



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

MECÂNICA



MILENA DA SILVA TAVARES

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
APLICADO À UM LATICÍNIO DE MÉDIO PORTE**

**OURO PRETO – MG
2019**

MILENA DA SILVA TAVARES

milena.taavares@gmail.com

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO
APLICADO À UM LATICÍNIO DE MÉDIO PORTE**

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

Professor orientador: DSc. Elisângela Martins Leal.

**OURO PRETO – MG
2019**

T197a Tavares, Milena da Silva.
Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à um laticínio de médio porte [manuscrito] / Milena da Silva Tavares. - 2019.

59f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Elisângela Martins Leal.

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

1. Energia. 2. Cogeração. 3. Turbinas a vapor e a gás. 4. Industria de laticínios. 5. Análise energética. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



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

ATA DA DEFESA

Ao 28º dia do mês de junho do ano de dois mil e dezenove às 9 horas, na sala 2, localizada na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, UFOP, foi realizada a defesa de monografia da aluna **Milena da Silva Tavares**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia, Prof. DSc. Edson Alves Figueira Júnior e a Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. A candidata apresentou o trabalho intitulado: “**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO À UM LATICÍNIO DE MÉDIO PORTE**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram a aluna aprovada.

Ouro Preto, 28 de junho de 2019.

Elisângela Martins Leal

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Luis Antonio Bortolaia

Prof. DSc. Luis Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Edson Alves Figueira Jr

Prof. DSc. Edson Alves Figueira Júnior
Professor Avaliador

Milena da Silva Tavares

Milena da Silva Tavares
Aluna

Dedico este trabalho aos meus pais e a todos
que torceram por mim

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre acreditarem na minha capacidade e apoiarem minhas decisões. Por toda educação, força e valores que me foram passados.

À UFOP pelo ensino público e de excelência.

Aos professores do DEMEC por se doarem tanto para tornar o curso cada dia melhor e por todo conhecimento transmitido.

À minha orientadora Elisângela pelo exemplo de profissional, por toda paciência, dedicação e incentivo durante este trabalho.

Aos amigos da Engenharia Mecânica por dividirem comigo cada etapa deste curso, por acreditarem que este dia chegaria, por todo apoio e por me incentivarem a ir muito mais longe.

A República Convento e todas que a compõem por apoiarem minhas escolhas nesta etapa final e por serem parte fundamental de toda minha trajetória.

RESUMO

TAVARES, Milena da Silva. Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à um laticínio de médio porte. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 59 páginas. 2019

Atualmente, há uma preocupação muito grande com o setor energético brasileiro visto que estudos comprovam que a demanda de energia do país vai superar a capacidade de geração. Com isso, muitos estudos estão sendo realizados para buscar novas tecnologias de geração de energia e/ou aprimorar a eficiência das tecnologias já existentes. A cogeração, que é a geração combinada de calor e eletricidade, tem como objetivo aproveitar ao máximo o potencial térmico disponibilizado por uma fonte primária, minimizando desperdícios. O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise energética e propor um sistema de cogeração a ser aplicado à uma indústria de laticínios de médio porte, que tem demanda térmica de vapor e de produção de frio, além de demanda de energia elétrica. Optou-se por trabalhar em paridade térmica, ou seja, dando prioridade para atender a demanda térmica da empresa, para isso, analisou-se sistemas de cogeração com emprego de turbinas a vapor e turbinas a gás. Para o emprego de turbinas a vapor estratificou-se o estudo em turbinas operando em contrapressão e extração-condensação, obtendo eficiências de cogeração de aproximadamente 77% e 53% respectivamente. Embora mais eficiente, o sistema que opera em contrapressão atendeu somente aproximadamente 22% da demanda elétrica da empresa. Para este sistema, selecionou-se a turbina a vapor SST-300 da *Siemens* e da caldeira *Heros* da *Babcock & Wilcox*. No sistema com turbina a gás estudou-se três turbinas em que a de melhor eficiência de cogeração foi a *Centaur 40* da *Solar Turbines* com aproximadamente 65%, a mesma atendeu a demanda térmica da empresa e gera um excedente em torno de 637 kW de energia elétrica, que pode ser comercializado. Ambos sistemas a vapor e a gás possuem viabilidade técnica e atendem às demandas da empresa, entretanto, optou-se por selecionar o sistema a vapor por ser mais barato, de mais fácil instalação e manutenção, portanto, mais condizente com o porte da empresa. Para a escolha do modo de operação desta turbina sugeriu-se uma análise econômica a fim de verificar se é mais viável a compra de 78% de energia elétrica para complementar o sistema de contrapressão ou a compra de 88% a mais combustível para atender a demanda da caldeira no sistema de extração-condensação.

Palavras-chave: Energia, Cogeração, Turbinas a vapor e a gás, Indústria de laticínios, Análise energética.

ABSTRACT

TAVARES, Milena da Silva. Energy analysis of a cogeneration system applied to a medium-sized dairy. Bachelor degree in Mechanical Engineering. School of Mining. Federal University of Ouro Preto. 59 pages. 2019

Currently, there is a great concern with the Brazilian energy sector since studies show that the country's energy demand will exceed generation capacity. Therefore, many studies are being carried out to search for new energy generation technologies and/or to improve the efficiency of existing technologies. Cogeneration, which is the combined heat and power, aims to make the most of the thermal potential provided by a primary source, minimizing waste. The present work aims to analyse energetically and propose a cogeneration system to be applied to a medium-sized dairy industry, which has thermal steam demand and cold production, as well as electric energy demand. It was decided to work on thermal parity, that is, giving priority to meet the thermal demand of the company. For that, cogeneration systems using steam turbines and gas turbines were analyzed. For steam turbines, the study was stratified in turbines operating in backpressure and extraction-condensation, obtaining cogeneration efficiencies of about 77% and 53%, respectively. Although more efficient, the system that operates in back pressure served only about 22% of the electric demand of the company. For this system, Siemens SST-300 steam turbine and the Babcock & Wilcox Heros boiler were selected. In the gas turbine system, three turbines were studied in which the best efficiency of cogeneration was for the engine Centaur 40 of Solar Turbines with about 65%, which met the thermal demand of the company and generates a surplus of about 637 kW of electric energy, which can be marketed. Both steam and gas systems have technical feasibility and meet the demands of the company, however, it was decided to select the steam system because it is cheaper, easier to install and maintain, therefore more consistent with the size of the company. In order to choose the mode of operation of this turbine it was suggested an economic analysis in order to verify if it is more viable the purchase of 78% of electric energy to complement the system of back pressure or the purchase of 88% more fuel to meet the demand of the boiler in the extraction-condensation.

Keywords: *Energy, Cogeneration, Steam and gas turbines, Dairy industry, Energy analysis.*

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
B	Bomba
C	Compressor
CA	Caldeira convencional
CC	Câmara de combustão
CR	Caldeira de recuperação
EMPRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GE	Gerador elétrico
MC	Motor de combustão
PDE	Plano Decenal de Energia
SRC	Sistema de refrigeração por compressão
TG	Turbina a gás
TV	Turbina a vapor
TV-CP	Turbina a vapor de contrapressão
TV-EC	Turbina a vapor de extração-condensação
HP	<i>High pressure</i>
LP	<i>Low pressure</i>
UHT	<i>Ultra High Temperature</i>
UP	Unidade de processo

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFA	Razão ente potência elétrica e térmica consumida no segmento [-]
BETA	Razão entre potência elétrica e térmica produzidos pelo sistema de cogeração [-]
COP	Coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração [-]
C_p	Calor específico molar a pressão constante [kJ/kgmol K]
E	Energia elétrica e/ou mecânica consumida no segmento [-]
E'	Energia elétrica e/ou mecânica produzidas pelo sistema de cogeração [-]
h_i	Entalpia no ponto “i” [kJ/kg]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
P_i	Pressão no ponto “i” [kPa]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
Q_H	Calor fornecido para o sistema [kW]
Q_L	Calor rejeitado pelo sistema [kW]
RAC	Razão ar-combustível [-]
r_p	Razão de pressão [-]
s_i	Entropia no ponto “i” [kJ/kgK]
S	Energia térmica consumida no segmento [kW]
S'	Energia elétrica e/ou mecânica produzidas pelo sistema de cogeração [kW]
T_f	Temperatura final do processo [K]
T_i	Temperatura inicial do processo [K]
v_i	Volume específico no ponto “i” [m ³ /kg]
W_b	Trabalho necessário da bomba [kW]
W_{liq}	Trabalho líquido do sistema [kW]
W_s	Trabalho consumido pelo compressor [kW]
W_t	Trabalho realizado pela turbina [kW]
$\eta_{Brayton}$	Eficiência do ciclo Brayton [%]
$\eta_{Cogeração}$	Eficiência de cogeração [%]
$\eta_{Rankine}$	Eficiência do ciclo Rankine [%]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de energia por setor.....	3
Figura 2: Oferta interna de energia elétrica por fonte	7
Figura 3: Fluxo de energia elétrica.....	8
Figura 4: Balanço comparativo, em unidades de energia, entre um sistema convencional de produção de energia térmica e elétrica e um sistema de cogeração.	10
Figura 5: Geração de energia tradicional e geração de energia com cogeração.....	11
Figura 6: Exemplo de projeto de cogeração em ciclo <i>topping</i>	12
Figura 7: Exemplo de projeto de cogeração em ciclo <i>bottoming</i>	13
Figura 8: Ciclos térmicos de cogeração.....	14
Figura 9: Ciclo Rankine ideal simples.....	17
Figura 10: Turbina a gás que opera segundo o ciclo Brayton: (a) Ciclo aberto; (b) Ciclo fechado	19
Figura 11: Ciclo padrão a ar de Brayton.....	20
Figura 12: Diagrama de uma planta de cogeração de energia com ciclo combinado	23
Figura 13: Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor	24
Figura 14: Diagramas P-h e T-s do ciclo de compressão de vapor	24
Figura 15: Etapas genéricas da indústria de derivados lácteos.....	28
Figura 16: Fluxograma das etapas da monografia.....	33
Figura 17: Potência requerida de frio e eletricidade da empresa em estudo	36
Figura 18: Consumo de vapor por hora na empresa em estudo.....	36
Figura 19: Imagem ilustrativa da caldeira presente no estabelecimento	37
Figura 20: Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de contrapressão	39
Figura 21: Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de extração-condensação.....	42
Figura 22: Turbina a vapor selecionada	46
Figura 23: Caldeira selecionada	46
Figura 24: Sistema de cogeração proposto com turbina a gás.....	47

Figura 25: Turbina 1 - <i>Kawasaki</i> GPB30D	48
Figura 26: Turbina 2 - <i>Siemens</i> SGT-A05	48
Figura 27: Turbina 3 - <i>Solar Centaur</i> 40	49
Figura 28: Comparação entre as condições de trabalho propostas	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das características das tecnologias de cogeração.....	15
Tabela 2: Coeficientes para o cálculo do calor específico.....	21
Tabela 3: Faixa de valores de 1/ALFA e eficiência global para os ciclos de cogeração.....	26
Tabela 4: Evolução do Consumo de Leite e Derivados Lácteos no Brasil.....	28
Tabela 5: Comparação entre pesquisa qualitativa x quantitativa	32
Tabela 6: Variáveis e indicadores da pesquisa	34
Tabela 7: Dados das caldeiras do estabelecimento.....	37
Tabela 8: Condições de entrada na turbina a vapor.....	39
Tabela 9: Turbina de contrapressão - Condição 1	40
Tabela 10: Turbina de contrapressão - Condição 2	40
Tabela 11: Turbina de contrapressão - Condição 3	40
Tabela 12: Turbina de contrapressão - Condição 4	40
Tabela 13: Resultados obtidos do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão	41
Tabela 14: Turbina de extração-condensação - Condição 1	43
Tabela 15: Turbina de extração-condensação - Condição 2.....	43
Tabela 16: Turbina de extração-condensação - Condição 3.....	44
Tabela 17: Turbina de extração-condensação - Condição 4.....	44
Tabela 18: Resultados obtidos do sistema de cogeração com turbina a vapor de extração-condensação.....	45
Tabela 19: Especificações da turbina a vapor selecionada.....	46
Tabela 20: Especificações da caldeira selecionada	47
Tabela 21: Especificações das turbinas a gás selecionadas	49
Tabela 22: Eficiência, energia cedida pelo combustível e vazão necessária em cada turbina selecionada.....	50
Tabela 23: Composição do gás de exaustão	50

Tabela 24: Eficiência de cogeração nas turbinas a gás selecionadas	51
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Formulação do problema	1
1.2. Justificativa	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Geral	4
1.3.2 Específicos.....	4
1.4 Estrutura do Trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 O cenário energético brasileiro	6
2.2 Cogeração	9
2.3 Ciclo Rankine e as turbinas a vapor	16
2.4 Ciclo Brayton e as turbinas a gás.....	19
2.5 Ciclo Combinado.....	22
2.6 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor	23
2.7 Seleção e configuração da central de cogeração	25
2.8 A indústria de laticínios	27
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 Tipos de pesquisa.....	30
3.2 Materiais e métodos.....	33
3.3 Variáveis e indicadores.....	34
3.4 Instrumento de coleta de dados	35
3.5 Tabulação dos dados.....	35
3.6 Considerações finais	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 Necessidades energéticas da empresa.....	36
4.2 Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de contrapressão.....	38
4.3 Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de extração condensação.....	42
4.4 Equipamentos selecionados para os sistemas de cogeração com turbina a vapor.....	45
4.5 Sistema de cogeração proposto com turbina a gás	47
4.6 Considerações finais	51

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	53
5.1 Conclusões.....	53
5.2 Recomendações	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é abordada a formulação do problema, onde há uma contextualização sobre o tema deste trabalho, além da justificativa, dos objetivos gerais e específicos e uma breve descrição de como o mesmo é estruturado.

1.1. Formulação do problema

Segundo Tolmasquim (2012), a capacidade de um país de prover energia para o desenvolvimento social e tecnológico de sua produção, em condições seguras, competitivas e ambientalmente sustentáveis, é um dos principais fatores que garante a sua estabilidade econômica.

De acordo com Barbeli (2005) e Holanda e Ramos (2011), com o desenvolvimento econômico do país tem-se, por consequência, um aumento da demanda energética, entretanto há uma enorme preocupação com a fragilidade futura deste setor, visto que estudos realizados por órgãos ligados ao ramo energético nacional têm evidenciado a tendência de que a demanda por energia irá superar a capacidade de geração do país.

Santos (2005) discute que questões ambientais e o provável esgotamento dos combustíveis fósseis têm sido fatores de grande influência na busca de outras tecnologias para a produção de energia, sendo assim, estudos relacionados ao melhor aproveitamento e/ou substituição destes combustíveis estão cada vez presentes, buscando proporcionar menor consumo com maior eficiência.

Uma das maneiras de atender à essa nova perspectiva, foi a cogeração industrial, que de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em sua Resolução Normativa nº 235/2006, pode ser apontada como um processo de produção combinada de calor e energia mecânica que são convertidos total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária (ANEEL, 2006).

O propósito do emprego da cogeração é aperfeiçoar o uso racional e econômico da energia, além de possibilitar o aproveitamento do potencial térmico ainda existente nos produtos resultantes da queima de um combustível, auxiliando assim, na diminuição da emissão de poluentes e minimizando o desperdício (MARCHIONNI, 2004).

Um sistema típico de cogeração consiste basicamente no acionamento de um gerador elétrico através de energia gerada em um motor a combustão interna (ciclo Otto ou Diesel), uma turbina a gás (ciclo Brayton) ou uma turbina a vapor (ciclo Rankine), por exemplo (PRUZAESKY, 2005). Além disso, estão sendo realizados muitos estudos acerca do uso de microturbinas e células combustíveis.

Além dos benefícios da cogeração citados anteriormente, Ramos (2007) destaca, também, quão ampla é a sua aplicabilidade, abrangendo desde grandes plantas industriais até centrais de pequeno porte, como as de comércios, hotéis e residências. Nas plantas industriais, são capazes de atender diversos setores como o siderúrgico, petroquímico, farmacêutico, têxtil e o setor de alimentos e bebidas (MOISÉS, 2007).

Dentre o setor de alimentos e bebidas, pode-se destacar o setor de laticínios. Conforme Maganha (2006), este setor tem grande demanda energética devido às suas especificidades, como por exemplo, o amplo uso de vapor e água quente e a necessidade intermitente de refrigeração, além dos usos básicos de iluminação, ventilação e operação de equipamentos no geral.

Segundo Maganha (2006), o consumo de energia está relacionado com a confiabilidade e a garantia da qualidade dos produtos, em especial aqueles que devem ser submetidos a processos como tratamentos térmicos, refrigeração e condições especiais de armazenamento.

Diante da grande necessidade energética de empresas deste setor, há também uma maior conveniência em explorar métodos e maneiras de diminuir o gasto de energia, acarretando menor custo de produtos e maior competitividade no mercado, portanto é necessário a elaboração de um planejamento energético, a fim de analisar e estimular a máxima produção da planta.

Portanto, a cerca deste contexto, tem-se o seguinte questionamento:

Quais as configurações e parâmetros de processo de um sistema de cogeração que melhor se adequam a indústria de laticínios em estudo?

1.2. Justificativa

É evidente que o Brasil é considerado uma potência energética mundial. O país é repleto de diferentes fontes de produção de energia que, em sua maioria, são de origens renováveis, como hidráulica, eólica, biomassa e outros (TOLMASQUIM, 2012).

Segundo Tolmasquim (2012), a demanda energética no setor industrial aumenta em grandes proporções e em 2020 o consumo de eletricidade será 61% superior ao consumo no ano de 2010. Entretanto, estima-se que a autoprodução no setor industrial cresça a proporções superiores.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2018 com ano base em 2017, o consumo final de energia do Brasil é fracionado conforme apresentado na Figura 1.

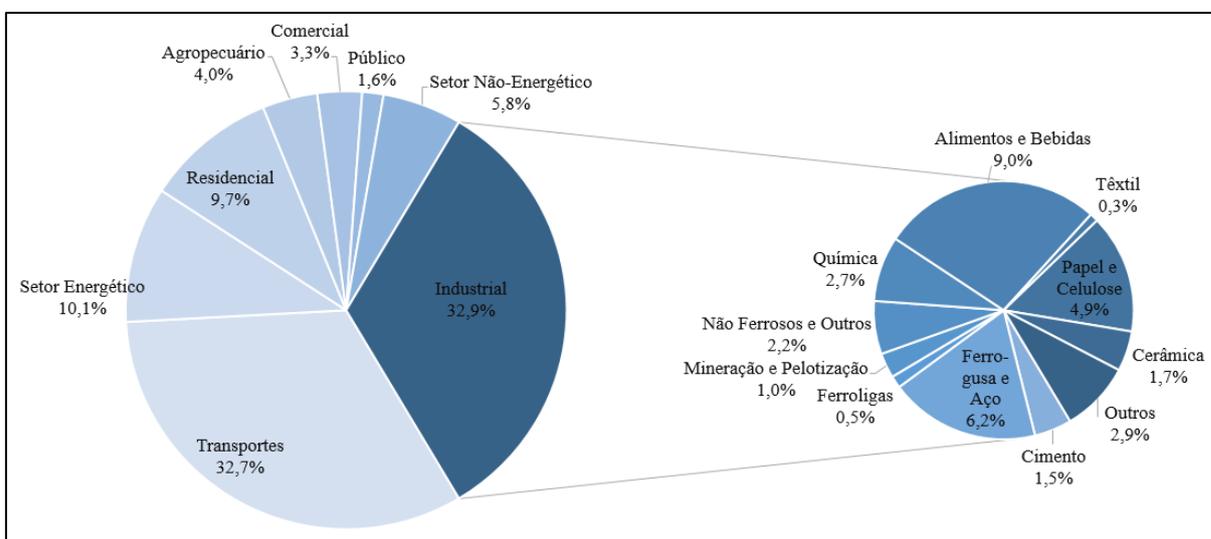


Figura 1: Consumo de energia por setor
Fonte: Adaptado de EPE 2018

Pode-se observar na Figura 1 que o setor industrial consome 32,9% de toda produção de energia do Brasil. Discriminando este percentual tem-se que 27,4% dele é destinado ao setor de alimentos e bebidas, ou seja, isso corresponde a 9% do total gasto em energia no Brasil.

