	51
Figura 28 – Modelos de TV selecionados.	52
Figura 29 – Caldeira MBR-1E.....	53
Figura 30 – Resultados dos cenários simulados para a indústria cervejeira estudada.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico do acionamento das bandeiras tarifárias.....	8
Tabela 2 - Composição do custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil em 20169	
Tabela 3 – Relações de razão calor/potência, potência saída e eficiência global.....	33
Tabela 4 – Tabela das Variáveis e Indicadores	38
Tabela 5 – Valores de ALFA e BETA	46
Tabela 6 – Especificações dos motogeradores selecionados.....	48
Tabela 7 – Resultados obtidos do sistema de cogeração usando os motogeradores selecionados.....	50
Tabela 8 – Especificações das turbinas a vapor selecionados	52
Tabela 9 – Dados da caldeira da Mitsubishi IHI	53
Tabela 10 – Resultados obtidos para cada ponto.....	54
Tabela 11 – Resultados obtidos das turbinas a vapor.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Formulação do problema	1
1.2.	Justificativa	4
1.3.	Objetivos	6
1.3.1.	Objetivo Geral	6
1.3.2.	Objetivos específicos	6
1.4.	Estrutura do Trabalho	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	O setor energético brasileiro	8
2.2	O setor cervejeiro	10
2.2.1	Produção da Cerveja	12
2.3	A cogeração	13
2.4	Configuração dos ciclos e tipos	15
2.4.1.	Ciclo Rankine	17
2.4.2.	Ciclo Brayton	22
2.4.3.	Ciclo Combinado	25
2.4.4	Ciclo Diesel	27
2.4.5	Ciclo Frigorífico por Absorção de Amônia	29
2.5	Seleção e configuração da central de cogeração	31
2.6	Considerações finais	34
3	METODOLOGIA	35
3.1	Tipo de Pesquisa	35
3.2	Materiais e Métodos	36
3.3	Variáveis e Indicadores	37
3.4	Instrumentos de Coletas de Dados	38
3.5	Tabulação de Dados	39
3.6	Considerações Finais	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Caracterização da Empresa	40
4.2.	Sistemas de cogeração propostos	46
4.2.1	Sistema de cogeração com motor de combustão interna (MCI)	47

4.2.2 Sistema de cogeração com turbina a vapor	50
4.3 Considerações Finais	55
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	57
5.1 Conclusões.....	57
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será feita uma rápida abordagem teórica e global sobre a cogeração, justificará a relevância da implantação de um sistema de cogeração no setor industrial, mais especificamente uma indústria cervejeira, além de toda uma contextualização do problema abordado neste trabalho através dos conceitos e análises da aplicabilidade dos ciclos e dos elementos que constituem os sistemas de cogeração. Portanto, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1. Formulação do problema

Apesar do conceito de energia ser recente, o conhecimento da mesma pelo homem vem desde a descoberta do fogo, do qual o homem se beneficiava da energia térmica obtida pelas chamas. Atualmente a principal forma de energia é a eletricidade, que é de extrema importância e o seu consumo é um fator determinante para o desenvolvimento de um país. E o setor de maior consumo é o setor industrial, que procura cada vez mais otimizar os gastos, aumentar a eficiência de seus equipamentos e reduzir o custo.

As fontes das quais pode-se obter a energia elétrica como produto final são várias, sendo que no Brasil a principal forma de geração de eletricidade é oriunda das hidrelétricas. É possível analisar as outras fontes de geração de energia elétrica, conforme mostra a Figura 1. (EPE,2017)

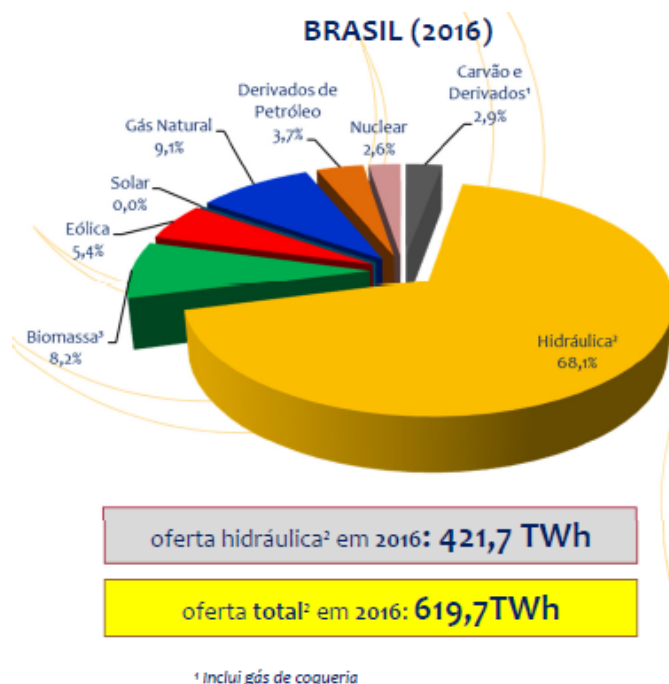


Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2016
 Fonte: Adaptado de EPE, 2017

A Figura 1 ilustra que, em 2016, 68,1% da oferta total de energia elétrica foram geradas por usinas hidrelétricas, totalizando 421,7 TWh, e, apesar de ser uma fonte renovável e limpa, é uma fonte que depende bastante da hidrologia brasileira.

Uma forma de melhorar a eficiência e reduzir os gastos é o *retrofit* de equipamentos das usinas hidrelétricas, nucleares e outras; e também os equipamentos das indústrias. Porém, uma outra alternativa é o investimento na autoprodução, nas instalações de placas fotovoltaicas ou de moinhos (energia eólica) nas próprias plantas industriais. Mas, uma opção mais viável e de baixo custo é a implantação da cogeração, que, segundo Balestieri (2002), a autoprodução de energia, nas formas de energia eletromecânica e calor industrial para processos, pode ser uma necessidade, uma vez que algumas áreas podem ser consideradas prioritárias no atendimento da demanda em função dos níveis de confiabilidade exigidos para sua operação.

De acordo com Silveira (1994), a cogeração é um método efetivo de conservação de energia primária, que pode ser aplicado quando economicamente justificado. O termo cogeração pode ser definido como a produção simultânea de duas formas de energia útil a partir de uma única fonte de energia. A principal vantagem é o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia das duas

formas citadas. Para analisar a viabilidade da implantação de um sistema de cogeração é preciso analisar primeiro a demanda energética da indústria.

De acordo com Balestieri (1994), a demanda por energia térmica e elétrica ocorre cotidianamente, tanto a nível residencial quanto industrial ou comercial. Para bem estabelecer a cogeração dentro da perspectiva do uso racional da energia em base industrial, é necessário estabelecer o conceito de planta de processo, como um conjunto de fábricas e/ou subprocessos de um certo setor, que se encontram em área física próxima, e que se inter-relacionam para a produção de bens. No caso do trabalho apresentado, o setor a ser estudado será uma indústria cervejeira.

Além disso, é necessário conhecer a demanda energética da indústria a ser trabalhada, os valores máximos e mínimos de eletricidade, assim como de outra forma de energia, no caso, a energia térmica, e a partir de então, determinar qual a configuração mais viável, levando em consideração o número de equipamentos e de máquinas térmicas, de acordo com o ciclo a ser trabalhado.

Por máquinas térmicas pode-se entender equipamentos que fazem parte dos sistemas térmicos ou ciclos térmicos. Segundo Chiericato (2010), a escolha de um sistema, por permitirem diferentes configurações, deve levar em conta a viabilidade técnico-econômica, as necessidades estratégicas (tal como a demanda energética, e principalmente, qual a indústria) e outras variáveis como disponibilidade de água, espaço, combustível, condições ambientais, etc.

Os ciclos que podem ser trabalhados, de acordo com Chiericato (2010), são: Ciclo Rankine; Ciclo Brayton; Ciclo Combinado (Rankine com Brayton); e o Ciclo de Cogeração com Motores Alternativos, que utiliza motores de combustão interna; e por último, Ciclo de Cogeração com Produção de Frio.

Segundo o site CervBrasil, o setor cervejeiro é um dos mais relevantes da economia brasileira, com investimento próximo aos R\$20 bilhões entre 2011 e 2014, representando 1,6% do PIB nacional, gerando 2,2 milhões de empregos diretos e indiretos. No total são 53 fábricas em operação. Considerando que são fábricas de grande porte, com alto gasto de energia elétrica e térmica, pode-se afirmar que o custo também é alto. Por isso, uma análise energética é importante, e soluções para aumentar a eficiência e reduzir custo devem ser pesquisados.

Assim, perante esse contexto, tem-se a seguinte problemática:

Diante dos benefícios da cogeração, qual a configuração e os parâmetros desse sistema que melhor se enquadra à indústria cervejeira em estudo?

1.2. Justificativa

Como já foi citado, a indústria cervejeira já conta com 53 fábricas atualmente, sem considerar as inúmeras microcervejarias, donas de rótulos locais, localizadas em toda parte do Brasil. O mercado é amplo e tende a crescer mais ainda, trazendo benefícios para a economia brasileira. Entre 2005 a 2014, a participação do setor no PIB manteve constante entre 1,5% a 1,7%, e é o 12º maior gerador de empregos, segundo o BNDES (2017). Na Figura 2 observa-se a participação do setor cervejeiro no Produto Interno Bruto brasileiro, e na Figura 3, o panorama do setor de cerveja no Brasil em 2014.

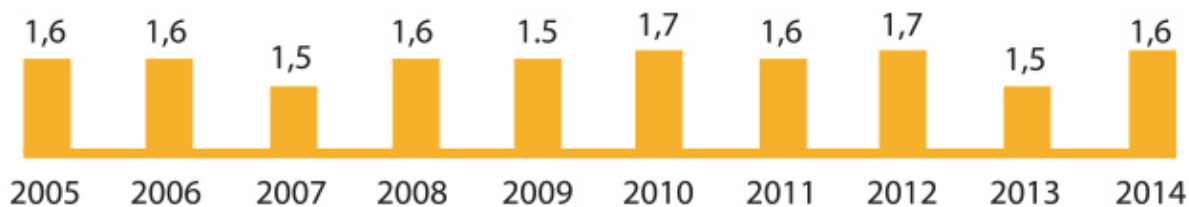


Figura 2 - Participação do Setor Cervejeiro no PIB
Fonte: Adaptado de www.cervbrasil.org.br, 2018.



Figura 3 – Panorama do setor de cerveja em 2014 no Brasil
 Fonte: Adaptado de CervBrasil, 2018.

Após os fatos apresentados, pode-se afirmar que o mercado da indústria cervejeira está em crescimento contínuo, e atualmente governos ao redor do mundo tem buscado cada vez mais otimizar o uso de eletricidade de tal forma a produzir mais a um menor custo. Pode-se concluir que a implantação de um sistema de cogeração, quando viável técnica e economicamente, é uma forma de alcançar tal objetivo, sendo as indústrias cervejeiras um setor do qual pode se beneficiar desta modalidade de geração de energia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Estudo do sistema de cogeração aplicado a uma indústria cervejeira. Este estudo envolve a busca da configuração, dos parâmetros de processo que melhor se adequam as necessidades da empresa e a análise técnica da configuração do sistema de cogeração a ser proposta.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar estudos sobre os sistemas de cogeração e as possíveis configurações, de acordo com seus ciclos;
- Identificar os parâmetros de caracterização de um processo específico da indústria cervejeira em estudo: razão entre calor e potência elétrica, consumo específico de vapor, combustível e calor, eficiência termodinâmica, disponibilidade, confiabilidade e viabilidade de cada equipamento;
- Descrever a metodologia a ser adotada, de tal forma a apontar as variáveis e os indicadores do estudo, apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Analisar, detalhar e fundamentar a configuração do sistema de cogeração proposto;
- Realizar sugestões para estudos futuros.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em cinco capítulos e apresenta-se conforme a estrutura a seguir:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do processo produtivo de uma indústria cervejeira e dos sistemas de cogeração existentes, apresentando seus ciclos e detalhando os conceitos, tais como os conceitos da análise energética (térmica e elétrica).

O terceiro capítulo explica o processo metodológico adotado neste trabalho, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes imprescindíveis na obtenção dos resultados.

As discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados serão abordados no quarto capítulo. Finalmente, o quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para futuros trabalhos relacionados ao assunto tratado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo um embasamento teórico, definindo e explicando os conceitos, a partir de uma literatura adequada, referente aos assuntos abordados como o setor energético brasileiro, o setor cervejeiro e sua produção, e os ciclos e configurações existentes da cogeração, assim como os seus componentes.

2.1 O setor energético brasileiro

Segundo documento emitido pelo Sistema Firjan (2017) a energia elétrica é um dos principais indicadores de qualidade e custo para as indústrias, e tem grande correlação com a competitividade e 79% das empresas utilizam a energia elétrica como principal energético, representando mais de 40% de seus custos de produção.

E a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil são oriundas das hidrelétricas, portanto a dependência é grande. Apesar de ser uma fonte renovável e de baixo custo, quase 50% das usinas hidrelétricas são do tipo “a fio d’água”, que não possui grandes reservatórios de acumulação, deixando o sistema cada vez mais vulnerável à hidrologia. Que foi o caso nos últimos anos, em que o Brasil teve que recorrer ao acionamento das termoelétricas, impactando no preço final para o consumidor, quando aciona-se a bandeira vermelha (FIRJAN, 2017). A Tabela 1 mostra o histórico das bandeiras.

Tabela 1 - Histórico do acionamento das bandeiras tarifárias

Mês/ano	Bandeira	Adicional da Bandeira (R\$/MWh)	Mês/ano	Bandeira	Adicional da Bandeira (R\$/MWh)
Jan/15	Vermelha	30	Jan/16	Vermelha	45
Fev/15	Vermelha	30	Fev/16	Vermelha – Patamar 1	30
Mar/15	Vermelha	55	Mar/16	Amarela	15
Abr/15	Vermelha	55	Abr/16	Verde	0
Mai/15	Vermelha	55	Mai/16	Verde	0
Jun/15	Vermelha	55	Jun/16	Verde	0
Jul/15	Vermelha	55	Jul/16	Verde	0
Ago/15	Vermelha	55	Ago/16	Verde	0
Set/15	Vermelha	55	Set/16	Verde	0
Out/15	Vermelha	45	Out/16	Verde	0
Nov/15	Vermelha	45	Nov/16	Amarela	15
Dez/15	Vermelha	45	Dez/16	Verde	0

Fonte: Adaptado de Firjan, 2017.

Durante o ano de 2015, a tarifa esteve acionada e teve um custo em sua maioria de 55 R\$/MWh, e só foi desligada em 2016. A Figura 4 mostra o custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil. Nesta figura pode-se observar que houve um aumento do custo médio da eletricidade desde 2013, de 340,10 R\$/MWh, até 2016 que fechou com uma média de 504 R\$/MWh, ou seja, um aumento de 48,2%, devido às faltas de chuvas que afetaram a produção de energia.



Figura 4 – Custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil
Fonte: Adaptado de Firjan, 2017.

O custo médio da energia elétrica pode ser dividido em cinco componentes: geração, transmissão e distribuição (GTD); perdas técnicas e não técnicas; encargos setoriais; bandeiras tarifárias; tributos estaduais e federais. Na tabela 2 é possível ver quanto que cada um desses componentes representa no custo final.

Tabela 2 - Composição do custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil em 2016

Item	R\$/MWh	%
GTD	298,45	59,2
Perdas	36,95	7,3
Encargos	23,98	4,8
Bandeiras	8,75	1,7
Tributos	135,87	27,0
Total	504,00	100,0

Fonte: Adaptado de Firjan, 2017.

Vale ressaltar que o valor de cada componente varia de estado para estado, os valores apresentados na tabela são valores médios. Tributos diz respeito ao ICMS, a nível estadual, quanto ao PIS/COFINS, a nível federal. Em Minas Gerais, a alíquota de ICMS incidente sobre o custo da energia elétrica industrial foi de 18%, e o custo médio da energia elétrica industrial com tributos em 2016 para Minas Gerais foi 500,18 R\$/MWh, sendo o décimo estado mais caro.

2.2 O setor cervejeiro

Segundo dados de 2017 do Portal do Governo do Brasil, o setor cervejeiro emprega 2,2 milhões de trabalhadores e a receita corresponde a 1,6% do PIB nacional, contribuindo com R\$ 23 bilhões de impostos ao ano. Apenas em 2016 o Brasil fabricou 14,1 bilhões de litros de cerveja, o país tem cerca de 117 mil hectares plantados com cereais destinados à produção da bebida.

De acordo com o Portal do Sebrae, o Brasil é o terceiro maior produtor do mundo, atrás de Estados Unidos e China, e em uma pesquisa realizada pelo Ibope em novembro de 2013 revelou que a cerveja é a bebida preferida de 2/3 dos brasileiros para comemorações, com 64% da preferência.

