

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA**  
**CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE**

**RODRIGO NEGRIZOLI DA SILVA**

# **TURBINA A GÁS**

**RIO DE JANEIRO**  
**2014**

**RODRIGO NEGRIZOLI DA SILVA**

**TURBINA A GÁS: geração de energia a bordo**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: José Adilson Reis

Rio de Janeiro

2014

**RODRIGO NEGRIZOLI DA SILVA**

**TURBINA A GÁS: geração de energia a bordo**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: José Adilson Reis

---

Assinatura do Orientador

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

## **DEDICATÓRIA**

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus, e, reconheço com carinho e gratidão o apoio, a compreensão e o estímulo dados a mim por minha mãe, Nadir Negrizoli, ao meu pai, Francisco Fernandes, que incondicionalmente, sempre estiveram ao meu lado. Aos meus irmãos, Wanderson e Wanessa, que mesmo distantes, atuaram em minha vida passando-me experiências e alegrias fraternas. E por último, mas não menos importante, aos meus amigos e companhas de camarote, que muito me ajudaram nos meus estudos e me auxiliaram na produção deste TCC.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, inicialmente, a Deus, pois acredito em um ser superior que nos conduz e ilumina. A minha família e amigos, sem os quais, com certeza, não seria possível essa vitória. Ao meu orientador, CT Adilson Reis por sua dedicação, paciência e apego a minha causa. Ao Senhor Bosco, da biblioteca, pela atenção e ajuda, todas as vezes que se fizeram necessárias. E finalmente, a esta conceituada Instituição de ensino e seus Comandantes, pela acolhida recebida nestes três anos de curso, que além de nos preparar para a grandiosa carreira a frente, também nos agrega experiências e qualidades que serão levadas durante a nossa vida futura.

## 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; e que durante a sua operação realiza a transformação da energia química de um combustível em energia mecânica, que é transformada em potência no eixo ou geração de eletricidade, dependendo de como e onde ela será utilizada.

A evolução tecnológica tem promovido, nos últimos anos, o contínuo aperfeiçoamento da turbina a gás, mas assim como toda máquina, apresenta vantagens e desvantagens para seu emprego, como por exemplo: mínimos componentes atritantes e ausência de movimentos recíprocos significam poucos problemas de balanceamento, baixo consumo de lubrificante e alta confiança. Entretanto, a eficiência dos componentes (razão de compressão do compressor) e a temperatura de trabalho são fatores que afetam negativamente o desempenho da turbina.

**Palavras-chave:** Turbina, motor de combustão, baixo consumo, eficiência.

## **ABSTRACT**

We intend to address in this paper the issue related to the gas turbine, which is typically an internal combustion engine of the rotary type and is composed primarily of: compressor, combustion chamber and turbine; and that during operation carries out the transformation of chemical energy of a fuel into mechanical energy which is transformed into shaft power or electricity generation, depending on how and where it will be used.

A technological development have promoted in recent years the continuous improvement of the gas turbine, but like every machine, has advantages and disadvantages for its use, such as: minimum frictioning components and absence of reciprocal movements means fewer balancing problems, low lubricant consumption and high reliability. However, the efficiency of the components (compression ratio of the compressor) and working temperature are factors that adversely affect the performance of the turbine.

**Keywords:** Turbine, combustion engine, low fuel consumption, high efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo de Brayton

Figura 2 - Compressor de Fluxo Axial

Figura 3 - Palhetas Rotativas e Fixas

Figura 4 - Câmara de Combustão

Figura 5 - Câmara Caneco

Figura 6 - Turbina

Figura 7 - Fixação Rabo de Andorinha

Figura 8 - Fixação “Árvore de Natal” (Fir Tree Root)