O ramo de laticínios é responsável por uma grande parcela no setor de alimentos e bebidas, portanto, está diretamente inserido aos percentuais descritos a cima. Diante disto, vê-se a necessidade de um estudo mais aprofundado de métodos alternativos de geração de energia que promovam o beneficiamento das plantas industriais para o uso absoluto da energia demandada, bem como a contenção de perdas, justificando o presente trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar, sob o ponto de vista da termodinâmica, um sistema de cogeração aplicado à uma indústria de laticínios de médio porte, bem como descrever as características e peculiaridades do sistema adotado.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica acerca do setor energético, cogeração, empresa de laticínios e equipamentos utilizados em sistemas de cogeração;
- Identificar os parâmetros de caracterização de um processo específico da indústria de laticínios em estudo;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Analisar, detalhar e fundamentar o sistema de cogeração proposto;
- Concluir e realizar sugestões para estudos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos e eles estão organizados da seguinte maneira:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, onde o assunto do trabalho é contextualizado, a justificativa para a realização dele, os objetivos gerais e específicos e uma breve descrição da estrutura do mesmo.

O segundo capítulo trata-se da fundamentação teórica a respeito do cenário energético no Brasil, da cogeração e da indústria de laticínios, bem como todos os conceitos e formulações dos cálculos solicitados na turbina a gás e a vapor e análise energética.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados. Além disso, é proposto um sistema de cogeração que melhor atende uma empresa de laticínios de médio porte.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica acerca do contexto energético brasileiro, uma descrição de conceitos, aspectos e especificidades de centrais de cogeração, dando ênfase em sistemas com turbinas a gás e turbinas a vapor, além de buscar quesitos teóricos para elaborar um balanço energético desses sistemas. São abordados, também, as particularidades da produção em uma indústria de laticínios a fim de evidenciar a grandeza de sua demanda energética.

2.1 O cenário energético brasileiro

Desde os primórdios da humanidade, a energia é um fator fundamental no desenvolvimento e evolução de questões tecnológicas. A primeira revolução industrial, meados do século XVIII, teve o carvão mineral como maior fonte de matéria prima para alimentação das máquinas a vapor, contribuindo para o desenvolvimento do transporte ferroviário e marítimo. A partir de meados do século XIX, início da segunda revolução industrial, passou-se a utilizar energia elétrica e petróleo, por serem mais potentes (DARWICHE, 2010).

Oshiro (2015) destaca que o advento do motor de combustão interna foi o principal responsável pela ascensão do petróleo e a função estratégica que o mesmo exerceria de modo que o acesso crescente aos recursos energéticos passou a ser entendida com e associada ao progresso tecnológico e ao desenvolvimento socioeconômico.

Entretanto, com a crise do petróleo em 1973 (um súbito e dramático aumento do preço do barril de petróleo, concomitante a um aumento das taxas internacionais de juros), a sociedade percebeu a total dependência da matéria prima e iniciou-se uma mudança na forma em que lidavam com apropriação energética e com a utilização de apenas uma fonte de energia. (PINTO JÚNIOR, ALMEIDA, *et al.*, 2007).

A partir desta preocupação com o esgotamento das fontes não-renováveis e o impacto ambiental provocado pelas mesmas, foi despertado um interesse mundial em tentar diminuir o uso dessas fontes e conseqüentemente uma mobilização e incentivo para o planejamento energético interno de cada país, bem como a priorização da energia provinda de fontes renováveis.

Hoje em dia, isto é controlado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a qual apresenta anualmente um Balanço Energético Nacional (BEN), que tem como objetivo fazer

um acompanhamento do setor energético nacional, contendo a contabilidade relativa à oferta e consumo de energia no Brasil, além de informações sobre reservas, capacidade instalada e etc. (EPE, 2018). Além disso, a EPE também elabora um Plano Decenal de Energia (PDE) que tem por objetivo principal pressupor, com base em dados, uma perspectiva decenal para a expansão da oferta de energia elétrica no país, de forma a garantir o abastecimento adequado, com sustentabilidade técnica, econômica e ambiental.

Diante destes relatórios, é possível extrair diversas informações e dentre elas destaca-se a estrutura da oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, que é apresentada na Figura 2.

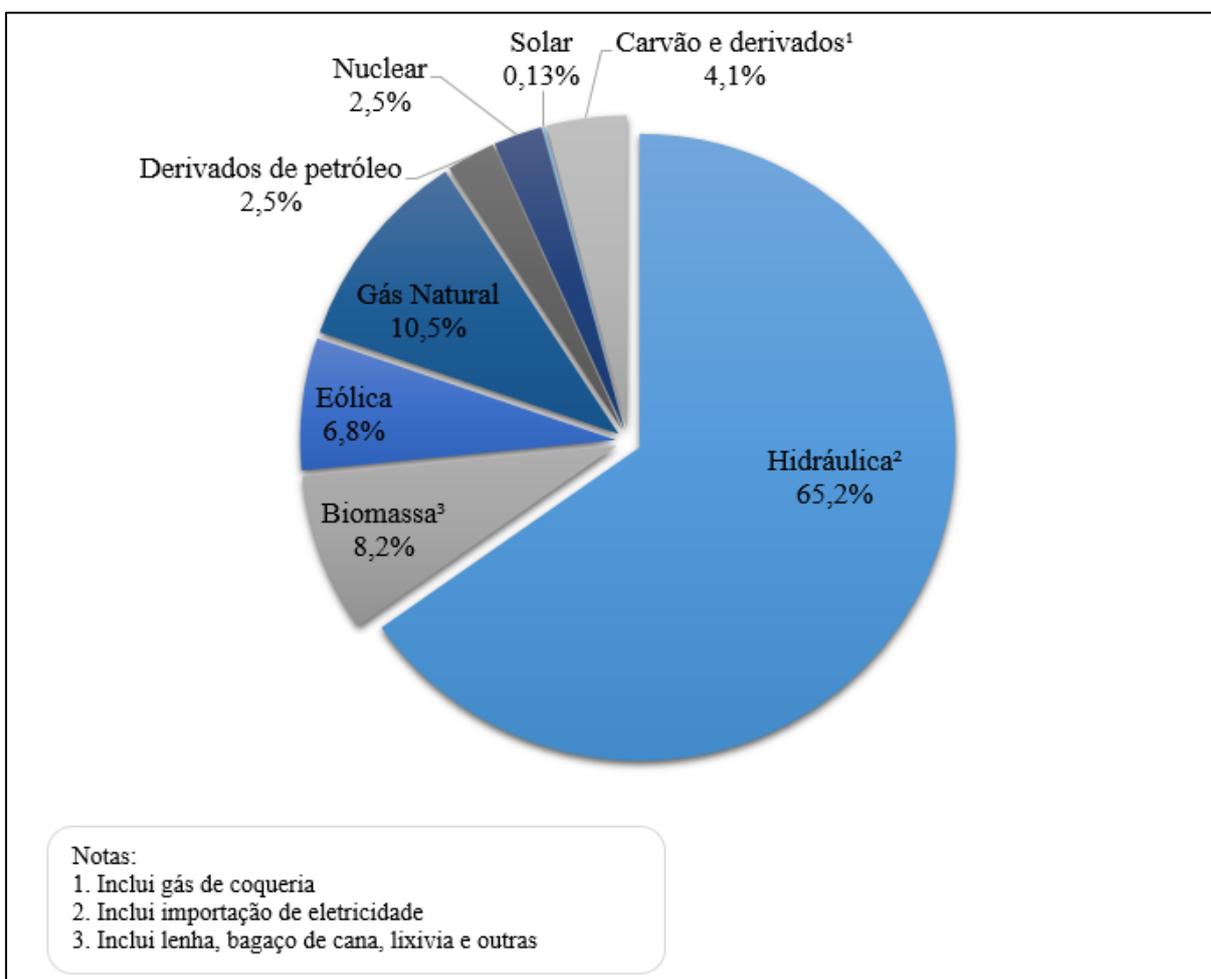


Figura 2: Oferta interna de energia elétrica por fonte
Fonte: Adaptado de EPE 2018

Pode-se observar na Figura 2, que apesar de possuir várias fontes de energia, a predominância discrepante é da geração hidrúlica, a qual corresponde a 65,2% da oferta. As fontes renováveis representam 80,4% que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável.

Segundo Tolmasquim (2012), a grande discrepância da oferta de energia hidráulica é relacionada ao fato do Brasil deter de um grande potencial hidráulico e que, apesar de também conter seus fatores negativos, a energia hidráulica engloba vários aspectos relevantes à sua valorização: é renovável; praticamente não emite gases de efeito estufa; é extremamente competitiva; e, no caso do Brasil, a construção das usinas pode ser feita praticamente com 100% de fornecimento e serviços nacionais, o que significa geração de emprego e renda no país.

A Figura 3 expõe discriminadamente a geração de eletricidade por fonte e o seu destino final por setor.

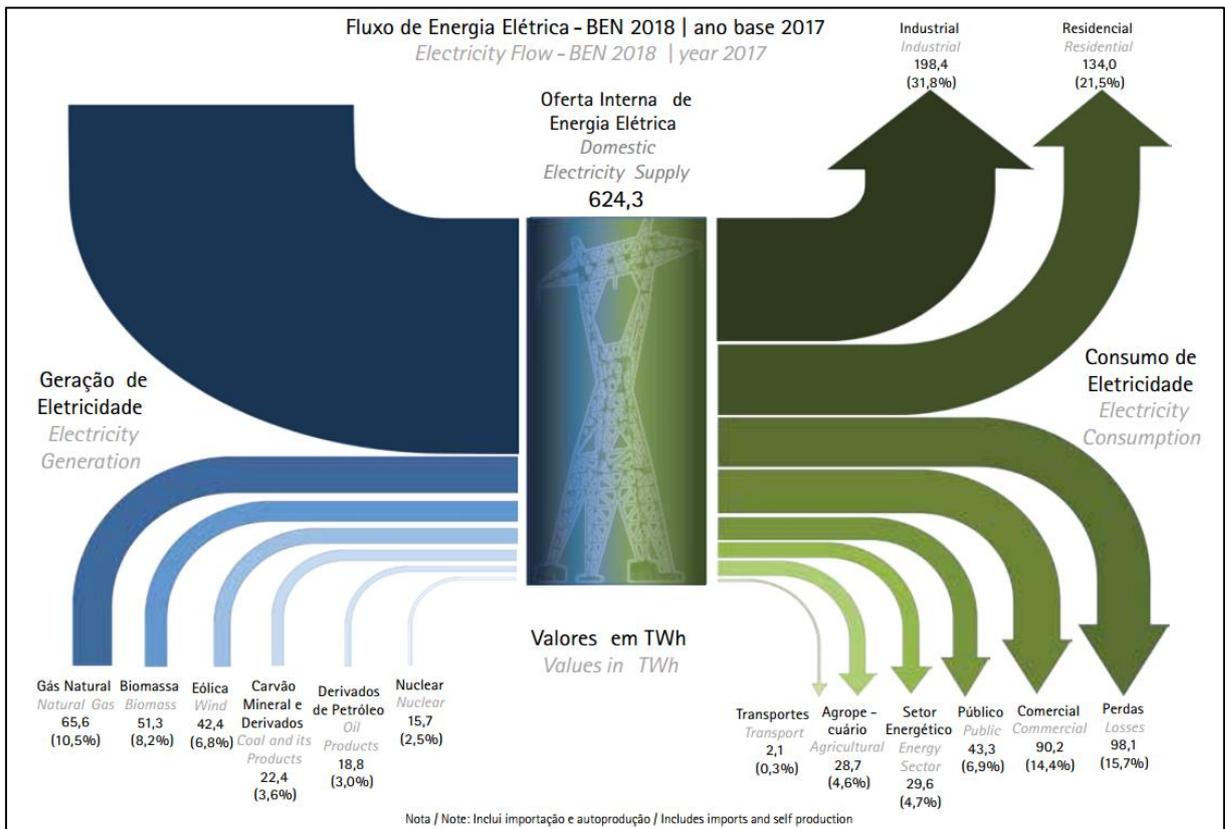


Figura 3: Fluxo de energia elétrica
Fonte: EPE 2018

A Figura 3, além de expor novamente as origens da geração de energia elétrica no Brasil, apresenta o destino da energia ofertada, bem como sua distribuição percentual. Constatamos que a maior parcela é destinada ao setor industrial (31,8%) e residencial (21,5%) e que há uma fração muito grande perdida (15,7%).

Segundo Nunes (2016), a grande questão em torno da utilização da energia hidráulica, nuclear, solar e eólica é que seu uso está diretamente ligado a geração de energia elétrica, como podemos ver na Figura 3, e isso faz com que elas não contemplem algumas áreas da indústria

e o setor de transportes, portanto não substituem o uso dos derivados do petróleo, gás natural, biocombustíveis e outros de mesmo fim.

Tendo conhecimento da eventual dependência da utilização de fontes não renováveis e de seus impactos econômicos e ambientais, Pinto Júnior *et al.* (2007) afirma que a partir da década de 1980, houve alterações relevantes nos critérios de aproveitamento destes recursos energéticos. O que antes se concentrava apenas em expandir a oferta de energia, deu lugar à preocupação com seu uso eficiente. O mesmo afirma ainda que ser eficiente do ponto de vista energético é gastar a mesma quantidade de energia e obter maiores rendimentos e um melhor resultado final e que isso pode ser obtido com estudo e melhoria das técnicas de produção da mesma.

2.2 Cogeração

Segundo Amundsen (1990) a cogeração é “a produção em sequência de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica útil, a partir de uma mesma fonte primária”. Ele afirma que a mesma ganhou visibilidade nos Estados Unidos quando, diante uma grande dificuldade na construção de novas grandes centrais elétricas, cada empresa passou a buscar maneiras de produzir sua própria energia. Ele define este período como “Revolução da Cogeração”.

Oddone (2001) segue a mesma linha conceitual e simplifica a definição como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil. Contudo, as formas úteis mais frequentes são energia mecânica e a térmica, em que a energia mecânica pode ser utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica e a energia térmica é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor ou na produção de frio.

O objetivo da cogeração é produzir eletricidade ou energia mecânica utilizando maior parte da energia disponível no combustível, no lugar de somente uma pequena parte, portanto, este maior aproveitamento da energia térmica, torna possível um rendimento global mais alto quando comparado aos sistemas convencionais (REIS, 2006).

Os sistemas convencionais operam com rendimentos relativamente baixos, não ultrapassando valores da ordem dos 40%, portanto verifica-se que pelo menos 60% da energia disponível no combustível é desperdiçada, sob a forma de calor. (GULYURTLU *et al. apud* SANTOS, 2010). A comparação entre um sistema convencional e um sistema de cogeração é feito na Figura 4.

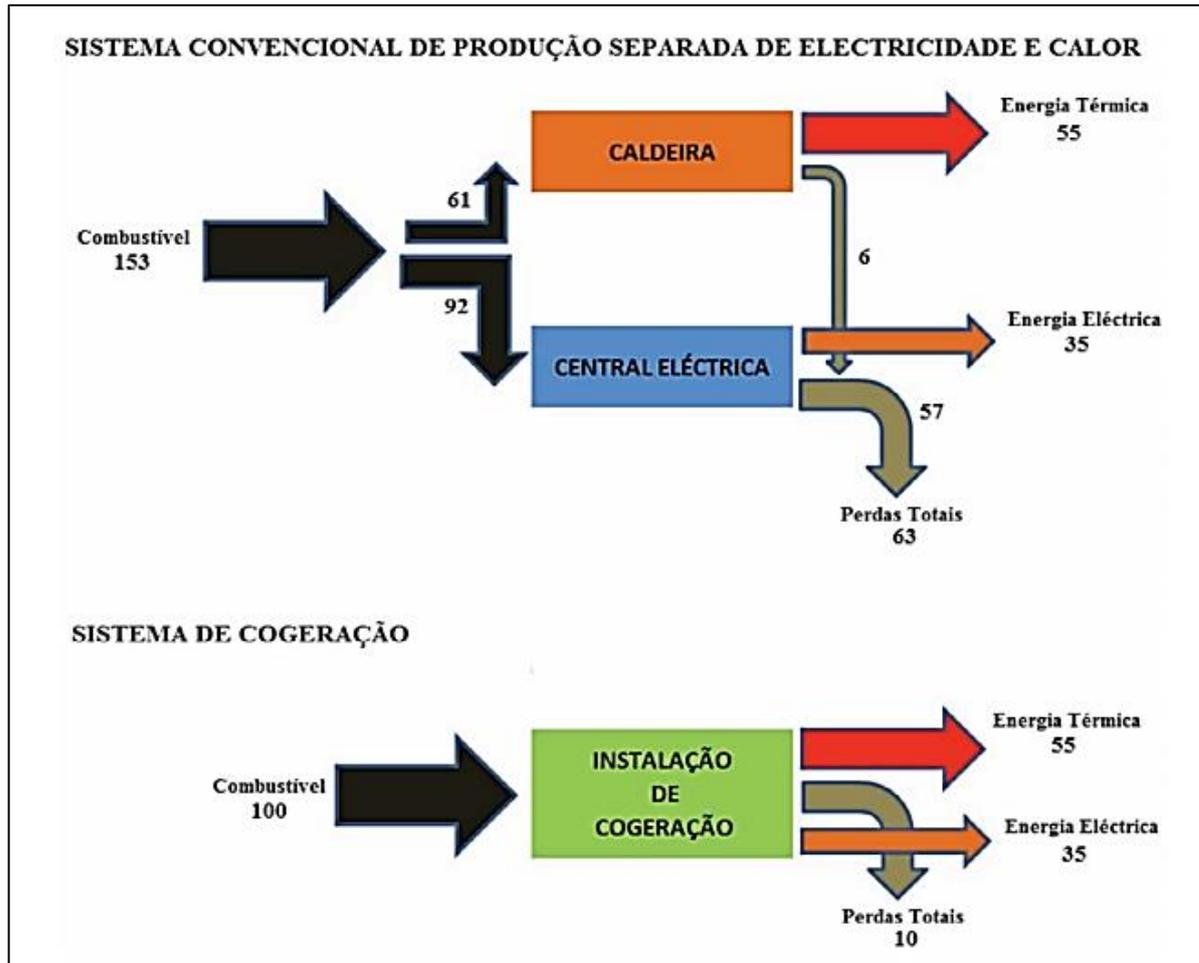


Figura 4: Balanço comparativo, em unidades de energia, entre um sistema convencional de produção de energia térmica e elétrica e um sistema de cogeração.

Fonte: Gulyurtlu *et al apud* Santos (2010)

Santos (2010) evidencia que um sistema de cogeração fornece as mesmas quantidades de energia (térmica e elétrica) que um sistema convencional, utilizando uma menor quantidade de combustível. Na Figura 4 vê-se que um sistema convencional, em que a energia elétrica é fornecida por centrais elétricas tradicionais, necessita de 153 unidades de energia do combustível para geração de 55 unidades de energia térmica e de 35 unidades de energia elétrica, já o sistema de cogeração, por sua vez, necessita de apenas 100 unidades do combustível para atingir os mesmos níveis de calor e eletricidade.