Segundo O Globo, o número de cervejarias no Brasil cresceu 17,5% só no primeiro semestre de 2017. Atualmente estão registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento (Mapa) 610 cervejarias, sendo 83% delas concentradas nas regiões Sul e Sudeste, e fabricam 7.540 produtos, divididos entre cervejas e chopes. São Paulo é o estado líder no ranking, com Rio Grande do Sul em segundo, Santa Catarina, Minas Gerais e Paraná, completando os cinco estados com mais fábricas.

De acordo com o portal Governo do Brasil (2018), desde 2007 esse número cresceu cerca de seis vezes, devido ao incentivo de abertura de empresas de pequeno porte, microcervejarias e bares que produzem sua própria cerveja (*brewpubs*).

A Figura 5, feita pela Escola Superior de Cerveja e Malte, mostra os números sobre o setor cervejeiro.



*Adaptado dos dados de registro do MAPA, 2017: (<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes-DIPOV/a-cerveja-no-brasil-28-08.pdf>)

ESCOLA SUPERIOR DE CERVEJA E MALTE

Figura 5 – Cerveja no Brasil
Fonte: Escola Superior de Cerveja e Malte, 2017.

A Figura 5 ilustra que Minas Gerais, o quarto estado com mais fábricas no Brasil, possui 72 fábricas oficialmente registradas, e do total, 41% das fábricas estão no Sudeste, a segunda região do Brasil com mais fábricas. E apesar da crise atual, a perspectiva é que esse número continuará a crescer, e por isso é importante o estudo para melhores equipamentos e melhores plantas energéticas.

De acordo com Sebrae, as cervejas especiais representavam 8% do mercado nacional da bebida em 2012 e encerraram 2014 com uma participação de 11%, e a projeção, segundo o Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja, é de que essa cota suba para 20% até 2020.

Logo, devido a esta projeção otimista quanto às microcervejarias responsáveis pelas cervejas artesanais, esse trabalho foca ambas as indústrias de cerveja de “massa”, isto é, com maior produção, quanto as artesanais, pois o foco é beneficiar qualquer planta cervejeira que tenha a viabilidade de implantar uma configuração de cogeração.

2.2.1 Produção da Cerveja

Dependendo da quantidade da produção e do produto final desejado, os equipamentos a serem utilizados variam, mas as etapas da produção, no geral, são as mesmas. Dos equipamentos, o que mais interessa ao projeto são: Panela de Fervura (caldeira), Panela, Serpentina de Resfriamento e o Tanque Fermentador.

E as etapas, de acordo com material da Agraria Malte (2018), são: Moagem; Mostura; Cálculos de Insumos; Clarificação; Fervura; Lupulagem; Separação do *Trub* Quente (trub são flocos que se sedimentam nas tinas, são compostos por proteínas coaguladas, polifenóis, lipídeos e bagaço do lúpulo); Resfriamento e Aeração; Fermentação; Maturação; Limpeza e Sanitização. Porém, nem todas as etapas citadas envolvem algum processo de transferência de calor, que são os processos que se deseja analisar nesse trabalho. Portanto, será feito um panorama geral apenas das etapas que envolva alguma troca de calor e produção de vapor. Esses processos são:

- **Mostura:** após a moagem, da qual o malte passou por um processo de moagem, liberando os açúcares do grão (endosperma), é feito a mostura. A mostura consiste em aquecer a mistura do resultado da moagem com água, cozinhando-a afim de converter o amido dos grãos em maltose e outros carboidratos que formarão o mosto. Esse processo é dividido em rampas (etapas de aquecimento a uma temperatura constante por um determinado tempo de repouso), e segundo a Agraria Malte (2018), existem pelo menos três rampas importantes: a primeira é entre 40 a 55°C, a segunda é de 60 a 65°C e a última é de 70 a 75°C, sendo o tempo variado de acordo com a receita da cerveja a ser produzida. Essa etapa pode ser realizada por infusão ou por decocção.
- **Fervura:** consiste em ferver a mistura a fim de evaporar a água para regulagem da concentração. Além disso, na indústria cervejeira, a fervura é a etapa que ocorre a quebra e expulsão de substâncias voláteis e indesejáveis, a formação de compostos aromáticos desejáveis e a intensificação da cor. O tempo de fervura depende da receita da cerveja a ser produzida, porém é algo da faixa de 50 a 90 minutos, ressaltando que quanto maior o tempo de fervura, maior o rendimento do amargor.
- **Resfriamento e Aeração:** essa etapa consiste em resfriar o mosto, que após a fervura se encontra a uma temperatura superior a 92°C, para temperaturas de inoculação de 8 a 25°C. O resfriamento deve ser o mais rápido possível a fim de evitar a evaporação de mais compostos desejáveis do lúpulo.

Além dessas etapas, outras etapas como a Limpeza e Sanitização utiliza água quente e/ou jatos de vapor, então pode ser enquadrado como unidade de processo da configuração de cogeração a ser esquematizada, aproveitando o calor e/ou vapor produzidos durante as etapas anteriores.

2.3 A cogeração

A cogeração, de uma forma resumida, é definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil, por exemplo, energia elétrica e energia térmica. Na Figura 6 é possível observar o esquema simples do princípio de funcionamento de um sistema de cogeração. Um único combustível abastece o sistema,

produzindo energia térmica que pode ser direcionada para alimentar um processo da indústria, e energia mecânica que pode ser utilizada para produzir energia elétrica.

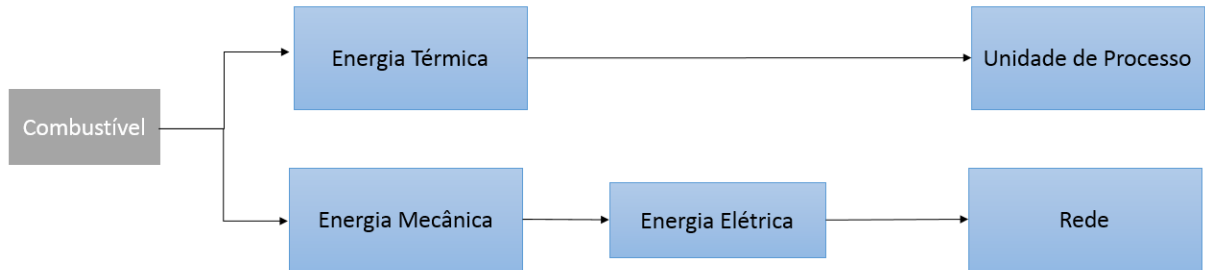


Figura 6 – Processo de Cogeração de Energia.
Fonte: Adaptado de Pilon et al., 2012

Na Figura 6 é mostrado que a partir de um único combustível (energia primária) pode ser geradas duas outras formas de energia (térmica e elétrica) disponíveis para o processo. Na Figura 7 é mostrado um sistema de cogeração empregando motor de combustão interna e uma caldeira de recuperação de calor. O sistema de cogeração utiliza gás natural como combustível e produz energia elétrica e energia térmica.



Figura 7 – Cogeração de Energia a Gás Natural
Fonte: COMGÁS, 2017.

Balestieri (2002) afirma que uma central de cogeração não apresenta máquinas essencialmente diferentes daquelas utilizadas, por exemplo, em uma central de utilidades que

produza vapor e energia elétrica de forma independente. A grande diferença está na forma da qual se utiliza a energia primária para atendimento das demandas.

De acordo com Balestieri (2002), algumas vantagens da utilização da cogeração são:

- Possibilidade de uso de combustíveis renováveis ou resíduos em substituição aos combustíveis fósseis, apresentando menos índices de emissão de poluentes;
- Elevação da eficiência conjunta de conversão da energia química do combustível em energia útil para patamares de até 85% (35% para energia elétrica e 50% para energia térmica, havendo variação de acordo com o ciclo térmico adotado);
- Maior confiabilidade na utilização dos insumos energéticos para a empresa autoprodutora, sendo que a mesma somente produz energia para o seu uso exclusivo (BRASIL, 1996); especialmente em setores cujos processos não permitem falhas no fornecimento de energia;
- Possibilidade de geração de recursos para a empresa, mediante a interconexão da central de cogeração ao sistema elétrico da concessionária local, desde que as tarifas de compra e venda de energia elétrica se encontrem em patamares que remunerem o capital investido, e;
- Facilidade de apropriação da tecnologia pelo quadro técnico das empresas.

Porém, existem também algumas desvantagens. O reaproveitamento da energia térmica deve estar localizado próximo ao local de sua geração, um estudo detalhado da viabilidade econômica deve ser feito antes da implantação, levando em consideração os equipamentos a serem utilizados e o layout da configuração do sistema a ser adaptado. Esses fatores podem fazer com que o custo do investimento inicial seja elevado e os lucros obtidos com a nova configuração oscilam diretamente de acordo com o preço e a disponibilidade do combustível empregado e da energia elétrica oferecida (BALESTIERI, 2002).

2.4 Configuração dos ciclos e tipos

As centrais de cogeração são compostas por motor alternativo ou turbina a vapor, turbina a gás e outras possíveis combinações. A aplicação da cogeração é convencionalizada de duas formas *topping* e *bottoming* (PILON et al., 2012).

De acordo com Pilon et al (2012), a configuração *topping* consiste em aproveitar a energia disponibilizada pelo combustível primeiramente para a geração de energia eletromecânica, e em seguida, aproveitar o calor útil. Assim, como é possível observar na Figura 8, esta configuração é mais comumente usada quando o combustível é utilizado a primeiro instante para alimentar uma turbina a gás ou motor, gerando energia elétrica. O calor rejeitado na forma de gases de exaustão da turbina é então direcionado para uma caldeira para a produção de vapor ou água quente, para ser usada na unidade de processo (OTIS, 2015).

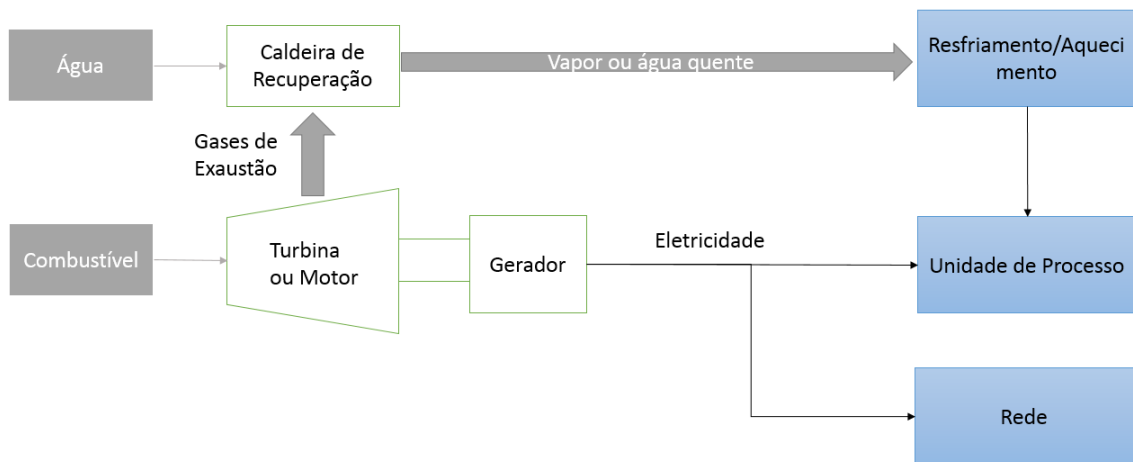


Figura 8 – Esquema de uma configuração *Topping*
 Fonte: Adaptado de Otis, 2015.

Já a configuração *bottoming*, mostrada na Figura 9, o combustível alimenta o motor ou turbina existente na planta e o processo consiste em aproveitar o calor rejeitado (500-600°C) em altas temperaturas (entre 1000-1200°C), direcionando-o a um trocador de calor para aquecer água ou para produção de vapor que alimentará uma turbina a vapor geradora de energia elétrica para a unidade de processo, e se houver excedente, para a rede. Assim, a energia contida no combustível pode ser mais bem aproveitada, com o uso inicial em uma carga térmica e na sequência a produção de eletricidade num ciclo do tipo *bottoming* (PILON et al., 2012).

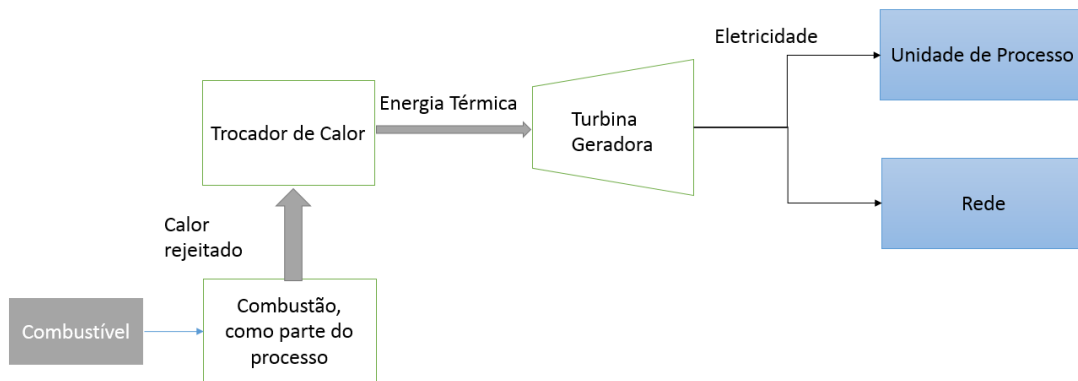


Figura 9 – Esquema de uma configuração *Bottoming*
 Fonte: Adaptado de Otis, 2015.

A cogeração em ciclo *topping* é mais comum na indústria, uma vez que o processo de geração eletromecânica requer altas temperaturas e a demanda de calor se dá a temperaturas relativamente baixas (entre 120°C e 200°C). Já a cogeração em ciclo *bottoming* é restrito a processos onde os gases rejeitados ainda estão em altas temperaturas. Ainda assim, essa configuração apresenta rendimento inferiores quando comparados ao *topping*.

Segundo Balestieri (2002), os principais ciclos utilizados para configurações de centrais de cogeração são: (i) ciclo Rankine; (ii) ciclo Brayton; (iii) ciclo Combinado e (iv) ciclo Diesel.

2.4.1. Ciclo Rankine

O ciclo Rankine também é conhecido por ser o ciclo que trabalha com turbinas a vapor. Nessa configuração, segundo *Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd.* (2006) o combustível é queimado primeiro em uma caldeira adequada para gerar vapor de alta pressão em parâmetros pré-determinados. O vapor produzido é expandido através de uma turbina a vapor para produzir energia mecânica/eletricidade e um vapor de baixa pressão. A turbina a vapor pode ser do tipo contrapressão, tipo condensação-extração ou do tipo extração-contrapressão, dependendo dos níveis e parâmetros em que o vapor é requerido pela unidade de processo.

Em uma usina convencional movida a combustível fóssil, a eficiência máxima de combustível é de cerca de 35%. A perda de calor máxima ocorre por meio do calor rejeitado em um condensador de vapor, onde uma turbina a vapor de condensação é usada. Alguma melhoria na eficiência poderia ser obtida através da turbina a vapor de extração-condensação

em vez do tipo de condensação direta. Assim, o vapor extraído pode ser fornecido para o consumidor ou aquecer a água de alimentação antes de entrar na caldeira. Como visto, a energia calorífica rejeitada da turbina a vapor é mais eficientemente usada para atender ao requisito de energia térmica daquele processo em particular, adotando um sistema de cogeração baseado em turbina a vapor sem condensação. A eficiência global pode chegar a ser de cerca de 80 a 85% (Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd. 2006). Normalmente, o ciclo de Rankine é composto por uma caldeira, uma turbina a vapor, uma bomba e um condensador, como mostra a Figura 10a. O diagrama T-s deste ciclo é mostrado na Figura 10b.

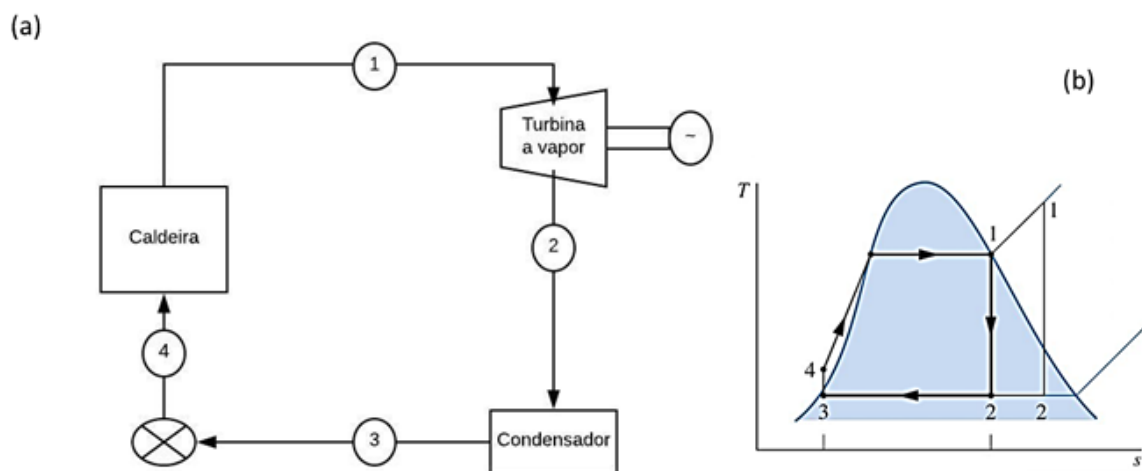


Figura 10 – Esquema (a) e Diagrama T-s (b) de um Ciclo Rankine Simples
Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro, 2013.