Figura 9 - Sensor de Temperatura e Pressão

Figura 10 - Casulo de Proteção da Turbo Máquina

Figura 11 - Turbina Olympus TM3B

Figura 12 - RMS Queen Mary 2

Figura 13 - Turbinas Rolls Royce Trent970

Figura 14 - Fragata classe Niterói da MB

Figura 15 - Chiller de Absorção

Figura 16 – Co-geração de Energia Elétrica

Figura 17 – Co-geração de Energia Elétrica e Vapor

Figura 18 - Esquema simplificado do Sistema CODAG

Figura 19 - NDCC Almirante Saboia, Fragata Niterói e Corveta Frontin

Figura 20 - CODAG WARP

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>11</b>
1 Máquinas Primárias	11
1.1 Turbina	12
1.2 Tipos de Instalação	13
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>14</b>
2 Turbina a Gás	14
2.1 Funcionamento	14
2.2 Ciclo de Brayton	14
2.3 Tipos de Ciclos de Turbinas	16
2.3.1 Turbina de Ciclo Simples	16
2.3.2 Turbina com Velocidade Variável	16
2.3.3 Turbina de Ciclo Combinado	16
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>17</b>
3 Componentes	17
3.1 Compressor	17
3.2 Câmara de Combustão	19
3.3 Turbinas	20
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>24</b>
4 Sistemas Auxiliares de Turbina a Gás	24
4.1 Sistemas de Proteção	24
4.1.1 Sensores de Vibração e Temperatura dos Mancais	24
4.1.2 Sensores de Temperatura dos Gases Gerados	24
4.1.3 Sensores de Velocidade	25
4.2 Sistemas de Ar	25
4.2.1 Sistema de Filtragem do Ar de Admissão para o Gerador de Gás	26
4.2.2 Sistema de Ar de Combustão	26
4.2.3 Sistema de Ar de Referência para Controle	26
4.2.4 Sistema de Ar de Resfriamento	26
4.2.5 Sistema de Ar para Selagem dos Mancais	27
4.3 Sistema de Partida	27
4.3.1 Elétrico	28

4.3.2 Hidráulico	28
4.3.3 Eletro-hidráulico	28
4.3.4 Pneumático	28
4.4 Sistema de Óleo Lubrificante do Sistema Hidráulico	28
4.5 Sistema de Combustível	29
4.6 Casulo de Proteção da Turbo Máquina	29
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>31</b>
5 Fundamentos da Termodinâmica ligados a Turbina a Gás	31
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>32</b>
6 Rendimento	32
<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>34</b>
7 Utilização da Turbina a Gás	34
7.1 Produção de Energia Elétrica	34
7.1.1 Vantagens	34
7.1.2 Desvantagens	35
7.1.3 Geração de Energia a Bordo	35
7.2 Propulsão a Jato	36
7.3 Propulsão Naval	37
<b>CAPÍTULO VIII</b>	<b>39</b>
8 Co-geração	39
8.1 Definição de Co-geração	39
8.1.1 Definição de Chiller de Absorção	39
8.2 Energia na Exaustão da Turbina a Gás	41
<b>CAPÍTULO IX</b>	<b>43</b>
9 Sistema CODAG	43
9.1 Definição de Sistema CODAG	43
9.2 Funcionamento do Sistema CODAG	43
9.3 Variações do Sistema CODAG	45
9.3.1 CODAG WARP	45
9.3.2 CODLAG	45
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>48</b>

## INTRODUÇÃO

O motor de combustão interna 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 e aviões.

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 frequente 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 deste 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. A primeira turbina a gás, economicamente viável é atribuída a HOLZORTH 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, onde na aviação esse avanço de tecnologia tem possibilitado a criação de aviões cada vez maiores, mais manobráveis e mais econômicos. Já as turbinas industriais possibilitam a produção de energia cada vez mais econômica e limpa.

## CAPÍTULO I

### 1 Máquinas Primárias

Toda máquina precisa de uma energia para seu funcionamento e esta energia se obtém dos combustíveis, combustível que pode ser de origem fóssil ou nuclear e tem de dispor de um meio de transformar a energia calorífica do combustível em energia mecânica.