A Figura 5 demonstra como Santos e Novo (2008) comparam os sistemas de geração de energia elétrica convencionais e os que utilizam cogeração.

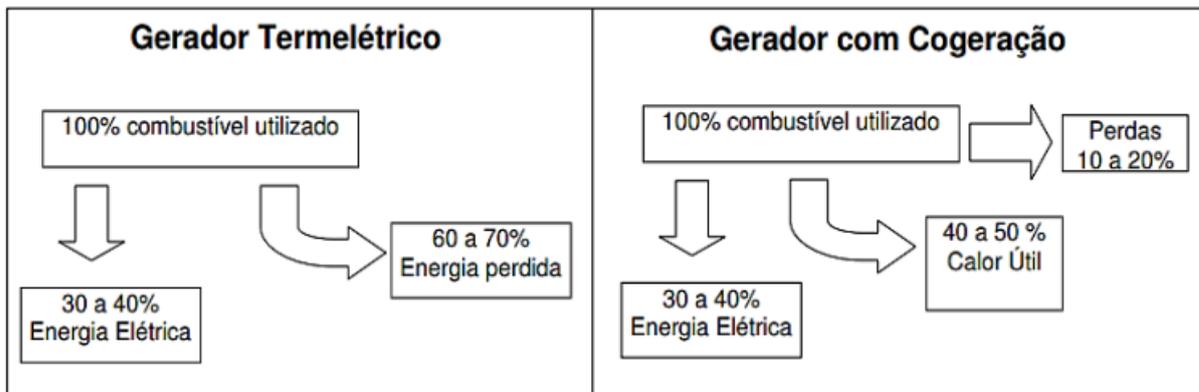


Figura 5: Geração de energia tradicional e geração de energia com cogeração.
 Fonte: Adaptado Santos e Novo (2008)

Ao observar o que foi colocado por Santos e Novo (2008) na Figura 5, constata-se que é possível produzir a mesma quantidade de energia elétrica com um gerador termelétrico e um gerador com cogeração, porém, a alta porcentagem de energia perdida no gerador termelétrico (60% a 70%) pode ser evitada quando se usa um gerador com cogeração, pois essa energia é utilizada para produção de calor útil, minimizando as perdas para a escala de 10 a 20%.

Viana Júnior (1999) destaca que, apesar de os sistemas de cogeração possuírem características particulares quanto à configuração e aplicação, pode-se enumerar os seguintes tópicos como as principais vantagens do uso da cogeração:

- Aumento na eficiência global do sistema;
- Melhora na disponibilidade e confiabilidade energética;
- Investimentos baixos quando comparados a sistemas convencionais de produção de energia;
- Emprego de combustíveis alternativos como gás natural, biomassa e combustíveis sólidos e líquidos, muitas vezes oriundos do próprio processo industrial;
- Redução dos impactos ambientais, com baixos índices de emissão de SO₂ e CO₂;
- Prazo de implantação reduzido;
- Redução nos gastos com transmissão, já que as plantas de cogeração ficam normalmente instaladas próximas ao consumidor final.

Os sistemas de cogeração são classificados a partir da ordem de produção, ou seja, se a priorização do sistema é produção de energia mecânica (potência) ou energia térmica (calor). Eles são conhecidos como regime *topping* e *bottoming*.

No regime *topping* a energia disponibilizada pelo combustível é aproveitada primeiramente para a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), e em seguida para o aproveitamento do calor útil (BARJA, 2006). De acordo com Ferreira (2008) um exemplo de aplicação deste tipo é quando o combustível é queimado em um gerador de vapor que é utilizado para gerar potência em um turbo-gerador e o calor rejeitado pela turbina é empregado no processo produtivo, como pode-se ver na Figura 6.

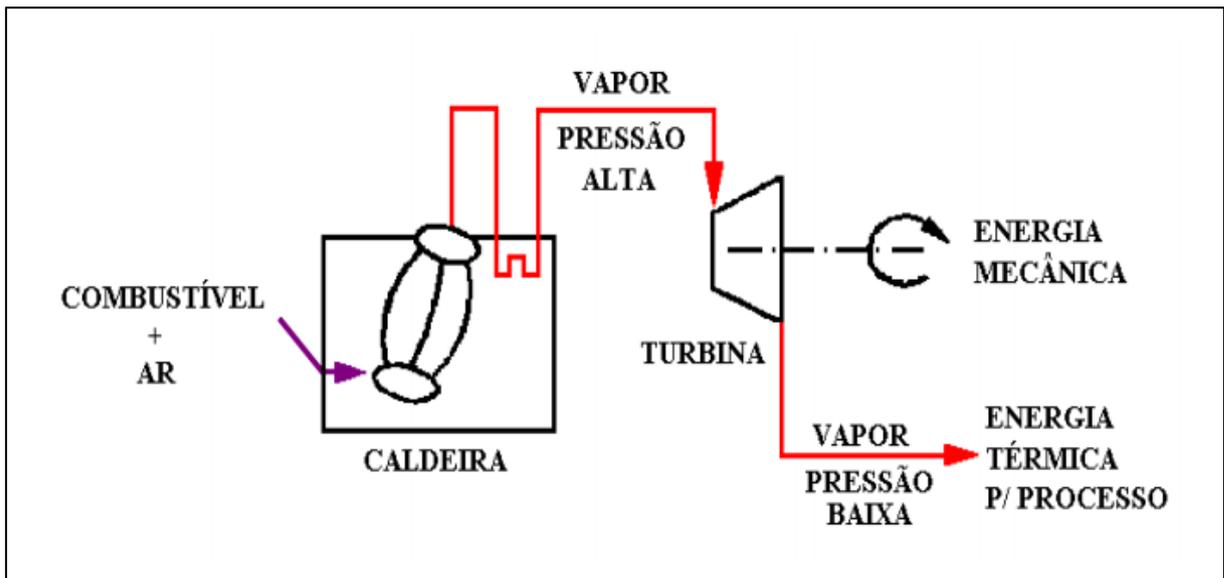


Figura 6: Exemplo de projeto de cogeração em ciclo *topping*.
Fonte: Koblitz (1998) *apud* Paula (2004)

A Figura 6 apresenta um ciclo de cogeração utilizando um sistema *topping*, onde primeiramente foi produzido energia mecânica e o calor residual da turbina foi utilizado para geração de energia térmica. Segundo Belisario (2012), este é o arranjo mais utilizado nos sistemas de cogeração por aproveitar melhor a energia dos insumos.

No regime *bottoming* a energia disponibilizada pelo combustível se dá primeiramente pelo aproveitamento de calor útil a elevadas temperaturas e em seguida para a geração de energia eletromecânica (BARJA, 2006), assim como pode-se ver na Figura 7.

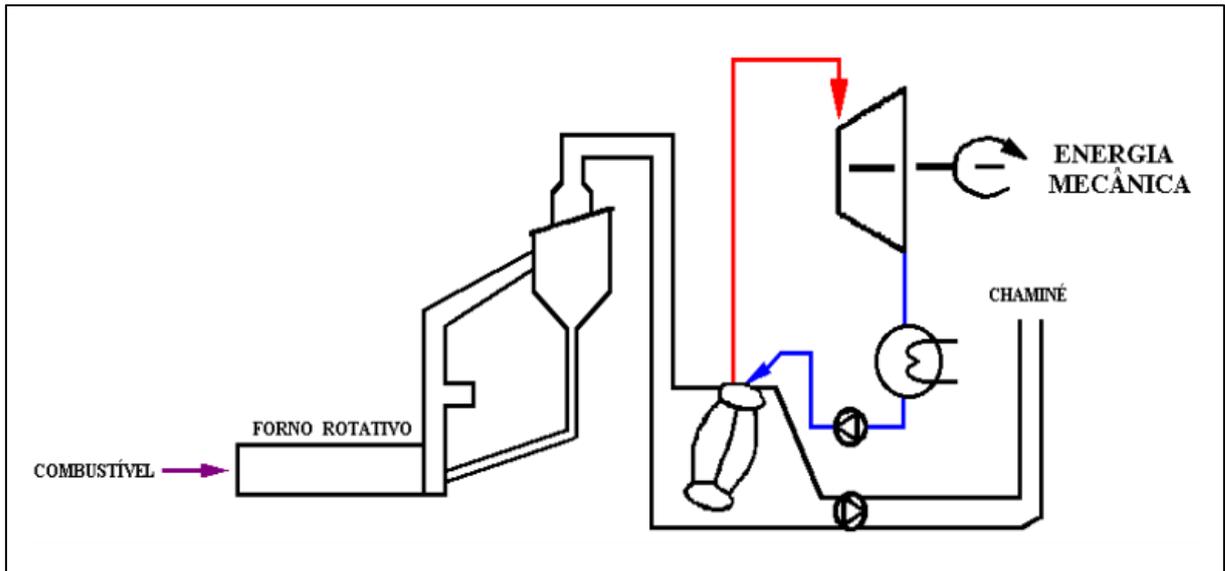


Figura 7: Exemplo de projeto de cogeração em ciclo *bottoming*.
 Fonte: Koblitz (1998) *apud* Paula (2004)

A Figura 7 apresenta o ciclo de cogeração em regime *bottoming* em que o calor é utilizado pelo processo e o calor rejeitado é aproveitado em uma caldeira recuperadora para gerar vapor que irá acionar uma turbina ou um turbo gerador. Ferreira (2008) relata que normalmente este regime é utilizado em indústria do setor químico, devido às altas temperaturas utilizadas em seus processos.

Balestieri (1994) cita que os principais ciclos utilizados para configurações de centrais de cogeração são: Ciclo Rankine, Ciclo Brayton, Ciclo Combinado e Ciclo Diesel. Ele ainda acrescenta que somente o ciclo Rankine apresenta regime *bottoming*, os demais operam somente com regime *topping* e apresenta, na Figura 8, um exemplo dos tipos de ciclos termodinâmicos citados.

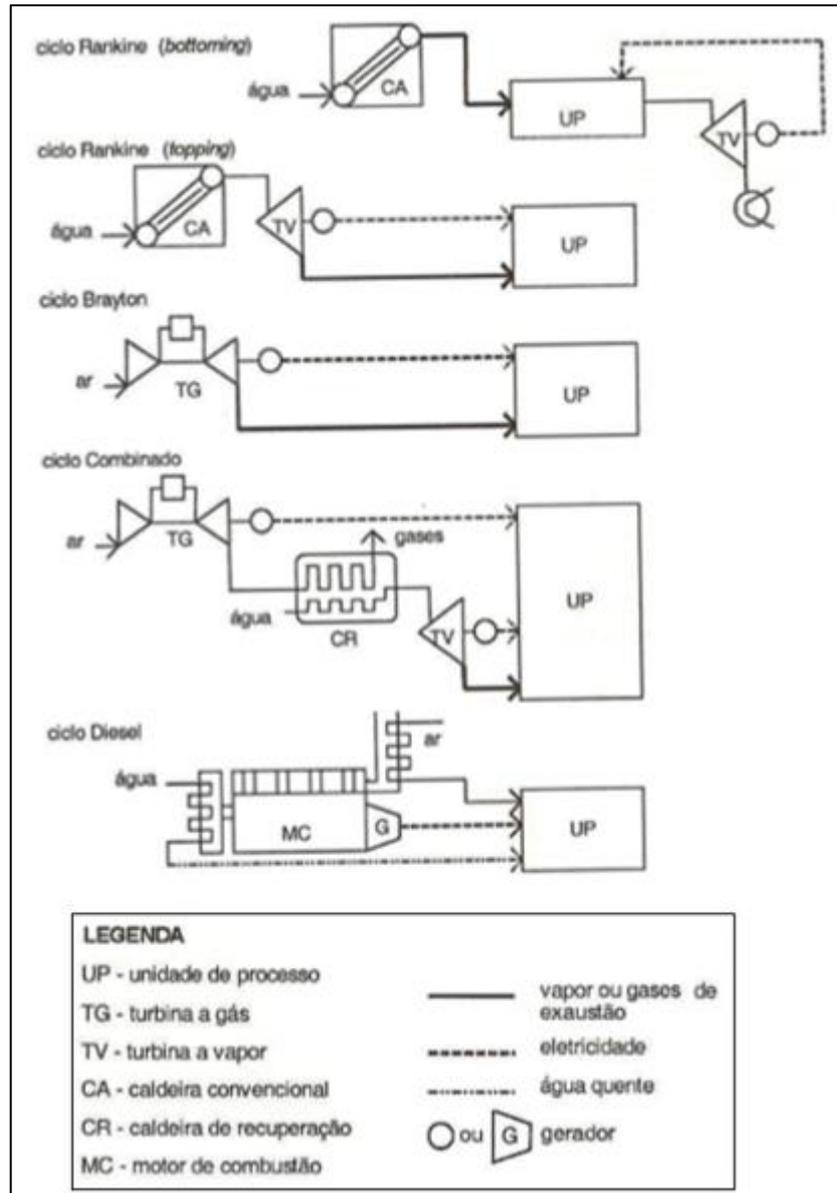


Figura 8: Ciclos térmicos de cogeração
 Fonte: Balestieri (2002)

A Figura 8 mostra as principais configurações e ciclos termodinâmicos utilizados em sistemas de cogeração, o que permite concluir quão ampla é a aplicabilidade desse sistema. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais tecnologias utilizadas nos sistemas de cogeração, bem como suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1: Resumo das características das tecnologias de cogeração.

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Turbina a Gás	<ul style="list-style-type: none"> • Alta confiabilidade; • Baixa emissão de gases poluentes; • Grande quantidade de energia térmica disponível; 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer gás a alta pressão ou compressor de gás; • Baixa eficiência com carga parcial; • Rendimento depende das condições do ambiente; • Tempo de instalação é alto;
Microturbina	<ul style="list-style-type: none"> • Menor número de partes móveis (baixo desgaste); • Pequenas dimensões e baixo peso; • Baixa emissão de gases poluentes; • Não necessita sistema de refrigeração; • Tempo de instalação é baixo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo inicial; • Relativamente baixo rendimento mecânico; • Limitada a sistemas de cogeração de baixa temperatura;
Motor a Combustão Interna (Ciclos Otto e Diesel)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiência e possibilidade de operar com carga parcial; • Partida rápida; • Relativamente baixo custo de investimento; • Pode ser usado em locais remotos; • Utiliza gás em baixa pressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de manutenção; • Limitado a sistemas de cogeração de baixa temperatura; • Alta taxa de emissão de gases poluentes (ciclo Diesel); • Requer sistemas de refrigeração; • Alto nível de ruído;
Turbinas a Vapor	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiência; • Flexibilidade de combustíveis; • Capaz de atender a grandes demandas de calor; • Vida útil longa e de alta confiabilidade; • Flexibilidade na relação potência/calor; 	<ul style="list-style-type: none"> • Partida lenta; • Operação precisa de pessoal especializado;
Células a Combustível	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa emissão de gases poluentes e baixo ruído; • Alta eficiência sobre toda faixa de potência; • Flexibilidade modular; 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo inicial; • Baixa durabilidade; • Baixa densidade de potência • Dependência de hidrogênio manufaturado

Fonte: Andreos (2013)

Ao observar as vantagens e desvantagens de cada tecnologia empregada em sistemas de cogeração descritas na Tabela 1, pode-se destacar que: sistemas que empregam turbinas a gás possuem alta confiabilidade e disponibilizam grande quantidade de energia térmica, em contrapartida, seu rendimento depende das condições do ambiente em que foi instalada. Os sistemas com microturbinas são menores e com menor número de partes móveis, o que evita o desgaste, porém possui alto investimento inicial e baixo rendimento mecânico. Os sistemas com motores de combustão interna possuem alta eficiência e baixo custo inicial, entretanto, possuem alta taxa de emissão de poluentes e um alto nível de ruído. Os sistemas com turbinas a vapor são flexíveis em relação ao combustível utilizado, possuem alta eficiência e são capazes de atender à altas demandas de calor, porém necessitam de mão de obra especializada para operação. Os sistemas com células a combustível possuem baixa emissão de poluentes e ruídos além de alta eficiência, por outro lado requerem alto investimento inicial e baixa durabilidade.

2.3 Ciclo Rankine e as turbinas a vapor

Neste sistema, a energia mecânica é obtida através da turbina por meio da expansão de vapor de alta pressão, gerado em uma caldeira convencional. Ele possui menor rendimento térmico quando comparado ao sistema de uma turbina a gás, porém sua eficiência global é mais alta (PALOMINO, 2004).

Silveira (1994) relata que a utilização de turbinas a vapor é a opção tecnológica mais difundida para as instalações industriais, pois existem várias opções disponíveis que atendem os sistemas, sendo dimensionados a partir da quantidade e qualidade demandada de vapor, e de outros fatores operacionais, no processo produtivo.

As turbinas a vapor empregadas em cogeração podem ser de extração-condensação e ou de contrapressão. As turbinas de contrapressão operam com uma pressão de saída pelo menos igual à pressão atmosférica, enviam o vapor diretamente ao processo e não necessitam de um condensador. São adequadas para locais com demanda de vapor de pressão intermediária. Já as turbinas de extração-condensação trabalham com uma pressão de saída inferior a atmosférica e possuem maior potência que as turbinas de contrapressão para as mesmas condições de entrada (ARTEAGA, 2010).

As turbinas a vapor seguem o ciclo termodinâmico de Rankine. A Figura 9 apresenta uma configuração esquemática do ciclo, bem como o seu diagrama temperatura *versus* entropia.

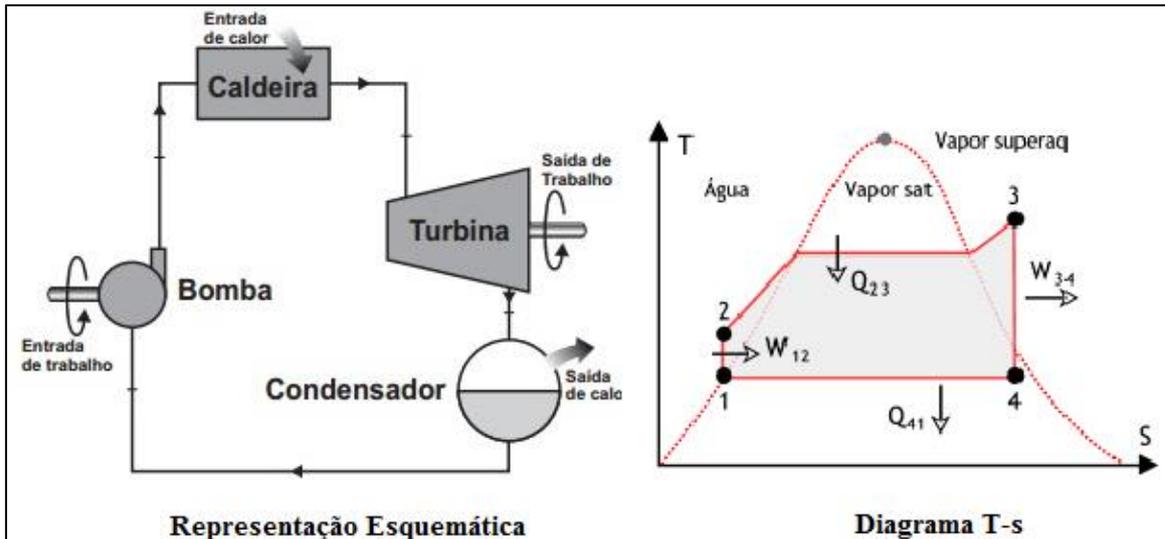


Figura 9: Ciclo Rankine ideal simples
 Fonte: Çengel e Boles, 2006

A representação esquemática da Figura 9 nos mostra que o ciclo Rankine normalmente é composto por uma bomba, uma caldeira, uma turbina e um condensador, já o diagrama T-s aponta que o ciclo é baseado em quatro processos. Çengel e Boles (2006) os define da seguinte maneira:

- 1-2: Processo de compressão adiabática reversível (isentrópica) na bomba;
- 2-3: Fornecimento de calor à pressão constante na caldeira;
- 3-4: Expansão isentrópica na turbina;
- 4-1: Rejeição de calor à pressão constante no condensador.

