

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

AMARILDO FERREIRA FROSSARD

**ESTUDO DE UMA PLANTA DE COGERAÇÃO TERMOELÉTRICA
VISANDO CONFIRMAR SEU ENQUADRAMENTO NA
MODALIDADE QUALIFICADA, COM POSSIBILIDADE DE
APROVEITAMENTO DE GASES**

VOLTA REDONDA

2020

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

**ESTUDO DE UMA PLANTA DE COGERAÇÃO TERMOELÉTRICA
VISANDO CONFIRMAR SEU ENQUADRAMENTO NA
MODALIDADE QUALIFICADA, COM POSSIBILIDADE DE
APROVEITAMENTO DE GASES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Uni-FOA como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aluno: Amarildo Ferreira Frossard

Orientador: Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

Co-orientador: Prof. Esp. Bruno Moreira da Silva

**VOLTA REDONDA
2020**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Amarildo Ferreira Frossard

Título: Cogeração termoelétrica qualificada com aproveitamento de gases

Orientador: Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

Banca Examinadora:

Prof.

Prof.

Prof.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me proporcionado força e saúde a cada raiar do dia.

Agradeço a minha família que muitas vezes abriu mão do lazer me fortalecendo e me inspirando quando as dificuldades apareciam ao se encaminhar o curso.

Aos professores que se dedicaram em compartilhar todo conhecimento adquirido ao longo deste curso, em especial ao Prof. Bruno que foi meu Co-orientador na elaboração deste projeto de conclusão de curso.

RESUMO

O desenvolvimento industrial e residencial do presente século acarretou um crescente consumo de energia elétrica, trazendo ao “mundo atual” maior necessidade de desenvolverem-se tecnologias eficientes de geração dessa energia. Em unidades consumidoras de energia elétrica de médio e grande porte, um dos principais conceitos de eficiência na área de geração energética são as cogerações, fornecendo energia elétrica, térmica e com possibilidade, em grande parte dos casos, de fornecimento de insumos adicionais de gases para a planta. A eficiência das cogerações é tratada e certificada por norma emitida por órgão regulamentador brasileiro. Um estudo de caso desenvolvido em uma planta geradora leva à verificação destes conceitos, bem como aos cálculos de eficiência de geração elétrica, térmica e a qualificação desta, verificando-se a viabilidade de implantação do aproveitamento do Dióxido de Carbono (CO₂) aumentando sua eficiência global de geração.

Palavras-chave: Cogeração, qualificada, termoelétrica, geração, CO₂.

ABSTRACT

The industrial and residential development of the present century is an increasing consumption of electric energy, bringing to the “current world” a greater need to develop efficient technologies for the generation of this energy. In medium and large energy consuming units, one of the main concepts of efficiency in the area of energy generation are cogenerations, providing electrical, thermal energy and with the possibility, in most cases, of supplying additional gas inputs for the plant. The efficiency of cogenerations is treated and certified by a standard issued by a Brazilian regulatory agency. A case study developed in a generating plant leads to the verification of these concepts, as well as to the calculation of efficiency of electrical and thermal generation and its qualification, verifying the feasibility of implementing the use of Carbon Dioxide (CO₂) increasing its efficiency global generation.

Keywords: Cogeneration, qualified, thermoelectric, generation, CO₂.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivos gerais.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Hipótese	13
2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	14
2.1 Geração hidráulica	14
2.2 Geração Solar	15
2.3 Energia Eólica	17
2.4 Geração Nuclear	19
2.5 Geração térmica.....	20
3. COGERAÇÃO	22
3.1 Geração Elétrica.....	25
3.1.1 Motores de combustão.....	25
3.1.2 Células a combustível	26
3.1.3 Turbinas a gás.....	27
3.2 Geração térmica.....	31
3.3 Beneficiamento e aproveitamento de gases.....	32
3.3.1 Tecnologias disponíveis de captura	33
3.3.1.1 Pré-oxidação	33
3.3.1.2 Oxi-combustão	33
3.3.1.3 Pós-combustão	34
4. ESTUDO DE CASO	36
4.1 Eficiência de geração elétrica.....	38
4.2 – Eficiência de Geração térmica.....	39
4.3 Eficiência global da planta.....	41
4.4 Análise para implantação de recuperação de gases de exaustão	41
4.5 Aderência aos termos de cogeração qualificada.....	42
5. CONCLUSÃO	44

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
7. ANEXOS	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

KWh – Quilowatt-hora

KW – Quilowatt

MW – Megawatt

V – Volts

kV - Quilovolts

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

CGH – Central Geradora Hidráulica

EOL – Usinas Elioelétricas

UTE – Usinas Termelétricas

UFV – Usinas Fotovoltaicas

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

CBEE – Centro Brasileiro de Energia Eólica

SIN - Sistema Interligado Nacional

IEC - International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

NBR – Normas Brasileiras

TC – Transformador de Corrente

QDC – Quadro de Distribuição de Circuitos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Participação setorial no consumo de energia elétrica	10
Figura 2- Crescimento no consumo setorizado	11
Figura 3- Oferta interna de energia por fonte	11
Figura 4- Exemplo de painel solar.....	16
Figura 5- Fluxograma de geração heliotérmica	16
Figura 6- Protótipo de uma geração eólica	18
Figura 7 – Perdas de eficiência em uma geração térmica	21
Figura 8- Perdas de eficiência em uma cogeração térmica.....	21
Figura 9- Sistema de geração com turbina a gás combinada.	23
Figura 10- Ciclo a montante - Topping	23
Figura 11- Ciclo a distante - Bopping	24
Figura 12- Faixa típica de temperatura para os sistemas de cogeração	24
Figura 13- Esquema de uma célula a combustível.....	27
Figura 14- Dispersão de elétrons pela reação química	27
Figura 15 – Ciclo ideal de Brayton x Ciclo real.....	28
Figura 16- Esquema de uma instalação de turbina a gás com circuito aberto	29
Figura 17- Eficiência de cogeração	31
Figura 18- Exemplo de planta de recuperação de CO ₂	35
Figura 19- Geração de energia – período 1	36
Figura 20- Geração de energia – período 2	37
Figura 21- Geração de vapor	37
Figura 22-. Consumo de gás.....	38
Figura 23- Análise de emissão de gases	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de temperatura por tipo de eletrolítico	47
Tabela 2 – Eficiência geração elétrica	48
Tabela 3 – Eficiência geração térmica	49
Tabela 4 - Constantes de Cálculo atendimento RN 235/2016.....	49

1. INTRODUÇÃO

Atualmente ocorre uma nova revolução industrial onde a interação humana com máquinas e processos mais automatizados por meio da robótica e ampliação de parques industriais tornou-se uma constante. Sob o olhar social, esta também passou por novidades tecnológicas de comunicação, transporte e conforto.

Os três maiores consumidores de energia elétrica são as indústrias com 37,5%, residenciais com 25,4% e o comércio com 16,4% respectivamente, conforme figura 1 abaixo apresentada.

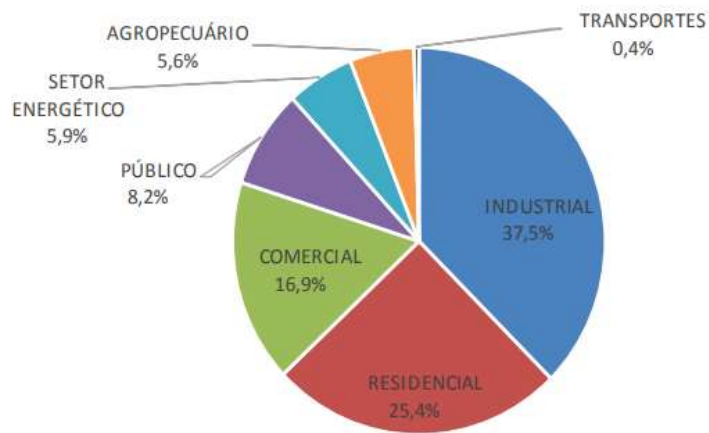


Figura 1 – Participação setorial no consumo de energia elétrica

Fonte: Balanço Energético Nacional 2019.

Toda esta evolução tecnológica, bem como o crescimento de um país está diretamente relacionado ao consumo energético e sua capacidade geradora para suprir todo este crescimento de demanda consumidora. Este crescimento é representado pelo gráfico de crescimento abaixo (figura 2), no consumo setorial apresentado na imagem anterior.

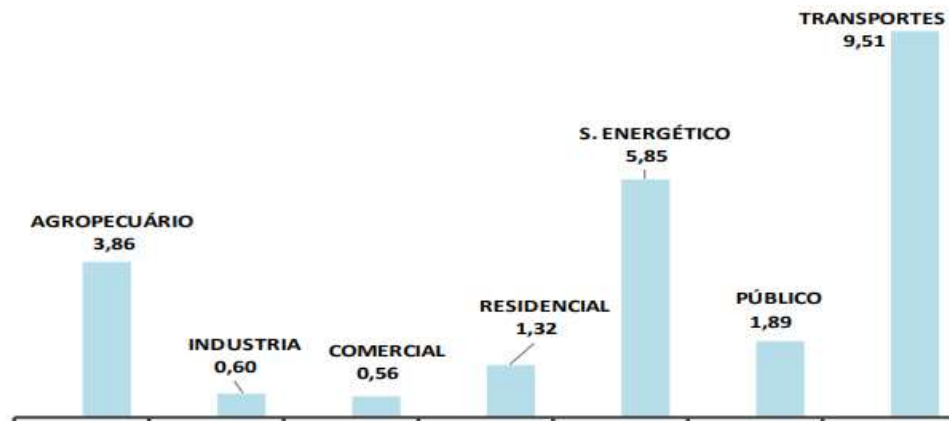


Figura 2 – Crescimento no consumo setorializado

Fonte: Balanço Energético Nacional 2019.

O sistema elétrico brasileiro possui sua maior capacidade de geração vinda de usinas hidrelétricas reguláveis, que em 2018 correspondeu a 66,6% de toda produção nacional no ano (Fonte Balanço Energético Nacional 2019). O restante da geração nacional vem distribuído conforme ilustrado na figura 3.

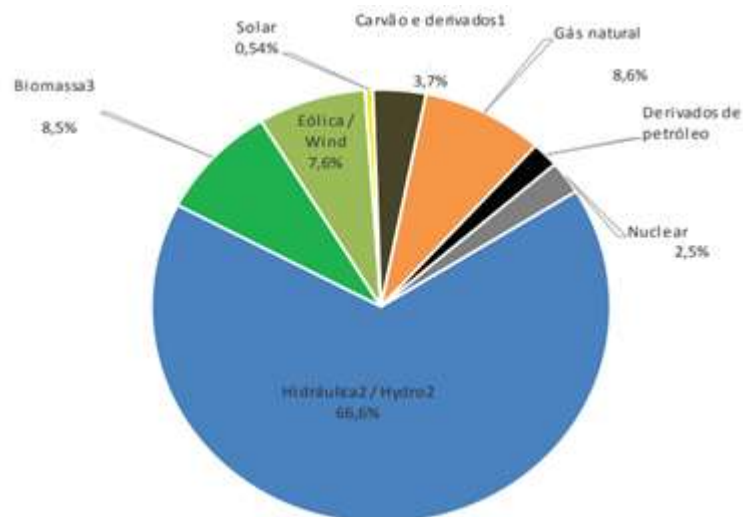


Figura 3 - Oferta interna de energia por fonte

Fonte: Balanço Energético Nacional 2019

Com as diversidades regionais e as usinas interligadas pelo SIN (Sistema Interligado Nacional), é possível ter um plano de compensação entre regiões, homogeneizando assim a sua capacidade de geração.

Dentro do valor hidrelétrico considera-se ainda a energia comprada de Itaipu do consorcio entre Brasil e Paraguai

Com o crescente consumo temos que, além de desenvolver novas tecnologias geradoras, procurar soluções de eficiência máxima no aproveitamento dos insumos consumidos nestas gerações com menor custo e máximo aproveitamento dos recursos disponíveis.

A fim de regular estes custos/aproveitamento dos insumos a ANEEL publicou a Resolução Normativa 235 de 14 de novembro de 2006 que definiu regras para a qualificação do conceito de cogeração qualificada.

1.1 Justificativa

Nos dias atuais a competitividade vem em linha com a eficiência, qualidade, segurança e custo dos serviços prestados. Quando falamos em geração também trata-se de um serviço e deve atender a estes requisitos a fim de se tornar competitiva no mercado de energia.

Uma termoelétrica além de gerar energia para fornecimento dispensa vários gases da queima para atmosfera que gera impacto negativo direto ao meio ambiente, principalmente na camada de ozônio, uma vez que o CO₂ é muito prejudicial e um dos maiores fatores para o efeito estufa no mundo.

Este Trabalho visa disponibilizar a máxima eficiência de uma planta cogeneradora, tendo a melhor eficiência de geração e disponibilizando os seus resíduos de forma reaproveitável para uma segunda destinação, minimizando o custo de produção e os efeitos negativos da dispensa destes gases para atmosfera.

Para este estudo estaremos tendo como base o atendimento a resolução normativa da ANEEL que descreve sobre as cogerações qualificadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho vem com o objetivo de analisar e viabilizar conceitos de uma cogeração qualificada capaz de ter um máximo de eficiência com qualidade e

reaproveitamentos de seus rejeitos atendendo a norma regulamentadora da ANEEL 235/14.

1.2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivo específico realizar um estudo sobre fontes geradoras de energia existentes e disponíveis na atualidade tendo como interesse principal a geração térmica no modelo de cogeração a gás natural, demonstrando a funcionalidade de forma a disponibilizar a máxima eficiência de geração aproveitando seus rejeitos gasosos em segundo plano, tendo como consequência um custo menor, bem como o impacto ambiental minimizado.

Com um estudo de caso realizado em uma planta cogeneradora a gás natural localizada na cidade de Piraí no estado do Rio de Janeiro, serão realizados estudos práticos e comprovações teóricas através de pesquisas científicas e estudos de bibliografias diversas aqui mencionadas.

1.3 Hipótese

Durante a geração de energia por meio da queima do gás existem diversos processos que podem se tornar menos eficientes quando não acompanhados em suas rotinas. Um ponto comum em uma termoelétrica são os rejeitos gasosos lançados a atmosférica, tais como CO₂ e SO_x, gerando considerável impacto ambiental quando não retirados e tratados.

Neste trabalho será abordado o funcionamento de uma cogeração com os pontos-chaves determinantes para uma boa eficiência geradora, propondo as necessidades para atender a norma regulamentadora da ANEEL que fala sobre as cogerações qualificadas.

Ao final deste trabalho uma avaliação de eficiência máxima será apresentada para a planta, bem como o reaproveitamento dos rejeitos gasosos a fim de se aplicar a Norma regulamentadora que prevê benefícios as plantas nela enquadradas.

1.4 Metodologia

Metodologia de estudo obtendo conhecimentos e condições para levantar as necessidades para uma maior eficiência no processo de geração de energia em uma planta térmica do tipo cogeneradora.

Em um segundo momento com uma metodologia exploratória buscando os conceitos de uma geração térmica, passando por cada etapa ou ciclo de desenvolvimento deste modelo de planta.

No estudo de caso em uma planta cogeneradora pretende-se, na parte final da construção deste trabalho de conclusão de curso, comprovar na prática todo o estudo realizado com as referências bibliográficas, oferecendo viabilidade técnica e oportunidades de uma melhor eficiência bem como reaproveitamento de seus rejeitos.

2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Geração hidráulica

Usinas Hidrelétricas são fontes de energia com baixo custo operacional, tendo o custo elevado apenas em sua construção, que envolve barragens que também possui um grande impacto ambiental. Com as atuais tecnologias existem turbinas geradoras de alta performance que garante um alto índice de conversão cinética da água em energia elétrica para distribuição, além de ter um controle de vazão hidráulica que gera uma estabilidade em sua geração.

Além das grandes geradoras, como Itaipu e Tucuruí, existem as chamadas PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas). Estas PCH são turbinas de pequeno porte que possuem um pequeno reservatório para suprir seu abastecimento em épocas de seca ou fio d'água. Os dois casos podem levar a ociosidade em determinado período do ano devido à baixa no volume hídrico da bacia onde estão instaladas. As PCHs que trabalham no que chamamos de usinas a fio d'água, por de trabalhar direto com o fluxo dos rios, sem necessidade de represar água, minimizando consideravelmente o impacto ambiental na fauna e flora do local.

As hidrelétricas são compostas, de forma macro, por alguns componentes: barragens, câmara de descarga, extravasores, comportas, chaminé de equilíbrio, dutos, casa de força e tomada de água.

2.2 Geração Solar

No sol ocorrem constantes fusões de átomos de hidrogênio em seu núcleo, semelhante a uma reação de uma bomba atômica. Destas fusões ocorre a união de dois átomos de hidrogênio formando o hélio, resultando desta fusão uma sobra que se transforma em luz e calor, que pode ser observada recebida pela terra.

No ano de 1958 iniciou-se a utilização da energia solar, pois o programa espacial precisava de energia para alimentar seus equipamentos no espaço. Assim, surgiram as placas fotovoltaicas utilizadas no sistema espacial até a década de 70, quando iniciou-se a expansão da utilização da mesma em solo terrestre.

O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, principalmente no nordeste brasileiro. Na região do semiárido estão os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 w/m² de potência contínua. (GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Lineu Belico dos Reis, 2^o Edição).

Existem diferentes meios de aproveitar esta energia e um deles é o sistema de aquecimento de água por meio da difusão de placas solares, porém não é o foco do estudo deste trabalho ficando a título de conhecimento de sua existência.

Os sistemas com painéis fotovoltaicos (figura 4) são capazes de transformar diretamente a energia, a vantagem desta tecnologia estaria em sua simplicidade de instalação e a forma silenciosa de geração.

As placas fotovoltaicas tradicionais são construídas com materiais semicondutores, normalmente de silício, que é um material abundante na natureza, cerca de 25% da crosta terrestre. Ao expor estas placas à luz solar, parte dos elétrons que recebe esta luz absorve os fótons, os elétrons livres são então atraídos e transportados por meio de um campo elétrico formando então um fluxo eletrônico entre os terminais do painel fotovoltaico.

A energia de corrente contínua gerada chega aos inversores e é transformada em corrente alternada para ser injetada nas redes de distribuição das concessionárias locais de energia. Esta injeção pode ser *on-grid* ou *off-grid*, injetando na rede de distribuição direta ou na rede interna isolada respectivamente.



Figura 4: Exemplo de painel solar

Fonte: <https://www.ecycle.com.br/2890-energia-solar> em 01 de março de 2019.

Outra forma disponível de transformação está na heliotérmica que consiste no aquecimento de determinado fluido por meio do calor recebido pela energia solar transformando a água em vapor com capacidade de girar uma turbina que por sua vez gera a energia elétrica. Este segundo passo do processo ocorre como uma termoelétrica, conforme explicitado na figura 5.

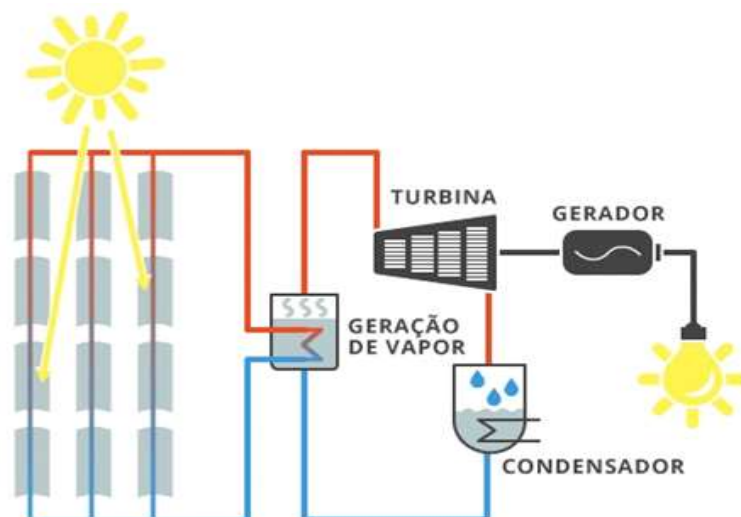


Figura 5: Fluxograma de geração heliotérmica.

Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-heliotermica-entenda-como-funciona.html>

2.3 Energia Eólica

“Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento)”. (Energia Eólica 6, Aneel).

A geração de energia eólica consiste na conversão desta energia cinética vindo do deslocamento das massas em energia mecânica nas turbinas geradoras que por sua vez converte a energia mecânica em energia elétrica para distribuição após passar pelo tratamento adequado. No início da utilização desta energia, a utilização principal estava na parte mecânica com os moinhos e bombas d’água. Somente no início do ano de 1970 com a crise do petróleo iniciou-se os investimentos na transformação desta energia em energia elétrica para transmissão. Em 1976 na Dinamarca foi implantada a primeira turbina eólica a nível comercial no sistema de distribuição do país.

A viabilidade de instalação de uma usina geradora eólica está atrelada principalmente nas análises climáticas do local, velocidade média dos ventos no local em média a uma altura de 50 metros. “Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s” (GRUBB; MEYER, 1993).

Em uma unidade geradora a energia cinética do vento é capturada pelas pás e transferida em forma de energia mecânica ao rotor que por sua vez faz a transferência mecânica para elétrica que chega até os painéis de distribuição desta energia. Atualmente as unidades geradoras dispõem de sensores de velocidade e deslocamento do vento, possibilitando um controle de posição do sistema a fim de ficar na posição de melhor aproveitamento desta energia, controlando assim sua potência de geração.

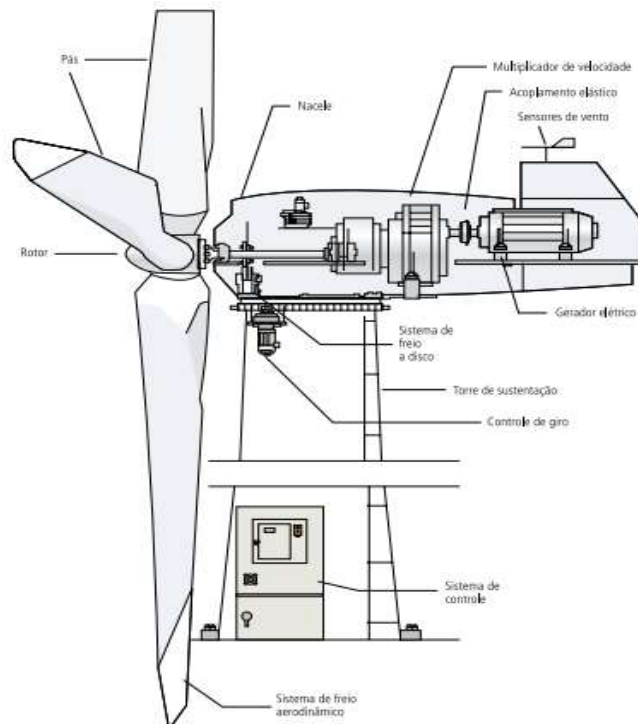


Figura 6 – Protótipo de uma geração eólica.

Fonte: CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA – CBEE / UFPE. 2000. Disponível em: www.eolica.com.br. (adaptado)

A figura 6 acima disposta demonstra um sistema de montagem de uma unidade geradora, podendo ver no detalhe o funcionamento de as partes e etapas da geração de forma mais detalhada.

“Entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devido ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos” (ARAÚJO, 1996). Em se tratando de impactos ambientais estes mencionados são bem menos prejudiciais ao meio ambiente quando comparada as demais gerações. Além dos mencionados temos ainda as interferências eletromagnéticas que vem mencionados em TAYLOR, 1996. Este influenciando nas transmissões de rádio e televisão.

2.4 Geração Nuclear

Quando se fala em energia nuclear ou em radioatividade o primeiro pensamento de muitos, principalmente os mais idosos, se tem a imagem negativa gerada pela Little Boy e Fat Man. Estes dois nomes são responsáveis pela destruição nuclear ocorrida respectivamente em Hiroshima e Nagasaki em agosto de 1945. Esta foi a apresentação mais potente da energia nuclear.

Além desta apresentação negativa a sociedade alguns acidentes nucleares também geram a imagem negativa sobre a radioatividade, podendo citar Chernobyl em 1986, césio 137 em Goiânia em 1987 e Fukushima que seria a mais atual de grandes proporções, ocorrida em 2011.

Porém a radiação é muito mais utilizada de forma benéfica do que nas crueldades humanas ou em acidentes como os citados. No ramo da medicina por exemplo a radiação vem sendo de grande ajuda no diagnóstico por imagem e no tratamento de tumores por meio da radioterapia.

No cenário energético, esta é considerada uma energia limpa por se tratar de uma geração térmica que não emite gases nocivos ao planeta. A energia nuclear representa aproximadamente 15% da energia gerada em todo o planeta, sendo os três maiores dependentes desta energia os Estados Unidos, França e Japão respectivamente do mais dependente para o menor.

No cenário brasileiro temos o potencial energético nuclear instalado na cidade de Angra dos Reis, que fica na Costa Verde do estado do Rio de Janeiro nas usinas de Angra I e Angra II que estão interligadas ao SIN. Estas unidades geradoras estão ligadas na malha energética sendo considerada em todo cenário nacional.

A geração de energia elétrica nas usinas nucleares ocorre por meio da fissão de um átomo com quantidade de prótons e neutros bem elevada. Esta fissão do núcleo do Urânio – 235 libera uma quantidade de energia próximo a 80 mil vezes a energia gerada na queima de carvão mineral. Dentro do processo de uma usina nuclear toda esta energia é controlada e transformada em energia elétrica.

O Brasil hoje possui sua própria indústria de enriquecimento de urânio, que fica situada no município de Resende/RJ, a Indústria Nuclear Brasileira – INB, porém os rejeitos das usinas, que apesar de ter sido utilizados continua com grande radiação,

ainda não possui uma destinação definitiva ficando armazenadas em um ambiente controlado, porém ainda representando um risco ambiental.

2.5 Geração térmica

A geração térmica é uma tecnologia que utiliza o poder calorífico para geração de energia elétrica, incluindo como insumo a energia nuclear em uma de suas possibilidades, conforme descrito no item anterior. Esta tecnologia consiste na conversão de energia térmica em energia mecânica e posteriormente transformando de energia mecânica para energia elétrica.

A geração térmica acontece com a expansão de um fluido ou gás que por consequência gera calor. Esta energia térmica é transformada em energia mecânica pelas turbinas de geração que acopladas em geradores transformam a energia mecânica em energia elétrica que passa pela equalização e distribuição, seja para o SIN ou para consumo interno da planta onde se tem a geração.

A usina de Santa Cruz é a segunda maior geradora térmica do país com capacidade de aproximadamente 350 MW de potência (<https://www.furnas.com.br/subsecao/138>). Originalmente esta usina foi projetada tendo como combustível o carvão natural que era extraído de Santa Catarina e transferido até a usina para o processo de queima e geração de energia elétrica. Após algumas atualizações e modernizações junto as expansões desta usina o combustível foi alterado para óleo e posteriormente incluído o sistema de gás natural a planta gerando uma energia mais limpa quando comparada aos insumos iniciais.

Esta geração possui os maiores impactos negativos de eficiência no próprio combustível e nas perdas térmicas do próprio sistema, onde ocorre a conversão mecânica. Na conversão para energia elétrica as perdas consideráveis estão relacionadas as perdas elétricas e o consumo próprio da geração.

Em um processo termoelétrico, por mais eficiente que seja, produz uma perda (figura 7) em torno de 60%, ou seja, apenas 40% em média do combustível de entrada ao sistema é aproveitado para a geração de energia elétrica, com os demais dispensados de alguma forma.

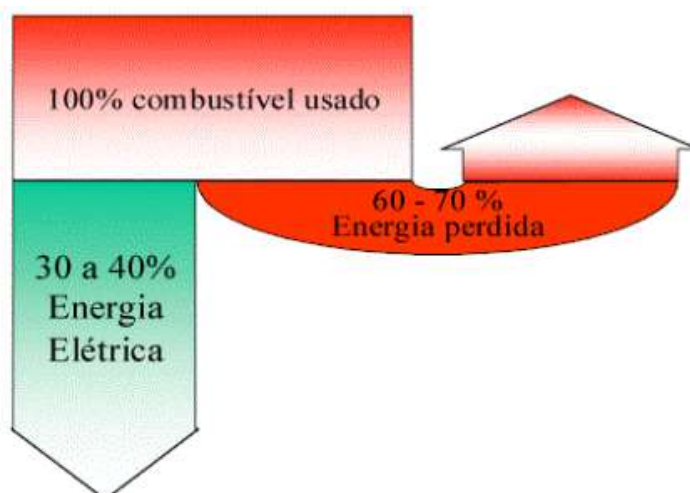


Figura 7: Perdas de eficiência em uma geração térmica.

Fonte: http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp

A tecnologia que minimiza estas perdas é a cogeração, trabalhando com o reaproveitamento de grande parte da energia originalmente desperdiçada. Uma das formas de energia dispensada no processo de geração térmica é o calor em forma de vapor, que na planta cogeneradora é aproveitada como vapor nos processos a quente em indústrias, residências e/ou prédios.

Outro subproduto dispensado pelas gerações térmicas e de grande impacto ambiental é o CO₂ que compromete a camada de ozônio e ajuda negativamente no efeito estufa do planeta. Em uma planta cogeneradora este subproduto pode ser aproveitado em uma planta de beneficiamento de CO₂, que faz o tratamento e purificação deste produto disponibilizando-o para ser comercializado ou utilizado como insumo.

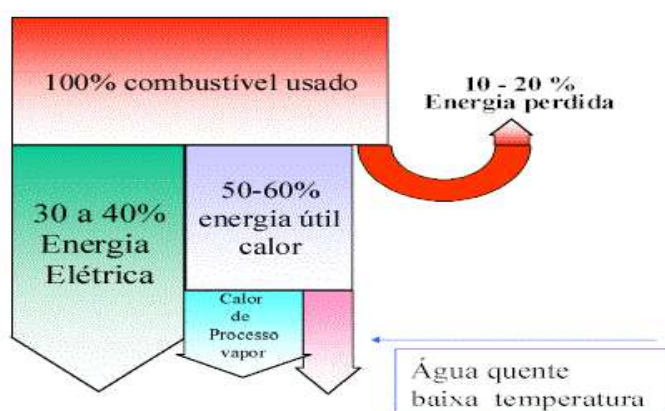


Figura 8: Perdas de eficiência em uma cogeração térmica.

Fonte: http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp

3. COGERAÇÃO

Com um conceito que não é novo, as cogerações já foram responsáveis por cerca de 50% da geração de energia elétrica nos Estados Unidos na década de 40. Nos anos sessenta este sistema sofreu uma queda chegando a cerca de 5% do sistema energético americano. Na década de 80 esse sistema voltou a assumir uma crescente evolução, valorizando a eficiência energética e a melhor distribuição de combustível como o gás natural (Lora & Nascimento, 2004).

Com uma forma de geração combinada em uma termoelétrica é possível aproveitar duas ou mais formas de energia, como, por exemplo, a energia calorífica gerada nas turbinas de geração elétrica, representada a seguir pela figura 9, o que traz uma maior eficiência energética e menor impacto ambiental. Este é o conceito básico de cogeração.

“Sistemas de cogeração são aqueles em que se faz simultaneamente e de forma sequencial a geração de energia elétrica e térmica a partir de um único combustível, tais como gás natural, carvão, biomassa ou derivados de petróleo”. (Reis, Lineu Belico dos, 2011).

Em 14 de Novembro de 2016 a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, publicou a Resolução nº 235/16, que regulamenta as regras para qualificação de uma cogeração, sendo esta aplicada tanto a pessoas jurídicas quanto físicas.

De acordo com esta resolução, para estar enquadrado como qualificada uma cogeração deverá estar devidamente regularizada junto ao órgão regulador de energia e atender as seguintes equações:

$$\frac{Et}{Ef} \geq 15\% ; e$$

$$\frac{Et}{Ef} \div X + \frac{Ee}{Ef} \geq Fc$$

Onde:

Et (kW) - potência cedida pela central térmica;

Ef (kW) - potência de entrada na central térmica;

Ee - potência eletromecânica (kW);

X - fator de ponderação;

FC - fator de cogeração (%).

Uma das tecnologias disponíveis é a geração de energia com reaproveitamento do calor dispensado direto em trocadores de calor, fornecendo o aquecimento de fluidos industriais.



Figura 9: Sistema de geração com turbina a gás combinada.

Fonte: Nogueira et al. (2004)

As cogerações são classificadas considerando seu primeiro processo, a montante, conhecido também como *Topping*, ou a jusante, conhecido como *Bottoming*.

No modelo *Topping*, demonstrado na figura 10, o sistema de geração elétrica trabalha na entrada do combustível, tendo como segunda geração a parte de aproveitamento de gases e energia calorífica que vai para utilização nos processos.



Figura 10: Ciclo a montante (*Topping*)

Fonte: Nogueira et al. (2004)

No processo *Bottoming* (figura 11), inverte-se a ordem do processo de geração com a parte calorífica antes da geração de energia elétrica. Neste processo a geração

elétrica passa a ter sua potência determinada pelo consumo de energia calorífica solicitada pelos processos industriais.



Figura 11: Ciclo a jusante (*Bottoming*)

Fonte: Nogueira et al. (2004)

A escolha de qual modelo utilizar depende da necessidade de carga térmica necessária ao processo e a geração de energia elétrica.

Usualmente as energias caloríficas utilizadas nos processos necessitam de uma temperatura entre 120 °C a 200 °C, utilizadas para cozimentos, secagem, fervuras entre outros. Já o processo de geração de energia requer uma temperatura mais elevada, entre 400 °C a 950 °C (Lara & Nascimento. Geração Termoelétrica Volume II), ilustrada na figura 12.

Por estas características a utilização industrial tem como escolha a de melhor aproveitamento o tipo à montante, onde os gases rejeitados pela turbina já se encontram com temperaturas próximas a utilizada nos processos.

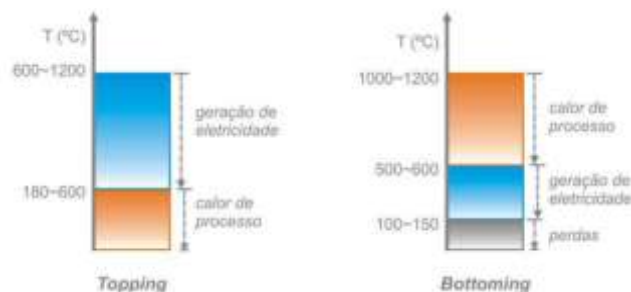


Figura 12: Faixa típica de temperatura para os sistemas de cogeração.

Fonte: *Cogen Europe*, (2001)

As fontes de combustíveis utilizadas como insumo na geração térmica possuem grande variedade, possibilitando uma aplicação ampla para diversos segmentos da indústria como celulose, com reaproveitamento dos rejeitos de madeira do processo, açucareira com o bagaço da cana de açúcar e o gás natural que possui uma grande oferta no mercado.

Esta mesma variedade de combustível pode servir de insumo para as cogerações que possui em sua parte de geração de energia a utilização de métodos com turbinas a gás natural, motores alternativos, turbinas a vapor e células a combustível, tendo ainda algumas novas tecnologias ainda em estudo.

3.1 Geração Elétrica

A geração elétrica é parte do processo de uma cogeração, ocorrendo de forma semelhante a uma geração térmica tradicional, diferenciando-se pelo reaproveitamento dos seus rejeitos. Esta etapa do processo permite uma geração em potência plena permanente ou modulando com controlando da entrada de combustível na parte de queima.

3.1.1 Motores de combustão

As cogerações podem ser utilizadas em diferentes portes e dimensões. Para atender ambientes de pequeno porte como supermercados e hotéis a utilização de motores de combustão são os mais indicados, pois suas dimensões reduzidas proporcionam uma rápida instalação e requerem espaços menores.

Com enorme variedade de insumo combustível, a geração elétrica vinda de motores a combustão origina-se de um gerador acoplado ao eixo. Com a combustão do combustível, este eixo sofre um movimento circular gerando um campo magnético no gerador que faz a função de transferir este campo magnético para geração elétrica. Os gases derivados desta combustão bem como os fluídos de refrigeração do sistema são reaproveitados em sistemas de troca de calor como aquecedores de água.

Segundo Endreos, 2013, o rendimento elétrico encontra-se em torno de 34% e com reaproveitamento de gases em torno de 45%.

“Os motores de combustão interna estão disponíveis numa grande faixa de potência, possuem construção compacta, podem utilizar uma variedade de combustíveis líquidos e gasosos, além de apresentarem uma elevada eficiência. Por essas características, se apresentam como a primeira opção na aplicação em sistemas de cogeração de pequeno porte para prédios comerciais, hospitais, hotéis e supermercados” (MATA, 2001).

O reaproveitamento dos rejeitos deste modelo de cogeração é indicado para recuperação de calor onde existe a necessidade de grande quantidade de calor em uma temperatura relativamente baixas.

3.1.2 Células a combustível

A utilização de células a combustível consiste na geração de energia a partir da reação de oxirredução do hidrogênio ou material rico em hidrogênio e água, sendo assim um processo sem geração de gases poluentes como nos processos tradicionais.

A célula a combustível consiste num dispositivo eletroquímico capaz de converter diretamente a energia do combustível em eletricidade, sem estágios intermediários de combustão ou trabalho mecânico. Esta é uma tecnologia de uso restrito devido ao custo elevado, e ainda em desenvolvimento desde a sua descoberta pelo inglês Sir William Grove, em 1839 (BARJA, 2006).

Os maiores impactos negativos desta tecnologia estão ligados ao custo, aquisição e ao armazenamento da matéria prima, Hidrogênio.

Os modelos indicados para serem utilizados como cogeração são MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) e SOFC (*Solid Oxid Fuel Cell*).

O processo consiste na reação química ocorrida no ânodo que se caracteriza pela oxidação por parte do hidrogênio e na reação que ocorre no cátodo que caracteriza-se pela redução do oxigênio. Sendo assim temos a reação da célula a combustível como $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$.

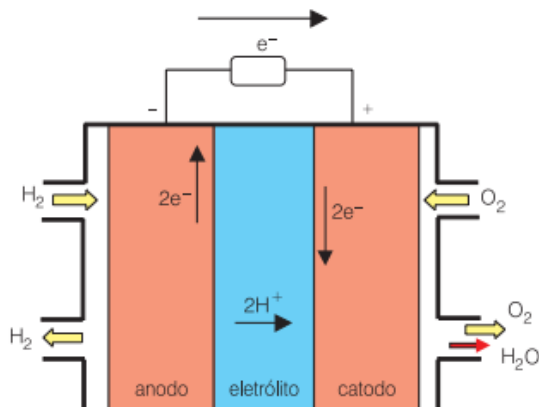


Figura 13: Esquema de uma célula a combustível.

Fonte: <http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4316>.

Após as reações os elétrons são encaminhados pelos cabos da fonte geradora até as estações de trabalho recebendo a energia para execução do trabalho, tendo como exemplo a figura 14.

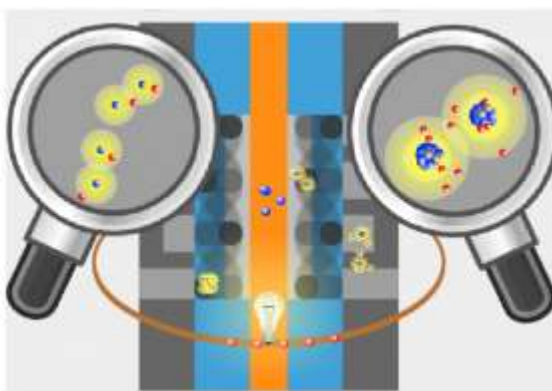


Figura 14: Dispersão de elétrons pela reação química.

Fonte: <http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4316>.

3.1.3 Turbinas a gás

O grande desafio dos projetos com turbinas a gás ao longo da história foi conseguir uma eficiência de geração, isso devido ao equilíbrio das perdas de compressão e as temperaturas suportadas pelas turbinas.

“Em 40 anos, desde o final da II Guerra Mundial, a turbina a gás tem sido desenvolvida com muita rapidez. Os grandes desenvolvimentos foram, basicamente, na aerodinâmica dos compressores e no aumento da temperatura máxima do ciclo,

obtidos graças ao desenvolvimento de materiais resistentes a altas temperaturas associadas a novas tecnologias de resfriamento.” (Lora & Nascimento, 2004).

Grande parte dos processos de geração por meio de turbina são feitos pelo ciclo de Brayton explicitado na figura abaixo (figura 15) que utiliza um processo termodinâmico composto de 4 etapas.

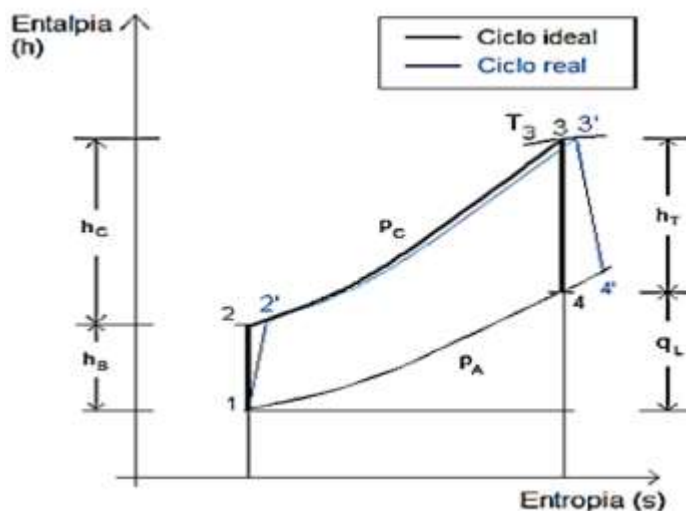


Figura 15: Ciclo Ideal de Brayton x Ciclo Real

Fonte: Potter, 2007

Este processo se inicia com a compressão do ar, elevando a pressão e temperatura. Ao entrar no processo este ar comprimido passa por um filtro com a função de eliminar possíveis partículas e umidade que podem ser fontes contaminadoras ao processo. Este processo no ciclo de Brayton ocorre sem a perda calorífica por contato ou partes vizinhas, o que não ocorre em uma cogeração. Por este motivo esse processo tem uma dispersão na sua curva característica.

Comprimido este fluido entra na câmara de combustão onde é adicionado o gás natural também com pressão elevada ocorrendo a queima. Esta combustão gera um deslocamento em velocidade e temperatura muito elevada, a maior de todo o processo de cogeração, que é direcionado a parte dos estágios da turbina que transforma parte desta energia em energia mecânica na ponta do eixo. Desta energia disponível nos gases vindo da combustão parte fica no compressor, parte utilizada na geração de energia elétrica e outra parte dispensada, que no caso das cogerações é reutilizada para geração de vapor, água quente entre outras variações em processos a quente. Neste processo também ocorre perdas de calor, assim como a parte de expansão dos

gases após a queima, distorcendo a curva quando comparado uma cogeração e o ciclo de Brayton.

A figura 16 mostra um modelo construtivo de uma turbina para geração de energia elétrica.

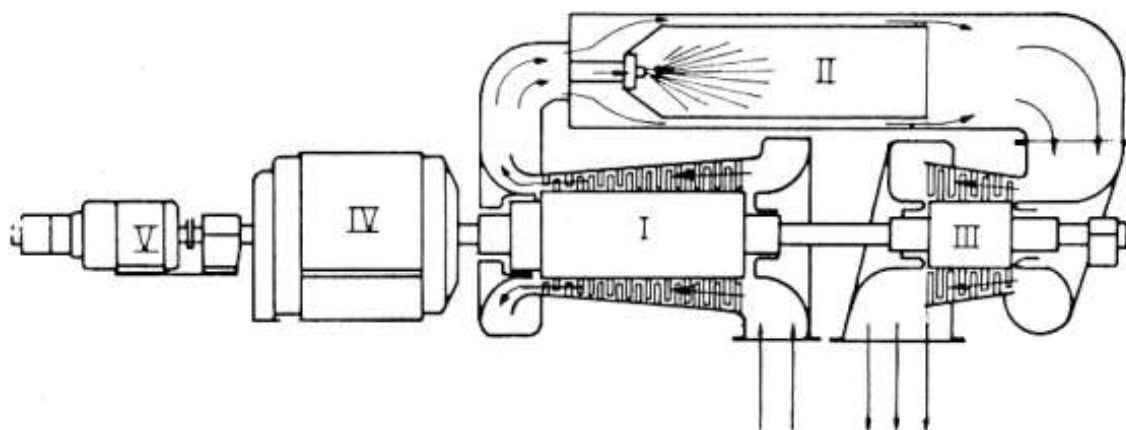


Figura 16: Esquema de uma instalação com turbina a gás em circuito aberto.

Fonte: <http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/capitulo12.pdf> em 25/03/2020.

I - Compressor de ar

Os compressores trabalham no sistema para elevar a pressão do ar comprimido que entra na turbina. Este subconjunto trabalha com eixo da turbina como fornecedor de energia mecânica e são construídos por estágios, sendo cada um destes estágio constituído por um rotor e um difusor. Com este sistema é possível a instalação de resfriadores entre os estágios, permitindo diminuir a temperatura do fluido entre cada estágio o que ajuda no aumentando do rendimento da planta.

O rotor possui um conjunto de paletas que trabalham com a função de acelerar o ar que entra no sistema, aumentando sua velocidade no sistema dando ganho de energia cinética. O difusor por sua vez direciona o ar para o estágio seguinte de forma a direcionar para as paletas seguintes de forma favorável aumentando a pressão e temperatura.

II - Câmara de combustão

A câmara de combustão recebe o ar que vem dos compressores onde 25% deste se mistura ao gás natural gerando a zona de chama. Esta chama não chega a tocar na estrutura da câmara devido a modelagem do fluxo de ar. Os 75% restante do

ar vindo da compressão encontra-se com os gases da queima na saída da câmara de combustão controlando a temperatura de saída, uma vez que o material da turbina não possui resistência material para suportar uma temperatura elevada como a direta dos gases da chama.

As câmaras de combustão podem ser projetadas como tubular, anular ou tubo-anular, sendo utilizada a tubular nas cogerações industriais por serem de grande porte.

A eficiência da Câmara de combustão fica muito atrelada a sua refrigeração, queima de gases e estabilidade contínua da chama. Com estes itens enquadrados a planta consegue obter sua eficiência garantindo uma boa queima com baixa emissão de CO₂.

III - Turbina a gás

A turbina recebe os gases da queima com alta energia de deslocamento em suas palhetes que são dimensionadas para transformar esta energia em energia mecânica do eixo acoplado a estas palhetes. Como as palhetas recebem diretamente os gases vindo da queima na câmara de combustão é importante que a mistura da saída da queima esteja bem ajustada para manter uma temperatura suportável pelas palhetas.

O trabalho mecânico desenvolvido é transmitido para um gerador elétrico por meio de um eixo acoplado a turbina de potência. Os gases gerados neste trabalho são direcionados por meio de dutos de exaustão para serem reutilizados em sistemas de recuperação de calor por meio de trocadores de calor.

IV - Gerador

O alternador é o componente deste ciclo com a função de converter a potência mecânica do eixo em energia elétrica. O princípio de funcionamento está na indução da força eletromotriz, de forma similar a um motor de indução, porém de forma inversa, como demonstrada na figura 17.

Cabos conectados as extremidades dos polos conduzem a energia gerada para reguladores de tensão e a parte de proteção, uma vez que esta energia não pode ser transmitida para fora da planta geradora com frequências e tensões diferentes da rede e/ou equipamentos alimentados.

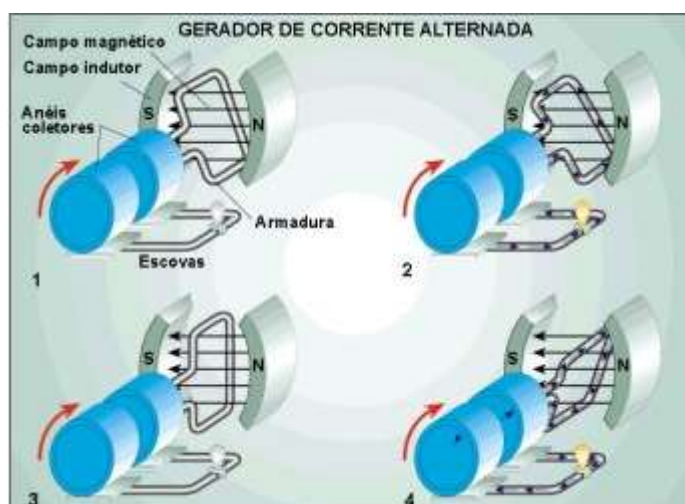


Figura 17 – Gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F40A0E2ABD99123CF0325740C00496689>

Motor de arranque e excitatriz

O motor de arranque tem a função de partida da planta geradora, uma vez que a planta é iniciada, o próprio sistema se mantém em funcionamento por meio de um eixo interligando a turbina ao compressor.

3.2 Geração térmica

Nas indústrias a maioria das gerações térmicas são de caldeiras, sendo estas cercadas por normas regulamentadoras que garantem sua segurança de operação. A principal normal a ser atendida é a NR13 que fala sobre os requisitos de segurança em vasos de pressão.

Em se tratando das cogerações e visando a sua qualificação, a eficiência de geração é de extrema importância, bem como o bom aproveitamento de seus rejeitos.

As caldeiras podem ser de dois modelos, flamotubulares e aquatubular. O que diferencia estes dois modelos são a forma de aquecimento da água, sendo que na flamotubular a os gases quentes oriundos da combustão passam pelo interior de tubos que cortam o interior de um reservatório de água aquecendo e transformando esta água em vapor por troca térmica. As aquatubulares passam a água pelo interior de um conjunto de tubos, como se fosse um trocador de calor, trocando calor com os gases oriundos da combustão.

Em se tratando de custo as flamotubulares possui um valor de construção inferior ao das aquatubulares, porém de eficiência mais elevada.

De acordo com o V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, ocorrido em 29 de maio de 2017, não há uma metodologia normatizada para medição de eficiência de caldeira. Costuma-se utilizar normas de outros países, geralmente dos Estados Unidos (ASME, 1998) ou da Alemanha (DIN, 1994).

Usando os conceitos termodinâmicos a eficiência fica ligada na fração do poder calorífico que entrada, combustível, pelo calor de saída do sistema. Em outras palavras podemos dizer que a eficiência (n) é igual ao Calor útil ($Q_{\text{útil}}$) dividido pelo Calor total (Q_{total}) multiplicado por 100.

$$n = \left(\frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{total}}} \right) * 100$$

Para saber qual o calor total (Q_{total}) disponível pelo combustível também temos a equação seguindo os conceitos termodinâmicos multiplicamos a quantidade de combustível utilizado (M_{comb}) pelo poder calorífica deste combustível (PCI).

$$Q_{\text{total}} = M_{\text{comb}} * PCI$$

O calor útil ($Q_{\text{útil}}$) pode ser calculado pela multiplicação do calor disponível pela caldeira (D) pela subtração entre as entalpias do vapor gerado (H_{vapor}) e da água de entrada (H_{agua}).

$$Q_{\text{útil}} = D * (H_{\text{vapor}} - H_{\text{agua}})$$

3.3 Beneficiamento e aproveitamento de gases

Durante a combustão de geração é emitido alguns gases dependendo do tipo de combustível utilizados, sendo o mais encontrado o gás carbônico (CO_2).

Com alguns processos químicos este gás despreendido na combustão pode ser aproveitado e beneficiado para retorne como insumo aos processos ou venda externa, garantindo uma eficiência energética ainda maior.

3.3.1 Tecnologias disponíveis de captura

Para obtenção deste gás existem 3 tecnologia, pré-combustão, oxi-combustão e pós-combustão

3.3.1.1 Pré-oxidação

Tecnologia utilizada nos combustíveis sólidos e líquidos com um processo de gasificação destas fontes de combustão e em seguida é feita a retirada do CO₂, deixando uma mistura rica em hidrogênio para combustão e conversão energia pela turbina a gás.

O CO₂ gerado na combustão é evitado por meio de um processo a base de água que converte este CO₂ em dióxido de carbono e mais hidrogênio.

A vantagem da pré-oxidação em relação a pós-oxidação está nas dimensões do ambiente necessário para instalação do sistema e no consumo interno de energia pela planta.

3.3.1.2 Oxi-combustão

Esta tecnologia baseia-se na combustão utilizando o oxigênio no lugar do ar, formando o dióxido de carbono para o beneficiamento, que por sua vez se torna mais simples, sendo necessária apenas a condensação da água para separação do gás.

O cuidado necessário para esta tecnologia está na alta temperatura dispensada pela combustão. Atualmente é tratada com uma refrigeração dos gases de combustão antes do contato com as partes da turbina.

Uma grande desvantagem esta no custo desta tecnologia que consome grande quantidade de oxigênio. “Apenas para comparação, uma planta IGCC de 640 MW com captura necessitaria de aproximadamente 200 t/h de oxigênio, enquanto que uma

planta oxi-combustível em ciclo subcrítico requereria um valor próximo de 500 t/h”,
Rochedo, 2011.

3.3.1.3 Pós-combustão

Tecnologia muito utilizada para implantação em plantas cogeneradoras já em operação por ser uma função agregada pós processo de combustão e geração.

Neste processo o CO₂ é capturado em meio a diversos gases dispensados na combustão, tendo em sua maioria o nitrogênio. Devido a esta característica o beneficiamento trabalha com uma grande quantidade de gases de entrada, necessitando de uma quantidade maior de equipamentos de purificação, bem como um custo mais elevados em relação as tecnologias anteriores.

Atualmente estão disponíveis vários modelos desta tecnologia para realizar a separação do CO₂ dos demais gases, sendo estas baseadas em processos físico-químicos tendo como principal impacto negativo o consumo de energia elétrica adicionada a uma planta cogeneradora. Ao adicionar uma recuperação de CO₂ a uma cogeração são adicionados compressores para armazenagem e um sistema de troca de calor junto a uma planta purificadora.

Um sistema bem conhecido e utilizado nas plantas purificadoras é a combinação de um reagente com capacidade de se agrupar e retirar o CO₂ dos demais gases.

São características necessárias para este reagente ser de alta capacidade de absorção, baixa volatilidade, corrosividade e viscosidade, com boa estabilidade química. Economicamente este reagente deve ser de custo baixo e consumo baixo de energia necessária para regeneração (Castelo Branco, 2012).

Com estas características é possível ter um reagente com alta performance de purificação com maior quantidade de CO₂ absorvido, com boa velocidade de absorção e transferência de calor, conservando a vida útil dos equipamentos evitando gastos com materiais secundários para evitar a corrosão, como no exemplo da figura 18.

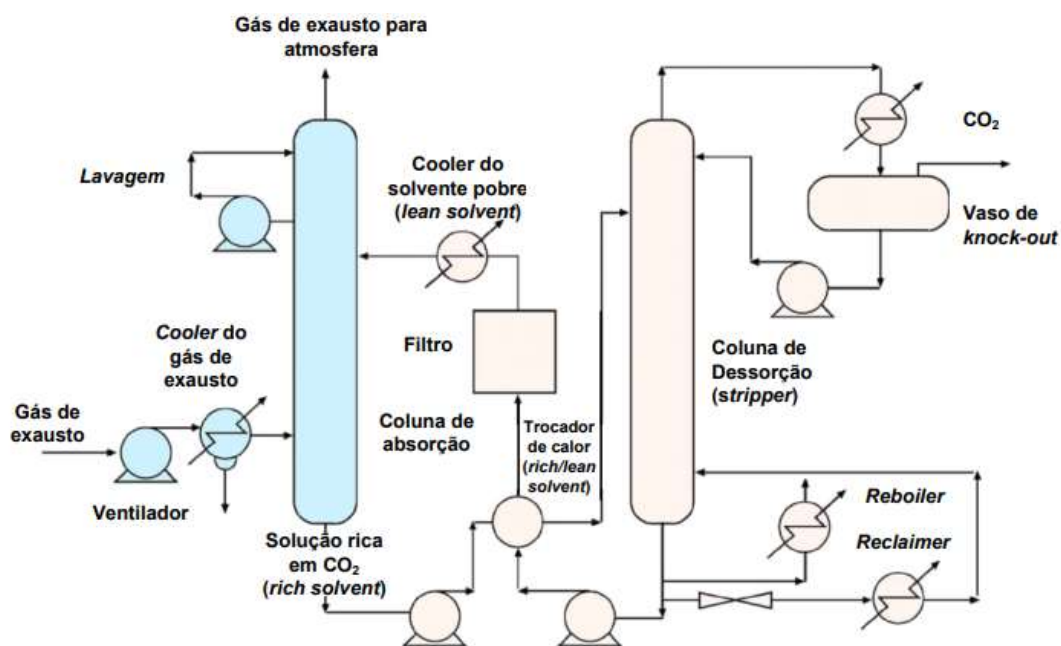


Figura 18 – Exemplo de planta de recuperação de CO₂.

Fonte – Castelo Branco, 2012

A figura 16 acima planificada mostra o fluxo de ocorrência do sistema, onde os gases entram pela parte inferior e o fluido reagente entra pela parte superior ocorrendo a absorção do CO₂ com o reagente formando uma solução rica em CO₂, carbonato, que é retirado da torre de exaustão. Os demais gases seguem e são direcionados para atmosfera pela parte superior da torre de absorção.

A solução rica em CO₂ é aquecida no *reboiler* ocorre a quebra do carbonato, dispensando grande quantidade de CO₂. O reagente é resfriado e direcionado para iniciar um novo ciclo de recuperação de CO₂ na coluna de exaustão, já o CO₂ é direcionado para um secador e posteriormente comprimido e armazenado em estado líquido.

Uma instalação de remoção de CO₂ opera geralmente em condições que apresentam uma taxa de remoção de 90%. Quando é exigida uma taxa menor de captura, a boa prática não é a diminuição da eficiência do equipamento de remoção, mas a instalação de um *bypass*, ou seja, a separação da corrente em duas partes, uma que passará pela unidade de remoção de CO₂ e outra que seguirá para a chaminé (Castelo Branco, 2012).

4. ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso objetiva confirmar a eficiência de planta cogeneradora, tratada na norma regulamentadora da ANEEL 235/14 de cogeração qualificada e verificar a viabilidade de inclusão de uma planta de beneficiamento de CO₂.

A planta cogeneradora está situada na região sul fluminense do estado do Rio de Janeiro, com capacidade máxima de geração de 5 MWh de produção elétrica e 12,5 ton/h de vapor. Iniciou sua operação no ano de 2018 tendo como insumo gás natural encanado fornecido pela empresa Nome completo - CEG, mesmo fornecedor de gás natural utilizado para geração de vapor.

Foi utilizado no estudo os dados da turbina de modelo TYPHOON - SGT-100 (5,25 MW ISO) - RM 394, onde a geração de energia elétrica vem como processo primário da cogeração e mandante da capacidade de operação, bem como o seu tempo de operação. A cogeração modula sua capacidade de acordo com o cenário econômico da energia e gás natural no mercado.



Figura 19 – Geração de energia – período 1.

Fonte – Empresa em estudo, 2020.

O ano de 2020 vem demonstrando que a relação gás natural versus preço da energia no mercado livre não compensa a operação da planta a partir do mês de março (figura 20). O valor de energia adquirido no mercado livre não será objeto de estudo e também não será compartilhado neste trabalho por se tratar de uma informação confidencial da empresa.

A planta trabalha no sistema *offgrid* com capacidade de suprir as necessidades básicas da unidade fabril sendo esta dependente da concessionária realizar o

funcionamento da planta como um todo, pois trabalha com energia externa para partida e parada de vários equipamentos.



Figura 20 – Geração de energia – período 2

Fonte – Empresa em estudo, 2020.

A segunda etapa conta com uma caldeira flamotubular que utiliza a energia térmica vindo da descarga da turbina. O vapor gerado nesta segunda etapa é destinado aos processos juntando-se ao vapor gerado pela área de utilidades.

No ano de 2020 foi gerado 8.100,1 toneladas de vapor. A geração térmica não tem capacidade de suprir as necessidades da planta, sendo assim a energia térmica é unida a parte gerada pelo setor de utilidades em um cavalete de vapor e utilizado no restante da planta, conforme figura 21.



Figura 21 – Geração de vapor.

Fonte – Empresa em estudo, 2020.

O gás natural é recebido em um barrilete onde é dividido o gás natural entre a área de utilidades e a planta cogeneradora. O gás é direcionado aos compressores que

comprime este gás e é dirigido a turbina para a sequência de geração, conforme figura 22 a seguir:



Figura 22 – Consumo de gás.

Fonte – Empresa em estudo, 2020.

4.1 Eficiência de geração elétrica

Conforme memória de cálculo apresentado pela empresa em estudo, a geração de energia elétrica possui uma eficiência média de 27% e é objeto de acompanhamento diário pela área responsável pela cogeração e semanalmente pelo corpo gerencial com toda área de Utilidade e Engenharia. Caso seja verificada uma divergência entre o valor médio conhecido e o valor apresentado na reunião semanal, é realizado um estudo de caso para sanar a ineficiência, caso seja um problema que não tenha sido resolvido pela equipe técnica da cogeração.

No mês de janeiro de 2020 a média de produção foi de 75,17KWh consumindo em média 27.543,86nm³.

Conforme Lora & Nascimento, 2004, o cálculo de eficiência de uma turbina a gás é calculado seguindo a estrutura:

$$N_{cs} = \frac{W_{cs}}{QF}$$

Onde:

N_{cs} é a eficiência da turbina a gás em percentual;

W_{cs} potência gerada pela turbina em MW;

QF Energia fornecida a turbina em MW.

Ainda segundo Lora & Nascimento temos que:

$$QF = Mc * PCI$$

Onde:

Mc é a vazão mássica do combustível Kg;

PCI é o poder calorífico inferior do combustível em MJ/Kg.

De acordo com a empresa comgas o poder calorífico inferior do gás natural industrial é de 8.600kcal/nm³ e com a média de consumo em janeiro de 27.543,86nm³:

$$QF = QV * PCI$$

$$QF = 21.098,6 \text{ nm}^3 * 8.600 \text{ Kcal/nm}^3$$

$$QF = 236.877.196 \text{ Kcal}$$

Para executar a relação de potência gerada na turbina pela potência fornecida é necessário ainda colocar os dois valores em mesma grandeza, com isso transforma-se Kcal em W/h usando o fator de multiplicação de 1,16.

$$QF = 236.877.196 \text{ Kcal} * 1,16$$

$$QF = 274.777.547,4 \text{ W/h}$$

Logo:

$$NCI = \frac{75.170.000 \text{ W/h}}{274.777.547,4 \text{ W/h}} * 100$$

$$NCI = 27,36\%$$

Fundamentado pela revisão bibliográfica apresentada pode ser constatado que a eficiência de geração elétrica da planta em janeiro do ano de 2020 apresenta uma performance de eficiência de 27,36%.

4.2 – Eficiência de Geração térmica

Para fins de análise tomou-se janeiro do ano de 2020, com resultados de 218,99 toneladas de vapor por dia com consumo de 27.543,86nm³ de gás natural. A planta acompanha os valores de eficiência de geração térmica com resultado de 58,19% de eficiência.

Seguindo a linha de Lora & Nascimento, 2004, temos:

$$NCI = \frac{WCI}{Q_{transf}}$$

Sendo:

NCI – Eficiência de geração térmica;

WCI – Potência gerada pelo ciclo;

Q_{transf} – energia fornecida a geração Térmica.

A planta atualmente não possui um valor de perda da energia de escape, o que leva a considerar que *Q_{transf}* é a quantidade de energia dispensada pela turbina sem perdas de transferência.

Da entrada inicial ao sistema de 236.877.196Kcal foram transformados 64.801.724 Kcal em energia elétrica, transferindo a parte geradora de vapor 172.075.471,9Kcal que gerou 218,99 toneladas de vapor saturado a uma pressão de envio de 8 bar.

Considerando que cada tonelada de vapor a pressão de 8 bar consome 661.000kcal, foram convertidas 144.752.390 calorias para as 218,99 toneladas de vapor.

$$NCI = \frac{WCI}{Q_{transf}}$$

$$NCI = \frac{144.752.390}{172.075.471,9} * 100$$

$$NCI = 84,12\%$$

Seguindo as recomendações e revisões bibliográficas temos uma geração de vapor no mês de janeiro de 2020 com 84,12% de eficiência.

4.3 Eficiência global da planta

Para o cálculo de eficiência total da planta segue-se o mesmo conceito de eficiência, razão entre a energia calorífica transformada pela energia calorífica fornecida a planta.

A planta recebeu um total de 236.877.196 kcal vindo do gás natural, sendo gerados 75,17 MW de energia elétrica e 218,99 toneladas de vapor, correspondendo a transformação de 64.801.724 e 144.752.390 respectivamente a cada etapa de geração.

A eficiência total da planta é obtida, segundo Lora & Nascimento, pela equação:

$$Nt = \frac{WCS + WCI}{QF}$$

Onde:

Nt – Eficiência total da planta;

WCS – Potência elétrica gerada;

WCI – Potência térmica gerada.

Trabalhando estes valores na grandeza de kcal temos:

$$Nt = \frac{64.801.724,14 + 144.752.390}{236.877.196}$$

$$Nt = 88,47\%$$

4.4 Análise para implantação de recuperação de gases de exaustão

A empresa possui um projeto de extração de CO₂ a ser instalado na parte de geração de vapor com caldeiras tradicionais, conforme figura 23. Com isso será considerado o mesmo sistema que trabalha na pós combustão com absorção química utilizando o produto químico MEA para a absorção do CO₂.

Amostragem número:	1	Data da amostragem:	03/10/2019
		Hora da amostragem:	12:20
PARÂMETRO	SIMB.	UNIDADE	VALOR
diâmetro da chaminé	Dc	m ²	1,20
área da chaminé	Ac	m ²	1,1310
alimentação ou produção	A	t / h	1,12
vazão de gases	Qnbs	Nm ³ / h	42.964
concentração de NO_x (CNTP)	CNO_x	mg / Nm³	21
emissão de NO _x	ENO _x	kg / t	0,788
taxa de emissão de NO _x	TeNO _x	kg / h	0,881
concentração de NO (CNTP)	CNO	mg / Nm ³	12
concentração de CO ₂	CO ₂	%	2,0
concentração de O ₂	O ₂	%	18,1
concentração de CO	CO	ppm	1
emissão de CO	ECO	kg / t	0
taxa de emissão de CO	TeCO	kg / h	0,054

Figura 23 – Análise de emissão de gases.

Fonte – Empresa em estudo, 2020.

Considerando a vazão mensurada de exaustão de 42.964 nm³/h e o percentual de 2% de CO₂ o valor disponível para captura pela planta de extração é de 859,28 nm³/h de CO₂. Como o fornecedor da planta indica em seu projeto a garantia de extração de 90% a vazão de beneficiamento seria de 773,35nm³/h.

A empresa utiliza a medição de CO₂ tanto produzida quanto consumida em Toneladas por hora (ton/h). Fazendo a conversão de unidade temos um CO₂ com densidade de aproximadamente 1,52. convertendo a vazão a planta em estudo teria capacidade de produção de 1,18 ton/h.

Considerando o consumo de uma planta de extração e a quantidade baixa de CO₂ dispensado pela planta, chega-se à conclusão que esta planta não possibilita a inclusão do beneficiamento do CO₂ dispensado à atmosfera.

4.5 Aderência aos termos de cogeração qualificada

Para cálculo de eficiência global a planta utiliza o método da soma das duas eficiências, sendo assim apresentando uma Eficiência global de 85%.

Com os cálculos utilizando os conceitos da revisão bibliográfica constata-se uma divergência positiva de 3,9% em relação ao cálculo atual. Nos cálculos apresentados utilizando esta revisão bibliográfica a eficiência global é de 88,47%.

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

$$\frac{144.752.390}{236.877.196} \geq 15\%$$

$$\frac{Et}{Ef} \div X + \frac{Ee}{Ef} \geq Fc$$

$$61,1\% \div 2,14 + \frac{64.801.724,14}{236.877.196} \geq 41\%$$

Ambos os cálculos colocam a planta dentro dos parâmetros de cogeração qualificada, atingindo eficiências acima dos valores mencionados na revisão bibliográfica, atendendo as exigências da Resolução Normativa ANEEL 235/16, de 14 de novembro de 2016.

5. CONCLUSÃO

A demanda de energia elétrica na malha brasileira é crescente a cada ano, com isso cada vez mais empresas buscam por soluções de geração diferentes da grande malha hidráulica existente.

Inverso ao crescimento da demanda, a reduzir de emissão de CO₂ no cenário atual incentiva empresas e indústrias a adotarem estratégias que modifiquem essa realidade, na medida em que possam ainda trazer benefícios financeiros através das mesmas. Hoje, países como a Holanda e a Finlândia, por exemplo, já utilizam a cogeração, segundo pesquisas apresentadas, em mais de 40% da totalidade do ramo.

Além do incentivo ambiental a Resolução Normativa ANEEL 235/16, de 14 de novembro de 2016 cria grande atrativo com incentivo para que as cogerações sejam cada vez mais eficiente em seus processos, com maior aproveitamento das matérias primas e cada vez menos poluentes.

Utilizando a revisão bibliográfica acima mencionada aplicada a uma planta cogeneradora constata-se que o valor de eficiência de caldeira acompanhado pelos gestores apresenta um memorial incoerente comprovado o valor real apresentado pelo estudo realizado.

A planta cogeneradora estudada apresenta os dois critérios de cogeração qualificada satisfatória para enquadrar-se como cogeneradora qualificada em acordo com Resolução Normativa ANEEL 235/16.

O estudo de viabilidade de implantação de uma planta de extração de CO₂ dos gases dispensados não se torna viável pelo modelo desta planta, pois devido ao ar comprimido utilizado na refrigeração e geração de energia na turbina os gases apresentam baixa concentração de CO₂.

Fica como proposta para trabalhos futuros a aplicação desta revisão bibliográfica em uma planta que apresente emissão de CO₂ considerável sendo viável a aplicação de uma planta de extração quantificando o quanto este processo de extração de gases pode agregar na soma de eficiência de uma cogeração, inclusive passando de não aderente para aderente à Resolução Normativa ANEEL 235/16, de 14 de novembro de 2016.

Como oportunidade para desenvolvimentos futuros poderiam ser abordados temas da parte de interligação do sistema de geração ao sistema de distribuição das Subestações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa nº 235**. Brasília, 2006. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/> Acesso em 10 de janeiro de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa nº 414**. Brasília, 2010. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/> Acesso em 10 de janeiro de 2020.

BALESTIERI, J. A. P. **Geração de Energia Sustentável**. Editora UNESP.

CASTELO BRANCO, D. **Avaliação do real potencial de redução das emissões de CO2 equivalente com uso da captura em uma UTE a carvão**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

ELECTROCELL **Células combustíveis**. Disponível em:
<https://www.electrocell.com/> Acessado em 29 de março de 2020.

<http://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/manual.pdf> Acessado em 07 de setembro de 2020.

http://ctborracha.com/wp-content/uploads/2012/07/Tabela-de-vapor-saturado-seco_site-ctborracha-MC.pdf Acessado em 07 de setembro de 2020.

https://www.comgas.com.br/wp-content/uploads/2017/05/RIP-2014_2-Generalidades-versao-marco-2014.pdf Acessado em 15 de agosto de 2020.

INEE. **O que é cogeração** Disponível em:
<http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp>. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2020.

INFOESCOLA. **Célula combustível** <https://www.infoescola.com/eletroquimica/celula-de-combustivel/> Acessado em 29 de março de 2020

LORA & NASCIMENTO. **Geração Termoelétrica**. Editora Interciência. Volume I.

Geração Termoelétrica. Editora Interciência. Volume II.

MENESES, E. L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas**. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Uezo, Rio de Janeiro, 2011.

PORTAL SOLAR. **Energia heliotérmica**. Disponível em:

<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-heliotermica-entenda-como-funciona.html>. Acessado em: 01 de março de 2020.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. Manole. 2^o edição.

ROCHEDO, P. R. R. **Análise Econômica sob Incerteza da Captura de Carbono em Termoelétricas a Carvão: Retrofitting e Capture-ready**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA TERMELÉTRICA GAS NATURAL, BIOMASSA, CARVÃO, NUCLEAR**. epe.

8. ANEXOS

<i>Tipo (*)</i>	<i>Eletrólito</i>	<i>Faixa de temp. (°C)</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>	<i>Aplicações</i>
PEMFC	Polímero (H ₃ O ⁺)	20-120	Alta densidade de potência, operação flexível, mobilidade	Custo da membrana e catalisador, contaminação do catalisador com CO	Veículos automotores, espaçonaves, unidades estacionárias
PAFC	H ₃ PO ₃ (H ₃ O ⁺)	160-220	Maior desenvolvimento tecnológico, tolerância a CO	Controle da porosidade do eletrodo, eficiência limitada pela corrosão	Unidades estacionárias, geração de calor
MCFC	Carbonatos fundidos (CO ₃ ²⁻)	550-660	Tolerância a CO/CO ₂ , eletrodos à base de Ni	Corrosão do cátodo, interface trifásica de difícil controle	Unidades estacionárias, cogeração de eletricidade / calor
SOFC	ZrO ₂ (zircônia) (O ₂ ⁻)	850-1000	Alta eficiência (cinética favorável), a reforma do combustível pode ser feita na célula	Problemas de materiais, expansão térmica	Unidades estacionárias, cogeração de eletricidade/calor

Tabela 1 – Faixa de temperatura por tipo de eletrólito

Fonte: <https://www.infoescola.com/eletroquimica/celula-de-combustivel/> em 24/05/2020.

Report Diário Gerencial			Turbina 1 - Energia Elétrica						Lista de Eventos	
Dia	Meta de Produção (MWh)	Produção Total (MWh)	Cumprimento Meta de Produção	Horimetro Final	Perda (MWh)	Horas de Produção	Horas Não Produtivas	Eficiência Elétrica	Energia Elétrica (kWh)	Gás Natural (nm³)
1-jan	96,00	0,00	0%	3090,59	96	0,00			188,1300	0,00
2-jan	96,00	0,00	0%	3090,59	96	0,00	24,00		203,8700	0,00
3-jan	96,00	2,41	3%	3090,59	93,59	2,47	21,53	8,2%	1274,2500	2990,07
4-jan	96,00	3,09	3%	3090,59	92,91	2,45	21,55	25,1%	921,7500	1253,92
5-jan	96,00	63,50	66%	22,476	32,5	18,30	5,70	27,6%	2947,8800	23414,78
6-jan	96,00	84,94	88%	46,81	11,07	24,00	0,00	28,0%	3939,1200	30803,56
7-jan	96,00	86,69	90%	71	9,308	24,00	0,00	27,8%	3915,5000	31713,34
8-jan	96,00	86,51	90%	95	9,493	24,00	0,00	27,2%	3965,2500	32347,92
9-jan	96,00	86,04	90%	119	9,957	24,00	0,00	27,7%	3945,7500	31608,18
10-jan	96,00	84,80	88%	143	11,2	24,00	0,00	27,5%	4024,5000	31389,54
11-jan	96,00	85,30	89%	167	10,7	24,00	0,00	28,0%	3963,7500	30995,46
12-jan	96,00	86,06	90%	191	9,936	24,00	0,00	27,4%	3928,7500	31967,31
13-jan	96,00	89,78	94%	215	6,224	24,00	0,00	28,2%	3953,7500	32353,69
14-jan	96,00	90,12	94%	238,602	5,88	24,00	0,00	28,3%	3966,0000	32381,88
15-jan	96,00	77,65	81%	259,77	18,35	21,30	2,70	27,8%	3584,7500	28399,12
16-jan	96,00	85,87	89%	283,77	10,14	24,00	0,00	28,0%	3902,0000	31219,00
17-jan	96,00	89,91	94%	308,026	6,09	24,00	0,00	28,0%	3959,0000	32668,83
18-jan	96,00	93,03	97%	331,784	2,969	24,00	0,00	28,1%	4001,5000	33659,09
19-jan	96,00	91,23	95%	355,784	4,775	24,00	0,00	28,0%	3967,2500	33095,08
20-jan	96,00	89,54	93%	379,784	6,463	24,00	0,00	28,0%	3938,5000	32559,00
21-jan	96,00	87,85	92%	403,345	8,147	24,00	0,00	27,8%	3901,7500	32084,05
22-jan	96,00	88,14	92%	427,775	7,864	24,00	0,00	27,6%	3879,5000	32462,72
23-jan	96,00	81,41	85%	449,65	14,59	21,62	2,38	28,0%	3855,0000	29552,23
24-jan	96,00	89,37	93%	473,65	6,627	24,00	0,00	28,6%	3939,5000	31717,00
25-jan	96,00	89,42	93%	497,65	6,579	24,00	0,00	27,8%	3924,2500	32669,00

Tabela 2 – Eficiência geração elétrica
 Fonte: Empresa do estudo de caso, 2020.

Caldeira 1 - Energia Térmica Calor								Lista de Eventos	
Dia	Meta de Produção (ton)	Produção Total (ton)	Cumprimento Ordem de Produção	Perda (ton)	Horas de Produção	Horas Não Produtivas	Eficiência Térmica	Água Industrial (m³)	Gás Natural (nm³)
1-jan	250,00	0,00	0%	250	0,00	24,00			0,00
2-jan	250,00	0,00	0%	250	0,00	24,00			0,00
3-jan	250,00	0,00	0%	250	0,00	24,00	0,0%		2990,07
4-jan	250,00	0,00	0%	250	0,00	24,00	0,0%		1253,92
5-jan	250,00	123,00	49%	127	12,00	12,00	41,2%		23414,78
6-jan	250,00	248,93	100%	1,075	24,00	0,00	63,4%		30803,56
7-jan	250,00	262,04	105%	0	23,92	0,08	64,9%		31713,34
8-jan	250,00	255,13	102%	0	23,17	0,83	61,9%		32347,92
9-jan	250,00	258,19	103%	0	23,75	0,25	64,1%		31608,18
10-jan	250,00	251,74	101%	0	23,75	0,25	62,9%		31389,54
11-jan	250,00	260,32	104%	0	23,67	0,33	65,9%		30995,46
12-jan	250,00	255,64	102%	0	23,83	0,17	62,8%		31967,31
13-jan	250,00	264,96	106%	0	23,75	0,25	64,3%		32353,69
14-jan	250,00	261,82	105%	0	23,92	0,08	63,5%		32381,88
15-jan	250,00	230,27	92%	19,728	21,22	2,78	63,6%		28399,12
16-jan	250,00	261,98	105%	0	23,83	0,17	65,9%		31219,00
17-jan	250,00	262,68	105%	0	23,75	0,25	63,1%		32668,83
18-jan	250,00	266,47	107%	0	23,75	0,25	62,1%		33659,09
19-jan	250,00	266,06	106%	0	23,75	0,25	63,1%		33095,08
20-jan	250,00	258,79	104%	0	23,75	0,25	62,4%		32559,00
21-jan	250,00	251,92	101%	0	23,75	0,25	61,6%		32084,05
22-jan	250,00	261,94	105%	0	23,75	0,25	63,3%		32462,72
23-jan	250,00	221,75	89%	28,246	21,33	2,67	58,9%		29552,23
24-jan	250,00	256,84	103%	0	23,75	0,25	63,6%		31717,00
25-jan	250,00	258,31	103%	0	23,75	0,25	62,1%		32669,00

Tabela 3 – Eficiência geração térmica

Fonte: Empresa do estudo de caso, 2020.

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Tabela 4 – Constantes de Cálculo atendimento RN 235/2016

Fonte: RESOLUÇÃO NORMATIVA No 235, DE 14 DE NOVEMBRO DE 2006.