

BRUNO HENRIQUE DOS SANTOS MATOS

Projeto de cogeração: estudo de caso para aplicação de uma fábrica cafeeira

Bruno Henrique dos Santos Matos

Projeto de cogeração: estudo de caso para aplicação em uma fábrica cafeeira

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Fernando Henrique M. de Araújo

M433p	Matos, Bruno Henrique dos Santos Projeto de cogeração: estudo de caso para aplicação em uma fábrica cafeeira / Bruno Henrique dos Santos Matos – Guaratinguetá, 2018. 63 f : il. Bibliografia: f. 62-63 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique M. de Araújo 1. Energia elétrica e calor – Cogeração. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Caldeiras. I. Título. CDU 536.72
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

BRUNO HENRIQUE DOS SANTOS MATOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA MECÂNICA "

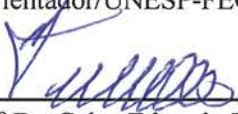
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Profº Dr. MARCELO SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profº Me. Fernando Henrique M. de Araújo
Orientador/UNESP-FEG



Profº Dr. Celso Eduardo Tuna
UNESP-FEG



Profº Nestor Proenza Perez
UNESP-FEG

Dezembro, 2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Me. Fernando Araújo* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *José e Auxi*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

aos meus grandes amigos e irmãos da república Palace II que estiveram ao meu lado durante toda essa caminhada;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Caminhante não há caminho, caminho se
faz ao caminhar.”

Antônio Machado

RESUMO

Nos últimos anos estão crescentes as preocupações empresárias para que se reduzam os custos das operações fabris e que se amenizem os impactos junto ao meio ambiente. Este estudo visa uma nova possibilidade ao sistema térmico já existente em uma fábrica de Café Solúvel afim de se obter uma alternativa de uma fonte descentralizada de energia elétrica, que seja viável e aumente a confiabilidade no processo. Neste trabalho foi abordado um estudo de caso com a proposta de implementação de um sistema de cogeração. Este estudo encontra-se em fase de viabilidade técnica, desta forma foram feitas análises dos indicadores que melhor se encaixam para as demandas térmicas/elétricas da empresa, juntamente com o melhor equipamento que atenda essas necessidades. Serão testados para essa solução, uma turbina a vapor de contrapressão e uma turbina a gás, junto com uma caldeira de recuperação para produção de vapor. Para concretização deste estudo, primeiramente foram abordados todos os temas teóricos por trás dos fenômenos e conceitos térmicos. Em seguida foram analisadas todas as demandas energéticas da planta e o seu consumo total de combustíveis nas caldeiras. Para seleção da turbina a vapor, mantendo a performance de geração de vapor já existente foi necessário a mudança das caldeiras para que a operação atingisse a pressão e temperatura desejados, 2,5MPa e 300oC respectivamente. Desta forma foi constatado pelas equações termodinâmicas um potencial para instalação de dois equipamentos de 1,5 MW de potência. No caso do conjunto a gás será instalada uma turbina de 5,7 MW de potência, que analisada a demanda de energia térmica da fábrica, irá suprir essa necessidade pela substituição da caldeira a gás pela caldeira de recuperação, oferecendo uma vazão de vapor de 15 ton/hora de vapor, e ainda atendendo praticamente toda demanda elétrica da fábrica. Por fim para se concluir esse estudo foram calculados os custos de instalação e operação destes sistemas, que serão comparados com a operação e custos já existentes da fábrica.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração. Estudo de caso. Viabilidade técnica. Borra de café.

ABSTRACT

In recent years, business concerns have grown to reduce the costs of manufacturing operations and to reduce the impact on the environment. This study aims at a new possibility for the thermal system already existing in a Soluble Coffee plant in order to obtain an alternative from a decentralized source of electric energy, which is feasible and increases the reliability in the process. In this work, a case study was presented with the proposal to implement a cogeneration system. This study is in the phase of technical feasibility, in this way were made analyzes of the indicators that best fit the thermal/electrical demands of the company, together with the best equipment that meets those needs. A backpressure steam turbine and a gas turbine will be tested for this solution, along with a recovery boiler for steam production. For the purpose of this study, we first approached all the theoretical themes behind the thermal phenomena and concepts. Then all the energy demands of the plant and its total fuel consumption in the boilers were analyzed. To select the steam turbine, maintaining the existing steam generation performance, it was necessary to change the boilers so that the operation reached the desired pressure and temperature, 2.5MPa and 300oC respectively. In this way it was verified by the thermodynamic equations a potential for installation of two equipment of 1,5 MW of power. In the case of the gas assembly, a turbine of 5.7 MW of power will be installed, which will analyze the thermal energy demand of the plant, will supply this need by replacing the boiler with gas by the recovery boiler, offering a steam flow of 15 ton / hour steam, and still serving virtually all electrical demand from the plant. Finally, in order to conclude this study, we calculated the installation and operation costs of these systems, which will be compared with the already existing operation and costs of the plant.

KEYWORDS: Cogeneration. Case study. Technical viability. Coffee ground.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da oferta de energia interna	16
Figura 2 – Principais culturas agrícolas do Estado de São Paulo	17
Figura 3 – Órgãos reguladores de energia elétrica no Brasil	17
Figura 4 – Cogeração de Energia	19
Figura 5 – Unidade térmica geradora a vapor com superaquecimento	25
Figura 6 – Princípio de Funcionamento do Conjunto a gás	26
Figura 7 – Caldeira Convencional	27
Figura 8 – Caldeira Flamotubular	28
Figura 9 – Caldeira Aquatubular	29
Figura 10 – Partes principais de uma caldeira aquatubular a biomassa	30
Figura 11 – Esquema de Caldeira de Recuperação Térmica	32
Figura 12 – Caldeira de Recuperação real	33
Figura 13 – Turbina a vapor de contrapressão	34
Figura 14 – Turbina a vapor de condensação	35
Figura 15 – Turbina a gás: Ciclo aberto	36
Figura 16 – Turbina a gás: Ciclo fechado	37
Figura 17 – Turbina aero derivativa GE LM6000	37
Figura 18 – Turbina Heavy Duty ABB GT13E	38
Figura 19 – Desaerador de forma ilustrativa	39
Figura 20 – Etapas do processamento de Café Torrado, Moído e Solúvel	41
Figura 21 – Universo de todas as soluções possíveis	44
Figura 22 – Níveis de profundidade dos estudos de viabilidade	45
Figura 23 – Fluxograma de Materiais e Métodos	47
Figura 24 – Variáveis e Indicadores estudados	48
Figura 25 – Consumo de combustíveis nas caldeiras	49
Figura 26 – Consumo de energia elétrica durante o ano de 2017	50
Figura 27 – Consumos de vapor no processo durante o ano de 2017	50
Figura 28 – Custos de operação	51
Figura 29 – Esquema térmico utilizado pela fábrica	51
Figura 30 – Características técnicas dos sistemas de cogeração	52
Figura 31 – Modelo1 - Caldeiras e turbinas novas	53
Figura 32 – Modelo1 – Caldeira de biomassa	54

Figura 33 – Turbina a vapor de contrapressão.....	54
Figura 34 – Modelo 2 proposto utilizando Turbina a gás.....	55
Figura 35 – Modelo 2 - Turbina a gás	56
Figura 36 – Custo de Aquisição dos Equipamentos para o Caso 1	59
Figura 37 – Custo de Operação comparando Cogeração	59
Figura 38 – Custo de Aquisição dos Equipamentos para o Caso 2	60
Figura 39 – Custo de Operação com e sem Cogeração	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVO	13
1.2.1	Geral	13
1.2.2	Específico	13
1.2.3	Estrutura do Trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	15
2.2	COMÉRCIO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.3	COGERAÇÃO	18
2.3.1	Aspectos e Definições Gerais	18
2.3.2	Critério para ser um Cogrador	20
2.3.3	Vantagens e Desvantagens	21
2.4	FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS	21
2.4.1	Equações termodinâmicas	22
2.4.2	Ciclos termodinâmicos	24
2.4.2.1	Ciclo Rankine	25
2.4.2.2	Ciclo Bryton	26
2.5	EQUIPAMENTOS	27
2.5.1	Caldeiras	27
2.5.2	Turbinas	33
2.5.2.1	Turbina a vapor	33
2.5.2.2	Turbina a gás	35
2.5.3	Desaerador	39
2.6	INDÚSTRIA CAFEEIRA	40
2.6.1	Café no Brasil	40
2.6.2	Produção de Café Solúvel	41
2.7	PROJETO DE SISTEMAS TÉRMICOS	44
3	METODOLOGIA	46
3.1	TIPOS DE PESQUISA	46
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.3	VARIÁVEIS E INDICADORES	48

3.4	INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS	49
3.5	EXECUÇÃO DO PROBLEMA	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O planeta historicamente sofreu mudanças naturais em relação ao clima e a sua atmosfera, as famosas eras geológicas, porém pesquisas recentes provam que a atividade humana gerada pelo seu crescimento tecnológico tem agravado esse cenário com maior rapidez do que o esperado (RAMOS et al., 2008).

Devido a utilização diária de um enorme volume de combustíveis fósseis (principal fonte de energia do planeta) tem aumentando a concentração de CO₂ e outros gases oriundos das atividades humanas, como metano e o óxido nitroso, acentuando o “efeito estufa” natural que torna a Terra um planeta habitável, porém essas altas concentrações desses gases fazem com que o fenômeno se intensifique aumentando assim a temperatura média causando um desequilíbrio (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Esta velocidade de alteração sem precedentes está ameaçando o equilíbrio biológico dos sistemas sociais e ambientais que não tem a mesma capacidade de auto ajuste no mesmo ritmo. Tem-se constatado o aumento de catástrofes naturais ocorridas por mudanças climáticas como períodos de longas estiagens (como a ocorrida em São Paulo no ano de 2015) e enchentes vistos no Norte do país.

A busca de formas alternativas de energia se intensificaram desde a década de 70 com a crise do Petróleo de 1972 somada ao fenômeno conhecido como “despertar da consciência ecológica” onde teve como início a conferência de Estocolmo que foi marcado pela tentativa de muitos países em promover formas alternativas de desenvolvimento que visavam a preservação da natureza e dos recursos naturais. Outras iniciativas internacionais como Rio 92, 97 em Quioto e Rio + 20 também tiveram importância diante a preocupação com os impactos das atividades humanas (PENA-VEGA, 2003).

Em decorrência das crises energéticas de 2001, e a mais recente de 2015, ocorrida devido à redução de água em reservatórios das hidrelétricas por escassez de chuvas e do aumento do consumo de energia acima da capacidade das companhias em responder ao crescimento dessa demanda, levou o Brasil a um panorama de incertezas quanto à garantia de oferta de energia (FRANÇA, 2015).

Para geração de energia elétrica no Brasil, existem diferentes formas e possibilidades. A evolução para o uso de cada uma delas depende da disponibilidade de recursos e de investimentos direcionados para cada um deles. Neste contexto, no ano de 2012 a principal fonte de geração era a hidráulica, sendo a produção de 79.811 MW. Com forma de se complementar a oferta de energia elétrica, há alguns incentivos por parte do governo para a

geração através da biomassa. No ano de 2014, o país contava com 502 usinas termelétricas movidas por biomassa. Destas usinas 386 usavam o bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia, contando com uma potência de aproximadamente 9.820 MW de eletricidade (REIS, 2015).

Em 2018, havia 549 empreendimentos que exploravam fontes energéticas de origem Biomassa, com potência instalada de 14.548.593 KW, correspondente a 8,81 do total da matriz elétrica brasileira (ANEEL 2018).

Segundo a COGEN (2018), cogeração é definida como o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total e parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis, cujas principais vantagens em relação a outros processos são o consumo menor de combustíveis e a consequente redução de emissões.

Este trabalho visa aplicação dos métodos de cogeração utilizando como combustíveis gás natural e biomassas (borra de café e cavaco). Uma das biomassas de grande destaque no Brasil é o café, responsável por cerca de um terço da produção mundial, faz o país ser o maior produtor atualmente. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) estimada safra de 2017 a produção brasileira deverá ficar entre 49,13 e 51,94 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado. Se considerada a média de produção desse intervalo (50,5 milhões de sacas), esta pode ser a segunda maior safra de café da história, ficando atrás da safra de 2012, que foi de 50,8 milhões de sacas. A previsão indica um acréscimo de 13,6% a 20,1% em relação à safra de 2016 que foi de 43,24 milhões de sacas produzidas no país.

Tendo em vista a disponibilidade dessa biomassa na economia e na cultura do brasileiro, a oportunidade de se explorar mais afundo os seus potenciais são totalmente satisfatórios tendo em vista seus potenciais químicos para a geração de energia e seu potencial como produto principal nas mesas dos brasileiros e da população mundial como um todo.

A borra de café, assim como outras biomassas, pode gerar eletricidade em ciclos de cogeração, a partir da combustão em fornalhas, gerando energia na forma de calor, utilizado para a produção de vapor, que por sua vez é utilizado para a produção de energia elétrica a partir da conversão da energia mecânica das turbinas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho partiu da observação da oportunidade em se otimizar os processos energéticos em uma fábrica de café, analisando a implantação de um equipamento à vapor ou a gás natural de geração de energia elétrica caracterizando assim um sistema de cogeração.

Diante de um cenário onde a incerteza em relação ao abastecimento de energia elétrica é crescente, faz-se pensar sobre o investimento em produção descentralizada, motivando o estudo em questão, que tem como objetivo principal o maior aproveitamento dos resíduos (borra do café) gerando energia elétrica fazendo com que se utilize menos a energia vinda das linhas de transmissão.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo geral, a análise e avaliação da implantação do processo de cogeração, utilizando biomassa como fonte energética de uma indústria produtora de café solúvel. Para isso será feita análise da viabilidade técnica do ciclo de cogeração dentro da operação da fábrica. Este estudo visa o melhor aproveitamento dos recursos naturais, tais como reuso de resíduo do processo e economia no custo de energia elétrica.

1.2.2 Específico

Este trabalho tem como diretrizes:

- Aplicar modelo de análise de ciclo com cogeração em uma indústria de produção de café solúvel localizada na região de Campinas.
- Propor dois modelos de cogeração, sendo a primeira representada pelo ciclo à vapor e a segunda pelo ciclo a gás.
- Propor recomendações para trabalhos futuros.

1.2.3 Específico

O estudo em análise está dividido em 5 capítulos e apresenta-se conforme a estrutura a seguir:

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

O segundo capítulo relata a revisão bibliográfica embasada em conceitos termodinâmico e principais equipamentos utilizados em ciclos de cogeração, além dos processos e as demandas energéticas de uma fábrica de café.

No terceiro capítulo é apresentado o processo metodológico da pesquisa, assim como as ferramentas necessárias para a coleta de dados que são fundamentais na obtenção do resultado, além da apresentação dos dados referentes a fábrica em estudo.

No quarto capítulo foram relatadas as discussões e resultados encontrados por meio da coleta de dados.

Por fim, o quinto capítulo abrange as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros que darão continuidade a implementação deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são fundamentados os conceitos teóricos que darão base ao estudo em questão. Nele são apresentados o cenário em que se encontra a matriz energética brasileira e suas projeções futuras de demanda, os conceitos relacionados ao sistema de cogeração (processos e equipamentos utilizados nesta análise), além do processo de fabricação e industrialização do café solúvel e por fim é configurada a metodologia de um projeto de sistema térmico.

2.1 O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

A análise da matriz energética é fundamental para orientar o planejamento do setor energético (que reúne as atividades ligadas a produção, transporte, inovação, manejo e venda de produtos energéticos de um país ou região) com a finalidade de garantir a produção, a segurança energética e o uso adequado da energia disponível (ENERGÉTICA, 2007).

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) possui características singulares que são usadas de base para que seja traçado o planejamento do país. As dimensões continentais fazem necessário a descentralização da produção de energia elétrica, tendo uma interligação plena entre as regiões a partir de um extenso sistema de linhas de transmissão de longa distância. O relevo caracterizado por vales e morros, no qual representam abundância em energia potencial de rios na forma de quedas d'água além da diversidade de bacias hidrográficas que acarreta a predominância de hidrelétricas no país (TOLMASQUIM, 2016).

Em um contexto mundial, tem-se como padrão de geração e consumo de energia baseados em fontes fósseis, o que gera grandes volumes em emissões de poluentes, agravadores do efeito estufa que colocam em risco o suprimento a longo prazo no planeta. Com o passar dos anos as preocupações neste assunto se intensificam e os estudos e implementações de energias renováveis se tornaram realidade. Nesse sentido, o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo devido aos recursos naturais dispostos (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

Segundo dados obtidos do Instituto de Economia Agrícola (IEA - 2015) e do Plano Nacional de Energia (PNE-2030) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), as estruturas de ofertas primárias de energia global e no Brasil, em 2014, são muito dependentes do petróleo e demais combustíveis fósseis, entanto estão previstas variações que indicam

menor dependência nas próximas décadas. Estima-se variação de -9,4% no Brasil até 2030 e -7,2% no mundo até 2040 (ENERGÉTICA, 2007).

As conquistas em energias renováveis alcançadas no setor elétrico decorrem fundamentalmente da revisão do marco regulatório e institucional, que resultou em condições favoráveis aos investimentos, como se demonstra na competitividade dos recentes leilões de geração de energia eólica e hidrelétrica (usinas do Rio Madeira e de Belo Monte) (TOLMASQUIM, 2012).