Detalhando os processos citados acima tem-se que, a água entra na bomba no estado 1 na fase líquida e é comprimida até o estado 2. Considerando um ciclo ideal em que o processo é reversível e adiabático, e desprezando as variações de energia cinética e potencial, tem-se aporte de energia (PANOSSO, 2003). A partir da Primeira Lei da Termodinâmica, Sonntag *et al.* (2003) conclui que o trabalho transferido ao fluido é a variação da entalpia entre os estados de alimentação (1) e descarga (2), ou seja:

$$W_b = h_2 - h_1 \quad (1)$$

A partir da Equação de Bernoulli, tem-se que:

$$h_2 - h_1 = v \times (P_2 - P_1) \quad (2)$$

Tem-se então que a potência da bomba é:

$$W_b = v \times (P_2 - P_1) \quad (3)$$

Após a saída da bomba, no estado 2, a água entra na caldeira como líquido comprimido onde é aquecida pela combustão dos gases a alta temperatura, saindo como vapor superaquecido no estado 3 (PANOSSO, 2003). Seguindo novamente a primeira lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial e considerando o trabalho nulo, obtém-se o calor gerado pela caldeira da seguinte maneira:

$$Q_H = h_3 - h_2 \quad (4)$$

O vapor superaquecido deixa a caldeira, no estado 3, e entra na turbina onde é expandido e produz trabalho através da rotação do eixo, normalmente acoplado a um gerador elétrico. Na turbina, assume-se que o processo de expansão da água é adiabático e reversível internamente (PANOSSO, 2003). Seguindo Sonntag *et al.* (2003), o trabalho desenvolvido por ela é dado por:

$$W_t = h_3 - h_4 \quad (5)$$

A água deixa a turbina, no estado 4 e entra no condensador, onde ocorre a transferência de calor para as vizinhanças. Ela normalmente se apresenta na fase de vapor mas pode ser uma mistura bifásica, próxima da linha de vapor saturado. No ciclo ideal, a pressão no condensador é tomada como constante, portanto a temperatura também é constante (PANOSSO, 2003). Aplicando a primeira lei, desprezando as variações de energia cinética e potencial e considerando o trabalho nulo. Tem-se que:

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

Por fim, o líquido deixa o condensador no estado 1 e entra novamente na bomba, reiniciando o ciclo.

Segundo Sonntag *et al.* (2003), o rendimento térmico do ciclo Rankine, que é menor que o do ciclo de Carnot, é dado pela razão entre o trabalho líquido produzido durante o ciclo e a transferência de calor fornecida à água na caldeira. Portanto, tem-se a seguinte fórmula:

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{líq}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \quad (7)$$

Sonntag *et al.* (2003) acrescenta que também pode-se escrever uma expressão para o rendimento térmico em função das propriedades de vários pontos no ciclo. Assim:

$$\eta_{Rankine} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_3 - h_2} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (8)$$

2.4 Ciclo Brayton e as turbinas a gás

As turbinas a gás têm como principal característica a produção de gases de exaustão em grandes volumes e a temperaturas elevadas, o que torna esse equipamento muito adequado a aproveitamentos energéticos complementares de interesse, melhorando-se dessa forma, o rendimento térmico do conjunto (PAULA, 2004).

O princípio de funcionamento de um conjunto a gás, consiste no ar passando pelo compressor, sofrendo aumento de pressão e escoando para a câmara de combustão, onde ocorre a queima de um combustível (óleo desmineralizado, gás natural, gases oriundos de processos de gaseificação de carvão, gaseificação de biomassa, dentre outros) de forma contínua e a pressão constante e por fim, os gases aquecidos são expandidos na turbina, que gera potência de eixo para acionamento do compressor e do gerador (REIS, 2006).

De acordo com Sonntag *et al.* (2003), o ciclo-padrão de Brayton é o ciclo ideal para as turbinas a gás. Ele se diferencia do ciclo Rankine, pois o fluido de trabalho não apresenta mudança de fase durante o ciclo (o fluido estará sempre na fase vapor) e operam em dois tipos, o ciclo aberto e o ciclo fechado, como pode-se observar na Figura 10.

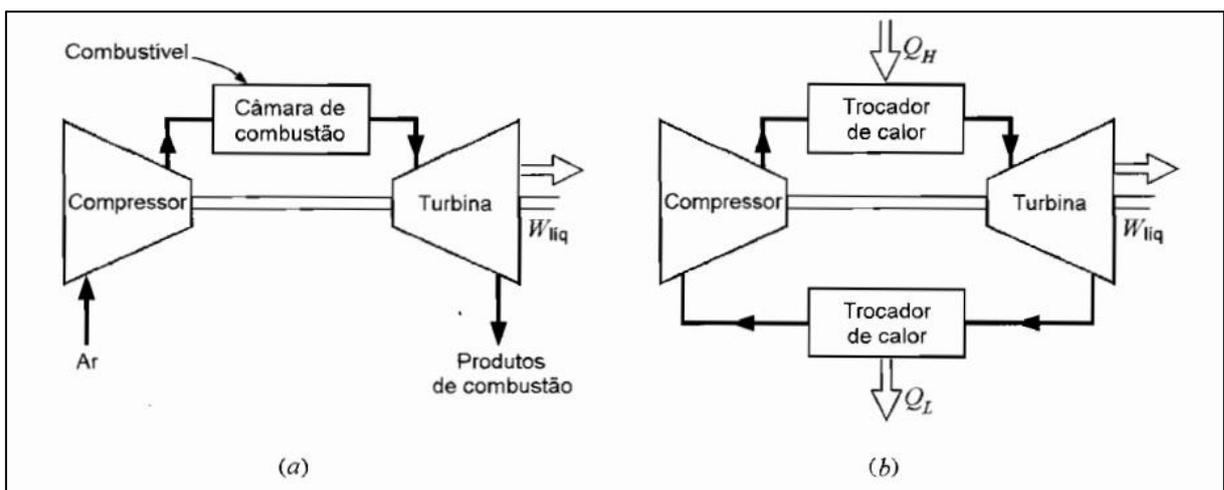


Figura 10: Turbina a gás que opera segundo o ciclo Brayton: (a) Ciclo aberto; (b) Ciclo fechado
Fonte: Sonntag *et al.* (2003)

A Figura 10 mostra os diagramas esquemáticos de turbinas a gás simples. A ciclo aberto utiliza um processo de combustão interna e a de ciclo fechado, utiliza dois processos de transferência de calor.

Castro (2009) relata que, para efeitos de análise, é mais conveniente estudar o funcionamento de uma turbina a gás de ciclo fechado, pois é onde vê-se um maior aproveitamento do potencial térmico do combustível, visto que é possível aproveitar, de forma útil, o calor associado aos gases que são rejeitados pela turbina. Na prática, os dois sistemas são utilizados. A Figura 11 apresenta os diagramas P-v e T-s para o ciclo Brayton.

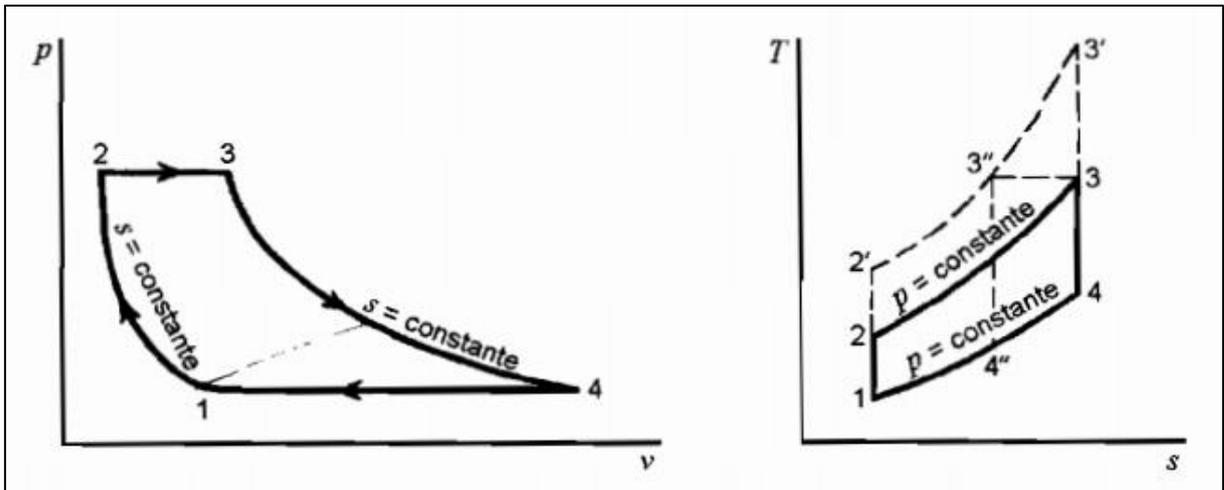


Figura 11: Ciclo padrão a ar de Brayton
Fonte: Sonntag *et al.* (2003)

Assim como pode-se ver nos diagramas apresentados na Figura 11, e segundo Çengel e Boles (2006), o ciclo possui quatro processos internamente reversíveis, são eles:

- 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.

O fornecimento de calor à pressão constante, a rejeição de calor a pressão constante e o trabalho realizado pela turbina podem ser calculados da seguinte maneira, respectivamente (SONNTAG *et al.*, 2003):

$$Q_H = h_3 - h_2 = \overline{C}_p(T_3 - T_2) \quad (9)$$

$$Q_L = h_4 - h_1 = \overline{C}_p(T_4 - T_1) \quad (10)$$

$$W_T = h_3 - h_4 = \overline{C}_p(T_3 - T_4) \quad (11)$$

Sendo $\overline{C_p}$ o calor específico médio molar à pressão contante das substâncias. e admitindo que ele varia somente com a temperatura, pode ser calculado, em kJ/kgmol K, a partir da equação (WARK, 1983):

$$\overline{C_p} = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (12)$$

Em que a, b, c e d são os coeficientes representativos de cada substância e são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Coeficientes para o cálculo do calor específico

Substância	Fórmula	a	b	c	D
Dióxido de carbono	CO ₂	22,26	0,0598	-4E-05	7,469E-09
Vapor d'água	H ₂ O	32,24	0,0019	1,1E-05	-3,595E-09
Nitrogênio	N ₂	28,9	-0,002	8,1E-06	-2,873E-09
Oxigênio	O ₂	25,48	0,0152	-7E-06	1,312E-09

Fonte: Wark (1983)

Ao considerar um processo, o calor específico molar médio pode ser definido por (WARK, 1983):

$$\overline{C_{pm}} = \frac{\int_{T_i}^{T_f} C_p dT}{T_f - T_i} \quad (13)$$

Em que T_i e T_f são as temperaturas inicial e final do processo, respectivamente.

A partir disso, o rendimento térmico do ciclo Brayton pode ser determinado da seguinte forma (SONNTAG *et al.*, 2003):

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (14)$$

Sabe-se, entretanto, que (SONNTAG *et al.*, 2003):

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (15)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \therefore \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{e} \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1 \quad (16)$$

Logo, a partir da equação (9), tem-se (ÇENGEL e BOLES, 2006):

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (17)$$

Definindo a razão de pressão como (ÇENGEL e BOLES, 2006):

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (18)$$

Então, tem-se que o rendimento térmico do ciclo Brayton também pode ser escrito como (ÇENGEL e BOLES, 2006):

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (19)$$

2.5 Ciclo Combinado

O termo ciclo combinado é usado quando há a junção de dois ciclos termodinâmicos, que operam em níveis diferentes de temperatura. O mais conhecido deles é o que usa turbina a gás e turbina a vapor. Neste sistema, o gás produzido na combustão da turbina a gás é usado para produzir vapor a alta pressão, através de uma caldeira de recuperação, para depois alimentar a turbina a vapor e produzir energia pela segunda vez. O ciclo combinado é aplicado em processos na qual a razão entre potência e calor é alta (PALOMINO, 2004).

Como pode-se perceber no conceito descrito acima, o princípio da utilização do ciclo combinado coincide com o da cogeração, ou seja, aproveitamento da rejeição térmica de um ciclo primário de geração eletromecânica numa segunda máquina térmica. Na Figura 12, tem-se a representação de uma planta de cogeração de energia que utiliza ciclo combinado.

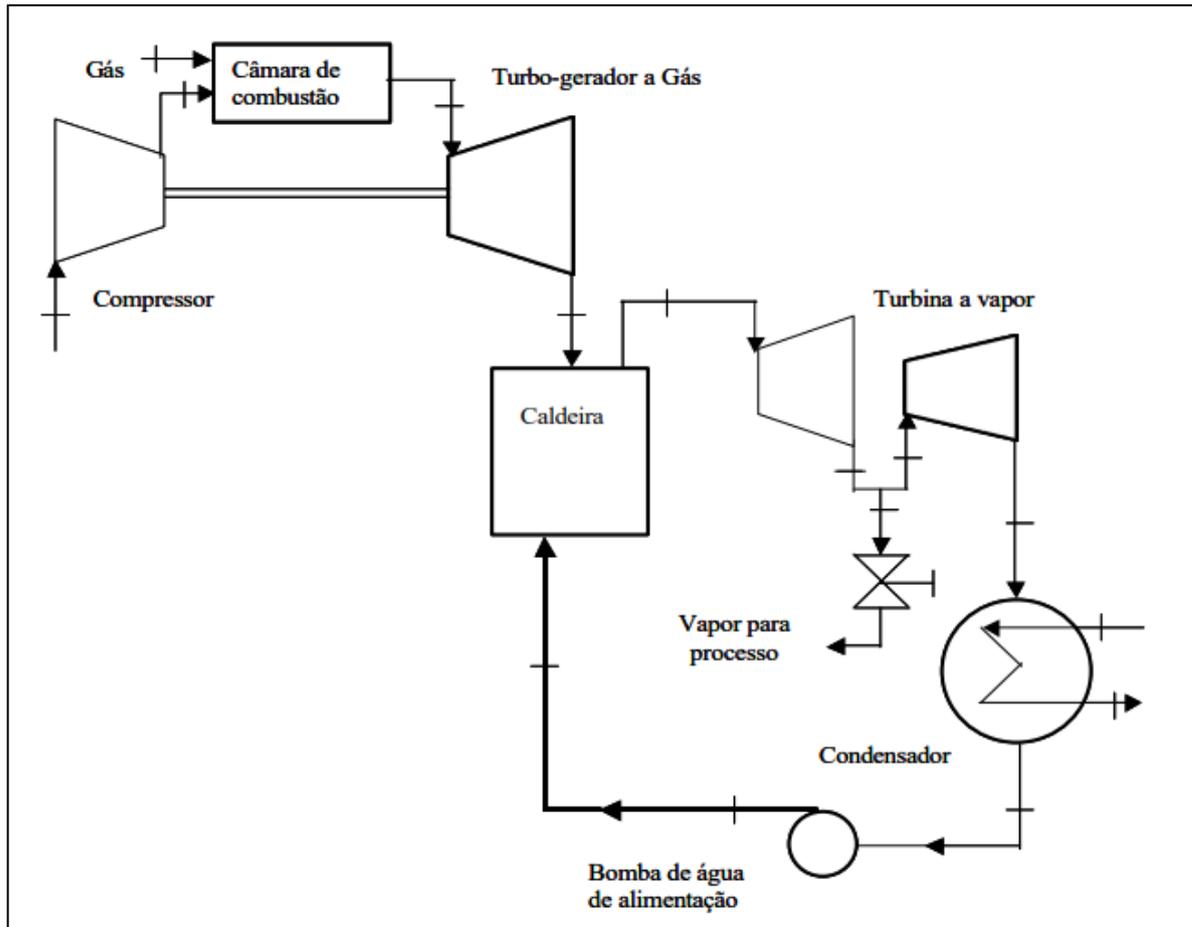


Figura 12: Diagrama de uma planta de cogeração de energia com ciclo combinado
Fonte: Sanchez (2003)

A partir da Figura 12, observa-se que a combinação de ambos os ciclos se dá devido à caldeira de recuperação, encarregada da geração de vapor, através da transferência da energia térmica dos gases para a água.

2.6 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor

De acordo com Gosney (1982) *apud* Schreiner (2008), “a refrigeração é a arte ou ciência relacionada ao resfriamento de corpos ou fluidos a níveis de temperatura mais baixos do que sua vizinhança em um determinado tempo e espaço”.

Gallego (1998) descreve que, em teoria, qualquer fenômeno físico ou químico de natureza endotérmica, pode ser usado para produção de frio. Entretanto, destaca-se três processos por apresentarem possibilidade de aplicação em cogeração, são eles: refrigeração por compressão mecânica de vapor; refrigeração por meio de vapor d’água; e refrigeração por absorção. Esse mesmo autor acrescenta que o sistema de compressão mecânica de vapor é o mais adotado atualmente, tanto na refrigeração industrial como no conforto térmico, isto se dá

devido à sua facilidade de instalação, sua compacidade e seu elevado coeficiente de desempenho (COP), isto é, baixo consumo específico de energia. Sabendo disso, as especificidades desse sistema serão enfatizadas no presente trabalho (GALLEGO, 1998).

A Figura 13 apresenta um esquema do ciclo padrão de compressão de vapor.

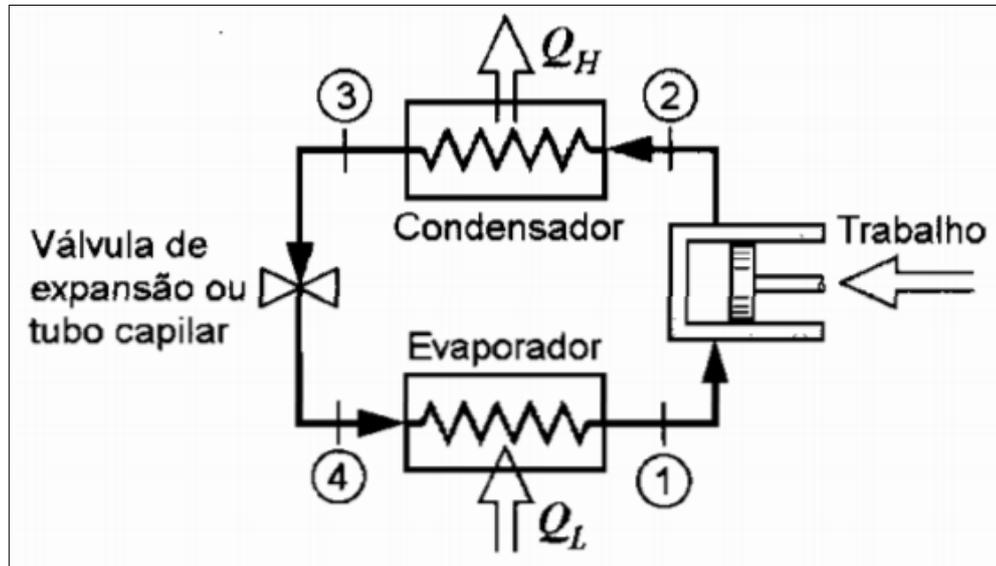


Figura 13: Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor

Fonte: Sonntag *et al.* (2003)

Assim como foi apresentado na Figura 13, o ciclo padrão de compressão de vapor é composto por um compressor (realizando trabalho), um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador. Na Figura 14 são apresentados os diagramas pressão *versus* entalpia e temperatura *versus* entropia associados a este ciclo.

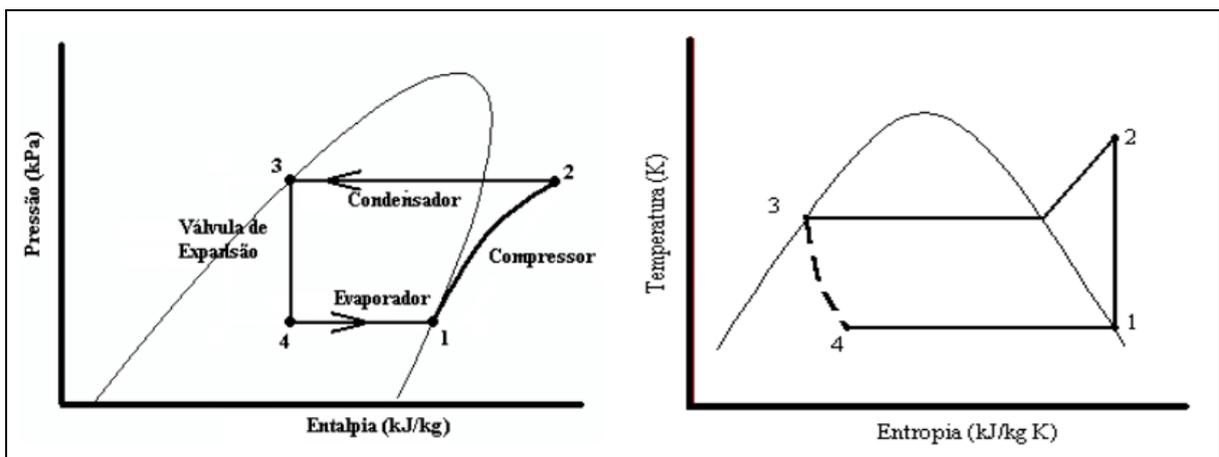


Figura 14: Diagramas P-h e T-s do ciclo de compressão de vapor

Fonte: Adaptado de Gallego (1998)

Os diagramas apresentados na Figura 14 explicitam os quatro processos do ciclo de compressão de vapor. Stoecker e Jabardo (2002) os descreve da seguinte forma:

- 1-2: Compressão isentrópica até a pressão de condensação;
- 2-3: Redução da temperatura do vapor seguida de condensação até líquido saturado a pressão constante;
- 3-4: Expansão isentalpica até a pressão de evaporação no dispositivo de expansão;
- 4-1: Evaporação até o estado de vapor saturado a pressão constante.

A partir das etapas descritas acima e através da aplicação da termodinâmica, pode-se quantificar a taxa com que calor é removido do ambiente, denominada capacidade de refrigeração \dot{Q}_L e a taxa com que a potência \dot{W}_s é consumida pelo compressor ao longo do processo, definidos pelas equações 20 e 21 (SCHREINER, 2008).

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (20)$$

$$\dot{W}_s = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (21)$$

Assim, após definir os valores de capacidade e potência consumida, pode-se estabelecer a relação conhecida como coeficiente de desempenho (COP) do sistema (SCHREINER, 2008):

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_s} \quad (22)$$

2.7 Seleção e configuração da central de cogeração

Silveira (1994) acredita que o ponto crucial para escolher a tecnologia de cogeração adequada para um determinado segmento é relacionar as características de consumo de energia do segmento com as características de produção de energia do cogrador. A partir disso, deve-se analisar dois parâmetros adimensionais: um caracterizando o segmento onde se deseja empregar a cogeração (ALFA) e outro para caracterizar o sistema escolhido (BETA). A partir disso, tem-se:

$$ALFA = \frac{E}{S} \quad (23)$$

$$BETA = \frac{E'}{S'} \quad (24)$$

Sendo: E a energia elétrica e/ou mecânica consumida no segmento e S a energia térmica consumida no segmento. E' e S' as energia elétrica e/ou mecânica e energia térmica produzidas pelo sistema de cogeração.

Gurney *et al.* (1988) e Gorges (1982) *apud* Balestieri (1994) também destacam alguns parâmetros a serem analisados para o planejamento de uma central de cogeração. São eles:

- Razão (potência/calor) gerado pelo equipamento (ALFA);
- 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.

A Tabela 3 apresenta a faixa do valor da razão calor/potência (1/ALFA) para cada tecnologia de cogeração, bem como uma faixa de eficiência dos sistemas:

Tabela 3: Faixa de valores de 1/ALFA e eficiência global para os ciclos de cogeração

Sistema de cogeração		1/ALFA	Eficiência global (%)
Turbina a vapor (Ciclo Rankine)	Contrapressão	4,0 – 14,3	84 – 92
	Extração-condensação	2,0 – 10	60 – 80
Turbina a gás (Ciclo Brayton)		1,3 – 2,0	70 – 85
Ciclo combinado		1,0 – 1,7	69 – 83
Motor de combustão interna (Ciclo Diesel)		1,1 – 2,5	75 – 85

Fonte: Adaptado de Devki Energy Consultancy (2006).

Para determinar a eficiência global do sistema de cogeração basta fazer a razão entre a soma de toda energia aproveitada no ciclo (térmica ou elétrica) e o calor produzido pela queima do combustível, ou seja, através da seguinte equação (BALESTIERI, 2002):

$$\eta_{\text{cogeração}} = \frac{E' + S'}{\sum \dot{m} PCI} \quad (25)$$

De acordo com Balestieri (1994), além dos parâmetros citados acima, a seleção de uma central de cogeração também possui uma estratégia de operação que, de modo geral, se resumem a atendimento da demanda térmica (paridade térmica); atendimento da demanda eletromecânica (paridade elétrica); e despacho econômico.

Em paridade térmica, a central opera de acordo com a curva da demanda térmica da planta de processo, podendo haver importação ou exportação de eletricidade. Já em paridade elétrica, a central atende à curva de demanda eletromecânica, o calor liberado é usado para atender a demanda térmica ou pode ser eliminado, caso esteja em excesso. E o despacho econômico corresponde à colocação da central de cogeração em funcionamento apenas nos períodos de interesse do investidor (BALESTIERI, 1994).

2.8 A indústria de laticínios

O leite é um dos produtos mais versáteis da agroindústria de alimentos. Além de ser consumido em sua forma original, também pode ser transformado em diversos derivados, seja em opções salgadas como queijos e manteiga, ou em opções doces como iogurte, leite condensado, leite fermentado e doce de leite.

De acordo com o Anuário Leite (2018) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMPRAPA, o Brasil é o quinto maior produtor de leite do mundo, totalizando 35,1 bilhões de litros produzidos em 2017. Estima-se que o consumo aparente per capita de produtos lácteos no Brasil foi de 173 litros por habitante, totalizando 25,19 bilhões de litros consumidos no ano e gerando um faturamento de R\$ 70,2 bilhões de reais para a indústria de laticínios do país,

A Tabela 4 apresenta a evolução de consumo de produtos lácteos no Brasil em bilhões de litros.

Tabela 4: Evolução do Consumo de Leite e Derivados Lácteos no Brasil

Descrição	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Leite Pasteurizado	1,8	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1
Leite UHT	5,3	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,6	6,7	6,8	7,0
Leite em pó	4,6	5,4	5,6	6,1	6,3	6,4	6,3	6,3	6,6	6,6
Queijos	5,4	5,8	6,6	7,1	7,3	7,8	8,2	8,2	8,2	8,4
Demais produtos	1,9	2,0	2,5	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	2,0	2,0
Total	18,95	20,29	21,85	22,89	23,43	24,43	24,98	24,65	24,74	25,19

Fonte: Adaptado de EMPRAPA (2018)

Na Tabela 4 pode-se perceber que o aumento de consumo de produtos lácteos no Brasil foi 33% em relação ao ano de 2008 e que os percentuais mais significativos foram queijos (56%), leite em pó (45%) e leite UHT (32%).

Ao descrever-se o cenário brasileiro das indústrias de laticínios, é necessário aprofundar-se um pouco mais sobre os processos produtivos. A Figura 15 apresenta as etapas genéricas de produção dos derivados lácteos.

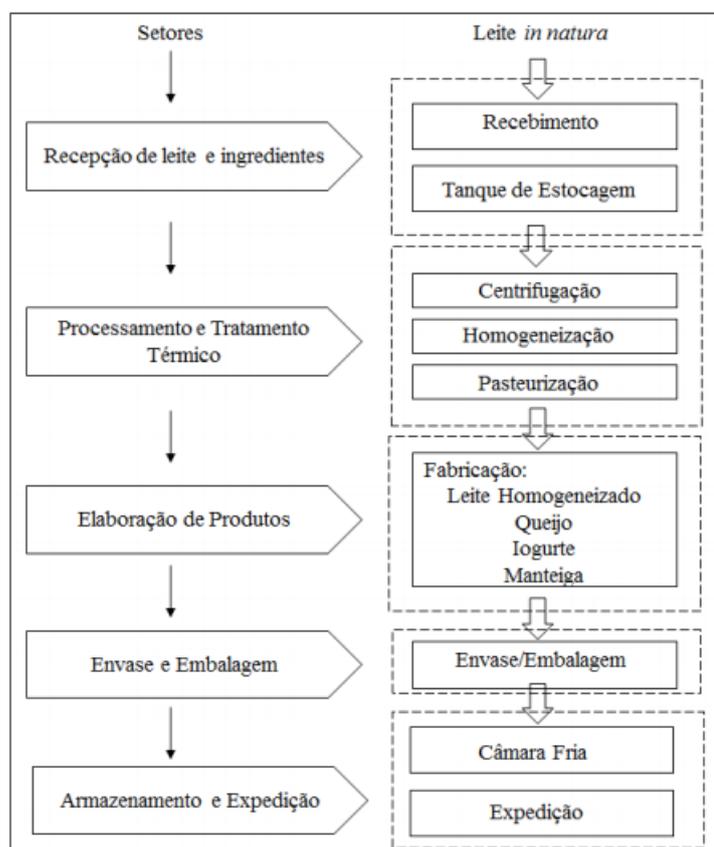


Figura 15: Etapas genéricas da indústria de derivados lácteos
Fonte: Silva (2016)

Ao lado esquerdo da Figura 15, pode-se observar todas as etapas do processo fabril que o leite é submetido e do lado direito a especificação de cada operação realizada nessas etapas. Para auxiliar em uma melhor compreensão delas, Maganha (2006) as descreve da seguinte maneira:

- **Recepção do leite e ingredientes:** Após ser transportado por caminhões isotérmicos, o leite é pesado e filtrado, em seguida é encaminhado para tanques refrigerados para manutenção das suas características e qualidade até a sua utilização;
- **Processamento:** O leite é novamente filtrado e submetido a operações de clarificação, padronização e pasteurização/esterilização. A clarificação consiste na centrifugação para remoção de impurezas e a padronização para ajustar o teor de gordura do leite;
- **Tratamento térmico:** O leite é aquecido até uma determinada temperatura, mantido nela durante um tempo e resfriado em seguida. Isso é feito para assegurar a destruição dos microrganismos patogênicos;
- **Elaboração de produtos:** O leite é encaminhado para o processo produtivo final que varia de acordo com os produtos a serem obtidos;
- **Envase e embalagem:** Os produtos prontos passam para a fase de acondicionamento em recipientes apropriados;
- **Armazenamento e expedição:** Os produtos são armazenados e expedidos para o consumidor final. Em ambos, eles continuam sob refrigeração e em condições que impedem a contaminação e desenvolvimento de microrganismos.

Com o detalhamento do processo produtivo dos laticínios descrito acima, é possível perceber que em todas as etapas há uma demanda muito grande de energia, seja ela térmica ou elétrica, tornando o estabelecimento muito propício ao emprego da cogeração.

Maganha (2006) resume o uso da energia térmica para geração de vapor, água quente e limpezas em geral e o uso da energia elétrica, para refrigeração, iluminação, ventilação e operação de equipamentos. A demanda de energia elétrica normalmente é suprida por concessionárias locais e a demanda térmica através de caldeiras.

3. METODOLOGIA

O presente capítulo visa descrever as características do desenvolvimento da pesquisa para implementação de um sistema de cogeração para atender a demanda de utilidades de uma indústria de laticínios. Tem como objetivo determinar a natureza da pesquisa, a classificação, área, método e instrumento de coleta de dados, assim como as variáveis e indicadores adotados para os cálculos e análises.

3.1 Tipos de pesquisa

De acordo com Gil (2008), pode-se definir pesquisa como o processo formal e sistemático de desenvolvimento de um método científico. Tem como objetivo fundamental descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos. Devido a essa conceituação tão ampla, estratifica-se sua natureza em pesquisa pura e aplicada, a pesquisa pura busca desenvolver os conhecimentos científicos sem a preocupação direta com suas aplicações e consequências práticas. Já a pesquisa aplicada, tem como característica fundamental o interesse na aplicação, utilização e consequências práticas dos conhecimentos, ou seja, é uma pesquisa menos focada no desenvolvimento de teorias de valor universal e mais direcionada à realidade circunstancial.

Minayo (2002) tem a mesma ideia de conceituação e acrescenta que é a pesquisa quem alimenta a atividade de ensino e a atualiza frente a realidade do mundo. Defende que, embora seja uma prática teórica, a pesquisa vincula pensamento e ação, ou seja, “nada pode ser intelectualmente um problema, se não tiver sido, em primeiro lugar, um problema da vida prática”.

Há várias maneiras de classificar as pesquisas, dentre as mais usuais, tem-se: a partir da sua natureza, como foi descrito acima; a partir dos seus objetivos específicos; a partir dos seus procedimentos técnicos; e também a partir da forma de abordagem do problema. Do ponto de vista dos seus objetivos específicos, Gil (2008) as classifica da seguinte maneira:

- Pesquisas exploratórias: busca proporcionar uma visão geral, de tipo aproximativo, acerca de determinado fato. Tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo problemas mais precisos e hipóteses indagadoras;

- Pesquisas descritivas: tem como objetivo principal descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Sua característica mais significativa está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados;
- Pesquisas explicativas: são aquelas que buscam identificar fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência de algum fenômeno ou fato. Tem como objetivo principal aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, as pesquisas precisam ser delineadas, ou seja, deve-se traçar um modelo conceitual e operativo delas. Isso significa realizar o planejamento da pesquisa, em sua forma mais ampla, envolvendo previsão de análise e interpretação de coleta de dados considerando as variáveis envolvidas. Para este delineamento, são definidos dois grandes grupos: aqueles que estão em fonte de papel (pesquisa bibliográfica e pesquisa documental) e aquele cujo os dados são fornecidos por pessoas (pesquisa experimental, pesquisa *ex-post-facto*, o levantamento, o estudo de caso, a pesquisa-ação e a pesquisa participante) (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Dentre os métodos citados acima, Gil (2008) explica o significado, acerca da classificação de pesquisa do ponto de vista dos procedimentos técnicos, daqueles que considera mais importante:

- Pesquisa bibliográfica: é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos;
- Pesquisa documental: se diferencia da bibliográfica somente pela natureza das fontes. Enquanto a bibliográfica busca contribuições de diversos autores, na documental usa-se materiais que não possuem nenhum tratamento analítico;
- Pesquisa experimental: consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo, definir formas de controle e observar como elas se comportam;
- Pesquisa *ex-post-facto*: assemelha-se à experimental, porém é impossível manter o pleno controle dos experimentos, logo, é uma investigação sistemática e empírica na qual o pesquisador não tem controle das variáveis independentes;
- Levantamento: é simplesmente caracterizado pela interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer;

- Estudo de caso: estudo empírico que investiga um fenômeno atual dentro do seu contexto de realidade;

Por fim, a classificação de pesquisa mais difundida é a que se usa a forma de abordagem do problema, e ela é dividida entre quantitativa e qualitativa. Prodanov e Freitas (2013) as descrevem da seguinte forma:

- Pesquisa quantitativa: traduz em números as opiniões e informações com intuito de classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e técnicas estatísticas. Deve-se formular hipóteses e classificar a relação entre as variáveis para garantir a precisão dos resultados, evitando contradições;
- Pesquisa qualitativa: é uma pesquisa descritiva, em que se tende a analisar os dados intuitivamente, em que o processo e seu significado são os principais focos da abordagem. Considera-se que há um vínculo entre o objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser mensurado.

A Tabela 5 resume algumas características citadas acima e aborda alguns pontos de comparação entre os métodos de pesquisa quantitativo e qualitativo.

Tabela 5: Comparação entre pesquisa qualitativa x quantitativa

Ponto de Comparação	Pesquisa Qualitativa	Pesquisa Quantitativa
Foco da pesquisa	Qualidade (natureza e essência)	Quantidade (quantos, quanto)
Raízes filosóficas	Fenomenologia, interação simbólica	Positivismos, empiricismo, lógico
Frases associadas	Trabalho de campo, etnografia, naturalismo, subjetivismo	Experimental, empírico, estatístico
Metas de investigação	Entendimento, descrição, descoberta, generalização, hipótese	Predição, controle, descrição, confirmação, teste de hipótese
Ambiente	Natural, familiar	Artificial, não natural
Amostra	Pequena, não-representativa	Grande, ampla
Coleta de dados	Pesquisador como principal instrumento (entrevista, observação)	Instrumentos manipulados (escala, teste, questionário e etc)
Modo de análise	Indutivo (pelo pesquisador)	Dedutivo (pelo método estatístico)

Fonte: Adaptado de Prodanov e Freitas (2013)

Diante todas as classificações apresentadas, é possível categorizar o presente trabalho como: uma pesquisa de caráter bibliográfico, visto que é baseada em livros, teses, dissertações e artigos para construir um embasamento teórico acerca de energia, cogeração, máquinas térmicas e indústrias de laticínios; um estudo de caso, pois haverá análise e compressão de alguns parâmetros da indústria relacionados à bibliografia; quantitativa, visto que é uma pesquisa em ambiente artificial com coleta de dados por instrumentos manipulados; e exploratória, já que tem a finalidade de desenvolver e propor um sistema de cogeração de energia para a empresa.

3.2 Materiais e métodos

A Figura 16 apresenta um fluxograma que contém um resumo das etapas realizadas no presente trabalho.

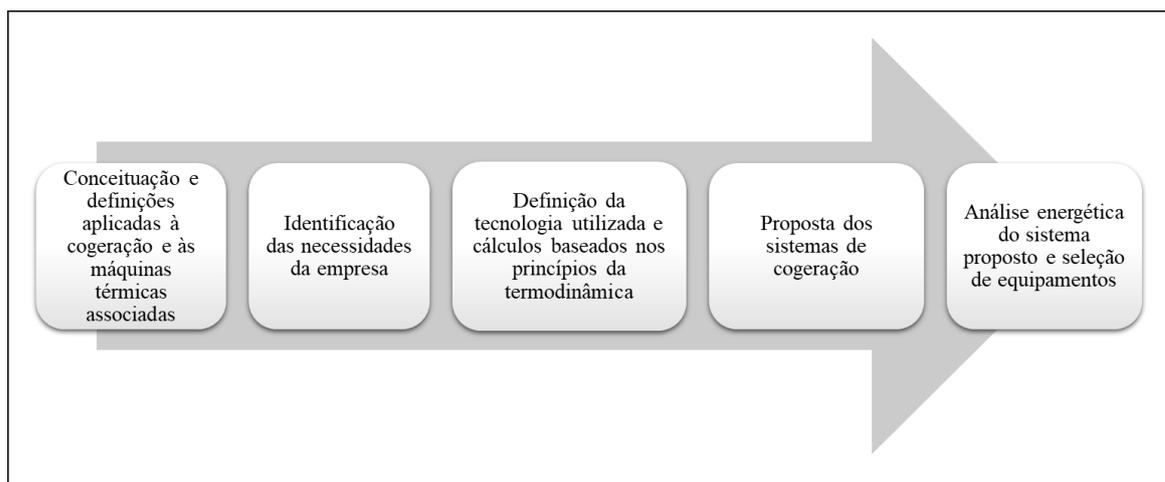


Figura 16: Fluxograma das etapas da monografia.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Como explicitado na Figura 16, para realização do presente trabalho foi necessário um embasamento teórico feito a partir de uma revisão bibliográfica a fim de tomar conhecimento do cenário energético atual, dos conceitos e as aplicações da cogeração de energia, bem como conhecer as máquinas térmicas associadas à essa tecnologia, entender suas condições de trabalho e como dimensioná-las e por fim conhecer os parâmetros necessários para a seleção e configuração da central.