Se o combustível é fóssil, como ocorre na imensa maioria das aplicações, dita transformação pode ser feita de uma das formas seguintes:

a) Queimando em um recipiente, como a caldeira a combustão, onde a energia calorífica se transfere na água que contida em seu interior para gerar vapor que é direcionado para uma turbina de vapor, produzindo o trabalho mecânico para acionar o eixo propulsor do navio ou geração de energia. Neste caso tratando-se da máquina de combustão externa;

b) Queimando-o diretamente no interior da própria máquina que desenvolve o trabalho mecânico, como ocorre nos cilindros dos motores ou direcionando o fluxo dos gases resultantes da queima para uma turbina a gás, definidas como máquinas de combustão interna;

Se o combustível é nuclear a energia calorífica liberada resultante da fissão ocorrida no reator atômico, o qual é resfriado por um fluido que é utilizado em um trocador de calor onde circula a água. Este processo vai gerar vapor d'água que é encaminhado para uma turbina para produzir trabalho mecânico ou geração de energia.

O trabalho mecânico desenvolvido pela máquina utiliza-se para a propulsão marítima acionando normalmente um eixo propulsor que une a saída do eixo da turbina com o do hélice mergulhado na água, proporcionando o movimento de avanço do navio. O funcionamento da turbina envolve alta RPM (rotações por minuto), portanto para tornar-se viável a sua aplicação na propulsão foi necessário o emprego de um sistema redutor de velocidade, conhecido como engrenagem redutora, ou simplesmente, redutora.

Torna claro que, com objeto de que a instalação propulsora tenha o maior rendimento possível como sistema completo, é preciso que os elementos que a compõem tenham por separado o melhor rendimento a se obter.

Em muitas ocasiões o número de revoluções a que a máquina em si tem seu ótimo rendimento é muito diferente do que exige o propulsor e por isso nesses casos deve se interpor entre ambos uma unidade que faça compatíveis esses dois regimes diferentes. Este elemento é a engrenagem redutora ou mais simplesmente redutora.

## 1.1 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; e
- Turbinas eólicas.

A forma construtiva básica é o mesmo para todos os tipos: um rotor dotado de 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 outro equipamento mecânico rotativo, como por exemplo, uma bomba ou um ventilador, podem também ser utilizados 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; e
- Eficiência.

## 1.2 Tipos de Instalação

Da combinação dos elementos assinalados no ponto anterior pode se já esquematizar os tipos de instalação mais usuais que são:

### - Propulsão a vapor (combustível fóssil)

- Geração do vapor: Caldeiras de canos de água, com ou sem circulação forçada ou com ar pressurizado; e
- Máquinas propulsoras: Turbinas de vapor e Propulsão Turbo-elétrica.

### - Propulsão por máquinas de combustão interna

- Motor diesel de dois ou quatro tempos: Lentos diretamente acoplados, semirrápidas e rápidos engrenados; disposição diesel-elétrico; e
- Ocasionalmente utilizam-se também motores de explosão como, por exemplo, em embarcações esportivas.

### - Propulsão por Turbinas de Gás

- Sozinhas com redutor de engrenagens; e
- Disposição turbinas de gás-elétrico.

### - Propulsão nuclear

- Geração do vapor: Reator atômico PWR; e
- Máquina propulsora: Turbinas de vapor de características especiais.

## CAPÍTULO II

### 2 Turbina a Gás

#### 2.1 Funcionamento

Como citado anteriormente os principais elementos que a compõem, são: o compressor, a câmara de combustão e a turbina. 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. Esta combustão produz um gás de alta energia e alta temperatura, atingindo, nas máquinas mais modernas, cerca de 1350°C (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, em empuxo propulsivo, ou uma combinação dos dois.

#### 2.2 Ciclo de Brayton

O ciclo Brayton é um ciclo ideal, isto é, uma aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás, descrevendo variações de estado (pressão e temperatura) dos gases. Este ciclo se constitui de quatro etapas. Primeiramente, o ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde ocorre compressão adiabática e isentrópica, com aumento de temperatura e conseqüente aumento de entalpia. Comprimido, o ar é direcionado às câmaras, onde se mistura com o combustível possibilitando sua queima e aquecimento, 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 outra máquina. A quarta etapa não ocorre fisicamente, se tratando assim 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.

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.

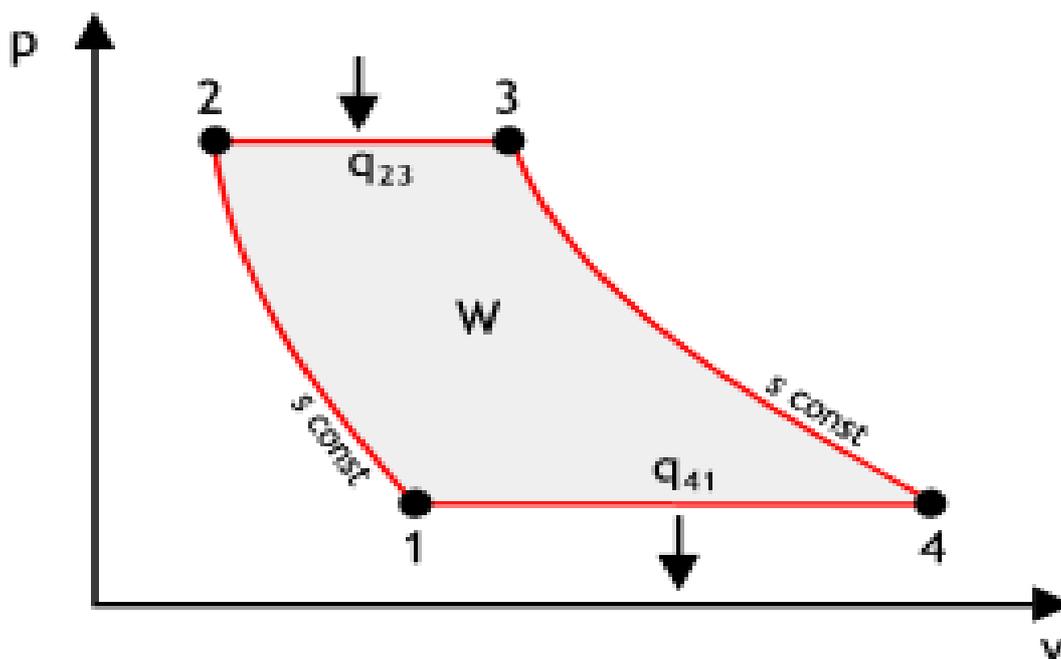


Figura 1 - Ciclo de Brayton

## 2.3 Tipos de Ciclos de Turbinas

Pode-se operar uma turbina através de diferentes modos, dependendo da aplicação desejada. Para isso existem basicamente três tipos de ciclos para operação de uma turbina a gás:

- Turbina de ciclo simples;
- Turbina com velocidade variável; e
- Turbina de ciclo combinado.

### 2.3.1 Turbina de Ciclo Simples

Quando a turbina é projetada para operar em ciclo simples, para aumentar eficiência energética, procura-se aperfeiçoar a taxa de compressão. A taxa de compressão é a relação entre a pressão do ar na entrada da turbina e na saída do compressor. Se o ar entra a 1 até, e deixa o compressor a 15 até, a taxa de compressão é 1:15.

### 2.3.2 Turbina com Velocidade Variável

Quando é necessário variar a rotação do eixo, como nos casos em que a turbina é utilizada para propulsionar uma embarcação, a turbina de potência é dividida em duas, sendo a primeira somente para acionar o compressor com velocidade constante, e a segunda (com eixo independente) para produção de potência mecânica, com velocidade variável. Para que seja possível variar a velocidade da turbina de potência é preciso que os bocais que direcionam os gases quentes sobre as palhetas sejam móveis, variando o ângulo de incidência dos gases.

### 2.3.3 Turbina de Ciclo Combinado

Se a turbina é projetada para operar em ciclo combinado, procura-se aumentar a eficiência energética do ciclo como um todo, através do aumento da temperatura de combustível, uma vez que os gases de saída da turbina ainda são utilizados para gerar potência.