A matriz energética brasileira é referência mundial e continuará a ser nos próximos anos. Atualmente o país já conta com forte participação das fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, etanol, biomassa, entre outras), contará com uma predominância ainda maior dessas fontes dentro de um prazo de dez anos.

O estudo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2020), desenvolvido pela EPE, aponta para uma participação das fontes renováveis de 46,3 % em 2020 ante os 44,8 % apresentados em 2010. Dessa forma, o Brasil se manterá como o país de matriz mais limpa no mundo. Essas mudanças podem ser vistas a partir da figura 1. (TOLMASQUIM, 2012).

Figura 1 – Evolução da oferta de energia interna



Fonte: Tolmasquim (2012)

De acordo com o planejamento energético brasileiro de médio prazo, a hidroeletricidade sofrerá uma leve queda da participação, assim como a lenha e o carvão vegetal. Por sua vez, fontes a partir de biomassas como os derivados da cana-de-açúcar entre outros, ganharão participação na matriz (ENERGÉTICA, 2007).

Dessa forma a biomassa de café se mostra uma boa alternativa na produção energética. Na figura 2 está exposto a representatividade do café em meio as principais culturas agrícolas no estado de São Paulo, local onde está instalada a fábrica que será estudada neste trabalho.

Figura 2 – Principais culturas agrícolas do Estado de São Paulo

CULTURA AGRÍCOLA	ÁREA CULTIVADA (ha)
Cana-de-açúcar	3.890.414
Milho	904.147
Laranja	584.096
Soja	475.973
Café	207.914
TOTAL	6.062.544

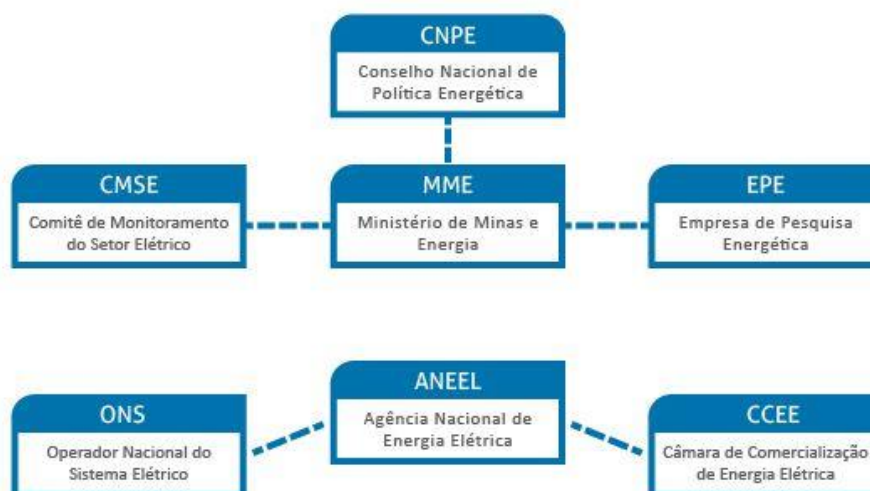
Fonte: IBGE (2017)

2.2 COMÉRCIO DE ENERGIA ELÉTRICA

A comercialização de energia elétrica pode acontecer de forma livre ou com preços e quantidades definidos ou limitados pelo Poder Público. No âmbito do Sistema Interligado Nacional - SIN, as duas formas são operacionalizadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE ANEEL(2018).

Na Figura 3 estão apresentados os órgãos responsáveis pela regulação de toda a cadeia de produção e consumo de energia elétrica no Brasil.

Figura 3 – Órgãos reguladores de energia elétrica no Brasil



Fonte: CCEE (2018)

A CCEE foi criada em março de 2004 e regulamentada em 12 de agosto e tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica no mercado de energia brasileiro. Para garantir o fornecimento e estimular a competitividade de preços e a modicidade tarifária é que existem os dois ambientes de compra e venda de energia, a compra via concessionária ou a compra no mercado livre de energia (MAGALHÃES, 2009).

A ponta dessa cadeia, os agentes de geração de energia são compostos por mais de mil usinas de diversos portes e tipos, podendo ser produtores independentes concessionárias de serviços públicos, ou autogeradores. Os agentes de distribuição compram energia dos geradores e a repassam aos consumidores (MAGALHÃES, 2009).

A população pode apenas comprar energia de seu distribuidor local, porém existem os consumidores livres, que são representados pelas fábricas e grandes empreendimentos que tem um consumo de energia muito elevado, podem optar pelo mercado livre de energia, comprando energia diretamente dos geradores ou comercializadores (BERGER, 2010).

Os agentes de comercialização compram a energia dos geradores e a revendem para consumidores livres ou distribuidores fazendo o intermédio da negociação que seja melhor para ambas as partes.

Como especialistas eles auxiliam os consumidores que querem migrar para o mercado livre em análises de viabilidade (BERGER, 2010).

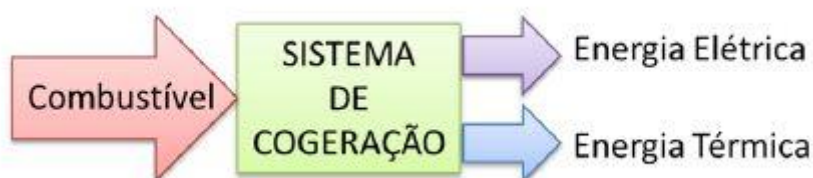
Existem três tipos de ambientes de negociação para comercialização de energia, que são: ambiente regulado, mercado livre e mercado de curto prazo. O ambiente regulado existe para atender a demanda dos distribuidores que só podem comprar energia por meio de leilões online realizados CCEE delegados pela ANEEL. O Mercado livre, onde geradores, consumidores e comercializadores tem liberdade para negociar de forma bilateral a compra e venda de energia, estabelecendo volumes preços e prazos. Por fim existe o Mercado de curto prazo, que contabiliza as diferenças entre o que foi contratado e o que foi consumido. No caso de excedentes e déficits esse mercado serve para atingir o equilíbrio entre consumo e produção (CCEE, 2018).

2.3 COGERAÇÃO

2.3.1 Aspectos e Definições Gerais

A cogeração é definida como o processo de produção de energia combinada de calor útil (vapor, água quente, água gelada, ar quente e frio) e potência (elétrica ou mecânica), com uso sequencial da energia liberada a partir da queima de uma mesma fonte primária de combustível. Este conceito pode ser aplicado em qualquer ciclo termodinâmico, como Rankine, Brayton ou Combinado por exemplo. Partindo desse conceito pode-se concluir que a cogeração aproveita uma parcela da energia que seria obrigatoriamente rejeitada para o ambiente, prevista na Segunda Lei da Termodinâmica, resultando em um aumento da eficiência global do ciclo. A figura 4 mostra de forma esquemática esse entendimento. (AZEVEDO, 2001)

Figura 4 – Cogeração de Energia



Fonte: Brasil (2005)

A Cogeração também pode ser entendida como uma solução de engenharia aplicável para certos tipos de usuários de energia, sendo capaz viabilizar a autoprodução, e até ser comercializada. Sua vantagem é a possibilidade do uso de diversas fontes energéticas, podendo ser de origem fóssil como derivados do petróleo, gás natural, entre outros, ou de origem renovável, como no caso das biomassas.

As importantes modificações na disponibilidade e nos custos da energia, que tiveram início a partir de 1973, com o primeiro choque do petróleo, resultaram no incentivo à racionalização do uso da energia e dos combustíveis nobres e nas desregulações do setor elétrico de alguns países ao longo das últimas três décadas, reestabelecendo a importância da tecnologia de cogeração. Nos Estados Unidos, a publicação do PURPA (*Public Utilities Regulatory Policy Act*), em 1978, abriu novos horizontes na indústria de geração, na medida em que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica e rompeu a estrutura verticalmente integrada das concessionárias públicas. (LORA; NASCIMENTO et al., 2004)

As novas oportunidades que surgiram a partir das últimas décadas, com o crescente mercado e do investimento em equipamentos e tecnologias para melhoramento da geração

distribuída, desenvolveram-se melhores soluções por parte de muitos fabricantes para implantação dos sistemas decogeração.

Segundo (LEAL; MACEDO, 2004), os principais equipamentos que compõem esses sistemas são aqueles que utilizando um combustível (biomassa e/ou óleo combustível e gás natural) produzem energia mecânica, para mover um gerador que produz eletricidade e, complementarmente outros equipamentos produzem energia térmica (calor e frio). Entre outros podemos relacionar os seguintes:

- Motores a combustão (ciclo Otto ou Diesel);
- Caldeiras que produzem vapor para as turbinas a vapor;
- Turbinas a gás natural;
- Caldeira de recuperação e trocadores de calor;
- Geradores elétricos, transformadores e equipamentos elétricos associados;
- Sistemas de *chillers* de absorção, que utilizam calor (vapor ou água quente) para produção de frio (ar condicionado);
- Sistemas de ciclo combinado (turbinas a vapor e gás natural) numa mesma central.

Alguns destes equipamentos serão discutidos posteriormente no capítulo 2.5

2.3.2 Critério para ser um Cogrador

Até o início da década de 1980 a legislação referente à autoprodução de energia elétrica era genérica e não viabilizava uma maior produção. Além disso, não havia distinção entre a cogeração e a geração exclusiva de eletricidade. (VELÁZQUEZ, 2000)

Somente em julho de 1995 foi criada uma lei que trata da produção independente de energia elétrica. Essa lei garante o uso das redes de distribuição e transmissão mediante pagamento definido pela ANEEL. (VELÁZQUEZ, 2000)

Segundo o artigo 3 da lei 9.648 de 1998 cabe a ANEEL regular as tarifas e estabelecer as condições gerais do acesso e uso dos sistemas de transmissão e de distribuição (LAMAS, 2010).

Na resolução 281/1999 da ANEEL, o Art. 18 diz que: os encargos de conexão aos sistemas de transmissão ou de distribuição serão de responsabilidade dos usuários. Sendo que os encargos de conexão serão objeto de negociação entre as partes deverão cobrir os custos

incorridos com o projeto, a construção, os equipamentos, a medição, a operação e a manutenção do ponto de conexão (LAMAS, 2010).

Não existem procedimentos de distribuição regulados pela ANEEL, o que gera obrigações cruzadas. Para o gerador, construir linhas e redes é uma desvantagem, uma vez que os custos são altos e os investimentos poderiam ser usados para melhorar a eficiência na produção de energia. Sendo as linhas e redes construídas pelo distribuidor, os investimentos e as tarifas são regulados pelas ANEEL, gerando menos custo ao consumidor (LAMAS, 2010).

2.3.3 Vantagens e Desvantagens

De acordo com Balestieri (2002), pode-se destacar vantagens de utilização da cogeração como mostrado abaixo:

As principais vantagens da cogeração podem ser avaliadas pelos seguintes fatores:

- Menor custo de energia (elétrica e térmica);
- Maior confiabilidade de fornecimento de energia;
- Melhor qualidade da energia produzida;
- Evitar custos de transmissão e de distribuição de eletricidade;
- Maior eficiência energética;
- Menor emissão de poluentes (vantagens ambientais);
- Criar novas oportunidades de trabalho e de negócios.

E as desvantagens:

- O investimento muitas vezes pode não ser rentável economicamente, tendo risco de longo prazo de retorno;
- Mudanças no processo de produção pode mudar o fator de cogeração [Calor/Eletricidade],isso impacta custos adicionais;
- Tempo de retorno de investimento alto;
- Problemas com barulho e poluição.

2.4 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS ENVOLVIDOS NAS COMPOSIÇÕES DOS CICLOS

Neste tópico será discutido alguns princípios teóricos que serão tratados na elaboração deste estudo, bem como as Leis Fundamentais da Termodinâmica e o uso dos ciclos Rankine e Brayton em processos de geração de energia.

2.4.1 Equações termodinâmicas

Nessa seção serão abordados alguns dos conceitos clássicos sobre as leis fundamentais da termodinâmica.

A análise de sistemas e processos pela Primeira Lei da Termodinâmica baseia-se na conservação da energia e massa. As equações que representam os processos são ajustadas para volumes de controle com fluxo de massa em cada subsistema que compõe o ciclo (SHAPIRO; MORAN, 2002).

A lei de conservação da massa considera o sistema em regime permanente, incluindo apenas o fluxo que entra e sai do volume de controle, desprezando a variação de massa no seu interior. Portanto, a lei estabelece que a taxa temporal de variação da massa contida no interior do volume de controle no instante t será igual a taxa temporal de fluxo de massa através da entrada e no instante t menos a taxa temporal de fluxo de massa através da saída s no instante t (SHAPIRO; MORAN, 2002). Matematicamente, a lei é representada pela equação 1:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

Para um volume de controle em regime permanente a identidade da matéria no interior do volume de controle varia continuamente, mas a quantidade total presente em qualquer instante permanece constante. Assim a equação 1 para um volume de controle pode ser reescrita como:

$$\sum \dot{m}_s - \dot{m}_e = 0 \quad (2)$$

Onde:

- $\dot{m}_e$: Vazão mássica que entra no volume de controle (kg/s);
- $\dot{m}_s$: Vazão mássica que sai do volume de controle (kg/s).

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a taxa temporal de variação da energia contida no interior do volume de controle no instante t , será igual a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro por transferência de calor no instante t , menos a

taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para fora por trabalho no instante t , mais a taxa líquida da energia transferida para o volume de controle juntamente com o fluxo de massa (SHAPIRO; MORAN, 2002). Desta forma, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita como:

$$\frac{Edt_{v,c}}{dt} = \dot{Q}_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3)$$

Onde:

- g : Aceleração gravitacional (m/s^2);
- h_e : Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/Kg);
- $\dot{Q}_{v,c}$: Potência térmica no volume de controle (kW);
- V_e : Velocidade da vazão mássica na entrada do volume de controle (m/s);
- V_s : Velocidade da vazão mássica na saída do volume de controle (m/s);
- $\dot{W}_{v,c}$: Taxa de transferência de trabalho no volume de controle (kW);
- z_e : Cota da vazão mássica na entrada do volume de controle.

Considerando desprezíveis as taxas de energia cinética e potencial no volume de controle, podemos reescrever a equação 3 como:

$$\dot{Q}_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (4)$$

O rendimento de um volume de controle baseado na primeira lei da termodinâmica relaciona o trabalho realizado e o trabalho produzido considerando um processo isentrópico desde a entrada até a saída do volume de controle. Um processo isentrópico é aquele que ocorre à entropia constante durante todo o processo, sendo este, necessariamente, adiabático e reversível.

$$\eta_{vc} = \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m} \Delta h_{iso}} \quad (5)$$

Onde:

- η_{vc} : Eficiência do volume de controle;
- $\dot{W}_{vc}$: Trabalho realizado pelo volume de controle (kW);
- $r \frac{Edt_{v,c}}{dt} = \dot{Q}_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$
- Δh_{iso} : Variação de entalpia da entrada e saída para processo isentrópico do volume de controle (kJ/kg).

$$\frac{Edt_{v,c}}{dt} = \dot{Q}_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

A caldeira representa um caso específico para a determinação da eficiência pela primeira lei da termodinâmica, que é determinada através da equação a seguir:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} h_{\text{vapor}} - \dot{m}_{\text{água}} h_{\text{água}}}{\dot{m}_c \text{ PCI}} \quad (6)$$

Onde:

- $\dot{m}_{\text{vapor}}$: Vazão mássica de vapor na saída da caldeira (kg/s);
- h_{vapor} : Entalpia do vapor na saída da caldeira (kJ/kg);
- $\dot{m}_{\text{água}}$: Vazão mássica de água na entrada da caldeira (kg/s);
- $h_{\text{água}}$: Entalpia da água na entrada da caldeira (kJ/kg);
- $\dot{m}_c$: Vazão mássica do combustível consumido na caldeira (kg/s);
- PCI: Poder calorífico Inferior.

A Segunda Lei da Termodinâmica, concebida no trabalho teórico de Carnot, em 1824, é de fundamental importância para o estudo de sistemas térmicos. A partir das considerações expressas por Carnot, definiu-se o conceito de entropia de modo a caracterizar a condição de irreversibilidade dos fenômenos físicos. Pode-se deduzir que $T ds \geq \delta Q$, isto é, o produto da variação entrópica pela temperatura absoluta tomada em um ponto de referência deve ser superior (na condição irreversível) ou no máximo igual (na condição reversível) à variação do calor em um processo.

A 2ª Lei da Termodinâmica pode ser estabelecida pela relação (SHAPIRO; MORAN, 2002):

$$s_2 - s_1 = \Delta s \geq \frac{\delta Q}{T} \Leftrightarrow T ds \geq \delta Q \quad (7)$$

Sendo que a igualdade se presta aos processos reversíveis (ideais) e a desigualdade aos processos irreversíveis (reais). A variável entropia (s) representa uma propriedade termodinâmica [kJ/kg. K] que $\eta = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} h_{\text{vapor}} - \dot{m}_{\text{água}} h_{\text{água}}}{\dot{m}_c \text{ PCI}}$ eficiência de um sistema.

2.4.2 Ciclos Termodinâmicos

Nessa seção serão apresentadas algumas configurações básicas dos principais ciclos termodinâmicos assim como suas configurações e diagrama de Temperatura x Entropia (TxS).

2.4.2.1 Ciclo Rankine

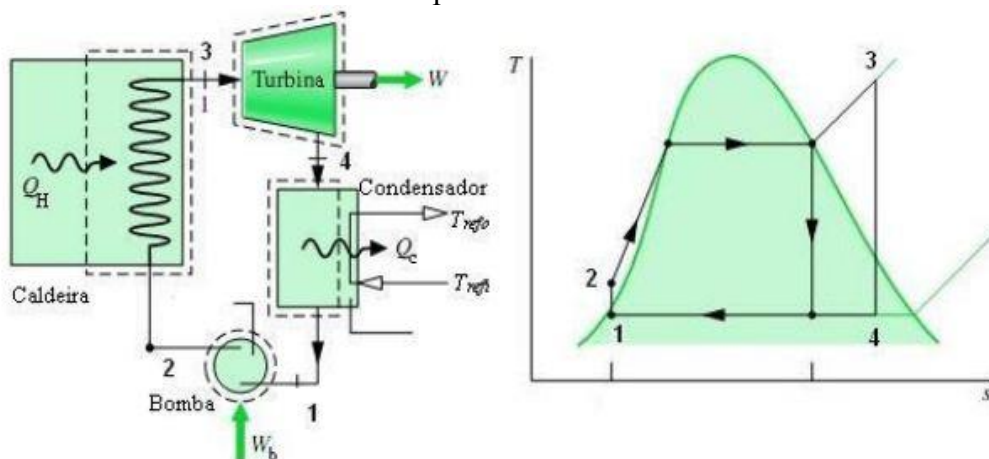
De acordo com (WYLEN, 2003) o Ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico ideal para centrais termelétricas a vapor, que funciona basicamente convertendo calor em trabalho. O calor é fornecido por uma caldeira, e o trabalho útil é gerado a partir do giro de eixo de uma turbina.

Este ciclo é utilizado em usinas de geração elétrica a partir da queima de combustíveis fósseis para que se obtenha calor, partindo do princípio que quanto maior a temperatura, melhor a produção de energia.

Sua operação pode ser vista na figura abaixo. Pode-se observar como o processo funciona para um ciclo fechado, com um aumento de pressão da água pela bomba (segmento 1-2) aumento da temperatura da água até a saturação (segmento 2-2'), alteração de fase na caldeira (segmento 2'-3'), superaquecido (segmento 3'-3), expansão adiabática na turbina (segmento 3-4), e por fim o processo de condensação do vapor no condensador (segmento 4-1). (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015)

A Figura mostra esquematicamente uma unidade de geração de energia que utiliza o ciclo Rankine como princípio de funcionamento. Esta unidade, basicamente contém 4 equipamentos: A bomba hidráulica e a Turbina a vapor, que consomem e geram potência e dividem o sistema em zonas de alta e baixa pressão, a caldeira e o condensador de vapor, que são responsáveis por fornecer e retirar energia do sistema na forma de calor. Neste exemplo, a turbina aciona um gerador elétrico que converte energia mecânica em eletricidade (SHAPIRO; MORAN, 2002).

Figura 5 – Unidade térmica geradora a vapor com superaquecimento e diagrama T-s correspondente



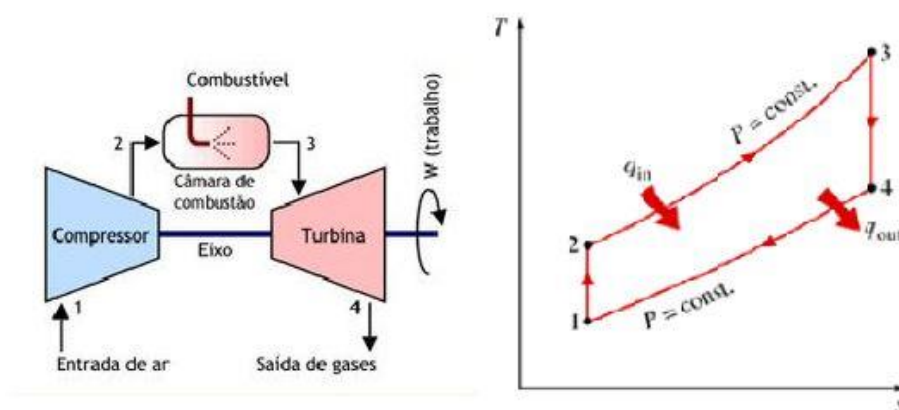
Fonte: Stuchi; Taconelli; Langhi, (2015)

2.4.2.2 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton é um ciclo termodinâmico ideal para centrais termelétricas que operam com conjuntos a gás no qual descreve variações do estado (pressão e temperatura) dos gases. Em seu modelo teórico são levadas em conta algumas hipóteses que servem como condições iniciais, como: O fluido de trabalho deve ser o mesmo durante o ciclo, todos os processos são ideais (sem perdas) e o ciclo opera em regime permanente.

O ciclo se constitui de quatro etapas, como demonstrado abaixo pela figura 6. Entre 1 e 2 o ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde por compressão adiabática e isotrópica ocorre o aumento de temperatura e consequente aumento de entalpia. Comprimido, o ar é direcionado às câmaras, entre 2 e 3, onde é misturado ao combustível possibilitando sua queima e seu aquecimento tendo sua pressão constante. Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura, se expandem conforme passam pela turbina, entre 3 e 4. Na medida em que o fluido fornece o trabalho sobre as palhetas, reduzem-se a pressão e temperatura dos seus gases, gerando-se potência mecânica. A potência extraída através do eixo da turbina é usada para acionar o compressor. A quarta etapa representa a transferência de calor do fluido para o ambiente em que se encontra. Dessa forma, mesmo se tratando de um ciclo aberto, parte da energia gerada pela combustão é eliminada por forma de calor nos gases quentes fluindo como escape. A rejeição de calor é um limite físico, intrínseco ao funcionamento de Ciclo termodinâmico, mesmo nos casos ideais, como define a Segunda lei da termodinâmica.

Figura 6 – Princípio de Funcionamento do Conjunto a gás e seu diagrama T-s correspondente



Fonte: Shapiro; Moran (2002)

2.5 EQUIPAMENTOS

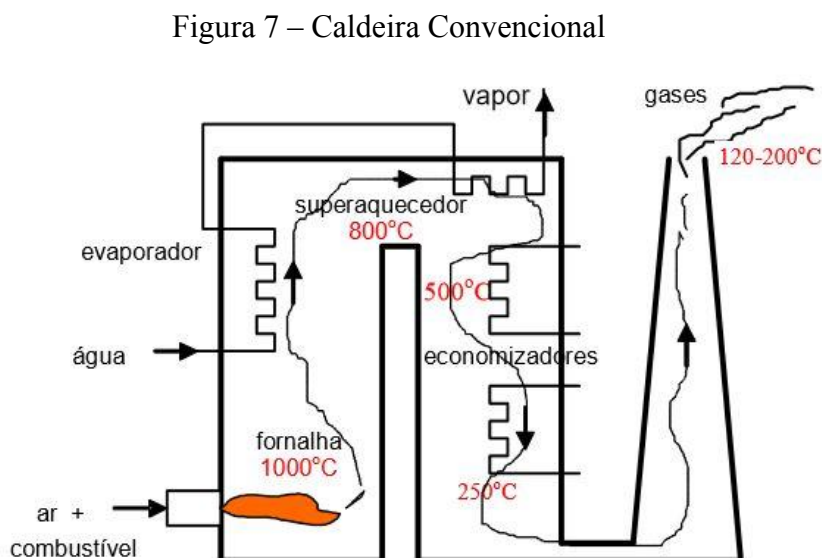
A parte básica de uma estação de Cogeração são as máquinas e tecnologias envolvidas na produção de eletricidade e energia térmica na forma de vapor. Serão apresentados de forma detalhada cada equipamento desenvolvendo suas características tecnológicas e físicas que fazem parte da estrutura do ciclo.

2.5.1 Caldeiras

Caldeiras são equipamentos que permitem a geração de formas de energia térmica de alto valor energético com aplicação tanto em nível industrial quanto comercial ou residencial, sendo vapor e a água quente de pressão elevada os subprodutos que se originam a partir do calor liberado pela queima de um combustível ou pelo calor recuperado de outras fontes (geralmente gases quentes). (VELÁZQUEZ, 2000)

As caldeiras que aproveitam o calor dos gases de escape de fornos ou de outros produtos da tecnologia que liberam energia térmica são classificadas como caldeiras de recuperação. Esse grupo de caldeiras é comumente aplicado em ciclos a gás onde aproveitam a energia dos gases com alto valor energético, que após serem usados nas turbinas seriam descartados no ambiente. Esses gases passam por trocadores de calor e dessa forma transferem uma parcela da sua energia para água dentro desta caldeira.

A figura 7 apresenta as etapas de aquecimento da água até tornar-se vapor superaquecido em uma caldeira convencional:



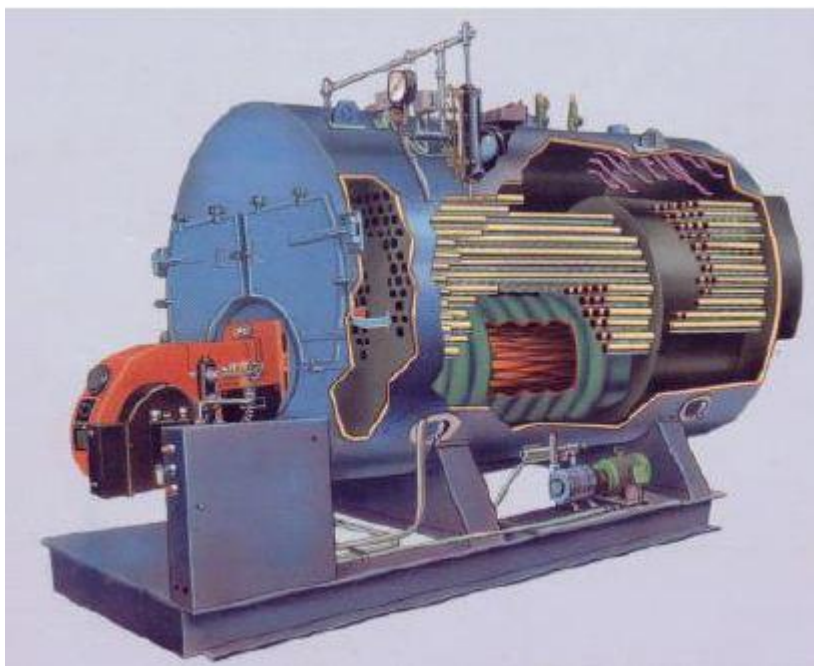
Fonte: Balestieri (2002)

As caldeiras podem fazer uso de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, o que lhes garante uma excelente flexibilidade operacional, além de poderem estar associadas aos ciclos de vapor de unidades nucleares. Dependendo do tipo de combustível, variam as características de projeto e os componentes básicos da instalação de vapor.

Esse sistema pode ser classificado a partir de termos construtivos como compactos no qual possuem capacidade reduzida e podem operar em pequenas indústrias ou em baixa demanda no setor terciário, ou industrial que seriam as que atendem a grandes empreendimentos e são montadas em campo.

Outro fator classificatório são as relações de fluxo de água e gases. As caldeiras flamo tubulares tem como característica a passagem dos gases da combustão através de tubos imersos em água. Os tubos, por sua vez, aquecem a água, criando o vapor. Trata-se de um tipo de caldeira com construção mais simplificada em relação à distribuição de tubos, podendo classificá-los em verticais e horizontais. (CESPEDES; JUNIOR, 1997)

Figura 8 – Caldeira Flamotubular



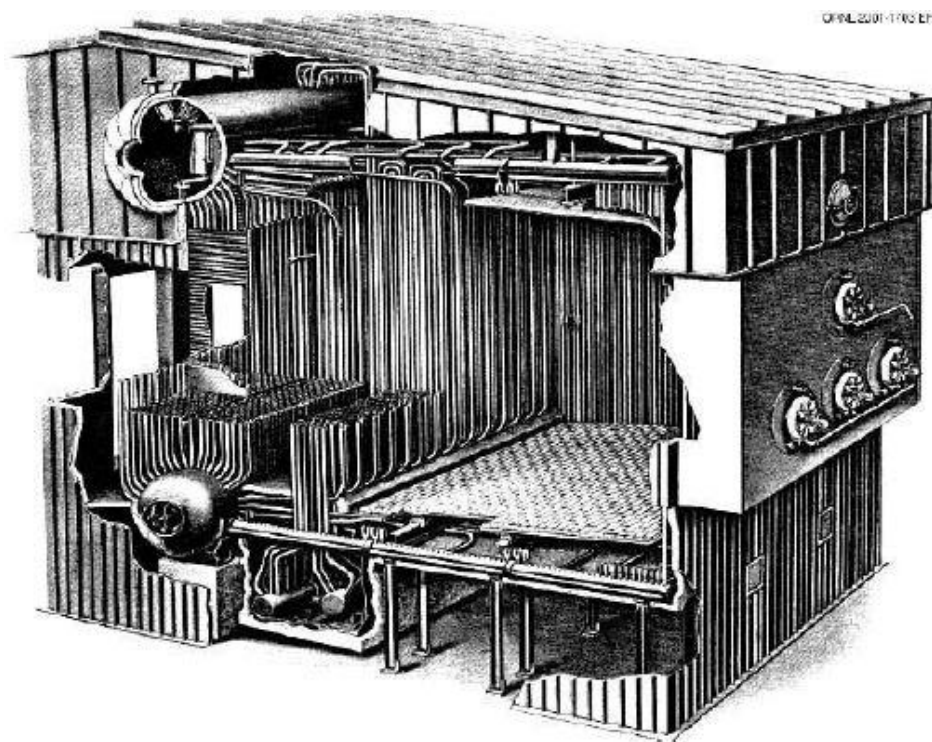
Fonte: Balestieri (2002)

As caldeiras flamo tubulares são fabricadas para operarem até 2.500 kPa, e com vazões de até 25 toneladas de vapor por hora. Acima destas condições torna-se inviável a sua fabricação, devido às elevadas espessuras de chapas necessárias. São caldeiras que

apresentam custos de manutenção menores se comparados com as aquatubulares. A figura 8 apresenta um exemplo deste equipamento. (BRASIL, 2005)

Nas caldeiras aquatubulares a água passa dentro dos tubos, e os gases de combustão por fora dos mesmos. São equipamentos que podem ser fabricados para pressões e vazões elevadas, podendo gerar vapor saturado e superaquecido. São particularmente aplicadas onde se utilizam turbinas a vapor para geração de energia elétrica em instalações de grande capacidade. Isto se deve ao fato de este sistema de troca térmica permitir maiores níveis de pressão (podendo superar a pressão crítica da água, de 28 MPa, sendo então chamadas de caldeiras supercríticas). Uma característica importante nestas caldeiras é a necessidade de um rigoroso tratamento de água, com baixos teores de sais e pH controlados em função da pressão de operação. Qualquer incrustação, por menor que seja, pode provocar o rompimento dos tubos. Um sistema muito utilizado é a desmineralização da água, que pode ter diversas tecnologias. Um deles é a passagem da água por resinas de propriedades específicas (acidez ou alcalinidade forte), com a retenção dos sais minerais contidos na água. A figura 9 apresenta um exemplo da configuração da caldeira aquatubular. (PERA, 1990)

Figura 9 – Caldeira Aquatubular



Fonte: Balestieri (2002)

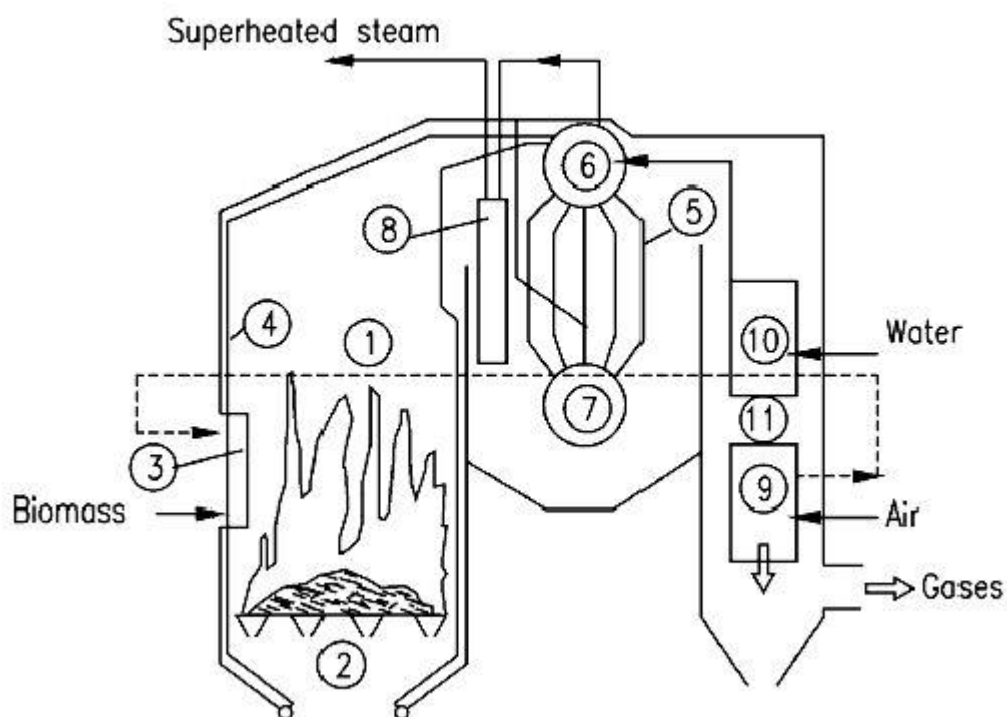
A fornalha é a parte da caldeira onde se converte a energia química do combustível em energia térmica. Para biomassa e em unidades de pequeno ou de médio porte se utilizam as fornalhas com grelhas. (SILVA; SILVA, 2008)

A combustão em uma fornalha para queima em grelhas é mostrada na Figura abaixo. A região de secagem (eliminação da umidade), a Pirólise (decomposição térmica), a combustão dos voláteis e a combustão do coque. (SILVA; SILVA, 2008)

As grelhas inclinadas são aplicáveis a qualquer tipo de biomassa, mesmo em casos onde a umidade é superior a 50%. São usadas na queima de cavacos de lenha, resíduos florestais, resíduos industriais, cascas de cereais e outras biomassas (PERA, 1990). As grelhas podem ser fixas ou móveis, para facilitar o escoamento da biomassa a ser queimada e a retirada das cinzas resultantes do processo de combustão. (SILVA; SILVA, 2008)

O ar que atravessa o leito (ar primário) tem a função de refrigerar as grelhas e promover uma distribuição uniforme em todo o combustível.

Figura 10 – Partes principais de uma caldeira aquatubular a biomassa.



Fonte: Brasil (2005)

Conforme observado na figura acima, as partes principais de uma caldeira aquatubular são:

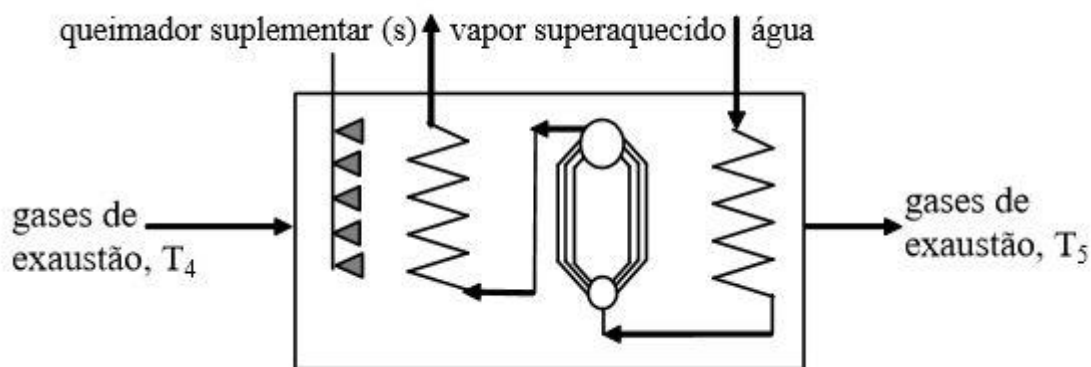
1. Fornalha: Câmara para a combustão da biomassa;
2. Grelha: Sistema que suporta a biomassa a ser queimada, distribuindo o ar primário e garantindo a retirada das cinzas;
3. Alimentadores de biomassa: Fornece o material a ser queimado na fornalha, distribuindo o mesmo de forma homogênea nas grelhas;
4. Paredes de água: Paredes formadas por tubos, por onde a água circula absorvendo o calor da combustão;
5. Feixe convectivo: Tubos que fazem a ligação do superior e inferior, onde ocorre a evaporação da água com o calor dos gases da combustão (também chamada de superfície evaporativa);
6. Tambor superior: Cilindro que recebe a água de alimentação e a mistura bifásica das superfícies evaporativas, promovendo a separação do vapor e da água. A água desce através dos tubos descendentes e o vapor saturado sai pela parte superior para o superaquecedor;
7. Tambor inferior: Cilindro que coleta a água em evaporação;
8. Superaquecedor Trocador de calor tipo feixe tubular que aumenta a temperatura do vapor saturado, transformando-o em vapor superaquecido.

Existe ainda outro tipo de caldeiras que será abordado neste trabalho por fazer parte da configuração do ciclo de cogeração utilizando conjunto a gás. Neste ciclo é empregado a caldeira de recuperação térmica, ou em inglês "*Heat Recovery Steam Generator*" - HRSG.

A caldeira de recuperação, como o nome já diz, recupera o calor a partir dos gases de exaustão gerados por uma turbina a gás acoplada ao sistema, transferindo essa energia térmica para água, gerando vapor de baixa e média pressão. A otimização do processo de recuperação de calor ocorre quando se combina a geração de energia elétrica com o uso de calor em outro processo de produção, na forma de energia térmica. Esse processo também conhecido como cogeração possibilita uma eficiência de até 90% da energia proveniente do combustível.

A Figura 11 apresenta um esquema da passagem dos gases e da água até se tornar vapor em uma caldeira de recuperação e a figura 12 mostra sua configuração real.

Figura 11 – Esquema de Caldeira de Recuperação Térmica

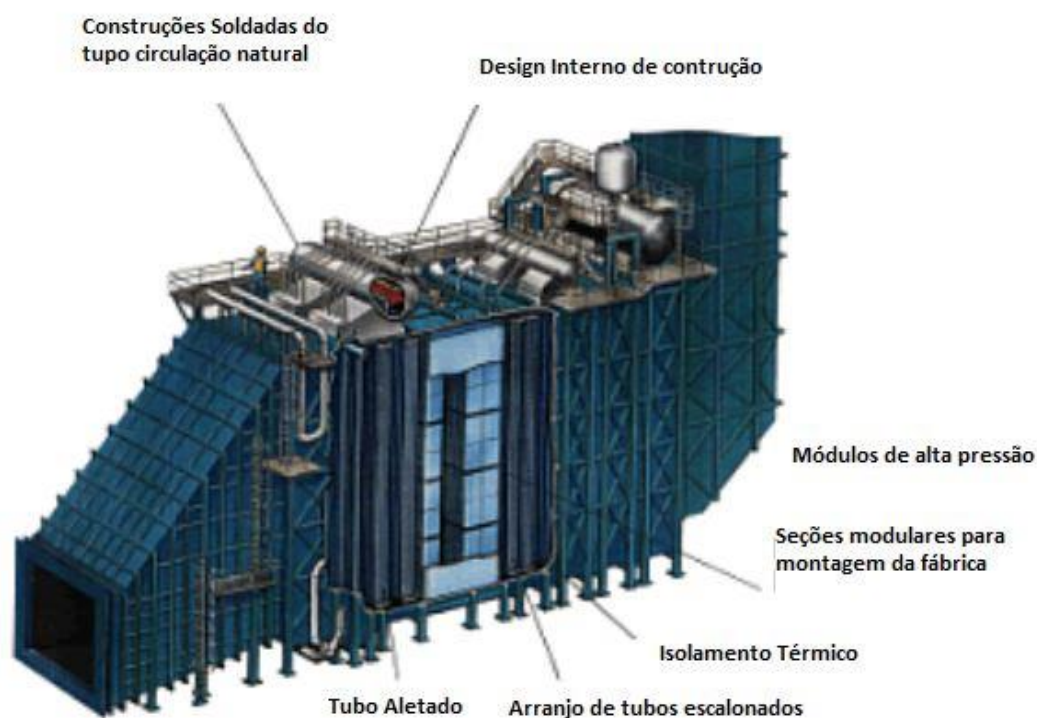


Fonte: Balestieri (2002)

Este equipamento é composto basicamente de 3 trocadores de calor (Economizador, Evaporador e Superaquecedor), podendo existir mais de acordo com as especificações do projeto. O Economizador é responsável por pré-aquecer o líquido fazendo ele atingir uma temperatura inferior à de ebulição, fazendo com que ele esteja hábil para passar para o próximo estágio, a evaporação. O Evaporador é o trocar que fica responsável em transferir o calor necessário para que a água passe da região de saturação e se torne vapor saturado. O Superaquecedor fará com que este vapor saturado alcance os valores determinados temperatura do vapor superaquecido. Em projeto de caldeiras, os parâmetros de pressão e temperatura do vapor são escolhidos de modo que atenda às necessidades dos processos e que seja economicamente viável.

Pensando do ponto de vista da otimização da energia liberada pelo combustível em relação as perdas termodinâmicas prescritas na segunda lei, o uso das caldeiras de recuperação eleva o rendimento térmico deste ciclo, porém o custo de investimento em um empreendimento desse deve ser levado em conta antes de se investir neste projeto. Abaixo é apresentada uma foto representando uma caldeira de recuperação real utilizada na indústria.

Figura 12 – Caldeira de Recuperação real



Fonte: Kawasaki (2018)

2.5.2 Turbinas

Nessa seção serão discutidos os dois principais tipos de turbinas utilizadas em centrais de geração de energia: a turbina a vapor e a turbina a gás.

2.5.2.1 Turbinas a Vapor

Turbina a vapor é uma máquina térmica que aproveita a energia do vapor, produzido a partir da queima de combustível na caldeira sob alta pressão, convertendo-o em trabalho mecânico útil através da rotação das suas pás que irão transmitir o movimento para um eixo central. Quando uma turbina é acoplada a um gerador, obtém-se a transformação da energia mecânica em energia elétrica (BRASIL, 2005).

Uma das grandes vantagens da turbina a vapor é sua flexibilidade em se obter extrações reguláveis na sua seção de fluxo, possibilitando o fornecimento de calor com os parâmetros demandados pelo consumo externo. Isso o faz um equipamento versátil, tornando sua aplicação possível em todos os tipos de projeto (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

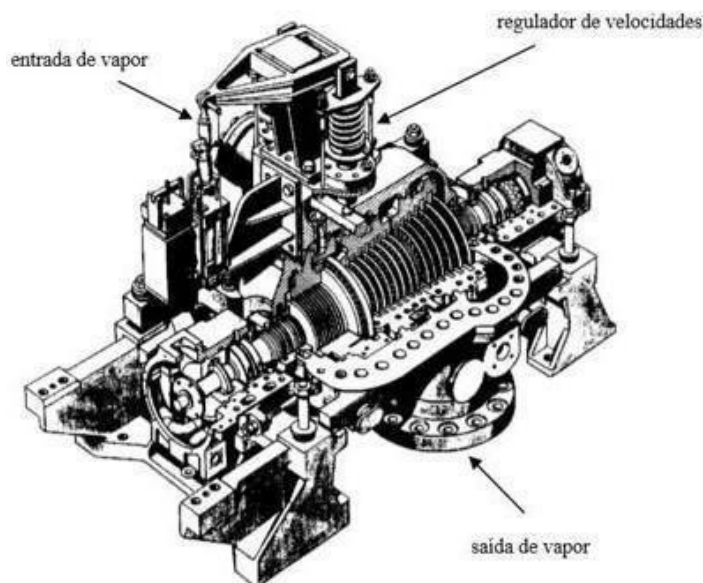
Nessas turbinas, o vapor antes de abastecer o consumo de calor, faz proveito do seu alto conteúdo de energia térmica na turbina durante o processo que produz energia elétrica. Isso faz deste equipamento ser um dos principais dentro dos ciclos de cogeração.

No contexto deste estudo, serão abordadas duas classificações para as turbinas a vapor. Em relação a descarga de vapor, podendo ser classificadas em Turbinas a vapor de contrapressão e Turbinas a vapor de condensação.

As turbinas de contrapressão são recomendadas para processos industriais onde a demanda de calor é aproximadamente igual à demanda de trabalho. Possuem uma regulação que mantém a pressão na saída da turbina constante. O vapor expelido por ela é aproveitado em processos ou descartado na atmosfera. Seu aproveitamento energético é menor do que as turbinas de condensação no que diz respeito geração de trabalho, pois a queda entálpica neste equipamento é menor, por não trabalhar com pressões e temperaturas próximas a zona de saturação (BALESTIERI, 2002).

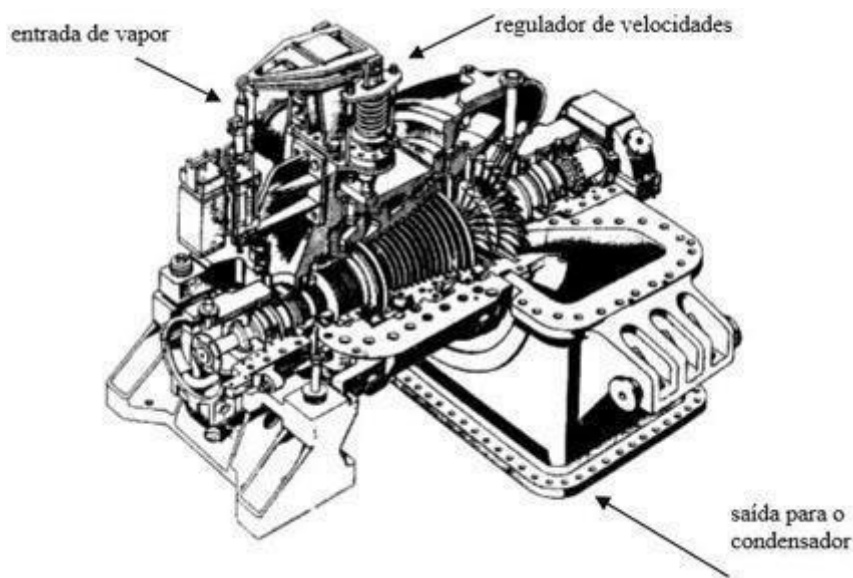
As turbinas de condensação são utilizadas onde se necessita da maior quantidade de energia eletromecânica gerada. Sua saída é conectada a um condensador que opera com um vácuo (pressão abaixo da atmosférica). Desta forma, produzem mais energia elétrica que as de contrapressão para uma mesma vazão, pressão e temperatura do vapor na sua admissão. No comparativo entre as duas figuras a seguir representativas das turbinas é possível observar que a diferença entre elas está na aparição do condensador na segunda foto logo após a saída do último estágio da turbina (BALESTIERI, 2002).

Figura 13 – Turbina a vapor de contrapressão



Fonte: Balestieri (2002)

Figura 14 – Turbina a vapor de condensação



Fonte: Balestieri (2002)

2.5.2.2 Turbinas a Vapor

A turbina a gás é um dos componentes do conjunto a gás que apresenta três equipamentos, sendo eles um compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita. Esta configuração forma um ciclo termodinâmico a gás, cujo modelo ideal é o ciclo Bryton, como discutido no capítulo "ciclos termodinâmicos" traz os parâmetros ideais de funcionamento.

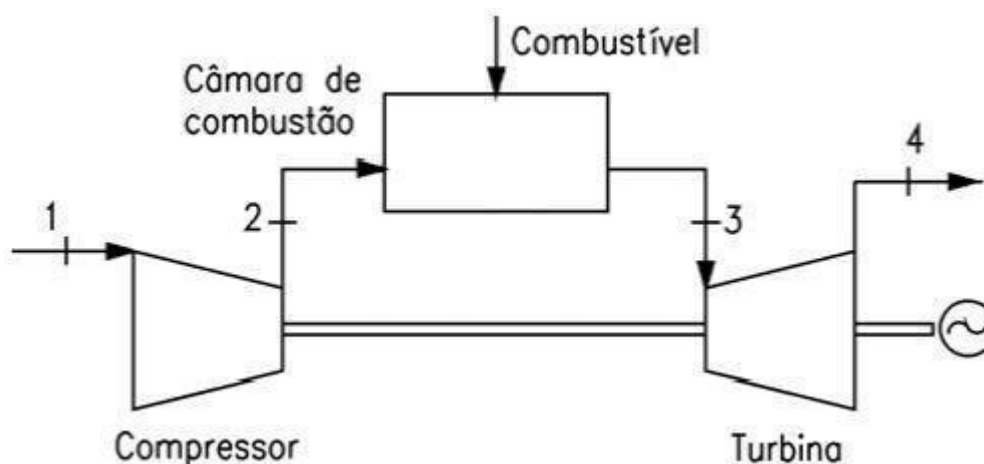
As turbinas a gás são máquinas térmicas onde a energia potencial termodinâmica contida nos gases quentes, que anteriormente passaram pela câmara de combustão, é convertida em trabalho mecânico, ou propulsam a partir da rotação de eixo. Assim como um motor a diesel ou gasolina, a turbina a gás é um tipo de motor de combustão interna e funciona usando o ciclo de admissão, compressão, combustão e escape. Porém a diferença está no movimento básico. Diferente dos motores a turbina a gás tem movimento circular enquanto o pistão tem o movimento "vai e vem" (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Este equipamento pode atuar em ciclo aberto ou ciclo fechado. Operando em ciclo aberto, o fluido de trabalho (ar) é admitido sob pressão atmosférica sofre compressão, em seguida é transferido para câmara de combustão elevando sua temperatura. Na saída da câmara, ele é levado até a turbina e lá sofre expansão. Este processo produz trabalho mecânico que é transmitido para o compressor e utilizado como potência útil na saída da turbina (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

A potência útil máxima que uma turbina a gás pode fornecer se limita devido à resistência térmica dos materiais que compõem o conjunto, em associação com as técnicas de resfriamento. Os fatores fundamentais que afetam o seu funcionamento são: a eficiência dos dispositivos e a temperatura de entrada da turbina.

A imagem 15 ilustra um conjunto a gás operando em ciclo aberto.

Figura 15 – Turbina a gás: Ciclo aberto



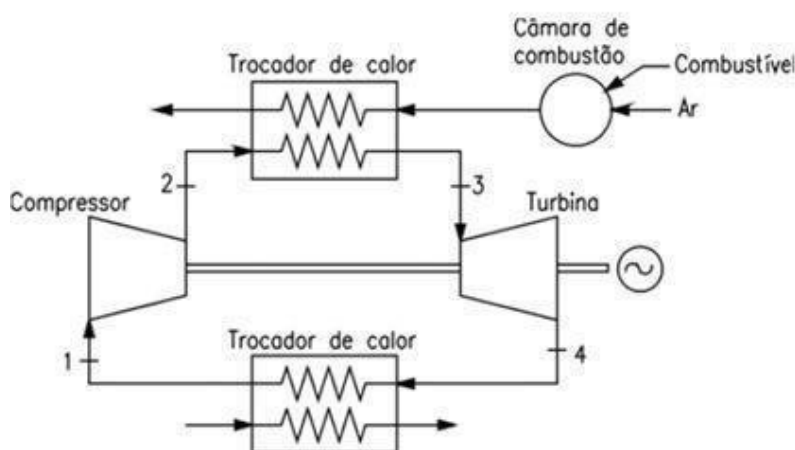
Fonte: Lora et al. (2004)

As turbinas a gás que trabalham em ciclo fechado possuem um processo de operação similar ao do ciclo aberto, no entanto, nesse ciclo, o fluido de trabalho se mantém no interior do sistema enquanto o combustível sofre combustão no exterior do sistema (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Este ciclo é vantajoso por possibilitar o uso de uma pressão elevada em todo o circuito resultando em uma redução das dimensões das máquinas para uma determinada potência útil, além de viabilizar a variação da potência através da alteração do nível de pressão. Além disso, esse tipo de ciclo impede o processo de erosão das palhetas da turbina e extingue a necessidade de filtros de ar (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Uma desvantagem deste ciclo é a necessidade de um sistema externo de aquecimento e para isso é preciso de um ciclo secundário com uma desigualdade de temperatura entre os gases da combustão e o fluido de trabalho. A figura 16 apresenta de forma esquemática o ciclo fechado de uma turbina a gás (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Figura 16 – Turbina a gás: Ciclo fechado



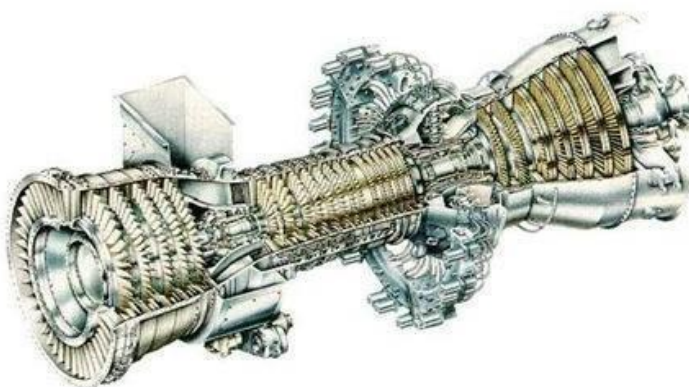
Fonte: Lora et al. (2004)

As turbinas a gás são divididas basicamente em dois tipos: Turbinas aero derivativas e *Heavy Duty*.

As turbinas aero derivativas são turbinas de aeronaves derivadas das turbinas a gás com alteração de projeto. Economicamente é mais vantajoso alterar o projeto desse tipo de turbina do que arquitetar e implementar uma que seja completamente nova (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Essas turbinas são formadas por um gerador de gás proveniente de uma turbina aeronáutica além de uma turbina livre ou de potência. O gerador a gás sofre uma alteração para a queima de um combustível industrial. Esse tipo de turbina possui a característica de ser mais eficiente, apresenta elevada confiabilidade, consome pouco espaço e possui uma relação peso/potência baixa. A figura abaixo mostra uma turbina aero derivativa de 40,7MW (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

Figura 17 – Turbina aero derivativa GE LM6000

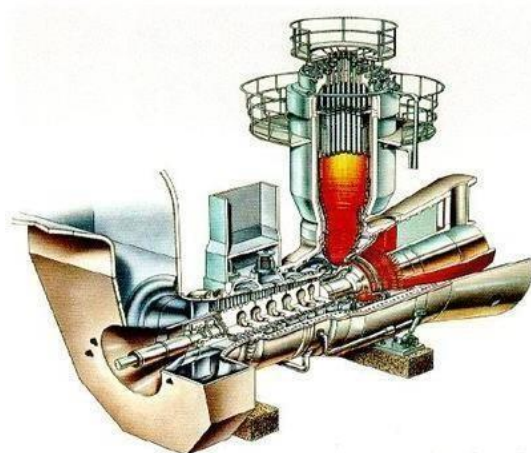


Fonte: Bicalho e Almeida (2001)

Essas turbinas são geralmente utilizadas em plataformas marítimas, bombeamento de gás, potência de pico em centrais termelétricas e propulsão naval.

O segundo tipo de turbinas, as *Heavy Dutys*, são equipamentos com ciclo simples de um eixo e um compressor. A temperatura máxima que esse tipo de turbina pode alcançar é de cerca de 1290 graus célsius. Sua aplicação se dá sobretudo na geração de energia elétrica. A figura 18 apresenta um esquema de turbina *Heavy Duty* de 1448 MW de potência.

Figura 18 – Turbina Heavy Duty ABB GT13E



Fonte: Eckardt; Rufli (2001)

Em relação as faixas de potência as turbinas a gás são divididas segundo a seguinte faixa de potência:

- Pequeno porte de até 1MW. Esse tipo de turbina é composto de um compressor centrífugo de estágio simples, turbina de fluxo radial e de uma câmara de combustão de temperatura máxima de 870 graus célsius.
- Porte médio entre 1MW e 15MW. Este tipo de turbina apresenta projeto semelhante as *heavy duty*. São compostas de dois eixos, sendo mais eficientes. A turbina do gerador de gás usualmente possuiu 2 ou 3 estágios axiais, com mecanismo de resfriamento a ar do primeiro estágio. Elas são aplicadas em plataformas offshore em plantas industriais petroquímicas. Em unidades de cogeração com ciclo combinado, que normalmente fazem o uso de turbinas de médio porte, apresentam eficiência elevada.

- Grande porte, acima de 15MW. Podem ser aero derivativas ou *heavy duty*. As turbo máquinas são majoritariamente axiais e chegam a possuir inúmeros estágios (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

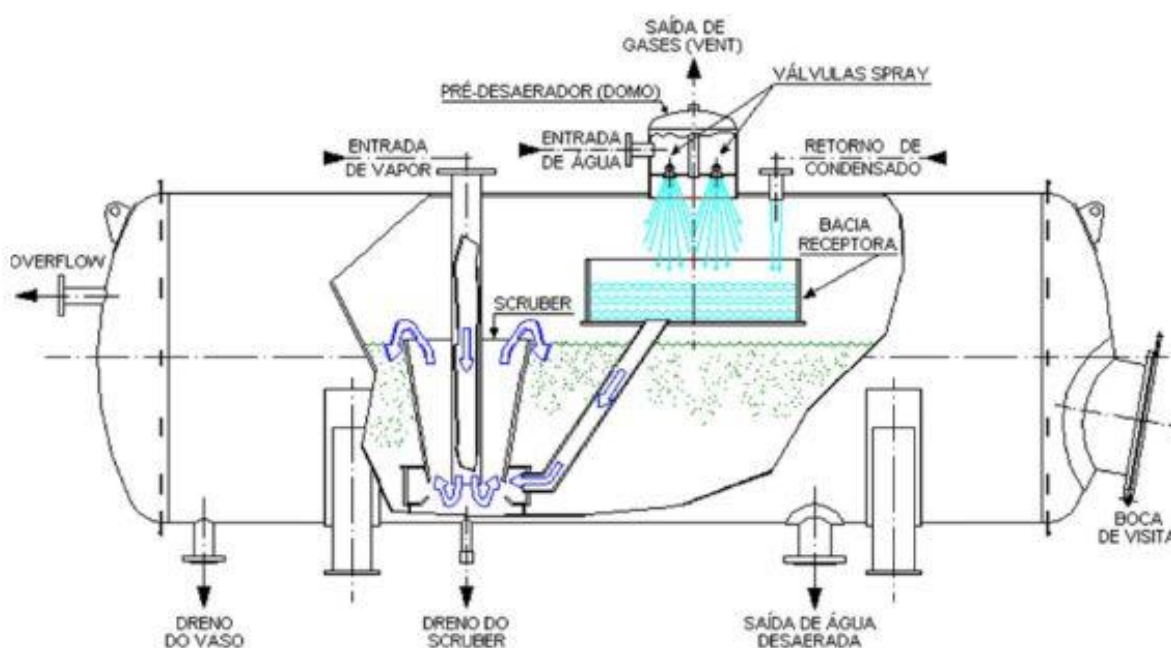
2.5.3 Desaerador

Desaerador é um equipamento que retira gases não condensáveis dissolvidos na água dentro de um circuito térmico. Oxigênio (O_2) e Dióxido de Carbono (CO_2) são exemplo comuns de gases encontrados nesses sistemas. Sua presença pode ocasionar bolhas de ar dentro da tubulação atrapalhando o funcionamento das máquinas.

O equipamento, visto nas figuras 19 e 20, tem um princípio de funcionamento simples. Ele recebe água que tem em sua composição os gases dissolvidos e que precisam ser retirados. Essa água entra em contato com o vapor podendo ser ou pelas bandejas ou pela pulverização, em seguida o vapor aquece a água.

O aumento da temperatura faz com que a solubilidade desses gases diminua, ou seja, fica mais difícil para eles manterem-se misturados à água. Não conseguindo mais se dissolver no líquido, esses gases, então, são expelidos. A figura 19 mostra de forma os componentes que compõem este equipamento.

Figura 19 – Desaerador de forma ilustrativa



Fonte: AQUAFIL (2012)

Além do aumento de temperatura, outro fator que atua no desaerador é a pressão. A solubilidade dos gases na água é afetada diretamente pela pressão parcial que esses mesmos gases fazem no líquido na atmosfera que o circunda.

Isso quer dizer que se a pressão parcial causada por esses gases for diminuída ao redor do líquido, automaticamente, a capacidade desses gases de se dissolver nele também diminuirá. O resultado, igualmente, será a eliminação desses gases para o ar. Assim como no caso da temperatura, a alteração da pressão também é feita pelo vapor.

Como se trata de um ambiente de alta pressão, todo o vapor utilizado no processo se condensa. Esse vapor se mistura à água que foi processada. Pelo fato de os gases retirados da água não serem condensáveis, eles mantêm-se separados do líquido e saem do aparelho.

2.6 INDÚSTRIA CAFEEIRA

2.6.1 Café no Brasil

Em 1727 o café chega ao norte do Brasil, trazido da Guiana Francesa pelo Sargento-Mor Francisco de Mello Palheta, mais precisamente na cidade de Belém. Este foi um pedido do então governador do Maranhão e Grão Pará, que deu a Mello a missão de trazer o incrível produto que já tinha fama internacional e um grande valor comercial (TAUNAY, 1945).

Devido as condições climáticas favoráveis do Brasil para o desenvolvimento do café, seu cultivo se espalhou rapidamente para outras regiões como Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Minas Gerais. Num espaço de tempo curto, o café passou de uma posição secundária para a de produto base da economia brasileira. Desenvolveu-se com total independência, tendo grande interesse de diversos fazendeiros pelo seu cultivo devido aos benefícios financeiros (TAUNAY, 1945).

O café solúvel surgiu em meados de 1901 em Chicago, a partir de diversos testes do cientista japonês Satori Kato. Porém este produto se popularizou a partir de 1938 a partir de investimentos da Nestlé com a marca Nescafé que desenvolveu uma planta avançada de refino de café (ORMOND; PAULA; FILHO, 1999).

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2017), o Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo responsável por 30% do mercado internacional, com volume equivalente à soma da produção dos outros seis maiores países. É também o segundo mercado consumidor, atrás somente dos Estados Unidos (RAMIREZ; BRAGA, 2012).

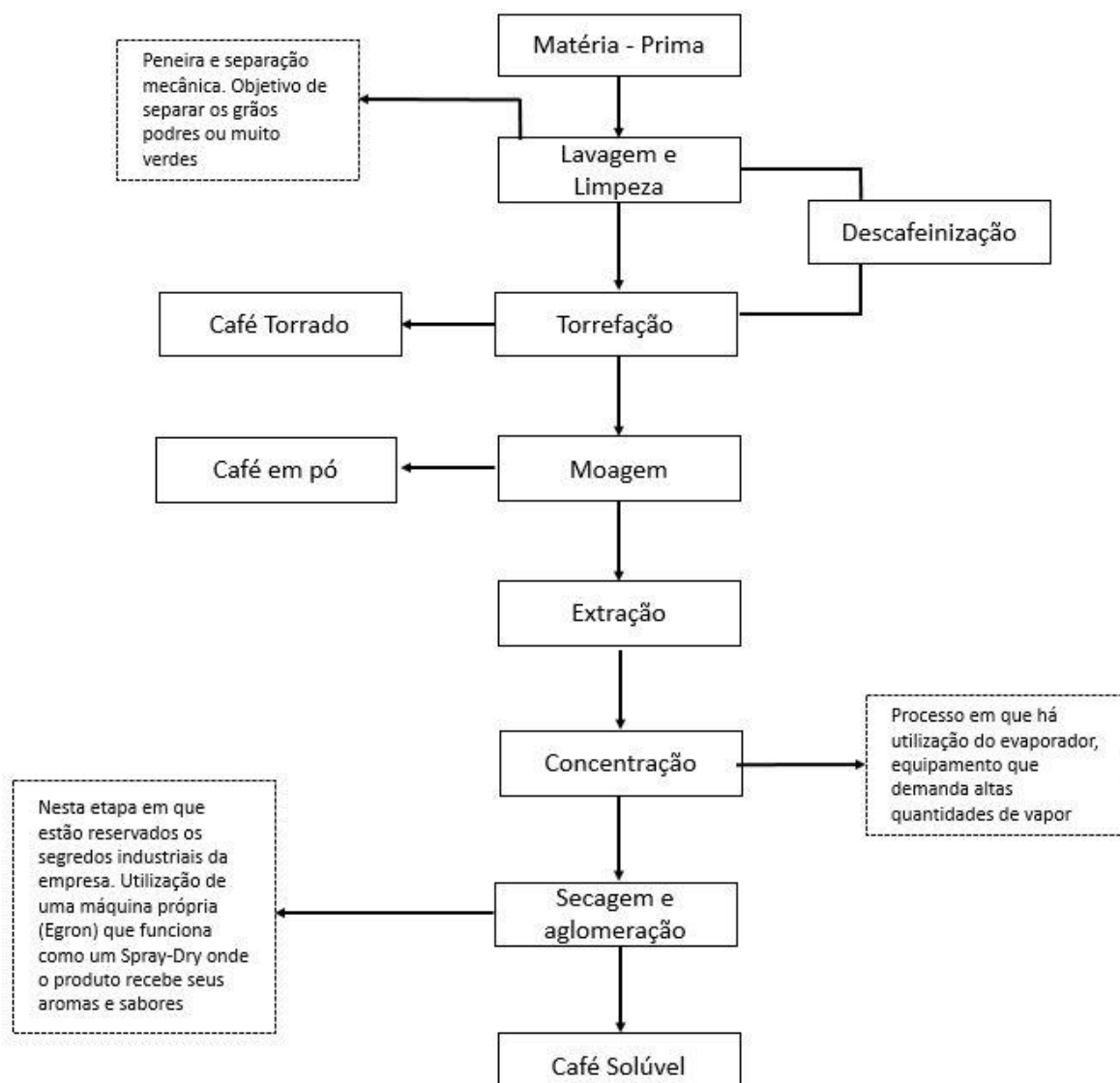
Na cadeia do café, a indústria de café solúvel é a principal geradora de receita pela

exportação de produto com maior valor agregado (ABICS, 2008).

As áreas cafeeiras estão concentradas no centro-sul do país, onde se destacam quatro estados produtores: Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná. A região Nordeste também tem plantações na Bahia, e da região Norte pode-se destacar Rondônia.

2.6.2 Produção de café solúvel

Figura 20 – Etapas do processamento de Café Torrado, Moído e Solúvel



Fonte: Adaptado de Varnam; Sutherland (1994)

A qualidade do café torrado e consequentemente do café solúvel depende de aspectos relacionados à matéria-prima, tais como variedade, formato do grão, homogeneidade em tamanho do grão, teor de umidade, presença de defeitos (grãos pretos, verdes, mal granados,

brocados, quebrados etc.), impurezas (restos de cascas, gravetos, pedras e terra) e temperatura empregada na torrefação (MATIELLO, 1991).

A torrefação é constituída de dois estágios, sendo que o primeiro compreende 80% do tempo do processo. Neste estágio, os grãos verdes perdem sua água livre (cerca de 12%) e, gradualmente, tornam-se marrom-palha. No segundo estágio, ocorre a pirólise nos grãos, o que desencadeia o desenvolvimento de aroma e sabor, rápido escurecimento, emissão de uma fumaça oleosa e dilatação. A pirólise é uma reação química na qual ocorrem degradações e sínteses de compostos, simultaneamente. Neste estágio, a composição química dos grãos é rapidamente modificada, o que exige que sejam resfriados de forma brusca no ponto de torrefação desejado (SMITH, 1989; PIMENTA, 2003). A zona de torrefação é atingida entre 185°C e 240°C, sendo ideal entre 210°C e 230°C, quando o aroma se forma completamente (MATIELLO, 1991).

Na produção de café solúvel, após o processo de torrefação, os grãos são moídos de forma grosseira e suficientemente uniforme, a fim de seguir para o processo de extração. Geralmente, uma moagem grosseira é necessária, porque uma moagem muito fina impede a passagem do extrato nas colunas de extração (NUNES et al., 1997).

Depois de torrado e moído, o café passa pelo processo de extração para produção de café solúvel. As altas temperaturas durante a extração (175°C) podem ocasionar a decomposição térmica de compostos do aroma e reações químicas como a degradação de polissacarídeos de elevada massa molecular, o que provoca alterações indesejáveis no aroma e sabor (VARNAM; SUTHERLAND, 1994).

Para minimizar os efeitos indesejáveis da temperatura, a extração usualmente é realizada em um conjunto de cerca de seis percoladores cilíndricos, operando em contracorrente. As colunas de aço inox são carregadas com pó de café fresco, enquanto que o pó de café que já passou pela extração é descartado. A água (a aproximadamente 180°C) é introduzida no percolador em que o pó já passou por várias extrações e segue para os outros. Esse sistema otimiza a extração de sólidos solúveis sem comprometer demasiadamente a qualidade do extrato de café, porque a água mais quente passa pelo pó mais extraído e perde calor à medida que segue para os outros percoladores (SMITH, 1989).

No processo de extração, somente uma pequena parte do óleo essencial de café passa para o extrato. A recuperação desses óleos pode ser feita antes da extração, prensando-se mecanicamente os grãos de café e utilizando-se gases inertes ou vapor para recuperar esses voláteis (VARNAM; SUTHERLAND, 1994).

Esse tipo de recuperação de aroma é tratado na patente americana n 3535118 (KROGER CO., 1970). Ela descreve um processo no qual café torrado e moído é introduzido em uma coluna e mantido a 40 C. Um spray de água é lançado no café para facilitar o desprendimento de aromas. Em seguida, um gás inerte a 44°C, normalmente nitrogênio, é introduzido na coluna pela parte inferior, passa através dela carregando os aromas e segue para um condensador operando a cerca de 5°C, onde a água do gás é condensada. O gás desidratado é alimentado em um condensador criogênico, onde o aroma é recuperado na forma de pequenos cristais de gelo. A concentração e a desidratação são as etapas seguintes à extração. Geralmente utiliza-se a concentração mediante evaporação térmica, mas há interesse crescente pela utilização de concentração por congelamento (crioconcentração). Um problema importante durante a evaporação é a perda de compostos voláteis do extrato com efeitos adversos sobre o aroma e o sabor. A recuperação dos voláteis pode ser feita por meio de condensação, instalando-se uma unidade para a recuperação dos aromas antes do evaporador principal (VARNAM; SUTHERLAND, 1994).

A patente americana n 4606921 descreve um processo de recuperação de componentes aromáticos voláteis durante o umedecimento e a extração do café torrado e moído (antes da concentração). Os gases resultantes dessas etapas são utilizados como meio removedor e carreador para os voláteis. Esses gases são separados do extrato por meio de uma câmara de separação e conduzidos, pelo menos a dois condensadores. No primeiro condensador a água é removida, enquanto que no último ocorrem a condensação (0 a 5°C) e coleta dos voláteis, que podem ser adicionados ao extrato posteriormente a concentração ou ao produto após a secagem (LIU, 1986).

O extrato de café passa pelo processo de concentração antes da secagem, porque isso melhora a retenção de voláteis na secagem, reduz a carga do secador e aumenta a capacidade de produção. Além disso, a concentração produz partículas maiores de pó após a secagem. Isso evita a formação de partículas em excesso, que podem se aderir às paredes da torre de atomização, sofrer carbonização e cair no produto, afetando negativamente sua qualidade. Quanto maior a quantidade dessas partículas formadas, mais o processo de secagem é interrompido para a limpeza do secador (NUNES et al., 1997).

A secagem do extrato é feita por atomização (em *spray dryer*) ou liofilização. Após a atomização o pó de café resultante passa pelo processo de aglomeração, que consiste em umedecer o pó com vapor ou com água e desidratá-lo novamente em um secador de leito fluidizado. Também é possível aglomerar o pó durante a atomização juntamente com o extrato

que será atomizado. Na etapa de atomização são perdidos compostos voláteis do aroma de café (VARNAM; SUTHERLAND, 1994).

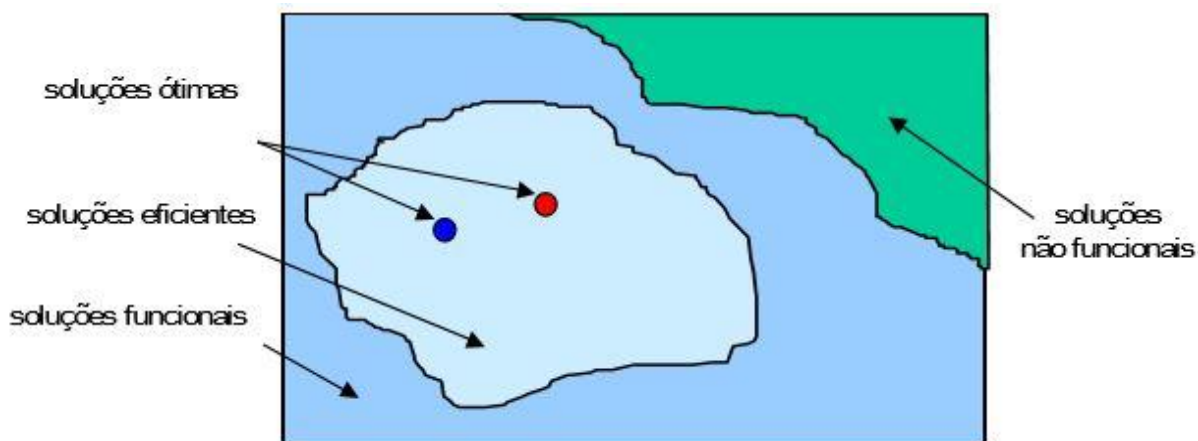
A liofilização foi desenvolvida em 1960 e é o melhor processo para a elaboração de café solúvel de qualidade, uma vez que a perda de voláteis é muito menor. Nesse processo o líquido é congelado e passa por uma granulação. Os grânulos sólidos são submetidos a condições de ultra vácuo e calor moderado, o que promove a sublimação da água e resulta em um produto seco. No entanto, a liofilização é um processo de alto custo. Terminada a secagem o café solúvel é embalado e pronto para ser comercializado (NUNES et al., 1997).

2.7 PROJETO DE SISTEMAS TÉRMICOS

Nesta seção serão abordadas as diretrizes e premissas que devem ser analisadas antes e durante a elaboração de um projeto de sistema térmico. Para um projeto dessa magnitude são necessários conhecimentos técnicos sendo eles: as leis termodinâmicas, as tabelas de estado físicos dos fluidos de trabalho, conceitos de perda de carga, transmissão de calor além dos conhecimentos tecnológicos, que lidam com as máquinas, equipamentos e como eles funcionam e operam em condições de projeto e reais.

Para cada tipo de situação em que o projeto se encontra, pode-se determinar diferentes soluções. A figura 21 apresenta o universo das possíveis soluções que podem ser encontradas diante de um problema. Dependendo da aplicabilidade do projeto, pode-se considerar uma solução funcional, que talvez não seja de maior performance, mas se encaixa para certas situações, ou em casos em que se busca realmente a solução mais eficiente, a solução ótima (BALESTIERI et al., 1999).

Figura 21 – Universo de todas as soluções possíveis

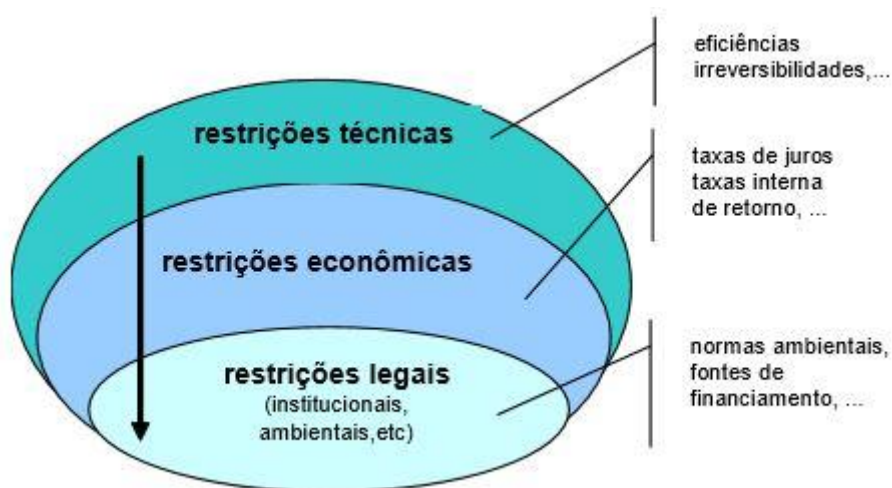


Fonte: Balestieri et al. (1999)

Cabe ao engenheiro propor soluções tecnicamente adequadas e economicamente viáveis para cada empreendimento. Para elaboração de um sistema de geração de energia é necessário harmonizar a junção de diferentes componentes (máquinas térmicas, trocadores de calor, unidades de processo, equipamentos auxiliares e de controle, dentre outros) para que o resultado final atenda às necessidades propostas para o projeto.

Durante a elaboração de um projeto é necessário a sugestão de propostas alternativas para que a solução desejada não seja impedida por algumas das barreiras apresentadas na figura 22, em especial porque soluções tecnicamente viáveis podem ser recusadas por limitações de ordem econômica, ou institucionais.

Figura 22 – Níveis de profundidade dos estudos de viabilidade



Fonte: Balestieri et al., (1999)

Por essa razão, o estudo de viabilidade técnica é o primeiro a ser realizado para que não sejam propostas soluções com inconsistências físicas ou restrições construtivas. Neste trabalho será realizado um estudo de viabilidade técnica afim de dar início em uma possível instalação desse tipo de equipamento em uma fábrica já operante. Desta forma este trabalho tem como objetivo determinar os melhores equipamentos que podem ser utilizados nesta situação. (BALESTIERI et al., 1999)

A seguir será abordado as principais considerações que devem ser tomadas em projetos de sistemas térmicos para geração de energia, sendo empregados turbinas a vapor e em seguida turbinas a gás.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda as características do desenvolvimento da pesquisa, demonstrando seu tipo, os materiais e métodos utilizado, às variáveis e indicadores, a captação de dados e de que forma foram organizados.

3.1 TIPO DE PESQUISA

Este trabalho surgiu da identificação da oportunidade de se instalar um equipamento de cogeração em uma fábrica de café. Desta forma a pesquisa foi fomentada em decorrência das demandas térmicas definidas e controladas pela equipe da fábrica, onde foram analisadas para formulação deste tema.

Foi conduzido sob uma pesquisa exploratória, pois tem o objetivo de proporcionar maior familiaridade com o problema abordado, com vistas a torna-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Desta forma o trabalho é classificado como exploratório por apresentar uma ideia nova em relação a geração da energia elétrica do site a partir de equipamentos de cogeração.(GERHARDT; SILVEIRA, 2009)

A Pesquisa Científica pode ser classificada segundo dois grandes métodos: quantitativo e qualitativo. O método quantitativo é aquele que apresenta quantificações tanto na coleta de informações, quanto em seu tratamento por meio de técnicas estatísticas. Para, (GERHARDT; SILVEIRA, 2009), o método quantitativo representa a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitar distorções de análise, possibilitando, uma margem de segurança quanto as inferências. Já o método qualitativo tem como referência a coleta de dados empíricos, como históricos de ocorrências, fatos e fatos em que são observados problemas relacionados à pesquisa, e estudos de casos de locais com a mesma ou semelhante realidade estudada. Desta forma, é possível ser feita uma análise dos fenômenos e do ambiente, possibilitando a interpretação dos problemas envolvidos.

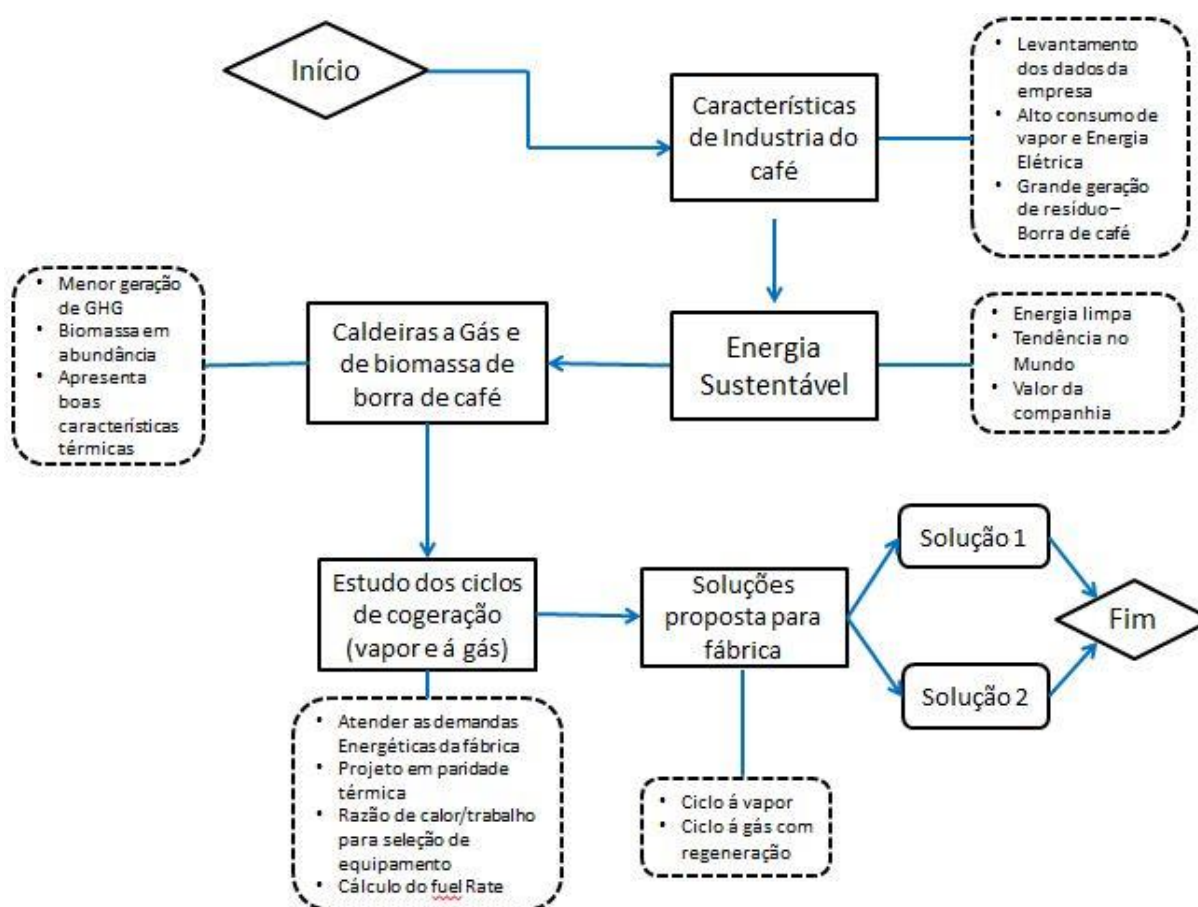
Deste modo, a pesquisa em questão será conduzida de forma qualitativa, a partir de interpretação das análises de dados obtidos da empresa em questão, que foram tratados a partir de modelos teóricos tirados da literatura.

Por fim, outra classificação tomada para o trabalho é de pesquisa baseada em Estudo de Caso, em que se refere a observação de um problema real em que uma melhoria pode ser aplicada. Dessa forma as variáveis selecionadas foram tratadas e simuladas de forma a obter a resposta esperada tendo por trás um estudo bibliográfico.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a conclusão deste estudo foi necessário traçar um procedimento que auxiliou na organização e desenvolvimento da metodologia descrita no capítulo anterior. A figura 23 apresenta o fluxograma de atividades que foram desenvolvidas neste trabalho.

Figura 23 – Fluxograma de Materiais e Métodos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para iniciar este trabalho, foi realizado um estudo bibliográfico a respeito dos equipamentos de cogeração e como eles podem ser aplicados na indústria em geral, assim como os parâmetros e indicadores que envolvem as configurações destes ciclos. Esta busca teve como objetivo total entendimento técnico teórico dos ciclos, bem como o comportamento termodinâmico para que fosse possível sua aplicação dentro da fábrica estudada.

Foram obtidos dados da empresa escolhida para o Estudo de Caso afim de entender as demandas térmicas e elétricas. A caracterização do objeto de estudo foi realizada através de análises do processo produtivo, desde a etapa inicial do processamento até o envase e embalo

do café solúvel totalmente processado, a quantidade de borra de café resultante deste processo, bem como a energia gasta e o consumo dos combustíveis para sua geração.

Orientou-se a partir dos princípios da termodinâmica, e dos conceitos e equações do ciclo Rankine e Brayton, além de estar de acordo com os materiais obtidos para a elaboração da proposta de uma central de cogeração que melhor se enquadre nas necessidades energética, sendo medido os custos de cada proposta afim de se obter a melhor solução, e que possua compatibilidade com o processo produtivo, a quantidade de combustível consumido pelas caldeiras e atendendo, portanto, a empresa em estudo.

Finalizou-se o trabalho com a seleção dos equipamentos disponíveis no mercado da central de cogeração proposta, sendo realizado o embasamento destas escolhas a partir das análises de cada máquina térmica.

3.3 VARIÁVEIS E INDICADORES

Nessa seção serão apresentadas as variáveis que foram recolhidas da empresa que será analisada neste estudo. As variáveis fazem referência as características do fenômeno a ser estudado. Elas podem variar de acordo com o tipo de pesquisa, nas quantitativas elas são medidas, enquanto nas qualitativas, são descritas ou explicadas. A figura 24 ilustra a variante pertinente a esta pesquisa e quais são seus respectivos indicadores:

Figura 24 – Variáveis e Indicadores estudados

Variável	Indicadores
Combustíveis	Biomassa - café, lenha e cavaco
	Gás natural
	Consumo de vapor nos processos
Demanda energética da planta	Vapor vendido
	Consumo de combustível no processo
	Consumo de eletricidade
Custos	Custo de investimento
	Custo de operação
Modo de operação do sistema	Paridade Térmica
	Paridade Elétrica
Seleção dos ciclos de cogeração	Demandas energéticas da empresa
	Temperatura desejada no processo produtivo
	Vazão de vapor desejados
	Pressão de vapor desejado no processo produtivo
Eficiência térmica do ciclo de cogeração	Eletricidade produzida no ciclo
	Calor do processo fornecido pelo ciclo
	Energia gasta no ciclo

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.4 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

Nessa seção são apresentadas as informações pertinentes a fábrica de estudo em que foram disponibilizados os dados de performance energética. Os dados são referentes aos elementos ligados a produção, de tal forma, foram representados os consumos de cada combustível com o respectivo custo, seguido do vapor total gerado além do consumo de energia elétrica do site.

Com essas informações foi possível conhecer a capacidade energética do sistema, podendo assim dimensionar os equipamentos de cogeração que mais se adequam as necessidades. Estas informações foram fornecidas pela fábrica da Nescafé pertinentes ao ano de 2017.

Na figura 25 está representado o controle de combustível nas duas caldeiras em operação no ano de 2017.

Figura 25 – Consumo de combustíveis nas caldeiras

Consumo das Caldeiras anual			
Eficiência das caldeiras		entre 85 e 90%	
Caldeira a gás		Vazão de projeto	25 ton/h
Combustível	Consumo [m³]	PCI [MJ/m³]	Energia [MJ]
Gás Natural	5.140.635	35,108	522.429.685
Caldeira a biomassa		Vazão de projeto	40 ton/h
Combustível	Consumo [kg]	PCI base úmida [MJ/kg]	Energia [MJ]
Lenha [kg/ano]	40.322.736	11,618 (40%)	504.128.259
Cavaco [kg/ano]	8.974.266	11,176 (40%)	92.526.083
Borra de café	46.386.015	7,047 (65%)	326.255.994

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na sequência são apresentados os consumos totais de energia elétrica.

Figura 26 – Consumo de energia elétrica durante o ano de 2017

Mêses	Energia total [kWh]
janeiro	3.572.662
fevereiro	4.627.724
março	4.731.592
abril	4.290.822
maio	4.320.416
junho	4.356.647
julho	4.447.376
agosto	4.429.244
setembro	3.960.207
outubro	4.563.722
novembro	3.560.733
dezembro	3.999.393
Total	50.860.538

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em seguida são apontadas as vazões de vapor geradas pelas caldeiras. Esses valores de vazões variam de acordo com a demanda mensal de produção.

Figura 27 – Consumos de vapor no processo durante o ano de 2017

Vapor			
Mês	kg de Vapor Gerado / mês	Energia MJ	Produção ton
Janeiro	23.417.626	56.904.831	9.196
Fevereiro	36.088.337	87.694.659	9.495
Março	35.260.562	85.683.166	10.323
Abril	30.476.344	74.057.516	9.569
Maio	33.765.672	82.050.583	11.451
Junho	33.769.000	82.058.670	12.170
Julho	36.160.000	87.868.800	13.428
Agosto	35.618.000	86.551.740	13.340
Setembro	29.352.000	71.325.360	12.089
Outubro	31.549.000	83.954.070	13.009
Novembro	22.226.000	54.009.180	11.270
Dezembro	28.126.000	68.346.180	12.315
Total/ano	375.808.541	920.504.755	137.656

Fonte: Elaborado pelo Autor

Posteriormente o custo com os combustíveis e com energia elétrica, que possuem tarifas que variam com o mês.

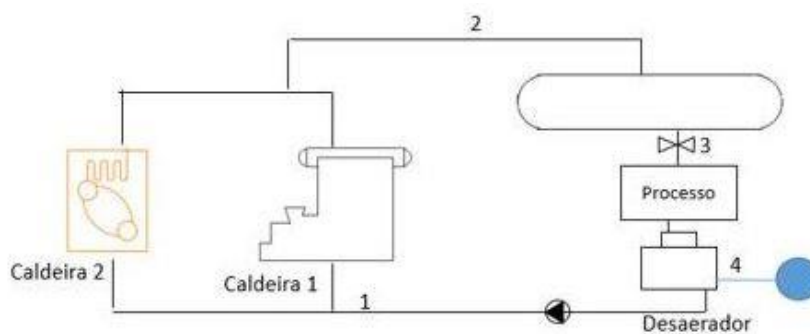
Figura 28 – Custos de operação

Custo de operação				
Mês	Combustível		Energia Elétrica	
Janeiro	R\$	923.764,37	R\$	1.223.958,00
Fevereiro	R\$	1.347.511,00	R\$	1.305.947,00
Março	R\$	1.313.024,00	R\$	1.223.953,00
Abril	R\$	1.130.262,00	R\$	1.117.546,00
Maio	R\$	1.608.022,00	R\$	1.378.200,00
Junho	R\$	1.476.441,00	R\$	1.152.006,00
Julho	R\$	1.650.126,00	R\$	1.273.211,00
Agosto	R\$	1.662.484,00	R\$	1.121.141,00
Setembro	R\$	958.475,00	R\$	1.108.958,00
Outubro	R\$	1.351.532,00	R\$	1.361.200,00
Novembro	R\$	1.004.418,00	R\$	997.878,00
Dezembro	R\$	1.030.617,00	R\$	1.150.300,00
Total/ano	R\$	15.456.676,37	R\$	14.414.298,00

Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a coleta dos consumos e custos de operação, foi feito um modelo representando o ciclo térmico existente juntamente com seus parâmetros termodinâmicos. A figura 29 apresenta esta configuração.

Figura 29 – Esquema térmico utilizado pela fábrica



Modelo 0 - Configuração atual da fábrica					
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [Mpa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/Kg]	Entropia [kJ/kg.K]
1	12	1,5	98	419,32	1,3065
2	12	1,15	250	2935,0,1	6,8293
3	12	1	216,5	2866,84	6,7749
4	12	0,1	40	167,54	0,5724

Fonte: Elaborado pelo Autor

As caldeiras deste ciclo operam com vazões que variam de acordo com a produção de café do mês. Esses valores também podem ser verificados pela variação do consumo dos combustíveis.

Elas foram projetadas para operar com pressões de 1,5 MPa, temperatura de 250°C e vazões de 40 ton/h para a caldeira de biomassa e 15 ton/h para caldeira de gás natural.

A caldeira de biomassa consome madeira e borra de café. Essa mistura é feita de acordo com as demandas de produção da fábrica para se estimar o volume de borra disponível, porém em média utiliza-se 50% do volume de combustível vindo da madeira e 50% vinda da borra em bases úmidas.

3.5 EXECUÇÃO DO PROBLEMA

Para selecionar os equipamentos que melhor se adequem as necessidades da fábrica foi feita a relação entre o Calor e Trabalho utilizados no sistema e com auxílio da figura 30 pôde-se ter um parâmetro de qual equipamento será o mais adequado.

Figura 30 – Características técnicas dos sistemas de cogeração

Sistema de cogeração	Potência elétrica	Fator de disponibilidade	Eficiência elétrica		Eficiência total	Eletricidade / calor
	MW	%	carga 100%	Carga 50%	%	--
Turbina a vapor	0,5-100	90-95	14-35	dez/28	60-85	0,1-0,5
Turbina a gás	0,1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0,5-0,8
Ciclo combinado	4-100	77-85	35-45	25-35	70-88	0,6-2,0
Motor Diesel	0,07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0,8-2,4
Sistema com motor alternativo	0,015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0,5-0,7
Célula a combustível	0,04-50	90-92	37-45	37-45	85-90	0,8-1,0

Fonte: COGEN Europe, (2001)

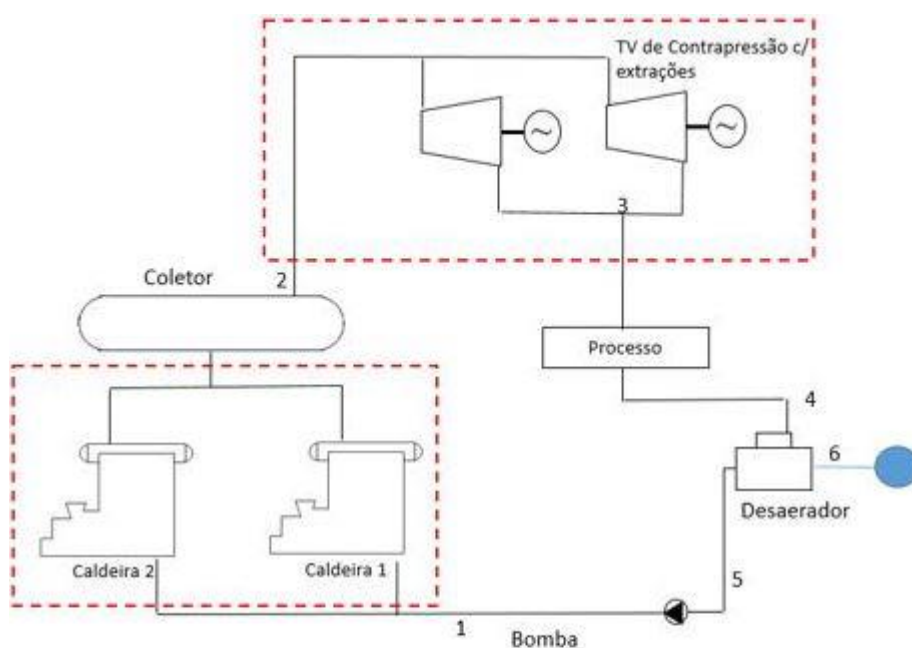
Desta forma utilizando os dados coletados da fábrica na seção 3.4 foi encontrado nesta relação ao valor 0,20 (183.097.937 MJ referente a energia elétrica e 920.504.755 MJ a energia térmica) que de acordo com a tabela tem-se que o melhor equipamento é a turbina a vapor. Porém este estudo fez testes com turbinas a vapor de contrapressão e turbina a gás com caldeira de recuperação e determinaram-se os custos de cada sistema.

Seguindo este raciocínio, o Modelo 1 testou a configuração dos ciclos a vapor. Para atender as demandas de pressão e temperatura das turbinas a vapor serão necessários a aquisição de novas caldeiras, que operem com vapor superaquecido com pressões mais elevadas. Elas foram dimensionadas para operar a vazão de 35ton/h, tendo pressão de 2,5 MPa e temperatura de 300°C.

Neste cenário foram testadas turbinas de contrapressão, pois essas turbinas são recomendadas para processos industriais onde a demanda de calor é aproximadamente igual à demanda de trabalho, diferente das turbinas de condensação onde um grande volume do vapor precisa ser enviado ao condensador para garantir a viabilidade do seu uso.

Adequando-se a demanda de vapor para 56 ton/h foram dimensionadas duas turbinas que operam com 28 ton/h de vapor a pressão de 2,4 MPa cada. Desta forma a figura 31 retrata o formato do ciclo juntamente com suas especificações técnicas e termodinâmicas.

Figura 31 – Modelo1 - Caldeiras e turbinas novas



Modelo 1 - Utilização de TV de Contrapressão					
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [MPa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/Kg]	Entropia [kJ/kg.K]
1	15	2,25	98,5	414,814	1,2876
2	15	2,25	300	3016,2	6,7023
3s	15	1	201,6	2831,8	6,7023
3	15	1	216,5	2866,84	6,7749
4	15	0,1	99,6	417,46	1,3026
5	15	0,1	40	168,32	1,2635
6	15	0,1	98	410,6	1,2842

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para compor o ciclo indicado no Modelo 1 foram selecionados os equipamentos descritos a seguir: Caldeira do fabricante EngeMan e a turbina de contrapressão do modelo CB 1.5 do fabricante Base Sólida Energia.

Os equipamentos juntamente com suas especificações estão indicados nas figuras 32 e 33.

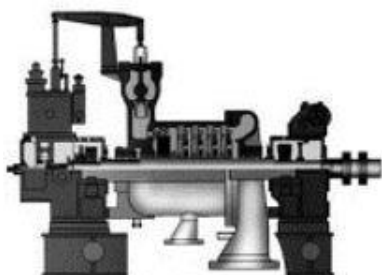
Figura 32 – Modelo1 - Caldeira de biomassa



Caldeira de biomassa	
Capacidade	35 ton/h
Pressão	MPa
Temperatura	300°C
Rendimento	80 a 88%

Fonte: EngeMan (2018)

Figura 33 – Turbina a vapor de contrapressão



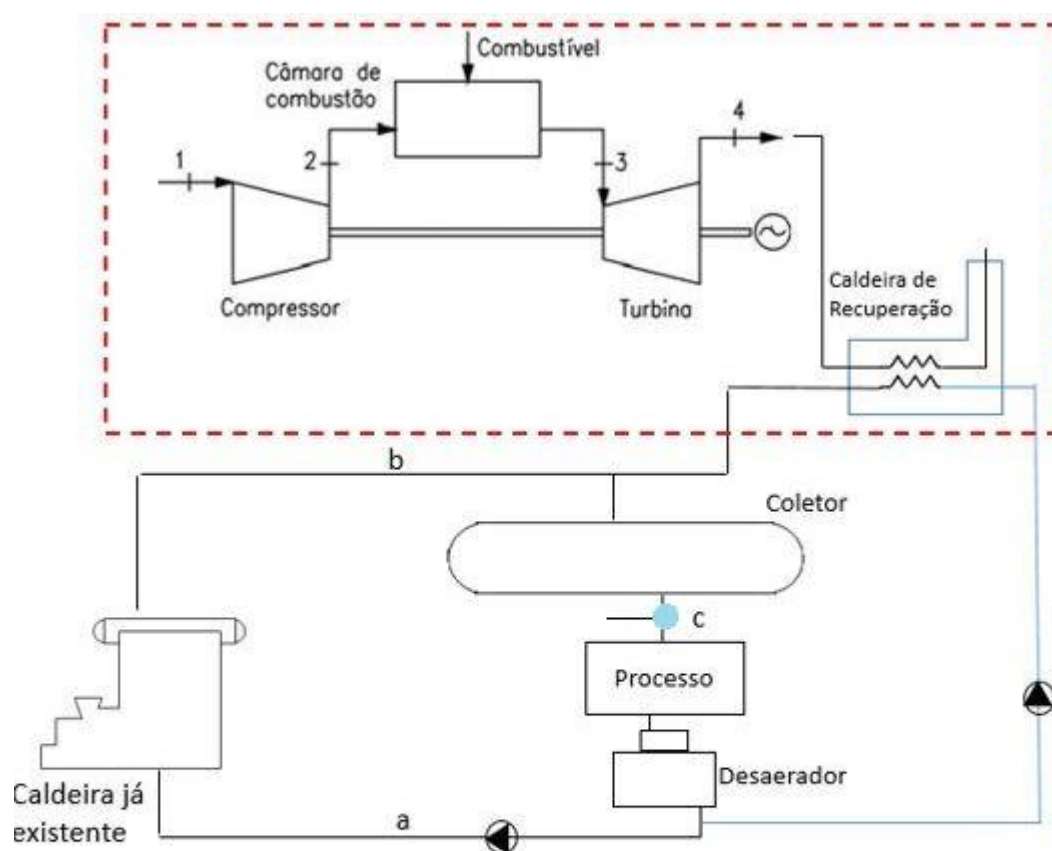
Turbina de contrapressão com Extrações	
Fabricante	Base Sólida Energia
Modelo	CB 1.5 - 2.35/0981/0.49
Potência [MW]	1,5
Pressão de entrada [MPa]	2.400
Temperatura máxima [°C]	390
Vazão [t/h]	28
Pressão de extração	1.000
consumo específico [kg/kw.h]	18,6
Peso [ton]	20
Dimensões [m]	3,9 x 2,5 x 2,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na composição do Modelo 2 foi utilizado um conjunto a gás, contendo uma turbina a gás juntamente com uma caldeira de recuperação térmica. Neste sistema o objetivo é utilizar um equipamento que atenda a demanda de energia térmica, substituindo a caldeira a gás, contribuindo com a geração de energia elétrica que praticamente suprirá as demandas da planta.

A partir da figura 34 é possível analisar essa configuração.

Figura 34 – Modelo 2 proposto utilizando Turbina a gás



Modelo 2a - Utilização de Conjunto a gás					
Pontos	Vazão Mássica [kg/s]	Pressão [Mpa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/Kg]	Entropia [kJ/kg.K]
a	11,11	1,1	201,6	2831,8	6,7023
b	11,11	1	250	2942,59	6,9246
b'	3,88	1	250	2942,59	6,9246
c	15	1	216,5	2866,84	6,7749

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para compor o ciclo indicado no Modelo 2 os equipamentos selecionados que atendem as especificações determinadas foram:

A caldeira será a mesma já utilizada para os processos sem cogeração, e a turbina a gás será do modelo GpB60 da fabricante Kawasaki.

Os equipamentos juntamente com suas especificações estão indicados nas figuras 35.

Figura 35 – Modelo2 - Turbina a gás

Turbina a gás	
Fabricante	Kawasaki
Modelo	GpB60
Potência [MW]	5,40
Heat Rate [kJ/kWe-h]	12.300
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	548
Vazão de gás [t/h]	77,6
Vazão de vapor da caldeira [t/h]	14,5
Peso [ton]	55
Dimensões [m]	11,5 x 2,8 x 3,6



Fonte: Kawasaki (2018)

A caldeira de recuperação será fornecida pela fabricante da turbina e se estima um investimento equivalente a 13% do valor da turbina para aquisição deste equipamento. Esse valor é baseado em cotações realizadas pela Construcap CCPS (2015) em empreendimentos similares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos criados para os dois casos estudados, apresentando os custos dos novos equipamentos, custo de montagem e custo de operação trazendo posteriormente o valor de *payback* do sistema.

Modelo Utilizando Turbina a Vapor:

O modelo 1 propôs uma configuração na qual as caldeiras existentes (biomassa e gás natural) foram trocadas por duas novas caldeiras de biomassa. Essa mudança se deu para que estes novos equipamentos pudessem suprir tanto as demandas energéticas das turbinas selecionadas, pressão de 2,4 MPa e vazão de 56 ton/h, quanto as necessidades do processo. As caldeiras cotadas para compor esse sistema atuam com pressão de 2,5 MPa e temperatura de 300°C com vazão de 35 ton/h.

As novas caldeiras operam com uma queda entálpica de 2594 KJ/tonelada de vapor utilizando em média uma vazão de 28 ton/hora. A partir das equações vistas no item 2.4.2.1 foi possível calcular os consumos de madeira (lenha + cavaco) e borra a partir do balanço de energia da caldeira.

Foi considerado um rendimento de 80% para o equipamento e PCI de 10.500 MJ/ton para madeira com umidade média de 34,74% e PCI de 7.100 MJ/ton e umidade de 62,44% para borra de café. Dessa forma chegou-se a um valor de consumo de 89.112.745 kg de madeira (cavaco e lenha) e 77.044.707 kg de borra.

Modelo Utilizando Turbina a Gás:

O modelo 2 propôs uma configuração na qual a caldeira de biomassa que alimentava o processo foi mantida e foi trocada a caldeira a gás por um conjunto a gás no qual é composto de uma turbina com potência de 5,4 MW e uma caldeira de recuperação térmica com capacidade de vazão de 14,5 ton/h.

Para que o processo continue sendo atendido com uma demanda de vapor de 54ton/h, a caldeira de biomassa irá operar com vazão de 29,5ton/h, porém esse valor dependerá das necessidades mensais de produção.

Neste processo a caldeira de biomassa continuou a operar com queda entálpica de 2.500 MJ/ ton de vapor utilizando em média uma vazão de 40,0 ton/hora.

Os consumos de borra e madeira foram calculados de acordo com o balanço de energia da caldeira resultado em 51.212 toneladas de borra e 59.234 toneladas de madeira gastos no ano.

4.1 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica foi realizada para os dois modelos propostos, considerando três diferentes variáveis: o custo do combustível, o preço da compra de energia elétrica e o custo de instalação do novo sistema.

Para o custo dos combustíveis, não foram consideradas variações mensais de preço de compra sendo a tarifa adotada para lenha e cavaco fixada em R\$ 0,21 reais por kg e R\$ 0,00 para borra de café, já que seu custo já foi contabilizado como insumo de produção. Para o gás natural foi utilizado a tarifa média de R\$ 0,99 por m³ de gás. Esses valores seguem a média do que foi praticado no ano de 2017 pela Nescafé.

As tarifas praticadas da compra de energia elétrica a partir de negociações no mercado livre tiveram uma média de R\$ 0,283 por kWh. Desta forma este valor será utilizado para se ter um parâmetro nos cálculos dos custos operacionais do sistema. Estes dados são baseados na planilha de performance da fábrica.

Os custos de instalação de um conjunto de cogeração englobam custos com projeto, infraestrutura, equipamentos, custos financeiros, ambientais e transmissão. Os custos com equipamentos representam mais da metade do custo de instalação, cerca de 60%. Assim, possíveis variações nos custos dos equipamentos, refletem significativamente no custo de instalação. Estes valores foram variados de R\$ 2000 a R\$ 4000 por kW de potência da planta (BRACIANI et al., 2011).

Para as novas instalações propostas, foi considerada um período de vida útil dos equipamentos de 20 anos para 7920 horas de funcionamento anual da usina. Os custos de operação e manutenção foram estabelecidos como 4% do investimento inicial para geração.

No Modelo 1 foi considerado a compra de duas novas caldeiras da EngeMan e duas turbinas a vapor de contrapressão do modelo CB1.5 da fabricante Solidda Energia. Na figura 37 estão expressos os custos totais envolvendo a instalação deste novo sistema. Os custos dos equipamentos foram calculados a partir do estudo de (BRACIANI et al., 2011) sendo utilizado o valor crítico de R\$ 4.000,00 por kW. Os valores de montagem foram feitos considerando valor de mão de obra contendo soldadores, lixadores, caldeiristas e encarregado. Foi levantado a utilização de um guindaste para auxiliar neste serviço. Os valores apresentados estão alinhados com os praticados pela empresa Construcap CCPS para montagens de caldeiras e turbinas.

Figura 36 – Custo de Aquisição dos Equipamentos para o Caso1

Custo de Aquisição		
Custo do Equipamento	2	12.000.000
Custo de Aquisição do Sistema de Vapor	2	6.000.000
Custo de Montagem	-	3.000.000
Custo de Manutenção	-	480.000
Custo total da Instalação da Planta		21.000.000

Fonte: Elaborado pelo Autor

A figura 37 traz os custos operacionais que este novo sistema trará, em comparação com o que era praticado antes da cogeração. Os valores de custo foram adquiridos a partir do que foi gasto na compra de energia elétrica e dos novos consumos das caldeiras. As tarifas foram baseadas no que foi praticado pela fábrica estudada no ano de 2017. A vazão de vapor da caldeira foi adotada como sendo 56 ton/hora antes da cogeração, para que dessa forma fosse possível uma comparação.

Figura 37 – Custo de Operação comparando Cogeração com o que faz a fábrica

Turbina a Vapor			
Custo anual operacional	Convencional		Cogeração
Custos com Energia Elétrica	R\$	14.414.298,00	R\$ 7.058.172,25
Consumo de madeira [kg]		66.367.275	89.112.746
Consumo de gás natural [m³]		6.537.760	-
Custo com combustíveis	R\$	20.409.510,07	R\$ 19.159.240,36
Custo Anual	R\$	34.823.808,07	R\$ 26.217.412,61
			-R\$ 8.606.395,46

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores de energia elétrica foram obtidos a partir da diferença do que foi gerado pela turbina a vapor com o que foi demandado no ano de 2017. Essa diferença de 24.940538 MWh foi multiplicada pela tarifa.

O consumo de madeira se deu considerando uma vazão de 45 ton/hora de vapor na caldeira de biomassa e o consumo de gás pela vazão de 11 ton/hora de vapor na caldeira a gás.

No Modelo 2 foi considerado a compra de uma turbina a gás do modelo Gpb60 juntamente com uma caldeira de recuperação da fabricante Kawasaki. Na figura 38 estão expressos os custos totais envolvendo a instalação deste novo sistema. As equipes de montagem foram dimensionadas da mesma forma que no caso anterior referenciando o praticado pela empresa Construcap CCPS.

Figura 38 – Custo de Aquisição dos Equipamentos para o Caso2

Custo de Aquisição		
Custo do Equipamento	1	22.800.000
Custo de Aquisição do Sistema de Vapor	1	3.000.000
Custo de Montagem	-	5.000.000
Custo de Manutenção	-	912.000
Custo total da Instalação da Planta		30.800.000

Fonte: Elaborado pelo Autor

A figura 39 traz os custos operacionais que este novo sistema terá, em comparação com o que era praticado antes da cogeração. Os valores de custo foram adquiridos a partir do valor gasto com energia elétrica comprado da rede, do cálculo dos novos consumos da turbina a gás, sendo que o volume de combustível foi calculado a partir do *Heat Rate* e Trabalho líquido deste equipamento e o consumo valor gasto com as biomassas na caldeira.

Figura 39 – Custo de Operação comparando Cogeração com o que faz a fábrica

TURBINA A GÁS			
Custo anual operacional	Convencional		Cogeração
Custos com Energia Elétrica	R\$	14.414.298,00	R\$ 1.177.270,64
Consumo de madeira [kg]		66.367.275	59.234.112
Consumo de gás natural [m³]		6.537.760	16.345.813
Custo com combustíveis	R\$	20.409.510,07	R\$ 28.029.177,19
Custo Anual	R\$	34.823.808,07	R\$ 29.206.447,83
			-R\$ 5.617.360,24

Fonte: Elaborado pelo Autor

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como finalidade apresentar uma possível solução para implantação de um sistema de cogeração em uma fábrica cafeeira, partindo do estudo de viabilidade técnica selecionando os equipamentos relativos as demandas energéticas da planta. Desta forma pretende-se obter um sistema que supra as demandas térmicas (de vapor) e complemente com geração de energia elétrica.

Logo, para tal foi escolhido equipamentos térmicos, como as turbinas a vapor e as turbinas a gás, que foram testados e analisados em relação aos parâmetros de performance e consumo.

A partir da relação calor / trabalho foi identificado que o melhor equipamento seria a turbina a vapor. Este equipamento se mostrou muito mais rentável pelo fato de utilizar como combustíveis somente a biomassa, sendo a borra de café um insumo que não apresenta custo para sua aquisição por se tratar de um resíduo do processo. O elevado custo de operação da turbina a gás se dá pelo fato de as tarifas de gás natural estarem altas e seu investimento ser maior do que a aquisição das turbinas a vapor.

Desta forma a central foi projetada para operar em paridade térmica. As configurações apresentadas tiveram valores de *payback* de 3 anos para turbina a vapor e 5 anos para turbina a gás sendo que estes equipamentos serão utilizados em média por 20 anos.

Os sistemas apresentados trarão maior confiabilidade no processo, pois praticamente toda a demanda energética do site será suprida por geração interna.

Todos os cálculos apresentados foram elaborados pelo autor, em consulta a projetos orçados pela empresa Construcap, que traz em seu repertório orçamento de obras de termelétricas e industriais.

Com isso o trabalho traz um resultado satisfatório pois cumpriu seu principal objetivo que é apresentar uma solução tecnicamente viável, seguido de um estudo superficial dos custos de implantação e operação. Para o projeto ter continuidade é necessária uma análise completa da viabilidade econômica do empreendimento, seguido de uma análise regulatória da operação desses sistemas e por fim uma análise ambiental dos seus impactos.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

pode-se citar:

- Análise de viabilidade econômica da central de cogeração escolhida;
- Análise dos secadores e dos sistemas a frio que são utilizados na indústria cafeeira;
- Proposição de outros equipamentos de cogeração que possam ser utilizados para a indústria cafeeira abordada.
- Análise de emissões dos gases de efeito estufa dos equipamentos propostos para possíveis encontrar oportunidades de melhoria.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **Indicadores da indústria do café**. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/estatisticas/>>. Acesso em: 17 jan. 2018

AZEVEDO, J. L. T. **Apontamentos sobre cogeração**. Ano letivo 2000/2001. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001. 11 p.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração**: geração combinada de electricidade e calor. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002. v.1. 279 p.

BALESTIERI, José Antônio Perrella et al. Metodologias para análise de sistemas energéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. **Anais eletrônico...** Águas de Lindóia: ABENGE, 1999.

BERGER, P. Formas de contratação de fornecimento de energia elétrica. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 59, p. 76–77, 2010.

BICALHO, R.; ALMEIDA, E. Turbinas a gás: oportunidades e desafios. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 111–129, 2001.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Blucher, 2013. 728 p.

BRACIANI, U. et al. **Estrutura de custos para implantação das usinas de geração de energia elétrica no Brasil**. 2011. 85 f. Dissertação (Trabalho de Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BRASIL, N. P. **Apostila de cogeração**, 2005. Disponível em: < www.professores.uff.br>. Acesso em: 20 jul. 2018.

CESPEDES, J. F. P.; JUNIOR, S. Análise termoeconômica de plantas de cogeração. **Revista brasileira de engenharia química**, São Paulo, v. 17, p. 21–27, 1997.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Quem somos**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos?_adf.ctrl-state=23p73q1jd_5&_afLoop=262866667563540>. Acesso em: 20 set. 2018.

COSTA, H. V.; WANDER, P. R.; INDRUSIAK, M. L. S. **Simulação de ciclo térmico com duas caldeiras em paralelo**: combustão em grelha e em leito fluidizado. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_A4_A5_A6/A5_ARTIGO_06.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2018.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. p. 1970–2010.

FRANÇA, E. d. S. **Atual crise de energia no Brasil**. 2015. 69 f. Dissertação (Trabalho de Mestrado em Gestão Pública) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia, Ceará, 2015.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dRuzRyEIzmkC&oi=fnd&pg=PA9&dq=GERHARDT,+T.+E.%3B+SILVEIRA,+D.+T.+M%C3%A9todos+de+pesquisa&ots=92TaVXkvKF&sig=Z_grszn_gXvb6md6ahhCTadM83M#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 10 jul. 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

KAWASAKI. **Kawasaki power your potencial**. Disponível em: <https://global.kawasaki.com/br/energy/equipment/gas_turbines/index.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

LAMAS, E. C. **Metodologia para avaliação de alternativas de fornecimento de energia elétrica para consumidores do grupo A**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2010.

LEAL, M.; MACEDO, I. Evolução tecnológica dos sistemas de geração de energia nas usinas de açúcar e álcool. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 3, p. 245–253, 2004.

LIU, Richard T. **Process for improving the flavor and aroma of instant coffee**. U.S. Patent n. 4,606,921, 19 ago. 1986.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. d. et al. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 2, p. 2.

MAGALHÃES, G. d. S. C. **Comercialização de energia elétrica no ambiente de contratação livre: uma análise regulatório-institucional a partir dos contratos de compra e venda de energia elétrica**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Editora Globo São Paulo, 1991.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 800 p.

NUNES, F. M. et al. Foamability, foam stability, and chemical composition of espresso coffee as affected by the degree of roast. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 45, n. 8, p. 3238–3243, 1997.

ORMOND, J. G. P.; PAULA, S. R. L.; FILHO, P. d. S. C. **Café: (re)conquista dos mercados**. Rio de Janeiro. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1999.

PENA-VEGA, A. **O despertar ecológico**. Rio de Janeiro. Editora Garamond, 2003.

PERA, H. **Geradores de vapor**: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. São Paulo: Fama, 1990.

RAMIREZ, J. L. M.; BRAGA, M. J. Comparação relativa entre os custos de produção de café na colômbia e no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 38-49, jan./mar. 2012.

RAMOS, M. A. B. et al. **Mudanças climáticas**. Geodiversidade do Brasil. Rio de Janeiro: CPRM – Serviços Geológicos do Brasil, 2008. 163 p

REIS, L. B. dos. **Geração de energia elétrica**. São Paulo. Tec Art , 2015. 410 p.

SILVA, B. C. F. e SILVA, V.. Combustíveis e queimadores em caldeiras. PROMINP – Engenheiro de suprimentos. Escola Politécnica, departamento de Engenharia Mecânica, 2008. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/27799732/Engenheiro-de-Suprimentos-Disciplinade-FabricaCAo-e>. Acesso em: 02/01/2013.

STROBEL, C. **Térmicos a vapor**. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM364/Material%20de%20Aula/Aula%2001%20%20Ciclos%20T%E9rmicos%20a%20Vapor%20%20M%E1quinas%20T%E9rmicas%20I.pdf. Acesso em: 20 set. 2018.

STUCHI, G. A. D.; TACONELLI, M.; LANGHI, V. A. B. **Geração termelétrica**: principais componentes e tipos de centrais termelétricas. 2015. 147 f. Dissertação (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos 2015.

TAUNAY, A. d. E. **Pequena história do café no Brasil (1727-1937)**. Rio de Janeiro. Departamento Nacional do Café. 1945. 558 p.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 74, p. 247–260, 2012.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável**: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceanica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

VARNAM, A. H.; SUTHERLAND, J. P. Coffee. **Milk and Milk Production**. Disponível em: https://www.springer.com/productFlyer_978-0-8342-1955-7.pdf?SGWID=0-0-1297-33273306-0. Visto em: 13 jun 2018.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose**: Contribuição à matriz energética do Brasil. 2000. 143 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.