O foco da pesquisa é uma empresa de laticínios, na qual foi realizada uma análise das etapas do processo produtivo afim de identificar suas necessidades específicas, como a demanda de energia térmica, de energia eletromecânica, o consumo de vapor e água gelada, além de conhecer os métodos atuais de produção destes insumos.

Após levantar todas as demandas da empresa em estudo, foi calculado o parâmetro utilizado para definir a tecnologia de cogeração que melhor se adequa ao segmento. A partir disso, utilizou-se os princípios da termodinâmica e as equações descritas no presente trabalho para concluir um dimensionamento de cada máquina do sistema, levantando dados de potência elétrica, potência térmica, vazão de combustível e demais dados associados ao sistema de cogeração proposto, tornando possível selecionar equipamentos disponíveis no mercado, condizentes com o cenário da empresa e que atenda suas necessidades reais.

3.3 Variáveis e indicadores

Gil (2008) define variável como sendo “qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias” e define indicadores como dimensões relevantes para conduzir ao estabelecimento do valor da variável. Logo, para realização de uma pesquisa, é necessário listar as variáveis e indicadores do seu objeto de estudo. A Tabela 6 exibe as variáveis e indicadores relevantes para a realização do presente trabalho.

Tabela 6: Variáveis e indicadores da pesquisa

Variáveis	Indicadores
Demanda energética	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de vapor no processo; • Consumo de combustível no processo; • Consumo de água gelada; • Consumo de eletricidade;
ALFA	<ul style="list-style-type: none"> • Potência eletromecânica consumida no segmento; • Potência térmica consumida no segmento,
Modo de operação do sistema de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • Paridade térmica; • Paridade elétrica; • Despacho Econômico,
Seleção dos ciclos de cogeração	<ul style="list-style-type: none"> • $1/ALFA$; • Demandas energéticas da empresa; • Processo Produtivo; • Temperatura desejada no processo produtivo; • Vazão de vapor e água gelada desejados; • 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 (2019)

3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados sobre os temas do presente trabalho se dá por meio de revisões bibliográficas, observações e cálculos, de forma a obter o embasamento necessário para a realização da pesquisa. Logo, foi necessária uma observação direta da empresa em estudo e a partir disso, os dados foram coletados através de tabelas, equações, manuais e catálogos que permitiram a realização do dimensionamento das máquinas utilizadas no sistema de cogeração proposto.

3.5 Tabulação dos dados

A partir dos dados termodinâmicos obtidos pela teoria, foram realizados cálculos no *software* Excel que permite maior facilidade para determinar resultados a partir de diferentes valores de variáveis, o que torna simples a disposição de uma tabela a fim de comparar estes resultados e melhorar a análise dos ciclos das máquinas térmicas estudados neste trabalho, auxiliando para um dimensionamento mais eficaz do sistema.

Após os cálculos feitos no *software* Excel, foi utilizado o *software* Power Point para criar a representação esquemática do diagrama de cogeração proposto, facilitando sua compreensão. Além da utilização do *software* Power BI para confecção dos gráficos comparativos de resultados. Por fim, é utilizado o *software* Word para apresentar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações finais

No presente capítulo foram apresentadas as variadas classificações sobre os tipos de pesquisa e então definidas quais classificações se aplicam a este trabalho. Foram apresentados os materiais e os métodos utilizados para realização da pesquisa, além de definidas as variáveis e os indicadores que são considerados para a realização dos cálculos do capítulo seguinte e por fim, foi explicitado o instrumento de coleta de dados e como foi realizada a tabulação dos mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os sistemas de cogeração propostos para um laticínio de médio porte em estudo. São apresentadas análises energéticas realizadas e discutidos eficiência de cogeração, demanda elétrica, demanda térmica e demanda de frio, com a finalidade de analisar qual cenário mais se enquadra com os padrões da empresa em estudo.

4.1 Necessidades energéticas da empresa

A empresa de laticínios em estudo apresenta demanda de energia para produção de frio, energia elétrica e energia térmica para produção de vapor de processo. As Figuras 17 e 18 apresentam o consumo de frio, a demanda de eletricidade e o consumo de vapor de processo por hora na empresa.

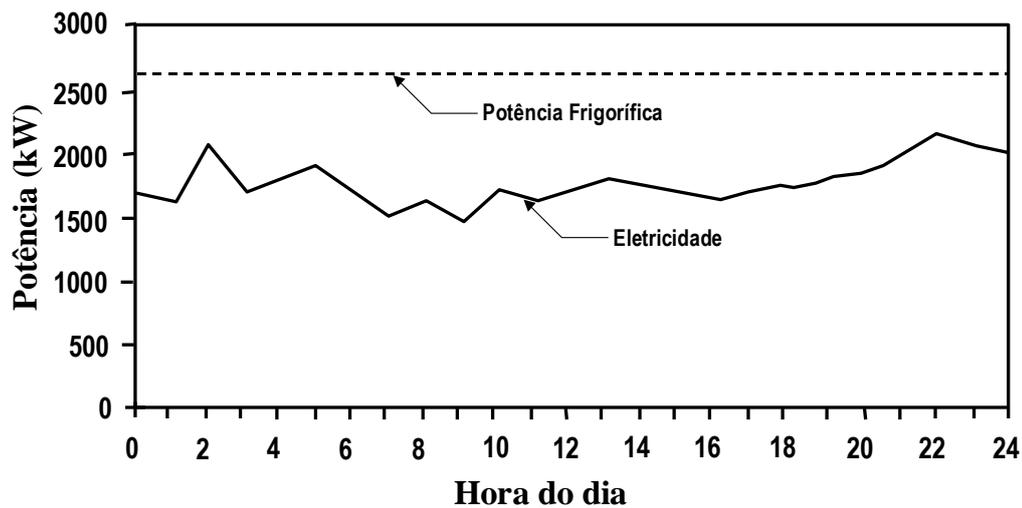


Figura 17: Potência requerida de frio e eletricidade da empresa em estudo
Fonte: Leal (2000)

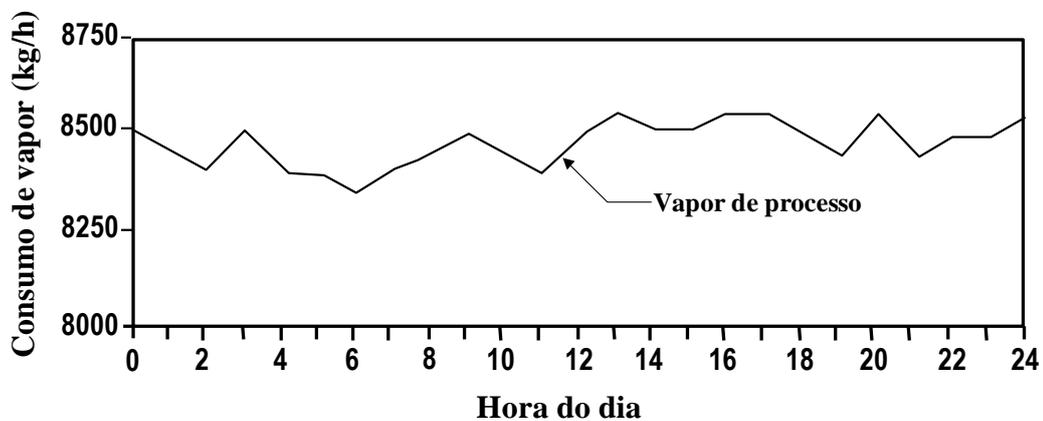


Figura 18: Consumo de vapor por hora na empresa em estudo
Fonte: Leal (2000)

A partir da Figura 17, nota-se que a necessidade máxima de eletricidade na empresa ocorre por volta das 22h e corresponde a 2100 kW. A demanda de frio é referente à produção de água gelada a 1°C, que é utilizada para o funcionamento da câmara fria e necessita de 2725 kW de potência. Já na Figura 18 observa-se que há uma variação do consumo de vapor durante o dia, entretanto, estima-se que o consumo médio seja de 8500 kg/h (2,361 kg/s), o qual também é a capacidade de produção da caldeira do estabelecimento, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Dados das caldeiras do estabelecimento

Equipamento	Dados
Caldeira 1	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ATA - MP - 812</u> • Pressão de vapor: 1,08 MPa • 2,361 kg/s de produção de vapor • 0,182 kg/s de consumo de combustível (óleo combustível 1A)
Caldeira 2	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ATA - MP - 813</u> • Pressão de vapor: 1,08 MPa • 2,917 kg/s de produção de vapor • 0,2136 kg/s de consumo de combustível (óleo combustível 1A)

Fonte: Adaptado de Leal (2000)

Além das informações dos equipamentos descritos na tabela acima, vale ressaltar que a empresa funciona 24h por dia e que o uso das caldeiras é alternado, ou seja, uma delas sempre está em *standby* (LEAL, 2000). A Figura 19 apresenta uma imagem ilustrativa da caldeira presente no estabelecimento.



Figura 19: Imagem ilustrativa da caldeira presente no estabelecimento
Fonte: Central das caldeiras (2019)

Para atender a demanda de frio, utilizou-se o sistema de refrigeração por compressão de vapor e foi adotado o coeficiente de desempenho (COP) de 3,5. A partir disso, e da necessidade de refrigeração de 2725 kW, foi possível determinar a potência necessária para o acionamento do compressor que é igual a 778,57 kW.

Conforme apresentado na Tabela 7, a pressão do vapor no processo é de 1,08 MPa e considerando suas respectivas entalpias de saturação ($h_l = 777,614$ kJ/kg e $h_v = 2780,96$ kJ/kg) como as entalpias inicial e final do processo, além da vazão mássica de 2,36 kg/s, calculou-se a potência necessária de vapor igual a 4730 kW.

A soma das demandas térmicas (4730 kW e 2725 kW) fornece o valor de S. A demanda elétrica (E) do estabelecimento é de 2100 kW. Desta forma, calcula-se o valor de ALFA, a partir da Equação 23, que é um parâmetro utilizado para caracterizar sistemas de cogeração.

$$ALFA = 0,282 \text{ e } \frac{1}{ALFA} = 3,55$$

Comparando o valor de $1/ALFA$ com os valores de base apresentados na Tabela 2, o sistema de cogeração que mais se enquadra no laticínio em estudo é o de cogeração com turbina a vapor. Foram propostos sistemas de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e de extração-condensação e também um sistema de cogeração com turbina a gás com intuito de comparar os ciclos.

4.2 Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de contrapressão

A Figura 20 apresenta o sistema de cogeração proposto com uma turbina de contrapressão.

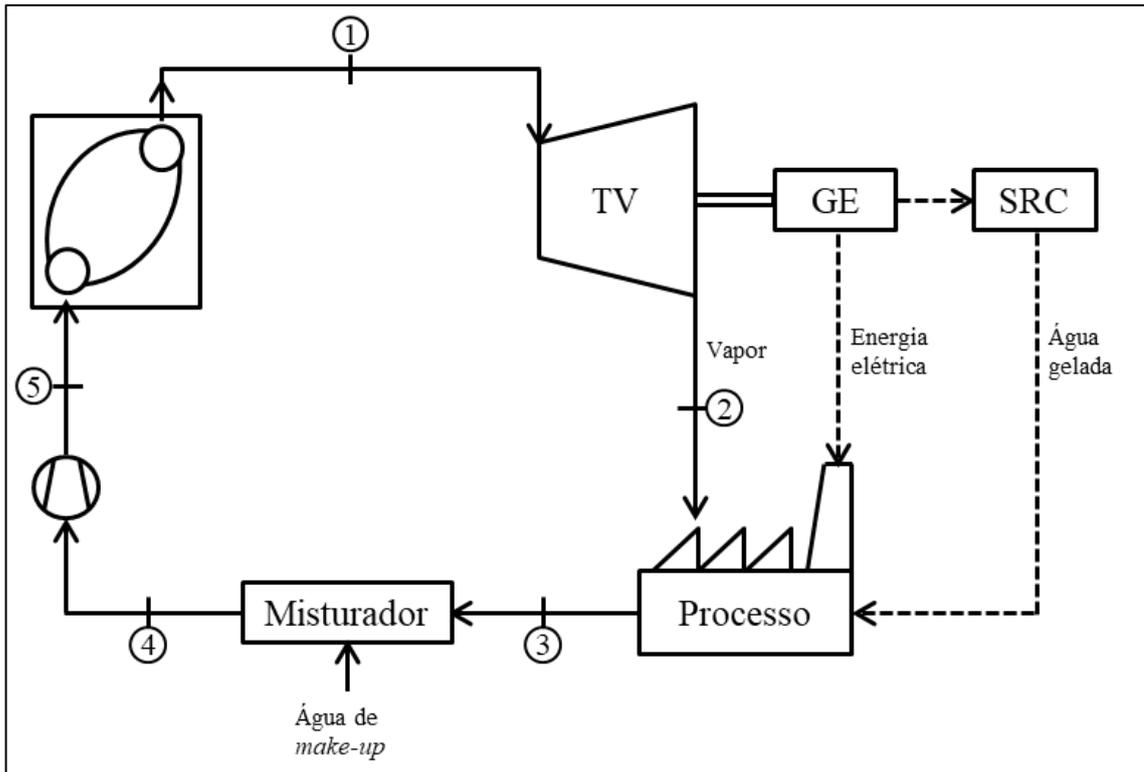


Figura 20: Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de contrapressão
 Fonte: Pesquisa direta (2019)

Como pode-se observar na Figura 20, o vapor entra na turbina a vapor (TV) que está acoplada a um gerador elétrico (GE) que gera energia elétrica para o processo e para o sistema de refrigeração por compressão (SRC) que, logo após, envia água gelada para o processo. O vapor da TV também é direcionado para o processo, que ao final passa em um misturador para recuperar a perda mássica e em seguida é direcionado para a bomba, a qual pressuriza o líquido para a entrada da caldeira.

Optou-se por trabalhar em paridade térmica, atendendo primeiramente a demanda de vapor e de energia para geração de frio e a energia residual sendo utilizada para atender a demanda elétrica. A partir disso testou-se quatro condições de trabalho, apresentadas na Tabela 8, variando pressão e temperatura de entrada na turbina.

Tabela 8: Condições de entrada na turbina a vapor

Condição	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)
Condição 1	10	450
Condição 2	11,5	475
Condição 3	12	500
Condição 4	11,5	520

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As Tabelas 9 a 12 apresentam os valores de vazão mássica, pressão, temperatura, entalpia, entropia e o título de cada ponto da Figura 19.

Tabela 9: Turbina de contrapressão - Condição 1

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	2,3611	10	450	3240,830	6,4189	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2716,520	6,4189	0,9678
2	2,3611	1,08	188,88	2795,166	6,5922	-
3	2,0069	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
4	2,3611	0,101	80	334,880	1,0752	-
5	2,3611	13	80	345,198	1,0668	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 10: Turbina de contrapressão - Condição 2

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	2,3611	11,5	475	3284,763	6,4281	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2720,703	6,4281	0,9699
2	2,3611	1,08	192,90	2805,312	6,6140	-
3	2,0069	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
4	2,3611	0,101	80	334,880	1,0752	-
5	2,3611	14,95	80	346,750	1,0655	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 11: Turbina de contrapressão - Condição 3

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	2,3611	12	500	3347,590	6,4956	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2751,520	6,4956	0,9853
2	2,3611	1,08	207,62	2840,930	6,7769	-
3	2,0069	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
4	2,3611	0,101	80	334,880	1,0752	-
5	2,3611	15,6	80	347,269	1,0651	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 12: Turbina de contrapressão - Condição 4

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	2,3611	11,5	520	3406,551	6,5866	-
2'	2,3611	1,08	188,04	2793,051	6,5866	-
2	2,3611	1,08	226,58	2885,076	6,6882	-
3	2,0069	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
4	2,3611	0,101	80	334,880	1,0752	-
5	2,3611	14,95	80	346,750	1,0655	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para a realização dos cálculos das Tabelas 9 a 12, além das variações das condições de pressão e temperatura no ponto 1, considerou-se a eficiência isentrópica da turbina de 85%; a pressão de saída do processo igual a pressão atmosférica e com sua temperatura de saturação, uma perda mássica de vapor no processo de 15%, a qual foi retornada pela água de *make-up* no misturador, saindo a uma temperatura de 80°C e a perda de pressão na caldeira de 30% (LEAL, 2000).

A partir dos valores apresentados nas Tabelas 9 a 12 e utilizando as equações 1 a 6 e a equação 25 foi possível calcular o trabalho gerado na turbina, o calor fornecido pela caldeira, a potência de vapor de processo, a vazão mássica necessária de combustível, a eficiência de cogeração e o atendimento da demanda elétrica, visto que o sistema foi projetado para trabalhar em paridade térmica. Estes valores são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados obtidos do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão

Parâmetro	Un.	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Potência elétrica gerada na turbina	kW	1052,26	1132,04	1196,28	1231,26
Calor fornecido pela caldeira	kW	7596,57	7707,75	7871,21	8027,25
Potência de vapor no processo	kW	4763,67	4787,62	4871,72	4975,95
Vazão mássica de combustível na caldeira	kg/s	0,1852	0,1879	0,1919	0,1957
Demanda elétrica atendida	%	13,03	16,83	19,89	21,56
Eficiência de cogeração	%	76,56	76,80	77,09	77,33

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para os cálculos apresentados na tabela acima, considerou-se que a caldeira possui uma eficiência de 90% e a vazão mássica do combustível foi calculada considerando o óleo combustível 1A (PCI de 41022 kJ/kg, TECCALOR, 2019) que é o combustível atualmente utilizado na caldeira da empresa. Nota-se que a vazão mássica de combustível necessária é relativamente próxima à já utilizada na caldeira do estabelecimento, que é igual a 0,182 kg/s.

O cálculo da porcentagem da demanda elétrica atendida foi realizado subtraindo a potência necessária para o acionamento do compressor do SRC da potência gerada pela turbina a vapor e dividindo pela demanda elétrica total da empresa de 2100 kW.

Com base na Tabela 13, constata-se que todas as condições atenderam a demanda térmica de produção de vapor para processo, mas a condição de trabalho 4 (P_1 de 11,5 MPa e T_1 de 520°C) foi a que mais atendeu a demanda elétrica, além de ter a maior eficiência de cogeração.

4.3 Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de extração condensação

A Figura 21 apresenta o sistema de cogeração proposto com uma turbina a vapor de extração condensação.

