

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ÁLVARO LUIZ SILAS DE SOUZA
SUIANE TAILA SOARES**

**O EMPREGO DA TURBINA A VAPOR EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

JOÃO MONLEVADE

2019

**ÁLVARO LUIZ SILAS DE SOUZA
SUIANE TAILA SOARES
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**O EMPREGO DA TURBINA A VAPOR EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do Curso
de Engenharia Elétrica da Faculdade
Doctum de João Monlevade, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.**

**Professora Orientadora: D.Sc. Thaís de
Fátima Araújo Silva.**

JOÃO MONLEVADE

2019



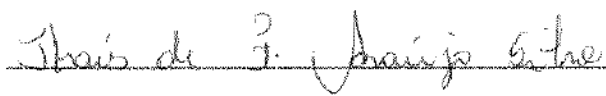
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

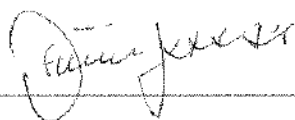
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: O EMPREGO DA TURBINA A VAPOR EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, elaborado pelos alunos ÁLVARO LUIZ SILAS DE SOUZA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

João Monlevade, 08 de julho de 2019.



Thaís de Fátima Araújo Silva



José Olímpio dos Santos Filho



Hernani Oliveira Santiago



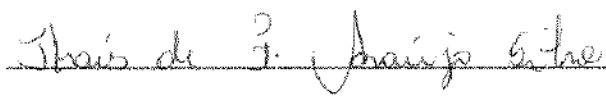
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

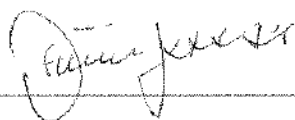
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: O EMPREGO DA TURBINA A VAPOR EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, elaborado pelos alunos SUIANE TAILA SOARES foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

João Monlevade, 08 de julho de 2019.



Thaís de Fátima Araújo Silva



José Olímpio dos Santos Filho



Hernani Oliveira Santiago

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, que foi nossa maior força nos momentos de angústia e desespero. Sem Ele, nada seria possível.

À orientadora Prof.^a Thaís de Fátima Araújo Silva pelo acompanhamento pontual, pelos textos encaminhados, orientação e competência demonstrada a fim de que esta etapa fosse concluída com o êxito esperado.

À nossa família, que ofereceram em todos os momentos apoio e carinho nessa etapa decisiva da nossa vida acadêmica.

Aos amigos que estiveram presentes em todos os momentos da nossa formação, não negando força e ficando na torcida, contribuindo de forma valiosa em nossa jornada acadêmica, nosso muito obrigado.

Daqui algumas décadas, a relação entre o meio ambiente, os recursos e os conflitos será tão óbvia como a conexão que vemos entre os direitos humanos, democracia e paz. (Wangari Maathai, prêmio Nobel da paz, 2004)

RESUMO

O mercado globalizado em especial o setor industrial encontra-se em busca da eficiência e redução de perdas e custos no processo, sendo essa uma preocupação na elaboração de projetos de engenharia. É nesse cenário é que se introduzem os sistemas de cogeração de energia, na qual são responsáveis por garantir eficácia no aproveitamento dos recursos energéticos. A proposta principal deste trabalho é elaborar um estudo bibliográfico sobre sistemas de cogeração que utilizam turbinas a vapor de forma a entender o processo de funcionamento de sistemas de cogeração e identificar e avaliar as variáveis e modelos matemáticos utilizados na implantação deste tipo de sistema de cogeração de energia, identificando através de estudos realizados importantes informações a respeito da implementação de sistemas de cogeração que utilizam turbina a vapor. Sendo assim, apresenta-se o conceito de sistemas de cogeração, bem como sua aplicação nas principais indústrias de tal forma a proporcionar a visão de setores onde sua aplicação seria mais viável e recomendações a fim de otimizar seus processos para que possam minimizar os custos de produção e energia.

Palavras-chave: Cogeração. Energia Elétrica. Turbina a Vapor.

ABSTRACT

The globalized market in particular the industrial sector is in search of efficiency and reduction of losses and costs in the process, being one, a concern in the elaboration of engineering projects. It is in this scenario that the energy cogeneration systems are introduced, in which they are responsible for ensuring efficiency in the use of energy resources. The main proposal of this work is to prepare a bibliographic study on cogeneration systems that use steam turbines in order to understand the operation process of cogeneration systems and to identify and evaluate the variables and mathematical models used in the implementation of this type of cogeneration system energy, identifying through studies carried out important information regarding the implementation of cogeneration systems that use steam turbine. Thus, the concept of cogeneration systems is presented, as well as their application in the main industries in such a way as to provide the vision of sectors where their application would be more feasible and recommendations in order to optimize their processes so that they can minimize the costs of production and energy.

Keywords: Cogeneration. Electric Power. Steam Turbine.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
Bracelpa	Associação Brasileira de Celulose e Papel
COPENE	Central de Matérias Primas do Nordeste
CHP	Combined Heat and Power
COPEL	Companhia Petroquímica do Sul
DHC	District Heating and Cooling
DMC	Sistemas de Controle Avançado
MILP	Programação Linear Inteira Mista
PID	Proporcionais Integrais Derivativos
Proálcool	Programa Nacional do Álcool

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔU	Varição de Energia
Q	Calor
W	Trabalho
$W_{líquido}$	Trabalho Líquido
QH	Calor de Entrada
$\eta_{Rankine}$	Eficiência Global do Ciclo de Rankine
$\eta_{Brayton}$	Eficiência Global do Ciclo de Brayton
η_g	Eficiência Global
\ddot{E}	Energia Eletromecânica
S	Energia Térmica
i	Contribuição Individual
m	Massa
η_t	Rendimento Isentrópico
W_t	Potência Gerada
H	Entalpia
S	Entropia
V_S	Vapor de Super Alta Pressão
V_A	Vapor de Alta Pressão
V_M	Vapor de Média Pressão
V_B	Vapor de Baixa Pressão
QL	Calor Liberado
Hz	Hertz
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$\%$	Porcentagem

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema termodinâmico.....	15
Figura 2 - Representação do Ciclo Rankine simples e Ciclo Rankine com implementação de cogeração do tipo <i>topping</i>	20
Figura 3 - Representação do Ciclo Brayton simples e Ciclo Brayton com implementação de cogeração do tipo <i>topping</i>	24
Figura 4 - Junção dos Ciclos Brayton e Rankine formando o Ciclo Combinado	27
Figura 5 - Ciclo combinado de cogeração utilizando Brayton e Rankine	28
Figura 6 - Geração Convencional X Geração com Cogeração	30
Figura 7 - Ciclo <i>Topping</i>	32
Figura 8 - Esquema de configuração <i>Topping</i>	32
Figura 9 - Ciclo <i>Bottoming</i>	33
Figura 10 - Esquema de uma configuração <i>Bottoming</i>	33
Figura 11 - Faixa típica de temperatura para os sistemas de cogeração	34
Figura 12 - Cogeração baseada numa turbina a gás	37
Figura 13 - Esquema de um ciclo Brayton simples	38
Figura 14 - Ciclo aberto x Ciclo fechado	39
Figura 15 - Esquema de uma solução de Cogeração com motor alternativo	40
Figura 16 - Desenho esquemático de um motor de explosão e etapas do seu funcionamento.....	42
Figura 17 - Sistema de geração pura de eletricidade com motor alternativo e sistema de geração combinada de calor e eletricidade – cogeração.	43
Figura 18 - Vista em corte de uma microturbina.....	44
Figura 19 - Esquema de funcionamento de uma Microturbina	45
Figura 20 - Geração de energia elétrica em uma Micro-turbina	46
Figura 21 - Diagrama T-s do Ciclo de Rankine	49
Figura 22 - Sistema de cogeração a vapor	50
Figura 23 - Turbina de ação X turbina de reação	52
Figura 24 - Esquema de uma solução de cogeração baseado numa turbina de vapor de contrapressão.....	55
Figura 25 - Balanço térmico típico de uma planta de geração pura, em ciclo a vapor X com sistema de cogeração agregado	57
Figura 26 - Fluxograma típico da cogeração de energia no setor sucroalcooleiro	72

Figura 27 - Fluxograma da cogeração de energia na siderurgia	73
Figura 28 - Consumo dos maiores segmentos consumidores de energia da indústria brasileira.....	76
Figura 29 - Fluxo energético em um processo industrial	77
Figura 30 - Representação simplificada esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de tecnologias	58
Quadro 2 - Prós e contras dos diferentes modelos de otimização	66
Quadro 3 - Aspectos das aplicações de cogeração	69
Quadro 4 - Comparação entre perda e desperdício de energia	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivos Específicos	13
1.2 Justificativa	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Termodinâmica	15
2.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica.....	15
2.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica.....	16
2.2 Ciclos de Funcionamento	18
2.2.1 Ciclo Rankine	18
2.2.2 Ciclo Brayton	22
2.2.3 Ciclo combinado.....	25
2.3 Cogeração	29
2.3.1 Tipos de Cogeração	31
2.3.2 Equipamentos da Cogeração	35
2.3.2.1 Turbinas a Gás.....	36
2.3.2.2 Motores Alternativos.....	40
2.3.2.3 Microturbinas.....	44
2.3.2.4 Turbina a Vapor.....	48
2.3.3 Legislação acerca da Cogeração	59
2.4 Otimização em sistemas de cogeração	61
3 METODOLOGIA	67
4 DESENVOLVIMENTO	68
4.1 Setor Sucroalcooleiro	71
4.2 Setor Siderúrgico	73
4.3 Setor Petroquímico	75
4.4 Setor de Papel e Celulose.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

No processo de geração de energia elétrica através da combustão, mais da metade da energia gerada pela combustão é perdida na forma de calor. Pillon (2012) define a cogeração como o processo de produção combinada de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas ao consumo próprio ou de terceiros. Para o autor essa é uma alternativa interessante de garantir economia de energia e competitividade acrescida às empresas.

Com o acirramento da competitividade no mercado globalizado, somente obter energia não é suficiente. É necessário que os processos de obtenção de energia sejam mais eficientes tanto no aspecto operacional como também no aspecto ambiental. Diante dessa situação as indústrias têm buscado a otimização do consumo de recursos energéticos.

No entanto, na visão de Barja (2006), ao mencionar a cogeração de energia, a economia de recursos energéticos propiciados pelo processo da cogeração, apesar de ser sua principal motivação, é apenas um dos fatores influentes na sua viabilidade.

A implementação da cogeração de energia nas indústrias beneficia a todos envolvidos nessa implementação nos mais diversos âmbitos. A indústria consegue diminuir despesas com energia elétrica e vapor, além de beneficiar o meio ambiente através da redução da emissão de poluentes, através da diminuição do uso de combustíveis.

Nos países desenvolvidos, principalmente na Europa e Estados Unidos, a cogeração está presente em todos os segmentos da sociedade (indústria, comércio e serviços). Isto se deve as políticas setoriais e consolidado pelo próprio mercado, dada a racionalidade econômica deste processo (BARJA, 2006).

No Brasil, a falta de informações sobre os sistemas de cogeração, e normas e leis que incentivem e definam que as empresas tenham processos mais eficientes, resultam na baixa utilização desses sistemas, apesar das suas inúmeras vantagens. Diante do exposto, esta pesquisa buscará responder a seguinte questão: Quais os modelos matemáticos de otimização que determinam como a cogeração deve funcionar de acordo com o tipo de empresa?

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre sistemas de cogeração que utilizam turbinas a vapor com o intuito de compreender o processo de funcionamento de sistemas de cogeração, identificar e avaliar as variáveis e modelos matemáticos utilizados na implantação de um sistema de cogeração de energia.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a. Estudar o conceito de sistemas de cogeração de energia e apresentar suas principais características e principais tipos através de um levantamento bibliográfico;
- b. Identificar os principais modelos matemáticos e variáveis utilizados neste tipo de sistema de cogeração;
- c. Identificar os tipos de indústrias que apresentam maior potencial para aplicação do sistema de cogeração de energia através de turbina a vapor.
- d. Apresentar de forma detalhada os principais tipos de indústrias em que se pode utilizar turbina a vapor para o aproveitamento do calor gerado no processo produtivo na produção de energia elétrica.

1.2 Justificativa

O Brasil apresenta sinais do início de uma crise no abastecimento de energia elétrica, devido aos escassos investimentos no setor e o crescente nível de consumo. O fim do monopólio estatal na geração de energia, abre no Brasil oportunidades na área da geração de energia, permitindo a implantação de sistemas alternativos (FERRÃO; WEBER, 2001).

A cogeração de energia surge como uma alternativa para redução de gastos com combustíveis, e também em ganhos ambientais como na redução de emissão de poluentes como o CO₂, resultantes da combustão.

Assim, a decisão de um investidor deverá ser baseada em uma análise que envolve a tecnologia empregada, o benefício econômico e a estratégia de atuação no mercado da eletricidade.

Nesse contexto, esse trabalho apresentará as características técnicas dos sistemas de cogeração, as variáveis que devem ser consideradas para a implantação do sistema de cogeração de energia através de turbinas a vapor, identificará os modelos matemáticos utilizados neste tipo de sistema, criando um base de dados para consulta das empresas que pretenderem implantar a cogeração de energia em indústrias que geram calor através de turbinas a vapor, obtendo, dentre outras vantagens, um maior nível de eficiência energética.

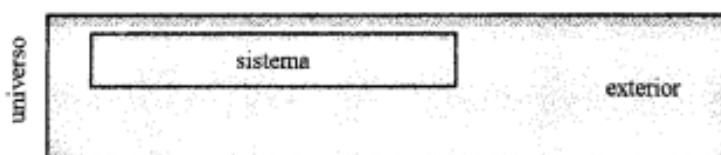
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Termodinâmica

De acordo com Almeida (2003), a termodinâmica é uma ciência macroscópica que estuda as transformações entre as diversas formas de energia, procurando estabelecer relações quantitativas entre elas. Esta ciência estuda, em particular, as transferências de energia como calor e trabalho, a relação entre as propriedades dos sistemas em equilíbrio (a pressão, a temperatura, o volume) e a forma como afetam o equilíbrio.

Ainda para Almeida (2003), o conceito de sistema, uma região do espaço contendo certa quantidade de matéria, é fundamental na Termodinâmica. A descrição de um sistema consiste na identificação dos seus componentes, do seu estado físico e de um dado número de propriedades que traduzem o estado do sistema. O sistema é separado do exterior por uma fronteira, existente ou imaginária, que divide o espaço em duas regiões (Figura 1). É através da fronteira que se dão as transferências de calor e trabalho entre o sistema e o exterior.

Figura 1 - Sistema termodinâmico



Fonte: Almeida (2003)

As Leis da Termodinâmica descrevem as transformações que podem ocorrer num dado sistema. As leis da termodinâmica serão explicadas nos subtópicos a seguir.

2.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica, de acordo com Zemansky e Dittman (1997) e Callen (1985), traduz através da sua formulação matemática que a variação da

energia interna de um sistema, ΔU , é igual à soma do calor (Q) com o trabalho que o sistema troca com a sua vizinhança (W), expresso pela equação 1:

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

Esta equação demonstra que a soma do calor com o trabalho trocados entre o sistema e seu exterior, durante um processo que ocorra entre estados de equilíbrio termodinâmico terminais, é igual à diferença entre as energias internas respectivamente associadas a estes dois estados, não fornecendo nenhuma informação, ou restrição, quanto aos estados intermediários que constituem o processo, logo sendo aplicável para processos reversíveis ou irreversíveis (MOREIRA; BASSI, 2001).

O trabalho de Carnot, em 1824, é considerado por Truesdell (1980) o marco inicial da termodinâmica. A partir de então a teoria recebeu várias contribuições, sendo modificada entre 1850 e 1854 através da fundamental substituição da teoria calórica pelo conceito de que calor e trabalho são uniforme e universalmente interconvertíveis, conforme experimentalmente demonstrado por Joule em 1847. Costuma-se denominar termodinâmica clássica à teoria que Clausius, Kelvin e Rankine edificaram entre 1850 e 1854, acrescida de trabalhos publicados posteriormente, especialmente por Clausius em 1862, sua famosa desigualdade.

De acordo com Gibbs (1928) a teoria chamada clássica, portanto, é temporal e antecede à tendência estática, que se inicia imediatamente após. Planck (1922) explica que o tratado publicado por Gibbs em 1901 consolidou o já pré-existente enfoque estático, através dos lógicos conceitos estatísticos inicialmente desenvolvidos por Maxwell (publicados entre 1860 e 1879) e por Boltzmann (publicados entre 1868 e 1896). A termodinâmica foi assim modernizada, adquirindo um novo brilho ao ser relacionada ao mundo microscópico que começava a atrair toda a atenção científica no começo do século vinte.

2.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica

Reis e Bassi (2012) A origem da segunda lei da termodinâmica é associada ao trabalho do físico Sadi Carnot (1796-1832), o qual estava particularmente

interessado na eficiência de máquinas térmicas operando sob condições ideais. Carnot demonstra que, para produzir trabalho em um processo cíclico, não é suficiente apenas absorção de calor pela máquina térmica, porque também é necessário que a máquina emita alguma quantidade de calor.

Ainda de acordo com Reis e Bassi (2012), tradicionalmente, a termodinâmica clássica restringe o conceito entropia aos estados de equilíbrio e aos processos reversíveis. Porém, ao contrário da termodinâmica clássica, a mecânica dos meios contínuos (da qual a temporal termodinâmica dos processos homogêneos é uma radical simplificação porque, nesta última, é imposta a homogeneidade espacial de todas as propriedades intensivas) utiliza a entropia para relacionar as respostas térmicas e mecânicas do sistema em qualquer estado, pertencente a qualquer processo termodinâmico real.

Para Ferracioli (2001), para um entendimento global da Segunda Lei da Termodinâmica, há de se levar em consideração os conceitos que fazem parte desta lei. Desta forma, os conceitos de Energia, Entropia, Temperatura, Calor e Trabalho fazem parte do contexto de estudo que levará ao Princípio da Segunda Lei.

Conforme estudos relatados por Martinez e Perez (1997 apud Ferracioli, 2001), Calor é a quantidade de Energia presente nos corpos e temperatura uma escala desta quantidade. Já o conceito de Trabalho pode apresentar dificuldades em seu entendimento, principalmente a relacionada à sua definição que diz que trabalho é o produto da força pela distância.

De acordo com Ogborn (1986 apud Ferracioli, 2001) para esta definição, por exemplo, o ato de lixar um pedaço de madeira tem coerência de sentido, mas quando se leva em conta o aquecimento da madeira pela lixa, uma conceituação, mais apurada, em termos de trocas de energia sem mudança de entropia será necessária. O conceito de Energia, na óptica das concepções do senso comum, está relacionado geralmente a algum tipo de combustível, que por sua vez está associado a diversos eventos e movimentos, revelando desta maneira uma confusão entre o conceito de Energia e Energia Livre. Sendo este último atrelado às propriedades do combustível.

De acordo com Ferracioli (2001), o enunciado de Kelvin (1824-1907) – Plank (1858-1947) estabelece a assimetria entre trabalho e calor definindo que é impossível construir uma máquina, operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e convertê-lo integralmente em trabalho, ou seja, nenhuma

máquina converte calor em trabalho com eficiência total, alguma energia é sempre perdida por dissipação para uma região de menor temperatura. O enunciado de Clausius da Segunda Lei da Termodinâmica mostra uma implicação na direção dos processos naturais: O calor não pode nunca passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente sem que ocorram ao mesmo tempo mudanças associadas, pois o calor em toda parte manifesta uma tendência em igualar diferenças de temperaturas, ou seja, o calor sempre flui de objetos quentes em direção aos frios.

Desta forma segue que a combinação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica mostra que embora a quantidade total de energia tenha de ser conservada em qualquer processo, a distribuição dessa energia é alterada de uma maneira irreversível. Em outras palavras, a Primeira Lei nega a possibilidade de a energia ser criada ou destruída, enquanto que a Segunda Lei nega a possibilidade de a energia ser distribuída de qualquer maneira sem maiores consequências (FERRACIOLI, 2001).

A primeira e a segunda lei da termodinâmica regem os ciclos de funcionamento dos ciclos termodinâmicos podendo ser observado fundamentos de tais leis sendo aplicados na prática. Estes ciclos serão abordados no tópico a seguir.

2.2 Ciclos de Funcionamento

Neste tópico serão apresentados os diferentes tipos de ciclos termodinâmicos usados na cogeração, o Ciclo Rankine, o Ciclo Brayton, e o Ciclo Combinado, explicando as particularidades inerentes a cada um deles e como se relacionam com a cogeração.

2.2.1 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é um modelo que representa um ciclo termodinâmico idealizado de geração de potência através da utilização de uma turbina a vapor, que tem como principal objetivo a geração de trabalho mecânico através da transformação da energia contida em um fluxo de vapor d'água (RODRIGUES, 2013).

Scarpin (2013) explica que essa transformação de energia se dá através da pressão resultante da queima de combustível da caldeira que aciona uma turbina a vapor onde se tem um gerador de eletricidade acoplado, gerando energia para o funcionamento dos equipamentos elétricos na planta.

Rodrigues (2013) destaca que a geração de energia pelo ciclo Rankine é responsável por cerca de 90% de toda a energia elétrica mundial. O que impulsiona a sua ampla utilização é o fato de que a combustão neste ciclo é feita externamente, ou seja, qualquer combustível pode ser utilizado na combustão e geração do calor que será fornecido ao fluido de trabalho, neste caso, a água.

A grande vantagem dessa configuração, para Santos (2014) é a flexibilidade do sistema com relação aos combustíveis utilizados, que, além dos combustíveis fósseis, permite a adoção de combustíveis mais baratos, como bagaço de cana, carvão, lenha, resíduos industriais, dentre outros.

Segundo Rodrigues (2013), ao final do ciclo, o vapor de baixa pressão obrigatoriamente rejeita uma quantidade calor tal que atinja a sua total condensação. Para tal, utiliza-se o condensador, um trocador de calor que vai permitir a troca entre o vapor a ser condensado e o ambiente. Dessa maneira, como nesta etapa há necessariamente rejeição de energia térmica, este é o principal ponto onde a cogeração pode ser inserida, de modo a aproveitar o calor rejeitado em outro processo posterior, caracterizando-se como um sistema do tipo *topping*. Ao retornar dos processos que demandam a energia térmica, a água, em devidas condições, é direcionada então ao processo de bombeamento para completar o ciclo. Além dessa, existem outras formas de implantação da cogeração num ciclo Rankine, onde o vapor pode ser extraído de outros pontos do ciclo, como nos estágios intermediários da turbina.

Ainda segundo Rodrigues (2013), do ponto de vista termodinâmico, a eficiência global do ciclo de Rankine pode ser descrita segundo as equações 2 e 3:

$$\eta_{Rankine} = \frac{w_{líquido}}{q_H} \quad (2)$$

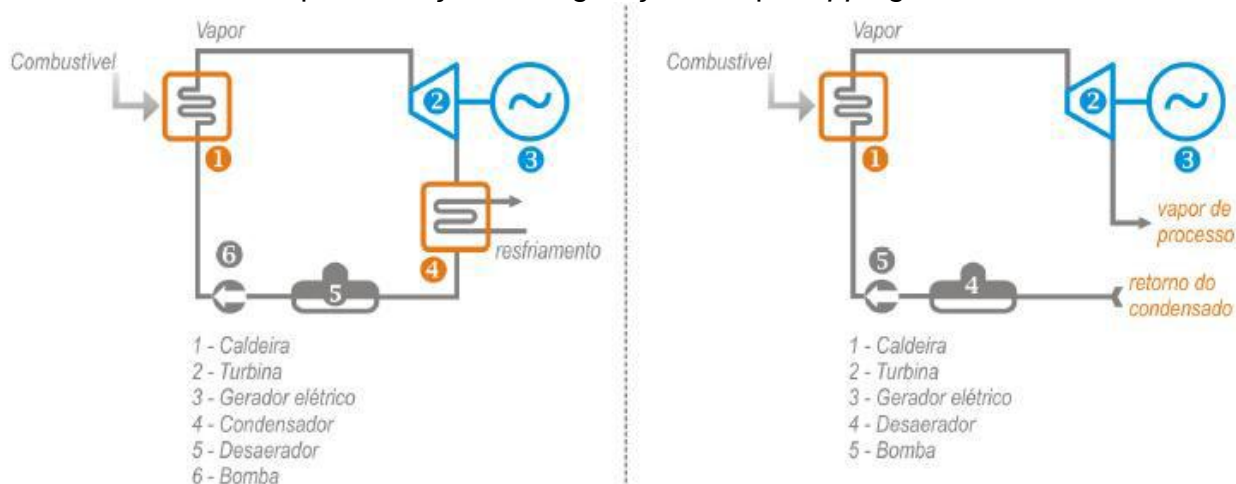
$$w_{líquido} = w_{turbina} - w_{bomba} \quad (3)$$

Nesta equação, o $w_{líquido}$ e o q_H representam respectivamente o trabalho líquido gerado pelo ciclo e o calor fornecido pela caldeira, que podem ser calculados

conhecendo-se as propriedades termodinâmicas de cada ponto do ciclo. Em geral, calcula-se qH através do poder calorífico do combustível.

Outra forma de implantação da cogeração em um ciclo Rankine seria a substituição da queima de combustíveis, por uma fonte térmica proveniente de outro processo anterior, caracterizando-se como um sistema do tipo *bottoming*. Na Figura 2, faz-se uma comparação entre o ciclo Rankine simples e um sistema de cogeração do tipo *topping* que faz uso do ciclo Rankine. Neste caso, é nítida a percepção de que a eficiência global do segundo caso é significativamente maior do que a do primeiro caso, devido ao reaproveitamento do calor rejeitado por este (RODRIGUES, 2013).

Figura 2 - Representação do Ciclo Rankine simples e Ciclo Rankine com implementação de cogeração do tipo *topping*



Fonte: Rodrigues (2013)

As perdas mais importantes que difere o ciclo Rankine ideal para o real são, para Sonntag (2003), as perdas na turbina, as perdas na bomba, as perdas nas tubulações e as perdas no condensador. As perdas na turbina são associadas ao escoamento do fluido de trabalho através dos canais e palhetas da turbina, e as perdas na bomba são análogas às da turbina e ocorrem principalmente por causa dos processos irreversíveis associadas ao escoamento do fluido. É importante ressaltar que as perdas da bomba são menores quando comparadas às perdas da turbina, uma vez que a potência utilizada no acionamento da bomba é menor que a potência produzida na turbina.

As perdas nas tubulações de acordo com Oliveira (2018), são caracterizadas pela perda de carga provocada pelo atrito, e a transferência de calor ao ambiente. Uma perda análoga é a perda de carga na caldeira. Devido a esta perda, a água que entra na caldeira deve ser bombeada a uma pressão maior que a pressão desejada de saída da caldeira.

As perdas no condensador, para Sonntag (2003), ocorrem devido ao resfriamento abaixo da temperatura de saturação do líquido que deixa o condensador. Logo uma troca de calor adicional será necessária para trazer a água até a sua temperatura de saturação, porém essa perda é relativamente pequena.

As turbinas podem ser classificadas, de acordo com Rodrigues (2013), de acordo com pressão de descarga da turbina em relação à pressão atmosférica. Segundo o autor, quando a pressão de descarga da turbina a vapor for superior a pressão atmosférica, classifica-se como uma turbina de contrapressão, que é comumente utilizada quando o vapor de exaustão é utilizado posteriormente por algum processo industrial. Por outro lado, quando a pressão de descarga for menor que a pressão atmosférica, convencionou-se como turbinas de condensação, geralmente utilizadas a fim de aumentar a eficiência do ciclo. Outra variação deste ciclo é conhecida como ciclo Rankine regenerativo, onde em estágios intermediários de expansão da turbina o vapor é extraído e misturado ao montante de fluido que deixa o condensador. Dessa forma, uma quantidade menor de energia do combustível passa a ser demandada, devido ao fato de que esta energia é então suprida pelo próprio fluido de trabalho extraído, obtendo-se então uma maior eficiência global.

O rendimento de um ciclo Rankine pode ser melhorado através de pequenas modificações, como o reaquecimento, à temperatura de saída da caldeira, do vapor superaquecido entre os estágios de expansão da turbina. Nesta configuração, os estágios da turbina podem expandir o vapor até o limite de saturação aceitável pelas características operacionais da turbina, e então reaquecê-lo para adentrar o próximo estágio, aumentando a eficiência global do ciclo (RODRIGUES, 2013).

2.2.2 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton, de acordo com Rodrigues (2013) é um ciclo termodinâmico de geração de potência por combustão interna, que representa aplicações que utilizam turbinas a gás.

O ciclo Brayton é constituído basicamente de uma turbina a gás, compressor e câmara de combustão. A combustão é interna o que permite a queima de combustíveis gasosos e líquidos (OLIVEIRA, 2017).

Santos (2014) explica que no ciclo de Brayton o ar atmosférico é comprimido e injetado em uma câmara, onde, misturado ao combustível, é queimado, gerando gases de combustão em alta temperatura e pressão. Parte desses gases aciona a turbina a gás que gera energia elétrica através de um gerador acoplado a seu eixo e o restante aciona o compressor de ar. Os gases de rejeição da turbina são então enviados a um recuperador de calor, responsável por gerar vapor para o processo.

Segundo Rodrigues (2013), geralmente, as aplicações que operam segundo o ciclo Brayton utilizam o sistema em regime aberto, apesar de ser convencional considerar, apenas para análises termodinâmicas, que os gases de exaustão são reutilizados, fazendo com que o sistema opere em regime fechado.

Os gases de combustão a uma temperatura elevada são expandidos através de uma turbina a gás, que aciona o gerador elétrico e o compressor de ar. Uma parte da potência mecânica é usada para a compressão do ar de combustão e a temperatura dos gases de exaustão pode alcançar de 480°C até 540°C, e podem atuar como uma fonte de calor a partir da qual o calor é recuperado na forma de vapor ou ar quente para qualquer aplicação industrial desejada (OLIVEIRA, 2018).

Rodrigues (2013) reitera que o trabalho realizado pelo compressor exige que uma demanda de potência externa seja alimentada. Dessa forma, uma parte da potência gerada pela turbina – ou por uma sequência de estágios de expansão – é consumida pelo compressor. Adotando o mesmo procedimento realizado para o ciclo de Rankine, a eficiência global do ciclo de Brayton pode ser descrita conforme as equações 4 e 5:

$$\eta_{Brayton} = \frac{W_{líquido}}{q_H} \quad (4)$$

$$W_{líquido} = W_{turbina} - W_{compressor} \quad (5)$$

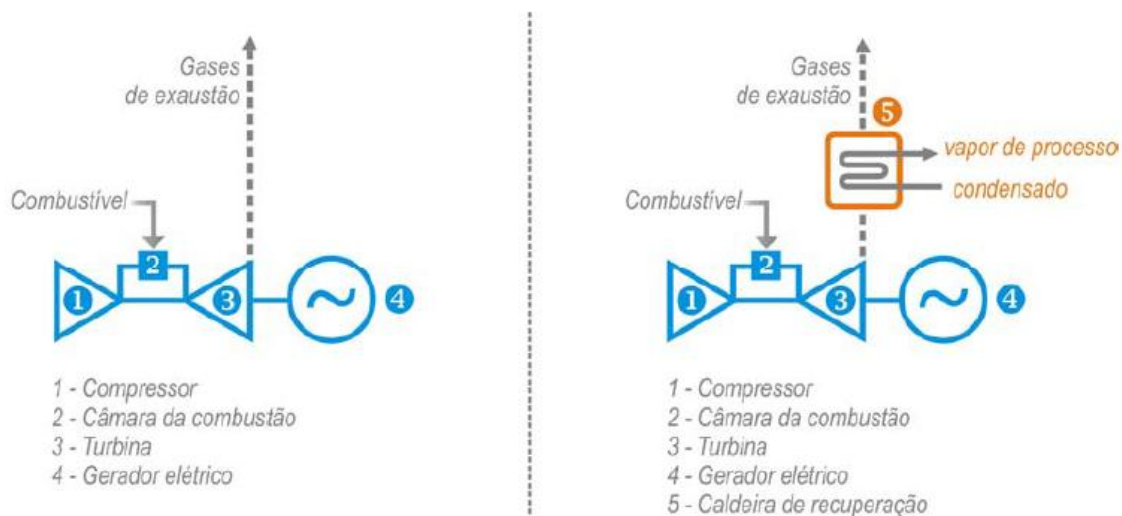
Nesta equação o $w_{líquido}$ e o qH representam respectivamente o trabalho líquido gerado pelo ciclo e o calor liberado pela queima do combustível, que também podem ser calculados conhecendo-se as propriedades termodinâmicas de cada ponto do ciclo. Em geral, calcula-se qH através do poder calorífico do combustível (RODRIGUES, 2013).

Oliveira (2018) destaca que as usinas de energia baseadas em turbinas a gás industriais instaladas para gerar apenas energia térmica operam com uma eficiência térmica de apenas 25% a 35%, dependendo apenas do tipo e do tamanho da turbina. Com a recuperação de calor nos gases de exaustão em uma caldeira de recuperação ou gerador de vapor, a eficiência global da planta pode alcançar entre 85% a 90%. Como alternativa, o calor dos gases de escape também pode ser desviado para o trocador de calor para gerar água quente ou ar quente ao invés de gerar vapor.

Santos (2014) explica que as temperaturas alcançadas nesse ciclo podem chegar a 1.300° C na câmara de combustão e após o acionamento da turbina e do compressor as temperaturas podem chegar a 590° C. Com temperaturas tão altas mesmo após o acionamento das cargas mecânicas, essa configuração torna-se extremamente atrativa para aplicação em sistemas de cogeração.

Para Rodrigues (2013), devido ao fato dos gases de exaustão encontram-se ainda em temperaturas elevadas, eles podem ser aproveitados por outros processos industriais específicos, ou pela utilização de um sistema de Ciclo Combinado, compondo, portanto, um sistema de cogeração do tipo *topping*. Uma das formas de aproveitamento dos gases para o aumento da eficiência do ciclo Brayton é o uso da regeneração. Nesta configuração os gases de exaustão, a temperaturas elevadas, fornecem uma parte da quantidade de calor total demandada para o ar, antes deste ser direcionado à câmara de combustão, diminuindo assim a quantidade de combustível necessária. Na Figura 3 faz-se uma comparação entre o ciclo Brayton simples e um sistema de cogeração do tipo *topping* que faz uso do ciclo Brayton. Assim como no caso do ciclo Rankine, a eficiência global do segundo caso é significativamente maior do que a do primeiro caso, devido ao reaproveitamento dos gases de exaustão.

Figura 3 - Representação do Ciclo Brayton simples e Ciclo Brayton com implementação de cogeração do tipo *topping*



Fonte: Rodrigues (2013)

De acordo com Oliveira (2018), em comparação com o ciclo Rankine, o Ciclo Brayton é ideal para as indústrias onde a demanda de vapor é relativamente alto e relativamente constante. O sistema de cogeração à base de turbina a gás proporciona um melhor desempenho com combustíveis limpos como gás natural, ou não contendo cinzas e escórias ou combustíveis de hidrocarbonetos líquidos de baixo teor de cinzas, como a nafta, diesel de alta velocidade, entre outros. Porém é preciso manter a limpeza e manutenção frequente.

Oliveira (2017) reitera que o ciclo Brayton é um estágio mais desenvolvido que o ciclo Rankine por apresentar maior eficiência térmica e menores impactos ambientais.

Para Oliveira (2018) sua desvantagem é que quando a demanda de energia cai para menos do que 80% da capacidade da turbina a gás, o consumo específico de combustível aumenta e a saída de vapor da caldeira de recuperação também cai. A saída de vapor pode ser mantida recorrendo a uma queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação. Os queimadores para queima suplementar são geralmente instalados no duto de combustão de escape fornecido entre a turbina a gás e a caldeira, e são projetados para permitir que a caldeira mantenha a potência máxima de vapor mesmo quando a turbina a gás estiver parcialmente carregada.

Segundo Devki (2006) esse sistema garante uma alta flexibilidade no projeto e garante a operação da planta, uma vez que é possível variar amplamente a

proporção de cargas de vapor para potência sem afetar muito a eficiência global da planta. No caso de queima suplementar com base nos dutos de exaustão, a necessidade de combustível é substancialmente reduzida proporcionalmente ao vapor adicional gerado devido à presença de cerca de 15% de oxigênio não queimado nos gases de escape.

Scarpin (2013) destaca que um dos parâmetros significativos do ciclo de turbinas a gás é a relação de pressão do ciclo que é referido ao quociente da pressão de descarga e a pressão de entrada, sendo que em turbinas modernas, um valor típico é próximo de 14. Já o outro parâmetro é a temperatura de atuação do ciclo, onde a faixa de temperatura pode atingir 1.500 K, que é restringida por problemas na utilização de determinados materiais e custos agregados. As três formas de aumentar a eficiência de um ciclo Brayton, são elas: regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento, isto é, a combinação dessas três formas é conhecida como ciclo composto.

2.2.3 Ciclo combinado

Rodrigues (2013) define o ciclo combinado como a unificação de dois ou mais ciclos termodinâmicos, tais como os de Rankine e Brayton, com a principal finalidade de aumentar a eficiência global do processo. Esse conceito se assemelha muito com o conceito de cogeração, posto que este seja a geração de duas formas distintas de energia associadas a processos distintos. Na prática, a combinação mais utilizada é a de uma planta que alia os conceitos dos ciclos Brayton e Rankine.

O ciclo combinado é uma junção dos ciclos de turbina a vapor (Ciclo de Rankine) e do ciclo a gás (Ciclo Brayton). Este ciclo tem como principal função o aproveitamento dos gases de exaustão que são expelidos pela câmara de combustão resultante da queima do combustível para o aumento da eficiência do ciclo combinado (FERREIRA, 2017).

Santos (2014) explica que no ciclo combinado o combustível é queimado e aciona uma turbina a gás acoplada a um gerador elétrico. Os gases de exaustão desse processo são utilizados em uma caldeira de recuperação para gerar vapor que aciona uma turbina conectada a um segundo gerador elétrico, podendo parte desse vapor ser utilizado para atender à demanda térmica do sistema.

Oliveira (2017) destaca que a configuração mais empregada é a combinação do ciclo Brayton como unidade superior *topping* com o ciclo Rankine como unidade inferior *bottoming*.

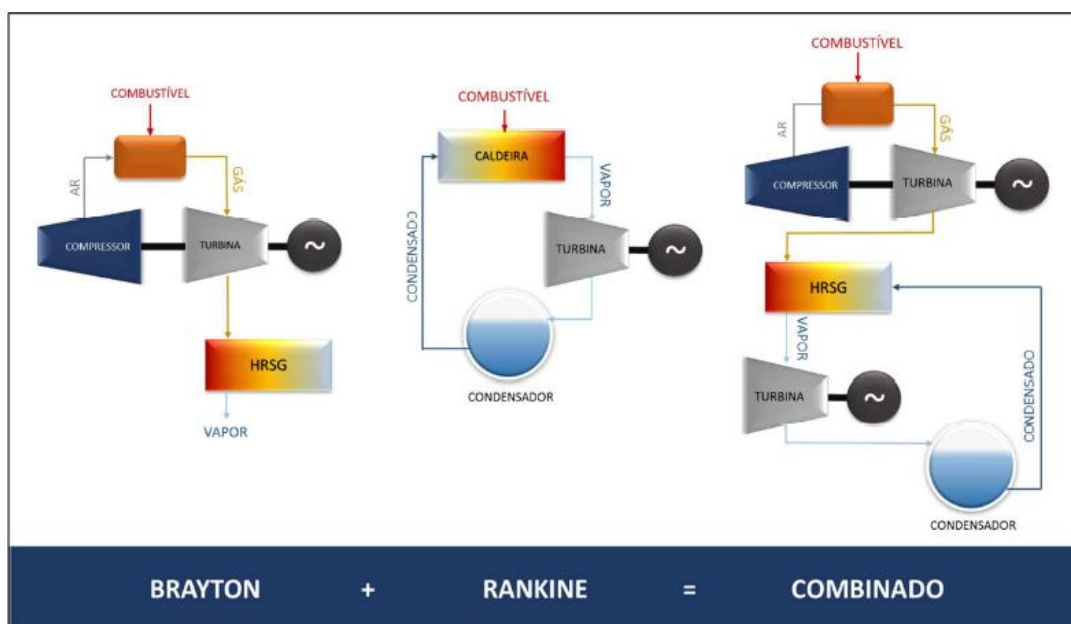
A combinação do ciclo Brayton e do ciclo Rankine, especificamente nesta ordem, onde a turbina a gás do primeiro é responsável pela geração de potência, e os gases de exaustão tornam-se a fonte energética de suprimento da caldeira para o segundo ciclo, torna esta uma configuração mais eficiente do que se os ciclos estivessem operando separadamente. É importante destacar ainda que além da geração de potência pela turbina a gás, a turbina a vapor do ciclo Rankine também será responsável por uma parte da geração de potência, utilizando-se da mesma fonte energética e que, portanto, aumenta a eficiência global da planta e pode garantir maiores níveis de excedente de energia elétrica RODRIGUES (2013).

Oliveira (2018) a combustão gera uma potência de eixo que alimenta o gerador elétrico e gera gases de exaustão. Os gases de exaustão são direcionados para uma caldeira de recuperação a fim de produzir vapor para alimentar a turbina a vapor em sequência. O vapor é expandido dentro da turbina, gerando uma potência de eixo que igualmente alimentará um gerador elétrico e um vapor a baixa temperatura e baixa pressão é rejeitada, que pode ser aproveitada também na unidade de processo.

Ferreira (2017) reitera, que o vapor originário do ciclo a gás passa por uma caldeira de recuperação, pelo qual tem a função de transmitir de maneira mais eficiente o calor gerado para o ciclo a vapor, assim de substituir a caldeira, reduzindo o consumo de combustível. Esta junção dos ciclos resulta em uma elevada eficácia na utilização do combustível.

Nesse ciclo, a prioridade de acordo com Santos (2014) é a eficiência na conversão de energia térmica em mecânica e posteriormente em elétrica. Sua principal vantagem é a flexibilização da geração térmica e elétrica que podem variar de acordo com as cargas consumidoras. A Figura 4 demonstra os ciclos descritos nos dois últimos itens funcionando separadamente e de forma combinada.

Figura 4 - Junção dos Ciclos Brayton e Rankine formando o Ciclo Combinado



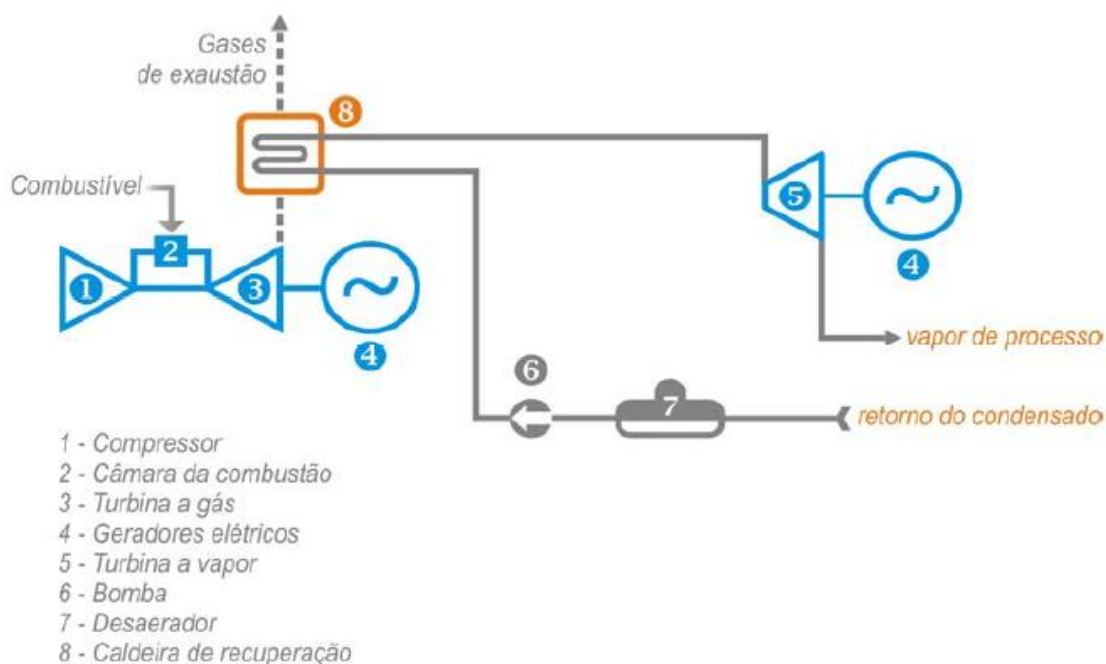
Fonte: Santos (2014)

No caso do ciclo combinado, a eficiência global pode ser calculada, de acordo com Rodrigues (2013), levando-se em conta o fato de que a utilização do combustível é feita apenas na turbina a gás, ainda que essa energia seja aproveitada posteriormente. Dessa forma, a eficiência global pode ser obtida pela razão entre todas as formas de energia efetivamente aproveitadas no ciclo e o calor gerado na queima do combustível, podendo chegar a valores entre 60% e 90%. Denominando E toda a energia eletromecânica líquida gerada pelo ciclo combinado e S a energia térmica disponibilizada, conforme equação 6:

$$\eta_g = \frac{\dot{E} + \dot{S}}{\sum \dot{m}_{c,i} PCI_i} \quad (6)$$

Ainda para Rodrigues (2013), nesta equação, onde o índice i representa a contribuição individual de cada elemento que utiliza o conteúdo energético fornecido pelo combustível, sendo o somatório de todas as contribuições a energia total fornecida pelo combustível. A Figura 5 mostra uma configuração típica de um ciclo combinado de cogeração, onde primeiramente tem-se a geração de potência por um ciclo Brayton e posteriormente a utilização de um ciclo Rankine utilizando os gases de exaustão como fonte de energia.

Figura 5 - Ciclo combinado de cogeração utilizando Brayton e Rankine



Fonte: Rodrigues (2013)

Oliveira (2018) destaca que a combinação dos dois ciclos é vantajosa quando a relação entre a energia elétrica e a carga térmica requisitada é alta, pois essa configuração fornece resultados melhores quando comparado ao Ciclo Rankine sozinho. E se for utilizada uma queima suplementar na caldeira de recuperação como citado no Ciclo Brayton, essa configuração fornecerá resultados ainda mais flexíveis e vantajosos.

O rendimento elétrico dessa configuração combinada, nas palavras de Oliveira (2017), pode ultrapassar 60%, valor consideravelmente maior do que se os ciclos trabalhassem separadamente, ficando em torno de 35%. Tendo a possibilidade de desenvolver cogeração em ciclos combinados através de extrações de vapor na turbina para atender a demanda térmica de processos a eficiência total do ciclo pode alcançar 85%.

Posto isso, a seção seguinte trata especificamente da cogeração, que se baseia nos ciclos de termodinâmicos descritos para a geração combinada de energia elétrica e térmica, aumentando a eficiência dos processos em que são utilizadas.

2.3 Cogeração

A cogeração é o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil. De acordo com o Conselho Mundial de Energia (2001), o conceito de cogeração significa a produção simultânea e sequencial de duas ou mais utilidades, calor de processo e potência mecânica e (ou) elétrica, a partir da energia disponibilizada por um ou mais combustíveis.

Devido as suas características, a aplicação da cogeração, de acordo com Barja (2006), é uma alternativa para os processos industriais de produção em que há demanda simultânea de energia térmica e eletromecânica, com a vantagem do uso racional de combustível.

Para o melhor entendimento sobre o desenvolvimento dessa tecnologia no mundo e também no Brasil, será apresentado o pequeno histórico sobre a mesma. Segundo Belisario (2012), no final do século XIX e início do século XX, a eletrificação industrial deu início a cogeração no mundo, primeiramente na Europa e em seguida nos EUA. No entanto, o crescimento de sistemas cogerativos no contexto histórico global esteve intimamente ligado às oscilações no mercado petrolífero, e os combustíveis derivados do petróleo mantiveram seus preços sem poucas oscilações até a década de 70, prejudicando uma possível ascensão desse setor.

Mas na década de 70, tudo mudou. Para Barja (2006), em 1973 e 1979, com as fortes crises do petróleo e a alta no preço dos combustíveis, novas fontes de energia tiveram seu uso intensificado e um redirecionamento dos esforços foi voltado para estudos que envolvessem o uso racional de energia na indústria.

No Brasil, de acordo com Pousa (2009), o início da cogeração se deu no setor sucroalcooleiro devido aos grandes incentivos que a produção do álcool obteve, principalmente após a criação do Programa Nacional do Álcool, o Proálcool, intensificados devido às fortes crises do petróleo. Hoje em dia, o grande motivador da criação de projetos de cunho cogerativos está na matriz energética brasileira.

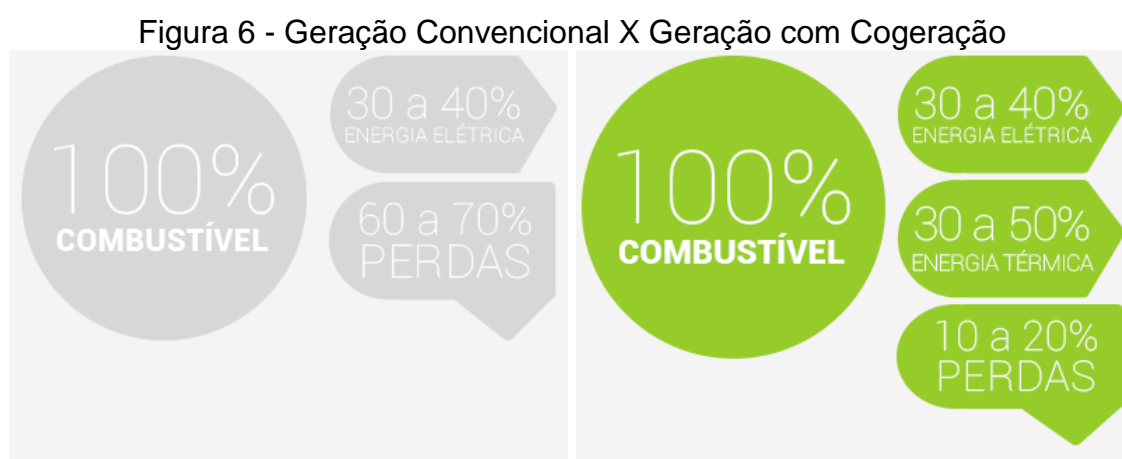
A principal vantagem dos sistemas de cogeração, para Belisario (2012), está no aproveitamento de rejeitos térmicos da máquina motriz para outras aplicações úteis, promovendo um expressivo aumento da eficiência global do ciclo quando comparada à geração separada de calor e potência.

No entanto, apesar dos incentivos e vantagens, a cogeração encontra algumas dificuldades para implantação no país. Barja (2006) ressalta que um dos entraves ao aumento de projetos e instalações de cogeração no Brasil são a elevada carga tributária e os altos preços dos insumos energéticos praticados no país.

Existem diferentes métodos que podem ser empregados para a geração de potência e o aproveitamento dos rejeitos térmicos, que podem variar com a atividade produtiva, o porte do cogerador e singularidades energéticas de cada país (GUARINELO JÚNIOR, 1997).

Além de depender desses fatores, Santos (2014) completa que as condições de aproveitamento e eficiência da cogeração, também estão intimamente ligadas à topologia do sistema da cogeração e podem variar de acordo com as tecnologias implantadas.

Pousa (2009) explica que a aplicação da cogeração em centrais térmicas convencionais de energia elétrica, onde se perde até 60% da energia fornecida pelo combustível, encontra dificuldades devido a localização distante dos centros comerciais e industriais consumidores de calor. No entanto, em um processo industrial onde haja demanda das duas formas de energia, a cogeração se torna extremamente atrativa. Nas instalações típicas de cogeração (Figura 6) as perdas de energia elétrica são menores, pois se localizam próximas aos centros consumidores, quando não estão dentro do próprio estabelecimento.



Fonte: CHP BRASIL (2018) (adaptado)

De acordo com a figura 6 percebe-se que no sistema de geração convencional as perdas representam um percentual de 60 a 70%, já na

geração com cogeração, as perdas são muito menores, ficando em percentuais entre 10 a 20%, já que além de gerar energia elétrica, o sistema também gera energia térmica. A cogeração promove uma eficiência energética maior devido ao aproveitamento do calor que seria rejeitado.

A tecnologia da cogeração, de acordo com Rodrigues (2013), pode ser aplicada tanto no setor industrial (empresas do setor sucroalcooleiro, alimentos e bebidas em geral, de papel e celulose, indústrias químicas e petroquímicas), quanto no setor terciário (em aeroportos, hotéis, hospitais e hipermercados). Para Balestieri (2002), a cogeração pode ser aplicada tanto em sistemas interligados quanto em sistemas isolados, distinguindo-se pelo porte dos sistemas então empregados.

Existem diferentes tipos diferentes de cogeração, o que possibilita sua aplicação em diversos setores. Os subtópicos seguintes apresentam esses diversos tipos e explicam as diferenças entre eles, além de abordar os equipamentos da cogeração.

2.3.1 Tipos de Cogeração

Os sistemas de cogeração podem ser classificados de acordo com a posição relativa da geração de energia elétrica na sequência da geração e utilização de calor. Barja (2006) explica que a aplicação da cogeração é convencionalizada de duas formas, em função da sequência relativa da geração de energia eletromecânica para a térmica: geração anterior de energia eletromecânica (*topping*) e geração posterior de energia eletromecânica (*bottoming*).

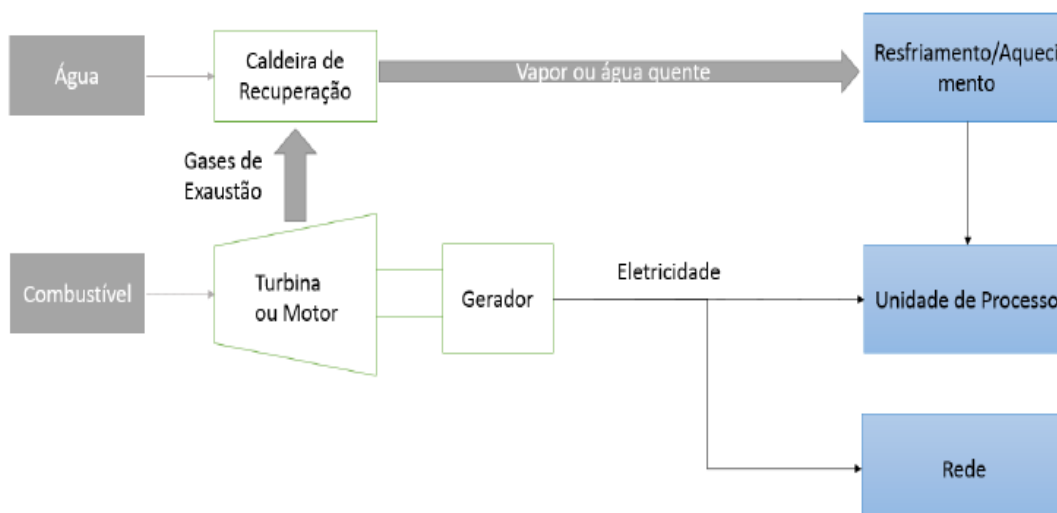
De acordo com Rodrigues (2013), quando a produção de energia elétrica ou mecânica antecede a demanda de calor útil, diz-se que o sistema é do tipo *topping* (a montante), ou seja, a utilização do combustível está diretamente relacionada à produção de energia.

Segundo Pillon (2012), neste tipo de sistema, através da energia disponibilizada pelo combustível o primeiro aproveitamento se dá para a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), e em seguida para o aproveitamento de calor útil (Figura 7). Neste tipo de sistema, o rejeito da geração elétrica (calor) poderá ser usado como uma fonte de energia para secadores situados dentro das empresas, principalmente das empresas cerâmicas.

Figura 7 - Ciclo *Topping*

Fonte: Nogueira, Carvalho e Teixeira (2004)

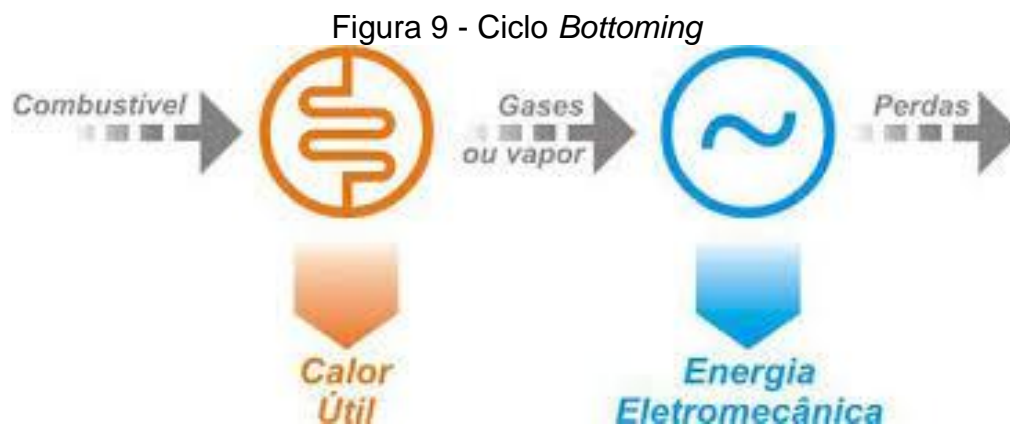
Belisario (2012) destaca que o regime *topping* é típico de máquinas térmicas cuja função é queimar combustível para atender a demanda de eletricidade. Os gases de exaustão da máquina são então aproveitados para geração de vapor. Esse tipo de arranjo é mais utilizado em sistemas de cogeração por aproveitar melhor a energia dos insumos. Nesse sistema os gases de exaustão são enviados para uma caldeira de recuperação alimentada com água, gerando vapor ou água quente, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de configuração *Topping*

Fonte: Adaptado de Otis (2015), por Oliveira (2018)

Já o regime *bottoming*, segundo Barja (2006), utiliza a energia disponibilizada pelo combustível primeiro para o aproveitamento de calor útil a elevadas

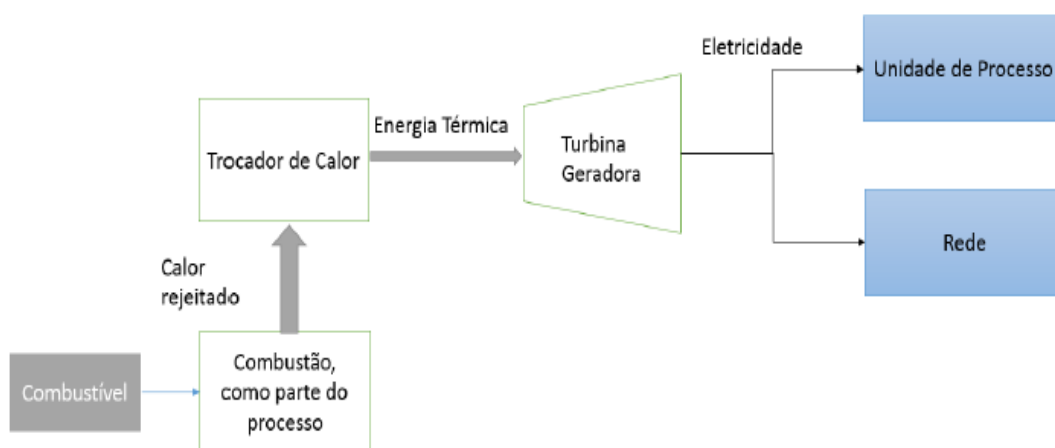
temperaturas, e em seguida para a geração de energia eletromecânica, como demonstrado na Figura 9.



Fonte: Nogueira, Carvalho e Teixeira (2004)

Este tipo de cogeração se baseia no aproveitamento do calor vindo de processos industriais para produção de vapor e em seguida, expansão em turbinas para geração de potência (BELISARIO, 2012). Como se pode observar na Figura 10, o calor rejeitado pela combustão é direcionado para um trocador de calor, que transfere energia térmica para a turbina geradora de eletricidade.

Figura 10 - Esquema de uma configuração *Bottoming*

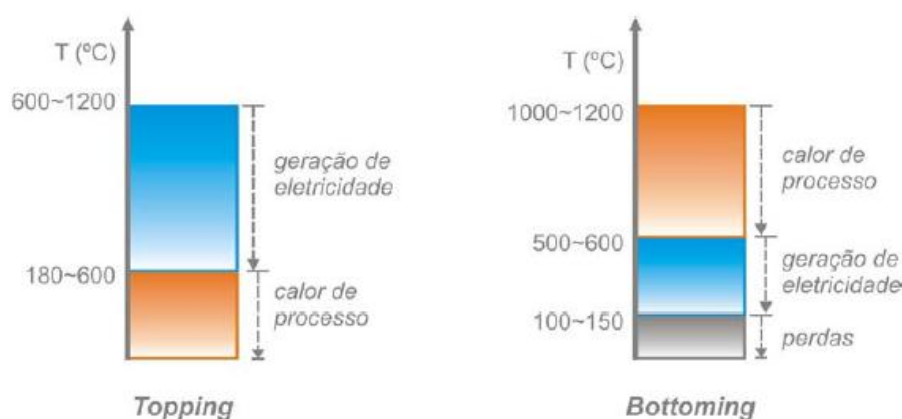


Fonte: Adaptado de Otis (2015)

A utilização de calor nas indústrias, de acordo com Carvalho *et al.* (2001), é habitual na faixa entre 120°C e 200°C, temperatura típica para os processos de

secagem, cozimento, evaporação, etc.; Contudo, a geração de energia elétrica trabalha em níveis mais elevados de temperatura, entre 400°C e 950°C. Sabendo que a temperatura de rejeição da geração termelétrica encontra-se mais elevada que a temperatura encontrada nos processos industriais é racional que se pense num sistema de cogeração do tipo *topping* onde se aproveita o calor proveniente da geração de energia elétrica no processo industrial. De fato, esta é a tecnologia empregada na maioria das indústrias, considerando que grande parte dos processos industriais demanda calor a baixas temperaturas.

Figura 11 - Faixa típica de temperatura para os sistemas de cogeração



Fonte: COGEN EUROPE (2001)

Já os sistemas de cogeração do tipo *bottoming*, de acordo com Barja (2006), são de utilização restrita, uma vez que o calor rejeitado pelos processos industriais se encontra em níveis de temperatura geralmente insuficientes para o seu emprego na produção de energia eletromecânica. Alguns processos industriais (siderúrgicas, fornos cerâmicos, cimenteiras, refinarias de petróleo) operam em altas temperaturas, entre 1000~1200°C. Após o processo, os gases de exaustão ainda encontram-se a temperaturas elevadas (500~600°C). Ao invés de descartá-lo diretamente na atmosfera, este calor residual pode ser direcionado a um trocador de calor, para produção de vapor que alimentará uma turbina a vapor. Desta forma, a energia contida no combustível pode ser mais bem aproveitada, com o uso inicial em uma carga térmica e na sequência a produção de eletricidade num ciclo do tipo *bottoming*. No entanto, este tipo de cogeração apresenta, em geral, rendimentos

eletromecânicos inferiores aos encontrados no tipo *topping*, que trabalham com temperaturas mais elevadas obtidas da queima direta de combustíveis.

O sistema do tipo *bottoming*, em geral, apresenta rendimentos eletromecânicos inferiores aos encontrados no sistema tipo *topping*. Para Rodrigues (2013) isso pode ser explicado pelas maiores temperaturas fornecida pela queima do combustível e sua utilização como principal elemento na mencionada sequência de cogeração. Ainda segundo o autor, a geração independente de calor – vapor e água quente – em caldeiras convencionais para o suprimento da energia térmica e a compra de energia elétrica de concessionárias locais para suprimento da demanda de potência concorrem incessantemente com os sistemas combinados de cogeração, apesar de haver um melhor aproveitamento da energia primária consumida neste caso.

A cogeração pode ser aplicada antes ou depois da obtenção de energia elétrica, e os rejeitos térmicos podem atender diferentes processos, em diferentes faixas de temperatura. Sendo assim, a cogeração pode ser aplicada em diferentes equipamentos. Estes equipamentos serão elencados e explicados no tópico a seguir.

2.3.2 Equipamentos da Cogeração

A cogeração necessita de equipamentos que queimem o combustível e permitam aproveitar a energia térmica despendida na combustão (RODRIGUES, 2009).

Para Santos (2014), a escolha dos equipamentos a serem utilizados dá-se em resultado às necessidades do sistema e do ciclo termodinâmico de trabalho das unidades de cogeração.

Existem diversas formas de classificar estes equipamentos, no entanto, Ferreira (2018) afirma que geralmente são caracterizados de acordo com o tipo de *prime mover* com que são equipados.

Castro (2009) explica que as soluções tecnológicas que hoje em dia equipam as centrais de cogeração podem ser divididas em dois grandes grupos, de acordo com o grau de maturidade, desenvolvimento tecnológico e disseminação comercial em que se encontram.

As tecnologias de cogeração podem ser divididas, na visão de Ferreira 2018, em dois grupos: as tecnologias convencionais, onde se englobam as turbinas a gás, as turbinas a vapor, os motores alternativos e o ciclo combinado (junção de duas tecnologias anteriores), e as tecnologias emergentes, onde estão inseridas as microturbinas e as pilhas de combustível. Nos subtópicos seguintes serão apresentados os equipamentos pertencentes a estes dois grupos.

2.3.2.1 Turbinas a Gás

As Turbinas a Gás, que têm uma vasta utilização em aeronáutica, são consideradas uma das tecnologias mais utilizadas em sistemas de cogeração devido à sua alta fiabilidade e grande variedade de potência (FERREIRA, 2018).

As turbinas a gás surgiram, de acordo com Neto (2018), com finalidade inicial de servir para pesquisas aerodinâmicas, como projeto de aviões, e com o passar do tempo, o seu uso foi ampliado para acionamentos de compressores, bombas e geradores.

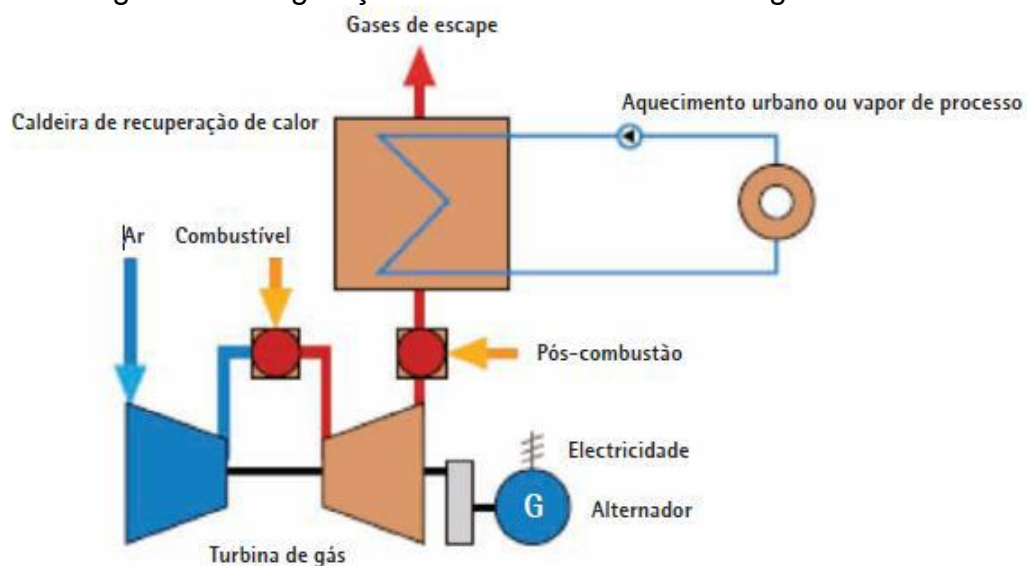
Barja (2006) explica que a turbina a gás é uma máquina de combustão interna de construção compacta, e que apesar do nome pode utilizar uma diversidade de combustíveis tanto líquidos quanto gasosos. A denominação de “turbina a gás” foi dada por consequência do seu fluido de trabalho – o ar. É composta por diversos elementos, resumidamente pelo compressor, câmara de combustão e turbina.

As turbinas a gás dos sistemas de cogeração, segundo Ferreira (2018), operam de acordo com o ciclo de Brayton e são constituídos por vários componentes: sistema de admissão de ar, compressor, câmara de combustão, turbina de expansão. O sistema de cogeração engloba ainda uma caldeira de recuperação de calor. Ou seja, este tipo de equipamento consiste num tipo de motor térmico onde o trabalho é produzido a partir de um fluxo contínuo de gases quentes provenientes da queima de contínua de um determinado combustível.

Ainda nas palavras de Ferreira (2018), as turbinas a gás podem operar em ciclo aberto, onde o ar atmosférico é levado ao compressor que eleva a sua pressão e, como consequência, a temperatura. Na câmara de combustão, o ar é misturado com o combustível e ocorre um processo de combustão a pressão constante. Geralmente o combustível presente é gás natural, podendo ser também fuelóleo, gás propano ou biogás. Os gases de combustão entram na turbina de expansão

acabando por acionar o dispositivo mecânico (gerador elétrico). A energia que estes gases ainda contêm quando saem da turbina pode ser recuperada numa caldeira de recuperação produzindo vapor ou água quente. A Figura 12 representa um esquema de uma solução de cogeração baseado numa turbina a gás.

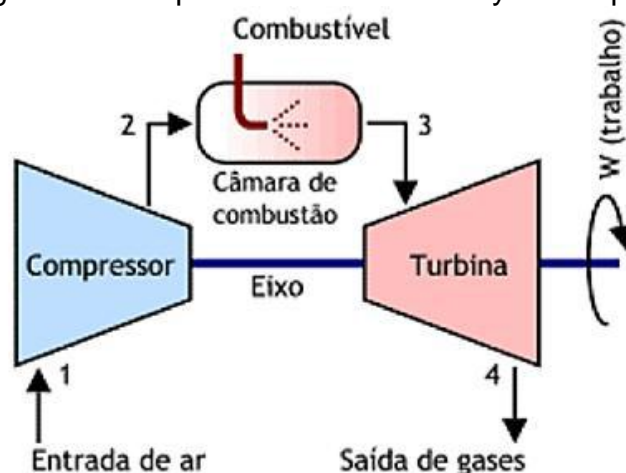
Figura 12 - Cogeração baseada numa turbina a gás



Fonte: Ferreira (2018)

De acordo com Neto (2018), em uma turbina a gás de ciclo Brayton simples (Figura 13). O ar entra no compressor (1) é descarregado já pressurizado (2) na câmara de combustão, onde se mistura com o gás natural (combustível). Após a queima que ali ocorre, os gases gerados são liberados a alta pressão e a alta temperatura para o expansor (a turbina propriamente dita) (3), fazendo girar as palhetas conectadas ao eixo rotativo, e a rotação do eixo faz funcionar o gerador para a produção de energia elétrica, acionando também o próprio compressor. Após passarem pela turbina os gases são liberados para o meio ambiente (4).

Figura 13 - Esquema de um ciclo Brayton simples



Fonte: Couto (2015)

Barja (2006) destaca que nesta máquina térmica, grande parte do trabalho obtido na turbina é consumida no compressor, em torno de metade da produção, e outra rejeitada nos gases de exaustão. É importante destacar a alta razão ar-combustível, em torno de 50:1 em massa, o que faz com que as condições climáticas (temperatura ambiente e umidade relativa) influenciem de forma significativa no seu desempenho, provocando alterações tanto no rendimento quanto na potência gerada, ambos piorando conforme a elevação da temperatura. Por trabalhar com excesso de ar, os gases de exaustão ainda possuem concentrações de oxigênio em torno de 15~16%, o que viabiliza a sua queima posterior em algumas aplicações.

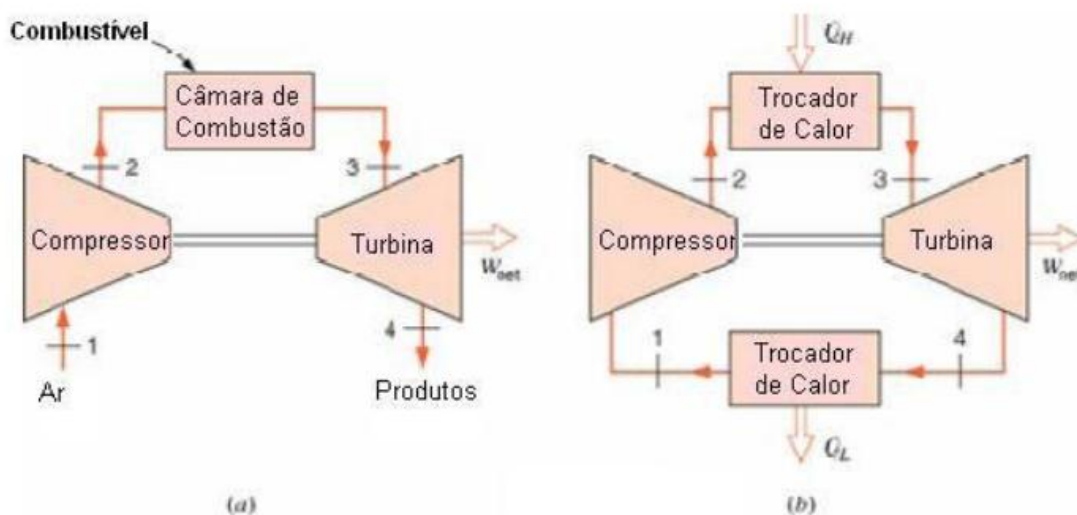
Ainda segundo Barja (2006), as turbinas a gás são divididas em duas classes principais, com aplicações específicas: aeroderivadas e *heavy duty*. As aeroderivadas possuem construção compacta e rendimento superior, da ordem de 35% a 42%, encontradas com potências entre 2,5 a 50 MW. As do tipo *heavy duty* são turbinas que possuem propositalmente rendimentos inferiores, com a finalidade de aproveitar-se seus gases de exaustão a temperaturas elevadas o suficiente (~600°C) para trabalhar em ciclo combinado, ou algum processo industrial específico, como será apresentado a seguir. São encontradas com potências superiores a 250 MW, em alguns casos. Em cogeração, a relação de produção entre eletricidade/ calor é da ordem de 0,8 a 0,5.

Com a aplicação desta tecnologia na cogeração, segundo NOGUEIRA *et al.* (2004), os gases de exaustão da turbina podem ser utilizados diretamente em

processos térmicos ou de modo indireto na produção de vapor ou água quente, mediante uma caldeira de recuperação, ou utilizando os gases como comburente nos queimadores de caldeiras convencionais. Algumas das possíveis aplicações em uso direto dos gases de escape de uma turbina a gás são: secadores com atomização (argilas, leite, produtos químicos), secadores em estufas (placas de madeira, placas de gesso, produtos agrícolas e alimentícios) e em fornos metalúrgicos de alívio de tensões e reaquecimento.

Já no funcionamento da turbina de gás em ciclo fechado, de acordo com Castro (2009), o processo de combustão é substituído por um processo de adição de calor de uma fonte externa (QH), a pressão constante, e o processo de escape é substituído por uma entrega de calor ao exterior (QL), também a pressão constante. Conforme apresentado na Figura 14 é possível comparar o processo de funcionamento das turbinas a gás de ciclo aberto e fechado, na qual: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor.

Figura 14 - Ciclo aberto x Ciclo fechado



Fonte: Freitas, Makiya (2012)

Ainda para Castro (2009), uma importante característica do ciclo de Brayton é o peso considerável que representa o trabalho que é necessário fornecer ao compressor, comparado com o trabalho fornecido pela turbina: o compressor pode requerer cerca de 40 a 80% do trabalho à saída da turbina, o que contrasta

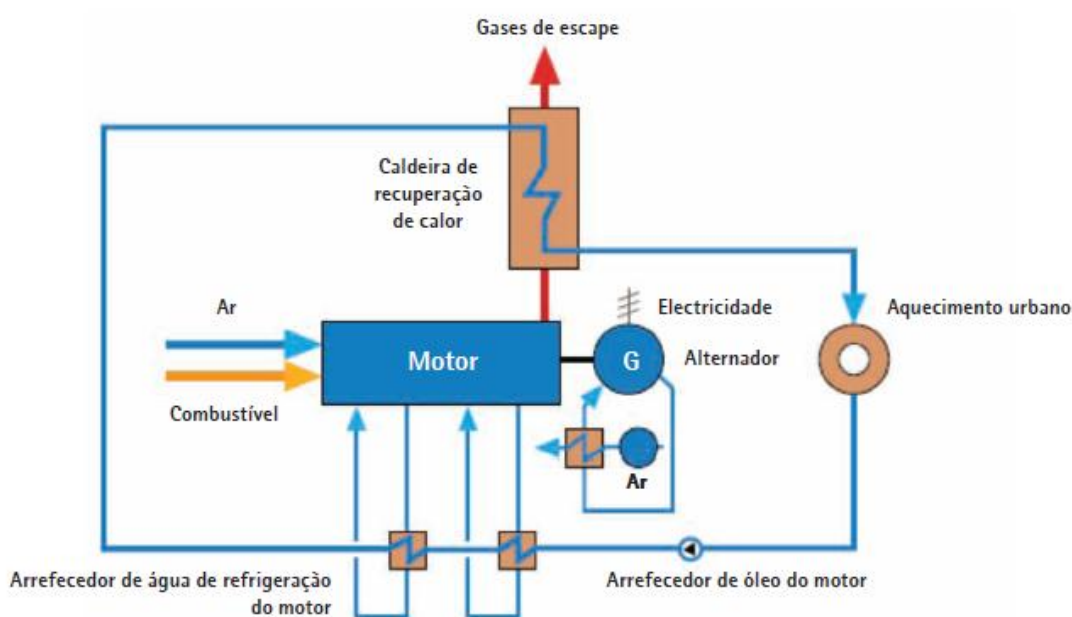
claramente com o ciclo de Rankine, em que aquela percentagem da ordem de 1 a 2%.

O trabalho útil da turbina a gás, segundo Neto (2018), corresponde à diferença entre o trabalho que é realizado no expensor e o trabalho utilizado para acionar o compressor. Devido ao fato de poderem atingir temperaturas de até 600°C, os gases de exaustão podem ser aproveitados através da instalação de um recuperador de calor, servindo assim para produzir água quente ou vapor, maximizando o aproveitamento energético. Outra possibilidade para o aproveitamento destes gases reside numa configuração de cogeração para conseguir produzir mais energia elétrica.

2.3.2.2 Motores Alternativos

Os motores alternativos, de acordo com Ferreira (2018), são constantemente usados nos meios de transporte, mas também em sistema de cogeração nos sectores comerciais e residenciais. Um esquema de uma solução de cogeração com motor alternativo está representado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema de uma solução de Cogeração com motor alternativo



Fonte: Rocha (2016)

Os motores alternativos podem funcionar segundo o ciclo de Otto ou segundo o ciclo de Diesel e são muito utilizados em cogeração. Os motores Otto usam normalmente o gás natural, gasolina ou propano como combustível e são designados por motores de explosão ou ignição por faísca, enquanto os motores a Diesel trabalham com gasóleo e são designados por motores de ignição por compressão (Ferreira, 2018).

A maior diferença entre os motores de ciclo Diesel e ciclo Otto, de acordo com Barja (2006), está no modo de queima. No ciclo Diesel a combustão se dá por meio de difusão, iniciada por autoignição. Desta forma esse motor aspira ar sem nenhuma restrição (ausência de borboleta) e ajusta a quantidade de combustível para o requerimento de potência. Já no ciclo Otto, o motor aspira uma pré-mistura de ar e combustível. A chama é do tipo pré-misturada, altamente passível de detonação, e a queima é iniciada por uma vela de ignição.

Em outras palavras, Ferreira (2018) explica que nos motores de explosão o combustível é misturado com o ar atmosférico na câmara de combustão. Os gases em expansão provocam um movimento cíclico do pistão produzindo energia mecânica, que por sua vez ativa o gerador elétrico convertendo a energia produzida em energia elétrica. Nos motores de ignição por compressão o ar é comprimido no cilindro, sendo conseqüentemente aquecido, permitindo que o combustível acenda espontaneamente devido à alta temperatura do ar comprimido.

Castro (2009) destaca que os motores de explosão são os mais usados em instalações de cogeração, uma vez que possuem várias fontes de recuperação de calor: gases da exaustão e circuitos de refrigeração do óleo e do motor.

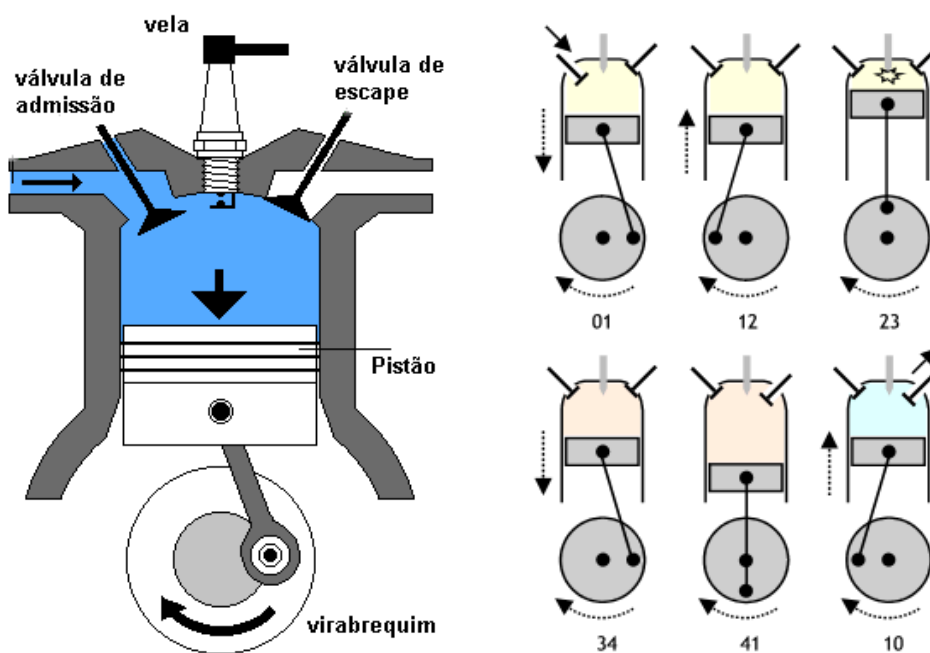
Barja (2006) reitera que os motores de combustão interna, se apresentam como a primeira opção na aplicação em sistemas de cogeração de pequeno porte para prédios comerciais, hospitais, hotéis e supermercados, devido as suas características. As principais são: disponibilidade numa grande faixa de potência, construção compacta, utilizar uma variedade de combustíveis líquidos e gasosos, elevada eficiência em ciclo simples e um bom fator de disponibilidade (80~90%).

Ainda de acordo com Barja (2006), esta máquina trabalha em ciclo aberto, utilizando o ar como fluido de trabalho. O ar (comburente) é admitido em seu interior pela sucção provocada pelo deslocamento de um pistão sob um êmbolo, no qual é adicionado o combustível. Em seguida, a mistura de ar e combustível é comprimida e inflamada (conversão da energia química do combustível em energia térmica),

ponto em que a temperatura é elevada e a pressão atinge valores da ordem de 100 atm, forçando o deslocamento do pistão à sua posição inicial (transformação de pressão em trabalho mecânico). O pistão está conectado a um eixo de manivelas, fazendo a conversão do movimento alternativo em rotativo.

Castro (2009) explica que a câmara de combustão contém um cilindro, duas válvulas (uma de admissão e outra de escape) e uma vela de ignição. O pistão que se move no interior do cilindro é acoplado à biela que se articula com a cambota. A cambota transforma o movimento de vaivém num movimento rotativo. Este tipo de motor designa-se por motor a “quatro tempos”, porque o seu funcionamento se faz numa sequência de quatro etapas. Os elementos e processos de um motor de explosão podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Desenho esquemático de um motor de explosão e etapas do seu funcionamento



Fonte: Castro (2009)

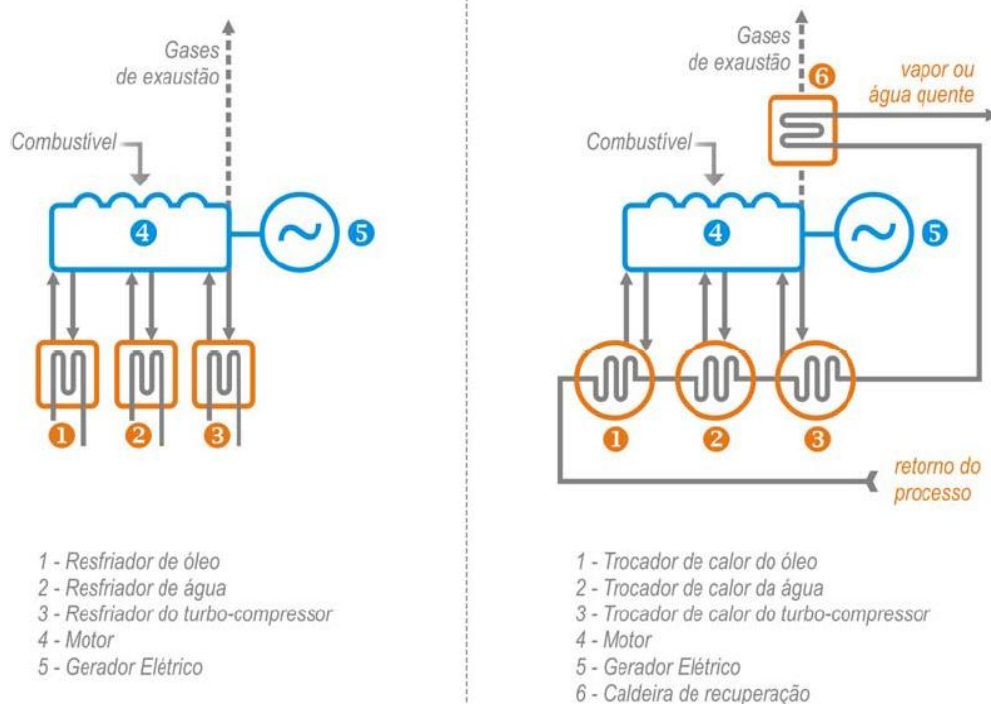
Já o motor diesel, Castro (2009), é o motor em que o combustível – o óleo diesel ou gasóleo – é queimado por ação do calor libertado quando o ar é comprimido com uma taxa muito elevada. A taxa de compressão no ciclo Diesel é muito superior à do ciclo Otto, porque no primeiro, apenas o ar é comprimido, enquanto que, no segundo, é a mistura ar-combustível que é comprimida, o que é

especialmente problemático na fase de explosão; daí a necessidade de taxas de compressão sensivelmente mais baixas.

Outra diferenciação do motor Diesel, para Barja (2006), é a alta taxa de compressão empregada, da ordem de 20:1, fazendo com que o seu rendimento supere valores de 45%, podendo chegar a 50%. Já nos motores *Otto*, que apresentam taxas de compressão inferiores, em torno de 10:1, os rendimentos alcançam valores em torno de 35%.

Barja (2006) Na cogeração, tanto nos motores *Otto*, quanto Diesel, os gases de exaustão (Figura 17) podem ser utilizados diretamente em processos térmicos ou indiretamente, através de uma caldeira de recuperação de calor, entretanto poderá ser necessária a utilização de queima suplementar para elevação da temperatura.

Figura 17 - Sistema de geração pura de eletricidade com motor alternativo e sistema de geração combinada de calor e eletricidade – cogeração.



Fonte: Barja (2006)

De acordo com Ferreira (2018) essa recuperação de calor acontece através de várias fontes, havendo recuperação de calor obtido nos gases de exaustão e uma recuperação associada aos circuitos de refrigeração do bloco e do óleo de lubrificação.

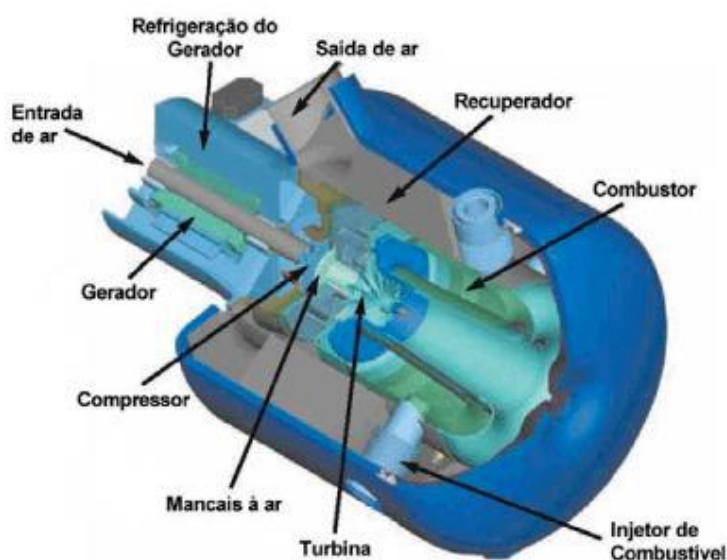
2.3.2.3 Microturbinas

A microturbina consiste num sistema semelhante ao de uma turbina a gás normal, no entanto com dimensões relativamente reduzidas, sendo composto por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico, com uma potência elétrica que não ultrapassa os 300 kWe. Atualmente existem alguns modelos com potências na ordem dos 20 kWe, no entanto, tem sido feito um estudo aprofundado de forma a seja possível desenvolverem-se unidades cada vez menores (DELGADO, 2016).

Para Castro (2009), a dimensão é a principal marca distintiva das microturbinas situam-se na gama 30 – 300 kW, enquanto as turbinas a gás ocupam o campo desde 0,5 a 250 MW.

Barja (2006) destaca, que a principal característica das microturbinas é o arranjo montado sob eixo único de um compressor radial simples com uma turbina radial e um gerador, com um recuperador utilizado para pré-aquecer o ar de combustão e aumentar a eficiência do sistema. O eixo do sistema atinge velocidades angulares elevadas, em torno de 45.000 a 100.000 rpm. Os componentes de uma microturbina podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 - Vista em corte de uma microturbina

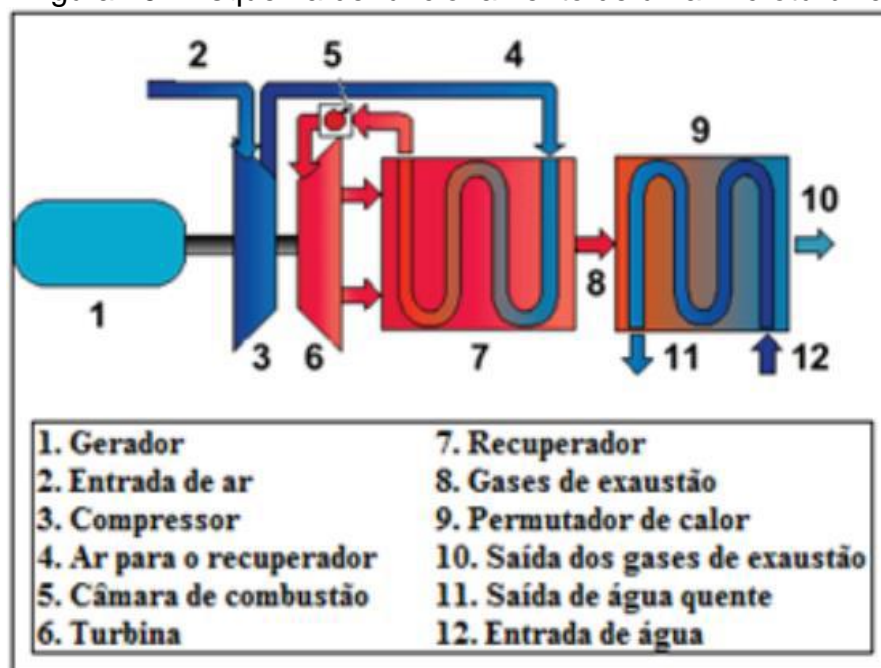


Fonte: Barja (2006)

Já quanto a cogeração, de acordo com Ferreira (2018), a microturbina pode ser integrada em sistemas de cogeração que operam de modo muito semelhante com a turbina a gás, operando segundo o ciclo de Brayton.

Nas microturbinas, de acordo com Delgado (2016), o ar novo é admitido e conduzido até ao compressor, onde a sua pressão é elevada. De forma a aumentar o rendimento, é comum integrar-se no sistema um recuperador de calor, também conhecido como regenerador, que aproveita a energia contida nos gases de escape de forma a aquecer o ar novo, antes de este entrar para a câmara de combustão. Este processo pode ser chamado de pré-aquecimento. O ar aquecido é, então, misturado com o combustível, nesse mesmo local. O calor que é libertado pela combustão provoca o aumento da temperatura da mistura ar-combustível e, conseqüentemente, da sua pressão. Ao passar na turbina, dá-se a expansão da mistura e, desta forma, é transmitida energia mecânica ao alternador, permitindo o acionamento do compressor e do gerador. O esquema de uma microturbina pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Esquema de funcionamento de uma Microturbina

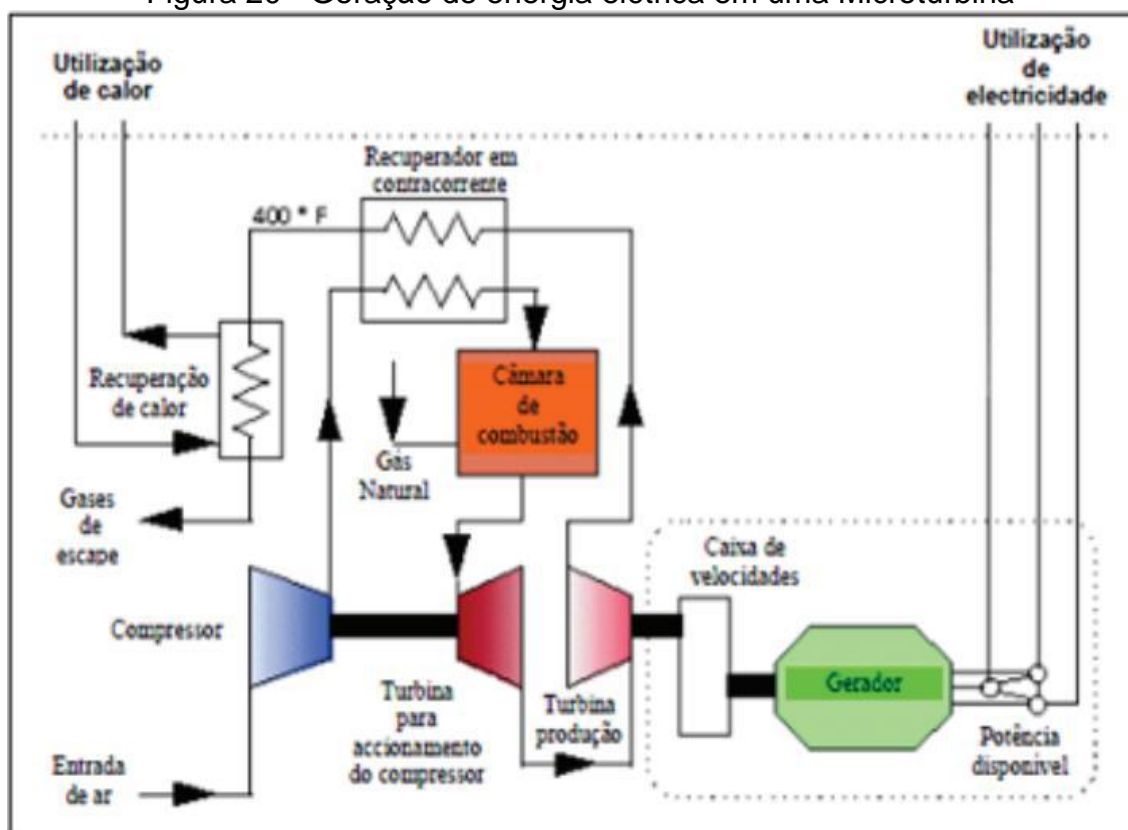


Fonte: Delgado (2016)

Barja (2006) destaca que a elevada rotação produz correntes alternadas de alta frequência, o que traz a necessidade do uso de um inversor para sua adequação ao uso (60 Hz). Outra solução consiste no uso de uma caixa de redução

para adequação da rotação do gerador, menos utilizado que a anterior. Esse arranjo pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Geração de energia elétrica em uma Microturbina



Fonte: Delgado (2016)

As microturbinas podem operar com uma grande variedade de combustíveis de acordo com Castro (2009), sendo o principal, o gás natural, mas também combustíveis líquidos como gasolina, querosene e óleo diesel.

Delgado (2016) reitera que apesar se de recorrer, frequentemente, ao conceito de “microturbinas a gás”, podem ser usados outros tipos de combustíveis. Os mais frequentes são o gás natural, o gás propano, a gasolina sem chumbo, os álcoois, o querosene, o bioetanol e o biogás. Dentre os combustíveis fósseis, o gás natural, é o mais indicado, uma vez que é aquele que permite uma menor emissão de gases poluentes, tornando-o mais adequado nos consumidores situados em centros urbanos, que representam parte considerável dos utilizadores de micro cogeração. O constante desenvolvimento, dessa tecnologia tem conduzido a valores de rendimentos cada vez mais elevados, menores taxas de emissão e diminuição

das necessidades e manutenção, garantindo um custo de kWe competitivo, sendo já, em alguns casos, inferior ao de pequenos motores de combustão interna a gás.

Outra característica importante de acordo com Barja (2006), é que as microturbinas possuem como característica baixos níveis de emissões de poluentes, podendo ser utilizadas sem a necessidade de tratamento dos gases de exaustão. O porte destes sistemas pode variar entre 30 e 250 kW, com razão entre eletricidade/calor em torno de 0,5 a 0,3 e temperatura de exaustão da ordem de 300 °C. De acordo com Castro (2009) O calor remanescente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para outros fins úteis.

Segundo Delgado (2016), normalmente, o alternador produz eletricidade em corrente alternada, com uma frequência bastante elevada, funcionando a uma velocidade na ordem dos 70.000 rpm a 90.000 rpm. Sendo esta, primeiro retificada para corrente contínua e, posteriormente, invertida de novo para corrente alternada, mas desta vez à frequência da rede, que se situa na gama dos 50 Hz ou 60 Hz. Também existem outras soluções em que o compressor e o gerador não se encontram acoplados no mesmo veio, sendo então necessário recorrerem-se a caixas de velocidade. Nestes casos, a existência de um maior número de peças móveis traduz-se num maior desgaste da máquina e necessidade de manutenção, bem como níveis de vibrações e ruído de operações superiores.

Ainda para Delgado (2016) um outro aspeto a ser considerado e que permite distinguir os diferentes tipos de microturbinas está relacionado com a forma de apoio dos componentes rotativos. Estes podem ser compostos por chumaceiras lubrificadas a óleo ou chumaceiras de ar, sendo que as primeiras exigem um consumo de óleo adicional. Em função do tipo de chumaceira utilizado serão diferentes as necessidades de manutenção, bem como o número de arranques a frio.

Barja (2006) destaca que alguns modelos de microturbinas utilizam tecnologia de mancal lubrificado a ar, e também sistema de resfriamento a ar, eliminando a necessidade da utilização de fluidos lubrificantes e refrigerantes, tecnologia que preza de alta taxa de disponibilidade e custos de manutenção reduzidos, comparando-se aos motores alternativos de mesmo porte.

O rendimento elétrico das microturbinas, de acordo com Delgado (2016), situa-se na ordem dos 30%, para os casos em que existe regenerador. Existem ainda situações em que os gases de combustão podem ser diretamente

aproveitados, como é o caso dos processos industriais de secagem ou pré-aquecimento com ar quente, e então, o valor pode mesmo ser superior a 90%. Recentemente, os últimos desenvolvimentos tecnológicos conduzem para uma utilização de materiais cerâmicos, nos diferentes componentes das secções quentes, presentes na próxima geração de microturbinas a gás, o que permitirá que se possa trabalhar com temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, rendimentos superiores.

2.3.2.4 Turbina a Vapor

De acordo com Barja (2006), há relatos de que os primeiros mecanismos a vapor datam de 200 anos A.C., que utilizavam pressão negativa para sua operação. Estes mecanismos não sofreram grandes alterações até a apresentação, no séc. XVIII, por Newcomen e James Watt, de uma máquina a vapor que combinava os diversos mecanismos desenvolvidos até então, capaz de utilizar o vapor de forma econômica e conveniente, por intermédio dos princípios físicos de domínio da comunidade científica.

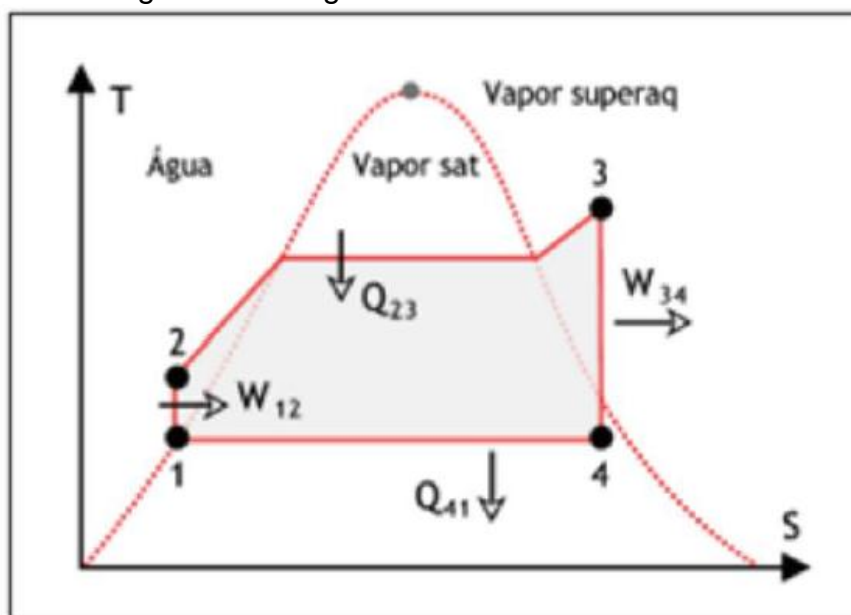
Ainda para Barja (2006), a máquina a vapor atual, de ciclo *Rankine*, pouco difere da máquina patenteada por James Watt há mais de 200 anos. Obviamente que foram introduzidas diversas modificações no intuito de melhorar-se o rendimento do ciclo. Esta máquina térmica, como qualquer outra, consiste basicamente em três componentes principais: uma fonte de calor, uma turbina a vapor e um sumidouro de calor.

Em uma turbina a vapor, segundo Ferreira (2018), o vapor é gerado numa caldeira, acabando por sair em condições de alta de pressão e temperatura. O vapor é transferido para uma turbina, onde a entalpia do vapor é transformada em energia mecânica, sendo aproveitada por um gerador para produzir energia elétrica.

Castro (2009) explica as turbinas a vapor são elementos constituintes bem conhecidos do equipamento das centrais térmicas convencionais (a carvão ou a fuel), incluindo as de ciclo combinado (a gás natural). O seu funcionamento é descrito pelo ciclo de Rankine.

Delgado (2016) exemplifica o ciclo de *Rankine*, cujo diagrama T-s é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama T-s do Ciclo de Rankine



Fonte: Delgado (2016)

Nas palavras de Delgado (2016), na figura está representado um esquema que traduz o ciclo de funcionamento de uma turbina a vapor, em circuito fechado. A água é aquecida, no interior de uma caldeira, sendo convertida em vapor saturado de alta pressão, a uma temperatura superior à de saturação (2 a 3). O vapor é depois expandido, por meio de uma turbina, normalmente constituída por vários andares, sendo mais tarde rejeitado, a uma baixa pressão, para um condensador de vácuo, onde se realiza a condensação do vapor. No final, o vapor condensado é direcionado de novo para a caldeira, dando início a um novo ciclo.

Barja (2006) destaca que a característica que mais diferencia o ciclo *Rankine* dos demais é a combustão externa ao fluido de trabalho. Com isso, pode-se utilizar qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso (ex: bagaço de cana, madeira, lixo, óleo diesel, gás natural).

A possibilidade da utilização de qualquer tipo de combustível é a grande vantagem deste sistema. A potência destes ciclos geralmente é encontrada em valores de 0,5 a 100 MW, podendo chegar até a 1.350 MW (PILLON, 2012).

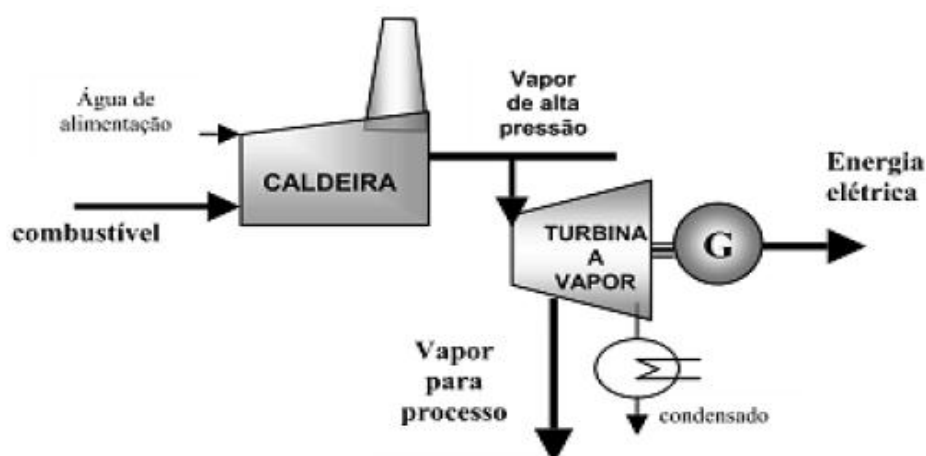
Rodrigues (2009) explica que a turbina a vapor converte a energia térmica contida neste fluido em energia mecânica, acionando um eixo acoplado ao gerador síncrono. O vapor superaquecido a alta pressão e temperatura entram nos bocais e é celerado, convertendo a energia térmica em energia cinética. O fluxo passa, então,

para as partes moveis da turbina (pás), exercendo uma força tangencial no rotor, para girar o eixo ao qual o gerador se encontra acoplado. No deslocamento axial do vapor em relação ao eixo da turbina, sua pressão cai e seu volume específico aumenta. As pás dos últimos estágios devem ser maiores, para acompanhar esta variação.

Barja (2006) reitera que este sistema utiliza a água como fluido de trabalho, em regra em circuito fechado. O ciclo inicia-se com a pressurização do fluido de trabalho ou o bombeamento de água, a pressões da ordem de 60 atm (podendo chegar até 100 atm), que segue para o gerador de vapor ou caldeira.

De acordo com Pillon (2012) na caldeira ocorre a queima do combustível é realizada na caldeira, desta maneira, a energia térmica liberada é transferida como fluido de trabalho, que atinge temperaturas desde alguns graus de superaquecimento até acima de 500°C, após este processo o vapor chega a turbina, onde o mesmo a alta pressão e temperatura são expandidos, convertida em cinética durante sua expansão, e em seguida a quantidade de movimento do fluxo de vapor é transferida às palhetas fixas e móveis do rotor transformando-se em trabalho do eixo no qual após criar esta energia chega ao condensador, onde são retirados o calor da pressão saturada que sai da turbina para que haja a condensação da água. Todos esses processos podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 - Sistema de cogeração a vapor



Fonte: Pillon (2012)

De acordo com Barja (2006), após a saída da turbina, o vapor saturado encontra-se comumente a baixa pressão e temperatura (na maioria dos casos em

condições próximas à atmosférica), havendo a necessidade de retirada de calor para a condensação da água, que ocorre no condensador rejeitando calor ao ambiente. Este é o principal ponto onde a cogeração é agregada, no momento em que há a necessidade da rejeição de energia térmica do ciclo, que pode então ser encaminhada para utilização posterior.

Ainda segundo Barja (2006) além da queima de combustível, a caldeira poderá ainda ser alimentada com o calor residual de outros processos industriais como fornos e reatores químicos, e até mesmo de outro ciclo de geração elétrica, formando o “ciclo combinado”. O vapor de processo poderá ser extraído também de outros pontos do ciclo, como nas extrações intermediárias da turbina. Existem dois arranjos básicos de cogeração: o primeiro com a turbina em contrapressão, onde o condensador é substituído pelo próprio processo industrial; o segundo arranjo com a turbina em condensação, onde há o condensador, porém o vapor destinado ao processo industrial é extraído em estágios intermediários da turbina, ou recuperado do condensador, e posteriormente retornado ao ciclo na forma de condensado. Na sequência, a água condensada, com a devida reposição, é bombeada no estado líquido novamente à caldeira, fazendo o fechamento do ciclo.

Silva (2018) explica que a turbina recebe fluxo de vapor com pressão e temperatura previamente fixada, expandindo-o e gerando potência útil, que será adicionada ao total de energia gerada pela MCFC. O balanço de massa deste componente está representado pela equação 7:

$$m_{19} = m_{20} \quad (7)$$

A geração de energia da turbina a vapor é limitada pelo seu valor isentrópico. Porém, em aplicações reais, sua operação apresenta perdas, sendo o valor de seu rendimento isentrópico estimado entre 0,70 e 0,88 (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009 apud SILVA, 2018). A equação 8 representa o rendimento isentrópico da turbina a vapor η_t .

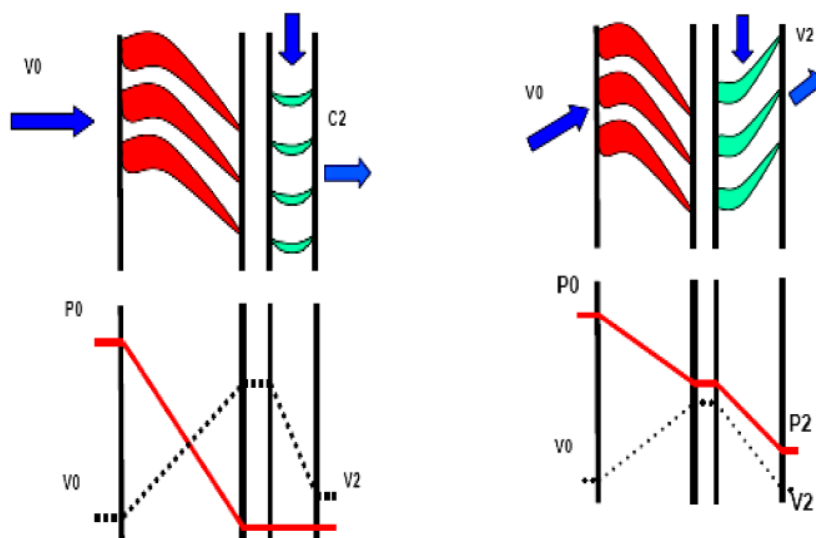
$$\eta_t = \frac{\bar{h}_{19} - \bar{h}_{20}}{\bar{h}_{19} - \bar{h}_{20s}} \quad (8)$$

De acordo com Silva (2018), o valor da entalpia no ponto 20 ideal, h_{20s} , é aquele que apresenta a mesma entropia da entrada da turbina ($s_{20} = s_{19}$), o que caracterizaria uma operação isentrópica. Já h_{20} representa o valor da entalpia na condição real de operação, em que $s_{20} > s_{19}$. O cálculo da potência gerada é feito com base no balanço de energia deste componente, conforme equação 9:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{19}(\bar{h}_{19} - \bar{h}_{20}) \quad (9)$$

Rodrigues (2009) explica que existem diversas classificações para as turbinas a vapor. Quanto à fabricação, as turbinas podem ser de ação ou reação. Nas turbinas de ação o vapor se expande somente nos bocais, havendo uma queda de pressão e aumento da energia cinética. Este vapor com alta velocidade incide sobre as pás móveis, convertendo sua energia cinética em trabalho mecânico. Interessante notar que a pressão se mantém constante nas pás móveis. As turbinas de ação são normalmente aplicadas para modelos de baixa capacidade. Já as turbinas de reação são projetadas para que a pressão diminua ao longo das pás fixas e móveis. As turbinas de reação são mais eficientes e compactas, pois possuem menos estágios (RINO, 2008 apud RODRIGUES, 2009). A Figura 23 demonstra esquematicamente a diferença entre as turbinas de ação e reação.

Figura 23 - Turbina de ação X turbina de reação



Fonte: Rodrigues (2009)

As turbinas a vapor também podem ser classificadas quanto a quantidade de estágios, podendo ser de simples estágio ou múltiplos estágios. As turbinas de simples estágio apresentam um único rotor. As turbinas de múltiplos estágios podem apresentar rotores de ação ou de reação (RINO, 2008 apud RODRIGUES, 2009).

E por fim, as turbinas a vapor podem ser classificadas quanto a descarga, podendo ser de contrapressão ou condensação. De acordo com Ferreira (2018) as turbinas a vapor podem ser classificadas como turbinas de vapor de condensação ou turbinas de vapor de contrapressão. Nas turbinas de vapor de condensação, a temperatura de saída do vapor na turbina é ligeiramente superior à temperatura ambiente e pressão inferior, já que, após a saída da turbina, o vapor passa por um condensador, voltando ao estado líquido e podendo ser reaproveitado no ciclo. Nas turbinas de vapor de contrapressão, o vapor deixa a turbina com uma pressão superior à pressão atmosférica e idêntica à que reina no utilizador do processo.

As turbinas a contrapressão são recomendadas para processos industriais onde a demanda de calor é aproximadamente igual a demanda de trabalho. Possuem uma regulação que mantém a pressão na saída da turbina constante. As turbinas de condensação são utilizadas onde se necessita da maior quantidade de energia eletromecânica gerada. Normalmente a 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 (BALESTIERI, 2002 apud RODRIGUES, 2009).

De acordo com Castro (2009), nos sistemas de cogeração não deve ser usado o tipo de turbina conhecida como turbina de condensação, pois este equipamento está dimensionado para otimizar o rendimento da conversão elétrica. Assim, é mais adequado usar, em sistemas de cogeração, as chamadas turbinas de contrapressão (ou de não condensação).

Ferreira (2018), reitera que as turbinas de vapor de condensação não são muito aconselháveis para serem usadas em processos de cogeração, sendo mais conveniente, para este tipo de sistemas utilizarem-se turbinas de vapor de contrapressão, uma vez que o vapor que sai da turbina é usado para um processo industrial. A utilização do vapor a altas pressões prejudica o rendimento elétrico, sendo compensado substancialmente pelo rendimento térmico do sistema.

Ferreira (2018) destaca que, no geral, a eficiência global das turbinas de contrapressão é superior às de condensação. Embora tenham um rendimento elétrico inferior às de condensação, as turbinas de contrapressão têm um elevado rendimento térmico.

Para a aplicação em sistemas de cogeração, segundo Delgado (2016), é mais conveniente usarem-se turbinas a vapor de contrapressão, nas quais, o vapor que sai da turbina é aproveitado para um processo industrial. Este tipo de turbinas tem esta designação uma vez que o vapor rejeitado se encontra a pressões próximas da pressão atmosférica, sendo superior ao vácuo que se encontra no condensador. Esse mesmo acontecimento leva a que o rendimento elétrico da turbina não seja tão elevado, como no outro caso, no entanto, tal fato é compensado pelo aumento substancial do rendimento global do sistema de cogeração.

Castro (2009) explica que nas turbinas de contrapressão, o fluxo de vapor exausto que abandona a turbina é enviado diretamente para o processo industrial em condições próximas das que são requeridas. O termo contrapressão refere-se ao fato de o vapor ser rejeitado a pressões da ordem de grandeza da pressão atmosférica, superiores, portanto ao vácuo do condensador (pressão da ordem das centésimas de bar). A utilização do vapor a uma pressão relativamente elevada prejudica sensivelmente o rendimento elétrico, mas melhora o rendimento térmico, pois as características do vapor são normalmente mais adequadas aos fins a que se destina.

Rodrigues (2009) detalha que para uma mesma demanda térmica (10 MW) se comparam: (i) uma turbina a contrapressão que produz 2,0 MWe e (ii) uma turbina a condensação que produz 2,8 MWe. O fator de utilização da energia elétrica (percentual de aproveitamento da energia contida no combustível), nos sistemas é de 90% e 79%, respectivamente. A explicação é que apesar de se produzir mais energia (devido a pressão negativa no condensador) as perdas de “custos” no mesmo são altas. Ou seja, a perda no condensador é significativa.

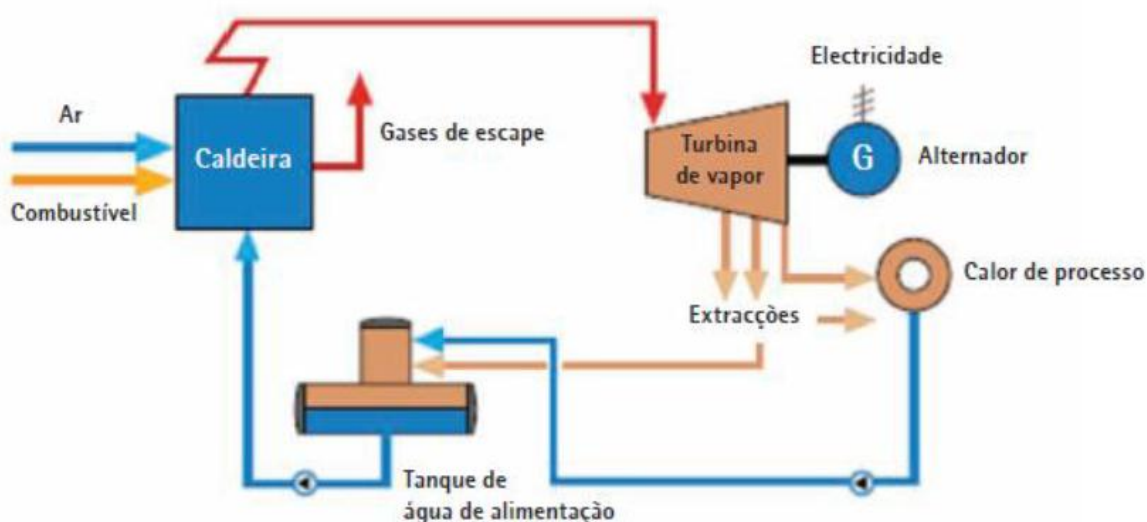
De acordo com Delgado (2016), pode ainda ser considerado um outro tipo de turbina, que combina as outras duas anteriores, chamada de turbina de vapor a extração, em que parte do vapor é direcionado para o processo industrial e o restante é condensado. Este tipo de turbinas é também usado em sistemas de cogeração.

Para Castro (2009), a turbina de extração é um misto das duas anteriores: uma parte do vapor é enviada para o processo industrial, a uma pressão intermediária, e o remanescente é condensado no condensador.

Rodrigues (2009) explica que uma solução de arranjo com turbina de condensação com extração é a mais adequada para uma vazão de vapor que varia mediante a necessidade de processo. Com isto, é necessária a instalação de um condensador de baixa pressão. Desta forma tem-se a flexibilidade operacional necessária a variação da demanda térmica. Para o caso analisado pelos autores, observou-se que no verão a produção de energia elétrica é maximizada (5.085 kWe) pois não há demanda térmica. Neste período não se utiliza aquecimento distrital devido as altas temperaturas ambientes. No inverno se produz energia térmica (16.120 kWt) e também energia elétrica (2.064 kWe). A turbina de condensação com extração alimenta um trocador de calor e a saída é conectada a um condensador; já na de contrapressão, existe um trocador de calor na saída da mesma (não possui condensador). Na turbina de condensação, não existe o trocador de calor e o vapor vai direto para o condensador, sendo que existe uma extração de vapor para o desaerador.

De acordo com Ferreira (2018), na Figura 24 demonstra um esquema que representa uma solução de cogeração baseado numa turbina a vapor de contrapressão.

Figura 24 - Esquema de uma solução de cogeração baseado numa turbina de vapor de contrapressão



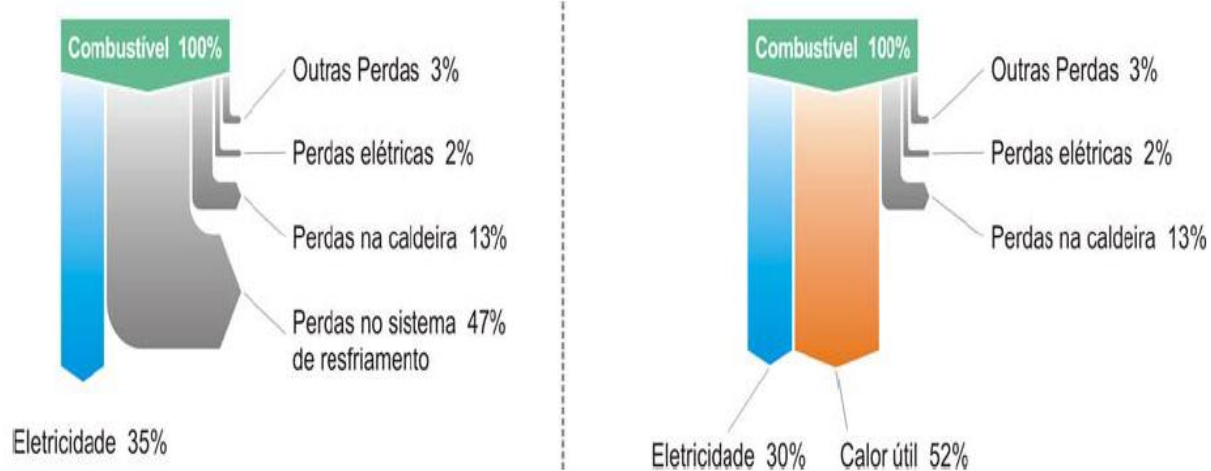
Fonte: Ferreira (2018)

A grande vantagem desse sistema, de acordo com Barja (2006), é a possibilidade da utilização de qualquer tipo de combustível, o que o torna como única opção em diversos casos, como na queima de carvão ou no aproveitamento de calor residual de processo. A potência destes ciclos geralmente é encontrada em valores de 0,5 a 100 MW, podendo chegar até a 1.350 MW (Angra II), com um rendimento típico em torno de 35 %. Outra vantagem se apresenta em consequência das baixas temperaturas encontradas no fluido de trabalho, sendo uma tecnologia dominada e com opções de fabricantes nacionais. Uma desvantagem deste sistema apresenta-se na operação pouco elástica em relação aos regimes de carga, devido às condições de compromisso com o ponto de trabalho termodinâmico do vapor.

Rodrigues (2009) destaca que para qualquer tipo de instalação com turbinas a vapor, quanto maior a pressão e temperatura do vapor da entrada, menor será a vazão de vapor necessária para gerar a mesma quantidade de energia, desde que as condições na exaustão sejam as mesmas. Ocorre que à medida que se opera com a turbina a vapor fora das condições de projeto da mesma, a sua eficiência é fortemente reduzida e não varia de forma proporcional a queda de vazão de vapor.

O rendimento neste tipo de ciclo pode ser melhorado, de acordo com Barja (2006), mediante a utilização de artifícios como o reaquecimento do vapor superaquecido, com extrações intermediárias na turbina ou o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira pela recuperação de calor em diversos pontos do ciclo, inclusive na chaminé. Apenas como curiosidade, um dos fatores limitantes ao rendimento deste ciclo é a temperatura de exaustão na chaminé, que não pode ser demasiadamente baixa devido à formação de ácido sulfúrico na presença de água e enxofre proveniente do combustível utilizado. A Figura 25 apresenta a comparação do balanço térmico de uma planta de geração pura e de uma planta semelhante com sistema de cogeração.

Figura 25 - Balanço térmico típico de uma planta de geração pura, em ciclo a vapor X com sistema de cogeração agregado



Fonte: Barja (2006)

O Quadro 1 sintetiza as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de cogeração, segundo Ferreira (2018).

Quadro 1– Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de tecnologias

Tecnologias	Vantagens	Desvantagens
Turbinas a Vapor	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento global elevado; • Operação com diversos tipos de combustível; • Grandes quantidades de calor disponíveis; • Vida útil e fiabilidade elevadas; • Vapor a alta pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arranque lento; • Rendimento elétrico baixo.
Turbinas a Gás	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilidade elevada; • Emissões de poluentes baixas; • Calor a temperaturas elevadas (500-600°C); • Não necessita de refrigeração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Operação com gás a alta pressão; • Rendimento reduzido a carga parcial; • Potência de saída diminui com o aumento da temperatura ambiente; • Ineficiente em processos com poucas necessidades térmicas.
Motores Alternativos	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento elétrico elevado; • Bom desempenho com carga parcial; • Arranque rápido; • Energia térmica a dois níveis de temperatura – gases de escape e arrefecimento do motor; • Manutenção no local com pessoal não especializado; • Operação com gás a baixa pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de manutenção elevados; • Calor de baixa temperatura; • Emissões poluentes relativamente elevadas; • Necessita de refrigeração; • Ruído de baixa frequência.
Microturbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensões compactas; • Peso reduzido; • Emissões de poluentes baixas; • Não necessita de refrigeração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos elevados; • Calor de baixa temperatura; • Tecnologia em maturação.

Fonte: Castro (2009)

2.3.3 Legislação acerca da Cogeração

Para entender melhor como se deu o desenvolvimento da legislação sobre a cogeração de energia no Brasil, será traçado um breve histórico. De acordo com Velázquez (2000), até o início da década de 1980 a legislação referente à autoprodução de energia elétrica era genérica e não viabilizavam uma maior produção. Além disso, não havia distinção entre a cogeração e a geração exclusiva de eletricidade.

Para Tavares (2006), o Novo Modelo do setor elétrico brasileiro, criado a partir de 1990, pretendia constituir uma estrutura controlada majoritariamente por capital privado e este contexto possibilitou às empresas do referido setor que passassem a operar com maior autonomia no mercado.

Velázquez (2000) destaca que somente em julho de 1995 foi criada uma lei que trata da produção independente de energia elétrica, que garante o uso das redes de distribuição e transmissão mediante pagamento definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De acordo com Barja (2006), a Lei nº. 9.074, de 7 de julho de 1995, regulamentada pelo Decreto nº. 2.003, de 10 de setembro de 1996, foi o marco regulatório a legislação brasileira relacionada à cogeração de energia, ou à geração de eletricidade, quando foram definidas as figuras do Autoprodutor e do Produtor Independente de Energia Elétrica, da seguinte forma:

- I – Produtor Independente de Energia Elétrica, a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco;
- II – Autoprodutor de Energia Elétrica, a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo. (Lei nº. 9.074, 1995)

Outras legislações sobre o assunto foram estabelecidas após o ano de 1995. Barja (2006) explica que no Decreto nº. 2.003/96 foi regulamentado, a fim de garantir a utilização e a comercialização da energia produzida pelo produtor independente e pelo autoprodutor, o livre acesso (Lei nº. 9.074/95) aos sistemas de transmissão e de distribuição de concessionários e permissionários de serviço público de energia elétrica, mediante o ressarcimento dos custos de transporte envolvidos. Este tema

foi regulamentado pela Resolução ANEEL nº. 281 de 1999, que estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Vale observar ainda o disposto na Lei nº. 9.648, de 27 de maio de 1998, que estabelece que a compra e venda de energia elétrica entre concessionários ou autorizados deve ser contratada separadamente do acesso e uso dos sistemas de transmissão e distribuição.

De acordo com USP (2013), 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. 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.

Ainda segundo USP (2013), em 2004 ocorreu uma segregação de fundo reformista na quais companhias até então com preponderante injeção de capital público são divididas entre geradoras, transmissoras e distribuidoras. A produção das geradoras passou então a ser negociada no mercado livre. Sobre o processo de cogeração, este fica estabelecido em lei pelo decreto 186/95, o qual a define como o processo de produção combinada de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas a consumo próprio ou de terceiros, com respeito pelas condições previstas na lei.

De acordo com a ANEEL (2015), a Lei nº 10.848 de 15/03/2004 dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.

Para Barja (2006), apesar de insuficientes, a legislação brasileira concede diversos incentivos às centrais cogeneradoras, considerando a sua racionalidade energética. Outro importante aspecto abordado ainda neste Decreto refere-se à comercialização, fator fundamental para o caso de plantas de cogeração exportadoras de energia elétrica. Especificamente aos casos de cogeração, é permitida ao produtor independente a comercialização com consumidores de

energia elétrica integrantes de complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração, mesmo que esses consumidores sejam “cativos”. “Consumidor cativo” (termo usual) é aquele que não possui os pré-requisitos do consumidor livre, podendo ser suprido somente por concessionário ou permissionário de distribuição mediante tarifa regulada.

Ainda nas palavras de Barja (2006), ainda é permitida a venda de energia elétrica para “consumidores livres” e para concessionário ou permissionário de distribuição. Para possibilitar o consumo em instalações industriais do produtor em local diverso daquele onde ocorre a geração, é possível a realização da permuta de energia, em blocos economicamente equivalentes, com os permissionários ou concessionários de serviço públicos envolvidos, certamente pagando-se pelo transporte da referida energia. O “consumidor livre” poderá exercer a opção de compra de energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre (ACL), de qualquer concessionário, permissionário ou autorizado de energia elétrica do sistema interligado, conforme as condições previstas nos arts. 15 e 16 da Lei nº. 9.074, de 7 de julho de 1995 e o no inciso X, § 2º, art. 1º do Decreto nº. 5.163, de 30 de julho de 2004.

Posto isso, de acordo com USP (2013) a energia produzida por mecanismos de cogeração pode ser negociada através de leilões operando em Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Por este regime, distribuidoras contratam um volume de fornecimento de energia de geradoras, passa a existir um teto para o preço de energia ofertado pelas geradoras e é dada a preferência para aquela que oferecer o menor preço.

2.4 Otimização em sistemas de cogeração

Otimização como o próprio nome já diz, remete a ideia de buscar o aumento da eficiência de algo, podendo ser das mais diversas formas, desde medidas bem específicas até medidas generalistas, como a otimização é bem abrangente também têm exemplos de sua aplicação em sistemas de cogeração, no qual serão tratados nesse tópico.

A otimização de um determinado sistema busca a maximização ou minimização de uma função matemática, conhecida como função objetivo, baseada na escolha sistemática de valores para algumas variáveis, comumente conhecida

como variáveis de decisão. Encontrando-se os valores máximos e mínimos para função, é então encontrado o valor ótimo de tais variáveis.

A otimização matemática trabalha com valores de qualquer ordem, o contrário da engenharia que só permite que sejam trabalhados valores que sejam fisicamente possíveis. Sendo então variáveis de projeto ou não, dificilmente irá assumir qualquer valor. Um exemplo prático seria a impossibilidade de uma máquina possuir um rendimento exegético maior que uma unidade. Sendo assim os problemas são restritas a igualdade ou desigualdade dando limitação a essas variáveis de decisão. Por isso esses problemas de otimização na engenharia são geralmente de natureza não linear, com restrições de desigualdade e igualdade, além de limitar as variáveis.

Cittadino (2017) demonstrou o modelo “Controle de nível a Três Elementos”, sendo este mais usual na produção de vapor, contudo não é o mais eficiente. Realizado por meio de controladores PID – Proporcionais Integrais Derivativos -, e lógica matemática de soma e subtração, contendo os elementos: nível da água do tubo de vapor; vazão de vapor para consumo; vazão da água de alimentação. A lógica de ajuste dos PID é executada pelo método de tentativa e erro. E ajustado, também, para funcionar em uma única zona de operação da usina.

A otimização de sistemas complexos exige o apoio de algumas ferramentas que auxiliam no decorrer do desenvolvimento dos cálculos, ou seja, softwares que facilitam os cálculos algébricos.

Atualmente, o mercado oferece softwares baseados em planilhas matemáticas que usam modelos rigorosos de unidades de geração de utilidades, que permitem acesso rápido a banco de dados de propriedades de vapor e água e aplicam modelos de equipamentos como caldeiras, turbinas e desaeradores. Estes softwares permitem avaliar projetos futuros, simulando o sistema e o efeito de qualquer mudança, reportando o custo real em outros fatores relevantes, como emissões atmosféricas e o custo real do vapor em cada nível de pressão. No entanto, mesmo permitindo uma investigação do impacto de várias mudanças, eles não retornam automaticamente ao usuário a melhor forma de operar o sistema (EASTWOOD; BEALING, 2003).

Há também métodos heurísticos que fornecem regras gerais e instruções focadas na otimização do uso de energia. Linhoff et al. (1982) utilizaram tecnologia Pinch, metodologia que visa o projeto de processos integrados, com recuperação de calor em redes de permutadores de calor. Com a identificação dos gargalos de

recuperação de energia, prevê o reaproveitamento de calor e redução dos consumos de utilidades, com o desenvolvimento de um método de síntese para custo mínimo, identificando as melhores opções de projeto. A Tecnologia Pinch foi após estendida para o conceito de Análise Energética Global (Total Site), que incorpora uma série de processos atendidos e ligados por uma central de utilidades (DHOLE; LINNHOFF, 1993). Essas tecnologias, através de perfis energéticos, possibilitam a especificação de metas para consumo de vapor, consumo de refrigeração, consumo de combustível, geração de trabalho e emissão de poluentes.

Mavromatis et Kokossis (1998) desenvolveram uma metodologia para análise e otimização de redes de turbinas de vapor, a partir de conjunto de regras lógicas e de conhecimento dos sistemas estudados. Esta metodologia, integrada com perfis energéticos, representa o conjunto formado por processo e utilidades, com considerações de metas termodinâmicas e restrições de equipamentos. Essa metodologia foi baseada nas relações de Willans, que relacionam as vazões de vapor extraído e/ou exausto da turbina simples ou de extração-contrapressão com a sua potência gerada. O método desenvolvido representa a região de operabilidade do sistema de turbinas e também possibilita a otimização de sua operação.

Os autores Pires e Zemp (2004) aliaram os conceitos de Análise Energética Global a uma abordagem que explica a eficiência de turbinas para avaliação de um complexo petroquímico brasileiro. Os autores definiram os perfis térmicos, assim como metas de consumo de vapor, refrigeração, combustíveis e trabalho. A partir daí foram avaliados casos de paradas de unidades, modificações de processo, entrada em operação de nova unidade e mudança de temperatura de uma utilidade. Constatou-se a conveniência do estudo na apresentação do perfil energético do complexo, em otimização do consumo energético total na fase de projeto e na análise de impacto de mudanças operacionais, com uma visão integrada das unidades de processo e utilidades.

Os métodos de programação matemática se baseiam na expressão de problemas por um modelo matemático, que é resolvido com técnicas de otimização. O projeto de redes de utilidades com demandas fixas de energia elétrica, trabalho e diversas pressões de vapor já foi estudado por meio da aplicação de programação linear mista, sendo o layout ótimo parte de uma superestrutura que associa

potenciais configurações com o modelo inteiro misto (PAPOULIAS; GROSSMANN, 1983).

Pinto (1995) apresentou uma tentativa de modelagem do sistema termoelétrico de uma indústria petroquímica brasileira, de forma integrada a software de aquisição de dados on-line. São aplicadas rotinas de otimização a uma base de dados, para determinar a melhor distribuição de carga entre equipamentos e dos combustíveis a serem utilizados, com o objetivo de diminuir os custos operacionais e atende às restrições de cada equipamento. Este sistema foi elaborado para ser utilizado como ferramenta gerencial, embasando decisões relacionadas à operação dos geradores de vapor, turbogeradores e principais equipamentos auxiliares. O modelo matemático foi desenvolvido tendo como base as equações linearizadas de balanço material e energético de cada equipamento, aplicadas dentro do domínio formado pelas restrições operacionais e com as informações relativas a demandas de energia elétrica e vapor e custos dos insumos energéticos. A técnica de otimização usada foi a programação linear inteira mista (MILP). Os principais problemas encontrados estão na inconsistência da base de dados. O fechamento do balanço de massa e energia não foi possível devido a erros em medições de vazão e falha de alguns elementos primários, e os balanços relativos aos turbogeradores foram montados exclusivamente a partir de curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante, sem a avaliação do desgaste devido ao envelhecimento natural dos equipamentos, sendo verificado nos testes desvio das condições de operação em relação à curva original.

A aplicação de pacotes de softwares comerciais também é reportada por Milosevic (1997), aplicada a sistemas de vapor de grande complexidade (refinaria), com a construção de modelo rigoroso envolvendo caldeiras, turbinas, vasos de flash, dessuperaquecedores e desaeradores. As informações são inseridas manualmente, mas estão rapidamente disponíveis devido ao sistema de aquisição *on-line*. O modelo considera as relações entre eficiência de turbinas e sua carga, as relações da qualidade do vapor com a carga de turbinas e desaeradores, o perfil de temperatura ao longo das tubulações, e o cálculo do preço de cada nível de vapor. Este software, baseado em uma planilha do *Excel*, recupera do modelo informações essenciais e trabalha apenas com as variáveis e equipamentos que podem ser manipulados (como caldeiras, importação de vapor e turbinas de extração-contrapressão e extração-condensação) objetivando a diminuição dos

custos. O pacote de otimização executa a modelagem de turbinas, o balanço básico do sistema de vapor, o cálculo de custo de operação e a otimização de rede.

Os autores Hirata et al. (2003) investigaram as oportunidades relacionadas à capacidade (capacidade mais habilidade) dos sistemas de utilidades de duas plantas petroquímicas após uma fusão de indústrias cujos sistemas de vapor e energia elétrica foram interligados. Assim, formulou-se um modelo das plantas para estudo situacional ou planejamento de produção, baseado nos balanços de energia e massa e envolvendo restrições como demandas sazonais e contratos de combustível e eletricidade.

Segundo Hirata et al. (2003), como planejamento de produção pode suportar tolerâncias razoáveis de precisão, o modelo pode adotar equacionamento linear para resolver problemas de escala industrial suficiente e eficientemente. O ambiente do modelo dos autores, integrou uma interface gráfica, banco de dados (Access) planilhas (Excel) e solver via programação matemática (GAMS). As equações de consumo de utilidades incluíram parâmetros que envolvem carga de produção, temperatura ambiente e status de parada ou partida de equipamentos, buscando cobrir um amplo espectro de situações de operação. Dados foram resgatados do histórico da planta, permitindo definição dos parâmetros do modelo através de regressão linear. A função objetivo buscou a minimização dos custos totais de produção através da variação da operação do sistema de utilidades. Apesar da planta operar com sistemas de controle avançado (DMC), potenciais para melhoria ainda se mostravam possíveis e de difícil identificação. O modelo permitiu aos engenheiros investigar os seguintes potenciais de melhoria:

- Planejamento de orçamento, sendo possível calcular simultaneamente o orçamento de todos os meses, já considerando demandas de situações otimizadas;
- Tomada de decisão em investimentos, permitindo a avaliação e seleção de novos equipamentos, buscando soluções econômicas.
- Otimização de contrato de energia elétrica, reduzindo a importação de energia elétrica e os custos de operação;
- Agendamento de paradas de manutenção, auxiliando a decisão a fim de garantir o atendimento dos balanços materiais e energéticos;

- Balanços de água e combustíveis, otimizando o consumo de água e de outros combustíveis, junto com vapor e energia elétrica. Com o emprego do modelo, a seleção entre combustíveis para atender parâmetros ambientais, são obtidos de forma mais rápida, fácil e precisa do que depender de experiências ou heurísticas que podem variar entre engenheiros e fornecer resultados diferentes.

O Quadro 2 apresenta a comparação, citados, confrontando os modelos de otimização.

Quadro 2 - Prós e contras dos diferentes modelos de otimização

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO	
HEURÍSTICOS	
PRÓS	CONTRAS
<ul style="list-style-type: none"> - Baseado em Dados Pré-estabelecidos; - Fornecimento de Dados Através do Fabricante do Equipamento; - Fácil Aplicação; - Baixo Custo de Aplicação; - Generalista (não trata condições específicas). 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigência de Complexo Banco de Dados; - Informações Errôneas, (não condizentes com as condições reais do regime de trabalho do equipamento); - Resultados Generalistas (as vezes não satisfatórios).
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	
PRÓS	CONTRAS
<ul style="list-style-type: none"> - Uso de Tecnologia Adequada para Otimização; - Existência de Modelo Padrão, (servindo como projeto piloto); - Melhoria contínua; - Fácil Acesso a Informação; - Ótimos Resultados; - Sistema Personalizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Método Complexo; - Dependência de Dados Concretos; - Exigência de mão de obra especializada.

Fonte: Próprio Autor (2019)

3 METODOLOGIA

Esse trabalho adotará o modelo de pesquisa exploratória, uma vez que se faz necessário obter as informações para que possa haver uma melhor compreensão do problema, além de ser um tema em ascensão no mercado tanto no tocante á conscientização da utilização do uso da energia elétrica quanto á aplicação da cogeração em si.

A implementação de diversos sistemas de cogeração no setor industrial, fomentou a ideia de ampliar os conhecimentos sobre assunto. A pesquisa será secundária e bibliográfica, pois as informações serão obtidas através de leituras de artigos e livros relacionados ao assunto, leitura de informativos das empresas que estão adotando a cogeração e uma profunda busca na internet sobre a implementação da turbina a vapor nos sistemas de cogeração nas indústrias, para produzir uma revisão bibliográfica ao leitor, aonde resultará na compreensão de como maximizar sua eficiência energética e minimizar os desperdícios com os excedentes de calor.

Nesta fase, será produzido o levantamento das tecnologias do sistema de cogeração, definindo quais são, apresentando suas principais características, suas vantagens ao serem inseridas junto com a cogeração, e o estudo dos quesitos legais em que regem. Com bases destes dados, será possível identificar as principais indústrias que usam a turbina a vapor no processo de cogeração.

O tratamento dos resultados dessa pesquisa será tratado de forma qualitativa, pois será aprofundado as ideias e conceitos do uso das turbinas a vapor como ferramenta da cogeração. E será uma pesquisa aplicada, já que gerará novos conhecimentos ao apresentar as variáveis para a implementação do sistema de cogeração, assim como processos de otimização.

4 DESENVOLVIMENTO

A ideia central deste trabalho é a apresentação do uso da turbina a vapor como um instrumento da cogeração, especialmente no setor industrial, já que a somatória das oscilações das cargas, elétricas e térmicas, desse setor será capaz de caracterizar um regime contínuo de utilização, o que viabiliza a implementação do sistema de cogeração.

O setor industrial envolve grandes quantidades de energia térmica relativamente à demanda elétrica. Obviamente nem todas as tecnologias de cogeração demonstradas nos tópicos anteriores são aplicáveis a qualquer segmento do setor industrial. Assim, é necessário estabelecer critérios de escolha das tecnologias em função da aplicação a que se destina, de modo a viabilizar técnica e economicamente a instalação.

O Quadro 3 a seguir traz os aspectos das aplicações da cogeração. CHP é uma sigla que representa o conceito mundial de cogeração, e deriva do termo Combined Heat and Power. Já o DHC é uma sigla que representa o conceito internacional de aquecimento e arrefecimento, e deriva do termo District Heating and Cooling.

Quadro 3– Aspectos das aplicações de cogeração

Aspecto	CHP – industrial	CHP – comercial ou institucional	DHC
Consumidores Típicos	Indústria química, de papel e celulose, metalúrgica, de processamento pesado (alimentos, têxtil, madeira, minerais), de cerveja, fornos de coque, fornos de vidro, refino de petróleo	Fabricação de luz, hotéis, hospitais, grandes prédios urbanos, operações agrícolas	Todos os edifícios dentro do alcance da rede de calor, incluindo edifícios de escritórios, casas individuais, universidades, aeroportos e indústrias
Facilidade de integração com as energias renováveis e energia de resíduos	Moderado – Alto (particularmente fluxos de resíduos industriais de energia)	Baixo - Moderado	Alto
Nível de Temperatura	Alto	Baixo - Moderado	Baixo – Moderado
Capacidade típica do sistema	1 a 500 MWe	1 kWe a 10 MWe	Qualquer
Propulsor típico	Turbina a vapor, turbinas a gás, motores a pistão (ignição por compressão), ciclo combinado (sistemas complexos)	Motor alternativo (ignição por centelhamento), os motores Stirling, células de combustível, microturbinas	Turbina a vapor, turbinas a gás, incineração de resíduos, CCGT
Fonte Energética	Quaisquer combustíveis líquidos, gasosos ou sólidos, gases residuais de processos industriais (por exemplo, gases de alto forno, gases residuais do forno de coque)	Quaisquer combustíveis líquidos, gasosos	Qualquer combustível
Principais players	Indústria (concessionárias de energia)	Usuários finais e utilitários	Comunidade local, serviços públicos, locais e nacionais e indústrias

Fonte: Rodrigues (2013)

Conforme mencionado anteriormente, o ciclo de Rankine converte energia de combustíveis de baixo custo em eletricidade e/ou trabalho. Ou seja, a fração do calor que é transformada em eletricidade necessita de forma direta da condição do vapor produzido na caldeira e recebido na turbina: quanto maior a temperatura e pressão mais eficaz é o ciclo termodinâmico.

Com isso, a operacionalidade de um sistema de cogeração é acompanhada pelo tipo e pela capacidade do sistema. Contudo, para garantir um sistema mais eficaz, a restauração do calor excedido deve ser a maior possível, sob a condição operacional da planta de cogeração. Uma determinada planta de calor adicional corresponderá as exigências do usuário, caso sua necessidade seja maior que o calor recuperado.

As plantas industriais são planejadas para uma demanda diária de energia apenas, deste modo atuam em uma carga produção média. Como os sistemas de cogeração são locais, a demanda consegue ser flexível, alterando de forma rápida as condições de operação a fim de suprir uma demanda horária das indústrias.

O modo de operação ideal seria aquele onde houvesse equilíbrio e o sistema de cogeração operasse no estado energeticamente recomendável, sem excedentes e déficits, ou seja, buscando simultaneamente a geração de potência e o fornecimento de calor. Contudo, esse modo de operação é praticamente impossível, já que no processo real de uma instalação não existem demandas regulares e uniformes, mas variáveis. Assim, um sistema de cogeração precisa operar a todo momento em torno de um ponto médio da demanda.

A estrutura industrial brasileira possui as configurações da cogeração voltada ao atendimento da demanda térmica, visto que não há cultura se comercializar vapor excedente e demais formas de energia térmica. Isto é, há como foco no sistema de cogeração de vapor a paridade térmica.

Paridade térmica segundo Oliveira (2018) é, quando a central de cogeração é preparada para satisfazer as necessidades térmicas do componente de processo. Assim, o calor é o produto e a eletricidade o subproduto da cogeração. Rodrigues (2013) complementa este conceito ao informar que em algumas situações é necessário um adicional de calor pelas unidades auxiliares em virtude das demandas elevadas, com isso a energia elétrica produzida em excesso é exportada e o calor suprimido da unidade.

Por essa razão, as necessidades de calor típico são alcançadas com bons resultados em uma ampla gama de indústrias, como as do setor sucroalcooleiro, siderúrgicas, de papel e celulose, e indústrias petroquímicas, onde serão posteriormente apresentadas.

4.1 Setor Sucroalcooleiro

O setor sucroalcooleiro emprega de forma ampla o ciclo de Rankine, no qual usa o calor proveniente da queima do bagaço para a geração de vapor ou de energia. O fluxo de vapor nessas instalações é distribuído entre geração elétrica e acionamento mecânico.

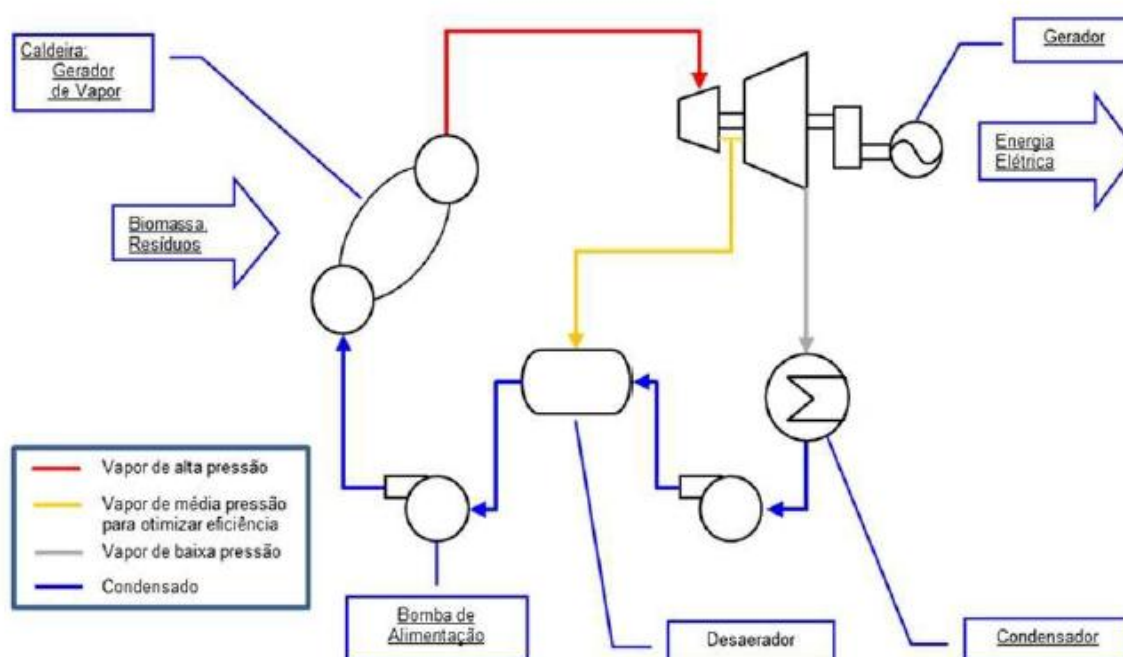
A geração de energia elétrica por meio da cogeração a vapor, segundo Baccarin e Castilho (2002), em indústrias sucroalcooleiras é realizada através de uma fornalha, na qual o bagaço é queimado, e em uma caldeira local em que se é produzido o vapor, visto que o jato de vapor obtido da caldeira gira uma turbina que se encontra interligada ao eixo de um gerador.

Souza (2003) corrobora com o apresentado por Baccarin e Castilho (2002), que para gerar energia elétrica, é necessário haver uma transformação de energia térmica em mecânica, e posteriormente em energia elétrica.

Já a produção de energia térmica ocorre com a queima da biomassa, que conseqüentemente transforma a água encontrada na caldeira em vapor, na qual é direcionada para uma turbina devido a alta pressão (Souza, 2003).

Moraes (2015) demonstra essa transformação de forma detalhada, a turbina acoplada a geradores recebe vapor superaquecido de alta pressão proveniente da caldeira, e que após o trabalho realizado envia vapor de baixa pressão para a indústria e/ou para o desaerador. Esse vapor oriundo da caldeira movimenta os rotores da turbina na qual produz a energia mecânica que os geradores precisam. Na Figura 26 pode-se observar o fluxograma da cogeração de energia no setor sucroalcooleiro.

Figura 26 - Fluxograma típico da cogeração de energia no setor sucroalcooleiro



Fonte: Cittadino (2017)

Com isso, as usinas sucroalcooleiras encontram-se em um entrave em relação ao excedente da cogeração, já que ele pode ser comercializado com a distribuidora de energia elétrica local ou destinado a ao consumo interno da planta. Aqueles que decidam na venda desse excedente devem otimizar a produção de eletricidade, elevando a eficiência dos geradores a vapor e reduzindo o consumo de vapor de escape. A maior disponibilidade de combustível junto com a presença do condensador aumenta na produção de energia elétrica, o que facilita também na comercialização.

Para aqueles que desejam usar o excedente no consumo interno precisam estabelecer um equilíbrio entre o bagaço exequível, a demanda de vapor e a geração de energia elétrica. A instalação de caldeiras esboçada para gerar vapor a elevados parâmetros é uma otimização necessária nesta opção. Bem como a adequação das turbinas, tornando-as mais eficientes e com maior capacidade, sendo direcionadas para o uso nas operações de evaporação, aquecimento e destilação.

Portanto, as indústrias sucroalcooleiras devem observar o preço de venda de energia elétrica e o custo de investimento, já que o custeio com essa otimização

será voltada para a energia elétrica excedente ou para outros produtos, como o álcool e o açúcar.

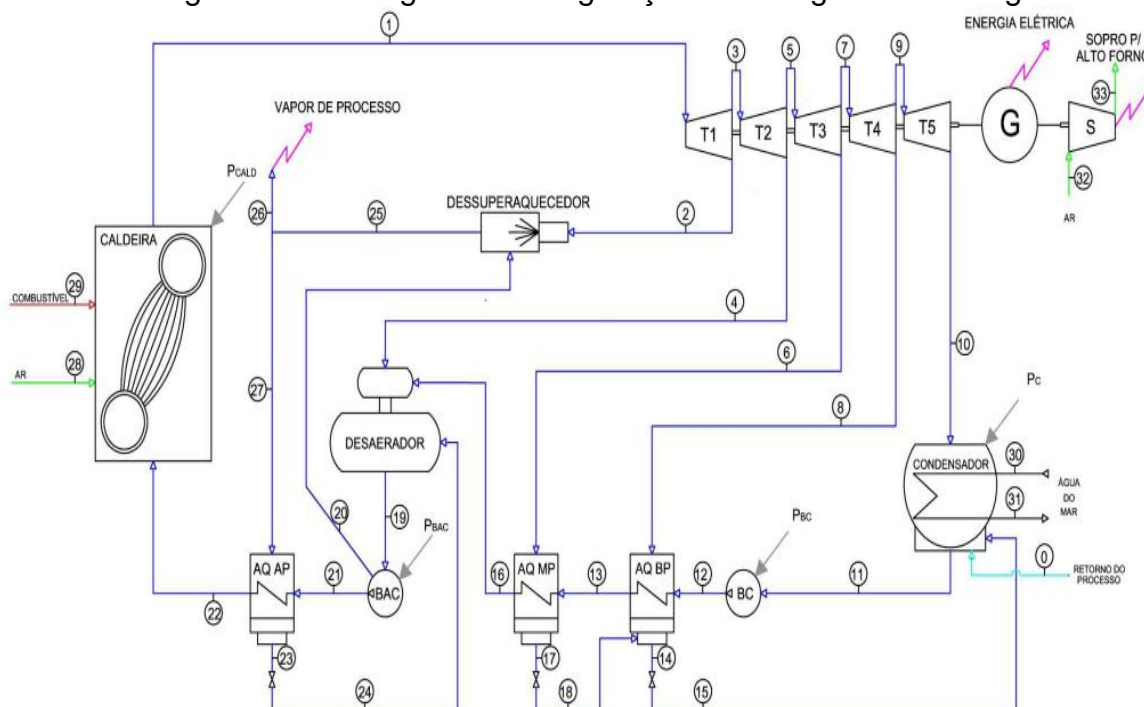
4.2 Setor Siderúrgico

Na siderurgia as fontes de energia modificam de acordo com os processos tecnológicos usados, assim possui consumo próprio de energia na qual podem ser afetados por diversos fatores. É um setor da indústria responsável por grande volume de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, com isso é incentivada a estar constantemente buscando a eficiência de seus processos e produtos.

Para Belisario (2012) a siderurgia é um ramo da engenharia metalúrgica que estuda os processos de obtenção do aço e suas ligas a partir de minérios de ferro e sucatas de aço e suas ligas.

O consumo de energia nas usinas siderúrgicas se dá por meio de energia térmica e elétrica. A implantação da cogeração nestas usinas é destinada, principalmente, aos setores da laminação, do alto forno e nos fornos de reaquecimento dos tarugos. A Figura 27 representa o fluxograma da cogeração de energia na siderurgia.

Figura 27 - Fluxograma da cogeração de energia na siderurgia



Fonte: Oliveira (2017)

Os produtos produzidos nos processos de laminação a quente por meio de tarugos de aço é onde se concentra o consumo mais intenso de energia elétrica. Para alcançar os requisitos do produto final, é preciso utilizar temperaturas específicas nos tarugos a serem laminados. Assim o principal objetivo dos fornos de reaquecimento é assegurar a homogeneidade da temperatura, operando em menor tempo e com baixo custo.

O funcionamento coerente e econômico dos fornos de reaquecimento impõe a minimização do consumo de combustíveis não interferindo na homogeneização de encharque térmico do produto e nas restrições do processo. E por mais que os gases de alto forno tem baixo poder calorífico, eles são fartos no processo, e caso não houvesse cogeração no sistema, esses gases seriam eliminados no ambiente.

Sendo assim, o desempenho dos fornos de reaquecimento se torna um problema de otimização, do qual tem por finalidade reduzir o custo com combustível. E por essa razão, os gases de alto forno podem ser utilizados na operação do próprio equipamento, uma vez que possuem um superior rendimento térmico no momento em que a queima é finalizada, propiciando ao tarugo melhor absorção da energia térmica gerada, resultando no alcance rápido das temperaturas de laminação.

A obtenção de monóxido de carbono fornecido pelos altos fornos que os encaminha até a laminação por meio de dutos desde a saída dos altos fornos até a entrada do forno de reaquecimento para que possa ser queimado aumentando a temperatura dos tarugos até estarem prontos para serem laminados. Os gases de alto forno podem ser reutilizados no próprio sistema gerador para aquecer o ar de entrada, já que o fluxo de produção é constante torna-se então um ciclo produtivo.

Contudo, o aproveitamento de gases residuais não é restringido meramente a produção de energia elétrica. A cogeração na siderurgia procura manter equilibrada a demanda interna quando for solicitado, já que o atendimento na própria planta é prioridade, colocando em segundo plano a geração elétrica. A utilização desses gases internamente na usina possibilita o consumo mínimo das demais fontes de combustíveis.

A energia elétrica na siderurgia é empregada como força eletromotriz, à exceção dos fornos elétricos que usam energia elétrica para a fundição de carga metálica e refino do aço.

4.3 Setor Petroquímico

De acordo com Campelli (2010), a otimização busca o aumento da eficiência energética em uma determinada instalação ou processo, através da redução das perdas e do consumo de energia, mantendo os mesmos resultados na produção e/ou serviços, utilizando de forma racional os recursos humanos, materiais e econômicos, por meio de ações de combate ao desperdício de energia e modernização das instalações, ou processos.

Para Cleveland e Eichhammer (2004), na aplicação da otimização na indústria, é importante definir com clareza como a eficiência energética será operacionalizada na forma de indicadores, como: a razão entre a transferência de energia de um tipo desejado por um dispositivo ou sistema e a energia fornecida para o dispositivo ou sistema para acioná-lo; a razão entre o trabalho teórico mínimo necessário para executar uma tarefa e o trabalho real disponível para executar essa tarefa; e a razão entre o consumo total de energia em um período e a produção total neste período.

O Quadro 4 abaixo traz a comparação entre perda e desperdício de energia, e como elas podem ser reduzidas ou eliminadas e de quais fatores isso depende.

Quadro 4 – Comparação entre perda e desperdício de energia

PERDA DE ENERGIA	DESPERDÍCIO DE ENERGIA
Não pode ser totalmente eliminada	Pode ser totalmente eliminado
Depende da tecnologia adotada (processos de produção e gestão)	Depende apenas do comportamento dos profissionais
Não pode ser reduzida de imediato (precisa ser avaliada e quantificada)	Pode ser combatido de imediato (comprometimento e cooperação)
A redução depende de avaliação econômica / investimentos em projetos de melhoria	A redução não depende de avaliação econômica
Implantação de melhorias tecnológicas	Mudança de hábitos (aspecto comportamental)

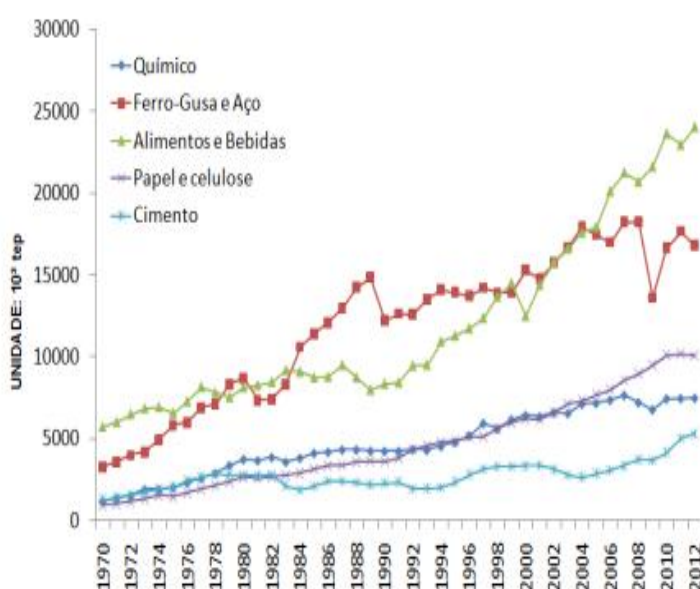
Fonte: Petrobras (2007).

Neste trabalho, o ramo da indústria estudado em relação a otimização do uso de energia foi o setor petroquímico. Segundo Torres (1997), a petroquímica é o ramo da indústria química orgânica que emprega como matérias-primas o gás natural, gases liquefeitos de petróleo, gases residuais de refinaria, naftas, querosene, parafinas, resíduos de refinação de petróleo e alguns tipos de petróleo cru. Apesar da

variedade de matérias primas, no Brasil usa-se principalmente a nafta, sendo que apenas a Central de Matérias Primas do Nordeste (COPENE) está capacitada para operar com frações mais pesadas.

Gomes, Dvorsak, Heil (2005) destacam que o setor petroquímico é o setor mais expressivo e dinâmico da diversificada indústria química nacional. Conforme indicado por Mathias (2014), na Figura 28, o consumo dos maiores segmentos consumidores de energia da indústria brasileira foi crescente a maior parte do tempo durante o período de 1970 a 2012. No ano de 2012 o consumo destes segmentos correspondeu a 72% do consumo energético total da indústria nacional.

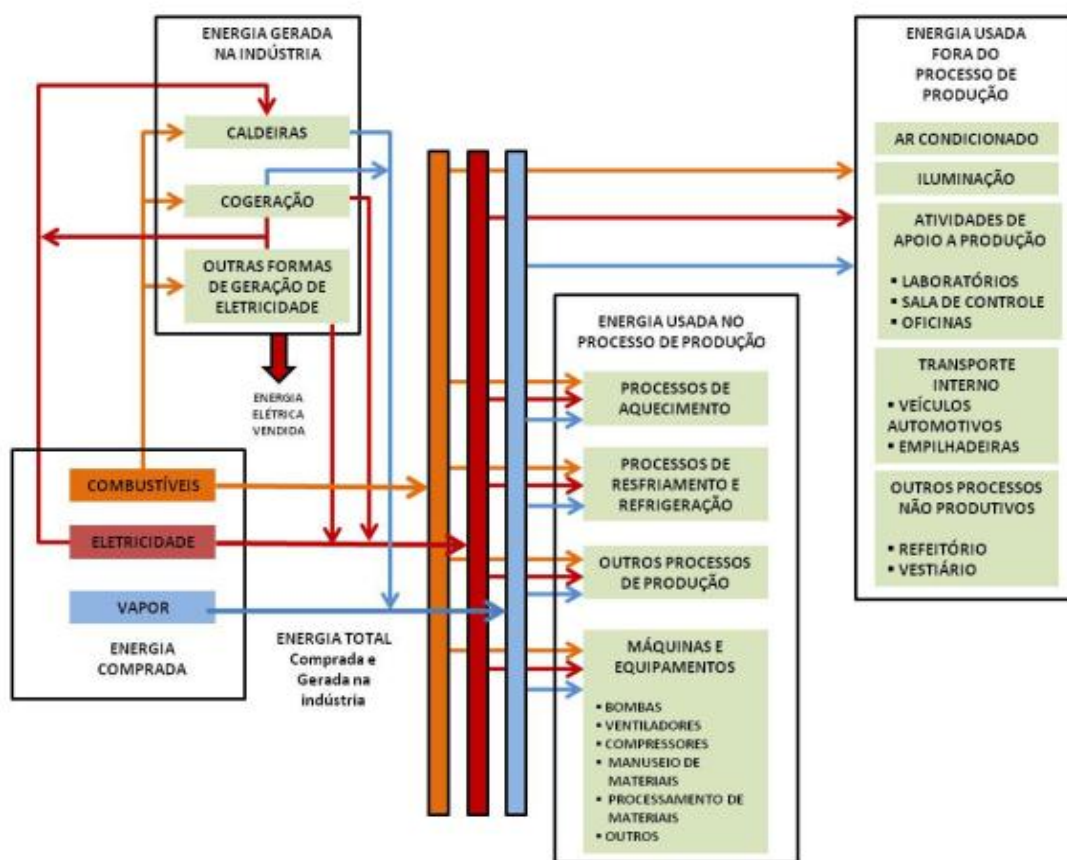
Figura 28 - Consumo dos maiores segmentos consumidores de energia da indústria brasileira



Fonte: Mathias (2014)

Ainda nas palavras de Mathias (2014), a energia consumida no setor industrial é utilizada em vários processos de produção, bem como em áreas não produtivas, mas de apoio à produção. Em geral, a área não produtiva mais importante em complexos industriais, sobretudo nos energo-intensivos, é o setor de utilidades, que provê energia elétrica, vapor de água, água quente, água tratada, ar comprimido e gases industriais para todos os processos industriais da instalação industrial a que pertence. O fluxo energético apresentado na Figura 29 é um exemplo geral e simplificado do que se observa em um processo industrial.

Figura 29 - Fluxo energético em um processo industrial



Fonte: Mathias (2014)

É de suma importância ter conhecimento técnico sobre o assunto bem como os equipamentos, parâmetros de funcionamento, características, e seu comportamento na instalação. Esta pesquisa tomou como base o estudo de caso realizado por Eduardo Guimarães de Magalhães, na indústria Companhia Petroquímica do Sul (COPELUS).

O sistema da empresa estudada se difere das termelétricas convencionais de acordo com Magalhães (2006), pois sua função não é apenas a geração de energia elétrica, tendo também que acionar turbomáquinas de grande, médio e pequeno porte. A rede de vapor foi subdividida em 4 níveis de pressão: vapor de super alta pressão (VS), vapor de alta pressão (VA), vapor de média pressão (VM) e vapor de baixa pressão (VB), respectivamente com pressões de 112 kgf.cm^{-2} , 42 kgf.cm^{-2} , 18 kgf.cm^{-2} e $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$ e temperaturas de, respectivamente, 525 °C , 400 °C , 315 °C e 225 °C .

Ainda de acordo com Magalhães (2006), o vapor de super alta pressão é obtido a partir da água e é gerado nos fornos de craqueamento (pirólise) das

unidades de processo e nas caldeiras de utilidades, já os demais níveis de vapor são obtidos através da(s) saída(s) de turbinas de extração controlada, de turbinas de contrapressão ou de estações redutoras de pressão.

Em relação ao sistema elétrico, a COPEL consome energia elétrica originária de três fontes internas (geração autônoma) e / ou através de fonte externa (concessionária de energia elétrica). A sua demanda total em funcionamento é cerca de 56MW, sendo que no horário de ponta normalmente não importa, já no horário fora de ponta há a compra de 5 a 10MW. O restante da demanda é preenchido pelos três geradores internos: dois turbogeradores a vapor, componentes do ciclo Rankine da central termoelétrica e uma turbina de combustão, operando em ciclo Brayton, com aquecedor de água de alimentação de forno incrementando a eficiência deste sistema e reduzindo a temperatura dos gases de combustão (MAGALHÃES, 2006).

Baseado nas informações técnicas e cálculos matemáticos contidos na pesquisa do autor Magalhães (2006), pode-se exprimir as variáveis que foram manipuladas para realização do modelo de otimização. Para uma melhor confiabilidade no modelo e uma diminuição do trabalho computacional do otimizado, o autor diz que as abordagens incluem cálculo dos parâmetros do modelo em cada situação da rede de vapor; foco básico no sistema de vapor e no fornecimento de energia elétrica; rigor na apuração dos consumos de vapor, buscando alta precisão no fechamento do balanço de vapor; identificação e rápida solução de problemas de instrumentação, favorecendo a eficácia do modelo.

A programação do sistema envolve muitas variáveis, pois se tratar de um caso específico, então será colocada em discussão as variáveis consideradas gerais, para poder assim contribuir na discussão sobre a otimização de processos de cogeração nos mais diversos ramos da indústria. De acordo com Magalhães (2006) as variáveis gerais consideradas foram:

- Modelagem de Turbinas de Dois Estágios: Parte fundamental do modelo de otimização, a modelagem das turbinas envolve a definição das equações de balanço e de performance das máquinas
- Equações de Balanço: Definem as relações entre as vazões de vapor de entrada e saída das turbinas de dois estágios
- Equações de Performance: A modelagem da operação a partir das linhas de Willans foi aplicada às turbinas da indústria estudada que

apresentam variáveis manipuláveis e assim, apresentam potenciais de otimização dentro do sistema estudado. Enquadram-se nesta premissa as turbinas de duplo estágio (com extração) e cujo ponto de operação ainda encontra-se em região com flexibilidade para transitar pelas linhas de Willans, sem, no entanto comprometer a carga exigida.

- Modelagem dos Equipamentos com Possibilidade de Seleção de Acionador: Fornece a definição da potência elétrica total a partir das medições das fontes. Todavia, é necessário também definir a potência elétrica total a partir dos consumos, que são compostos por duas principais parcelas: total de consumos fixos, parâmetro dependente basicamente das cargas de processo e os consumos de equipamentos motorizados que podem ser substituídos por máquinas turbinadas, com envolvimento de variável binária 'z'.

Analisando as variáveis citadas acima, dão um direcionamento para o otimizador, pois após fazer as rigorosas medições das propriedades da instalação e inserir essas informações no contexto do projeto de otimização, essas variáveis citadas servem como base para o complemento do projeto.

4.4 Setor de Papel e Celulose

O segmento de papel e celulose está entre os mais eletro-intensivos do setor industrial. As indústrias de celulose, e as integradas (papel e celulose) geram grande parte da energia consumida (50 a 60%), a partir da lixívia produzida no próprio processo e de biomassa em geral (resíduos de madeira). No entanto as indústrias de papel produzem apenas 10% da eletricidade necessária no processo, sendo o restante comprado das concessionárias, devido à falta de disponibilidade de combustível produzido nas próprias empresas (COELHO; IENO, 1993).

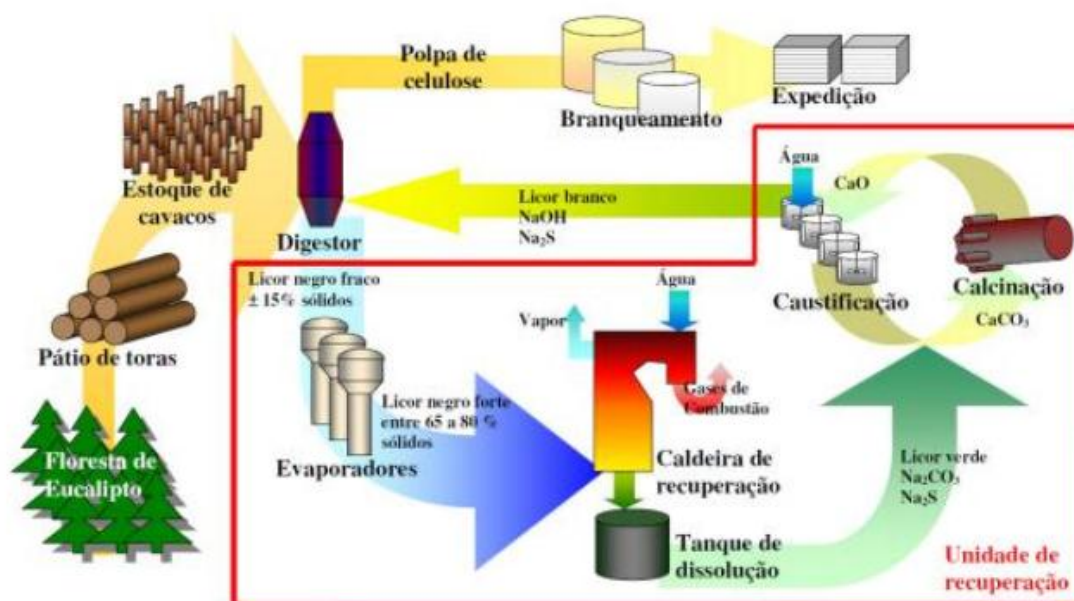
As indústrias de celulose e as integradas utilizam lenha e óleo combustível como combustível complementar nas caldeiras, para a geração de vapor, além dos subprodutos de seus processos. Este vapor é usado para produção de energia elétrica, através da cogeração, e depois no processo de fabricação (FONSECA, 1992; BONOMI, 1985). A utilização de tecnologias mais eficientes, com melhor

aproveitamento da biomassa permitiria uma maior geração de eletricidade, garantindo o suprimento de energia nas situações de interrupções no fornecimento.

Ribeiro (2016) explica que geralmente uma indústria de papel e celulose se divide em dois setores de produção distintos, um responsável pela produção da polpa de celulose e papel e o outro de recuperação e utilidades, que possuem as funções de recuperar e regenerar compostos químicos, fornecer água, vapor, energia elétrica e ar comprimido para todo o processo e tratar os efluentes.

Para a interação destas duas unidades, de acordo com Ferreira (2007), faz com que o processo empregado nesse tipo de indústria possa ser considerado fechado. A Figura 30 representa de forma simplificada um processo Kraft.

Figura 30 - Representação simplificada esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose



Fonte: Ferreira (2007)

Sobre seu faturamento anual, Ferreira (2017) destaca que o setor de papel e celulose apresentou um faturamento de aproximadamente R\$ 34 bilhões em 2010, de acordo com a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa). Comparando com o ano de 2009, o faturamento teve um crescimento de cerca de 23% em 2010. A Tabela 1 apresenta o faturamento Anual em 2009/2010.

Tabela 1 – Faturamento anual em (em R\$ mil)

Faturamento anual (em R\$ mil)			
	2009	2010	%
Celulose	8.035.367	11.414.773	42,06
Papel	14.938.350	17.471.045	16,95
Artefatos	4.544.836	5.064.029	11,42
Total	27.518.453	33.949.847	23,37

1. Refere-se a itens manufaturados como caixas, cadernos e itens de higiene

Fonte: Ferreira (2017)

Sobre a otimização na indústria de papel e celulose, a obra dos autores Vélazquéz, Coelho e Varkulya Jr. (1999), levanta uma discussão bem interessante e muito relevante no âmbito da cogeração de energia, pois os autores tratam da otimização de sistemas a vapor em duas configurações, onde a primeira tem o foco em diminuição de perdas e o alcance da autossuficiência térmica, não considerando essa autossuficiência elétrica.

Sobre a geração e cogeração neste setor, de acordo com Vélazquéz, Coelho e Varkulya Jr. (1999) no caso em estudo, que corresponde aproximadamente à situação atual (à exceção das pressões de trabalho e das eficiências dos equipamentos), a geração de eletricidade é determinada pelo vapor disponível, que expande na turbina (de contrapressão) até a pressão do processo. O sistema inclui caldeiras de alta pressão (60 bar e 470°C), queimando toda a biomassa (cascas, cavacos, dentre outros) disponível, além das próprias caldeiras de lixívia.

Os autores reiteram que no caso em que o vapor gerado não é suficiente, uma caldeira adicional (a lenha, por motivos ambientais) é prevista para substituir as caldeiras existentes que (na maior parte dos casos) usam combustíveis fósseis (óleo, carvão). Em todos os casos são adotadas eficiências mais elevadas para os equipamentos, quando comparadas com a situação atual. O vapor gerado é então alimentado numa turbina de extração/contrapressão.

A segunda configuração é mais interessante por levar em conta a autossuficiência térmica e elétrica o que deixaria mais viável a operação de sistemas desse modelo, gerando uma série de benefícios citados ao longo desse trabalho. De acordo com Vélazquéz, Coelho e Varkulya Jr. (1999), esta opção tem como objetivo a autossuficiência térmica e elétrica, através da instalação de uma turbina a gás

queimando gás natural com caldeira de recuperação, gerando vapor para alimentar a turbina a vapor (condensação/extração), sendo mantidas as caldeiras de biomassa e de recuperação (lixívia).

Posto essas informações, analisando o contexto de otimização no setor de papel e celulose identificam-se algumas variáveis mais genéricas porém fundamentais e extremamente importante para se obter um modelo de otimização eficiente e viável, variáveis essa que são:

- Análise técnica da cogeração: Consiste em identificar os modelos de equipamentos utilizados bem como suas características técnicas e seu comportamento na instalação e fazer um levantamento detalhado de informações sobre medições no sistema;
- Análise termodinâmica: balanços de energia e massa, visando a determinação da eficiência de processos e equipamentos;
- Análise energética: demanda energética da indústria onde a cogeração vai ser implantada, relação entre energia térmica e elétrica requerida nos processos, evolução temporal dos consumos;
- Análise exergética: reversibilidades e eficiências, avaliação sobre a *qualidade* da energia de acordo com a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica;
- Análise política: avaliação de legislação vigente, relativa à possibilidade de comercialização de excedentes elétricos produzidos, autogeradores, produtores independentes;
- Logística de combustíveis: disponibilidade regional, garantia de fornecimento, exigências de armazenamento e operação, etc.;
- Análise econômica: preço dos equipamentos e combustível, custo operacional, financiamento, retorno do investimento, entre outros.

Levando em consideração tais variáveis, fica mais simples e subentendido o processo de otimização, ajudando a identificar os “gargalos” da instalação e atuar em cima deles construindo uma função objetivo para determinada instalação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à ascensão dos preços da energia, o consumo responsável nos setores industriais apresentados é primordial estrategicamente, uma vez que a disponibilidade do vapor espelha diretamente o desenvolvimento da empresa. Dessa forma, análises e ponderações energéticas viabilizam a otimização o sistema de geração e distribuição de energia, e com isso a melhora na sustentabilidade da instalação, e minimização dos custos de produção.

O desenvolvimento do presente trabalho propiciou uma análise técnica do comportamento de uma turbina a vapor inserida no contexto do sistema de cogeração. Além disso, proporcionou, também, uma pesquisa das principais indústrias que emprega a cogeração com o uso da turbina a vapor.

A cogeração está obtendo relevância no contexto brasileiro, seus benefícios garantem diretamente ganhos nas áreas ambientais e econômicas. Além disso, soma valor a um subproduto antes ignorado, estimulando então o desenvolvimento sustentável da indústria. A viabilidade da implementação da cogeração transita pela disponibilidade do combustível, bem como pelo seu preço, evolução tecnológica das turbinas, atenuação das perdas, investimentos, política de incentivo à cogeração e análise técnico-econômica.

Após a apresentação das principais indústrias que empregam a cogeração por meio da turbina a vapor, torna-se possível realizar uma breve análise das indústrias presentes em nossa região. Sendo assim, o setor siderúrgico, presente na cidade, caso implementasse a tecnologia sugerida neste trabalho, aproveitaria de forma íntegra de seus próprios processos internos, seja para a geração de energia ou para a produção de trabalho. Ademais, salienta oportunidades de ganho de eficiência nas variadas etapas do processo de produção do aço, com ênfase admissão de tecnologias e minimização de emissões de poluentes.

Embora os objetivos propostos tenham sido alcançados, esta monografia apresentou os de otimização de processos de cogeração com o uso da turbina a vapor nos setores industriais, com destaque às usinas de papel e celulose, petroquímicas, siderúrgicas e sucroalcooleiras. Envolvendo não só a cogeração como um todo, mas também de forma específica nesses setores.

No que compete a complementação deste trabalho, recomenda-se o estudo da utilização da cogeração também no setor terciário, dado que é uma alternativa de efetivo interessante, e potencial de racionalização da oferta e do uso da energia. A pesquisa termoeconômica do emprego da turbina a vapor é uma boa oportunidade para analisar o processo de composição de custos dentro deste equipamento, assim como examinar seus subsistemas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Regulamentação**. Publicado: 17/12/2015, última modificação 28/04/2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulamentacao>>.

ALMEIDA, D. M. **Segunda Lei da Termodinâmica Recursos Digitais e Ensino de Química**. 2003. Dissertação (Mestrado em Química) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2003.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração**: Geração combinada de eletricidade e calor, 1ª edição, Editora da UFSC. Florianópolis – SC, 2002.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 157 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BELISARIO, I. C. **Análise Termoeconômica de uma Central de Cogeração de uma Indústria Siderúrgica**. 104f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2012.

BONOMI, A. (Coordenador). **Conservação de Energia na Indústria de Celulose e Papel**. Manual de Recomendações. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT. São Paulo, 1985.

CALLEN, H. B. **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics**. 2 ed., John Wiley: New York, 1985.

CARNOT, S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines propres à Développer cette Puissance**. Bachelier; Paris, 1824.

CARVALHO, F. R.; NOGUEIRA, L. A. H.; TEIXEIRA, F. N. Cogeração e Geração Distribuída. *In*: LORA, Electo Eduardo Silva; (2004). **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência. 2 volumes. 296 p.

CAMPELLI, A. **Energia elétrica**: qualidade e eficiência para aplicações industriais. São Paulo: Érica, 2013.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da Siderurgia Brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial - Siderurgia**, [S. l.], 2015. Setorial 41, p. 181-236.

CASTRO, R. M. G. Introdução à Cogeração. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. Lisboa, Maio 2009.

CASTRO, R.; FERRACIOLI, L. **Segunda Lei da Termodinâmica: um estudo de seu entendimento por professores do ensino médio**. Laboratório de Tecnologias Aplicadas à Modelagem Cognitiva Departamento de Física Universidade Federal do Espírito Santo, 2001.

Catalogue of CHP Technologies, U.S. Environmental Protection Agency. **Combined Heat and Power Partnership**. Energy Nexus Group, february 2002.

CHP BRASIL. **Cogeração Qualificada**. Disponível em: <http://chpbrasil.com.br/solucoes/cogerao-qualificada>. Acesso em: 01 de dezembro 2018.

CITTADINO, G. **Eficiência energética e redução da emissão de poluentes na indústria siderúrgica**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

CLEVELAND, C. J. Encyclopedia of Energy. In: EICHHAMMER, W. **Industrial Energy Efficiency**. California: Elsevier Science, 2004, vol. 3, p. 383-393.

COELHO, S.T.; IENO, G.O. **Cogeração de Eletricidade nas Indústrias de Papel e Celulose**. (mimeografado). Estudo realizado sob contrato com União Européia. São Paulo: IEE/USP, 1993.

COGEN EUROPE (2001). **Educogen** - An educational tool for cogeneration. 2 ed. Brussels, Belgium: COGEN Europe.

CONSELHO MUNDIAL DE ENERGIA. Comitê Brasileiro. **Dicionário de Terminologia Energética 2001**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CBCME, 2001. 324 p.

COUTO, A. F. R. **Estudo de viabilidade de sistema de autoconsumo industrial com cogeração**. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Eletrotécnica de Computadores, Feup, Porto, 2015.

DELGADO, R. F. L. **Estudo e Implementação de um Sistema de Cogeração**. 2016. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

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

DHOLE V.R.; LINNHOFF B. **Distillation column targets**. *Comput. Chem. Eng.*, 17(5), p 549-560, 1993.

EASTWOOD, A.; BEALING C. **Optimizing the Day to Day Operation of Utility Systems**. Northwich: KBC / Linnhoff March, 2003.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras. **Guia técnico de Gestão Energética**. Rio de Janeiro – RJ, 2005.

ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 2016, Londrina. **Cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar: estudo de caso múltiplo no setor sucroalcooleiro [...]**. [S. l.: s. n.], 2016.

FERRACIOLI, R. C. L. **Segunda lei da termodinâmica: um estudo de seu entendimento por professores do ensino médio**. Laboratório de Tecnologias Aplicadas à Modelagem Cognitiva Departamento de Física Universidade Federal do Espírito Santo, 2001

FERREIRA, A. S. **Cogeração numa lógica de autoconsumo da energia eléctrica produzida**. 2018. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.

FERREIRA, D. J. O. **Análise de escoamento de gases em uma caldeira de recuperação química via fluidodinâmica computacional**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Química da UFMG, Belo Horizonte 2007.

FERREIRA, S. S. **Análise termodinâmica do ciclo a vapor de uma empresa produtora de celulose**. Trabalho de Graduação - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Toledo, Araçatuba, 2017.

FERRÃO, P. D. M.; WEBER, F. A. **Cogeração: uma abordagem socioeconômica.** XXIX Cobenge, 2001. GDR 8 – 14.

FONSECA, M.A.S. **Consumo Energético na Indústria de Papel e Celulose.** In: SEMINÁRIO CEE/BRASIL - SETORES INDUSTRIAIS EM ENERGIA. Anais. São Paulo, 1992.

FREITAS, C. O.; MAKIYA, I. K. Potencial energético a partir do biogás proveniente de aterros sanitários do estado de São Paulo. *In: XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 2012, Bento Gonçalves. **Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: As Contribuições da Engenharia de Produção [...].** Bento Gonçalves: [s. n.], 2012.

GIBBS, J. W. **The Collected Works of J. Willard Gibbs.** Longman, Green; New York, 1928.

GOMES, G.; DVORSAK, P.; HEIL, T. **Indústria petroquímica brasileira: situação atual e perspectivas.** Departamento de Indústrias Químicas do BNDES, 2005.

GUARINELO JÚNIOR, F. F. **Avaliação termoeconômica de um sistema de cogeração proposto para um pólo industrial.** Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 1997.

HIRATA, K.; SAKAMOTO, H.; O'YOUNG, L.; CHEUNG, K. Y.; HUI, C. W. **Multi-site integration** – an industrial case study. *Computers & Chemical Engineering*, v. 28, p. 139-148, 2004.

LINNHOFF, B.; TOWNSEND, D. W.; BOLAND, D.; HEWITT, G. F.; THOMAS, B. E. A.; GUY, A. R.; MARSLAND, R. H.; **User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy.** U.K: The Institute Of Chemical Engineers, 1982.

MAGALHÃES, E. G. **Otimização da Distribuição de Vapor e Energia Elétrica de uma Indústria Petroquímica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2006.

MATHIAS, F. R. C. **Diagnóstico Energético e Gestão da Energia em uma Planta Petroquímica de Primeira Geração.** Dissertação de Mestrado – Curso Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2014.

MAVROMATIS, S. P.; KOKOSSIS, A. C. **A logic model for the analysis and optimization of steam turbine network.** Computers in Industry, v. 36, p. 165-179, 1998.

MILOSEVIC, Z.; PONHÖFER, C. **Refiner improves steam system with custom simulation / optimization package.** Oil & Gas Journal, august, p. 90-94, 1997.

MORAES, S. O. O. **Cogeração no setor sucroalcooleiro a partir do reaproveitamento energético da biomassa do bagaço de cana.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MOREIRA, N. H.; BASSI, A. B. M. S. **Sobre a Primeira Lei da Termodinâmica.** Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13083-970 Campinas, SP, 2001.

NETO, I. A. F. **Estudo das Inovações na Área da Turbina a Gás.** 2018. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

NOGUEIRA, L. A. H.; CARVALHO, F. R.; TEIXEIRA, F. N. et al. **Disseminação de Informações em Eficiência Energética – Cogeração.** Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, L. L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. **Estudo sobre Cogeração de Energia Elétrica no Setor Sucroalcooleiro.** REGRAD, UNIVEM/Marília-SP, v. 10, n. 1, p 354 – 365. Outubro de 2017.

OLIVEIRA, J. P. M. **Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à indústria cervejeira.** 2018. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, G. R. M. **Análise energética de um sistema de geração de energia de uma usina siderúrgica com foco na turbina a vapor e no condensador.** 2017. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

OTIS, P. **CHP Industrial Bottoming and Topping Cycle with Energy Information Administration Survey Data.** 2015. Disponível em: <https://www.eia.gov/workingpapers/pdf/chp-Industrial_81415.pdf>. Acesso em 12 maio 2019.

PAPOULIAS, S. A.; GROSSMANN, I. E.. **A structural optimization approach in process synthesis**. Part I: Utility systems. *Comput. Chem. Engng* 7, 695, 1983.

PILON, A.; LUZ, G.; DIAS, L. P.; MADEIRA, T. M.; RAMPINELLI, W.; TASSI, R.; CITTADIN, T. A. Sistema de Cogeração de Energia. **1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul**, Santa Catarina, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/viewFile/631/445>. Acesso em: 24 mar. 2019.

PINTO, J. H. F. **Otimização On-line do Sistema Termoelétrico de uma Companhia Petroquímica**. Figener S/A Engenheiros Associados. Disponível em: <http://www.figener.com.br/informativos/informativo_03.pdf>. Acesso em: Maio de 2019.

PIRES, V. F. M.; ZEMP, R. J. **Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico**. Artigo publicado no XV COBEQ / II CBTERMO, 2004.

PLANCK, M. K. E. L. **Wissenschaftliche Selbstbiographie**. J. A. Barth; Leipzig, 1948.

POUSA, A. C. **Análise termo-exergoecoômica e financeira de um sistema de cogeração, eletricidade e água gelada, aplicado a um centro comercial**. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

RANGEL, L. C.; LOPES, R. S.; VIEIRA, J. R. A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão. *In*: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2009, Salvador. **Cogeração e comercialização de excedentes de eletricidade em uma usina sucroalcooleira [...]**. Salvador: [s. n.], 2009.

REIS, M. C.; BASSI, A. B. M. S. **A Segunda Lei da Termodinâmica**. Departamento de Físico-Química, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13083-970 Campinas – SP, Brasi, 2012.

RIBEIRO, N. M. **Análise De Uma Instalação De Vapor Em Um Industria De Papel E Celulose**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica, Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Do Paraná, Pato Branco, 2016.

RODRIGUES, M. L. M. **Estudo Técnico-Econômico da Implantação da Cogeração em Pequena Escala a Biomassa em uma Indústria.** Dissertação de Mestrado – curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

RODRIGUES, R. C. **Otimização termoeconômica de uma central de cogeração de energia utilizando o simulador de processos IPSEPRO.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, M. I. C. **Um modelo para a otimização da cogeração de calor e eletricidade em uma planta industrial.** Dissertação de Mestrado – curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2014.

SCARPIN, L. M. **Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica do aproveitamento energético do palhiço da cana-de-açúcar através da gaseificação, dentro de uma nova concepção de projeto de uma usina sucroalcooleira.** 2012. Trabalho de Graduação, UNESP, Ilha Solteira, Brasil, 2013.

SILVA, F. S. **Determinação do custo de energia gerada através da utilização de células a combustível de carbonato fundido e turbina a vapor em um ciclo combinado.** Trabalho de Mestrado – curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2018.

SONNTAG, R. BORGNAKKE, C. VAN WYLEN, G.J. **Fundamentals of Thermodynamics.** 6. ed. John Wiley & Sons, 2003.

SOUSA, E. F. **Eficiência energética e redução da emissão de poluentes na indústria siderúrgica.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

TAVARES, P.C.C. **Cogeração na expansão:** A expansão sob a ótica da cogeração de energia. Opiniões – out/dez, p. 30, Ribeirão Preto 2006.

TORRES, E. M. **A evolução da indústria petroquímica brasileira.** Porto Alegre – RS QUÍMICA NOVA, 20, Especial, 1997.

TRUESDALL, C. A.; **The Tragicomical History of Thermodynamics: 1822-1854, vol. 4 de Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences**. Springer-Verlag, New York, 1980.

Universidade de São Paulo (USP). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Recursos Energéticos e Ambiente. **Cogeração**. Piracicaba, 2013.

VELÁZQUEZ, S.M.S.G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil**. 2000. 205 p. Dissertação de Mestrado - Mestrado em Energia, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

VÉLAZQUÉZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T.; VARKULYA JR., A. **A cogeração de eletricidade no setor de papel e celulose: avaliação técnica e econômica**. XV COBEM, 1999.

ZEMANSKY, M. W.; DITTMAN, R. H.; **Heat and Thermodynamics**. McGrawHill: Auckland, 1997.