## CAPÍTULO III

### 3 Componentes

#### 3.1 Compressor

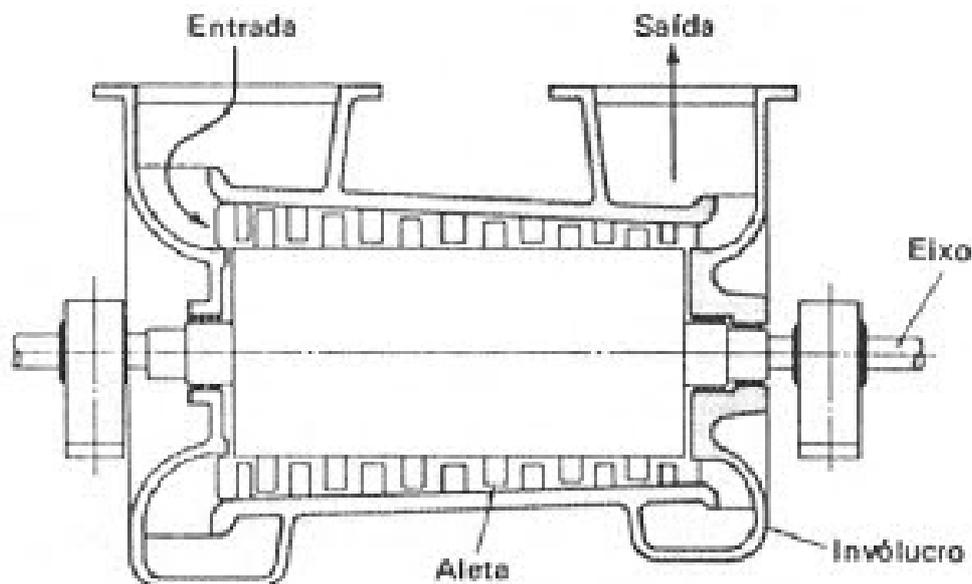
A configuração básica do turbo-compressor pode variar de acordo com o projeto, ou seja, varia o número de estágios, a arquitetura e o arranjo do projeto, mas a operação básica de todas as turbinas a gás segue o mesmo padrão.

- **Conduto 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 do turbo-compressor. O ar ao escoar pelos condutos convergentes perde pressão, enquanto que nos condutos divergentes a pressão aumenta.

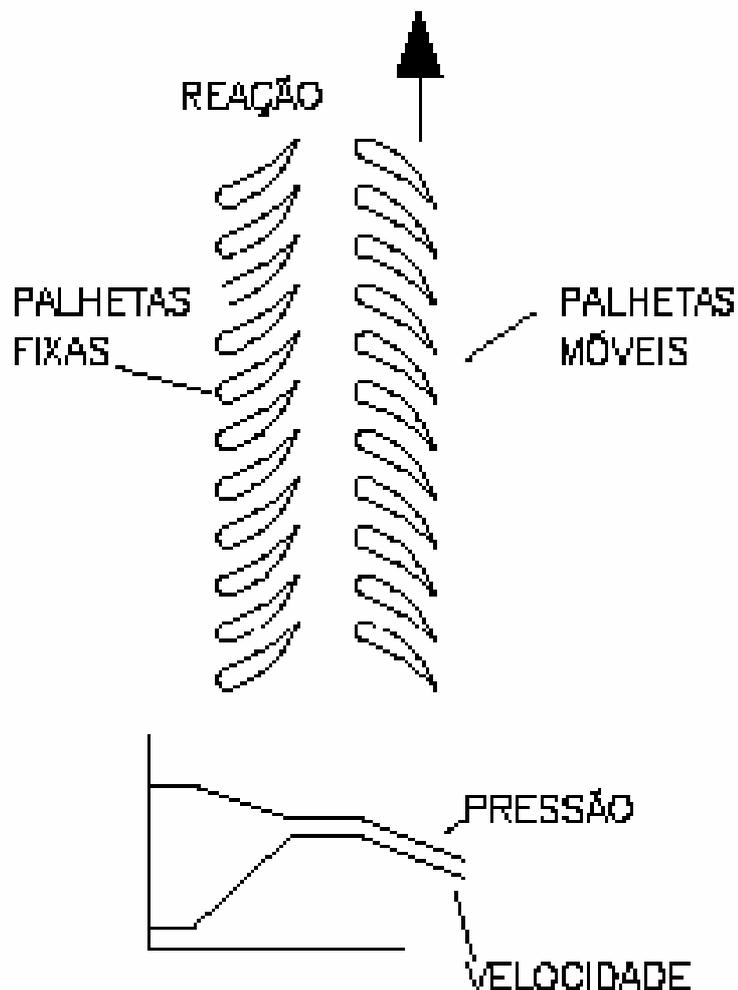
- **Compressor de Fluxo Axial**

Um compressor de fluxo axial transforma um grande volume de ar com baixa pressão e baixa velocidade, em um pequeno volume de ar de alta pressão e alta velocidade.



**Figura 2 - Compressor de Fluxo Axial**

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



**Figura 3 - Palhetas Rotativas e Fixas**

- **Palhetas de admissão**

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

A seção seguinte de palheta 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 desejada seja alcançada.

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

geometria variável permitem um melhor desempenho do compressor em regime de rotações variáveis.

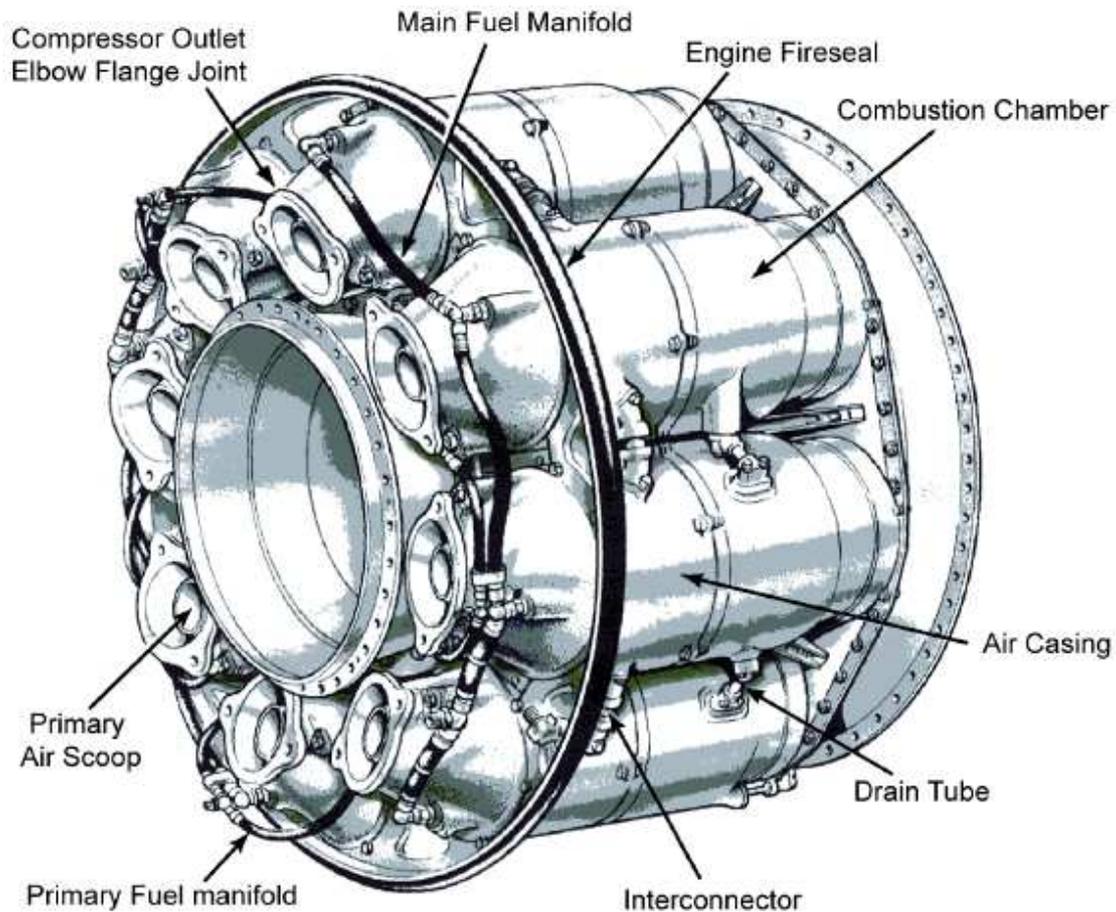
### 3.2 Câmara de Combustão



**Figura 4 - Câmara de Combustão**

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 à turbina. Tudo isso com a mínima perda de pressão e a máxima eficiência.