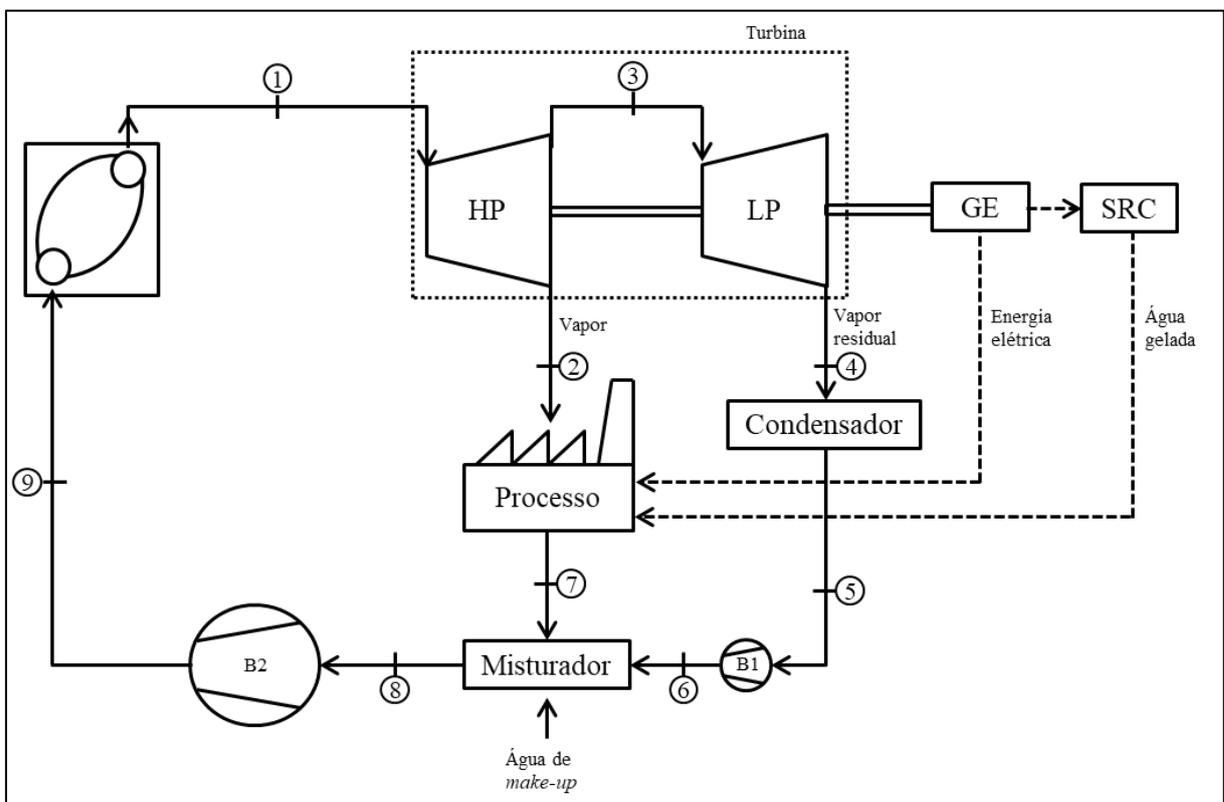


Figura 21: Sistema de cogeração proposto com turbina a vapor de extração-condensação
Fonte: Pesquisa direta (2019)

A Figura 21 descreve o sistema de cogeração com turbina a vapor de extração-condensação em que o vapor entra na turbina, parte dele é extraído para o processo e a outra utilizada para geração de mais energia elétrica e para a produção de água gelada no SRC. O fluido de trabalho da turbina LP passa pelo condensador e é direcionado ao misturador por uma bomba B1, para misturar-se com o fluido que sai do processo e com a água de *make-up*. Por fim, outra bomba B2 direciona a água para a caldeira, iniciando novamente o ciclo.

Também se optou por trabalhar em paridade térmica, atendendo primeiramente a demanda de vapor e produção de frio e o residual de energia para atender a demanda elétrica,

entretanto, como há uma extração na turbina, foi necessário aumentar a vazão mássica de vapor. Foram testadas as mesmas condições (1, 2, 3 e 4) de entrada na turbina, apresentadas anteriormente na Tabela 8, variando a pressão e temperatura, os resultados de vazão mássica, pressão, temperatura, entalpia, entropia e o título de cada ponto são apresentados nas Tabelas 14 a 17.

Tabela 14: Turbina de extração-condensação - Condição 1

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	4,3111	10	450	3240,830	6,4189	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2716,520	6,4189	0,9678
2	2,3611	1,08	210,48	2847,597	6,7016	-
3	1,95	1,08	210,48	2847,597	6,7016	-
4'	1,95	0,03	69,1	2260,039	6,7016	0,8437
4	1,95	0,03	69,1	2406,928	7,1307	0,9065
5	1,95	0,03	69,1	289,210	0,9439	-
6	1,95	0,101	69,1	418,864	1,3063	-
7	2,3611	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
8	4,3111	0,101	60	418,864	1,3063	-
9	4,3111	13	60	261,978	0,8242	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 15: Turbina de extração-condensação - Condição 2

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	4,3111	11,5	475	3284,763	6,4281	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2720,703	6,4281	0,9699
2	2,3611	1,08	215,28	2861,718	6,7353	-
3	1,9500	1,08	215,28	2861,718	6,7353	-
4'	1,95	0,03	69,1	2271,600	6,7353	0,8486
4	1,95	0,03	69,1	2419,130	7,1663	0,8865
5	1,95	0,03	69,1	289,210	0,9439	-
6	1,95	0,101	69,1	418,864	1,3063	-
7	2,3611	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
8	4,3111	0,101	60	418,864	1,3063	-
9	4,3111	14,95	60	263,608	0,8231	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 16: Turbina de extração-condensação - Condição 3

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	4,3111	12	500	3347,590	6,4956	-
2'	2,3611	1,08	183,25	2751,520	6,4956	0,9678
2	2,3611	1,08	233,22	2900,537	6,8080	-
3	1,9500	1,08	233,22	2900,537	6,4956	-
4'	1,95	0,03	69,1	2327,626	6,8080	0,8592
4	1,95	0,03	69,1	2447,491	7,2492	0,9239
5	1,95	0,03	69,1	289,210	0,9439	-
6	1,95	0,101	69,1	418,864	1,3063	-
7	2,3611	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
8	4,3111	0,101	60	418,864	1,3063	-
9	4,3111	15,6	60	264,150	0,8228	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Tabela 17: Turbina de extração-condensação - Condição 4

Ponto	m (kg/s)	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Título
1	4,3111	11,5	520	3406,551	6,5866	-
2'	2,3611	1,08	188,04	2793,051	6,5866	-
2	2,3611	1,08	253,12	2946,426	6,8990	-
3	1,9500	1,08	253,12	2946,426	6,8990	-
4'	1,95	0,03	69,1	2327,626	6,8990	0,8726
4	1,95	0,03	69,1	2482,326	7,3510	0,9388
5	1,95	0,03	69,1	289,210	0,9439	-
6	1,95	0,101	69,1	418,864	1,3063	-
7	2,3611	0,101	99,96	777,614	2,1710	0,1589
8	4,3111	0,101	60	418,864	1,3063	-
9	4,3111	14,95	60	263,608	0,8231	-

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para os cálculos das Tabelas 14 a 17, foram realizadas as seguintes considerações: eficiência isentrópica da turbina de 75%; a extração de vapor para o processo à vazão e pressão requerida; saída do processo à pressão atmosférica e temperatura de saturação; a pressão de saída para o condensador de 0,03 MPa; perda de 15% de massa de vapor no processo, retornando na água de *make-up* no misturador e saindo a 60°C e a perda de pressão na caldeira de 30% (LEAL, 2000).

Com base nos valores obtidos de cada ponto apresentados nas Tabelas 14 a 17 calculou-se a potência gerada pela turbina, o calor fornecido pela caldeira, a potência de vapor do

processo, a vazão mássica necessária de combustível, a eficiência de cogeração e o atendimento da demanda elétrica e foi construída a Tabela 18.

Tabela 18: Resultados obtidos do sistema de cogeração com turbina a vapor de extração-condensação

Parâmetro	Un.	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Potência elétrica gerada na turbina	kW	2554,6	2686,8	2810,7	2888,6
Calor fornecido pela caldeira	kW	14269,1	14471,7	14770,1	15055,1
Potência de vapor no processo	kW	4887,5	4920,8	4871,7	5120,8
Vazão mássica de combustível na caldeira	kg/s	0,3478	0,3528	0,3600	0,3670
Demanda elétrica atendida	%	84,57	90,87	96,77	100,48
Eficiência de cogeração	%	52,16	52,57	52,01	53,20

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A partir dos valores apresentados na Tabela 18, observa-se que todas as condições atendem à demanda térmica da empresa e a condição 4 ($P_1=11,5$ MPa e $T_1=520^\circ\text{C}$) atende à demanda elétrica em sua totalidade, além de possuir maior eficiência de cogeração.

4.4 Equipamentos selecionados para os sistemas de cogeração com turbina a vapor

Ao observar as condições de trabalho citadas nos itens 4.2 e 4.3, concluiu-se que a caldeira presente na empresa não atenderia às necessidades do processo, portanto seria necessário a troca da mesma. Sendo assim, foram selecionadas uma turbina e uma caldeira, que atendem as condições de trabalho das propostas, representadas pelas Figuras 22 e 23 e suas especificações descritas nas Tabelas 19 e 20, respectivamente.



Figura 22: Turbina a vapor selecionada
Fonte: *Siemens* (2017)

Tabela 19: Especificações da turbina a vapor selecionada

Turbina industrial a vapor		
Fabricante		<i>Siemens</i>
Modelo		SST - 300
Potência		até 45 MW
Velocidade		até 12000 rpm
Condições de entrada	Pressão	até 140 bar (14 MPa)
	Temperatura	540°C
Condições de saída	Contrapressão	até 16 bar (1600 kPa)
	Condensação	até 0,3 bar (30 kPa)
	Extrações (até 2)	até 25 bar (2500 kPa)
até 400°C		

Fonte: Adaptado de *Siemens* (2017)

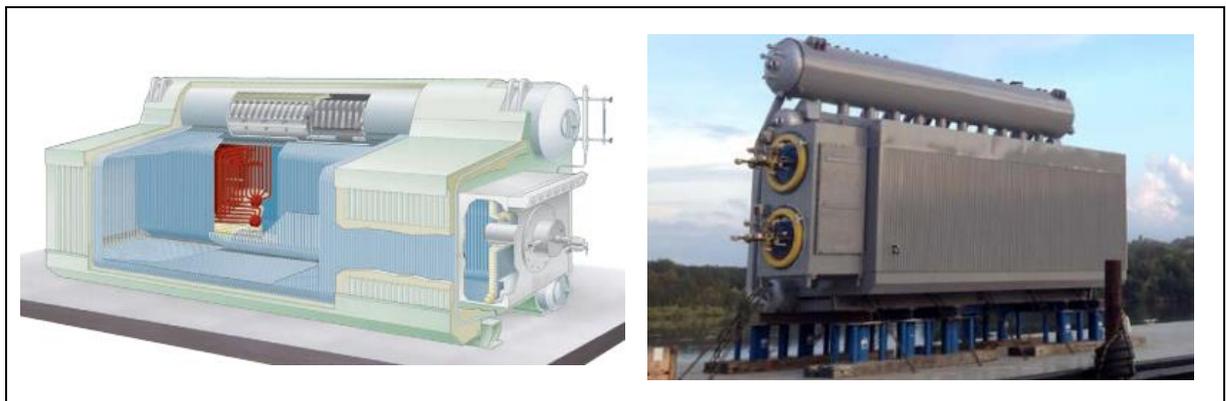


Figura 23: Caldeira selecionada
Fonte: B&W (2017)

Tabela 20: Especificações da caldeira selecionada

Caldeira industrial	
Fabricante	<i>Babcock & Wilcox</i>
Modelo	<i>Heros</i>
Vazão mássica de vapor	1,25 até 151,17 kg/s
Temperatura máxima	540°C
Pressão	17 até 165 bar (1,7 MPa até 16,5 MPa)

Fonte: Adaptado de B&W (2017)

Como descrito na Tabela 19, a turbina selecionada possui uma pressão máxima de trabalho 14 MPa e uma temperatura máxima de 540°C, atendendo todas as condições (1, 2, 3 e 4) propostas para a entrada na turbina. Além disso, a turbina SST-300 da *Siemens* possui modo de operação em contrapressão e em extração-condensação, portanto ela atende aos dois sistemas a vapor propostos.

Em relação à operação da caldeira, a principal diferença entre os dois sistemas é a vazão mássica de vapor e como a caldeira *Heros* da *Babcock & Wilcox* compreende uma grande faixa de vazão, como pode-se observar a Tabela 20, ela também é aplicável aos dois sistemas.

4.5 Sistema de cogeração proposto com turbina a gás

A Figura 24 apresenta o sistema de cogeração proposto com turbina a gás.

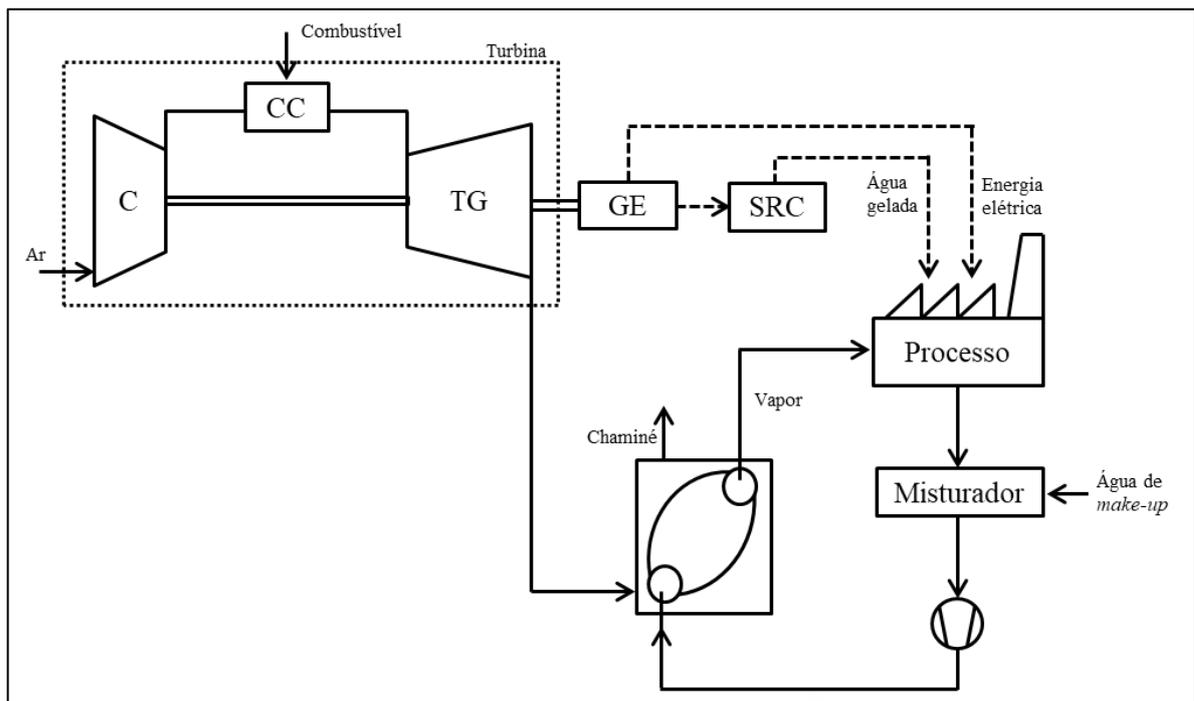


Figura 24: Sistema de cogeração proposto com turbina a gás

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Como pode-se observar na Figura 24, o ar é admitido no compressor (C) e entra em combustão ao misturar-se com o combustível na câmara de combustão (CC) cedendo a energia necessária para a turbina acionar o gerador elétrico, fornecendo energia elétrica para o processo e para o SRC. O gás de exaustão da turbina (TG) é direcionado à caldeira para que seu calor residual aqueça a água e gere vapor para o processo. Considerou-se que o vapor sai do processo com 15% a menos de massa, à pressão atmosférica de 101,325 kPa, com temperatura de saturação de 99,96°C e título de 15,89%, ou seja, as mesmas condições de saída do processo no sistema a vapor. Por fim, a vazão mássica é reposta no misturador, bombeada pela bomba e entra na caldeira como líquido saturado às mesmas condições de pressão e temperatura, iniciando novamente o ciclo.

Com base na demanda elétrica da empresa de 2100 kW somado a 779 kW necessários para a produção de frio, têm-se a potência requerida na turbina de 2879 kW. A partir disso, selecionou-se três turbinas disponíveis no mercado com potências de saída próximas a potência requerida, elas são apresentadas nas Figuras 25 a 27.



Figura 25: Turbina 1 - *Kawasaki* GPB30D
Fonte: *Kawasaki* (2019)

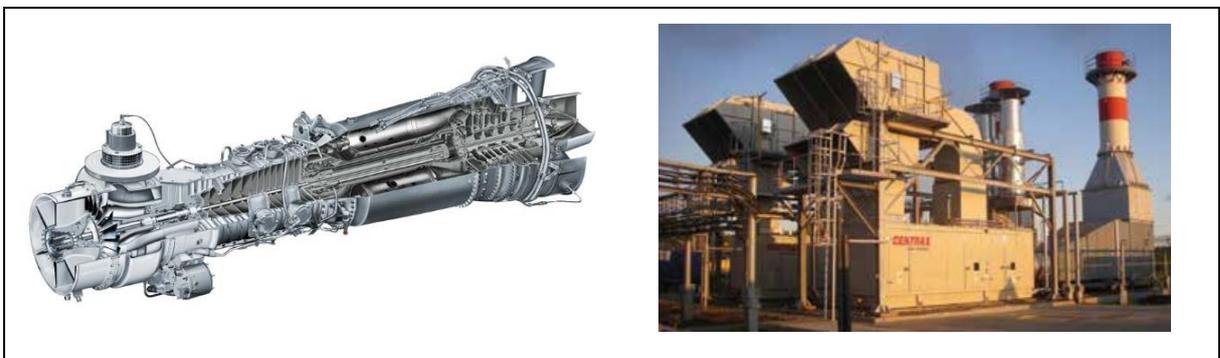


Figura 26: Turbina 2 - *Siemens* SGT-A05
Fonte: *Siemens* (2018)

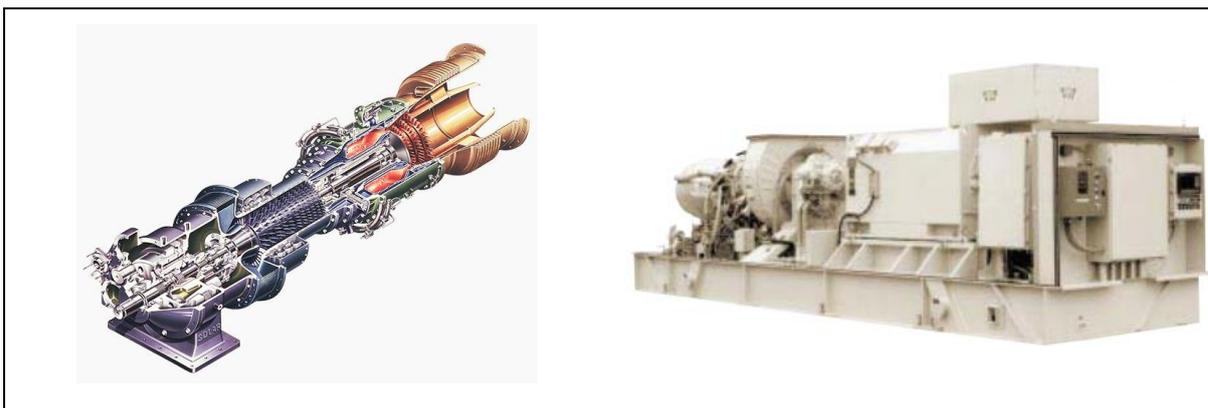


Figura 27: Turbina 3 - *Solar Centaur 40*

Fonte: *Solar* (2019)

A Tabela 21 apresenta as especificações das turbinas a gás selecionadas operando nas condições ISO.

Tabela 21: Especificações das turbinas a gás selecionadas

Descrição	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3
Fabricante	<i>Kawasaki</i>	<i>Siemens</i>	<i>Solar</i>
Modelo	GPB30 D	SGT-A05 KB5S	<i>Centaur 40</i>
Combustível	Líquido/Gás	Líquido/Gás	Líquido/Gás
Potência elétrica gerada (kW)	2950	3980	3515
<i>Heat Rate</i> (kJ/kWh)	15290	12137	12910
Vazão mássica na exaustão (kg/s)	17,1	15,4	19
Temperatura de exaustão (C°)	492	560	445

Fonte: *Kawasaki* (2019); *Siemens* (2018); *Solar* (2019)

Como todas as turbinas descritas na Tabela 21 admitem combustíveis líquidos e gasosos, selecionou-se como combustível o biogás, proveniente de uma estação de tratamento de efluentes, em sua composição mais pobre, com 60% de CH₄ e 40% de CO₂, com poder calorífico de 30107 kJ/kg e têm-se a seguinte reação estequiométrica da combustão com o ar de composição 21% de O₂ e 79% de N₂:



A partir disso têm-se a razão estequiométrica de ar combustível (RAC) de 6,056 kg de ar/kg de combustível.

Com os valores de *Heat Rate* apresentados na Tabela 21, pode-se calcular a eficiência de cada turbina e ao dividir a potência elétrica gerada por sua eficiência, tem-se o valor da

energia necessária do combustível na câmara de combustão e a partir disso, calcular a vazão necessária de combustível na câmara.

A Tabela 22 apresenta a eficiência, a energia do combustível e a vazão mássica necessária em cada turbina selecionada:

Tabela 22: Eficiência, energia cedida pelo combustível e vazão necessária em cada turbina selecionada

Parâmetro	Un.	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3
Eficiência da turbina	%	23,54	29,66	27,89
Energia do combustível	kW	12529,31	13418,13	12605,18
Vazão mássica de combustível	kg/s	0,416	0,446	0,419

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Ao subtrair a vazão mássica de exaustão da turbina apresentada na Tabela 21 da vazão mássica necessária de combustível apresentada na Tabela 22, têm-se a vazão mássica necessária de ar a ser admitido em cada turbina, que é, respectivamente, 16,72, 14,95 e 18,58 kg/s, permitindo calcular o excesso de ar necessário em cada turbina para que haja a combustão completa do combustível.

Calculadas as vazões mássicas de combustível e ar na entrada da turbina, têm-se a composição do gás de exaustão, apresentados na Tabela 23

Tabela 23: Composição do gás de exaustão

Substância	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3
Dióxido de carbono (CO ₂)	3,42%	3,98%	3,14%
Água (H ₂ O)	1,68%	1,96%	1,54%
Oxigênio (O ₂)	19,83%	19,26%	20,11%
Nitrogênio (N ₂)	75,07%	74,80%	75,20%

Fonte: Pesquisa direta (2019)

O gás de exaustão é direcionado à caldeira para que haja uma troca de calor com a água, suficiente para fornecer 2,36 kg/s de vapor a 1,08 MPa para atender as necessidades do processo. Considerando que a água entra na caldeira como líquido saturado à pressão atmosférica, a energia necessária para torná-la vapor a 1,08 MPa é de 5577 kW.

Considerando as condições de vazão e temperatura de exaustão do gás de cada turbina selecionada, apresentados na Tabela 21, e adotando a temperatura de final do mesmo na exaustão da caldeira como 150°C, é possível calcular a energia perdida por ele durante a troca de calor, que é respectivamente, 6012 kW, 6955 kW e 6310 kW.

Como a energia necessária para aquecer a água é de 5577 kW, conclui-se que todas as turbinas selecionadas são capazes de atender a demanda térmica de vapor de processo da empresa. Entretanto, como apresentam condições diferentes de energia liberada pelo combustível e de potência elétrica gerada, apresentam diferentes eficiências de cogeração, explicitadas na Tabela 24.

Tabela 24: Eficiência de cogeração nas turbinas a gás selecionadas

<i>Kawasaki</i> GPB30 D	<i>Siemens</i> SGT-A05 KB5S	<i>Solar</i> Centaur 40
61,30%	64,91%	65,41%

Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.6 Considerações finais

A Figura 28 apresenta uma comparação de todas as condições de trabalho propostas para o funcionamento da turbina a vapor de contrapressão, turbina a vapor de extração-condensação e turbina a gás.

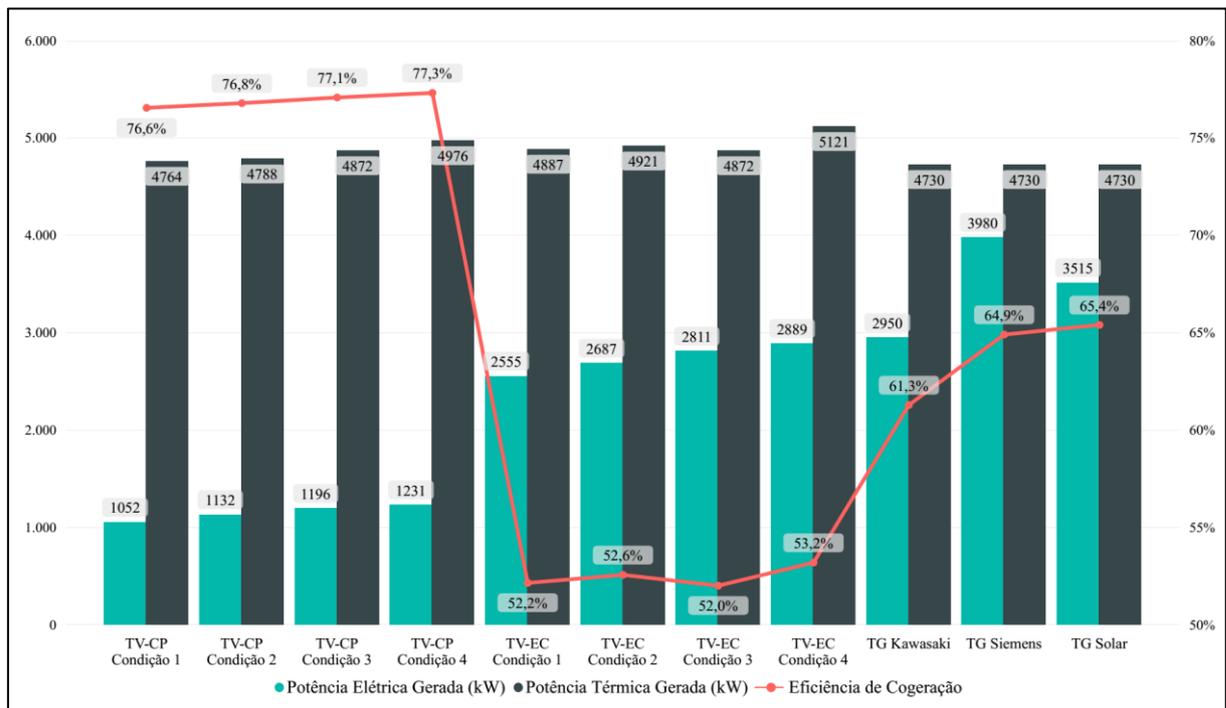


Figura 28: Comparação entre as condições de trabalho propostas

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A potência térmica requerida no processo é de 4730 kW, logo, todas as condições apresentadas são suficientes para suprir a demanda térmica da empresa, entretanto, a demanda de energia elétrica é de 2879 kW, o que somente a turbina a vapor de extração-condensação e

as turbinas a gás conseguiram atingir. Em contrapartida, a turbina a vapor de contrapressão é a que possui maior eficiência de cogeração.

No sistema a vapor, a condição de trabalho 4 com pressão de entrada na turbina de 11,5 MPa e temperatura de entrada na turbina de 520°C apresentam maior potência elétrica e térmica gerada em cada modo de operação, além melhor eficiência de cogeração, podendo ser considerada a melhor condição para as turbinas a vapor tanto em contrapressão quanto em extração-condensação.

Em relação ao sistema a gás, as turbinas geram um excedente de energia. A turbina da *Siemens* gera um excedente considerável, porém a turbina da *Solar* encontra-se mais próxima das necessidades da empresa, utilizando menos combustível e possuindo maior eficiência de cogeração, logo, foi escolhida como a melhor proposta de turbina a gás.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo sintetiza todos os resultados obtidos da análise para a aplicação de um sistema de cogeração na indústria de laticínios em estudo, bem como as melhores condições de trabalho encontradas de acordo com as demandas da empresa. Além disso, apresenta algumas recomendações para trabalhos futuros com intuito de abranger assuntos que não foram focos deste trabalho.

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como finalidade embasar, através da revisão bibliográfica, uma proposta de central de cogeração para o laticínio de médio porte em estudo, portanto, foi realizada uma análise termodinâmica para fundamentar as melhores configurações e os parâmetros de trabalho que melhor se adequam às necessidades da empresa. O estudo teve foco nas tecnologias que utilizam turbinas a vapor e a gás, detalhadas a seguir.

A proposta com turbina a vapor estratificou-se com a turbina operando em contrapressão e em extração-condensação em que ambos os casos foram capazes de suprir a demanda térmica para geração de vapor e água gelada na empresa, mas somente a de extração condensação foi capaz de fornecer a energia elétrica necessária. Estudou-se quatro condições de trabalho em cada turbina e a melhor condição da turbina a vapor de contrapressão atende somente 21,56% da demanda elétrica da empresa, mas, em contrapartida, é a que possui maior eficiência de cogeração, de 77,33%. Já a melhor condição de trabalho da turbina de extração condensação, atende todas as demandas mas apresenta uma eficiência de cogeração inferior de 53,2%.

Encontrou-se uma turbina a vapor da *Siemens* modelo SST-300 que possui a capacidade de operar tanto em contrapressão quanto em extração-condensação e que atende todos os parâmetros do processo, além de uma caldeira da série *Heros* da *Babcock & Wilcox* que também atende as condições de trabalho das duas propostas. A diferença entre elas é que para atender a demanda elétrica na turbina extração-condensação, foi necessário aumentar a vazão de vapor, aumentando o gasto de combustível na caldeira em 86,56%. Além disso, como a condição de condensação é próxima à pressão de vácuo, foi necessário incluir uma bomba pequena para levar a água do condensador ao misturador.

Na proposta com turbina a gás, foram escolhidas três modelos de turbina em que todas atenderam a demanda térmica e elétrica da empresa. A turbina GPB30D da *Kawasaki* oferece

uma entrega bem próxima das demandas empresa e possui uma eficiência de cogeração de 61,30%. Já as turbinas SGT-A05 da *Siemens* e *Centaur 40* da *Solar*, possuem uma eficiência de cogeração de 64,91% e 65,41% e é gerado um excedente energia de aproximadamente 1101,429 kW e 636,429 kW respectivamente, podendo ser negociado uma comercialização.

Portanto, conclui-se que, tanto o sistema a vapor quanto o sistema a gás são capazes de suprir as necessidades da empresa, entretanto, mesmo com a necessidade da troca da caldeira, a implementação do sistema a vapor teria um custo inferior ao valor da implementação do sistema a gás, além de ser mais simples e possuir maior facilidade de manutenção, o que é muito relevante para uma empresa de médio porte.

Para realizar a escolha do modo de operação desta turbina a vapor, deve-se fazer uma análise econômica comparando o valor do combustível utilizado com o valor da energia elétrica adquirida com a concessionária, a fim de conferir se é mais viável a compra dos 78,44% de energia das quais a operação em contrapressão não foi capaz de suprir ou a compra de 87,55% a mais de combustível necessários na caldeira na operação em extração-condensação.

5.2 Recomendações

Para elaboração de uma proposta de um sistema de cogeração mais concisa, seria interessante apresentar uma análise econômica dos sistemas propostos, visando levantar investimento inicial necessário para aquisição de todos os equipamentos, custos com manutenções, análise de vida útil dos equipamentos, além de uma cotação dos combustíveis utilizados.

Além disso, pode-se fazer uma análise exérgica das máquinas térmicas envolvidas no sistema de cogeração proposto, com objetivo de buscar o aumento do trabalho realizado por elas e uma operação mais eficiente.

Outra sugestão a ser dada, é a realização de uma análise energética de cogeração envolvendo outras máquinas, como por exemplo motores de combustão interna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMUNDSEN, R. N. The cogeneration revolution. **Applied Energy**, v. 36, p. 79-83, 1990.

ANDREOS, R. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do Estado de São Paulo**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 168. 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 235**, 2006. Disponível em: <http://www.traderenergia.com.br/downloadDoc.php?d=arqConteudo/arqMercadoLegislacao&f=REN._n_235_2006__Vigente.pdf>. Acesso em: 23 Outubro 2018.

ARTEAGA, J. A. F. **Análise energética e exergética de um sistema de cogeração com motores de combustão interna**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2010.

B&W. Babcock & Wilcox. **Water-tube boilers**, 2017. Disponível em: <<https://www.babcock.com/-/media/documents/products/heros/e101-3240---heros-industrial-boilers-refresh.ashx>>. Acesso em: 11 Junho 2019.

BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1994.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BARBELI, M. C. A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. **Empreendedorismo, Gestão e Negócios**, Pirassununga, p. 238-246, 2005.

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

BELISARIO, I. C. **Análise termoeconômica de uma central de cogeração de uma indústria siderúrgica**. Universidade Federal do Espírito Santos. Vitória, p. 103. 2012.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à cogeração**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2009.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

CENTRAL DAS CALDEIRAS. **Caldeira industrial ATA**, 2019. Disponível em: <<http://centralscaldeiras.blogspot.com/2010/09/caldeira-ata-lh-1000-kgvh-lenha.html>>.

Acesso em: 2019 Junho 21.

DARWICHE, T. J. **A matriz energética brasileira: evolução da estrutura de oferta e demanda**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas , p. 2010. 2010.

DEVKI ENERGY CONSULTANCY. Best Practice Manual of Cogeneration, 2006. Disponível em: <http://nredcap.in/PDFs/BEE_manuals/BEST_PRACTICE_MANUAL_COGENERATION.pdf>. Acesso em: 18 maio 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Anuário Leite - Indicadores, tendências e oportunidades para quem vive no setor leiteiro**, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094149/anuario-leite-2018-indicadores-tendencias-e-oportunidades-para-quem-vive-no-setor-leiteiro>>. Acesso em: 24 maio 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Nacional de Energia - Ano base 2017**, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 4 Maio 2019.

FERREIRA, A. T. F. **Análise de sistemas de cogeração com gaseificação de licor negro no setor de papel e celulose**. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 103. 2008.

GALLEGO, A. G. **Sistemas de refrigeração a partir da cogeração: análise e simulação de propostas para o caso de cervejarias utilizando gás natural**. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Barbara d'Oeste - SP. 1998.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6^a. ed. São Paulo: Atlas , 2008.

HOLANDA, L. R.; RAMOS, F. S. Análise de viabilidade econômica da energia elétrica gerada através das microalgas. **Revista Eletrônica de Sistemas & Gestão**, v. 6, p. 327-346, 2011.

KAWASAKI. **Kawasaki Gas Turbines**, 2019. Disponível em: <http://www.kawasakigasturbines.com/files/Kawasaki_GPB30D.pdf>. Acesso em: 18 Junho 2019.

LEAL, E. M. **Análise técnico-econômica de sistemas de cogeração utilizando células de combustível: Estudos de casos.** Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Guaratinguetá. 2000.

MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos.** Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, p. 89. 2006.

MARCHIONNI, L. **Análise da cogeração aplicada a microempresas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 61. 2004.

MINAYO, M. C. S. (.). et al. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** 21ª. ed. Petrópolis: Vozes, 2002.

MOISÉS, M. A. M. **Benefícios da cogeração a gás natural para o Estado de São Paulo.** Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do SUL, p. 156. 2007.

NUNES, A. F. **O choque do petróleo de 1973: Estados Unidos, OPAEP e a segurança energética.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 126. 2016.

ODDONE, D. C. **Cogeração: Uma alternativa para produção de eletricidade.** Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 88. 2001.

OSHIRO, A. H. F. **Análise de intensidade energética: um estudo de caso para o Estado de São Paulo.** Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 96. 2015.

PALOMINO, R. G. **Cogeração a partir de gás natural: uma abordagem política, econômica, energética, exergética e termoeconômica.** Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 145. 2004.

PANOSSO, G. C. **Métodos de simulação do ciclo Rankine.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

PAULA, C. P. **Geração distribuída e cogeração no setor elétrico: avaliação sistêmica de um plano de inserção incentivada.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

PINTO JÚNIOR, H. Q. (.). et al. **Economia da Energia: Fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2ª. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PRUZAESKY, F. C. **Análise de um sistema de produção simultânea de eletricidade, frio e calor**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 286. 2005.

RAMOS, E. F. **Análise do desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 174. 2007.

REIS, J. A. **Projeto e montagem de um sistema compacto de cogeração: aplicação de análise exergoeconômica**. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 141. 2006.

SANCHEZ, P. M. G. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 280. 2003.

SANTOS, F. B.; NOVO, L. M. A. **Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

SANTOS, J. C. A. **Análise energética e exérgica de plantas de cogeração**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 152. 2005.

SANTOS, T. A. R. **Serviços de energia aplicados à cogeração**. Universidade do Porto. Porto - Portugal, p. 276. 2010.

SCHREINER, J. E. **Desenvolvimento de metodologias de simulação para a análise de soluções de gerenciamento térmico aplicadas a compressores alternativos de refrigeração**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.

SIEMENS. **Siemens steam turbine portfolio**, 2017. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1515750015.5428122ca5a675845eae3f573452a9e58e65b254.steam-turbine-product-overview-01-2018.pdf>>. Acesso em: 10 Junho 2019.

SIEMENS. **SGT-A05 (Industrial 501) aeroderivative gas turbine**, 2018. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1538121036.9360ad3b6609be84dda9d9efee494bb4bec2a3e4.sgt-a05-brochure-2018-v8-web.pdf>>. Acesso em: 17 Junho 2019.

SILVA, N. F. **Desenvolvimento de metodologia de eficiência energética para aplicação em processos industriais de laticínios**. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 106. 2016.

SILVEIRA, J. S. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudos de casos para o setor terciário**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas , p. 193. 1994.

SOLAR. **Solar Turbines**, 2019. Disponível em: <https://www.solarturbines.com/en_US/products/power-generation-packages/centaur-40.html>. Acesso em: 18 Junho 2019.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da termodinâmica**. 6ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

TECCALOR. **Tabela - Poder Calorífico Inferior**, 2019. Disponível em: <[www.teccalor.com.br/PDF/Tabela PoderCalorifico.pdf](http://www.teccalor.com.br/PDF/Tabela%20PoderCalorifico.pdf)>. Acesso em: 24 Junho 2019.

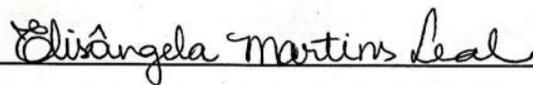
TOLMASQUIM, M. T. **Perpectivas e planejamento do setor energético no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

VIANA JÚNIOR, L. **Cogeração - Desenvolvimento de metodologia para avaliação energética: estudo de caso aplicado a industria de papel e celulose**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1999.

WARK, K. **Thermodynamics**. 4ª. ed. New York: Mc Graw-Hill , 1983.

Certifico que a aluna MILENA DA SILVA TAVARES, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado "ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO À UM LATICÍNIO DE MÉDIO PORTE", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 28 de junho de 2019.

A handwritten signature in black ink, reading "Elisângela Martins Leal", is written over a horizontal line.

Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora