



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO EDUARDO SENA DE FRANÇA

**UTILIZAÇÃO DE TURBINAS A GÁS PARA GERAÇÃO ELÉTRICA E PRODUÇÃO
DE VAPOR.**

CARAÚBAS-RN

2016

ANTONIO EDUARDO SENA DE FRANÇA

**UTILIZAÇÃO DE TURBINAS A GÁS PARA GERAÇÃO ELÉTRICA E PRODUÇÃO
DE VAPOR.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Rafael Luz Espindola –
UFERSA

CARAÚBAS-RN

2016

© Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Setorial Campus Caraúbas (BSCA)
Setor de Informação e Referência

S474u Sena de França, Antonio Eduardo .
 UTILIZAÇÃO DE TURBINAS A GÁS PARA GERAÇÃO
 ELÉTRICA E PRODUÇÃO DE VAPOR. / Antonio Eduardo
 Sena de França. - 2016.
 67 f. : il.

 Orientador: Rafael Luz Espindola.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica,
 2016.

 1. Turbina a gás. 2. Cogeração. 3. Vapor. 4.
 Compressor. 5. Caldeira. I. Espindola, Rafael Luz,
 orient. II. Título.

Bibliotecário: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB-15/700

ANTONIO EDUARDO SENA DE FRANÇA

**UTILIZAÇÃO DE TURBINAS A GÁS PARA GERAÇÃO ELÉTRICA E PRODUÇÃO
DE VAPOR.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 25 / 05 / 2016

BANCA EXAMINADORA


Prof. MSc. Rafael Luz Espindola
Orientador


Prof. MSc. Rudson de Souza Lima
Membro Examinador


Prof.^a MSc. Camila Pacelly Brandão de Araújo
Membro Examinador

DEDICO aos meus pais Antônio Fernando de França e Maria Auxiliadora Sena de França, meus irmãos Andrew Sena de França e Ívina Sena de França, minha família, amigos, meus professores, supervisores, e a todos que fizeram parte desta jornada.

Vocês são o motivo de eu estar aqui.
Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, ele é a razão de todas as coisas. Possibilitou-me conquistar esse objetivo, me dando força e não me permitindo desistir diante das adversidades que surgiram ao longo desta trajetória. Esteve sempre ao meu lado, e sei que muitas vezes me carregou quando eu não tinha mais forças pra continuar.

Agradeço aos meus pais, pelo amor e dedicação, pela educação a mim ofertada no respeito, por todo o esforço e compromisso deles para que eu chegasse a esse momento, bem sabemos que não foi fácil, e só nós sabemos dos sacrifícios que tivemos que fazer para que eu atingisse esse sonho. Por estarem sempre comigo, mesmo que distantes, meu muito obrigado! Os amo mais do que a mim mesmo!

A todos os meus familiares que me valorizaram pela escolha que fiz. A meu irmão Andrew, ao qual aprecio imensamente quando iniciamos uma discussão sobre uma teoria que por vezes foge da realidade, expandindo nossa criatividade. A minha irmã Ívina, que mesmo sendo a caçula da família, possui um temperamento incrivelmente forte, com o qual sempre tento aprender algo e trazer pra minha vida. A minha namorada Tainara, por compreender, aceitar e suportar todos esses anos que estive longe, onde na maioria das vezes só podíamos nos ver nos fins de semana, que apesar de passarem super rápidos, sempre me fortaleciam para mais uma semana de luta. A minha tia Cláudia, que é uma segunda mãe em minha vida, a qual devo os cuidados que teve comigo durante toda minha vida, onde mesmo depois de adulto, sempre me deu a mesma atenção que me dava quando criança. A minha tia Ana Maria, pelos almoços nos fins de semana, que mesmo não notando, aproximou significativamente toda nossa família. A minha tia Filomena, pelas incontáveis vezes que orou por mim, pedindo a Deus que me abençoa-se, e assim ele o fez.

A todos os amigos que fiz durante essa dura jornada, aos que se fazem sempre presente, e aos que por qualquer motivo estão distantes. A João Marcelo, companheiro de morada por muitos anos, ao considero como um irmão. A todos os outros que passaram pela mesma morada, David, Tiago, Michell, Rominho, Ricardo. As experiências compartilhadas nunca serão esquecidas.

A todos os amigos que fiz durante o tempo que passei em Caraúbas, os quais nunca esquecerei. Em especial a Luiz Eduardo e Willian, irmãos que me acolheram em sua casa sem ao menos me conhecerem.

A todos os Engenheiros da Usina Termoelétrica Jesus Soares Pereira, por dividirem comigo seu conhecimento, possibilitando que eu aumentasse o meu. Em especial a meu supervisor, Gerente de Manutenção José Wallace Araújo Mafra, por ter me dado a chance de participar desta equipe de trabalho, me proporcionando uma incrível experiência profissional.

A equipe de Operadores da Usina, que vejo como uma grande família onde todos se tratam como irmãos. Por dividirem comigo os procedimentos operacionais, e por terem a paciência de me explicar varias e varias vezes. São verdadeiros amigos que espero um dia poder ter a oportunidade de trabalhar novamente com todos.

As equipes PegAzuls e Acceptor Aerodesign, que me proporcionaram minha primeira experiência profissional, desenvolvendo características como responsabilidade e competência nos serviços desenvolvidos.

A Marcelo Farias, companheiro de trabalho que tive a honra de conhecer na usina, ex-petrobras, com anos de experiência e lutas, com o qual as risadas eram mais do que constantes, eram uma certeza diária.

A todos os professores que me acompanharam durante a graduação, me direcionando nos exercícios e pesquisas, me fazendo buscar o conhecimento para assim adquirir o aprendizado necessário para conquista dessa tão sonhada graduação.

Ao meu orientador Rafael Luz Espindola, a quem possuo uma grande admiração, que mesmo a distância esteve sempre disponível e empenhado em colaborar com o meu Trabalho de conclusão de curso (TCC).

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a utilização de turbina a gás para cogeração de energia elétrica e produção de vapor. Para a sua compreensão é feita uma análise dos princípios básicos de funcionamento, bem como configurações de montagem e classificação da turbina a gás. São expostos também seus principais componentes e descrição de suas funções e características. Abordando a geração a ciclo combinado, além de seus princípios básicos e sistemas auxiliares. São passadas ainda informações técnicas sobre um estudo de caso relacionado a uma usina termoelétrica localizada no Rio grande do Norte, a qual utiliza turbinas a gás da General Eletrics para cogeração, e caldeiras de recuperação de calor afim de aumentar o rendimento do sistema, produzindo vapor, que é utilizado em poços de petróleo adjacentes a usina.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina a gás; Cogeração; Vapor.

ABSTRACT

This paper presents a literature review on the use of gas turbine for cogeneration of electricity and steam production. For your understanding is an analysis of the basic principles of operation and mounting configurations and gas turbine rating. They are also exposed its main components and describe their functions and characteristics. Addressing the generation combined cycle, and its basic principles and auxiliary systems. Are passed further technical information on a case study related to a power plant located in Rio Grande do Norte, which uses gas turbines from General Electric for cogeneration and heat recovery boilers in order to increase system performance, producing steam which is used in oil wells adjacent the plant.

KEY-WORDS: Gas turbines; Cogeneration; Steam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O “Aeolipile” de Hero.....	20
Figura 2 - Macaco de chaminé de Da Vinci.....	21
Figura 3 - Turbina de Giovanni Branca.....	21
Figura 4 - O veículo de Isaac Newton.....	22
Figura 5 - Turbina a gás de John Barber.....	22
Figura 6 - Turbina a gás desenvolvida por Stolze.....	23
Figura 7 - Diagrama pressão x volume do ciclo Brayton.....	25
Figura 8 - Principais partes da turbina a gás.....	26
Figura 9 - Esquema de conversão de energia.....	28
Figura 10 - Princípios de Ação e Reação.....	29
Figura 11 - Esquema do Ciclo Aberto.....	30
Figura 12 - Esquema do Ciclo Fechado.....	31
Figura 13 - Esquema de turbina aeroderivada.....	32
Figura 14 - Turbina a gás aeroderivativa (Pratt & Whitney Power).....	32
Figura 15 - Turbina Heavy Duty.....	33
Figura 16 - Turbina a Gás ALSTOM GT8C.....	34
Figura 17 - Câmara de combustão em corte.....	35
Figura 18 - Compressor de uma turbina a gás.....	36
Figura 19 - Turbina axial de 3 estágios.....	37
Figura 20 - Entrada de ar com e estágios de filtração.....	38
Figura 21 - Sistema de exaustão.....	39
Figura 22 - Gerador de Vapor.....	41
Figura 23 - Componentes de uma caldeira completa.....	43
Figura 24 – Esquema de uma caldeira Flamotubular.....	45
Figura 25 – Esquema de uma caldeira Aquotubular.....	45
Figura 26 – Circuito do vapor.....	46
Figura 27 - Turbogenerador resfriado por hidrogênio.....	49
Figura 28 - Esquema generalizado dum sistema de Cogeração em Ciclo Combinado.....	52
Figura 29 - Método convencional, Injeção de água.....	54
Figura 30 - Método convencional, Injeção de gás.....	54
Figura 31 - Processo de produção e injeção de vapor.....	56
Figura 32 - Usina Termoelétrica Jesus Soares Pereira.....	57

Figura 33 - Fluxograma de processo da UTE-JSP.....	58
Figura 34 - City Gate no limite de bateria.....	59
Figura 35 - Casa de filtros.....	60
Figura 36 - Compressor de Turbina a gás GE.....	61
Figura 37 - Liners dos sistema de combustão.....	61
Figura 38 - Disposição dos Liners do sistema de combustão.....	62
Figura 39 - Turbina a gás GE.....	62
Figura 40 - Turbogenerador GE.....	63
Figura 41 - Esquema de circulação de gases e água da caldeira.....	64

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	17
2.1	CALOR	17
2.2	ENERGIA.....	17
2.3	GERAÇÃO.....	17
2.4	COGERAÇÃO.....	17
2.5	TERMODINÂMICA.....	18
2.6	SISTEMA.....	18
2.7	ESTADO TERMODINÂMICO.....	18
2.8	CICLO TERMODINÂMICO.....	19
2.9	TRABALHO.....	19
2.10	MEIO AMBIENTE.....	19
3	TURBINA.....	20
3.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	20
3.2	PROCESSOS ENVOLVIDOS.....	24
3.2.1	CICLO BRAYTON.....	24
3.2.2	ADMISSÃO.....	26
3.2.3	COMPRESSÃO.....	27
3.2.4	COMBUSTÃO.....	27
3.2.5	EXAUSTÃO.....	28
3.3	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE CIRCUITO.....	28
3.3.1	CIRCUITO ABERTO.....	30
3.3.2	CIRCUITO FECHADO.....	30
3.4	TIPOS DE TURBINAS INDUSTRIAIS.....	32
3.5	CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA TURBINA A GÁS.....	34
3.5.1	CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	34
3.5.2	COMPRESSORES AXIAIS.....	35
3.5.3	TURBINAS AXIAIS.....	37
3.5.4	SISTEMA DE ENTRADA DE AR.....	38

3.5.5	SISTEMA DE EXAUSTÃO.....	38
3.6	DESEMPENHO NO PONTO DE PROJETO.....	39
3.6.1	PARÂMETROS DE DESEMPENHO NO PONTO DE PROJETO DA TURBINA.....	39
4	GERADORES DE VAPOR.....	41
4.1	COMPONENTES CLASSICOS.....	42
4.2	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS CALDEIRAS DE VAPOR.....	43
4.3	CIRCUITO BÁSICO DO VAPOR.....	46
5	GERADORES ELÉTRICOS.....	48
6	PROCESSO DE COGERAÇÃO.....	51
7	RECUPERAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	53
7.1	MÉTODOS ESPECIAIS DE RECUPERAÇÃO.....	54
7.2	MÉTODOS TÉRMICOS – INJEÇÃO DE VAPOR.....	55
8	ESTUDO DE CASO - USINA TERMOELÉTRICA JESUS SOARES PEREIRA	57
9	CONCLUSÃO.....	65
10	REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

No início do ano de 2000, o Brasil se encontrou em uma situação de déficit energético que culminou em apagões e outros problemas na rede. Essa crise deixou clara a necessidade de se aumentar a capacidade de geração de energia elétrica instalada no país. Com isso, a implantação de sistemas térmicos tomou um volume cada vez mais significativo no Brasil, seguindo o exemplo de países Europeus e dos Estados Unidos. No Brasil, mais de 80% da energia é produzida nas hidrelétricas, que dependem de água em níveis adequados em seus reservatórios para gerar energia. Apesar do potencial hidráulico abundante, esses recursos estão normalmente disponíveis em áreas distantes dos centros consumidores, o que gera um elevado custo com linhas de transmissão (ANEEL, 2010).

No ano de 2014, a ausência de chuvas foi das maiores nas últimas décadas, prejudicando a oferta de energia. Juntamente com a crise energética, o governo se viu obrigado a comprar energia de termoeletricas, onde algumas se utilizam, dependendo de sua localização, ou proximidade de campos produtores de petróleo, possuem um ciclo combinado para a produção de vapor, e injeção do mesmo no poço produtor, visando uma redução na viscosidade do óleo e aumentando a produção do poço.

A participação de centrais termoeletricas na matriz elétrica Brasileira ainda é baixa. A cogeração, ou seja, a produção combinada de eletricidade e calor obtida pelo uso sequencial de energia a partir de um combustível, é largamente utilizada nos processos de grandes indústrias. Três grandes benefícios podem ser obtidos pelo aproveitamento da energia térmica. Primeiro, é o aumento do rendimento global energético, contribuindo para a redução da demanda global de combustível e, conseqüentemente, para a queda no preço dos combustíveis. O segundo benefício são a redução de emissões de carbono e de outros poluentes atmosféricos, pois menos combustível será queimado. E por último os impactos causados ao meio ambiente devido à liberação de calor por grandes plantas geradoras são reduzidos drasticamente (LORA, 2004).

Na recuperação de petróleo, os métodos recomendados para reservatórios com óleos do tipo pesado com maiores índices de sucesso no mundo são os térmicos, principalmente a injeção de vapor devido ao fato de a tecnologia ser amplamente dominada, tem sido utilizada com êxito em diversos países, inclusive o Brasil (Thomas, 2001). A Petrobras faz uso da

cogeração em campos localizados na região Nordeste, sendo que a mesma já está sendo testada nas acumulações da Bacia do Espírito Santo.

Para atingir os objetivos, de geração de eletricidade e produção contínua de vapor para injeção em poços de petróleo, são utilizadas turbinas a gás, onde um acoplamento entre seu eixo e o eixo do gerador permite a produção de eletricidade, enquanto os gases resultantes da combustão são direcionados para unidades recuperadoras de calor (caldeiras), produzindo assim o vapor necessário.

As turbinas a gás (TG) são motores de combustão interna que possuem uma faixa de operação que varia desde pequenas potências como 100 KW, até grandes potências como 180 MW, concorrendo assim tanto com os motores de combustão interna (DIESEL e OTTO) quanto com as instalações a vapor (TV) (MENESES, 2011). Além disso, apresentam vantagens consideráveis como seu peso relativamente baixo, e o baixo volume de espaço ocupado quando comparadas com outros equipamentos rotativos, o que reduz drasticamente o impacto ambiental provocado em uma determinada área. Tais vantagens proporcionam uma ascendência no uso destes equipamentos (MENESES, 2011).

Outro aspecto positivo é a baixa inércia térmica que permite a obtenção da plena carga em tempo reduzido, o que torna as turbinas a gás indicadas para sistemas de geração de energia elétrica de ponta, onde o processo de partida e a necessidade de carga plena no menor tempo possível são essenciais (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

Inicialmente foram criadas com o objetivo de fornecer trabalho mecânico, entretanto, seu desenvolvimento pleno ocorreu em virtude do seu uso como elemento de propulsão da indústria aeronáutica. De maneira geral, as turbinas a gás são utilizadas como elemento propulsor para aviões, navios, em setores como automotivos e ferroviários, como acionador de estações “booster” de bombeamento (oleodutos e gasodutos). Bem como na geração de eletricidade, por meio de centrais termoeletricas, recuperação poços de petróleo, em locais onde peso e volume são levados em conta como plataformas “Offshore” de extração de petróleo, e em locais de difícil acesso e instalação. Sua confiabilidade aliada a simplicidade de operação permitem inclusive que elas sejam operadas à distância (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

O presente trabalho tem como enfoque principal o uso das turbinas a gás para geração de energia bem como produção de vapor para injeção em poços de petróleo. O porquê do seu uso, apresentando suas vantagens e desvantagens, além de demonstrar os processos térmicos envolvidos, o seu funcionamento nos ciclos simples e combinado, a estrutura das turbinas a gás, a formação do conjunto turbo gerador e o funcionamento do mesmo. Como estudo de

caso da aplicação das turbinas a gás, será abordada uma análise de funcionamento e produção da Usina Termoeletrica Jesus Soares Pereira, localizada no Rio Grande do Norte.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo são descritos alguns conceitos fundamentais para o entendimento dos processos envolvidos na utilização das turbinas para geração de energia elétrica e produção de vapor, essenciais à compreensão e desenvolvimento do trabalho.

2.1 CALOR

Calor é definido como sendo a forma de energia transferida, através da fronteira de um sistema a uma dada temperatura, a outro sistema (ou meio) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.2 ENERGIA

É a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de fornecer em um determinado período de tempo. A energia pode ser transformada ou transmitida de diferentes maneiras: a energia cinética do movimento das moléculas de ar pode ser convertida em energia cinética de rotação pelo rotor de uma turbina eólica, que por sua vez pode ser transformada em energia elétrica através de um gerador acoplado ao rotor da turbina (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.3 GERAÇÃO

O processo de geração de energia elétrica envolve a transformação de diferentes tipos de energia em energia elétrica. É um processo que acontece em duas etapas. Na primeira, uma máquina primária transforma diferentes tipos de energia (hidráulica, térmica, química, etc.) em energia cinética de rotação. Na segunda etapa um gerador elétrico transforma a energia cinética de rotação em energia elétrica (WEG INDÚSTRIA LTDA, 2010).

2.4 COGERAÇÃO

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010), “Cogeração de energia é definida como o processo de produção combinada de calor e energia elétrica, ou

mecânica, a partir de um mesmo combustível, capaz de produzir benefícios sociais, econômicos ou ambientais. A atividade de cogeração contribui efetivamente para a racionalização energética, uma vez que possibilita maior produção de energia elétrica e térmica a partir da mesma quantidade de combustível.”

2.5 TERMODINÂMICA

É a parte da física que estuda as leis que descrevem a troca de calor (energia) e o trabalho realizado em um processo físico qualquer (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.6 SISTEMA

Chamamos de sistema a parte do universo que estamos interessados em estudar, e de meio ao restante do universo. Na termodinâmica, um sistema se caracteriza por um conjunto de propriedades como energia, temperatura, pressão, volume e número de partículas presentes.

Os sistemas podem ser considerados fechados ou abertos. Um sistema fechado, também designado por massa de controle, consiste numa quantidade fixa de massa, e não há transferência de massa através da fronteira. Isto quer dizer que em um sistema fechado não entra nem sai massa do sistema. No entanto, pode haver troca de energia e o volume não tem que, necessariamente ser fixo. Um sistema aberto, ou volume de controle, é uma região escolhida de acordo com a conveniência técnica do problema a ser analisado. Pode haver troca de massa e energia entre o sistema e a vizinhança (meio). São exemplos desse tipo de sistema os equipamentos que envolvem fluxo de massa tais como compressores, turbinas, aquecedor de água e outros (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.7 ESTADO TERMODINÂMICO

É o conjunto de valores das propriedades termodinâmicas de um sistema. A sequência de estados termodinâmicos pelos quais um sistema passa ao ir de um estado inicial a um estado final é chamada de processo termodinâmico. Os processos termodinâmicos são usualmente classificados em:

- Isovolumétricos ou isocóricos – o volume é constante;
- Isotérmicos – a temperatura é constante;

- Isobáricos – a pressão é constante;
- Adiabáticos – não ocorre troca de calor entre o sistema e o meio.

2.8 CICLO TERMODINÂMICO

É quando um sistema, a partir de um dado estado inicial, passa por um certo número de mudanças de estado ou processos e finalmente retorna ao estado inicial (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.9 TRABALHO

É a energia transferida de um corpo para outro devido a uma força que age entre eles (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

2.10 MEIO AMBIENTE

Uma turbina a gás operando em uma central termoelétrica, opera com vizinhanças de algum tipo. O termo ambiente refere-se a uma parte da vizinhança onde as propriedades intensivas de cada fase são uniformes e não mudam significativamente como resultado dos processos desenvolvidos pelo sistema.

3 TURBINA

A turbina é um equipamento rotativo, geralmente operando em regime permanente, que tem como finalidade fornecer trabalho na ponta do eixo (ou potência). O trabalho realizado na turbina é produzido devido a uma queda de pressão do fluido de trabalho que passa por ela. Tais equipamentos podem ser divididos em duas classes gerais: a formada pelas turbinas a vapor (ou qualquer outro fluido de trabalho), onde o vapor que deixa a turbina é direcionado para um condensador, em que o vapor é condensado até o estado líquido. E as turbinas a gás, em que o fluido de trabalho são os resíduos provenientes da combustão do gás utilizado como combustível.

A pressão de descarga de todas as turbinas é fixada pelo ambiente onde é descarregado o fluido de trabalho, e a pressão na seção de alimentação da turbina é alcançada com um bombeamento ou compressão do fluido de trabalho (LORA, 2004).

As turbinas a gás são consideradas turbomáquinas, pois o fluido de trabalho se desloca de maneira contínua em um sistema rotativo de pás (rotor). Desta forma ela absorve ou fornece a energia do rotor, dependendo de por onde o fluido passe, turbina ou compressor respectivamente.

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Por volta de 130 antes de Cristo, um filósofo e matemático egípcio, chamado Hero de Alexandria, inventou um brinquedo que girava em seu eixo central sobre uma pequena caldeira de água, esse brinquedo era o “Aeolipile”. Com isso ele verificou o efeito da reação provocado pelo ar quente ou o vapor movimentado por alguns bocais sobre uma roda. A figura 1 apresenta uma imagem do invento Hero (BENTLEY, J. R 2007).

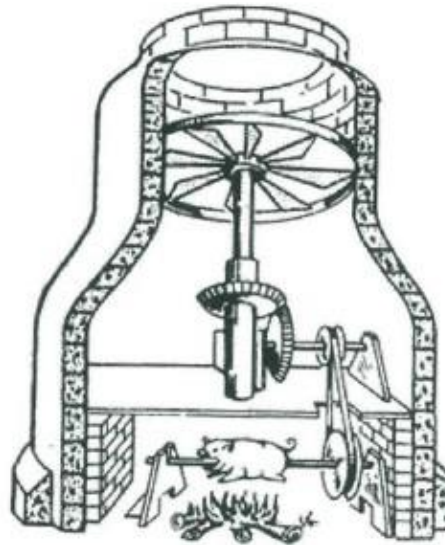
Figura 1- O “Aeolipile” de Hero



Fonte: <http://modelengines.info>

Leonardo da Vinci em 1550, desenvolveu um dispositivo chamado por ele mesmo de “macaco de chaminé”. Nele, gases quentes na chaminé passavam pelo dispositivo fazendo com que o mesmo girasse. Dessa forma, acoplando um conjunto de engrenagens Da Vinci conseguiu transmitir o movimento do “macaco de chaminé” para um espeto. A Figura 2 exemplifica o dispositivo (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

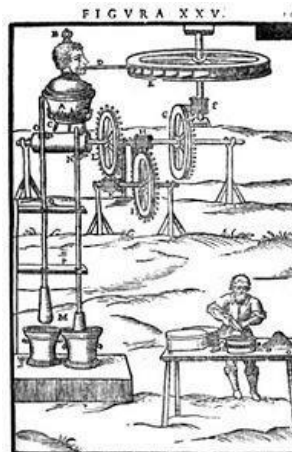
Figura 2- Macaco de chaminé de Da Vinci



Fonte: Martinelli Junior, 2002

Na Itália, o engenheiro Giovanni Branca criou um dispositivo que utilizava jatos de vapor para girar uma turbina, que por sua vez proporcionava trabalho para o maquinário. A figura 3 apresenta uma representação do dispositivo criado (BENTLEY, J. R 2007).

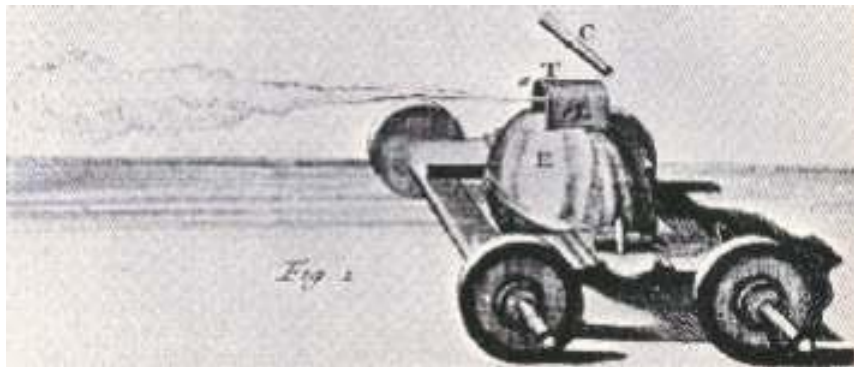
Figura 3- Turbina de Giovanni Branca



Fonte: <http://modelengines.info>

Isaac Newton em 1687 anunciou as leis do movimento. A terceira lei de Newton afirma haver um equilíbrio entre ação e reação: “ Para cada ação haverá uma reação de mesma intensidade e força, mas em sentido oposto”. Baseado nessa lei, Newton idealizou um veículo movido através de jatos de vapor. As leis desenvolvidas por Newton são a base da teoria da propulsão moderna. A Figura 4 demonstra o veículo idealizado (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

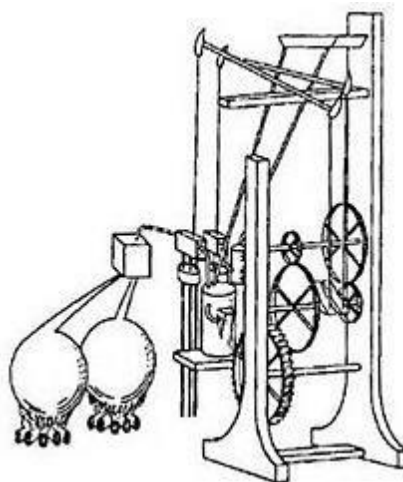
Figura 4- O veículo de Isaac Newton



Fonte: Martinelli Junior, 2002

Utilizando o ciclo termodinâmico das modernas turbinas a gás, em 1791, John Barber registrou a patente de um motor movido por uma turbina a gás (figura 5) . Projetado para ser um motor fixo de uso industrial, o aparelho empregava um gerador de gases constituído por compressor, câmara de combustão e rodas de turbina, componentes estes que são fundamentais nas turbinas atuais (MARTINELLI JUNIOR, 2002).

Figura 5- Turbina a gás de John Barber

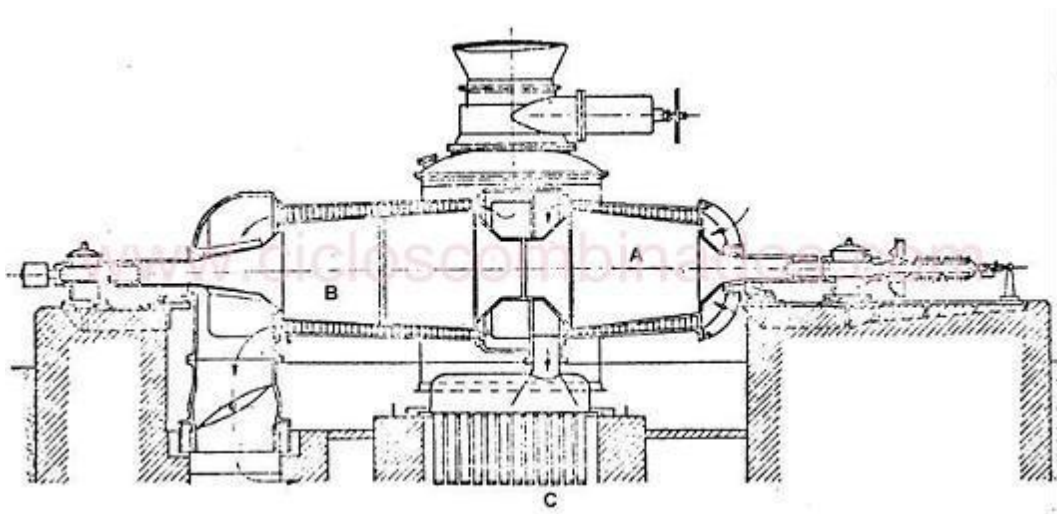


Fonte: Martinelli Junior, 2002

A primeira turbina multi-estágio foi imaginada em 1808 por John Dumball, mas seu projeto consistia em mover as lâminas sem aerofólios fixos para transformar o fluxo em cada uma das fases posteriores. Caso tivesse percebido a necessidade de uma fase de aerofólios estacionários entre cada fase de rotação, estaria originado o conceito de turbina axial utilizada nos dias atuais. Em 1837, na França, Bresson teve a ideia de usar uma espécie de ventilador para movimentação do ar, misturado com um gás combustível e queimado. Estes produtos de combustão seriam resfriados por adição de mais ar, e este produto final foi usado para conduzir lâminas de uma turbina. Entretanto não existem provas de que esse dispositivo tenha sido alguma vez construído (GIAMPAOLO, A 2006).

Dumball e Bresson consideraram em suas concepções todos os componentes das atuais turbinas com combustão e pressão constante. Porém, a primeira turbina com estas características só foi realmente construída entre os anos de 1900 e 1904 por J.F Stolze que a planejou anos antes (1872) combinando as ideias de John Barder e John Dumball, mas devido à falta de fundos para tal investimento, sua construção foi impossibilitada na época. A turbina desenvolvida (figura 6) foi testada durante quatro anos, mas nunca funcionou com efetividade (GIAMPAOLO, 2006).

Figura 6- Turbina a gás desenvolvida por Stolze



Fonte: <http://www.renovetecingenieria.com>

O avanço no estudos da termodinâmica em meados do século XIX, permitiu e impulsionou o melhoramento dos protótipos das turbinas. No início do século XX outras tentativas de desenvolvimento ocorreram. Podemos citar: Armengaud e Charles Lemale, que construíram em Paris uma turbina a gás com injeção de água para resfriamento, mas não conseguiram potência efetiva no projeto; a General Eletric Co. em 1903 deu início a seus

projetos de turbinas a gás com orientação do Dr. Sandford Moss, pioneiro no assunto nos Estados Unidos (GIAMPAOLO, A 2006).

O grande avanço no desenvolvimento das turbinas ocorreu quando começaram a ser implantados testes para o uso de turbinas no ramo aeronáutico, isso foi iniciado pouco antes da segunda guerra mundial. Suas características de baixo peso e pequeno volume foram as razões principais para tal investimento. O primeiro motor com essa finalidade de propulsão aeronáutica foi produzido por Frank Whittle em 1937. Whittle em 1930 já havia patenteado e concebido a utilização da reação ou jato como meio de propulsão (GIAMPAOLO, A 2006).

O avanço da aerodinâmica proporcionou uma consolidação do uso das turbinas a gás, fazendo com que acelerasse sua evolução significativamente. Fazendo com que 100% dos aviões de grande porte nos anos 70 fossem impulsionados por turbinas.

Com isso, a aplicabilidade das turbinas também foi aumentando, e elas começaram a ser utilizadas na área industrial. A primeira instalação é de 1949 em St. Denis, França, e atingia uma potência de 12,5MW (GIAMPAOLO, 2006).

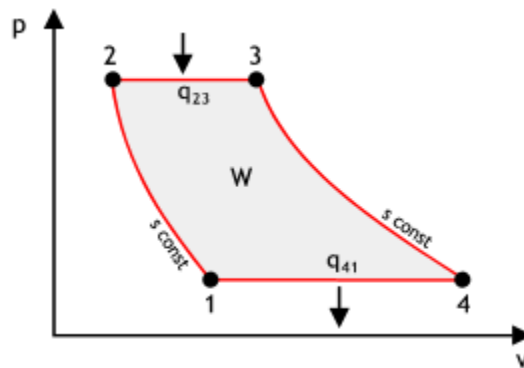
Esse desenvolvimento veio até os dias atuais, e hoje as TG têm múltiplas utilidades e são usadas para propulsão aeronáutica, naval, na geração de eletricidade, acionamento de equipamentos e são utilizadas em ciclos combinados para produção de vapor.

3.2 PROCESSOS ENVOLVIDOS

3.2.1 CICLO BRAYTON

O ciclo Brayton (Figura 7) é um ciclo ideal, uma aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás, descrevendo variações de estado (pressão e temperatura) dos gases. É um conceito utilizado como base didática para análise dos ciclos reais, que se desviam do modelo ideal, devido a limitações tecnológicas e fenômenos de irreversibilidade, como o atrito (VAN WYLEN et al., 2005).

Figura 7- Diagrama pressão x volume do ciclo Brayton



Fonte: <http://www.mspc.eng.br>

O ciclo se constitui de quatro etapas. Primeiramente, o ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde ocorre uma compressão adiabática e isentrópica, com aumento de temperatura e consequente aumento de entalpia. Comprimido, o ar é direcionado às câmaras, onde se mistura com o combustível possibilitando geração de calor devido a reação de combustão, à pressão constante. Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura, se expandem conforme passam pela turbina, idealmente sem variação de entropia. Na medida em que o fluido exerce trabalho sobre as palhetas, reduzem-se a pressão e temperatura dos gases, gerando-se potência mecânica. A potência extraída através do eixo da turbina é usada para acionar o compressor e, eventualmente, para acionar outras máquinas. A quarta etapa não ocorre fisicamente, se tratando de um ciclo termodinâmico aberto. Conceitualmente, esta etapa representa a transferência de calor do fluido para o ambiente. Desta forma, mesmo se tratando de um ciclo aberto parte da energia proveniente da combustão é rejeitada sob a forma de calor, contido nos gases quentes de escape. A rejeição de calor é um limite físico, intrínseco ao funcionamento de ciclos termodinâmicos, mesmo nos casos ideais, como define a segunda lei da termodinâmica (VAN WYLEN et al., 2005).

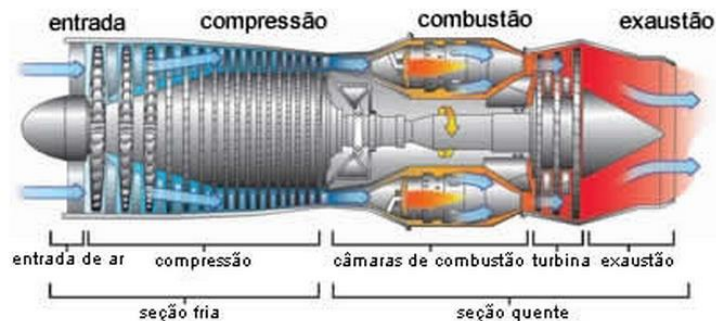
A perda de ciclo ideal pode ser quantificada pela potência proveniente do combustível, descontando-se a potência de acionamento do compressor e a potência líquida. Assim, diminui-se a perda à medida que se reduz a temperatura de escape e se eleva a temperatura de entrada da turbina, o que faz da resistência, a altas temperaturas, das partes da turbina um ponto extremamente crítico na tecnologia de construção destes equipamentos.

Uma turbina a gás produz energia a partir do resultado das seguintes etapas contínuas do ciclo BRAYTON:

- Admissão (4-1)
- Compressão (1-2)
- Combustão (2-3)
- Exaustão (3-4)

Na Figura 8 estão apresentadas as principais partes da turbina a gás, e seus estágios no ciclo Brayton:

Figura 8- Principais partes da turbina a gás



Fonte: <http://carros.hsw.uol.com.br/north-american-eagle2.htm>

3.2.2 ADMISSÃO

Os compressores da turbina são muito sensíveis a depósitos em suas palhetas, logo, poeira, insetos, vapores, entre outros, devem ser eliminados para manter a máxima eficiência. O ar atmosférico é admitido passando por uma seção de filtragem normalmente de três estágios. O primeiro estágio de filtragem é do tipo inercial com uma tela de aço inoxidável e venezianas verticais com a finalidade de reter partículas maiores (insetos) e água proveniente de chuvas. O segundo estágio é composto por elementos do tipo manta de fibra sintética coalescedora extratora de névoa de alta eficiência com densidade progressiva. O terceiro estágio é composto por elementos tipo caixa ou multibolsa para a filtragem final de partículas finas (GIAMPAOLO, 2006).

3.2.3 COMPRESSÃO

O ar é comprimido em um compressor dinâmico (axial ou centrífugo), normalmente do tipo axial de vários estágios onde a energia de pressão e temperatura do fluido (ar) é aumentada. O compressor de ar é o componente da turbina responsável pelo aumento da pressão do ar no ciclo Brayton e é acionado pela turbina do gerador de gás. O princípio de funcionamento do compressor axial é o da aceleração do ar com posterior transformação em pressão. É composto por uma seção estacionária, onde se encontram instalados os anéis com palhetas estatoras e a seção rotativa composta por um conjunto de rotores com palhetas montados em um eixo. Cada estágio de compressão é composto por um anel com palhetas estatoras e um rotor com palhetas. O rotor com palhetas é responsável pela aceleração do ar, como um ventilador. É nesta etapa que o ar recebe trabalho para aumentar a energia/velocidade. O anel de palhetas estatoras tem a finalidade de direcionar o ar para incidir com um ângulo favorável sobre as palhetas do próximo rotor e promover a desaceleração do fluxo de ar para ocorrer a transformação da energia de velocidade cinética em aumento de pressão e temperatura (efeito difusor) (GIAMPAOLO, 2006).

3.2.4 COMBUSTÃO

Na câmara de combustão, o ar comprimido a alta temperatura e o combustível injetado a alta pressão promovem a mistura e queima a uma pressão praticamente constante. A ignição da mistura ar e combustível ocorre durante a partida da turbina, através de um ignitor e uma tocha quando aplicável. Posteriormente a combustão se auto-sustenta. Os gases gerados na combustão a alta temperatura são expandidos a uma alta velocidade através dos estágios da turbina geradora que consiste de um conjunto rotor (eixo com rodas de palhetas) e as rodas estatoras com palhetas que promovem o efeito bocal e direcionam o fluido motriz (gases) para proporcionar um melhor ângulo de ataque nas palhetas das rodas da turbina, convertendo a energia dos gases em potência no eixo para acionar o compressor axial de ar e a turbina de potência (GIAMPAOLO, A 2006).

3.2.5 EXAUSTÃO

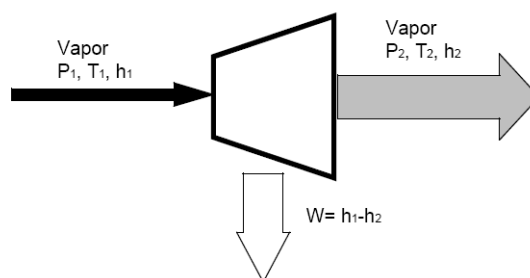
Em um avião a jato os gases remanescentes da expansão na turbina passam através de um bocal para aumentar sua velocidade e consequentemente o impulso (propulsão). Na aplicação industrial os gases são direcionados para uma turbina de reação ou turbina de potência com um ou mais estágios (estator e rotor), onde a energia disponível dos gases é convertida em potência no eixo para acionar os compressores de gás. Finalmente os gases fluem para o duto de exaustão, onde sua energia remanescente pode opcionalmente ser aproveitada em um sistema de recuperação de calor (aquecimento de água) (GIAMPAOLO, A 2006).

3.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO E TIPOS DE CIRCUITO

Em uma turbina ocorre a transformação da energia potencial do vapor ou do gás de combustão em energia cinética devido a sua expansão. Desta forma, a transformação desta energia em energia mecânica em decorrência da força dos gases que atingem as palhetas, produzindo rotação. A turbina é constituída basicamente de um rotor apoiado em mancais, onde se encontram as palhetas rotoras (móveis), as palhetas estatoras (imóveis), fixas na carcaça da turbina.

O trabalho mecânico produzido pode ser utilizado para o acionamento de diversos equipamentos, como por exemplo um gerador elétrico, um compressor ou uma bomba. A energia do vapor descarregado pela máquina, é na maioria dos casos simplesmente descartada para o ambiente, em um condensador. Em outras situações é possível aproveitar o vapor para fins de aquecimento, melhorando, em consequência, de forma significativa, o rendimento global do ciclo. O esquema mostrado na Figura 9 demonstra a conversão de energia realizada (LORA, 2004).

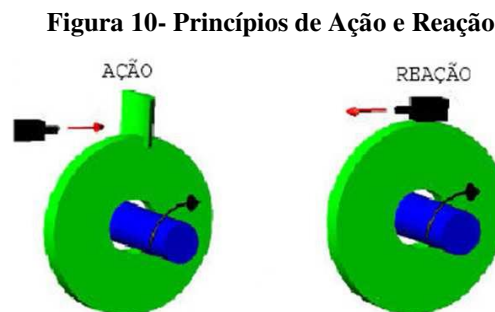
Figura 9- Esquema de conversão de energia



Fonte: Livro Geração Termoeletrica

Existem duas formas de utilizar a energia cinética do vapor ou dos gases de combustão, para realização de trabalho mecânico (LORA, 2004): o princípio da ação e o princípio da reação (Figura 10).

- **Ação** - Se a saída de vapor for fixa e o jato de vapor dirigido contra um anteparo móvel, a força de ação do jato irá deslocar o anteparo, em sua direção. O jato de vapor (o qual podemos considerar um corpo em movimento) tem sua velocidade modificada pelo anteparo circular, colocado em seu caminho.
- **Reação** - Se a saída de vapor puder mover-se, a força de reação que atua sobre ela, fará com que se desloque, em direção oposta do jato de vapor.



Fonte: (MOTA FILHO, 2010)

As turbinas, devido a sua ampla gama de utilização, podem ser classificadas segundo diferentes critérios (LORA, 2004). De acordo com sua finalidade, podem ser:

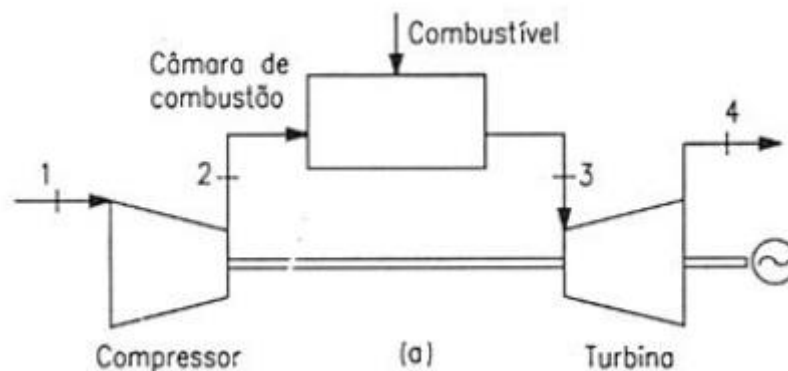
- **Acionamento elétrico** – Utilizadas para acionar um gerador elétrico de uma indústria, que irá suprir as necessidades da central. Geralmente operam com velocidade síncrona (1800 ou 3600 rpm) e com potências na faixa de 16 a 1300 MW.
- **Acionamento mecânico** – Utilizadas como acionador de grandes ventiladores de tiragem, bombas, compressores, propulsão de navios e outros grandes equipamentos de rotação. Esses sistemas normalmente operam entre 900 e 10000 rpm e com potências na faixa de 500 KW a 10 MW. Possuem vantagens sobre o acionamento elétrico, como melhor utilização da energia térmica, facilidade no controle da velocidade e rápido start-up.

Uma turbina a gás pode funcionar em dois tipos diferentes de circuito: Aberto e Fechado.

3.3.1 CIRCUITO ABERTO

No circuito aberto (Figura 11), o fluido de trabalho é comprimido pelo compressor, passando para a câmara de combustão, onde recebe energia do combustível, aumentando sua temperatura. Saindo da câmara de combustão, o fluido de trabalho é direcionado para a turbina, onde é expandido, fornecendo potência para o compressor e potência útil (COHEN, H., ROGERS 1996).

Figura 11- Esquema do Ciclo Aberto

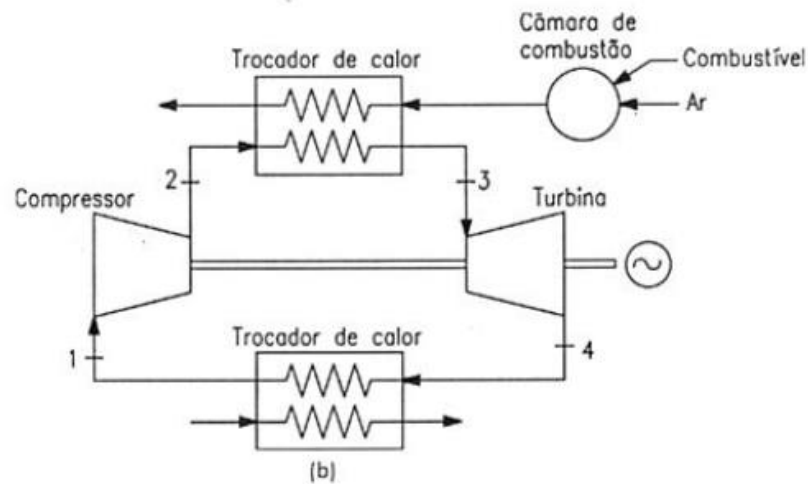


Fonte: Livro Geração Termoeétrica

A temperatura suportada pelo material da turbina, associado às tecnologias de resfriamento, definem a máxima potência útil fornecida pela turbina a gás. Dois fatores que afetam o desempenho das turbinas são a eficiência dos componentes e sua temperatura de entrada na turbina (COHEN, H., ROGERS 1996).

3.3.2 CIRCUITO FECHADO

Já no circuito fechado (Figura 12), o processo de funcionamento é o mesmo do ciclo aberto, com a diferença que o fluido de trabalho permanece dentro do sistema e o combustível é queimado em um trocador de calor externo (COHEN, H., ROGERS 1996).

Figura 12- Esquema do Ciclo Fechado

Fonte: Livro Geração Termoeletrica

A maior vantagem desta configuração é a possibilidade de uma maior pressão através de todo o circuito, o que resulta numa redução no tamanho das turbomáquinas para uma dada potência útil, e possibilita a variação da potência útil pela variação do nível de pressão no circuito. Esta forma de controle permite que uma grande faixa de potência possa ser obtida sem alterar a máxima temperatura do ciclo e com pequena variação na eficiência (COHEN, H., ROGERS 1996).

A principal desvantagem é que o circuito fechado necessita de um sistema externo de aquecimento, o que envolve o uso de um ciclo auxiliar, com uma diferença de temperatura entre os gases da combustão e o fluido de trabalho (COHEN, H., ROGERS 1996). Outras vantagens são:

- Evita a erosão das palhetas da turbina;
- Elimina o uso de filtros de ar;
- Aumenta a transferência de calor devido a alta densidade do fluido de trabalho;
- Usa gases com propriedades térmicas desejáveis, o que implica em componentes menores, tais como argônio e hélio.

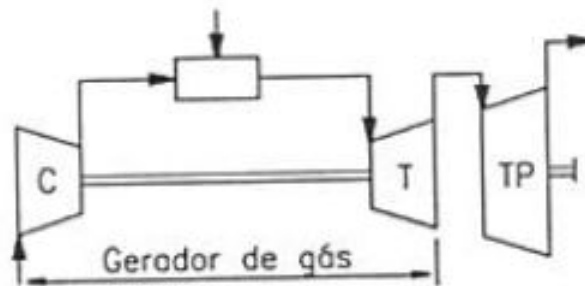
3.4 TIPOS DE TURBINAS INDUSTRIAIS

As turbinas a gás industriais podem ser divididas em dois tipos:

- Turbinas aeroderivativas;
- *Heavy duty*

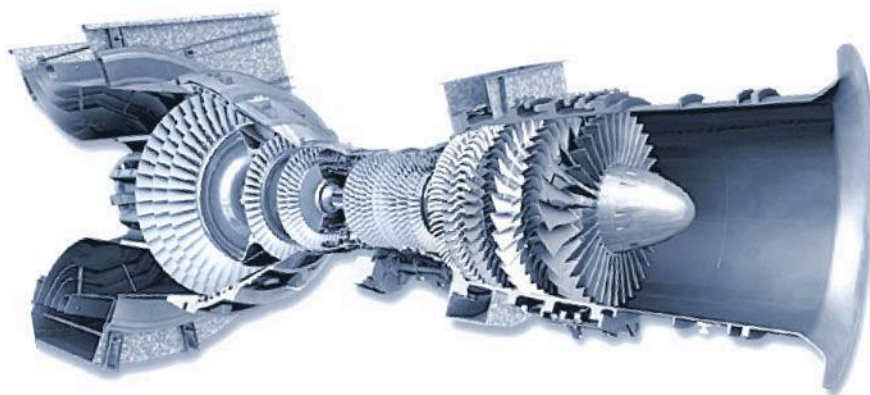
As turbinas aeroderivativas são oriundas de turbinas a gás aeronáuticas que sofrem algumas modificações no projeto. É mais econômico modificar uma turbina a gás aeronáutica para fins industriais do que projetar e desenvolver uma totalmente nova. Além disso, os recursos para pesquisa e desenvolvimento são provenientes mais do orçamento militar do que dos usuários industriais (LORA, 2004). Basicamente essas turbinas são constituídas de um gerador de gás, uma turbina aeronáutica e uma turbina livre ou de potência, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13- Esquema de turbina aeroderivada



Fonte: Livro Geração Termoelétrica

Figura 14- Turbina a gás aeroderivativa (Pratt & Whitney Power)



Fonte: <http://coepto.pai.pt/>

As turbinas a gás aeroderivadas são caracterizadas por serem mais eficientes, possuírem alta confiabilidade, ocupar pouco espaço, possuírem uma menor relação peso/potência e flexibilidade na manutenção. Atualmente as turbinas aeroderivadas podem atingir uma potência de cerca de 50 MW e são usadas principalmente em plataformas marítimas, bombeamento de gás, centrais termoeletricas e propulsão naval (LORA, 2004).

As turbinas industriais *Heavy duty* (Figura 15), são turbinas projetadas para a aplicação industrial seguindo uma filosofia própria e são conhecidas pela sua robustez, flexibilidade no uso de combustíveis, alta confiabilidade e baixo custo, e podem atingir uma potência de cerca de 340 MW. Elas são turbinas a gás de ciclo simples de um eixo, um compressor (a maioria axial), uma câmara de combustão, e uma turbina (a maioria axial) que fornece energia mecânica para o compressor e para outras aplicações. A grande utilização das turbinas a gás industriais tem sido a geração de eletricidade (LORA, 2004).

Figura 15- Turbina Heavy Duty

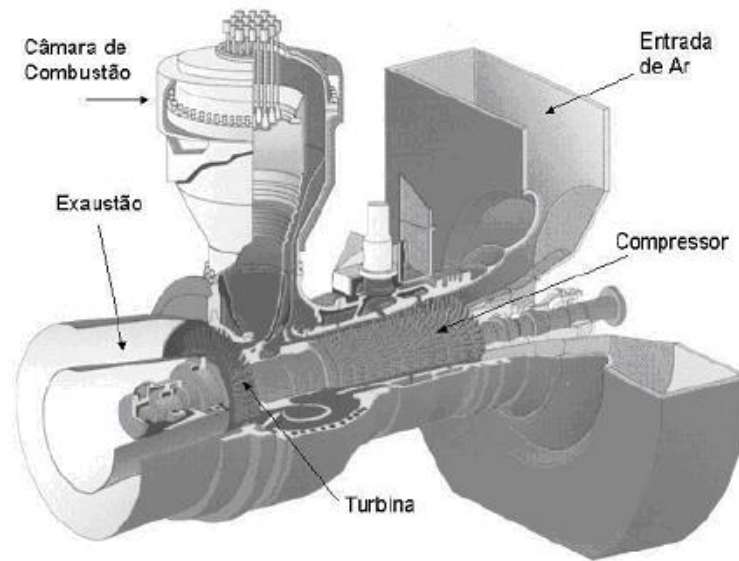


Fonte: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/gas-turbines/sgt-750.htm>

3.5 CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA TURBINA A GÁS

A Figura 16 exemplifica uma turbina a gás onde são exibidos seus componentes básicos, que serão abordados individualmente.

Figura 16- Turbina a Gás ALSTOM GT8C



Fonte: Site ALSTOM

3.5.1 CÂMARA DE COMBUSTÃO

A câmara de combustão (Figura 17) tem a finalidade de queimar uma quantidade de combustível fornecida pelo injetor, com uma grande quantidade de ar proveniente do compressor e liberar o calor de tal maneira que o ar é expandido e acelerado para produzir uma corrente suave e uniforme de gás quente, necessária à turbina. Isso deve ser alcançado com a mínima perda de pressão e a máxima eficiência. A quantidade de combustível adicionada à corrente de ar dependerá do aumento de temperatura requerida. Entretanto, a temperatura máxima é limitada pelo material das palhetas da turbina. Uma vez que a temperatura requerida do fluido de trabalho na entrada varia com o empuxo e o trabalho, a câmara de combustão deve ser capaz de realizar uma combustão estável e eficiente em toda a faixa de operação da turbina (DUTRA, 2006).

Figura 17- Câmara de combustão em corte



Fonte: Site ALSTOM

3.5.2 COMPRESSORES AXIAIS

O compressor axial é constituído de uma série de palhetas, com perfil aerodinâmico, colocadas ao longo de um disco, chamado de rotor, e um conjunto estacionário de palhetas, também com seção de perfil aerodinâmico, colocadas ao longo da carcaça, chamado de estator, conforme mostra a Figura 18. O rotor, seguido do estator, é chamado de estágio. Um compressor é formado por uma série de estágios sequenciais. Da entrada para a saída do compressor, existe uma redução gradual da área anular. Isto é necessário para manter a velocidade média axial do ar aproximadamente constante na medida em que a densidade aumenta através do comprimento do compressor. Alguns projetos de compressores têm dois ou mais compressores ou “carretéis” os quais são acionados por diferentes turbinas e são, portanto, livres para girar com diferentes velocidades. O compressor simples consiste em vários estágios, montados sobre um único eixo, para atingir a razão de pressão e a vazão em massa desejadas. Compressores axiais têm a vantagem de serem capazes de alcançar altas razões de pressão com eficiências relativamente altas, se comparados com os compressores radiais. O fluido de trabalho é inicialmente acelerado pelo rotor e, então, desacelerado pelo estator, onde a energia cinética transferida no rotor é convertida em pressão estática. O

processo é repetido em vários estágios, tantos quantos forem necessários para atingir a razão de pressão desejada (DUTRA, 2006).

Quando o compressor esta operando numa condição de vazão e rotação muito diferente daquela de projeto, podemos observar o fenômeno do *stall*. No caso de um aerofólio isolado, o *stall* surge do aumento excessivo do ângulo de incidência. O cuidadoso projeto das palhetas do compressor é necessário para evitar perdas e minimizar este problema, especialmente se a razão de pressão for alta. Quando o compressor está operando a uma rotação mais baixa do que a de projeto, a densidade do fluido de trabalho nos últimos estágios estará bem diferente do valor de projeto, resultando em uma velocidade axial incorreta, a qual acarreta *stall* nas palhetas e o compressor atingirá o que chamamos de *surge line* (linha de surto) (Dutra. A, 2006).

Figura 18- Compressor de uma turbina a gás



Fonte: Site ALSTOM

3.5.3 TURBINAS AXIAIS

A turbina (Figura 19) tem a tarefa de fornecer potência para acionar compressor e acessórios e, no caso de turbinas a gás as quais não fazem o uso somente da propulsão, potência de eixo. Ela faz isso extraindo energia dos gases quentes liberados na câmara de combustão e expandindo-os para uma pressão e temperatura mais baixas. Altas tensões são desenvolvidas nesse processo e para uma operação eficiente as pontas das palhetas podem atingir uma velocidade acima de 457 m/s. O escoamento contínuo de gás, ao qual a turbina está exposta, pode ter uma temperatura de entrada entre 1123 K e 1973 K e alcançar velocidades acima de 761 m/s em algumas partes da turbina. Para produzir o torque necessário, a turbina pode ter vários estágios, cada um tendo um empalhetamento estacionário (estator) chamado de bocais e um empalhetamento que se move chamado de rotor (DUTRA, 2006).

Figura 19- Turbina axial de 3 estágios

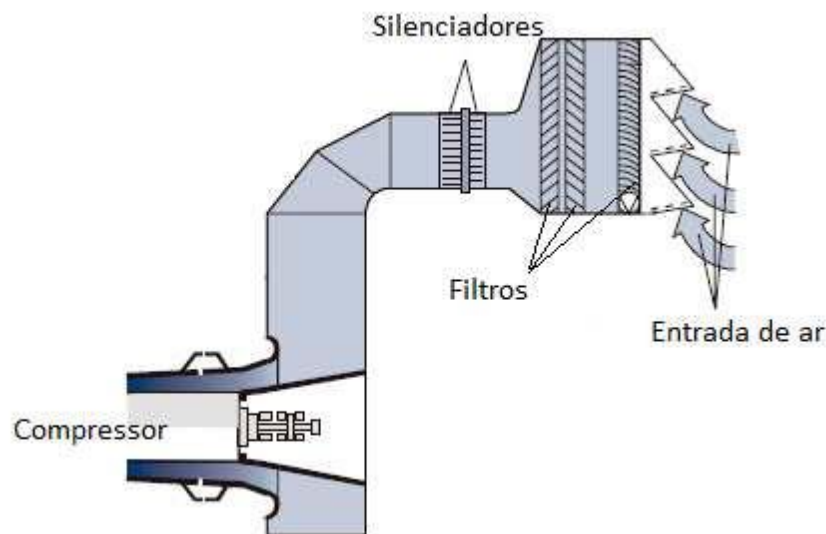


Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_a_gás, acessado em 20/04/2016

3.5.4 SISTEMA DE ENTRADA DE AR

Com o intuito de remover partículas que possam afetar os elementos da turbina a gás, o sistema de entrada de ar é composto por uma canalização direcionadora e uma série de filtros. Além disso, em alguns casos, o sistema de entrada de ar é utilizado para possibilitar o resfriamento do ar que entra no compressor (LORA, 2004). A Figura 20 mostra um sistema de filtragem de ar.

Figura 20- Entrada de ar com e estágios de filtração



Fonte: Manual GE

3.5.5 SISTEMA DE EXAUSTÃO

Após deixarem o último estágio da turbina, os gases de exaustão são encaminhados para a atmosfera ou direcionados para o equipamento de recuperação de calor. O sistema de exaustão possui uma chaminé na saída da turbina a gás. O exaustor direciona o gás a uma tubulação que transportará o gás quente para a chaminé ou para dentro do equipamento de recuperação de calor. A Figura 21 mostra o sistema de exaustão da caldeira de recuperação (DUTRA, 2006).

Figura 21- Sistema de exaustão



Fonte: Petrobras

3.6 DESEMPENHO NO PONTO DE PROJETO

Para a concepção da turbina, o estudo do desempenho do ponto de projeto se faz essencial. Características como configuração do motor, do ciclo a ser utilizado, os níveis de desempenho e o tamanho dos componentes são selecionados para uma dada especificação. O ponto de projeto deve ser definido antes que qualquer análise ou condição de funcionamento seja possível. O desempenho total resultante da turbina será crucial ao seu sucesso comercial. Os cálculos genéricos do ponto dos diagramas de ponto de projeto e do projeto de amostra serão apresentados para alguns tipos de turbina a gás (LORA, 2004).

3.6.1 PARÂMETROS DE DESEMPENHO NO PONTO DE PROJETO DA TURBINA

A condição de funcionamento onde a turbina passará a maior parte do tempo é tradicionalmente escolhida como o ponto do projeto. Para uma unidade industrial, esta seria normalmente a carga padrão alimentada por ela. Na configuração do ponto de projeto os parâmetros do ciclo dos componentes devem ser otimizados. Cada vez que os parâmetros de entrada são mudados, o procedimento do cálculo deve ser repetido, já que a mudança exigiria uma geometria diferente da máquina, na condição de funcionamento. Para a fase de concepção do projeto os componentes estão geralmente na mesma condição de funcionamento

que o ponto de projeto do motor, ainda que em uma fase de projeto mais avançada isto não pode ser verdadeiro.

Determinados parâmetros que definem o desempenho total do motor, são utilizados para avaliar a conformidade de um projeto, sua aplicação, ou comparar diversos projetos possíveis da máquina. Tais parâmetros são listados abaixo:

- Potência de saída.

A potência de saída requerida é quase sempre o objetivo fundamental para o projeto do motor e é função do fluxo de massa através da turbina, da variação de entalpia e da variação de temperatura entre a entrada e a saída.

- Potência Específica ou Torque.

Esta é a quantidade de potência ou de torque na saída pela unidade de fluxo mássico que entra na turbina. Fornece uma boa indicação inicial do peso, da área frontal e do volume do motor. É particularmente importante maximizar este parâmetro nas aplicações onde o peso ou o volume do motor são cruciais, ou para os aviões que voam nos números de *Mach* elevados onde o arrasto da área frontal da unidade é elevado.

- Consumo específico de combustível (*Specific Fuel Consumption* - SFC).

É a massa do combustível queimado por unidade de tempo, por unidade de potência ou de torque de saída. É importante minimizar SFC para as aplicações onde o peso e/ou o custo do combustível são significativos.

- Eficiência térmica de turbinas de potência.

É a potência de saída do motor dividida pela taxa de entrada de energia (combustível), expressa geralmente como uma porcentagem. É eficazmente a recíproca do SFC, mas é independente do valor calorífico do combustível. Para aplicações de ciclo combinado os termos eficiência térmica bruta e líquida da rede são usados. A eficiência térmica bruta não deduz a potência exigida para conduzir os auxiliares da planta a vapor, ao contrario dos valores líquido (LORA, 2004).

4 GERADORES DE VAPOR

Define-se como gerador de vapor, ou caldeira, todo equipamento que, utilizando energia química liberada durante a combustão de um combustível promove mudança de fase da água do estado líquido para o vapor, a uma pressão várias vezes maior que a atmosférica. O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, bem como para fins de aquecimento de processos industriais. A Figura 22 mostra uma caldeira de vapor em sua forma mais simples, ressaltando a presença dos dois componentes principais: a fornalha (onde ocorre a queima do combustível) e as superfícies de aquecimento, onde ocorre a troca de calor dos gases quentes com o fluido de trabalho (água, mistura de água-vapor, vapor ou ar) (PÊRA, 1990).

Figura 22- Gerador de Vapor



Fonte: <http://www.unaotsg.com.br/>

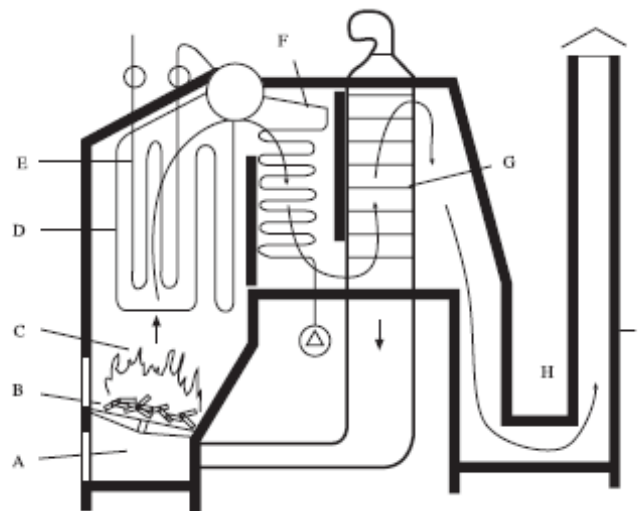
4.1 COMPONENTES CLÁSSICOS

Os geradores de vapor de grande porte são constituídos de uma associação de componentes, de maneira a constituírem um aparelho complexo. São o exemplo mais completo que se pode indicar, principalmente quando destinados à queima de combustível sólidos (PÊRA, 1990). Os principais componentes da caldeira são:

- (A) Cinzeiro: Lugar onde se depositam cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.
- (B) Fornalha: Local onde se inicia o processo de queima seja de combustíveis sólidos (líquidos ou gasosos).
- (C) Câmara de combustão: Volume onde se deve consumir todo o combustível antes de os produtos de combustão atingirem e penetrarem no feixe de tubos. Por vezes, confunde-se com a própria fornalha, dela fazendo parte; outras vezes, separa-se completamente.
- (D) Tubos Evaporadores: Correspondem ao vaso fechado e pressurizado com tubos contendo água no seu interior, a qual, ao receber calor, transforma-se em vapor.
- (E) Superaquecedor: Responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira.
- (F) Economizador: Componente onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
- (G) Pré-aquecedor de ar: Componente cuja função é aquecer o ar de combustão para introduzi-lo na fornalha, aproveitando o calor sensível dos gases da combustão.
- (H) Canais de gases: São trechos intermediários ou finais de circulação dos gases de combustão até a chaminé. Podem ser de alvenaria ou de chapas de aço, conforme a temperatura dos gases que neles circulam.
- (I) É a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promove a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo chamado *efeito de tiragem*.

A Figura 23 permite identificar os componentes clássicos e o princípio de funcionamento da instalação.

Figura 23- Componentes de uma caldeira completa



Fonte: Pêra (1990)

4.2 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS CALDEIRAS DE VAPOR

As caldeiras de vapor são classificadas atendendo aos seguintes critérios:

- Aplicação principal;
- Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho;
- Força motriz para a circulação do fluido de trabalho;
- Nível de pressão de operação;
- Tipo de combustível ou fonte de calor;
- Tecnologia de combustão;
- Organização da tiragem de ar e gases de combustão;
- Disposição da fornalha e superfície de aquecimento.

Classificando-as quanto a aplicação principal, podemos separá-las por setores:

- Termoelétrico (centrais termoelétricas);
- Industrial e terciário;
- Naval.

Para os propósitos da NR13, as caldeiras são classificadas em três categorias, conforme segue:

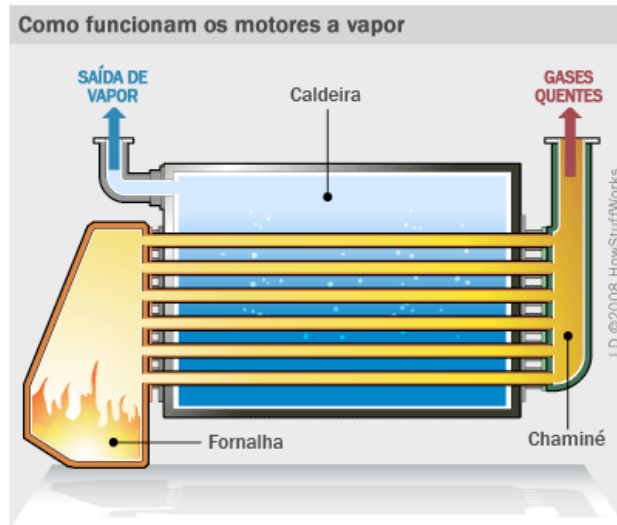
- Caldeiras de categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kpa ($19,98 \text{ kgf/cm}^2$);
- Caldeiras de categoria C são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kpa ($5,99 \text{ kgf/cm}^2$) e o volume interno é igual ou inferior a 100 l (cem litros);
- Caldeiras da categoria B são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

As caldeiras utilizadas por centrais termoelétricas são geralmente projetadas para operarem com vapor superaquecido na faixa de 400 a 560°C. Pressões típicas variam na faixa de 6 a 18 Mpa, podendo chegar a pressões supercríticas de até 34 Mpa, e caldeiras atuais operam com capacidades que variam entre 200 e 4536 t/h, ou mais, dependendo do porte da central de vapor. Na indústria, as caldeiras de vapor operam com pressão do vapor geralmente inferior a 2 Mpa, desde que utilizada para fins térmicos. No caso de centrais de cogeração industriais, as caldeiras são projetadas para operar com pressões entre 2,0 e 8,0 Mpa, e as temperaturas típicas estão na faixa de 340 a 440°C. As capacidades de geração comumente encontradas variam na faixa de 40 a 140 t/h de vapor, embora existam capacidades bem maiores (PÊRA, 1990).

Atendendo ao critério de classificação relativo a circulação dos gases, as caldeiras podem ser classificadas em dois tipos:

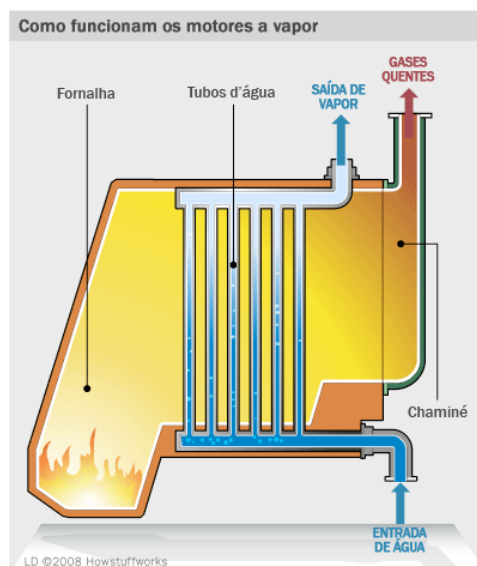
- Flamotubulares
- Aquotubulares

Nas chamadas flamotubulares, também conhecidas como pirotubulares, os gases fluem por dentro de tubos imersos em água. Este tipo de caldeira é frequentemente usada em aplicações de pequeno porte, como indústrias, lavanderias e aquecimento distritais. São caldeiras com capacidade de produção de vapor geralmente de até 20 t/h. Em geral, são usadas em operações que necessitem de vapor saturado. Na Figura 24 vê-se o esquema de uma caldeira flamotubular (PÊRA, 1990).

Figura 24 – Esquema de uma caldeira Flamotubular

Fonte: <http://engenhariaquimica2.blogspot.com.br/2015/10/caldeiras.html>

Nas aquotubulares (Figura 25), ao contrário das flamotubulares, a água circula pelo interior dos tubos e os gases trocam calor com a água através da parede dos mesmos. As superfícies de troca de calor das caldeiras aquotubulares são arranjadas em forma de um conjunto de tubos verticais (chamados de paredes de água) revestindo a fornalha, bem como de superfícies radiantes e convectivas dispostas nos dutos de passagem dos gases de combustão. Nas paredes de água a transferência de calor é predominantemente por radiação (PÊRA, 1990).

Figura 25 – Esquema de uma caldeira Aquotubular

Fonte: <http://engenhariaquimica2.blogspot.com.br/2015/10/caldeiras.html>

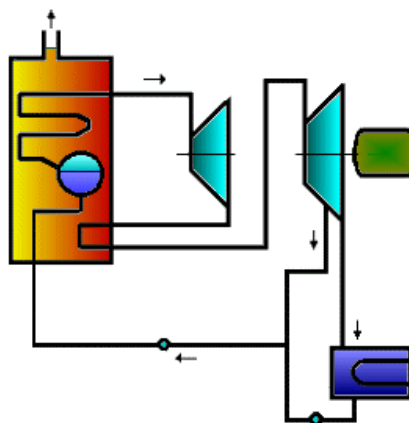
Caldeiras aquotubulares são empregadas nas centrais termelétricas e industriais que consomem grandes quantidades de vapor ou que necessitem de vapor superaquecido. A taxa de produção de vapor por área de troca de calor é maior que nas caldeiras flamotubulares (PÊRA, 1990).

4.3 CIRCUITO BÁSICO DO VAPOR

O vapor gerado na caldeira é transportado por tubulações até os pontos de utilização, podendo haver uma ou mais tubulações de distribuição. A partir dessas tubulações, outras de menor diâmetro transportam o vapor até os equipamentos de forma individual. Inicialmente, o vapor transfere calor para as tubulações que se encontram frias, bem como o ar que circunda essas tubulações. Nessa transmissão, parte do vapor se condensa e o condensado passa a ocupar as partes inferiores das tubulações, sendo empurrado pela massa de vapor circulante. O fluxo de vapor que sai da caldeira passa a ser contínuo, isto é, quanto maior a taxa de condensação, maior será a produção de vapor na caldeira para compensá-la. Nessas condições, maiores serão os consumos de combustível e de água (MOURA, 2015).

Ao se retornar o condensado para a caldeira, por se tratar de água aquecida, está se promovendo significativa economia no consumo de combustível, uma vez que menor será a quantidade de calor necessária para transformar essa água em vapor (MOURA, 2015). A Figura 26 abaixo exemplifica o circuito de utilização do vapor, e como se divide o sistema em quatro áreas:

Figura 26 –Circuito do vapor



Fonte: <http://engenhariaquimica2.blogspot.com.br/2015/10/caldeiras.html>

- Geração de vapor
- Distribuição do vapor
- Utilização de vapor
- Retorno do condensado

5 GERADORES ELÉTRICOS

São elementos responsáveis pela transformação de energia mecânica, fornecida em seu eixo pela turbina, em energia elétrica, disponível em seus terminais. Tal conversão se dá através de um fenômeno eletromagnético, basicamente os descritos pela lei de Faraday-Lenz, que demonstra a geração de uma tensão induzida quando um enrolamento é submetido a influência de um campo magnético variável (LORA, 2004).

Construtivamente, os geradores síncronos mais comumente empregados em geração térmica são constituídos por dois componentes físicos bem definidos: um girante, acoplado mecanicamente ao eixo da turbina, denominado rotor, e outro fixo, mais externo, montado na carcaça do gerador, que é denominado armadura. Nos geradores modernos a tensão é induzida na armadura graças a um campo criado no rotor (LORA, 2004).

Para tanto, o rotor é dotado de bobinas de campo montada sobre pólos magnéticos. Neste ponto reside a grande diferença entre um gerador aplicável a termoeletricas (turbogerador) e um aplicável a hidroelétricas (hidrogerador). Há uma relação muito estrita entre a rotação do gerador e a frequência da tensão gerada em seus terminais, dada por:

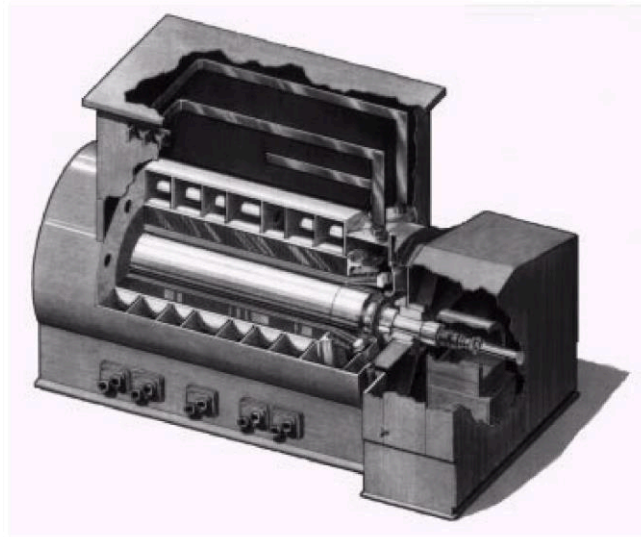
$$f = p * \frac{n}{60}$$

Equação – Frequência de um gerador.

Onde f é a frequência da tensão gerada (Hz); p é o número de pares de polos do rotor; e n a velocidade de rotação do rotor (rpm) (LORA, 2004).

Devido as elevadas rotações envolvidas em máquinas térmicas, mesmo com o uso de redutores de velocidade, acaba-se necessitando de turbogeradores com apenas um ou dois pares de pólos, para tanto, utiliza-se rotações na faixa de 3600 ou 1800 rpm para se obter uma frequência de, por exemplo, 60 Hz. Isto não acontece com hidrogeradores, uma vez que as turbinas hidráulicas trabalham com rotações normalmente menores do que 1200 rpm, podendo chegar a apenas algumas dezenas de rotações por minuto, o que implica em se possuir um elevado número de pares de pólos para que a Equação 1 se verifique. Em razão do reduzido número de pólos, os turbogeradores são normalmente de eixo horizontal, de pequeno diâmetro e de longo comprimento (LORA, 2004). A Figuras 27 apresenta o aspecto de um turbogerador.

Figura 27 - Turbogenerador resfriado por hidrogênio



Fonte – Manual de Operação GE

Em função da sua larga aplicação em países de geração eminentemente térmica, a evolução dos turbogeradores tem sido marcante desde a concepção das máquinas síncronas no final do século XIX (GALASSO ET AL., 1998).

O sistema de refrigeração é de fundamental importância e sua principal função é retirar de dentro da máquina o calor produzido pela passagem de corrente elétrica nos condutores da armadura e do rotor e pelo atrito entre as partes mecânicas e mancais. Tal sistema é caracterizado principalmente pelo tipo de fluido refrigerante, pelo arranjo do circuito de refrigeração.

O tipo de refrigeração utilizada tem influência direta sobre a potência possível de ser gerada. Note que a vida útil de uma máquina elétrica possui uma forte correlação com a temperatura de operação da máquina. A técnica convencional de resfriamento é proporcionar circulação de ar pelo interior da máquina. Porém, em meados da década de 50 começou a se desenvolver o conceito de resfriamento utilizando hidrogênio, o que possibilitou desenvolver turbogeradores de maior potência. O uso de hidrogênio como fluido refrigerante traz consigo grandes vantagens, dentre as quais pode-se citar: redução das perdas de carga na circulação, em função de sua baixa densidade; alta eficiência na absorção de calor, devido ao seu elevado calor específico e condutividade térmica; melhor isolamento elétrico, obtido com o controle das condições internas do gerador e da necessidade de um encapsulamento hermeticamente fechado. A todas essas vantagens deve-se adicionar a inexistência de oxidação de partes metálicas em uma atmosfera de hidrogênio. Como principal desvantagem, tem-se a

periculosidade do manuseio do hidrogênio devido a sua característica explosiva quando em contato com o oxigênio. Com o aumento de eficiência na dissipação de calor, através da modernização dos sistemas de refrigeração, pôde-se, ao longo dos anos, extrair uma maior potência para um mesmo volume de material. Um índice importante que mostra este desenvolvimento tecnológico é a relação peso-potência. Em 1930 este índice era da ordem de 2,5 kg/KVA, indo para 0,5 kg/KVA em 1980. Estima-se que esse valor caia para 0,2 kg/kva em um futuro próximo com o uso de supercondutores (LORA, 2004).

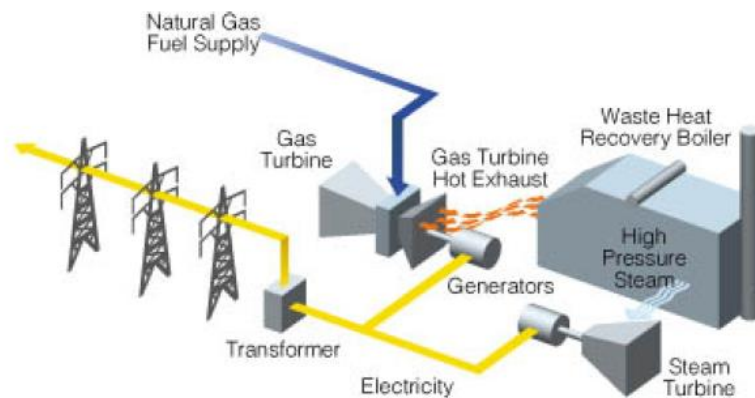
As turbinas térmicas trabalham com elevadas rotações, muitas vezes superiores a 10000 rpm. Já os geradores síncronos, por outro lado, possuem rotação máxima de 3600 rpm, quando conectados a uma rede em 60 Hz. Estes sistemas só são compatibilizados através do emprego de um acoplamento redutor de velocidade. Sendo assim, a definição da rotação nominal de um gerador irá depender do custo deste redutor. Via de regra, a rotação do gerador deverá ser 3600 ou 1800 rpm para sistemas em 60 Hz, ou 3000 e 1500 para sistemas em 50 Hz (LORA, 2004).

6 PROCESSO DE COGERAÇÃO

A cogeração não é uma tecnologia nova e já tem sido utilizada em muitas unidades industriais como um meio econômico de satisfazer, parcial ou totalmente, suas necessidades térmicas e elétricas. Contudo, foi apenas nos últimos anos que a cogeração ganhou expressivo impulso. Assim, aplicações em indústrias químicas, em refinarias de petróleo, em siderúrgicas, em indústrias de papel e celulose, no setor sucroalcooleiro, em indústrias de alimentos, além de hospitais, centros comerciais, complexos de escritórios, entre outros, tem demonstrado a potencialidade da cogeração para fornecer, simultaneamente, formas diferentes de energia úteis (LORA, 2004).

Os elementos fundamentais que constituem uma turbina a gás são o compressor, a câmara de combustão, e a turbina propriamente dita. Em seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera, geralmente, por um sistema de filtragem de ar com elevada eficiência realiza esse trabalho de aspiração, com a finalidade de aumentar ao máximo a qualidade do ar que entrará no compressor, reduzindo a quantidade de partículas sólidas (poeira, insetos, etc) e de gotículas de água, pois os mesmos podem ocasionar sérios danos aos componentes internos, bem como reduzir a eficiência da máquina. Após essa etapa de aspiração e filtragem, o ar é direcionado para o compressor, que dependendo do número de estágios de compressão, pode comprimir significativamente grandes quantidades de ar. Logo após, o ar comprimido é injetado nas câmaras de combustão onde é misturado ao gás natural, e queimado. Os gases de exaustão após a combustão são então direcionados para a turbina, onde se expandem, movendo as palhetas e produzindo potência mecânica para acionar o eixo do compressor, e frequente mesmo o rotor do gerador elétrico. Lembrando que como os produtos da combustão atravessam a turbina, os combustíveis utilizados devem atender requisitos de qualidade, como é o caso do gás natural e dos derivados claros de petróleo. Os gases de exaustão são então direcionados para a HRSG (do inglês, *Heat Recovery Steam Generator*) o Sistema de Recuperação de Calor e Geração de Vapor, que é responsável por realizar a troca de calor entre os gases quentes da exaustão da turbina a gás e gerar o vapor que alimenta o segundo ciclo de geração ou é direcionado para outras finalidades. No segundo ciclo, o vapor produzido pode alimentar uma turbina a vapor, a qual pode estar acoplada a outro gerador elétrico, elevando a produção de energia, ou o vapor pode ser direcionado para outras atividades industriais (LORA, 2004). A Figura 28 demonstra o sistema de cogeração.

Figura 28 - Esquema generalizado dum sistema de Cogeração em Ciclo Combinado



Fonte: “Cogeração: Produção e Planeamento de Energia Eléctrica”

Considerando duas instalações com turbina a gás: uma operando sem recuperação de calor de exaustão, e a outra operando com recuperação, em um sistema de cogeração. Para uma mesma quantidade de combustível fornecido, o primeiro sistema consegue uma eficiência elétrica de aproximadamente 20%, o que resulta num total de perdas de 80%. Ao se utilizar o calor de escape da turbina, a eficiência elétrica se mantém a mesma, enquanto que as perdas se reduzem a 20%, devido a recuperação de calor de exaustão, totalizando uma eficiência energética global de 80%. Dessa forma, fica claro que os sistemas de cogeração apresentam uma eficiência na utilização do combustível mais elevada. Os gases de escape da turbina podem ser aproveitados diretamente para processos térmicos, ou de modo indireto na produção de vapor ou água quente, utilizando uma caldeira de recuperação, ou utilizando os gases como comburente nos queimadores de caldeiras convencionais. A temperatura desses gases situa-se geralmente entre 420 e 650°C, com um conteúdo de oxigênio entre 14 e 17% em volume (LORA, 2004).

7 RECUPERAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

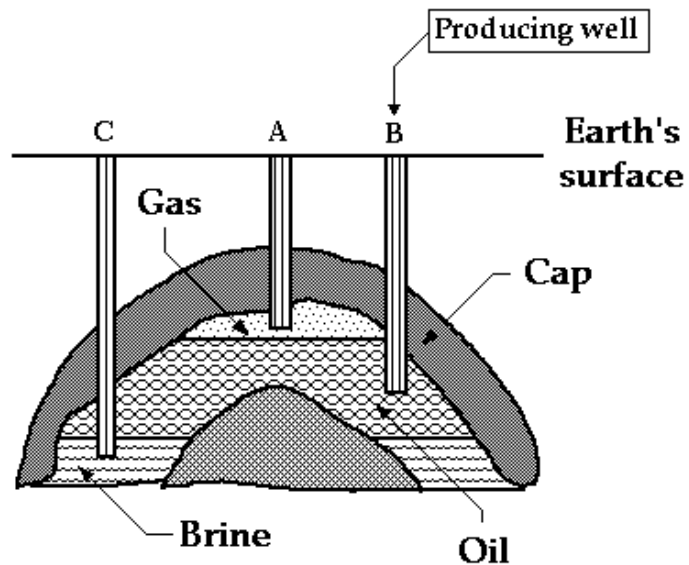
A aplicação mais ampla dos métodos especiais de recuperação se apresenta como uma possível resposta para as necessidades de suprimento de energia quando as reservas pelos métodos convencionais começarem a se esgotar. Assim, o alvo dos processos especiais de recuperação é a parcela correspondente a 70% do volume de óleo original provado, que é o volume percentual médio restante nos reservatórios após a recuperação convencional (THOMAS,2001).

A nomenclatura utilizada baseia-se no seguinte critério: para processos cujas tecnologias são bem conhecidas e cujo grau de confiança na aplicação é bastante elevado, como é o caso da injeção de água (Figura 29) e da injeção de gás (Figura 30), dá-se o nome de Métodos Convencionais de Recuperação, tais métodos conseguem recuperar uma quantidade de 5% a 20% do óleo do reservatório. Para os processos mais complexos e cujas tecnologias ainda não estão satisfatoriamente desenvolvidas, dar-se o nome de Métodos Especiais de Recuperação, que conseguem recuperar uma quantidade de 50% a 70% do óleo do reservatório (THOMAS,2001).

Uma etapa de grande importância no projeto de injeção é a definição do esquema de injeção, isto é, a maneira como os poços de injeção e de produção vão ser distribuídos no campo de petróleo. Além de levar em conta as características físicas do meio poroso e dos fluido desenvolvidos, de acordo com Thomas (2001), o modelo escolhido deve:

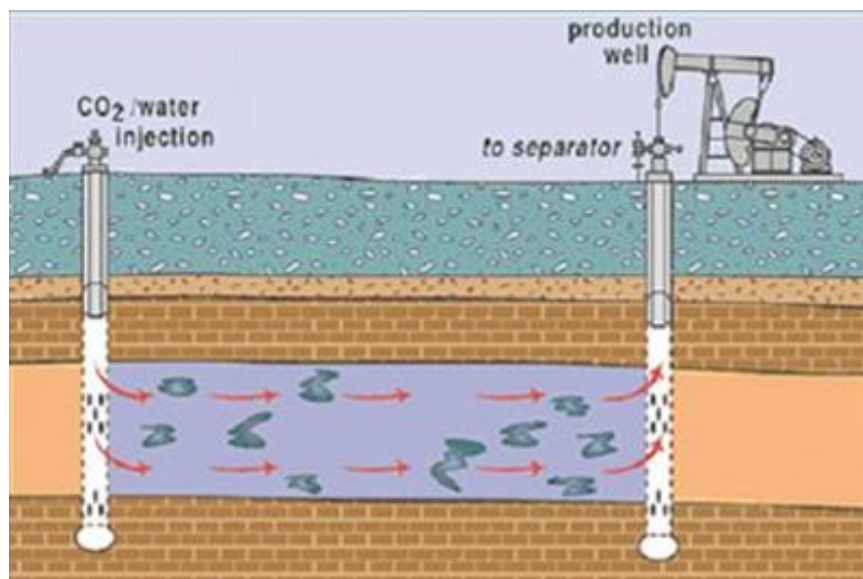
- Proporcionar a maior produção possível de óleo durante um intervalo de tempo econômico e com o menor volume de fluido injetado possível;
- Oferecer boas condições de injetividade para se obter boa produtividade resultando em vazões de produção economicamente atrativas;
- Ainda visando o aspecto econômico, fazer a escolha recair sobre um esquema em que a quantidade de poços novos a serem perfurados seja a menor possível, principalmente, no caso da aplicação do processo em um campo já desenvolvido.

Figura 29: Método convencional, Injeção de água



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5229-recuperacao-melhorada-de-oleo-eor/>

Figura 30: Método convencional, Injeção de gás



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5229-recuperacao-melhorada-de-oleo-eor/>

7.1 MÉTODOS ESPECIAIS DE RECUPERAÇÃO

Os Métodos Especiais de Recuperação são empregados para atuar nos pontos onde o processo convencional não conseguiu atingir as taxas de recuperação desejadas. As baixas

recuperações resultantes de um processo convencional de injeção de fluidos, podem ser creditadas basicamente em dois aspectos principais: geologia da formação, alta viscosidade do óleo no reservatório (THOMAS,2001).

Os métodos especiais de recuperação se dividem em três categorias, de acordo com a natureza geral dos processos:

- Métodos químicos:
- Métodos de deslocamento miscível:
- Métodos térmicos: combustão in situ, injeção de vapor.

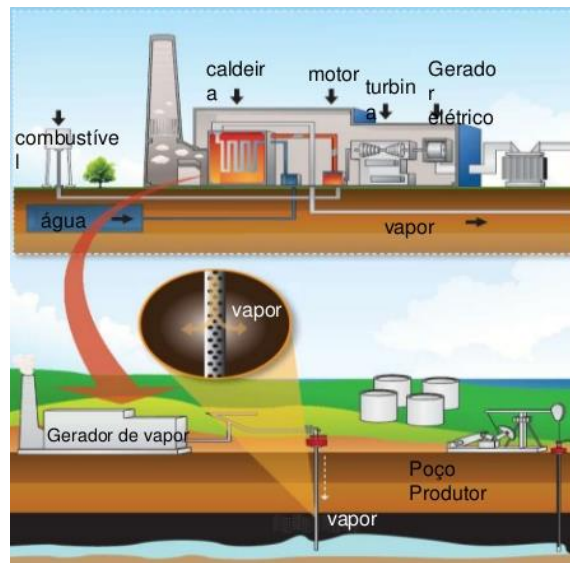
7.2 MÉTODOS TÉRMICOS – INJEÇÃO DE VAPOR

Os métodos térmicos são definidos como métodos que consistem em fornecer calor ao óleo provocando a redução da viscosidade, seja por injeção de um fluido quente, como vapor ou ar aquecido (combustão in situ) (THOMAS,2001).

A injeção de vapor é um processo bastante apropriado para formações muito permeáveis e espessas, portadoras de óleo viscoso. O método não é recomendado para formações muito profundas, já que se torna grande a perda de calor no poço, nem para os reservatórios com altas saturações de água, já que grande parte da energia seria destinada a aquecer a água, sem qualquer benefício para a recuperação.

Quando o vapor é continuamente injetado no poço, o óleo é aquecido, e forma uma câmara de vapor a qual cresce para cima e para os arredores do poço, como é observado na Figura 31. A temperatura na câmara se torna essencialmente igual à temperatura do vapor injetado. Na interface com o óleo frio o vapor condensa e o calor é transferido ao óleo. Então, o óleo já quente e a água condensada são drenadas pela unidade de bombeio (THOMAS,2001).

Figura 31: Processo de produção e injeção de vapor



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5229-recuperacao-melhorada-de-oleo-eor/>

8 ESTUDO DE CASO - USINA TERMOELÉTRICA JESUS SOARES PEREIRA

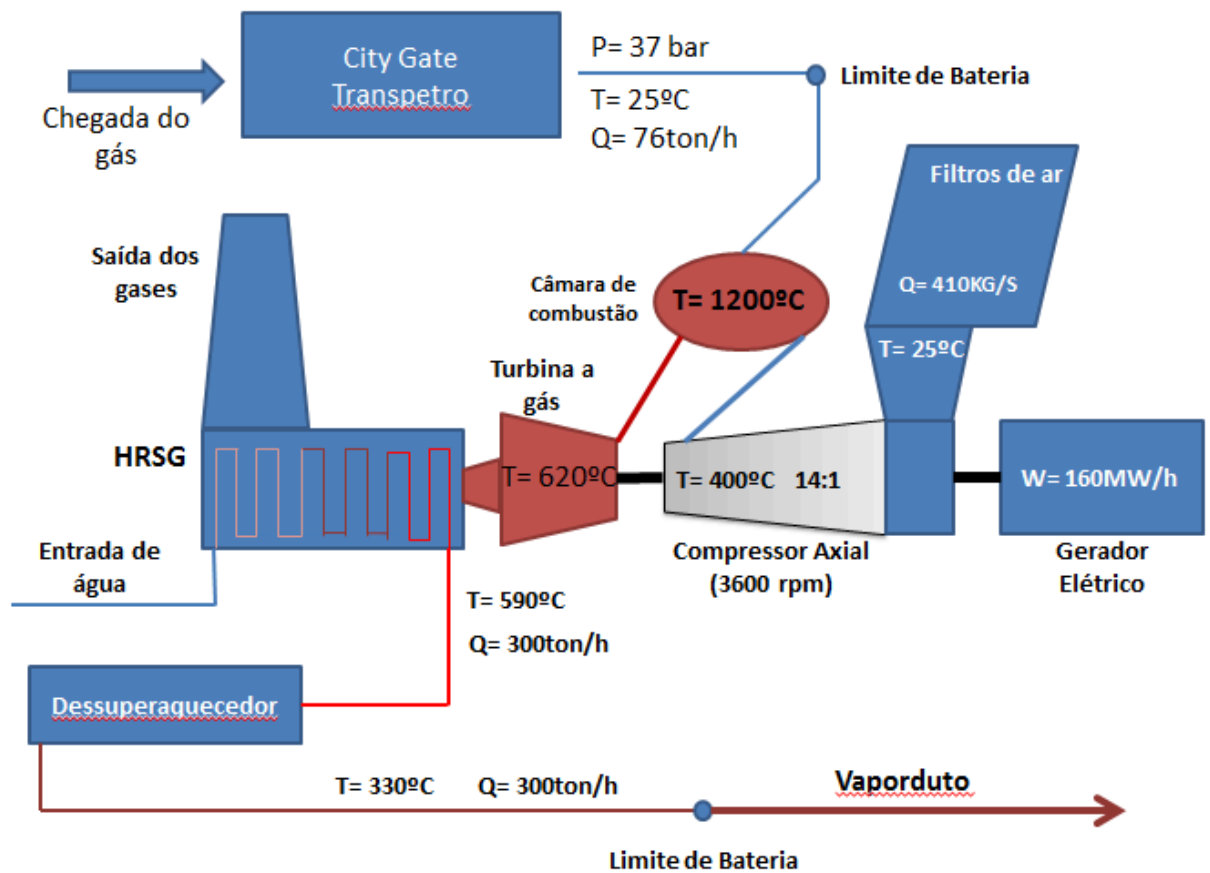
A Usina Termelétrica do Vale do Açu Jesus Soares Pereira, mais conhecida como Termoçu (Figura 32), é um ativo Petrobras de cogeração, isto é, foi concebida para produzir energia elétrica e vapor de água, utilizando gás natural como combustível. Seus principais sistemas são: a Estação de Tratamento de Água, duas turbinas a gás de fabricação GE, e duas caldeiras de recuperação calor (HRSG) utilizadas para produção de vapor.

Figura 32 - Usina Termoeletrica Jesus Soares Pereira



Fonte: Petrobrás

Figura 33 - Fluxograma de processo da UTE-JSP



Fonte: Autor

Todo o processo (Figura 33), começa com o recebimento do Gás Combustível, fornecido pela Transpetro, empresa do grupo Petrobras responsável pelo setor de gás natural. O mesmo é enviado por gasodutos vindos da Estação de Compressão de Gás Natural, situada no Pecém-CE. O gás chega então a uma segunda Estação de Fornecimento (City Gate), situada no limite de bateria da UTE-JSP (Figura 34). Esta estação fornece gás na pressão de 34 a 37 bar, com temperatura de 10 a 25°C , numa vazão de 76 ton/h, quantidade suficiente para abastecer as duas turbinas a gás a plena carga. O gás então é direcionado para as câmaras de combustão, onde é efetuado o controle de injeção de gás de acordo com a quantidade de ar contida na câmara de combustão.

Figura 34 - City Gate no limite de bateria



Fonte: Petrobras

A usina faz uso de duas Turbinas de modelo MS7001FA, de fabricação General Eletrics. O processo de combustão se inicia com a coleta e filtragem do ar que é realizado pelas Casas de Filtros (Figura 35) O ar que está sendo admitido à turbina a gás para combustão, entra na câmara de filtros, sua configuração elevada fornece um sistema compacto que minimiza a coleta de poeira. O sistema de entrada utiliza em sua construção materiais e revestimentos que dispensam manutenção. é formada por coberturas contra intempéries, um conjunto de filtros descartáveis de material sintético para filtragem de suidades de granulometria maior que 20 microns, um estágio de filtragem estática de alta eficiência, para material maior que 10 microns, e um módulo de resfriamento por evaporação. O sistema de filtragem estática consiste em 528 filtros tipo cartucho, que possuem um sistema de limpeza automática, à base de pulsos de ar de contra-fluxo, numa pressão que varia de 6,3 a 7,0 kg/cm² para limpeza das impurezas incrustadas. O quantidade de ar filtrada nas câmaras chega a aproximadamente 410kg/s em cada uma delas, sendo esta a mesma quantidade que chega aos compressores das turbinas.

Figura 35 - Casa de filtros

Fonte: Petrobras

Os compressores das turbinas a gás (Figura 36) são uma estrutura de fluxo axial que comprime com eficiência um grande volume de ar. É composto por 18 estágios individuais operando em sequência. Cada estágio do compressor é constituído de uma fileira de lâminas giratórias (aerofólios) que incrementam a velocidade da entrada de ar aumentando a energia cinética, seguida de uma fileira de lâminas fixas que agem como difusoras, e que convertem a energia cinética em aumento de pressão. Tais equipamentos possuem uma razão de compressão de 14:1. O ar proveniente da câmara de filtros possui uma temperatura de aproximadamente 25°C, adentra no compressor, e após o processo de compressão, sai no ultimo estágio com uma temperatura de aproximadamente 400°C, sendo então direcionados para a câmara de combustão.

Figura 36 - Compressor de Turbina a gás GE



Fonte: Site da GE

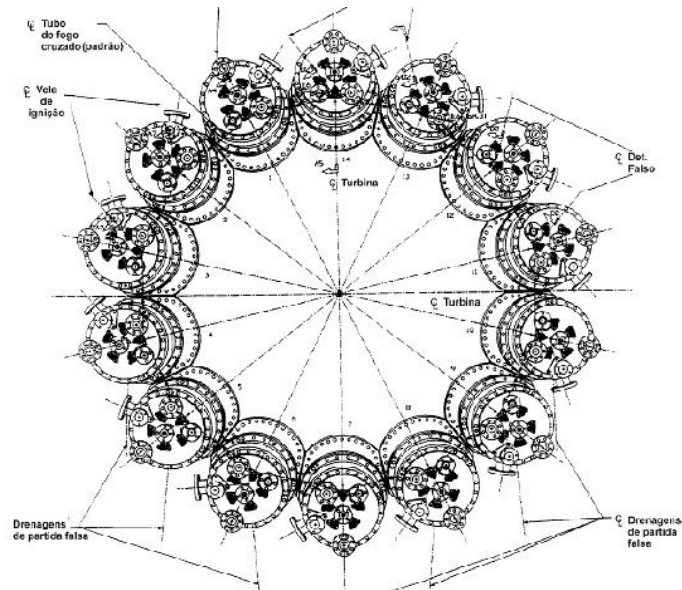
O sistema de combustão consiste em 14 liners (Figura 37 e 38) nos quais o combustível é adicionado e queimado junto com uma porção de ar comprimido. O excesso de ar comprimido é usado para resfriar os produtos da combustão em um nível de temperatura utilizável pela turbina, apenas 20% do ar que é comprimido é utilizado para combustão. O combustível é injetado em cada um dos liners por injetores de combustível, que atomizam o combustível para a queima correta. É inflamado inicialmente por ignição elétrica. Uma vez iniciado o fogo, a combustão se processa. Durante a combustão a temperatura atinge cerca de 1200°C nas câmaras, os gases provenientes da exaustão não podem ser direcionados para a turbina com esse valor. O excesso de ar que sai dos compressores é utilizado para resfriar esses gases de exaustão, reduzindo sua temperatura para aproximadamente 620°C, uma temperatura aceitável que não danifica os componentes da turbina.

Figura 37 - Liners dos sistema de combustão



Fonte: Petrobras

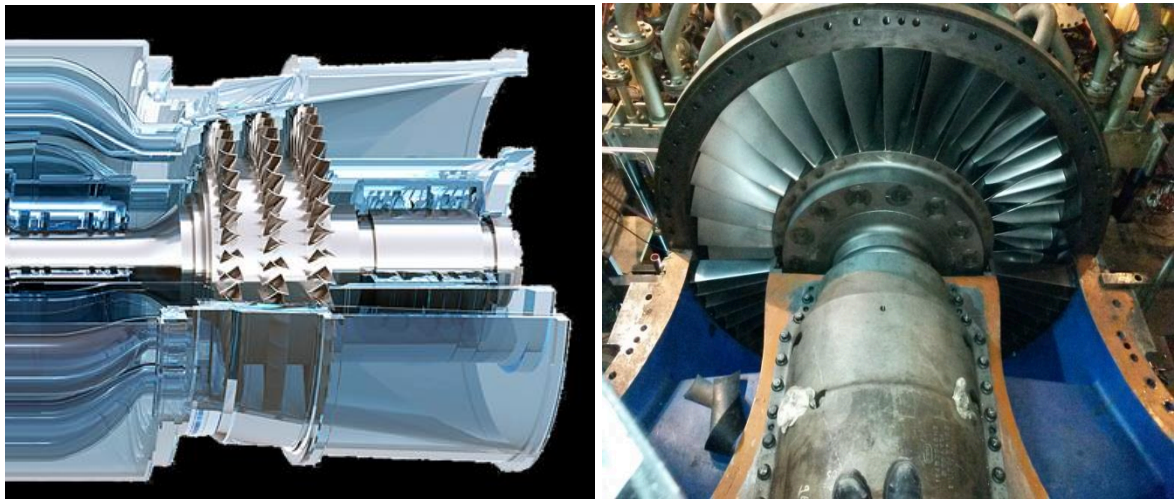
Figura 38 - Disposição dos Liners do sistema de combustão



Fonte: Manual de operação GE

A turbina (Figura 39) compreende três estágios. Cada estágio engloba uma fileira fixa de injetores onde os gases de alta energia ganham maior velocidade e são direcionados para uma fileira de pás giratórias (aerofólios) presas ao eixo da turbina. Os gases de alta velocidade são empurrados contra as pás, convertendo a energia cinética dos gases em potência do eixo. A expansão dos gases na turbina promove uma rotação de 3600 rpm em seu eixo.

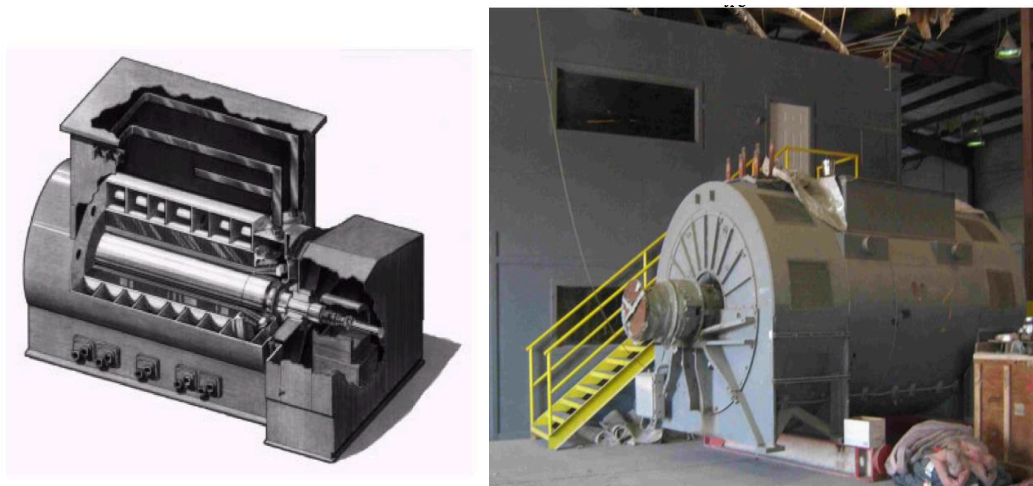
Figura 39 - Turbina a gás GE



Fonte: Site da GE

Os dois conjuntos geradores (Figura 40) consistem no gerador, no equipamento de controle de hidrogênio, no equipamento de controle de CO₂ e em um compartimento auxiliar montado na extremidade. Seu eixo é acoplado diretamente ao eixo do compressor e turbina, de modo que também seja rotacionado a 3600 rpm, tal rotação é necessária pelo fato do gerador possuir apenas dois polos. Cada máquina possui uma capacidade de geração de 160 MW/h, o que totaliza uma geração de 320 MW/h, que são injetados diretamente na rede do sistema elétrico. Estima-se que a UTE-JSP produza aproximadamente 70% da quantidade total de energia consumida no Rio Grande do Norte.

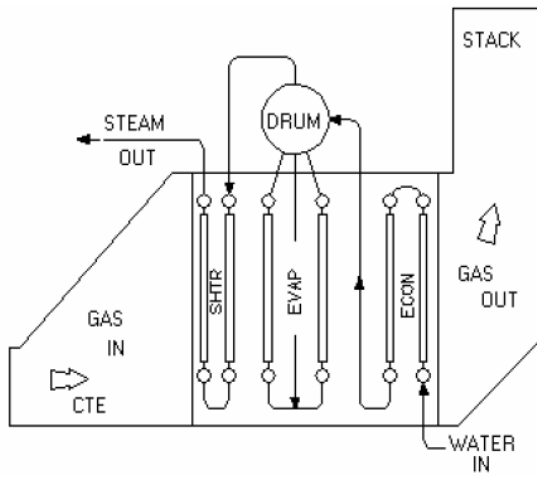
Figura 40 - Turbogenerador GE



Fonte: Manual GE

Os gases de exaustão após a saída da turbina com uma temperatura de 620°C, são então direcionados para as duas caldeiras (HRSG) (Figura 40). Mas antes de chegar às caldeiras, os gases passam por um sistema chamado Dumper, que de acordo com sua abertura limita a quantidade de gases que entrará, todo o excesso é então direcionado para a atmosfera por uma chaminé de Bypass. As caldeiras são do tipo Aquatubular, de categoria A, onde os gases quentes passam por Harpas que contém água, realizando a troca térmica entre os gases e a água contida nas harpas, que se dividem em Superaquecedor, Evaporativo e Economizador.

Figura 41 - Esquema de circulação de gases e água da caldeira



Fonte: Manual de manutenção VogtPower

O vapor gerado na caldeira sai pelas harpas do Superaquecedor, a uma temperatura de 590°C, e uma vazão de 300ton/h, totalizando 600ton/h com a produção das duas caldeiras. Antes de ser enviado ao Vaporduto, esse vapor recebe uma quantidade de vapor a uma menor temperatura pelo Dessuperaquecedor, reduzindo sua temperatura para 330°C para só então ser enviado para o Vaporduto.

O vapor superaquecido gerado é então utilizado na região de Assu e Alto do Rodrigues para injeção em poços maduros, proporcionando a recuperação do petróleo que não pode ser produzido por métodos convencionais. Estima-se que houve um aumento de produção nos poços da região de aproximadamente 6 mil barris por dia, totalizando uma produção diária de 12 mil barris de petróleo.

9 CONCLUSÃO

As Usinas Termoelétricas possuem um importante papel no sistema elétrico brasileiro, suprimindo a elevada demanda do mercado consumidor, quando em momentos de crise hídricas as Hidroelétricas não conseguem fornecer energia suficiente ao sistema.

Turbinas a gás são máquinas extraordinárias e complexas, como foi visto. Seu uso está consolidado não só nas unidades de produção da Petrobras, mas em todas as empresas do ramo de geração. Demonstrou-se que, devido às suas características, as turbinas a gás são as máquinas primárias que melhor se adaptam para desempenhar a função de motor principal no conjunto gerador de energia.

Além disso, há a possibilidade do uso da cogeração de energia elétrica aumentando consideravelmente a eficiência do sistema, onde o vapor gerado pode alimenta uma turbina a vapor acoplada a outro gerador, elevando a produção elétrica, outra finalidade, seria utilizar o vapor produzido para elevar a produção de poços de petróleo maduros da região, como no caso da UTE-JSP. A existência de gás natural disponível em larga escala também é um motivo para que se usem as TG ao invés do outros tipos de motores. Seu peso e ocupação reduzida de espaço é uma vantagem adicional, trazendo a tona o conceito de potência específica que é a potência gerada por unidade de massa ($W \cdot kg^{-1}$), onde potência específica das TG é bem superior aos dos outros motores de combustão, chegando a 0,5 kg/Kw gerado.

O número de vantagens das TG justifica seu uso de forma contínua para geração elétrica e produção de vapor, trazendo lucros ao investimento feito nas mesmas de forma segura.

No estudo de caso percebemos da importância da Usina Termoelétrica Jesus Soares Pereira, a qual possui uma capacidade de geração de 320 MW/h, o que equivalente a 70% de toda a energia consumida no Rio Grande do Norte. Com seu sistema de cogeração, consegue aproveitar os gases de exaustão para produzir uma quantidade de 600ton/h de vapor, que é destinado aos campos de petróleo da região próximo a usina. Sua injeção, permitiu elevar a produção diária em 6 mil barris por dia, resultando em uma produção de aproximadamente 12 mil barris diariamente.

10 REFERÊNCIAS

- BENTLEY, J. R. **The Aeolipile: A Replica of the World's First Rotating Steam Engine.** Disponível em <<http://modelengines.info/aeolipile>> acessado em 31/08/2010

- Cohen, H., Rogers, G. F. C. e Saravanamutttoo, H. I. H. **Gaz Turbine Theory.** 4^a ed. Harlow: Longman, 1996

- Dutra, A. F. A., **Padronização de modelos matemáticos de turbinas térmicas em ciclo combinado para estudos de transitórios eletromecânicos.** Itajubá, Abril de 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

- GIAMPAOLO, A. **Gas Turbine Handbook: Principles and Practices.** 2006. 3rd ed. USA. 427p.

- Lora, E. E. S, Nascimento, M. A. R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação.** Editora Interciência, Vol 1 e 2, 2004.

- MARTINELLI JUNIOR, L. C. **Máquinas Térmicas II.** 2002. Panambi. 135p.

- Manual de Instruções do BIG. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br> >> Acessado em 2 de novembro de 2010.

- MENESES, Ernani do Livramento de. **O USO DE TURBINAS A GÁS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PLATAFORMAS.** 2011. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2011.

- MOTA FILHO, Paulo Eduardo Dutra. **ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA COGERAÇÃO A CICLO COMBINADO GÁS/VAPOR.** 2010. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

- PANOSSO, G. C. **Métodos de Simulação para ciclos de Rankine**. 2003. 119p. Dissertação (Mestrado em fenômenos do Transporte), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Orientador: Paulo S. Schneider
- PERA, H., **Geradores de vapor**, Ed. FAMA, São Paulo, 1990.
- TRIGGIA, Attilio Alberto; CORREIA, Carlos Alberto; THOMAS, José Eduardo (Org.). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 267 p.
- VAN WYLEN, et al. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 575 p.
- WEG INDÚSTRIA LTDA. **Centro de treinamento de clientes: Módulo 4/ Geração de energia**. 314p.