A figura 10a mostra uma configuração de um ciclo Rankine, onde o combustível utilizado alimenta a caldeira para a produção de vapor. O vapor produzido será expandido dentro da turbina a vapor, de tal forma a movimentar um eixo e essa potência de eixo alimenta um gerador para produção de eletricidade. O vapor sai da turbina a baixa pressão e baixa temperatura e passa por um condensador de tal forma a resfriar o vapor, para então, ser bombeado a uma alta pressão de volta à caldeira. O diagrama da figura 10b mostra o comportamento da temperatura e entropia dentro do ciclo Rankine. Os pontos 1, 2, 3 e 4 da figura e do diagrama representam as fases, e assim pode-se explicitar os processos que ocorrem no ciclo Rankine simples:

- 1-2: Expansão adiabática reversível na turbina.
- 2-3: Transferência de calor a pressão constante no condensador.
- 3-4: Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba.

4-1: Transferência de calor a pressão constante na caldeira.

Sistemas de cogeração à base de turbinas a vapor (ciclo de Rankine) podem ser acionados pelos mais variados tipos de combustíveis fósseis, como carvão, óleo de forno, óleo combustível residual, gás natural e biocombustíveis como biogás, bagaço. No entanto, para plantas pequenas essa configuração não é recomendada devido ao elevado custo.

A primeira lei da termodinâmica pode ser aplicada a cada um dos equipamentos mostrados na Figura 10. Essa lei pode ser escrita para sistemas como (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$Q - W = (U_s - U_e) + \frac{1}{2}m(V_s^2 - V_e^2) + mg(z_s - z_e) \quad (1)$$

Já para volumes de controle, a primeira lei pode ser escrita como (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$Q - W = (H_s - H_e) + \frac{1}{2}m(V_s^2 - V_e^2) + mg(z_s - z_e) \quad (2)$$

Analisando o diagrama T-s, pode-se perceber que os estados 3 e 4 tem a mesma entropia, ou seja, na idealidade o processo de bombeamento é um processo isentrópico. Considerando regime permanente, processo adiabático (onde não existe calor trocado na bomba) e desprezando a variação das energias cinética $\left[\frac{1}{2}m(V_s^2 - V_e^2)\right]$ e potencial $[mg(z_s - z_e)]$, pode-se escrever a equação 2 para a bomba como (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$W_{3-4} = h_3 - h_4 \quad (3)$$

Das relações termodinâmicas, sabe-se que $Tds = dh - vdP$. Como não há variação de entropia no processo, para a bomba $dh = vdP$. Logo:

$$h_4 - h_3 = v \times (P_4 - P_3) \quad (4)$$

$$w_b = v \times (P_4 - P_3) \quad (5)$$

No ponto 4, representando a entrada da caldeira, a água entra como líquido comprimido, passa por uma transição de fases para sair como vapor superaquecido ou vapor saturado, no ponto 1. Logo, no processo 4-1, há um fornecimento de calor a pressão constante. Da primeira Lei, ainda desprezando as variações de energia cinética e potencial e considerando que não existe trabalho na caldeira, o calor fornecido pode ser escrito como (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$q_H = (h_1 - h_4) \quad (6)$$

O processo 1-2 representa o trabalho produzido através do fluido de trabalho que entra, na turbina, como vapor saturado seco ou vapor superaquecido e sai como vapor saturado úmido ou seco. Da primeira Lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial, e considerando que não existe calor trocado na turbina, ou seja, adiabático (MORAN; SHAPIRO, 2013), têm-se:

$$w_t = (h_1 - h_2) \quad (7)$$

E o processo 2-3, representando o condensador, ocorre a transferência do calor do fluido de trabalho, proveniente da saída da turbina, que entra como vapor saturado úmido ou saturado seco, e sai como líquido saturado. Da primeira Lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial, e que não existe trabalho no condensador têm-se o calor rejeitado (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$q_L = (h_3 - h_2) \quad (8)$$

Para calcular o rendimento do ciclo Rankine, utiliza-se a equação (9) ou (10). Lembrando que será sempre menor que o rendimento de um ciclo ideal, ou seja, menor que do Ciclo Carnot (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$\eta = \frac{w_{liq}}{q_H} = \frac{w_{turb} - |w_{comp}|}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{(h_1 - h_4) - (h_3 - h_2)}{(h_1 - h_4)} \quad (10)$$

Segundo Sonntag (2003), as perdas mais importantes que difere o ciclo Rankine ideal para o real são as perdas na turbina, as perdas na bomba, as perdas nas tubulações e as perdas no condensador.

Sonntag (2003) afirma que as perdas na turbina são associadas ao escoamento do fluido de trabalho através dos canais e palhetas da turbina. Afirma também que as perdas na bomba são análogas às da turbina e ocorrem principalmente por causa dos processos irreversíveis associadas ao escoamento do fluido. É importante ressaltar que as perdas da bomba são menores quando comparadas às perdas da turbina, uma vez que a potência utilizada no acionamento da bomba é menor que a potência produzida na turbina.

As perdas nas tubulações são caracterizadas pela perda de carga provocada pelo atrito, e a transferência de calor ao ambiente. Uma perda análoga é a perda de carga na caldeira. Devido a esta perda, a água que entra na caldeira deve ser bombeada a uma pressão maior que a pressão desejada de saída da caldeira (SONNTAG, 2013).

E as perdas no condensador são devido ao resfriamento abaixo da temperatura de saturação do líquido que deixa o condensador. Logo uma troca de calor adicional será necessária para trazer a água até a sua temperatura de saturação, porém essa perda é relativamente pequena (SONNTAG, 2013).

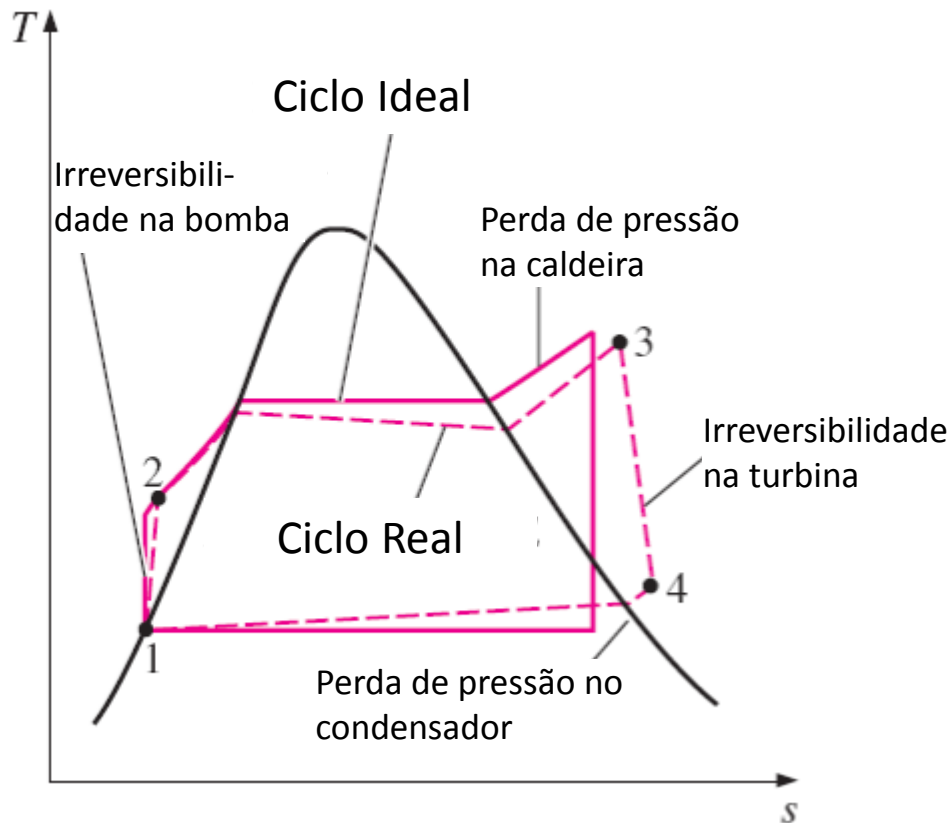


Figura 11 – Diagrama T-s Ciclo Rankine real
Fonte: Adaptado de Leal, 2016.

Na Figura 11 pode-se ver a diferença entre os diagramas T-s do Ciclo Rankine ideal e o real. Na Figura, a linha pontilhada representa o ciclo real, podemos perceber que a principal diferença está no processo entre os pontos 3 e 4, que representa a turbina, onde há uma maior perda.

2.4.2. Ciclo Brayton

O ciclo de Brayton também é conhecido como o ciclo que utiliza turbinas a gás em sua configuração. Segundo *Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd.* (2006), nesse ciclo o ar extraído da atmosfera é comprimido e misturado em uma proporção pré-determinada com o combustível em um combustor, onde ocorre a combustão. Os gases de combustão a uma temperatura elevada são expandidos através de uma turbina a gás, que aciona o gerador elétrico e o compressor de ar. Uma parte da potência mecânica é usada para a compressão do ar de combustão e a temperatura dos gases de exaustão podem alcançar de 480°C até 540°C, e podem atuar como uma fonte de calor a partir da qual o calor é recuperado na forma de vapor ou ar quente para qualquer aplicação industrial desejada.

As usinas de energia baseadas em turbinas a gás industriais instaladas para gerar apenas energia térmica operam com uma eficiência térmica de apenas 25% a 35%, dependendo apenas do tipo e do tamanho da turbina. Com a recuperação de calor nos gases de exaustão em uma caldeira de recuperação ou gerador de vapor, a eficiência global da planta pode alcançar entre 85% a 90%. Como alternativa, o calor dos gases de escape também pode ser desviado para o trocador de calor para gerar água quente ou ar quente ao invés de gerar vapor.

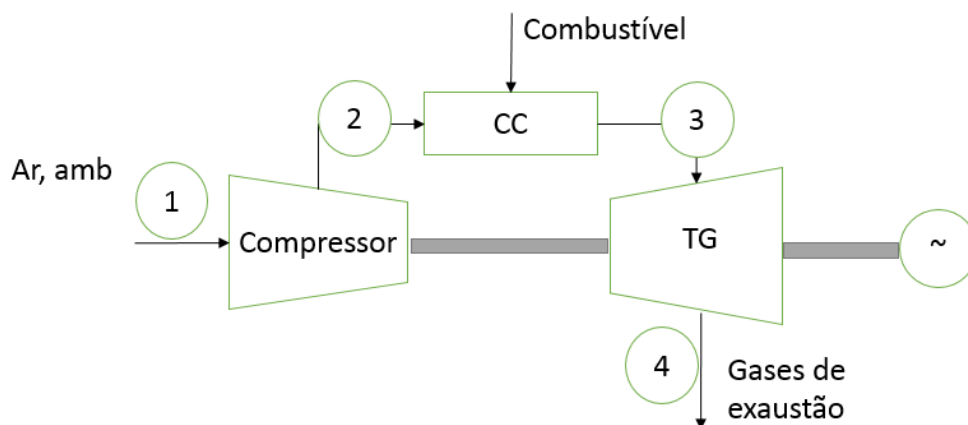


Figura 12 – Esquema simples de Ciclo Brayton
Fonte: Adaptado de Leal, 2016.

Em comparação com o Ciclo Rankine, o Ciclo Brayton é ideal para as indústrias onde a demanda de vapor é relativamente alto e relativamente constante. O sistema de cogeração a base de turbina a gás proporciona um melhor desempenho com combustíveis limpos como gás natural, ou não contendo cinzas e escórias ou combustíveis de hidrocarbonetos líquidos de baixo

teor de cinzas, como a nafta, diesel de alta velocidade, entre outros. Porém é preciso manter a limpeza e manutenção frequente.

Outra grande desvantagem é que quando a demanda de energia cai para menos do que 80% da capacidade da turbina a gás, o consumo específico de combustível aumenta e a saída de vapor da caldeira de recuperação também cai. A saída de vapor pode ser mantida recorrendo a uma queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação. Os queimadores para queima suplementar são geralmente instalados no duto de combustão de escape fornecido entre a turbina a gás e a caldeira, e são projetados para permitir que a caldeira mantenha a potência máxima de vapor mesmo quando a turbina a gás estiver parcialmente carregada. Esse sistema garante uma alta flexibilidade no projeto e garante a operação da planta, uma vez que é possível variar amplamente a proporção de cargas de vapor para potência sem afetar muito a eficiência global da planta. No caso de queima suplementar com base nos dutos de exaustão, a necessidade de combustível é substancialmente reduzida proporcionalmente ao vapor adicional gerado devido à presença de cerca de 15% de oxigênio não queimado nos gases de escape (DEVKI ENERGY CONSULTANCY PVT. LTD. 2006).

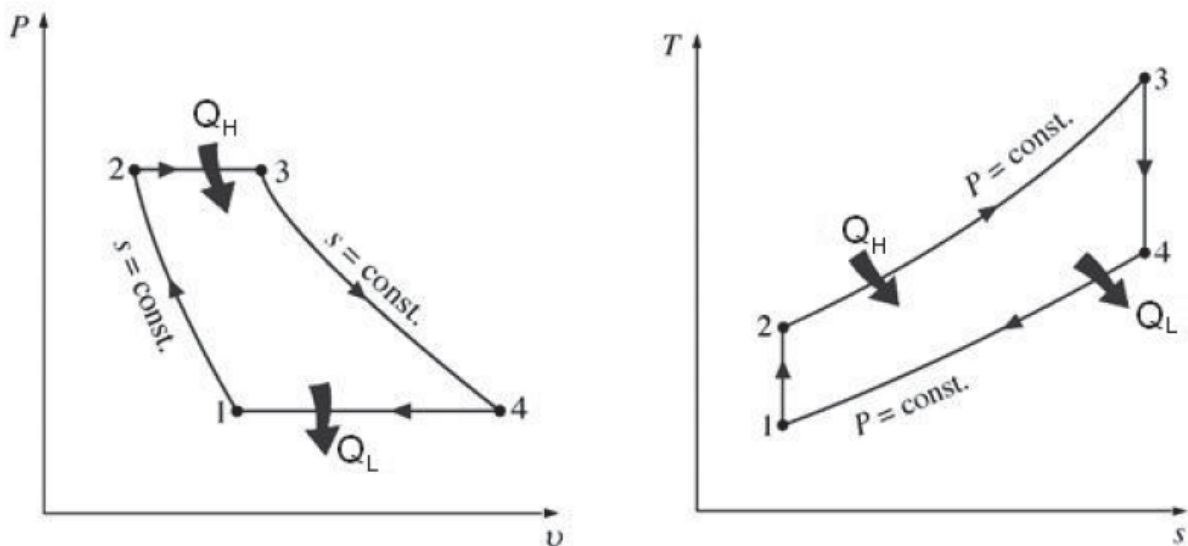


Figura 13 – Diagramas P-v e T-s do ciclo Brayton.
Fonte: Santos, 2011.

No ciclo Brayton ideal, os diagramas representados na Figura 13, demonstram os quatro processos internamente reversíveis que ocorrem (MORAN; SHAPIRO, 2013):

1-2: Compressão isentrópica no compressor.

2-3: Fornecimento de calor à pressão constante.

3-4: Expansão isentrópica na turbina.

4-1: Rejeição de calor a pressão constante.

Empregando as relações de Maxwell (MORAN; SHAPIRO, 2013):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

E definindo:

$$r_p = \text{razão de pressão} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (11)$$

Relacionando-se a razão de temperaturas e a razão de pressão, tem-se:

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_4} \quad (12)$$

E a eficiência se torna:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (13)$$

É importante ressaltar que o Ciclo Brayton anteriormente analisado é um ciclo considerado ideal, ou seja não é o que acontece na realidade. O ciclo real apresenta algumas diferenças, como ilustrado na Figura 14.

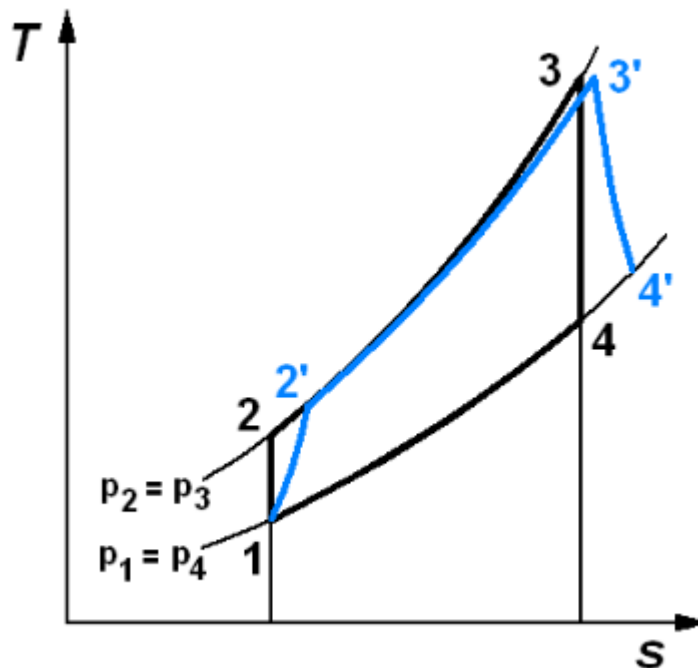


Figura 14 – Diagrama T-s do ciclo Brayton real.
 Fonte: Yanagihara *apud* Santos (2011).

Segundo Santos (2011), os processos 1-2 e 3-4 não são isentrópicos devido à geração de entropia existente no compressor e da turbina. Os processos 2-3 e 4-1 não são isobáricos, pois há uma diferença de pressão no interior da câmara de combustão e ao longo da saída de gases de exaustão.

2.4.3. Ciclo Combinado

O ciclo combinado, segundo *Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd.* (2006) é a configuração que ocorre quando combina ambos os ciclos Rankine e Brayton. Nessa configuração, a energia do combustível é usada primeiramente na turbina a gás, como descrito no Ciclo Brayton. O calor residual dos gases de exaustão, a uma elevada temperatura, é recuperado em uma caldeira de recuperação para gerar vapor de alta pressão (como no Ciclo Rankine). Esse vapor é expandido através de uma turbina a vapor (de contrapressão, extração-contrapressão ou de condensação-extração) para gerar energia elétrica adicional e o vapor de baixa pressão disponível a partir da exaustão da turbina a vapor é fornecido à unidade de processo.

A combinação dos dois ciclos é vantajosa quando a relação entre a energia elétrica e a carga térmica requisitada é alta, pois essa configuração fornece resultados melhores quando comparado ao Ciclo Rankine sozinho. E se for utilizada uma queima suplementar na caldeira de recuperação como citado no Ciclo Brayton, essa configuração fornecerá resultados ainda mais flexíveis e vantajosos.

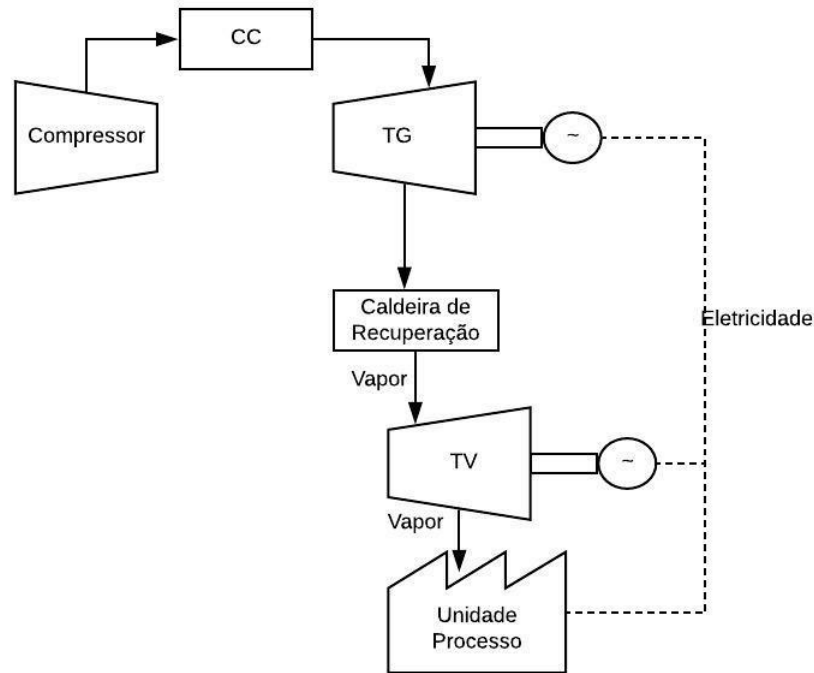


Figura 15 – Exemplo de um esquema de Ciclo Combinado.
Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Na Figura 15 tem-se um exemplo de uma configuração de Ciclo Combinado, onde o ar entra no compressor da turbina a gás, passa por uma compressão e é direcionado para a câmara de combustão onde mistura com o combustível e onde ocorre a combustão. Tal combustão gera uma potência de eixo que alimenta o gerador elétrico e gera gases de exaustão. Os gases de exaustão são direcionados para uma caldeira de recuperação a fim de produzir vapor para alimentar a turbina a vapor em sequência. O vapor é expandido dentro da turbina, gerando uma potência de eixo que igualmente alimentará um gerador elétrico e um vapor a baixa temperatura e baixa pressão é rejeitada, que pode ser aproveitada também na unidade de processo.

2.4.4 Ciclo Diesel

O ciclo Diesel, segundo Leal (2016), possui uma elevada produção de energia eletromecânica, porém uma baixa produção de energia térmica. É mais usado em motores de grandes potências e dimensões, e de poucas rotações por minuto, e podem ser classificados como motores de dois tempos (navios e caminhões) ou de quatro tempos (automóveis).

Este ciclo é usado para produzir trabalho em acionamento mecânico ou geração de energia elétrica quando acoplados em geradores (alternadores). A cogeração é obtida com a recuperação da energia térmica residual dos gases exaustão (CHIERICATO, 2010). A Figura 16 mostra os diagramas P-v e T-s do ciclo Diesel, onde cada ponto representa uma fase do ciclo, que é composto por quatro processos, considerados internamente reversíveis.

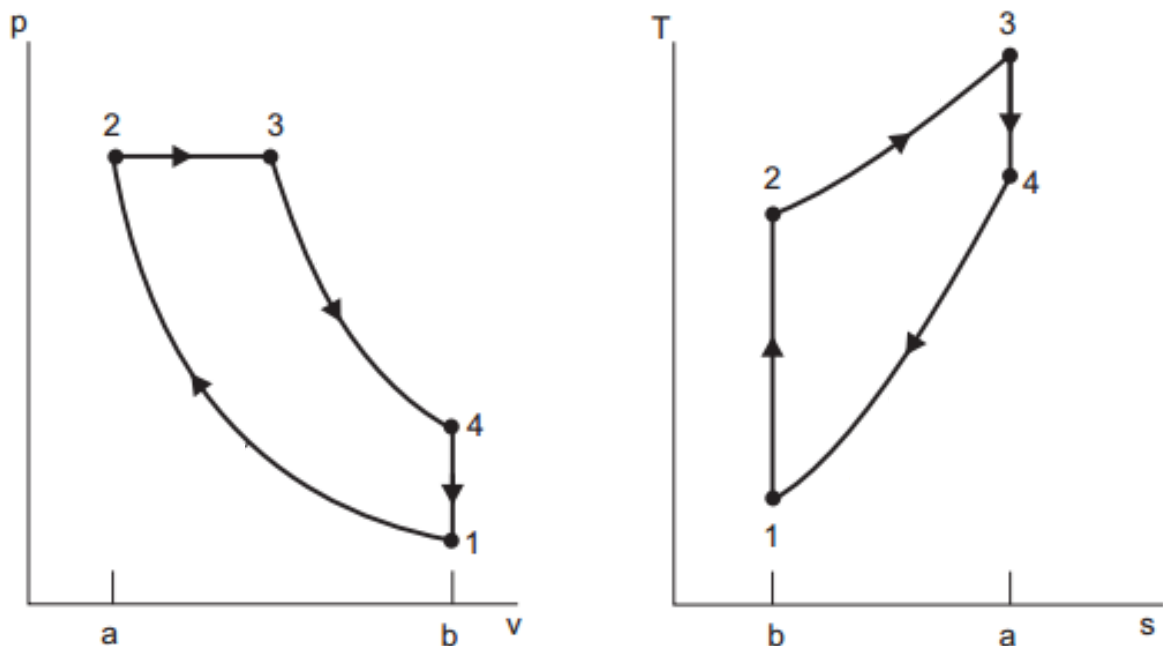


Figura 16 – Diagramas P-v e T-s do ciclo Diesel.
Fonte: Brunetti, 2012.

Os quatro processos são:

- 1-2: Ocorre a compressão à entropia constante (PMI – PMS);
- 2-3: Ocorre a adição de calor a pressão constante;
- 3-4: Ocorre a expansão à entropia constante (posição – PMI);
- 4-1: Ocorre a rejeição de calor a volume constante (no PMI).

Sendo PMI e PMS, respectivamente, os Ponto Morto Inferior e o Ponto Morto Superior. Representam as posições onde o êmbolo muda de sentido de movimento, estando no seu máximo (PMS) ou no seu mínimo (PMI), dentro de um cilindro.

A cilindrada (C) corresponde a este limite entre os pontos mortos, tendo como equivalência o volume varrido pelo pistão no seu deslocamento do PMS até o PMI e cuja formulação é a seguinte (BRUNETTI, 2012):

$$C = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \text{Curso} \cdot N^{\circ}_{\text{cilindro}} \quad (14)$$

Sendo que D representa o diâmetro do pistão. A relação de compressão (RC) é dada por:

$$RC = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} \quad (15)$$

Sendo que V_{PMI} representa o volume máximo dentro do cilindro, ou seja, no PMI e V_{PMS} o volume mínimo dentro do cilindro, no PMS.

A seguir, de acordo com Brunetti (2012), mostra-se a dedução de uma expressão para a eficiência térmica para esse ciclo.

$$\eta_t = \frac{W_c}{Q_{23}} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}} \quad (16)$$

Pela Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se:

$$Q_{23} - W_{23} = U_3 - U_2 \quad (17)$$

Como a adição de calor é feita a pressão constante (processo isobárico):

$$W_{23} = \int_2^3 p \times dV = p \times (V_3 - V_2) \quad (18)$$

Resultando em:

$$Q_{23} - p \times (V_3 - V_2) = U_3 - U_2 \rightarrow Q_{23} = (U_3 + p \times V_3) - (U_2 + p \times V_2) \quad (19)$$

Da definição de entalpia:

$$U + p \times V = H \quad (20)$$

E como se admite gás perfeito:

$$\Delta H = m \times C_p \times \Delta T \quad (21)$$

Resultando em:

$$Q_{23} = m \times C_p \times (T_3 - T_2) \quad (22)$$

$$Q_{41} = m \times C_p \times (T_4 - T_1) \quad (23)$$

Realizando as substituições algébricas, chega-se a:

$$\eta_t = 1 - \frac{m \times C_v \times (T_4 - T_1)}{m \times C_p \times (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1 \times (T_4 - T_1)}{k \times (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1 \times T_1}{k \times T_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) \quad (24)$$

Nas compressão e expansão isentrópicas, tem-se:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \text{ e } \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} \quad (25)$$

E agrupando termo a termo, tem-se:

$$\frac{T_2 \times T_4}{T_1 \times T_3} = \left(\frac{v_1 \times v_3}{v_2 \times v_4} \right)^{k-1} \text{ mas } v_4 = v_1 e \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad (26)$$

Reagrupando os termos da equação 23:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \times \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{k-1} = \frac{v_3}{v_2} \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^k = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^k \quad (27)$$

A expressão que traz a eficiência do ciclo-padrão ar com adição de calor a pressão constante então é:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} \left(\frac{\left(\frac{T_3}{T_2} \right)^k - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) \text{ ou } \eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \left(\frac{\left(\frac{T_3}{T_2} \right)^k - 1}{k \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \right) \quad (28)$$

Sendo: r_v a relação de compressão $\left(\frac{v_1}{v_2} \right)$.

2.4.5 Ciclo Frigorífico por Absorção de Amônia

O ciclo frigorífico por absorção de amônia está ilustrado na Figura 17. Segundo Sonntag (2003), o vapor de amônia de baixa pressão deixa o evaporador e entra no absorvedor, onde ele é absorvido pela água transformando-se em uma solução fraca de amônia. Esse processo ocorre a uma temperatura um pouco acima daquela do meio e deve ser transferido calor ao meio

durante esse processo. A solução forte é então bombeada através de um trocador de calor ao gerador (onde vão ser mantidas a uma alta pressão e alta temperatura). Sob essas condições, o vapor de amônia se separa da solução em consequência da transferência de calor da fonte de alta temperatura. O vapor de amônia vai para o condensador, onde é condensado, e então se dirige para a válvula de expansão e para o evaporador. A solução fraca de amônia retorna ao absorvedor através do trocador de calor.

A característica particular desse ciclo é a necessidade de um consumo pequeno de trabalho pois o processo de bombeamento envolve um líquido. Isso se dá porque para um processo reversível, o trabalho é igual a $-\int v dp$ e o volume específico do líquido é muito menor que o volume específico do vapor. Por outro lado, é necessária uma fonte térmica de temperaturas relativamente altas (100 a 200°C). (SONNTAG, 2003).

Segundo Sonntag (2003), o ciclo apresenta uma quantidade alta de equipamentos, quando comparada a outros ciclos de refrigeração, por isso ele só é justificável economicamente nos casos onde é disponível uma fonte térmica adequada e que, de outro modo, seria desperdiçada. Nos anos recentes, tem-se dado maior atenção a esse ciclo devido ao aumento de exploração de fontes alternativas de energia tais como as fontes de energia solar, eólica ou geotérmica.

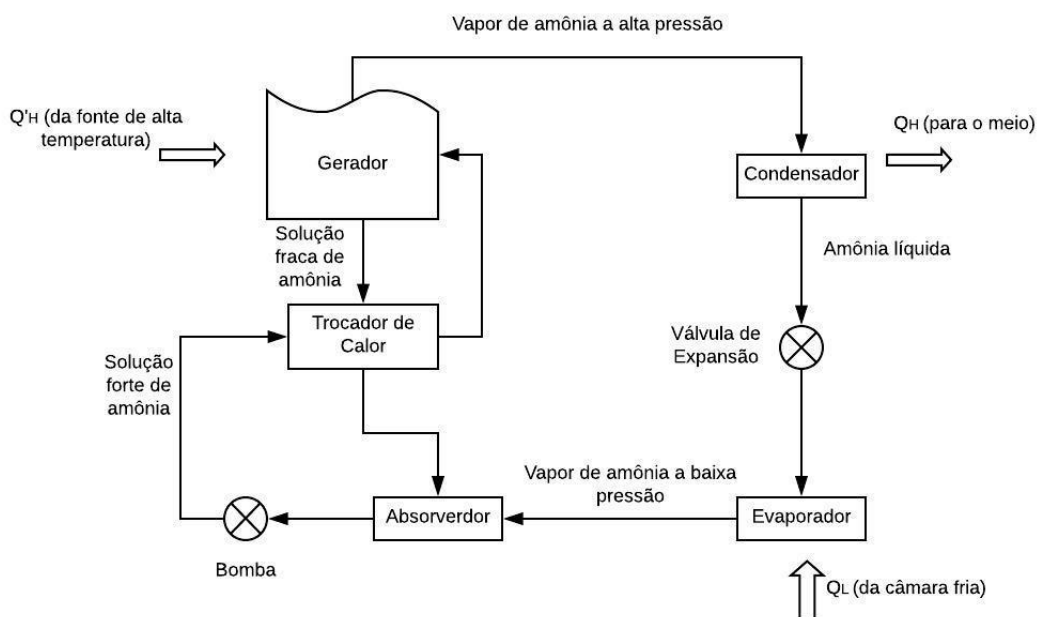


Figura 17 – Ciclo de Refrigeração por absorção de amônia.
Fonte: Adaptado de Sonntag, 2003

Sonntag (2003) afirma que a “eficiência” de um refrigerador é expressa através do coeficiente de desempenho, ou Coeficiente de Performance (COP). O objetivo é o calor transferido do espaço refrigerado, e a energia gasta é o trabalho. Assim tem-se que:

$$COP = \frac{Q_L \text{ (energia pretendida)}}{W \text{ (energia gasta)}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad (29)$$

2.5 Seleção e configuração da central de cogeração

Para fazer a seleção dos equipamentos que vão constituir a planta de cogeração, e também a sua configuração, é preciso avaliar a viabilidade da cogeração, tanto em fatores técnicos quanto econômicos. Segundo Leal *apud* Petrecca (2016), os principais fatores a serem considerados são:

- Perfil da demanda térmica, incluindo níveis de temperatura requeridos pelos usuários (que deve ser consistente com o nível de calor rejeitado do sistema de cogeração) e flutuações típicas da demanda (diária, mensal e anual);
- Perfil da demanda elétrica e flutuações típicas da demanda (diária, mensal e anual). Os perfis térmico e elétrico devem ser correlacionados um ao outro;
- Necessidade de uma consistência entre as características de demanda do estabelecimento (eletricidade, calor e combustível) e as características de capacidade de produção de eletricidade e de recuperação de calor do sistema de cogeração escolhido;
- Custo atual de compra do combustível e eletricidade e a projeção destes custos no futuro;
- Horas trabalhadas por ano;
- Tamanho da planta para necessidades presentes e futuras do estabelecimento;
- Custo capital da planta de cogeração e custo de operação durante a vida útil da planta;
- Impactos ambientais.

Atualmente, no Brasil, as configurações de cogeração são voltadas para a paridade térmica, uma vez que não é interessante a comercialização de vapor e outras formas de energia térmica. Isto é, a central de cogeração é projetada para operar de tal forma a atender as necessidades térmicas da unidade de processo, ou seja, o calor é o principal produto e a eletricidade é o subproduto da cogeração.

Logo, a paridade elétrica é quando a central de cogeração é projetada de modo a atender as necessidades eletromecânicas da unidade de processo, ou seja, a eletricidade é o produto principal e o calor é o subproduto da cogeração.

Segundo Balestieri (2002), há ainda a estratégia de despacho econômico, que corresponde à colocação do sistema de cogeração em funcionamento apenas nos períodos em que a taxa paga pela concessionária seja tal que o investidor ainda consiga um retorno de interesse.

Quanto aos equipamentos, uma série de parâmetros devem ser considerados para elaborar a configuração de uma central de cogeração. Segundo Balestieri (2002), os parâmetros são:

- Razão potência elétrica/calor (é o inverso de *heat-to-power ratio*, que caracteriza cada equipamento utilizado no sistema) gerado pelo equipamento;
- Consumo específico de vapor (*steam rate*) [kg/kWh];
- Consumo específico de combustível [kg/kWh];
- Consumo específico de calor (*heat rate*) [kJ/kWh];
- Eficiência termodinâmica global do equipamento;
- Variações da eficiência sob cargas parciais;
- Temperatura do fluxo térmico retirado do equipamento [°C];
- Limite de rejeição do equipamento;
- Disponibilidade e confiabilidade do equipamento.

Balestieri (2002) usa a relação potência elétrica/calor, porém a razão inversa, razão calor/potência elétrica, mais conhecida como *heat-to-power ratio* é mais usada. É uma razão entre duas variáveis, E' que representa a potência elétrica gerada [kWe] e S' que é a potência térmica gerada [kWth], associando assim as potências térmicas na forma de vapor e/ou água quente e/ou água gelada, todas obtidas pela central de cogeração a partir de sua operação em

plena carga ou em carga parcial. A Tabela 3 mostra as relações da razão calor/potência, potência de saída e eficiência global dos principais equipamentos usados em sistemas de cogeração.

Tabela 3 – Relações de razão calor/potência, potência saída e eficiência global

Sistema de Cogeração	Razão calor/potência [kWth/kWe]	Potência de saída (como % da entrada do combustível)	Eficiência Global (%)
Turbina a vapor (TV) 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 (TG)	1,3 – 2,0	24 – 35	70 – 85
Ciclo Combinado (TG + TV)	1,0 – 1,7	34 – 40	69 – 83
Motor de Combustão Interna	1,1 – 2,5	33 – 53	75 – 85

Fonte: Devki Energy Consultancy, 2006.

Segundo Balestieri (2002), para obter o valor da eficiência térmica global de cogeração, é feito um cálculo para encontrar a razão entre todas as formas de energia efetivamente produzidas no ciclo e o calor gerado na queima do combustível, ou seja:

$$\eta_{g,cog} = \frac{E' + S'}{\sum m_{c,l} PCI_l} \quad (30)$$

Quanto ao processo, Balestieri (2002) dividiu as informações necessárias, algumas características que devem ser também avaliadas para uma adequada seleção e elaboração de uma central de cogeração, em três partes:

- Na planta de processo: a quantidade de calor necessária nos processos; fluxos de massa para calor de processos requeridos e os respectivos níveis de temperatura; curvas de carga da potência eletromecânica (E) e para potência térmica (S); com variações diárias e sazonais; picos de potência e calor alcançáveis no processo e por último; componentes de demanda contínua; separados das demandas variáveis com a temperatura.

- Componentes do processo tais como existência de equipamentos de resfriamento (*chillers*), existência de equipamentos geradores de água quente e de bombas de calor, para investigar a possibilidade de suavização das curvas de carga de energia térmica.
- Combustíveis: disponibilidade, logística e limitações de combustíveis, inclusive resíduos; capacidade de armazenagem de combustíveis; capacidade de uso de combustíveis duais em equipamentos; e, impactos ambientais decorrentes do seu uso (quantidade de NO_x, SO_x e particulados emitidos).

2.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado os ciclos existentes que podem ser trabalhados na cogeração, assim como as fórmulas utilizadas em cada ciclo e análises dos gráficos e diagramas de cada ciclo. Além disso, foi feito uma abordagem superficial do processo produtivo da cerveja, destacando as principais etapas que envolvem processos termodinâmicos e para concluir foi citado como é feito a seleção de uma configuração de cogeração.

No próximo capítulo será abordado a metodologia do trabalho, citando os tipos de pesquisas existentes e quais tipos serão abordados no trabalho presente. Assim como as variáveis e indicadores, os instrumentos a serem utilizados para coletas de dados e como será feito o registro desses dados.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo descreve a característica do desenvolvimento da pesquisa, isto é, explicitar qual o tipo de pesquisa adotada, exploratória, descritiva ou explicativa. Descreverá também os instrumentos e fontes escolhidas para a coleta de dados utilizados, assim como as variáveis e indicadores adotados, das quais serão feitos as análises e cálculos.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), os tipos de pesquisas são classificados da seguinte forma: quanto à abordagem; quanto à natureza; quanto aos objetivos e por fim, quanto aos procedimentos.

Quanto à abordagem, temos a pesquisa qualitativa ou a pesquisa quantitativa. Segundo Goldenberg *apud* Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa qualitativa não se preocupa com representatividade numérica, mas sim com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização, etc. Já a pesquisa quantitativa, segundo Fonseca *apud* Gerhardt e Silveira (2009), é o tipo de pesquisa em que os resultados podem ser quantificados, logo, se centra na objetividade. A pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, etc.

Quanto a natureza tem-se a pesquisa básica e a pesquisa aplicada. Segundo Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa básica objetiva produzir conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência, sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais. Já a pesquisa aplicada, objetiva produzir conhecimentos novos e úteis e para a aplicação prática, procurando solucionar problemas específicos. Envolve verdades também e interesses locais.

Segundo Gil *apud* Gerhardt e Silveira (2009), com base nos objetivos pode-se classificar as pesquisas em três grupos: (i) pesquisa exploratória, (ii) pesquisa descritiva e (iii) pesquisa explicativa. A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. A grande maioria dessas pesquisas envolve: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que estimulem a compreensão. A pesquisa descritiva, segundo Triviños *apud* Gerhardt e Silveira

(2009), exige do investigador uma série de informações sobre o que deseja pesquisar. Esse tipo de estudo pretende descrever os fatos e fenômenos de determinada realidade. E por fim, a pesquisa explicativa preocupa-se em identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (GIL *apud* GERHARDT E SILVEIRA, 2009). Ou seja, este tipo de pesquisa explica porque específicos fenômenos ocorrem através dos resultados obtidos.

E por fim, quanto aos procedimentos existem várias classificações, sendo que serão explicadas apenas algumas, enquanto o restante será apenas citado, por não serem relevantes ao presente trabalho. São eles: (i) pesquisa experimental, (ii) pesquisa bibliográfica, (iii) pesquisa documental, (iv) pesquisa de campo, (v) pesquisa *ex-post-facto*, (vi) pesquisa de levantamento, (vii) pesquisa com *survey*, (viii) estudo de caso, (ix) pesquisa participante, (x) pesquisa-ação, (xi) pesquisa etnográfica, (xii) pesquisa etno-metodológica.

A pesquisa bibliográfica, segundo Fonseca *apud* Gerhardt e Silveira (2009), é realizada a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, material de apoio de professor, páginas de web sites. Já a pesquisa documental, recorre a fontes mais diversificadas e dispersas, sem tratamento analítico, tais como: tabelas estatísticas, jornais, revistas, relatórios, documentos oficiais, cartas, filmes, relatórios de empresas, etc.

O presente trabalho adota uma mistura de pesquisa bibliográfica com pesquisa descritiva e pesquisa quantitativa, uma vez que foi realizada uma pesquisa em artigos, livros e outros textos para produzir uma revisão bibliográfica ao leitor e apresentar também a situação atual do mercado de eletricidade e do mercado cervejeiro antes de apresentar os resultados. Tais resultados serão obtidos através de cálculos feitos com fórmulas matemáticas, também encontradas nas fontes buscadas.

3.2 Materiais e Métodos

Para o presente trabalho foi necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar as diferentes configurações e combinações de ciclos existentes, e as respectivas características, de tal forma a fazer uma análise para alcançar os objetivos desejados. Para que possa ser sugerida uma configuração, foi preciso analisar a conjuntura brasileira atual quanto à eletricidade e quanto ao mercado cervejeiro.

Foi preciso estudar como funciona a produção de cerveja, e conhecer as fábricas com seus respectivos equipamentos utilizados, de tal forma a sugerir uma adaptação na planta para implantar a cogeração. Foi feita uma visita à fábrica analisada, em que além de conhecer a planta e superficialmente sobre a linha de produção, foi coletado também dados essenciais para a realização dos cálculos.

Por fim, para analisar a viabilidade econômica do projeto, os cálculos devem ser realizados para analisar a situação futura caso seja implantada a cogeração, dados como eficiência energética, gastos com eletricidade, e, economia de gastos, se for possível, para apresentar os resultados e conclusões ao final. A Figura 18 mostra um esquema das etapas realizadas.

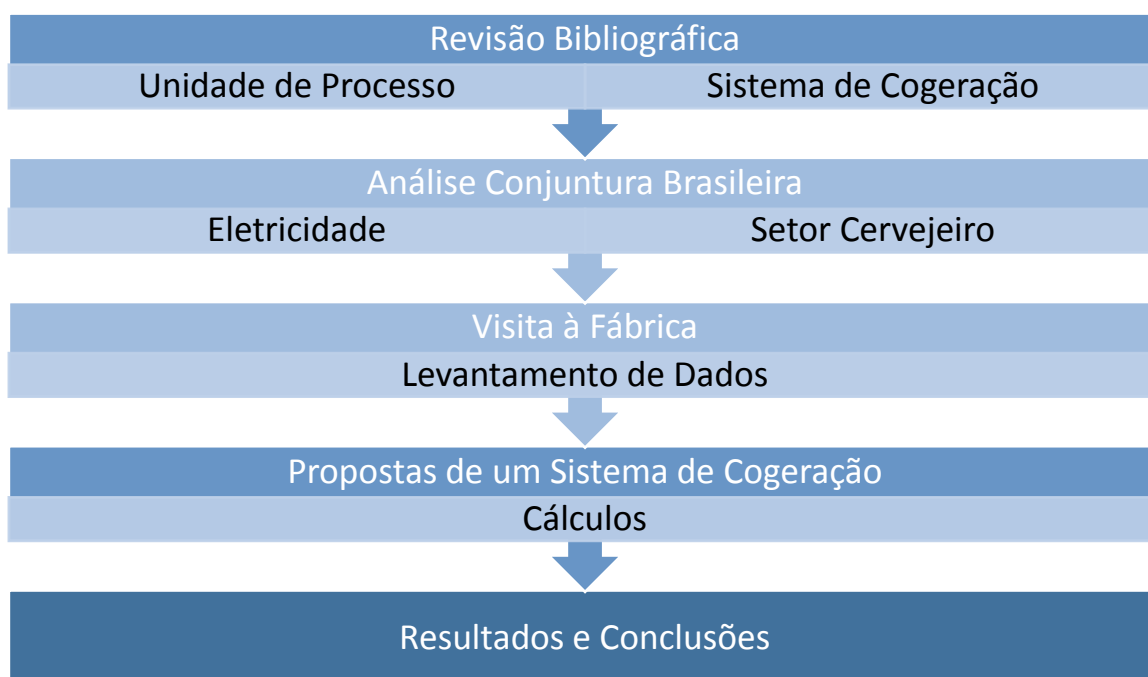


Figura 18 – Fluxograma das etapas da monografia.
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (1999) é possível afirmar que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que sofre variação, um conceito operacional que apresenta, contém ou representa um valor, propriedade, aspecto ou fator, identificando em um objeto de estudo e passível verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela das Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Demanda Energética	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de combustível; • Consumo de água; • Consumo de eletricidade; • Projeção da demanda energética.
Modo de operação do Sistema de Cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • Paridade térmica; • Paridade elétrica.
Seleção dos ciclos de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • 1/ALFA; • Demandas energéticas da empresa; • Processo Produtivo; • Temperatura desejada no processo produtivo; • Pressão de vapor desejada no processo produtivo.
Eficiência Térmica do ciclo de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • Eletricidade produzida no ciclo; • Calor de processo fornecido pelo ciclo; • Energia gasta no ciclo.

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

3.4 Instrumentos de Coletas de Dados

Nesta etapa acontece a coleta de dados referentes ao tema abordado a fim de obter um embasamento necessário para a pesquisa através de revisões bibliográficas, observações, experimentos e outras fontes.

Esta pesquisa, como já foi mencionado neste capítulo, é de caráter bibliográfica, quantitativa e descritiva, logo todos os dados necessários serão adquiridos através de uma profunda análise e pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações e catálogos, associada com uma observação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos.

3.5 Tabulação de Dados

Para a tabulação dos dados obtidos serão utilizados os *softwares Microsoft Word e Microsoft Excel*. A partir dos dados obtidos pela teoria, serão realizados cálculos, tabelas e gráficos pelo *Excel*, que permite uma maior facilidade na resolução dos cálculos e melhor visualização dos dados propostos neste trabalho. O *Word* será a ferramenta utilizada para relatar e discutir os dados obtidos, facilitando a leitura de terceiros.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia que será utilizada neste trabalho, contendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis, bem como seus respectivos indicadores, as formas de coleta de dados, e como os mesmos serão registrados e analisados. Sendo assim pode-se vislumbrar melhor como ocorreu o desenvolvimento desse trabalho.

No próximo capítulo, os resultados serão apresentados junto com tabelas e gráficos gerados, além de mostrar quais os procedimentos foram adotados para a realização dos cálculos necessários a fim de obter os valores de eficiência, e por fim será feita uma conclusão, discutindo os resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo irá abordar todo o embasamento teórico citado no capítulo 2 de tal forma a realizar cálculos para obter resultados que posteriormente serão analisados e discutidos, cumprindo o objetivo do trabalho presente.

4.1 Caracterização da Empresa

A cervejaria é dedicada à produção de cervejas artesanais, que são cervejas que focam mais na qualidade do que quantidade, quando comparadas com a produção de larga escala de marcas comuns. No mercado desde 1997, inicialmente a fábrica situava-se no bairro Belvedere em Belo Horizonte, mudando para a fábrica atual no bairro Jardim Canadá em Nova Lima. Conta atualmente com 21 rótulos bastante conhecidos no mercado local. Apesar do nicho de venda ser a região metropolitana de Belo Horizonte, a marca também vende rótulos para outros estados tais com São Paulo, Rio de Janeiro, Goiás, Espírito Santo e Pará.

No espaço atual a empresa possui a fábrica por si própria, local onde é realizada todas as etapas até o produto final. Possui também um escritório administrativo, uma loja, um espaço para estocar matéria prima e as garrafas prontas para serem transportadas. A demanda elétrica atualmente é de 120 kWh. A empresa não possui produção interna de eletricidade, portanto todo o seu consumo vem da rede elétrica que pertence à empresa concessionária de energia elétrica do estado de Minas Gerais. A cervejaria possui um contrato com fornecedor de gás GLP do qual todo mês são obtidas 11 toneladas, de acordo com o contato da empresa. Tal gás é utilizado para alimentar a caldeira existente na fábrica, que produz o vapor necessário para a unidade de processo.

A empresa forneceu também os seguintes dados: a produção média de cerveja por mês é de 200 mil litros (Figura 19), o consumo específico de combustível é de aproximadamente 4,3 kg de combustível por hectolitro de cerveja produzida (Figura 20) e a média anual de eletricidade consumida é de 43 mil kWh. Com esses dados foram feitos gráficos para facilitar na análise dos parâmetros da empresa.

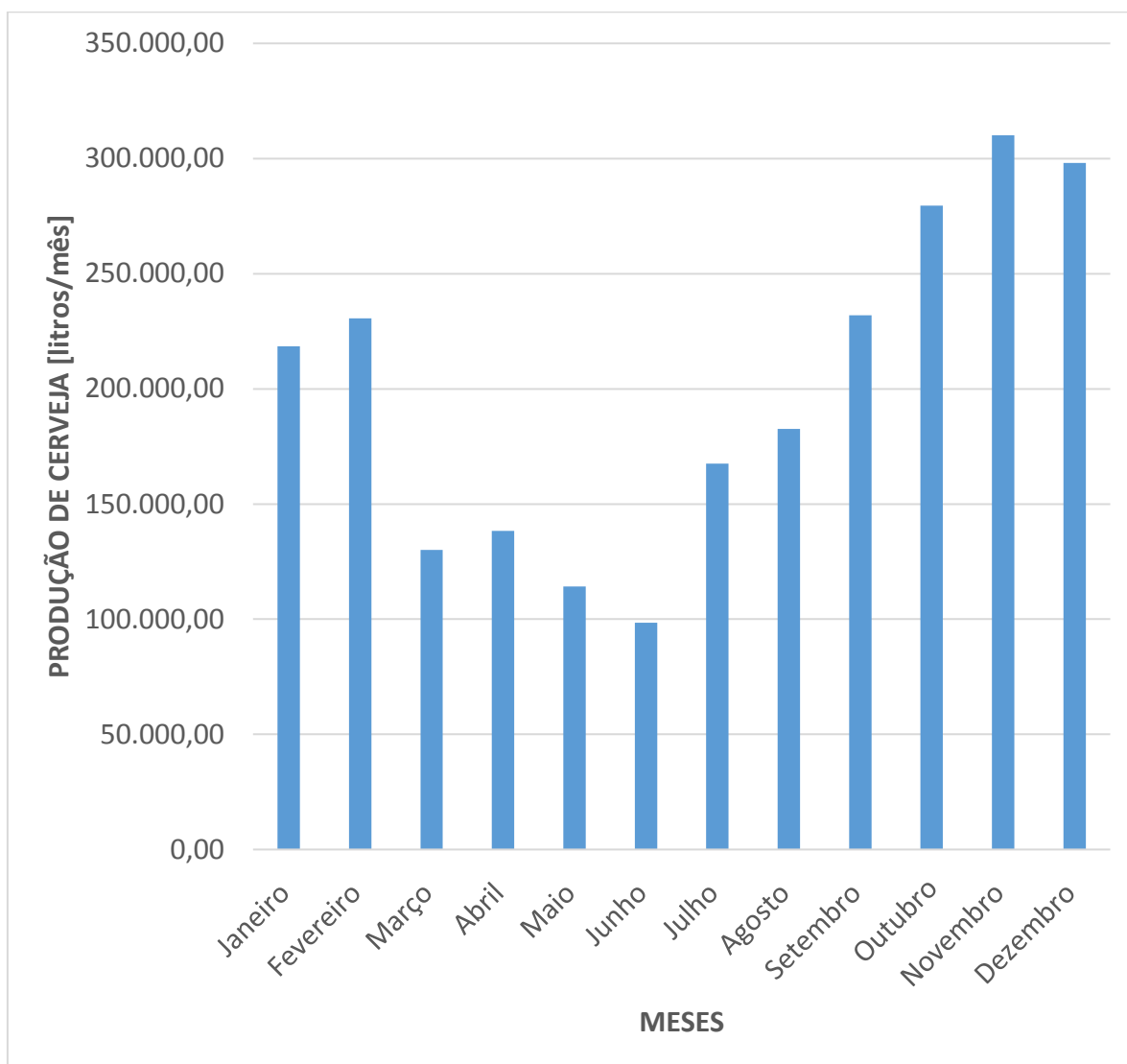


Figura 19 – Gráfico da Produção de Cerveja [litro/mês].
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A partir do gráfico mostrado na Figura 19 pode-se observar o comportamento da demanda/oferta que o mercado exige. É possível perceber que nos meses do verão, a produção é bem maior quando comparado aos outros meses, justificado também pelos eventos da época, tais como festas de Natal e de Ano Novo, e o Carnaval. No inverno a produção cai bastante uma vez que o consumo de cerveja em tempos frios é menor. Esse comportamento irá, obviamente, influenciar também em vários outros parâmetros da empresa, como será analisado posteriormente.

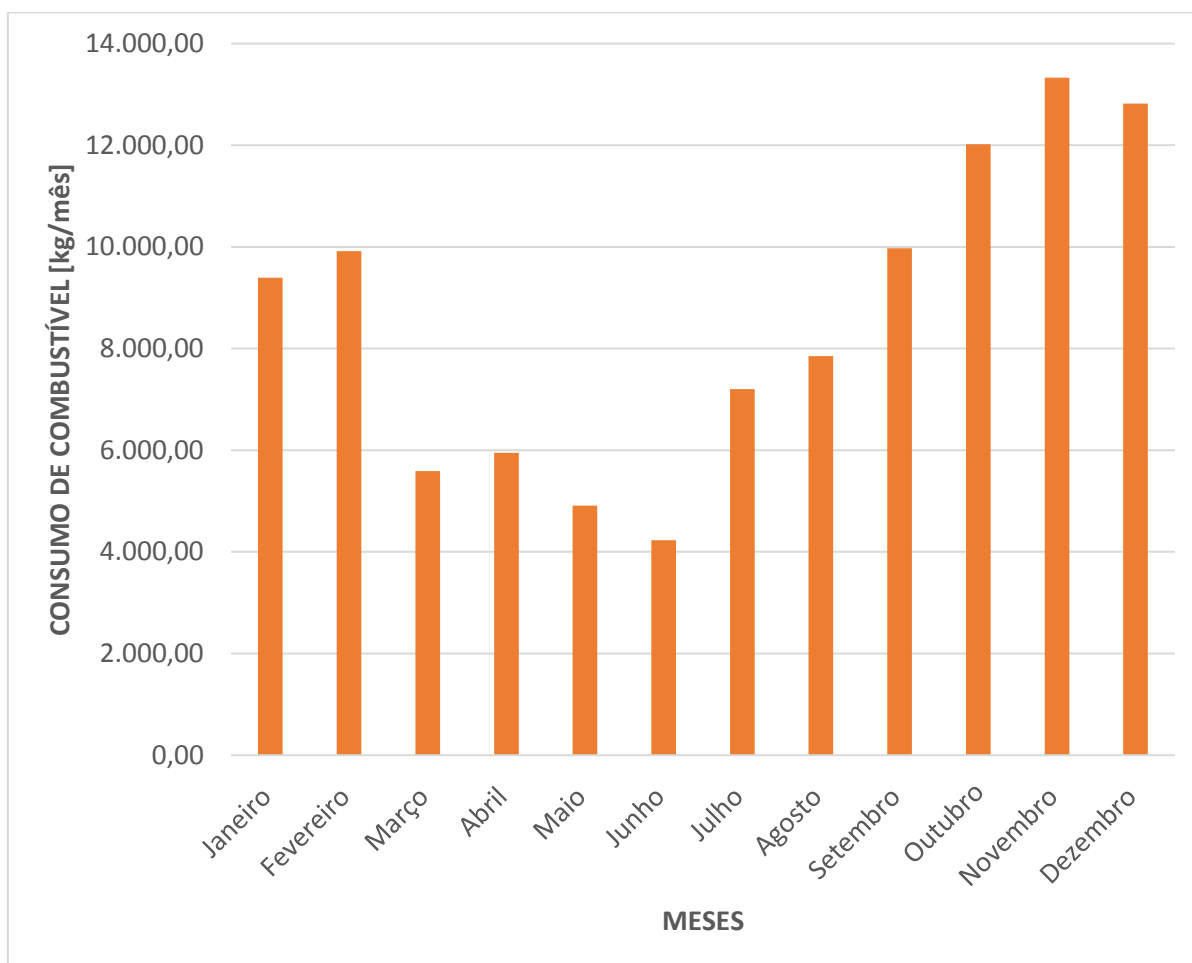


Figura 20 – Gráfico do Consumo de Combustível [tonelada/mês].
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Como foi dado pelo contato da empresa que o consumo específico de combustível é de 4,3 kg de combustível por hectolitro de cerveja produzida, foi possível traçar o gráfico da Figura 20 do consumo mensal durante um ano de combustível, e pode-se perceber que o seu comportamento acompanha a produção de cerveja.

O contato da empresa também forneceu o valor gasto por mês com eletricidade, e explicou que no horário de ponta (18h às 21h definido pela empresa concessionária de energia elétrica no estado de Minas Gerais) a maioria dos equipamentos elétricos são desligados automaticamente a fim de economizar gastos com eletricidade. Considerando tudo isso, foi feita uma aproximação de que a jornada de trabalho da empresa contabiliza 12 horas por dia, e considerando que o poder calorífico do gás GLP (50% propano e 50% butano) é de 11025 kcal/kg, foi possível traçar o gráfico da Figura 21 da demanda térmica da empresa em um mês.

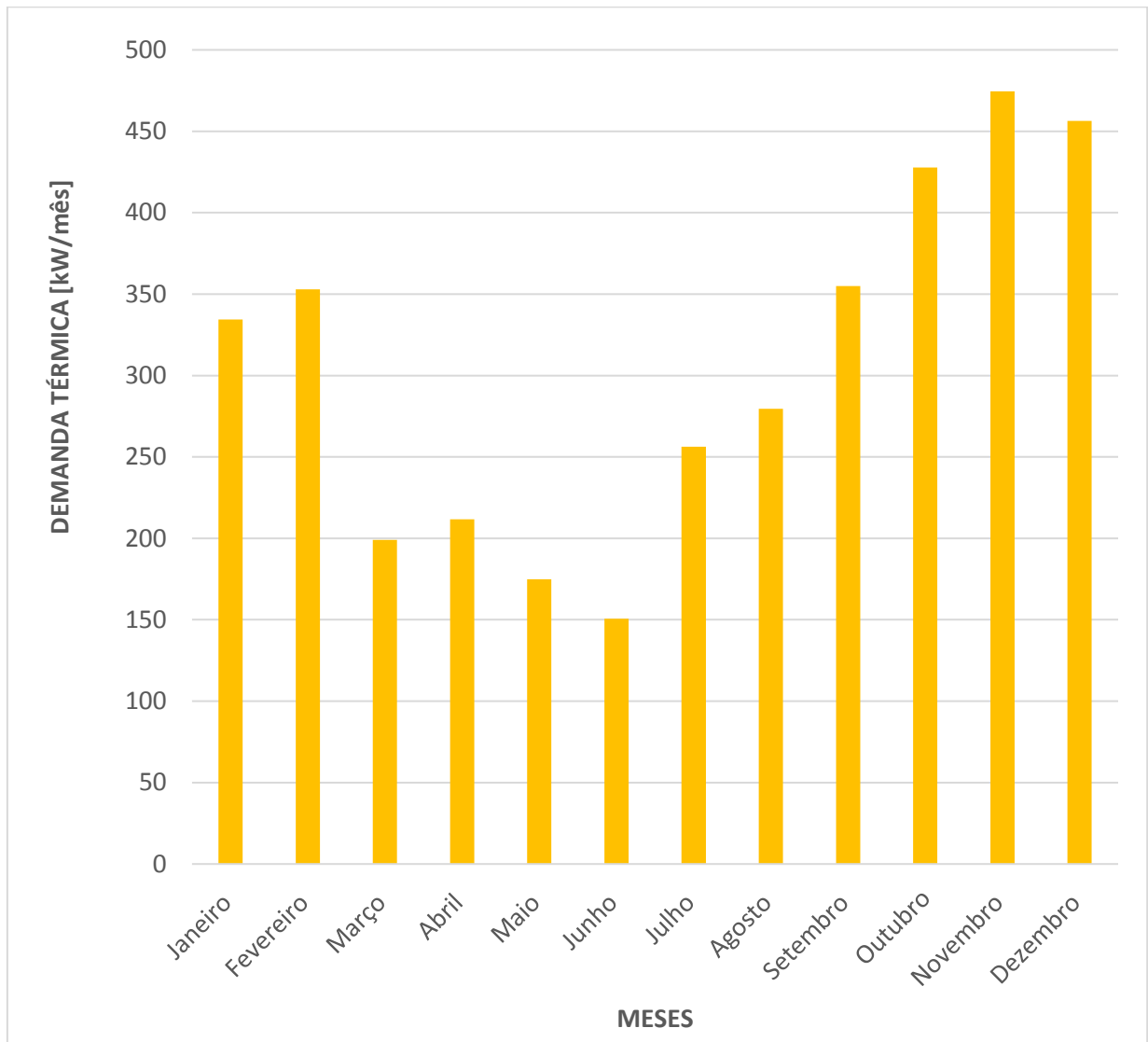


Figura 21 – Gráfico da Demanda Térmica [tonelada/mês].
 Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A partir do gráfico da Figura 21 pode-se observar que ele também acompanha o comportamento da produção mensal de litro de cerveja. Pelo gráfico pode-se observar que o mês que teve a maior demanda térmica foi o mês de novembro cuja demanda foi de aproximadamente 474 kW. Apesar de ainda não ser verão, o contato da empresa explica que como já é esperado que a demanda irá crescer muito, eles aumentam a produção para fazer estoque e poder conseguir atender a demanda.

O gráfico da Figura 22 mostra a demanda elétrica em kW por mês da empresa.

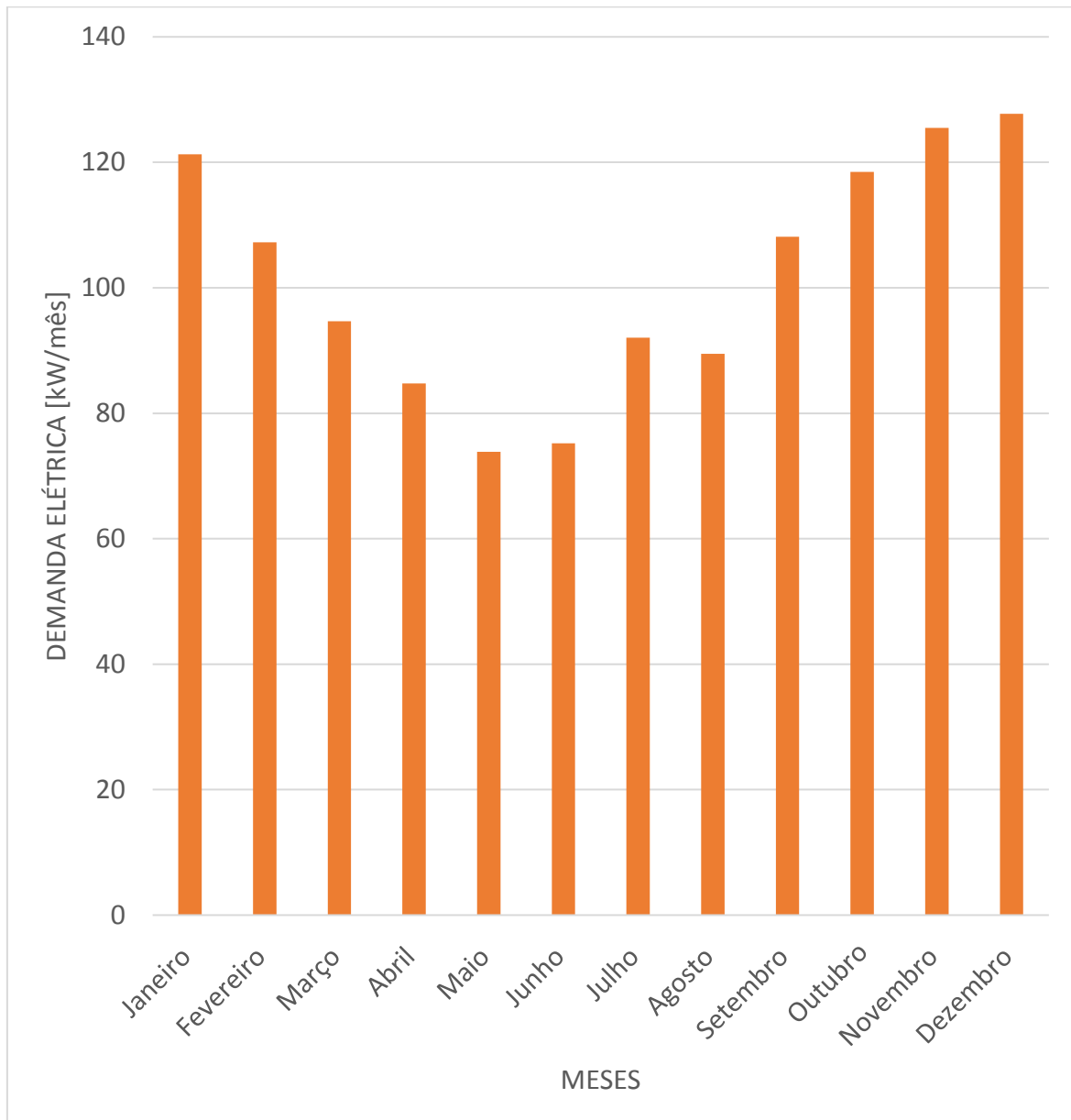


Figura 22 – Gráfico da Demanda Elétrica [kW].
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Através do gráfico da Figura 22 pode-se observar que o comportamento acompanha a produção de litro de cerveja. Através do gráfico pode-se observar que o mês de maior demanda elétrica foi dezembro, cuja demanda é 127,72 kW. Porém essa demanda é a demanda total da empresa, incluindo a refrigeração, que é considerada uma unidade de processo paralela à produção de cerveja.

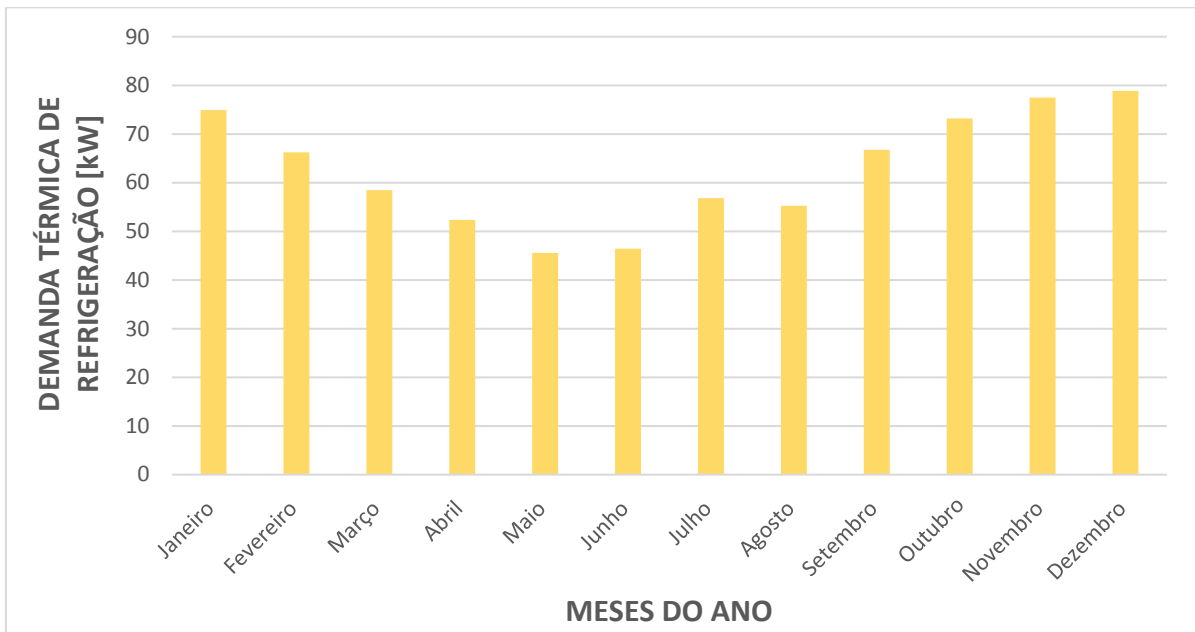


Figura 23 – Gráfico da Demanda Térmica da Refrigeração [kW].
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

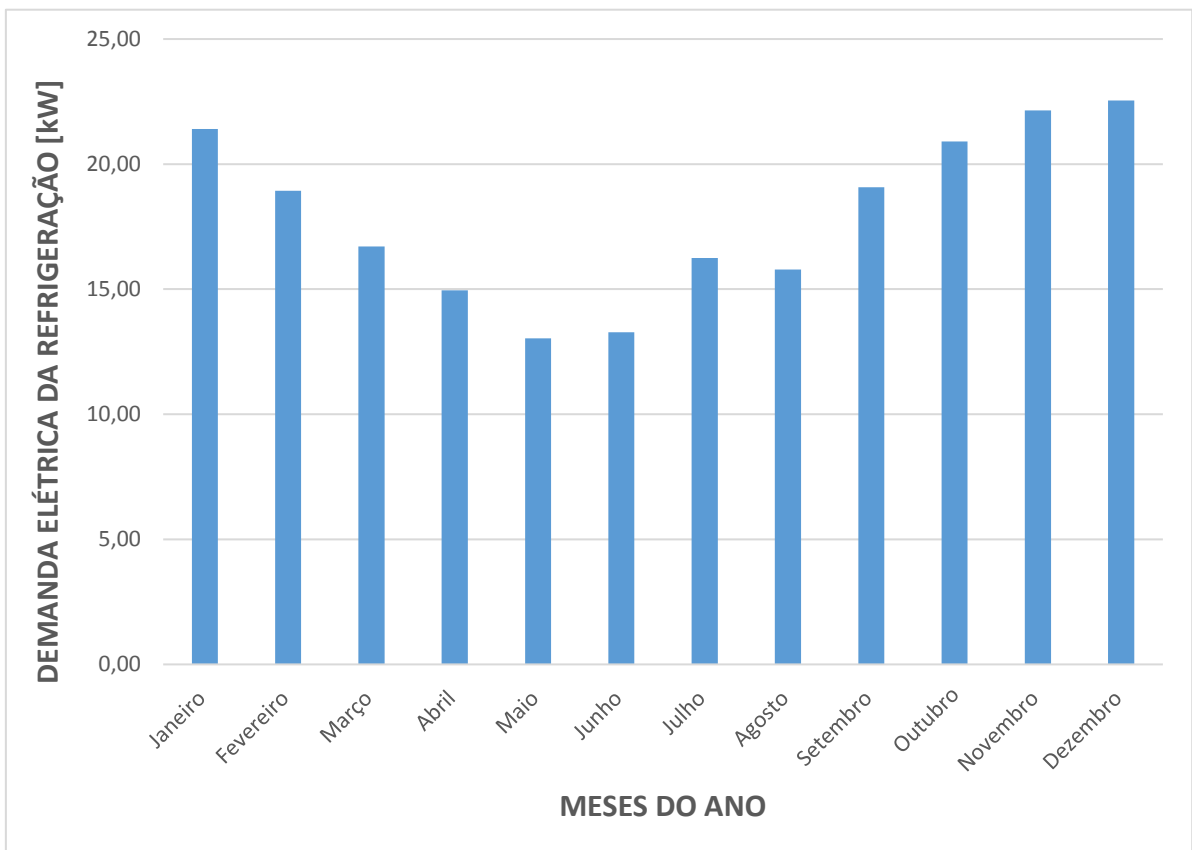


Figura 24 – Gráfico da Demanda Elétrica da Refrigeração [kW].
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Para os cálculos referentes à refrigeração foi considerado que 15% do total de energia provém da refrigeração. Considerou-se também um coeficiente de performance (COP) de 3,5. Foi considerado um refrigerador industrial com amônia como refrigerante, conforme Stoecker (2002). Assim foi possível chegar aos valores encontrados nos gráficos da Figura 23 e 24. O gráfico da Figura 23 mostra a demanda térmica da refrigeração, que representa uma parcela pequena do total, assim como a demanda elétrica mostrado no gráfico da Figura 24.

4.2. Sistemas de cogeração propostos

Considerando que a demanda térmica máxima da empresa é de aproximadamente 474 kW e que a demanda elétrica é de 127,72 kW, optou-se por configurar os sistemas de cogeração em paridade térmica. Assim, a Tabela 5 mostra os valores dos parâmetros ALFA e BETA de caracterização da unidade de processo.

Tabela 5 – Valores de ALFA e BETA

ALFA	BETA
0,30	3,38
0,26	3,91
0,37	2,72
0,32	3,12
0,33	2,99
0,38	2,62
0,29	3,40
0,27	3,74
0,26	3,90
0,24	4,23
0,23	4,40
0,24	4,19

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

Analisando a Tabela 5 e os valores recomendáveis da Tabela 3, chega-se ao consenso de que as melhores opções para atender a essa empresa são motor de combustão interna ou turbina a vapor.

4.2.1 Sistema de cogeração com motor de combustão interna (MCI)

Na Figura 25 têm-se um esquema da configuração proposta para a empresa estudada utilizando um motor de combustão interna. Conforme mencionado anteriormente, o sistema de cogeração será configurado em paridade térmica (o principal objetivo será atender a demanda térmica da unidade de processo), e classificado como ciclo *topping*, pois primeiro ocorre a geração de energia elétrica (o motor de combustão interna está diretamente acoplado a um gerador elétrico) para que posteriormente ocorra a geração de energia térmica.

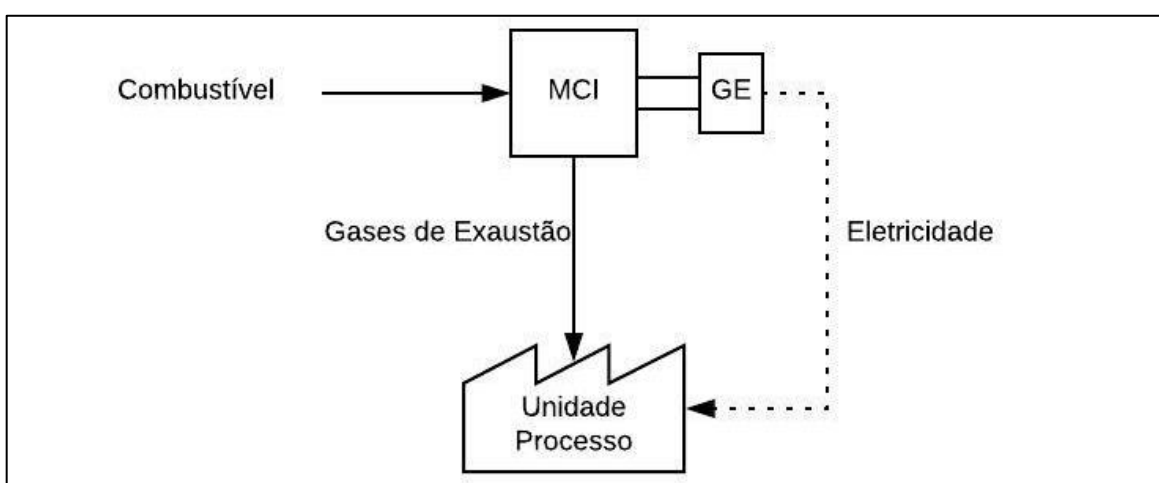


Figura 25 – Esquema proposto de sistema de cogeração utilizando motor de combustão interna.
Fonte: Pesquisa direta, 2018

Na Figura 25 pode-se observar que os gases de exaustão serão direcionados diretamente para a unidade de processo, que constitui basicamente da panela onde é feita a fervura do mosto e dos equipamentos para a refrigeração.

Para atender a demanda térmica de 474 kW, foram selecionados três motogeradores de diferentes fabricantes para análise da utilização na central de cogeração. A Figura 26 apresenta os modelos selecionados e a Tabela 6 exibe os parâmetros e especificações principais destas máquinas.



Caterpillar C15

Kohler KV550UC2

Himoinsa HSW-725 T6B

Figura 26 – Modelos de Motogeradores selecionados.

Fonte: Cartepillar Inc (2018); Himoinsa (2018); Kohler (2018)

Tabela 6 – Especificações dos motogeradores selecionados

Parâmetros		Caterpillar	Kohler	Himoinsa
		C15	KV550UC2	HSW-725 T6B
Potência máxima gerada	kWe	500	550	555
Frequência	Hz	60	60	60
Combustível	-	Diesel	Diesel	Diesel
PCI do combustível	kJ/kg	42780	42780	42780
Vazão mássica de combustível	kg/s	0,0325	0,0330	0,030898
Energia fornecida pelo combustível	kW	1388,698	1412,012	1321,797
Diâmetro do cilindro x Curso	mm	137,2 x 171,4	144 x 165	130 x 154
Número de cilindros	-	6	6	8
Cilindrada	L	15,20	16,12	16,4
Relação de compressão	-	16,1:1	16,5:1	16,7:1
Eficiência Térmica	%	36,0	39,0	42,0
Temperatura dos gases de escape	°C	531,1	512	536
Vazão volumétrica dos gases de escape	m ³ /min	102,1	110,4	118,0
Calor rejeitado	kW	493	500	488

Fonte: Pesquisa direta, 2018

O principal parâmetro para a seleção foi a quantidade de calor rejeitado, visando atender a demanda térmica. Como pode ser observado na Tabela 6, será adotado o combustível óleo Diesel para todos os três motores, cujo poder calorífico inferior (PCI) utilizado para os cálculos foi de 42.780 kJ/kg. Seguindo o padrão da rede elétrica do Brasil, todos os geradores produzem energia elétrica na frequência de 60 Hz. Empregaram-se as equações 14 ao 28 citadas anteriormente, sobre Ciclo Diesel, para a montagem e obtenção dos dados exibidos na Tabela 6, e também, posteriormente, na Tabela 7.

Para cada motor determina-se um cenário diferente, portanto o cenário “Motor 1” se refere ao modelo C15 Cartepillar que gera uma potência elétrica de 500 kWe, e atende à demanda térmica necessária entregando 493 kW quando o necessário é 474 kW. O cenário “Motor 2” se refere ao modelo KV550OUC2 da Kohler que gera uma potência elétrica de 550 kWe e uma potência térmica equivalente a 500 kW. E por último, o cenário “Motor 3” se refere ao modelo HSW-725 T6B da Himoina, potência elétrica de 555 kWe e potência térmica de 488 kW. O equipamento da Himoina apresenta altos valores de diâmetro de cilindro, curso e cilindrada, portanto apresenta também a maior relação de compressão o que acarreta na menor potência térmica dentre os três equipamentos.

Observa-se que em todos os cenários os equipamentos são capazes de suprir a paridade térmica, e também a demanda elétrica, produzindo até excedente, que pode ser vendido para a concessionária de energia elétrica.

De acordo com a equação 16, calcula-se a eficiência global de cogeração para cada cenário utilizando PCI de 42780 kJ/kg para o combustível adotado, conforme ilustra a Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos do sistema de cogeração usando os motogeradores selecionados

Parâmetros	Cartepilar C15	Kohler KV550UC2	Himoinsa HSW-725 T6B
Potência do Motor [kW] (%)	500 (35,3%)	550 (38,2%)	555 (43,2%)
Calor rejeitado nos gases de exaustão [kW] (%)	493 (34,8%)	500 (34,7%)	488 (38%)
Calor rejeitado na água de resfriamento [kW] (%)	182 (12,8%)	-	242 (18,8%)
Radiação e outras perdas [kW] (%)	241 (17,1%)	388 (24,1%)	-
Energia entregue pelo combustível [kW] (%)	1416 (100%)	1438 (100%)	1285 (100%)
Temperatura dos gases de escape [°C]	531	512	536
Fluxo mássico dos gases de escape [kg/s]	0,7837	1,3310	0,8614
Eficiência de cogeração	71,5%	82,6%	78,9%

Fonte: Pesquisa direta, 2018

Os resultados mostrados na Tabela 7 indicam que o sistema de cogeração proposto através do reaproveitamento dos gases de exaustão dos motores de combustão interna é viável tecnicamente em todos os cenários pois todos apresentam eficiência global superior a 69%.

O cenário 3 do uso do motor do fabricante Himoinsa é o que apresenta a maior eficiência térmica, porém o motor do fabricante Kohler apresenta a maior eficiência de cogeração. No cenário 2 são produzidos 550 kWe, quando a demanda elétrica máxima é de apenas 127,72 kWe. Assim, haverá um excesso de 422,28 kWe que a empresa pode comercializar, seguindo a regulamentação da empresa concessionária de energia.

4.2.2 Sistema de cogeração com turbina a vapor

Na Figura 27 têm-se um esquema da configuração proposto para a empresa estudada utilizando turbina a vapor de contrapressão. O sistema de cogeração também será configurado em paridade térmica e classificado como ciclo *topping*.

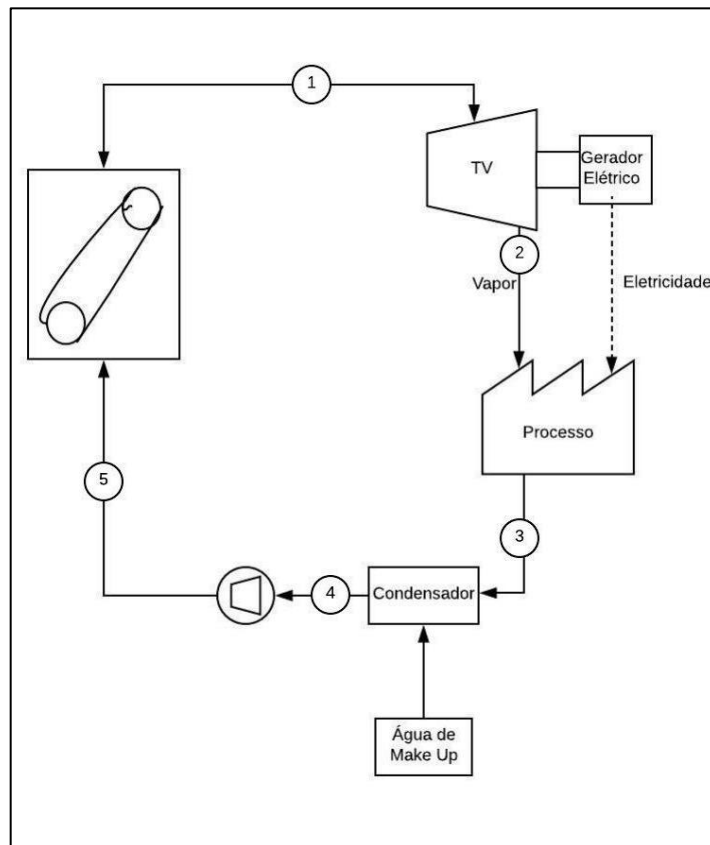


Figura 27 – Esquema proposto de sistema de cogeração utilizando turbina a vapor.
Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Na Figura 27 têm-se um esquema proposto para o sistema de cogeração usando turbina a vapor de contrapressão. Pode-se observar que a panela na unidade de processo será abastecida com vapor oriundo da turbina a vapor, ao invés da caldeira. Após a fervura na panela, o vapor será direcionado a um trocador de calor (condensador ou misturador) e acrescido de água de *make-up* e depois será bombeado de volta para a caldeira, a fim de produzir mais vapor para abastecer a turbina a vapor. Tal ciclo representa o ciclo Rankine e para os cálculos foram utilizadas as equações 1 ao 8 descritas no capítulo 2 deste trabalho.

Para atender a demanda térmica de 474 kW, foram selecionadas turbinas a vapor de diferentes fabricantes para análise da utilização na central de cogeração. A Figura 28 apresenta os modelos selecionados e a Tabela 9 exhibe os parâmetros e especificações principais destas máquinas.



Figura 28 – Modelos de TV selecionados.

Fonte: Siemens (2018); Full System Engineering 2018); G-Team (2018)

Tabela 8 – Especificações das turbinas a vapor selecionados

MODELO		S2E 50 – 600	TR 320	SST - 050
Potência máxima gerada	kWe	600	750	700
Frequência	Hz	60	60	60
Temperatura máxima de entrada	°C	350	550	500
Pressão máxima de entrada	MPa	3,5	9,0	10,1

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Para a realização dos cálculos para o ciclo Rankine foram feitas algumas considerações. A eficiência isentrópica da turbina adotada foi de 85%. Todo o vapor que entra na unidade de processo será totalmente condensado (do ponto 2 para o ponto 3) e o condensador subresfria o fluido de trabalho até 80°C.

Ao fim dos cálculos, obtém-se os valores de vazão mássica, pressão, temperatura, entalpia e entropia para cada ponto, e é possível verificar esses valores na Tabela 10 a seguir.

O vapor sai da turbina no ponto 2 ainda como vapor superaquecido e é completamente condensado durante o processo, portanto no ponto 3 a sua temperatura é a temperatura de saturação tabelada em tabelas termodinâmicas. Além desse ponto, a tabela é trabalhada também para encontrar os resultados referente aos outros pontos.

Como o contato da empresa não tinha os dados da caldeira presente na planta, foi necessário adotar uma caldeira comercial que pudesse ser adaptada, considerando os parâmetros de entrada e os cálculos realizados. Para tal, foi considerado uma caldeira da fabricante Mitsubishi HI ilustrada na Figura 29 e com as especificações mostradas na Tabela 9.



Figura 29 – Caldeira MBR-1E.
Fonte: Mitsubishi HI, 2018.

Tabela 9 – Dados da caldeira da Mitsubishi IHI

Modelo	-	MBR-1E
Evaporação máxima	kg/s	11,1
Pressão de Projeto da Caldeira	MPa	12
Pressão Máxima do Vapor	MPa	10
Temperatura Máxima do Vapor	°C	560
Eficiência	-	0,885
Temperatura da Água de Alimentação	°C	138
Número de Queimadores	-	2

Fonte: Mitsubishi HI, 2018.

Com os dados obtidos na Tabela 9, é possível realizar os cálculos através das equações 1 a 10, citadas neste trabalho no subcapítulo Ciclo Rankine, e obter a eficiência global de cogeração, além de outros valores, como ilustrado nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Resultados obtidos para cada ponto

Turbina S2E 50-600						
Pontos	Vazão, m [kg/s]	Pressão [kPa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.k]	Título
1	0,2213	3500	350,00	3104,0	6,6578	Vap
2s	0,2213	140	109,22	2464,76	6,6578	0,90
2	0,2213	140	109,22	2560,65	6,6578	0,94
3	0,2213	101	100,00	419,02	1,3068	Líq
4	0,2213	101	80,00	334,88	1,0752	Líq
5	0,2213	5000	81,00	343,08	1,0840	Líq
Turbina TR 320						
Pontos	Vazão, m [kg/s]	Pressão [kPa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.k]	Título
1	0,2205	7000	400,00	3158,10	6,4477	Vap
2s	0,2205	140	109,22	2464,76	6,4477	0,86
2	0,2205	140	109,22	2568,76	6,4477	0,95
3	0,2205	140	100,00	419,02	1,3025	Líq
4	0,2205	101	80,00	334,88	1,0752	Líq
5	0,2205	10000	82,00	351,22	1,0920	Líq
Turbina SST – 050						
Pontos	Vazão, m [kg/s]	Pressão [kPa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kg.k]	Título
1	0,2205	7000	400,00	3158,10	6,4477	Vap
2s	0,2205	140	109,22	2464,76	6,4477	0,86
2	0,2205	140	109,22	2568,76	6,4477	0,95
3	0,2205	101	100,00	419,02	1,3068	Líq
4	0,2205	101	80,00	334,88	1,0752	Líq
5	0,2205	10000	82,00	351,22	1,0920	Líq

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Tabela 11 – Resultados obtidos das turbinas a vapor

		Cenário 4: Turbina S2E 50- 600	Cenário 5: Turbina TR 320	Cenário 6: Turbina SST - 050
Potência da Turbina	kW	120,26	129,94	129,94
Potência da Bomba	kW	1,81	3,60	3,60
Calor do Processo	kW	474	474	474
Calor absorvido na caldeira para geração de vapor	kW	611,07	618,89	618,89
Energia do combustível entregue na caldeira	kW	690,47	699,31	699,31
Potência Máxima Produzida	kW	600	700	750
Eficiência Global de Cogeração	-	86%	86%	86%

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Na Tabela 11 verifica-se que a eficiência global em todos os cenários é superior a 69%, portanto são viáveis para a implantação. Observa-se também que os cenários 5 e 6 apresentam os mesmos resultados. Isso se dá devido às condições de trabalho que são limitadas tanto pelas especificações de cada turbina, quanto da caldeira e quanto às leis termodinâmicas. Porém, todos os cenários produzem uma baixa potência elétrica, quando comparados aos cenários 1,2 e 3. O cenário 4 não atende à demanda elétrica da unidade de processo que é de 127,72 kW e os cenários 5 e 6 atendem produzindo um excedente quase irrelevante.

4.3 Considerações Finais

A Figura 30 mostra os resultados da análise energética dos sistemas de cogeração em cenários estudados para a indústria cervejeira estudada. No gráfico da figura é possível perceber os valores de eficiência global de cogeração e potência elétrica produzida em cada cenário.

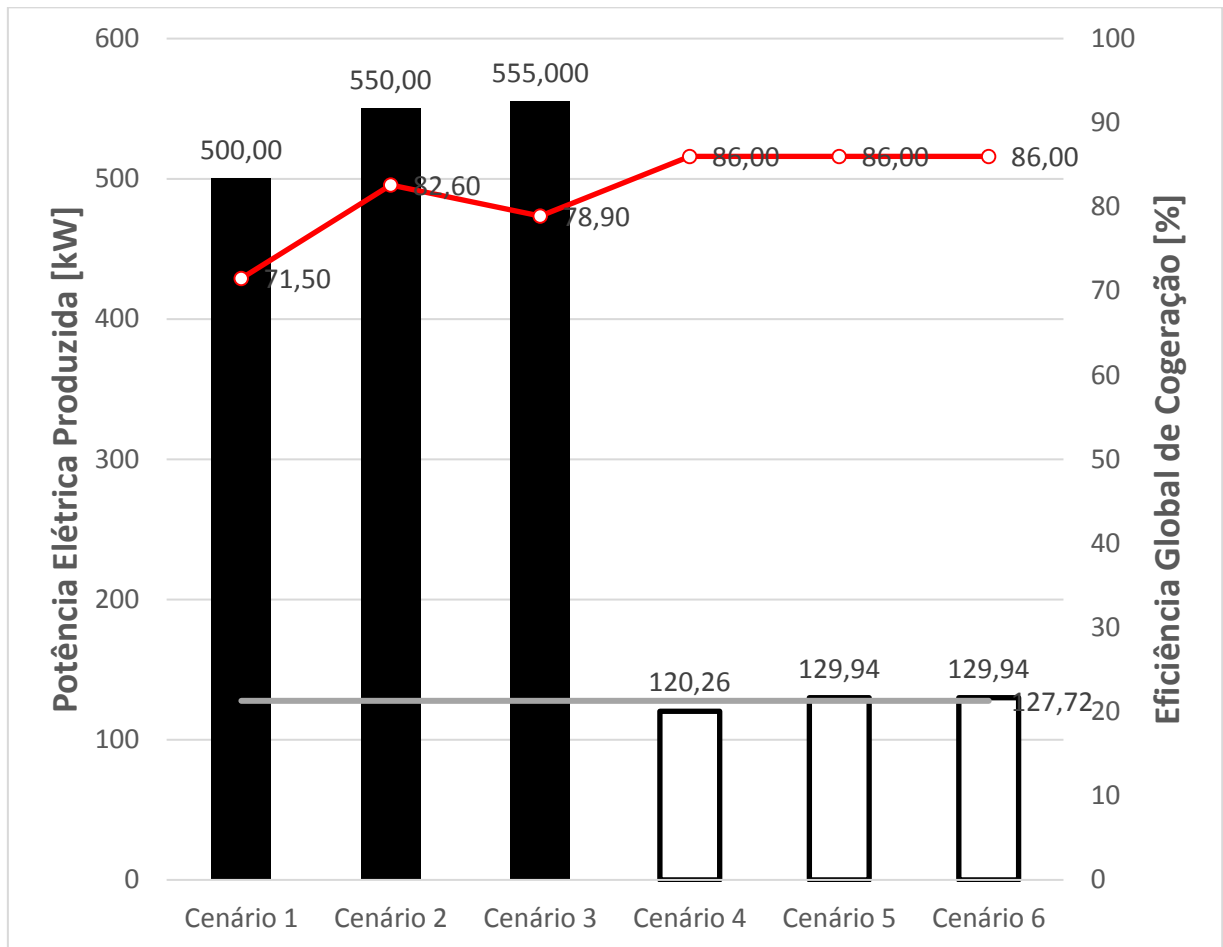


Figura 30 – Resultados dos cenários simulados para a indústria cervejeira estudada.
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Pela Figura 30 observa-se que os cenários referentes às turbinas de vapor apresentaram uma maior eficiência global de cogeração quando comparado aos motores de combustão interna. Porém, quando se trata sobre a demanda elétrica que é de 127,72 kW, o cenário 4 não consegue atender e os cenários 5 e 6 atendem sem produzir muito excedente, enquanto que os motores de combustão interna, apesar de apresentarem valores de eficiência menores, eles apresentam capacidade superior quanto a potência elétrica, produzindo excedente, o que pode ser benéfico para o cliente.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo finaliza o presente trabalho apresentando as conclusões obtidas através do estudo realizado e recomendações para novas pesquisas.

5.1 Conclusões

Conforme o cenário previsto para o setor cervejeiro, a projeção de demanda energética para a produção de cerveja será mantida. Destaca-se que neste trabalho não houve uma análise econômica dos equipamentos, portanto as escolhas dos cenários estudados foram baseadas apenas nas especificações técnicas e nos resultados obtidos.

O melhor cenário apresentado é o cenário 2, utilizando o motor de combustão interna da Kohler modelo KV550OUC2, que consegue suprir ambas as demandas elétricas e térmicas, apesar de que o modelo da HIMOINSA produz mais potência elétrica, a diferença entre os dois é de apenas 5kW. Mesmo que o cliente consiga vender todo o excedente produzido, essa diferença dará um valor pequeno, o melhor é considerar o modelo da Kohler que apresenta melhor eficiência global de cogeração.

Mas a escolha de tanto do motor de combustão interna quanto de turbina a vapor (cenário 4 e 5) pode ser implantado pela empresa, pois atende as demandas térmicas do processo produtivo, assim como não só atende à demanda elétrica, mas será produzido um excedente que pode ser vendido na rede, trazendo benefícios econômicos para a empresa, por mais que seja um valor baixo. E a empresa está localizada em um bairro onde existem outras fábricas então uma sugestão seria contatar essas fábricas e negociar um possível acordo.

Porém, para uma proposição completa e concisa da implantação de um sistema de cogeração devem ser considerados também o investimento inicial, o consumo, o preço dos combustíveis empregados, a manutenção dos equipamentos e a projeção do retorno financeiro que o projeto terá. Assim, essas análises são sugeridas em estudos futuros como descrito no item a seguir.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para novos trabalhos na área pode-se citar:

- Análise de viabilidade econômica da central de cogeração proposta;
- Análise exergética das máquinas térmicas envolvidas no sistema de cogeração;
- Como a fábrica possui uma área grande, com galpões altos, propõe-se a análise de viabilidade da instalação de placas solares. A ausência de prédios ao redor também favorece. Assim, com a demanda elétrica excedente, incentiva-se o aumento da produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRÁRIA MALTES. Material de Apoio para curso de produção de cerveja. 2018.
- BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração - Geração Combinada de Eletricidade e Calor**. UFSC, 2002.
- BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva**. Campinas: Tese de doutorado. UNICAMP, 1994.
- BRASIL É O TERCEIRO NO RANKING MUNDIAL DE PRODUÇÃO DE CERVEJA. GOVERNO DO BRASIL. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/08/brasil-e-o-terceiro-no-ranking-de-producao-mundial-de-cerveja>>. Acesso em 13 maio 2018.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: volume 1**/ Franco Brunetti. – São Paulo: Blucher, 2012.
- CHIERICATO, T. **Sistemas de Cogeração**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- COGERAÇÃO. COMGÁS. Disponível em: < <https://www.comgas.com.br/para-industria/cogeracao/>>. Acesso em 30 novembro 2018.
- DEVKI ENERGY CONSULTANCY PVT. LTD., **Best Practice Manual of Cogeneration**. 2006.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017**. Ministério de Minas e Energia - MME. Rio de Janeiro: EPE, 2014 Disponível em: < http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao46/topico82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 10 maio 2018.
- FONSECA, J.J.S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GERHARDT, T. E; SILVEIRA, D.T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Ed. São Paulo: Atlas, 2007

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GOLDENBERG, P.; MARSIGLIA, R.M.G.; GOMES, M.H.A. (Orgs.). **O clássico e o novo: tendências, objetos e abordagens em ciências sociais e saúde**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2003. P. 117-42

HORLOCK, J. H. **Cogeneration - combined heat and power (CHP): thermodynamics and economics**. Pergamon Press, 210 pages, 1987.

INDÚSTRIA CERVEJEIRA ESTÁ CONECTADA COM O DESENVOLVIMENTO DO PAÍS. CERVBRAZIL. Disponível em: http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/industria-cervejeira-conectada-desenvolvimento-pais/. Acesso em: 15 maio 2018.

INFOGRÁFICO – CERVEJA NO BRASIL. ESCOLA SUPERIOR DE CERVEJA E MALTE. Disponível em: < <http://cervejaemalte.com.br/blog/infografico-cerveja-no-brasil/>>. Acesso em: 15 maio 2018.

LEAL, E. M. **Cogeração – Material de Apoio à disciplina**. Ouro Preto, 2016.

MICROCERVEJARIAS GANHAM ESPAÇO NO MERCADO NACIONAL. SEBRAE. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/microcervejarias-ganham-espaco-no-mercado-nacional,fbe9be300704e410VgnVCM1000003b74010aRCRD>>. Acesso em: 13 maio 2018.

MORAN M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 800 p.

NÚMERO DE CERVEJARIAS NO BRASIL CRESCE 17,5% NO PRIMEIRO SEMESTRE DE 2017. O GLOBO. Disponível em: <<https://blogs.oglobo.globo.com/aqui-se-bebe/post/numero-de-microcervejarias-no-brasil-cresce-175-no-primeiro-semester-de-2017.html>>. Acesso em 13 maio 2018

OTIS, P. **CHP Industrial Bottoming and Topping Cycle with Energy Information Administration Survey Data**. 2015. Disponível em: < https://www.eia.gov/workingpapers/pdf/chp-Industrial_81415.pdf>. Acesso em 1 junho 2018.

PETRECCA, G. **Industrial Energy Management: principles and applications**. Massachussets: Kluwer Academic Publishers, 1993, 419p.

PILON, et al., 2012, Rev. Técnico Científica, v.3, n.1. 2012. Periódico, IFSC (, Rev. Técnico Científica, v.3, n.1. 2012. Periódico, IFSC).)

QUANTO CUSTA A ENERGIA ELÉTRICA PARA A PEQUENA E MÉDIA INDÚSTRIA NO BRASIL? SISTEMA FIRJAN. Disponível em: <
<http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>>. Acesso em 22 maio 2018.

SANTOS, R.A.C. **Estudo sobre fornos de tratamento térmico e propostas de cogeração de energia em usina siderúrgica não integrada**. – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá: [s.n], 2011.

SILVEIRA, J. S. **Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudos de casos para o Setor Terciário**. 1994. 193f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

SONNTAG, R.E. **Fundamentos da termodinâmica**. Tradução da sexta edição inglesa: Euryale de Jesus Zerbini. – São Paulo: Blucher, 2003.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

YANAGIHARA, J, I. **Máquinas Térmicas: Cogeração**. Curso de Engenharia Mecânica: Poli-USP, outubro de 2007. 22 f. Notas de aula.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



DECLARAÇÃO

Certifico que o aluno **João Paulo Malheiros Oliveira**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à uma indústria cervejeira" efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2018.

Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora