

**CENTRO DE INSTRUÇÃO  
ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA  
MARINHA MERCANTE - EFOMM**

**TURBINA A GÁS**

**Por: Clayton Emerick de Oliveira**

**Orientador**

**Prof. Hermann Regazzi Gerke**

**Rio de Janeiro**

**2011**

**CENTRO DE INSTRUÇÃO  
ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA  
MARINHA MERCANTE - EFOMM**

**TURBINA A GÁS**

Apresentação de monografia ao Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como condição prévia para a conclusão do Curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas da Marinha Mercante (APMA).

Por: Clayton Emerick de Oliveira

**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA**

**CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE - FOMM**

**AVALIAÇÃO**

PROFESSOR ORIENTADOR (trabalho escrito): \_\_\_\_\_

NOTA : \_\_\_\_\_

DATA: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois a sua graça e a sua misericórdia tem nos ajudado e nos sustentado a cada dia, agradeço também a minha família que está comigo em todos os momentos, nas alegrias e nas tristezas, especialmente minha esposa Katia e o meu filho Matheus.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus, pois sem ele nada podemos fazer, a sua graça e a sua misericórdia duram para sempre, dedico também a minha esposa Katia e ao meu filho Matheus que são as pessoas mais importantes na minha vida.

## RESUMO

Pretende-se abordar neste trabalho o tema referente à turbina a gás, que é tipicamente um motor de combustão interna do tipo rotativo e é composta basicamente por: compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita; e que durante a sua operação realiza a transformação da energia química de um combustível em energia mecânica que é transformada em potência, potência no eixo ou potência elétrica, dependendo de como e onde ela será utilizada.

Assim como em toda máquina, a turbina a gás apresenta suas vantagens e desvantagens, como por exemplo: a ausência de componentes atritantes e de movimentos recíprocos significa poucos problemas de balanceamento, baixo consumo de lubrificantes e alta confiança, entretanto, a eficiência dos componentes (razão de compressão do compressor) e a temperatura de trabalho são fatores que afetam a performance da turbina.

A evolução tecnológica tem promovido, nos últimos anos, o contínuo aperfeiçoamento desta máquina.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1-Turbina	10
2-Turbina a Gás	12
2.1-Do Funcionamento	12
2.2- Os Ciclos de Funcionamento e suas Variações	15
2.3-O Ciclo Brayton (Joule)	17
2.3.1-O Ciclo de Brayton no Ciclo Fechado	18
2.3.2-O Ciclo de Brayton no Ciclo Aberto	19
2.3.3-Modelo Termodinâmico	19
2.3.4-Aplicações	19
3-Componentes	21
3.1-Compressor	21
3.2- Câmara de Combustão	23
3.3-Turbinas	24
4-Sistema Auxiliar da Turbina a Gás	26
4.1-Sistema de Proteção	26
4.2-Sistema de Ar	27
4.3-Sistema de Partida	28
4.4-Sistema de Óleo Lubrificante de Comando Hidráulico	29
4.5-Sistema de Controle do Fluxo de Ar do Compressor Axial	30
4.6-Sistema de Combustível	31
4.7-Casulo das Turbomáquinas	31
5-Fundamentos da Termodinâmica ligados a Turbina	32
6-Rendimento	33
7-Nova Tecnologia de Turbina a Gás	35
7.1-Turbina a Gás de Fluxo Radial	35

8-Utilizações da Turbina a Gás	36
8.1-Na Produção de Energia Elétrica (Centrais de Turbinas a Gás)	36
8.1.1-Vantagens e Desvantagens	37
8.2-Na Propulsão a Jato	38
8.3-Na Propulsão Naval	38
8.4-Na Co-,geração	40
8.4.1-Definição de Co-geração	40
8.5-Ciclo de Co-geração com Turbinas a Gás	41
8.5.1-Energia na Exaustão das Turbinas a Gás	41
8.5.2-Co-geração com Turbina a Gás	41
CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43



## INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna tem sido utilizados como máquina motriz durante muitos anos e tem contribuído significativamente para o progresso da humanidade. Nos dias atuais a fabricação de motores de combustão interna constitui uma das maiores indústrias do mundo, temos como exemplo a fabricação para automóveis, navios, aviões e pequenas máquinas auxiliares.

Neste tipo de máquina os produtos da combustão são os próprios executores do trabalho e em virtude desta simplificação e do aumento de rendimento dela decorrente, o motor é uma das mais leves máquinas motrizes existentes, justificando a sua utilização tão freqüente nos diversos meios de transporte.

A turbina a gás é uma das máquinas de combustão interna mais antigas e surgiu bem antes do motor de movimento alternativo.

Na turbina a gás que é o objetivo do nosso estudo, a primeira tentativa seria feita para se produzir em larga escala no início do século XX. Em 1905 uma empresa francesa iniciou a produção de uma turbina com 400 HP de potência útil, cuja rotação era de 4250 rpm com taxa de compressão de 4,8 x 1. A primeira turbina a gás, economicamente viável é atribuída a HOLZWORTH em 1911. O início da aplicação de turbina a gás na aviação se deu em 1920, através da utilização de uma turbina simples para acionar um turbo compressor adaptado a um motor de pistões alternativos. No entanto, a grande escalada da turbina a jato na aviação só aconteceu após a segunda guerra mundial.

Desde então tem se registrado um grande impulso no desenvolvimento da tecnologia tanto para as turbinas de aviação, como para as turbinas industriais.

# CAPÍTULO I

## 1-Turbina

Turbina é um equipamento construído para converter energia mecânica e térmica contida em um fluido, em trabalho no eixo.

Os principais tipos encontrados são:

- Turbinas a vapor
- Turbinas a gás
- Turbinas hidráulicas
- Turbinas aeronáuticas
- Turbinas eólicas

A forma construtiva básica é o mesmo para todos os tipos: um rotor dotado de um certo número de pás ou palhetas, ligados a um eixo que gira sobre um conjunto de mancais de deslizamento (mancais de rolamento, por questões de durabilidade não são usados).

As turbinas podem ser usadas para movimentar um outro equipamento mecânico rotativo, como por exemplo uma bomba ou um ventilador, podem também ser utilizadas para a geração de eletricidade quando ligadas a um gerador, tem uma grande aplicação na área de propulsão naval especialmente em navios de guerra que precisam de altas velocidades e também na aeronáutica.

Todos os tipos podem ter uma rotação fixa ou variável, dentro de uma determinada faixa. Contudo, quando são usadas para geração de energia elétrica, a rotação costuma ser mantida num valor fixo para manter a frequência da rede constante.

A principal diferença entre os diversos tipos é o fluido de trabalho. Em decorrência disso, é claro, há outras, tais como a temperatura máxima de operação, a potência máxima, a vazão mássica de fluido, a pressão de trabalho e os detalhes construtivos e dimensões.

As maiores já construídas em termos de dimensões são as turbinas hidráulicas; as que trabalham a maiores temperaturas são as turbinas a gás, e as que são submetidas a maior pressão são as turbinas a vapor.

Todos os tipos possuem aplicação em uma ampla faixa de potência, que pode variar de 300 kw, para acionamento de ventiladores, até 1200 MW, estas últimas em instalações nucleares.

As turbinas têm dois aspectos principais que as caracterizam:

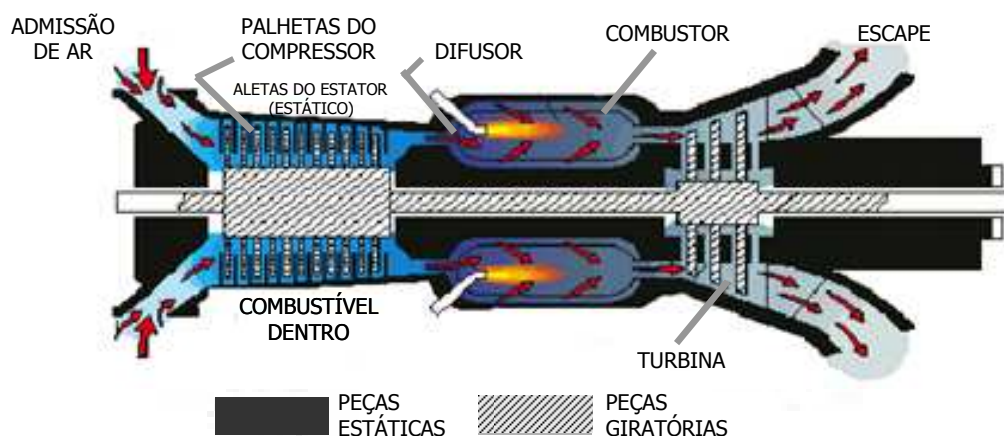
- Potência
- Eficiência

## CAPÍTULO II

### 2-Turbina a Gás

#### 2.1-Do Funcionamento

Como citado anteriormente os principais elementos que a compõem, são: o compressor, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita. O ar admitido no compressor é submetido a uma alta taxa de compressão, sendo a seguir direcionado para a câmara de combustão. O combustível é injetado na câmara de combustão, através dos bicos injetores, formando uma mistura com o ar comprimido, ocorrendo a queima do combustível, inicialmente com a ajuda de uma centelha elétrica. Posteriormente a combustão se auto-sustenta. Esta combustão produz um gás de alta energia (com alta temperatura), atingindo, nas máquinas mais modernas, cerca de 1350 graus Celsius em operação contínua. Os gases à alta temperatura se expandem através da turbina, que transforma a energia térmica da qual estão possuídos, em energia mecânica, imprimindo-lhe um movimento rotativo, que vai acionar o compressor, continuamente, e transformar toda energia excedente em potência mecânica através do seu eixo, e/ou, em empuxo propulsivo, ou uma combinação dos dois.



**Figura 1- Representa os princípios básicos de uma turbina a gás.**

Uma vantagem evidente da turbina a gás é a ausência de peças de movimento alternativo, logo, de componentes atritantes e de movimentos recíprocos, inclusive no compressor, que superpõe sobre esta vantagem a de um fluxo contínuo de ar. A continuidade de ação deste tipo de máquina permite altas velocidades de rotação e a aspiração de grandes quantidades de ar. Lembrando que, são vários os tipos de compressor em uso.

É importante observar que a potência das máquinas de combustão interna está diretamente relacionada com a quantidade de mistura queimada num certo intervalo de tempo, dependendo, portanto, da massa de ar (e combustível) introduzida no sistema. A turbina a gás pode funcionar com velocidades de rotação muito maiores do que os motores, por não ter peças submetidas a movimento alternativo, e o fluxo contínuo, em vez do intermitente utilizado nos motores, permite a obtenção de altas potências com uma máquina de pequeno porte.

Mas o motor alternativo apresenta uma vantagem que não será superada tão cedo: a temperatura (e conseqüentemente a pressão) da combustão pode ser altíssima, pois as peças só ficam a ela submetidas durante um curto intervalo de tempo. Por esta razão, as temperaturas máximas atingidas pelas diversas partes da máquina são muito baixas (somente poucas centenas de graus com raríssimas exceções, entre as quais está a válvula de descarga). Na turbina a gás, máquina de ação contínua, alguns condutos e o empalhamento da turbina (rotor) ficam permanentemente expostos a uma temperatura constante que, em conseqüência fica limitada entre 600 e 1000°C (aproximadamente entre 1000 e 1500°F). Nos motores com ignição por centelha, as temperaturas, que são momentâneas, podem atingir 3000°C (cerca de 5000°F).

O ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento das turbinas a gás denomina-se Ciclo Brayton (Joule) e foi idealizado por George Brayton em 1870, recebendo seu nome em homenagem, e estas turbinas a gás podem funcionar num ciclo aberto – a maioria – ou num ciclo fechado – como em usinas nucleares.

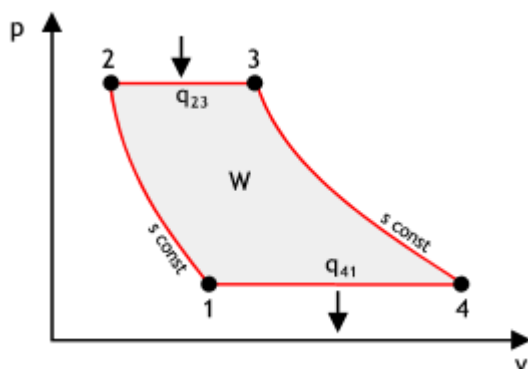


Figura 2 - Ciclo Brayton

Quatro processos compõem o ciclo térmico das turbinas a gás, conforme ilustra a figura. Esses processos foram identificados pela primeira vez por George Brayton e formam um ciclo que recebeu o nome de ciclo Brayton. Todos os motores de combustão interna funcionam com base neste ciclo. Os processos do ciclo Brayton são o seguinte:

- A compressão ocorre entre a admissão e o escape do compressor (Linha 1-2). Durante este processo, a pressão e a temperatura do ar aumentam;
- A combustão ocorre na câmara de combustão onde o combustível e o ar são misturados em proporções compatíveis para que haja uma combustão completa. A adição de calor provoca um grande aumento de volume (Linha 2-3);
- A expansão ocorre a medida que o gás quente é acelerado ao sair da câmara de combustão. Os gases mantêm a pressão constante até entrarem na turbina, onde se expandem ao longo de seus estágios. À medida que os gases se expandem pelos estágios, o espaço existente entre os canais, formado pelas palhetas da turbina, tem que ir aumentando gradativamente para permitir a queda da pressão e o conseqüente aumento do volume dos gases, devido a queda de temperatura (Linha 3-4).
- O escape ocorre através da chaminé do conjunto, com grande queda de volume, permanecendo a pressão constante. (Linha 4-1).

## 2.2-Os Ciclos de Funcionamento e suas Variações

Os principais elementos que compõem uma turbina a gás simples, são: um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina; a turbina a gás simples pode funcionar num ciclo aberto ou num ciclo fechado. Ao adicionar algum outro elemento nestes ciclos como por exemplo um aquecedor, um resfriador, uma câmara de reaquecimento, uma turbina de potência separada (turbina que transmite força para o eixo propulsor) haverá variações destes ciclos básicos.

A turbina de ciclo aberto com turbina de potência separada é conveniente para operação com rotação e cargas variáveis. Tem como vantagem um sistema de partida de menor dimensão, já que só precisa mover o gerador de gás. A desvantagem é que uma mudança de carga pode levar a turbina rapidamente a uma sobrevelocidade.

A variação de potência em uma turbina a gás é obtida pelo controle do fluxo de combustível para a câmara de combustão.

A eficiência pode ser melhorada substancialmente pela redução do trabalho do compressor e/ou pelo aumento do trabalho de expansão.

Se o processo de compressão se dá em dois ou mais estágios, com resfriador entre eles, o trabalho do compressor será reduzido. A potência de saída da turbina pode ser aumentada pela divisão da expansão entre dois ou mais estágios, com reaquecimento do gás entre eles, à temperatura máxima permitida. (Ciclo aberto com resfriador, aquecedor e câmara de reaquecimento).

Em muitas aplicações, pequeno tamanho e baixo custo de capital, são mais importantes que eficiência térmica.

Sem um aquecedor entre o compressor e a turbina, para que uma alta eficiência térmica seja alcançada, uma alta razão de compressão no compressor é essencial.

Os compressores são de deslocamento não-positivo e os de fluxo axial possuem maior eficiência que os centrífugos.

O compressor de fluxo axial é mais inclinado à instabilidade quando operando fora de seu “ponto de operação de projeto”, pois, em rotações bem abaixo desse ponto, a densidade do ar nos últimos estágios é muito baixa, tornando a velocidade do fluxo axial excessiva, contribuindo para que as palhetas se rompam. Violentas vibrações se fazem presentes na partida e em operações a baixa potência.

O problema da instabilidade (vibração) é particularmente severo quando se quer obter uma razão de pressão superior a 8:1 em um compressor. Nesse caso, divide-se o compressor entre duas ou mais seções. A divisão significa separação mecânica, permitindo cada seção trabalhar numa velocidade rotacional diferente, ou seja, cada compressor requer sua própria turbina. (Ciclo aberto com eixo duplo “Twin-Spool”)

Twin-Spool units: Inicialmente usadas para razão de pressão em torno de 10:1 e são convenientes para razões de pressão de pelo menos 20:1.

Triple-Spool units: É desejável para razões de pressão muito altas.

Razões de pressão em torno de 15:1 são obtidas em compressores singelos se vários estágios de lâminas de estator variável são utilizadas.

A principal desvantagem de um ciclo fechado é a necessidade de um sistema de aquecimento externo.

Uma vantagem do ciclo é a possibilidade de uso de alta pressão (e, por isso, alta densidade do gás) durante o ciclo, o que resulta num tamanho reduzido do conjunto compressor / turbina para uma dada potência. Também possibilita a alteração de potência pela mudança do nível de pressão no circuito (ar ou outro gás).

Além das vantagens e menor conjunto compressor / turbina, de não aspirar ar da atmosfera (problemas relativos à filtragem) e de eficiente controle, o ciclo fechado evita erosão nas palhetas da turbina causada pelos produtos da combustão.



## 2.3-O Ciclo Brayton (Joule)

A turbina a gás de combustão contínua discutida na seção 2.2 também pode ser idealizada em um ciclo hipotético. Assim, os processos de compressão e expansão reais serão, idealmente, processos isentrópicos; a combustão à pressão constante do combustível será substituída por uma adição de calor à pressão constante; e o ciclo será completado pela adição de um processo de resfriamento à pressão constante para conduzir o fluido ao seu estado original.

Então no ciclo termodinâmico teremos:

- Compressão isentrópica
- Adição de calor à pressão constante
- Expansão isentrópica
- Rejeição de calor à pressão constante

Assim as eficiências térmicas do Ciclo Otto padrão ar e o Ciclo Brayton padrão ar são governadas pela mesma equação. Mas uma razão de volume, tal como a razão de compressão ou de expansão, não corresponde a volumes físicos na turbina a gás real, a qual opera como uma máquina de fluxo contínuo. Por outro lado, as pressões na turbina a gás não variam; por esta razão é mais conveniente medir a razão de pressão e exprimir a eficiência térmica ( $\eta$ ) em termos deste parâmetro.

É interessante notar que adicionando calor, a pressão constante faz o Ciclo Diesel (mas não o Brayton) menos eficiente que o Ciclo Otto na mesma razão de expansão. No Ciclo Brayton, entretanto, a razão de expansão é constante para cada elemento de calor adicionado, porque os gases podem expandir-se até a pressão atmosférica (no motor a pistão os gases somente podem expandir-se até os limites do volume do cilindro e aí a pressão está muito acima da atmosférica).

Apesar de que a eficiência tanto do Ciclo Otto como do Brayton seja dada pela mesma equação, o motor de ignição por centelha ou o motor de ignição por compressão em geral é mais eficiente que a turbina a gás. A razão para isto é encontrada no processo

de compressão. Este processo no motor de ignição por centelha ou no motor de ignição por compressão é executado por um pistão no cilindro, com perdas mínimas de atrito fluido e turbulência. Na turbina a gás, entretanto, um compressor de fluxo contínuo é empregado, e as perdas são grandes porque as velocidades dos fluidos são altas; se forem empregadas altas rotações de pressão estas perdas, em geral, aumentam. Note-se, também, que uma turbina a gás experimenta uma temperatura contínua, e, portanto um limite máximo baixo deve ser observado (cerca de 1200°F). Se uma alta razão de pressão for usada, a temperatura depois da compressão aproximar-se-á da temperatura limite, e pouco calor poderá ser adicionado e pouco trabalho realizado; assim o Ciclo Brayton é limitado a baixas razões de temperaturas.

É curioso notar que todos os três tipos de motores a combustão (ignição por centelha, a maioria dos motores de ignição por compressão e turbina a gás) têm eficiência padrão ar iguais e expressas pela mesma equação. A turbina a gás opera a razões de pressões baixas devido a uma temperatura máxima ou limite baixa; o motor de ignição por centelha opera em razões médias ditadas pelos limites de detonação do combustível; e o motor de ignição por compressão opera na razão mais alta possível, e limitado pela pressão de combustão.

É conveniente lembrar que a razão de pressão e a razão de expansão são números diferentes para o mesmo motor. Assim, para o ar uma razão de pressão de 7 corresponde a uma razão de volume de cerca de 4.

### **2.3.1-O Ciclo de Brayton no Ciclo Fechado**

Acabamos de discutir o Ciclo de Brayton padrão de ar na seção 2.3, lembrando que ele representa o ciclo básico da turbina a gás.

No Ciclo Fechado (discutido na seção 2.2) o gás é comprimido e, em seguida aquecido pela fonte quente; então, segue para acionar a turbina e finalmente é resfriado pela fonte fria. A fonte quente pode ser originada por queima de qualquer combustível, orgânico ou inorgânico, ou por um reator nuclear. A fonte fria pode ser o ar ambiente, a água do mar ou de rio, ou o espaço.

### 2.3.2-O Ciclo de Brayton no Ciclo Aberto

No Ciclo Aberto (discutido na seção 2.2) não há um resfriador, o gás é o próprio ar ambiente captado frio (temperatura atmosférica) pelo compressor e expelido quente pela turbina – o que é equivalente ao processo de resfriamento pela fonte fria do Ciclo Fechado. Na prática, no ciclo aberto, o aquecedor é substituído por uma câmara de combustão contínua; portanto, não é o ar, mas, sim, os gases de combustão que passam pela turbina e são exauridos para o ambiente.

### 2.3.3-Modelo Termodinâmico

Admite-se um fluxo de massa de regime permanente evoluindo segundo um ciclo.

- Compressão adiabática reversível, isoentrópica:  $S = \text{const}$ ,  
 $Q = 0$ ,  $+W_{\text{compressor}}$ .
- Aquecimento isobárico:  $P = \text{const}$ ,  $+Q_{\text{entra}}$ ,  $W = 0$ .
- Expansão adiabática reversível, isoentrópica:  $S = \text{const}$ ,  $Q = 0$ ,  $-W_{\text{turbina}}$ .
- Resfriamento isobárico:  $P = \text{const}$ ,  $-Q_{\text{sai}}$ ,  $W = 0$ .

### 2.3.4-Aplicações

O ciclo Brayton é muito versátil, e a alta eficiência das turbinas, principalmente a altas temperaturas, o que permite aproveitar bem o conteúdo energético dos combustíveis, aliada a alta rotação, garante um lugar de destaque deste ciclo nos tempos modernos, notadamente para instalações de propulsão em trens, embarcações velozes, submarinos e principalmente aeronaves, ou para instalações de geração de eletricidade, em particular para o aproveitamento de energia liberada de outros sistemas – cogeração.

No caso de reatores nucleares, usa-se o ciclo fechado, e a fonte quente é um fluido passando em outro circuito fechado através do reator, assim, o gás para a turbina e o fluido aquecedor não tem contato entre si, nem com o meio ambiente.

No caso de aeronaves, há que se considerar ainda, o difusor (bocal de admissão) que coleta o ar para o compressor, aproveitando a energia cinética do fluxo e “transformando-a em pressão” (de fato em entalpia de estagnação).

No turbo-hélice, a turbina aciona o hélice propulsor da aeronave (assim como aciona o hélice propulsor no caso de veículos aquáticos) e também aciona o compressor.

No caso do turbo-jato, a turbina aciona apenas o compressor, logo há uma “sobra de energia” muito grande que é usada para dar energia cinética ao fluxo de gases, o qual direcionado por um bocal ejetor na forma de um jato, promove o “empuxo” motriz.

O turbo-fan é um sistema misto hélice / jato para aproveitar o empuxo a jato para altas velocidades, e o empuxo a hélice para baixas velocidades.

Essas aplicações serão vistas com maiores detalhes no Capítulo VII.

## CAPÍTULO III

### 3-Componentes

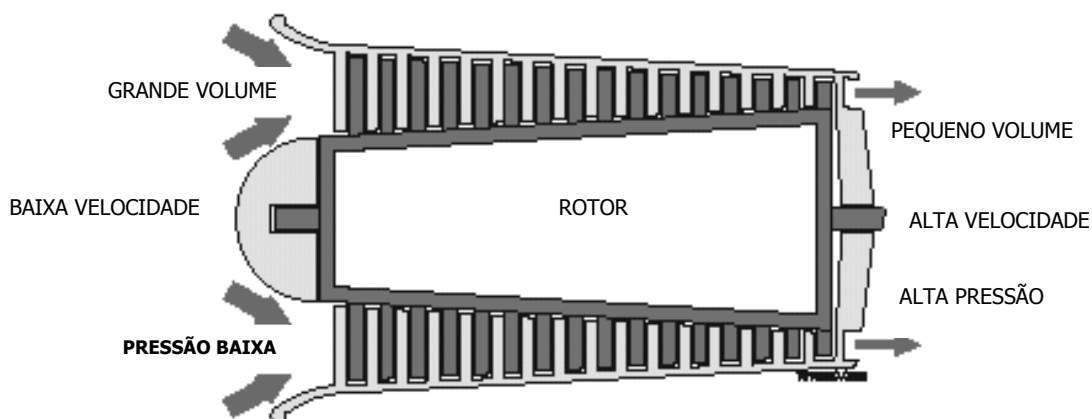
#### 3.1-Compressor

A configuração básica do turbo compressor pode variar de acordo com o projeto, ou seja, varia o número de estágios, a arquitetura e o arranjo do projeto, mas a operação básica de todas turbinas a gás segue o mesmo princípio, o qual está sintetizado no ciclo Brayton.

- Conduitos Convergentes e Divergentes

Os compressores que compõem as turbinas a gás usam condutos convergentes e divergentes para gerar as altas pressões necessárias ao bom funcionamento dos turbo-compressores. O ar ao escoar pelos condutos convergentes perde pressão, enquanto que nos condutos divergentes a pressão aumenta.

- Compressor de fluxo axial



**Figura 3 - Compressor de fluxo axial**

A figura mostra um compressor de fluxo axial que transforma um grande volume de ar com baixa pressão e baixa velocidade, em um pequeno volume de ar de alta pressão e alta velocidade.

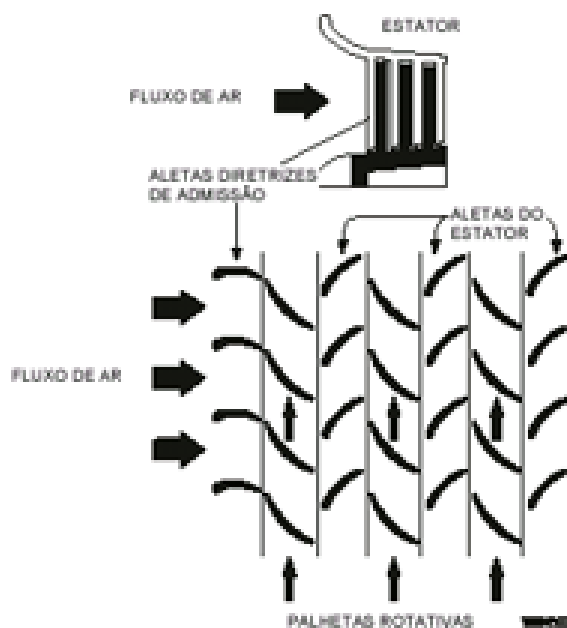
Uma aparente contradição na operação do compressor de fluxo radial é que a alta pressão é gerada embora a forma convergente geral aparentaria causar uma pressão de saída mais baixa. A pressão de saída é aumentada pela divergência em cada seção estática interestágio.

As palhetas rotativas do compressor em cada estágio estático aumenta a velocidade do ar, está velocidade é transformada em pressão nos estágios fixos.

- Alhetas de admissão

A função das alhetas fixas de admissão é alinhar o fluxo de ar para a primeira seção de palheta rotativa, onde a velocidade aumenta pela adição de energia.

A seção seguinte de alheta do estator é divergente, fornecendo um aumento em pressão estática e uma redução na velocidade do ar. O fluxo de ar então entra no segundo estágio a uma velocidade e pressão iniciais mais elevadas do que na entrada para o estágio anterior. Cada estágio seguinte irá fornecer um aumento de velocidade e pressão estática até a faixa de pressão e velocidade desejado seja alcançada.



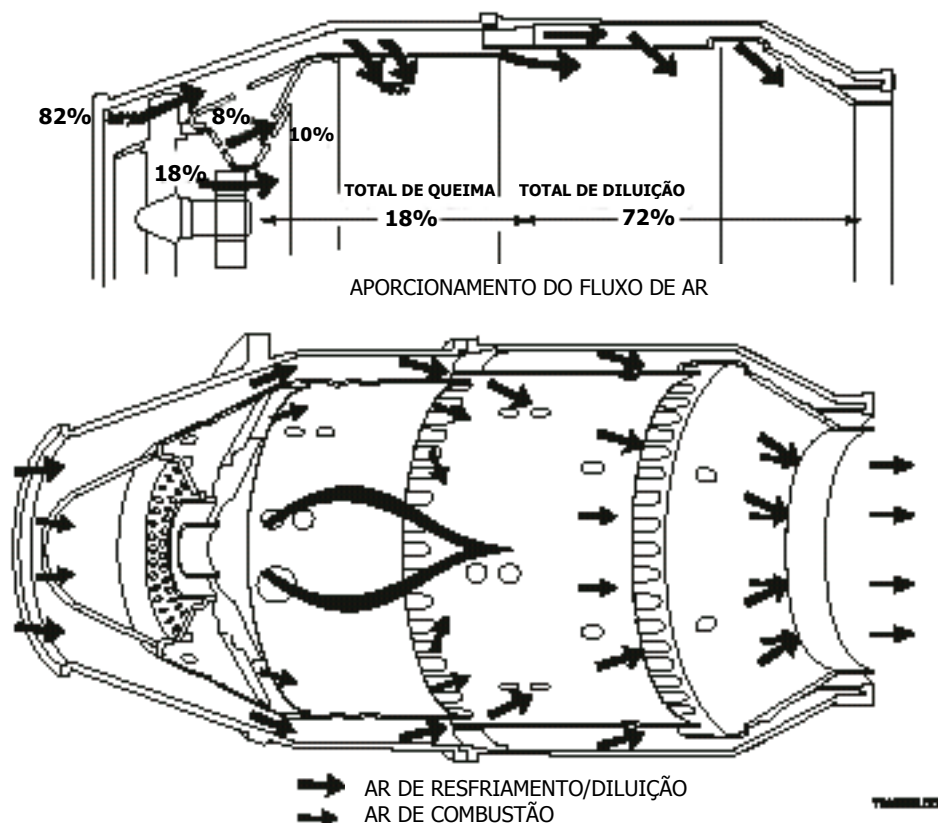
**Figura 4 - Alhetas fixas de admissão**

A função básica das alhetas fixas do compressor é de direcionar o fluxo de ar, com ângulo correto, para os canais formados pelas palhetas rotativas.

Alhetas fixas com geometria variável permitem um melhor desempenho do compressor em regimes de rotações variáveis. Estas alhetas de geometria variável giram

em torno de seu próprio eixo, permitindo controlar o fluxo de ar que passa entre seus canais, aumentando ou diminuindo a área de admissão e escape dos canais.

### 3.2 Câmara de Combustão



**Figura 5 – Padrões de Estabilização de Chama e Fluxo Geral**

A Câmara de combustão tem por finalidade queimar uma grande quantidade de combustível fornecida pelos injetores, com uma grande quantidade de ar proveniente do compressor e liberar o calor de maneira que o ar é expandido e acelerado para dar uma corrente suave e uniforme do gás quente, necessária a turbina. Tudo isso com a mínima perda de pressão e a máxima eficiência.

É um componente crítico porque deve:

- Ter uma operação confiável em temperaturas extremas;
- Proporcionar uma distribuição adequada de temperatura à entrada da turbina;
- Emitir a mínima quantidade de poluentes durante a sua vida útil.

Existem vários tipos de câmara de combustão de turbina a gás, nas turbinas mais modernas a câmara de combustão mais utilizada é a do tipo “câmara anular”, a “câmara caneco” foi o primeiro tipo de câmara utilizada em turbina a gás.

### **3.3-Turbinas**

Turbina é um equipamento construído para converter energia mecânica e térmica contida em um fluido, em trabalho no eixo.

Os engenheiros projetistas das turbinas enfrentam alguns problemas, entre eles, precisam dimensioná-la e qualificar o material empregado em sua construção, de modo que possa resistir a altos níveis de temperatura, à variações de temperatura bruscas e elevadas, à altas tensões mecânicas devido a força centrífuga, à resistência à corrosão para enfrentar as partículas de sal (cloreto de sódio) que penetram em suspensão no ar e o resíduo de enxofre do combustível, a resistência à oxidação face ao grande volume de ar (oxigênio) que flui a altas temperaturas, a resistência à fadiga devido as vibrações induzidas e finalmente a capacidade de ser usinável.

Todos estes fatores combinados tornam o projeto bastante complexo e a solução foi obtida através de ligas especiais de níquel chamadas NIMONIC.

Cada estágio da turbina compreende uma fiada de palhetas fixas (expansores) e uma fiada de palhetas móveis.

O princípio de funcionamento é o de impulsos e reação. Na impulsão, o fluxo de gases muda de direção fornecendo energia cinética à turbina; na reação, suas palhetas de forma aerodinâmica, são dispostas em dutos convergentes e inclinados, de maneira a transformar a energia térmica dos gases em energia cinética. A reação ao acréscimo de velocidade, é através da componente tangencial à roda de palhetas móvel, transformada em velocidade do rotor ou trabalho mecânico. Portanto 50% da energia cedida pelos gases é sob forma de impulsão e os outros 50% sob forma de reação.



Na saída da câmara de combustão e na saída de cada roda de palhetas móveis, temos seções de expansores, que transformam a energia térmica dos gases em velocidade de escoamento. As palhetas fixas que formam estes expansores têm forma aerodinâmica e são ocas e furadas para permitir o seu resfriamento pelo fluxo de ar; só assim resistem às altas temperaturas.

O rendimento obtido nas turbinas é da ordem de 90 a 92%.

Os discos que recebem e alojam as palhetas são forjados e necessitam também de um bom resfriamento, em ambas as faces.

A fixação das palhetas fixas e móveis é idêntica aos compressores e utiliza três processos:

- a) Fixação por pino e trava
- b) Árvore de natal
- c) Rabo de andorinha.

As duas últimas são as mais utilizadas porque oferecem mais segurança.

Quando a turbina está fria, observa-se uma folga no alojamento das palhetas, para permitir a dilatação do material quando em operação.

O tope das palhetas é frenado para melhorar a vibração e reduzir a fuga dos gases pelos topes.

O balanceamento das turbinas é preciso e fundamental. O balanceamento é eletrônico e imprescindível, inclusive após a execução de reparo nas palhetas móveis.

## 4-Sistemas Auxiliares de Turbina a Gás

Os seguintes sistemas auxiliam na operação da turbina a gás:

- 1-Sistema de proteção
- 2-Sistema de ar
- 3-Sistema de partida
- 4-Sistema de óleo lubrificante e óleo de comando hidráulico
- 5-Sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial
- 6-Sistema de combustível
- 7- Casulo das turbomáquinas

### 4.1-Sistema de Proteção

- ◆ **Sensores de vibração e temperatura dos mancais.** O eixo do conjunto gerador de gás (GG) e o eixo da turbina de potência (PT) são apoiados em mancais radiais e axiais (escora) do tipo pastilhas deslizantes (tilting pads bearings) ou de rolamentos (ball bearings), sendo esse último mais aplicado nos geradores de gás aeroderivados. Nesses mancais são feitas monitorações de vibração radial através de sensores por deslocamento e aceleração (VEs), sensores de deslocamento axial (ZEs). A monitoração de temperatura é feita nos mancais de escora e nos drenos de óleo dos mancais radiais utilizando sensores tipo termorresistência, RTDs (TEs).
- ◆ **Sensores de temperatura dos gases gerados.** Constitui de termopares normalmente instalados entre a exaustão da turbina GG e a admissão da turbina PT, onde recebem a denominação de termopares T4 ou T5. Em algumas turbinas do tipo industrial porte pesado (NUOVO PIGNONE) esses termopares são instalados na exaustão da turbina de potência, onde recebem a denominação de termopares T6. A monitoração dessa temperatura é feita individualmente para cada termopar, gerando uma temperatura média calculada. Essa monitoração é de extrema importância para a vida útil da turbina, sendo um item de limitação na operação.
- ◆ **Sensores de velocidade.** Utilizando sensores magnéticos (SEs) montados sobre

engrenagens instaladas nos eixos GG e PT, as monitorações das velocidades GG (NGG) e PT (NPT) são itens de limitação na operação da turbina. No eixo da turbina PT, além dos sensores normalmente instalados, são utilizados também sensores reservas de emergência de sobrevelocidade (backup overspeed), pois a turbina PT é uma turbina livre, portando aumentando as necessidades de monitoração de sobrevelocidade.

## 4.2-Sistema de Ar

O sistema de ar das turbinas normalmente se divide em 5 subsistemas:

- ◆ **Sistema de filtragem de ar de admissão para o gerador de gás.** Considerando que o ar succionado é utilizado no ciclo de funcionamento da turbina a gás com vários propósitos, a vida útil bem como o desempenho da turbina depende necessariamente da eficiência do sistema de filtragem. Esse sistema normalmente é composto de um casulo (alojamento) com 3 (três) a 5 (cinco) estágios de filtragem, juntas de expansão, duto de admissão com silenciadores e estabilizadores de fluxo. 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. Nesses sistemas são instalados indicadores, transmissores e sensores de pressão (PDIs, PDTs, PDSH, PDSHH) para monitoração e proteção através de sinal de alarme (normalmente em torno de 5" H<sub>2</sub>O) ou sinal de parada (normalmente em torno de 7" H<sub>2</sub>O).
- ◆ **Sistema de ar de combustão.** O ar admitido após filtrado é comprimido e passa por um difusor de descarga alcançando a câmara de combustão onde ocorrerá a mistura ar e gás combustível que será queimada. A quantidade de ar utilizada na combustão é de aproximadamente 25% que também é denominada de ar primário.
- ◆ **Sistema de ar de referência para controle.** Uma tomada de ar proveniente da

descarga do compressor ar (PCD ou P2) é direcionada para ser utilizada como referência no sistema de controle de combustível e/ou sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial (Atuadores das VIGVs, das válvulas de sangria).

- ◆ **Sistema de ar de resfriamento.** Considera-se que aproximadamente 75% do ar admitido e comprimido é utilizado como resfriamento (ar secundário) da parede interna da câmara de combustão onde grande parte dessa massa de ar recebe energia da combustão e se transforma em gases a alta temperatura (fluido motriz) que se expandem através das turbinas, transformando a energia térmica em energia mecânica. Através de tomadas de ar internas e externas, parcelas de ar são direcionadas para resfriar as palhetas estatoras (vanes) dos primeiros estágios GG e as faces dos discos das rodas das turbinas.
  
- ◆ **Sistema de ar de selagem dos mancais.** Através de tomadas de ar internas e externas proveniente da descarga do compressor de ar (PCD ou P2), parcelas de ar são direcionadas para pressurização dos selos de labirinto dos mancais para evitar a fuga de óleo lubrificante dos mancais para as seções internas de compressão, combustão e turbinas, evitando assim formação de pontos quentes causados pela queima desse óleo e conseqüentemente sérios danos às partes internas da turbina.

### 4.3-Sistema de Partida

Os sistemas de partida têm a finalidade de retirar o conjunto GG da inércia, proporcionando um fluxo de ar para purga GG, PT, duto de exaustão e recuperador de calor (WHRU) quando utilizado. Após o ciclo de purga é iniciada a ignição seguida da combustão, onde com a sustentação da rotação pelo motor de partida e com incremento de combustível, o torque no eixo do motor vai reduzindo e a velocidade aumentando. Assim segue até o ponto em que o ciclo de funcionamento gere energia suficiente para se auto-sustentar, nesse ponto o sistema de partida é desacoplado e o motor de partida é desligado.

Os sistemas de partida utilizados podem ser dos seguintes tipos:

- ◆ **Elétrico.** Utiliza um motor elétrico cujo suprimento é feito através de um variador

de frequência (VFD) que controla a velocidade do motor através da variação de frequência. Pode ser utilizado também motor elétrico com duas velocidades, através de alteração dos pólos na gaveta de comando do motor.

- ◆ **Hidráulico.** Utiliza um motor hidráulico cujo fluido motriz é oriundo de uma unidade hidráulica a parte.
- ◆ **Eletro-hidráulico.** Utiliza um motor elétrico para acionar um conversor de torque hidráulico ou uma bomba hidráulica que descarrega óleo a alta pressão acionando uma turbina hidráulica ou motor hidráulico.
- ◆ **Pneumático.** Utiliza uma turbina cujo fluido motriz é o gás natural ou ar comprimido.

Em todos os sistemas citados, o acoplamento entre o sistema de partida e o eixo do conjunto GG é feito através de um conjunto mecânico com catracas denominado embreagem livre, cujo acoplamento e desacoplamento é feito automaticamente através de força centrífuga.

#### **4.4-Sistema de Óleo Lubrificante de Comando Hidráulico**

Os sistemas de óleo lubrificante têm a finalidade de suprir óleo tipo mineral (turbinas industriais de porte leve e pesado) ou tipo sintético (geradores de gás aeroderivados), limpo, a uma determinada temperatura, pressão e vazão para resfriar e lubrificar os mancais da turbina, mancais e engrenagens da caixa de acessórios, mancais e engrenagens das caixas multiplicadoras ou redutoras e mancais dos compressores centrífugos de gás e dos geradores, durante partida (pré-lubrificação), operação e parada (pós-lubrificação). Em algumas turbinas, têm também a finalidade de suprir óleo de comando hidráulico para o atuador das válvulas de sangria (Bleed Valves), atuador das palhetas variáveis guias de entrada (VIGVs) e atuador da válvula dosadora de combustível.

Os sistemas são equipados com reservatório, bombas (principal mecânica, pré-lubrificação CA e pós-lubrificação CC, hidráulica), filtros dúplex, resfriadores dúplex,

válvulas controladoras de pressão e temperatura, válvulas de bloqueio, segurança e retenção, indicadores, sensores e transmissores de pressão, temperatura e nível.

#### **4.5-Sistema de Controle do Fluxo de Ar do Compressor Axial**

Esse sistema de controle tem a finalidade de ajustar a vazão de ar do compressor axial da turbina de acordo com sua condição operacional, com os seguintes propósitos:

- ◆ Evitar danos causados por efeitos aerodinâmicos (STALL e SURGE) em baixas rotações.
- ◆ Controlar o fluxo de ar na admissão do compressor axial, mantendo ajustada a sua curva de desempenho com a curva do sistema (oferta de ar).

O compressor é projetado para operar com alta eficiência em altas rotações, que é a situação normal de operação. Nas condições de baixas rotações a faixa operacional estável é muito estreita, podendo sair dessa faixa e entrar na zona de instabilidade operacional onde ocorre efeitos aerodinâmicos danosos ao compressor, que é o descolamento da camada limite que envolve as palhetas e ondas de choque. O primeiro, conhecido como o "STALL", provoca o bloqueio do fluxo ar e se inicia nos primeiros estágios. O segundo, conhecido como "SURGE", são sucessivas inversões e reversões do fluxo quando o compressor atinge a condição de vazão mínima que corresponde a máxima energia (HEAD) para uma determinada rotação, provocando os choques das massas de ar e conseqüentemente vibrações a níveis de danificar o compressor.

O surge nos compressores axiais é evitado através da utilização de uma ou mais válvulas de sangria (bleed valve) que proporcionam a sangria de ar de alguns estágios ou da descarga do compressor axial para o duto de exaustão da turbina.

Esse sistema utiliza os seguintes componentes:

- ◆ Atuador hidráulico das VIGVs.
- ◆ Anéis atuadores das VIGVs.
- ◆ Estatores com palhetas guias variáveis de entrada (VIGVs).
- ◆ Atuador hidráulico ou pneumático das válvulas de sangria.
- ◆ Válvulas de sangria (Bleed Valve).

#### 4.6-Sistema de Combustível

O sistema combustível da turbina tem a finalidade de suprir diesel, gás ou querosene limpo a determinada pressão, temperatura e vazão através do coletor de distribuição de combustível com os bicos injetores para a câmara de combustão. O sistema dosa automaticamente o combustível durante a partida, aceleração, operação normal, desaceleração e comutação.

O sistema de controle recebe os sinais de NGG, NPT, T5, T1, referência da junção fria, sinal de retorno da dosadora de combustível (feedback) e ponto de ajuste NGG ou NPT e os fornece para o controlador de combustível. O controlador de combustível processa esses sinais e gera um sinal de saída para um atuador que posicionará a válvula dosadora de combustível fornecendo para a câmara de combustão a vazão de combustível requerida durante toda a etapa de funcionamento da turbina.

O sistema é composto por válvulas de bloqueio automáticas denominadas primária e secundária, válvulas solenóides de comando e alívio, válvulas controladoras de pressão e vazão, sensores e transmissores de pressão e temperatura, ignitores e coletor de gás e diesel com os bicos injetores.

#### 4.7-Casulo das Turbomáquinas

O casulo é uma estrutura de projeto modular, composta por painéis de aço removíveis com capacidade de isolamento térmico e acústico. Possui portas de acesso e pontes rolantes para movimentação da turbina, compressores e geradores durante manutenções. É pressurizado para manter a turbomáquina isolada da atmosfera externa.

Possui um sistema de ventilação/pressurização equipado com ventiladores, abafadores (dampers) e sensores de pressão diferencial (PDSL, PDSLL). Possui também um sistema de segurança interno que inclui sensores de gás, UV, de temperatura e sistema de extinção de incêndio (CO<sub>2</sub>).

Nas laterais são instalados painéis com instrumentos para monitoração e proteção.

**Nota:**

Em alguns projetos os compressores de gás não são protegidos por casulos.

## CAPÍTULO IV

### 5-Fundamentos da Termodinâmica ligados a Turbina

Como já vimos, o ar ao escoar-se pela turbina sofre variações de pressão e velocidade. Essas variações exigem um tamanho e forma adequada de dutos, através dos quais se processa o escoamento. Em síntese a aerodinâmica é chamada a prestar sua colaboração. Assim, onde há conversão de velocidade em pressão precisamos de um duto de forma divergente e reciprocamente precisamos de um duto convergente para transformar energia de pressão em cinética. Estas formas, entretanto, aplicam-se quando a velocidade do fluido em escoamento é sub-sônica ou no máximo igual à velocidade do som. Para velocidades superiores, as coisas mudam e precisamos, por exemplo, de um duto convergente-divergente para transformar energia de pressão em energia cinética.

Assim o projeto dos dutos, expansores e palhetas, são de especial importância para um bom rendimento da máquina. Qualquer turbilhamento na corrente fluida gera grandes perdas de eficiência e vibrações que podem levar a ruptura estrutural da máquina trazendo em consequência sérios acidentes.

Normalmente encontra-se maior dificuldade na definição das formas divergentes, onde a probabilidade de turbilhamento é muito maior.

O processo termodinâmico que ocorre no ciclo da turbina baseia-se fundamentalmente nas leis de Boyle e Charles, aplicada aos gases perfeitos. Assim,  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$  é a equação que se aplica em cada estágio do ciclo para medir as variações de pressão, volume e temperatura.



## CAPÍTULO V

### 6-Rendimento

O rendimento da turbina a gás está ligado diretamente aos máximos valores de temperatura dos gases, que se conseguir na saída da câmara de combustão. Esta temperatura será denominada de PTET (Power Turbine Enter Temperature). Quanto maior for a PTET, maior será a energia cinética disponível para ser transformada em trabalho nas palhetas da turbina. O grande problema tecnológico atual é obter-se um tipo de material que resista a essas temperaturas, que são da ordem de 2000°C. Esta temperatura pode ser aumentada em função do débito de combustível que se queima na câmara de combustão. Através de um sistema de resfriamento de palhetas, ciscos e diafragmas, bem como superfícies de irradiação de calor e ventilação da carcaça do isolamento acústico, tem-se obtido condições para que os materiais existentes suportem de 1500°C a 2000°C.

Outros componentes afetam o rendimento; o compressor, a turbina, os dutos, o resfriamento entre estágios de compressão.

Quanto mais eficiente é um compressor, maior é a sua pressão de saída para um mesmo trabalho recebido em seu eixo. As compressões mais eficientes são as isotérmicas e exigem resfriadores entre os estágios.

Isso torna a instalação muito complexa e experimentalmente mostrou ser pouco aconselhável.

Da mesma forma na turbina, obtém-se maior eficiência, quanto maior for o trabalho mecânico por ela fornecida para uma mesma energia cinética recebida.

Com relação aos dutos, passagens e carcaças, há perdas de energia por atrito no escoamento, condução de calor para o exterior por deficiência do isolamento térmico e turbulência no crescimento de dutos de forma diferente do ideal.

Na turbina Olympus TM3B, 2/3 do trabalho, por ela produzido é usado para movimentar os seus compressores. Temos, portanto um rendimento ainda baixo. Além disso, em função das limitações do material somos obrigados a diluir a mistura ar combustível a proporções de 250kg de ar para 1kg de combustível.

## CAPÍTULO VI

### 7-Nova Tecnologia de Turbina a Gás

#### 7.1-Turbina a Gás de Fluxo Radial

A viabilidade de uma nova tecnologia de turbina a gás foram demonstradas por pesquisas de engenheiros do Instituto de Pesquisas do Sudoeste, nos Estados Unidos. Eles construíram uma turbina de fluxo radial, que é mais resistente, simples e barata do que as turbinas convencionais, além de requerer menor manutenção.

A maioria das turbinas industriais modernas, em operação ao redor do mundo, são máquinas tecnicamente muito complexas, com inúmeras partes móveis e sofisticados sistemas de lubrificação e controle eletrônico. A sofisticação dessas turbinas exige que a manutenção seja realizada por funcionários do próprio fabricante. Estas turbinas a gás são do tipo fluxo axial, por possuírem um compressor de fluxo axial.

Já a nova turbina é baseada no conceito de ciclo aberto, com um fluxo inteiramente radial, sendo formada por três componentes principais: um compressor centrífugo, uma câmara de combustão de fluxo radial e uma turbina radial de elevado impulso. O compressor e a turbina são montados em um único disco rotativo, enquanto que a câmara de combustão e os bocais são montados em um disco estacionário em posição oposta ao disco rotativo.

"A turbina a gás inteira consiste de apenas dois componentes relativamente fáceis de serem fabricados. Como há apenas uma parte móvel, os custos de fabricação, manutenção, reparo e reposição são muitos baixos", afirma o coordenador do trabalho, Dr. Klaus Brun.

## **CAPÍTULO VII**

### **8-Utilizações da Turbina a Gás**

#### **8.1-Na Produção de Energia Elétrica (Centrais de Turbinas a Gás)**

A turbina a gás é uma forma de motor térmico que produz trabalho a partir de um fluxo contínuo de gases quentes provenientes da queima contínua de um combustível.

A utilização deste tipo de equipamento tem vindo a aumentar devido à variedade de combustíveis que pode queimar e da facilidade com que se pode trocar um combustível para outro sem interrupção de serviço.

São normalmente utilizadas em sistemas de média e de grandes dimensões, para potências desde os 40KW até aos 250 MW.

A turbina a gás, como já foi dito muitas vezes ao longo do nosso trabalho, é um conjunto composto por:

- 1) Admissão de ar;
- 2) Compressão de ar;
- 3) Câmaras de combustão;
- 4) Turbinas e;
- 5) Sistemas de exaustão

Quando o compressor é acionado, seja pelo motor de partida ou durante a operação da máquina pela turbina, ele aspira o ar atmosférico, comprimindo-o e direcionando-o para a câmara de combustão onde o combustível misturado com uma parte do ar proveniente do compressor é queimado, resultando; num fluxo contínuo de ar.

Esse fluxo contínuo de gás de combustão é expandido na turbina de expansão, que extrai do mesmo a energia que permite acionar tanto o compressor da turbina a gás como o equipamento a este acoplado (gerador) produzindo assim energia elétrica.

O excesso de ar (que não foi misturado com o combustível) é utilizado no arrefecimento dos componentes das áreas quentes da turbina a gás (como o rotor) e posteriormente este fluxo é misturado aos gases de combustão provenientes da turbina e a seguir são dirigidos para o sistema de exaustão.

### **8.1.1-Vantagens e Desvantagens**

As principais características que representam vantagens são:

- Fácil manutenção implicando menores tempos de paragem;
- Arranque relativamente rápido;
- Grande viabilidade e baixa poluição ambiental;
- Unidades compactas e de pequeno peso;
- Não necessita de vigilância constante e;
- Disponibiliza energia térmica a temperaturas elevadas (500°C - 600°C).

As turbinas a gás equivalem a geralmente 1/4 em peso e 1/7 em volume quando comparados com os motores alternativos.

Como desvantagens tem-se:

- Utilização menos atrativa em processos com poucas necessidades térmicas e;
- Tempo de vida útil relativamente curto.

## 8.2-Na Propulsão a Jato

O piloto de testes da Força Aérea Real Frank Whittle inventou o motor a jato em 1937.

No início a idéia de Frank Whittle quando ele apresentou pela primeira vez na década de 20 foi rejeitada pela Força Aérea, rejeição essa que logo foi superada e a Força Aérea Real acabou contribuindo para as coisas mudarem.

O protótipo de Whittle podia propulsar 1.240 libras, uma fração da potência do jato moderno. Mesmo assim, a invenção marcou uma dramática diferença nos motores de combustão interna que impulsionavam os aviões mais rápidos da era.

O que os fazem diferentes então?

- Os motores dos jatos com turbinas de gás queimam o combustível pressurizado, causando a expansão do ar e fazendo girar a turbina - o que cria a propulsão.
- Os motores de combustão interna são muito semelhantes, exceto que o combustível pressurizado é queimado em pequenas explosões controladas dentro do motor.

A grande diferença entre os dois é o razão potência-peso. Os motores de reação proporcionam uma potência incrível comparada com o peso do aparelho.

## 8.3-Na Propulsão Naval

O nome mais adequado para esse tipo de propulsor é "motor de combustão interna". Porém, os norte-americanos popularizaram o termo "turbina a gás" (*gas turbine*). A propulsão através da turbina a gás nada mais é que a adoção de um motor a jato acoplado num eixo naval, girando um hélice. Os britânicos começaram a trabalhar em turbinas a gás na segunda metade da década de 1940 e lançaram a primeira embarcação do mundo movida por essa nova propulsão em 1953, o HMS *Grey Goose*.

Na década seguinte já se projetavam navios de grande porte exclusivamente movidos por turbina a gás.

Com algumas exceções, quase todas as turbinas a gás utilizadas em navios são "marinizadas" a partir de motores aeronáuticos (aeroderivadas). Porém, para atender requisitos específicos, algumas alterações são efetuadas. Uma delas é a mudança da câmara de combustão. Por utilizar óleo diesel ao invés de querosene de aviação as câmaras de combustão das turbinas navais apresentam um projeto diferenciado. Em outros casos o material das palhetas do compressor é diferente (feitas de aço nos motores navais e de alumínio nos aviões) e a introdução de um compressor de baixa pressão é necessária.

A utilização de turbinas a gás também implica numa outra mudança. Como elas não podem ser revertidas, os navios equipados somente com esse tipo de propulsão devem possuir câmbio de reversão ou hélice de passo controlável.

Dentre as características principais de desempenho desse tipo de propulsão destacam-se a boa relação peso/potência. Por essa razão, as turbinas a gás atendem tanto a embarcações pequenas como *hovercrafts* e aerobarcos (relação de 100HP por tonelada), escoltas (relação entre 10 e 15 HP por tonelada) e até navios-aeródromos (relação de 5 HP por tonelada). A grande aceleração inicial (uma Kortenaer acelera de 0 a 30 nós em cerca de 75 segundos) também é um atrativo para esse tipo de propulsão, pois com a turbina a vapor era necessário esperar que a pressão das caldeiras atingisse um nível mínimo desejado. Porém, este ótimo desempenho tem um custo. O consumo específico de combustível é relativamente alto. Por este motivo algumas marinhas decidiram adotar turbinas a gás somente para velocidades altas (acima de 18 nós), utilizando um outro tipo de propulsor (p. e. motores diesel) para velocidades baixas.

A introdução das turbinas a gás permitiu uma redução do espaço ocupado quando comparadas com as instalações das casas de máquinas das turbinas a vapor e suas caldeiras. Houve também uma economia em peso. De certa forma, isto trouxe problemas para os projetistas navais da época em que foram introduzidas, pois as pesadas instalações antigas garantiam o equilíbrio dos navios, principalmente quando as grandes antenas de radar traziam peso cada vez maior para as partes mais altas.

No Brasil, a MB passou a contar com navios movidos por turbinas a gás a partir da década de 1970, quando começaram a chegar as fragatas classe Niterói. Até então, todas as demais escoltas eram movidas por turbinas a vapor ou motores diesel. Hoje, a turbina a gás equipa quase todas as escoltas da Marinha, com exceção do contratorpedeiro Pará. Além das Niterói (que possuem duas turbinas Olympus para altas velocidades), a MB possui a classe Inhaúma, equipada com uma única turbina LM-5200 por corveta e as Tipo 22, com um par de Olympus e outro de Tyne.

Resumidamente as principais vantagens da turbina a gás na propulsão são:

- São mais leves do que qualquer outro tipo de máquina;
- Instalação simples;
- Ocupam menor espaço;
- Partida rápida, mesmo em baixa temperatura;
- Aceleração rápida, atendendo as variações de carga;
- Produzem menor vibração;
- Menor manutenção;
- Menor consumo de óleo lubrificante.

## **8.4-Na Co-geração**

### **8.4.1-Definição de Co-geração**

A co-geração é a produção simultânea de 2 formas de energias úteis através de uma única fonte de energia, como o gás natural, o GLP, a biomassa e etc. A vantagem principal, e inicial, é o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia nas formas citadas.

A aplicação de co-geração mais utilizada é a produção de energia elétrica e energia térmica que normalmente se dá através de um grupo gerador e um chiller por absorção.



As formas de energia úteis mais frequentes são a energia mecânica e a térmica. A energia mecânica pode ser utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica. A energia térmica é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor ou na produção de frio.

A eficiência de um sistema de co-geração pode chegar a 92%, ou seja, rejeita apenas 8% da energia disponível no combustível.

A figura abaixo demonstra essa eficiência

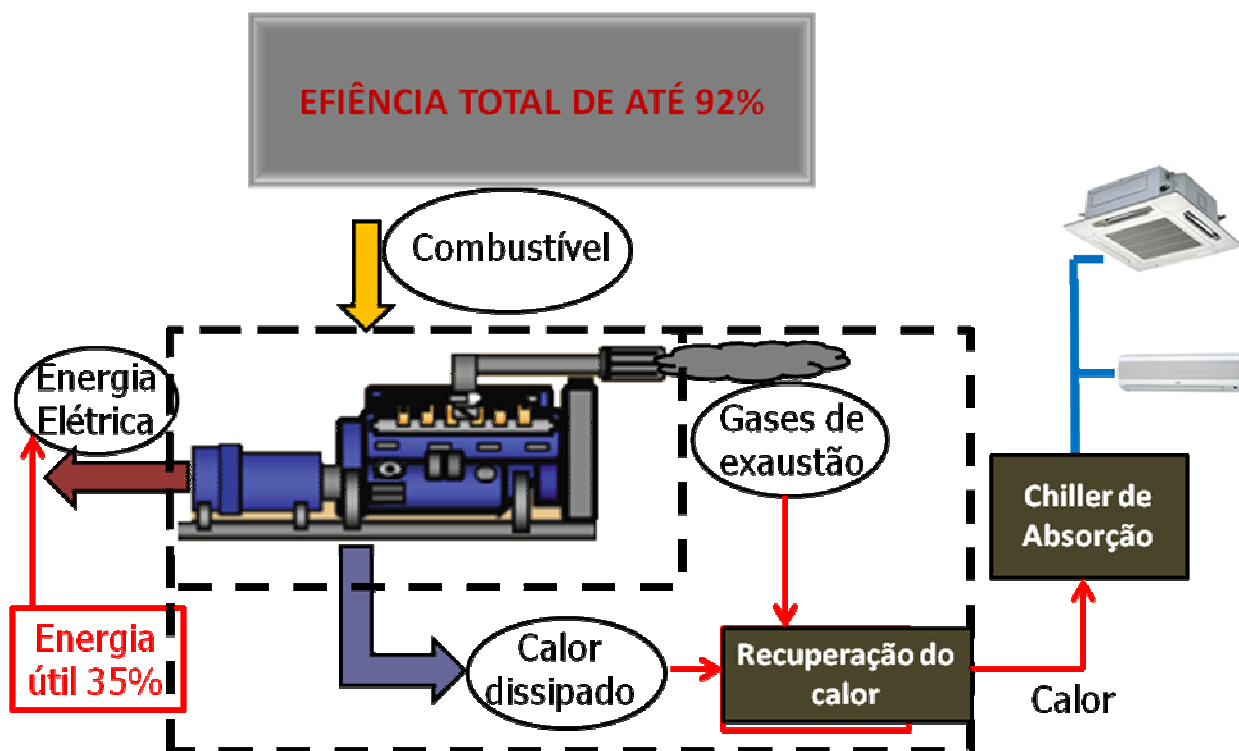


Figura 6

## **8.5-Ciclo de Co-geração com Turbinas a Gás**

### **8.5.1-Energia na Exaustão das Turbinas a Gás**

Na saída da turbina a gás, os gases de exaustão apresentam ainda uma temperatura relativamente elevada, da ordem de 380 a 600°C. Estes gases possuem um elevado conteúdo energético, da ordem de 50 a 70% da energia contida no combustível.

A co-geração se baseia no aproveitamento de parte desta energia térmica. Dependendo das características da carga térmica, o aproveitamento pode ser maior ou menor. Os processos que utilizam temperaturas mais baixas podem aproveitar mais energia residual dos gases de exaustão.

Os usos mais freqüentes para esta energia são a utilização dos gases quentes para secagem, geração de vapor através de uma caldeira de recuperação, aquecimento de fluido térmico, condicionamento ambiental, etc.

### **8.5.2-Co-geração com Turbina a Gás**

Corresponde a uma instalação de co-geração onde uma turbina a gás aciona um gerador que produz energia elétrica (já visto na seção 7.1) que alimenta a fábrica que hospeda a instalação. Os gases quentes da saída da turbina produzem vapor em uma caldeira de recuperação que alimenta a fábrica com esta utilidade.

As figuras abaixo demonstram exemplos de co-geração com turbina a gás:

## Turbina a Gás: Energia Elétrica + Vapor

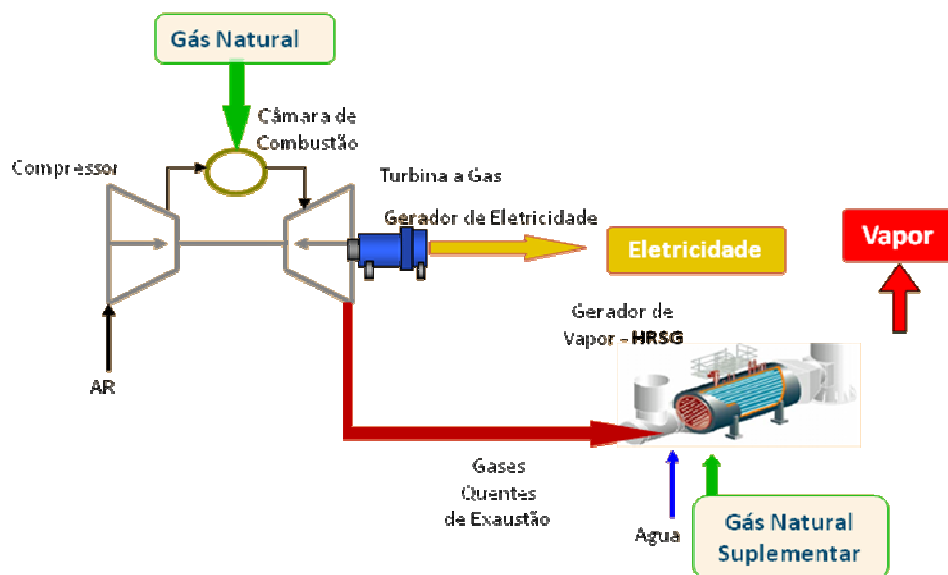


Figura 7

## Turbina a Gás: Energia Elétrica + Gases de Exaustão

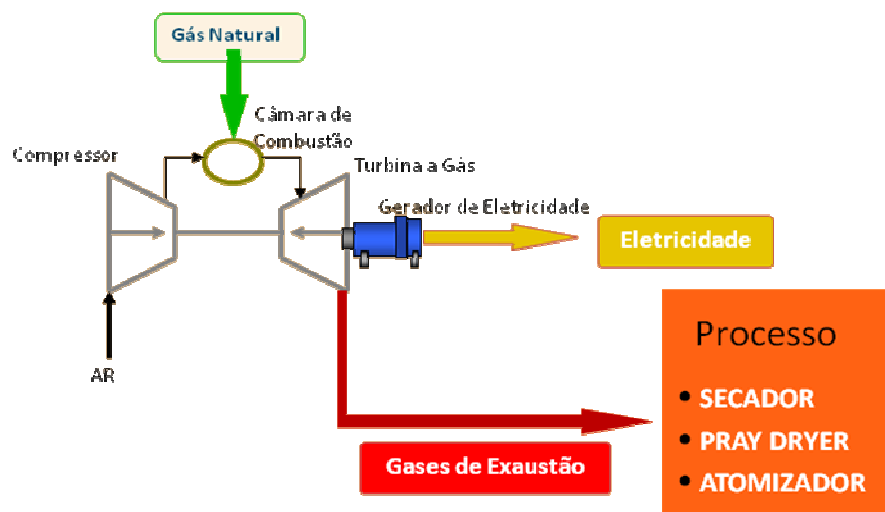


Figura 8

## Ciclo Combinado: Energia Elétrica

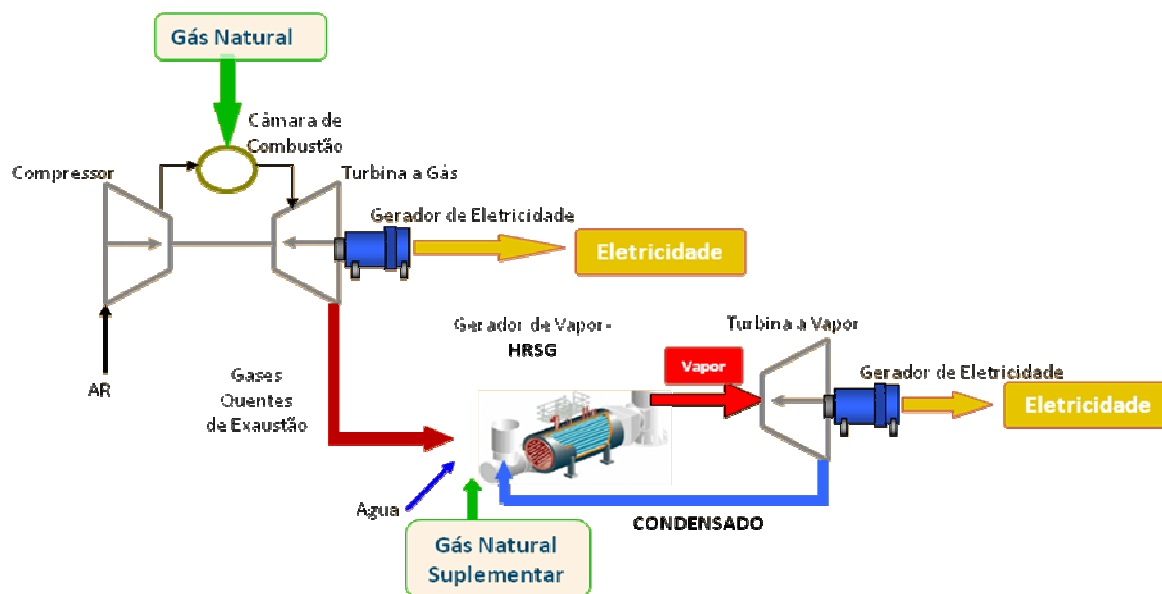


Figura 9

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Serão retomados agora os pontos que considero mais importantes na elaboração deste trabalho.

A turbina a gás é uma incrível máquina de combustão interna que vem desempenhando ao longo dos anos desde o seu invento, passando por suas evoluções até os dias atuais uma notória e importantíssima participação no progresso e desenvolvimento de diversas nações, tenho certeza que ainda dará muitos frutos em um futuro promissor como máquina continuando a ajudar na evolução e progresso das nações.

No meio naval a turbina é um dos principais meios de propulsão, principalmente em navios de guerra onde altas velocidades, partidas rápidas, rápidas respostas são exigidas e de vital importância neste tipo de embarcação sem contar na relação peso x potência muito satisfatória.

A turbina também vem ganhando notório destaque na participação de sistemas de co-geração com a geração simultânea, e combinada, de energia térmica e energia elétrica ou mecânica, a partir de uma mesma fonte. Com a vantagem de maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia nas formas citadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – OBERT, Edward F. Motores de combustão interna, 2.ed.Porto Alegre: Editora Globo, 1971.
- 2 – <http://www.energia.sp.gov.br>
- 3 – [http://www.discoverybrasil.com/guia\\_tecnologia/resumo\\_historia/index.shtml](http://www.discoverybrasil.com/guia_tecnologia/resumo_historia/index.shtml).
- 4 - H, Cohen, GFC, Rogers, HLH, Saravanamuttoo. Gas turbine theory. London: Longman Group Limited, 1972.
- 5 – [http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_a\\_g%C3%A1s](http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_a_g%C3%A1s).
- 6 – <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo...>
- 7- Macyntire, Archibald J. Fundamentos da Termodinâmica, Ed.Ltc, 1997.