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



**Figura 5 - “Câmara Caneco”**

A Câmara de Combustão é um componente crítico, pois dentre suas funções estão:

- 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.

### 3.3 Turbinas

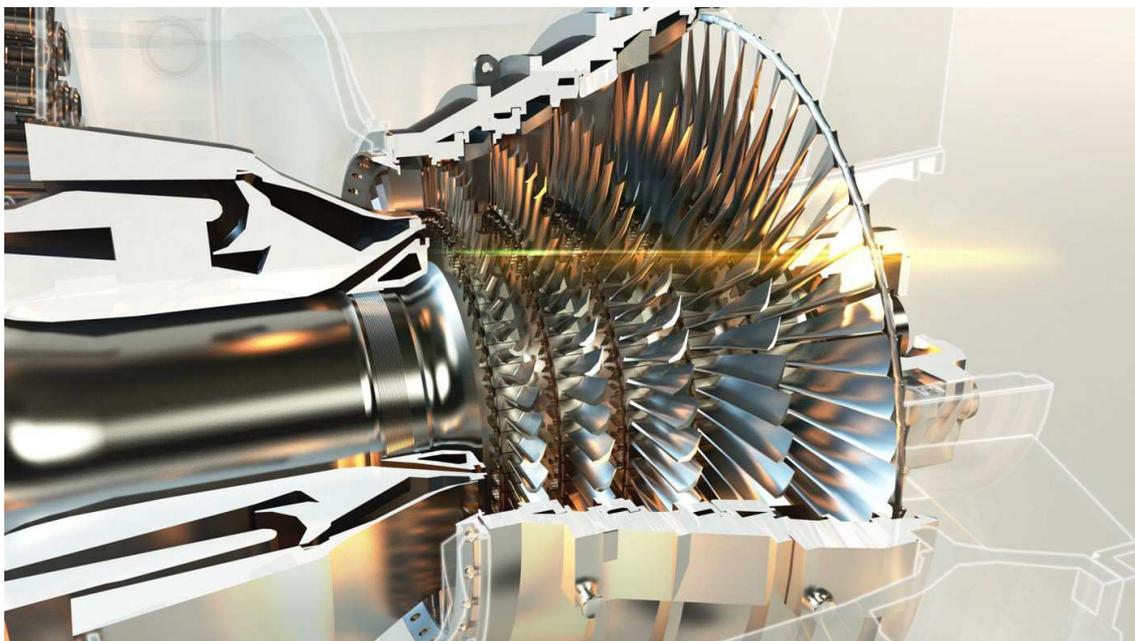
Cada estágio da turbina compreende uma fiada de palhetas fixas (expansores) e uma fiada de palhetas móveis. O material empregado em sua construção de ser resistente a altos níveis de temperatura, a variações de temperatura bruscas e elevadas, a altas tensões mecânicas devido à força centrífuga, a corrosão para enfrentar as partículas de sal que se encontra em suspensão no ar e penetram nos componentes da turbina, resíduo de enxofre do combustível, a oxidação devido ao grande volume de ar (oxigênio) que flui a

altas temperaturas, a fadiga devido às vibrações induzidas e, finalmente, deve ter 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.

Em resumo, a turbina é um equipamento construído para converter energia mecânica e térmica contida em um fluido, em trabalho no eixo.

Cada estágio da turbina compreende uma fiada de palhetas fixas (expansores) e uma fiada de palhetas móveis. O princípio de funcionamento é o de impulso 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 inclinadas, 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.



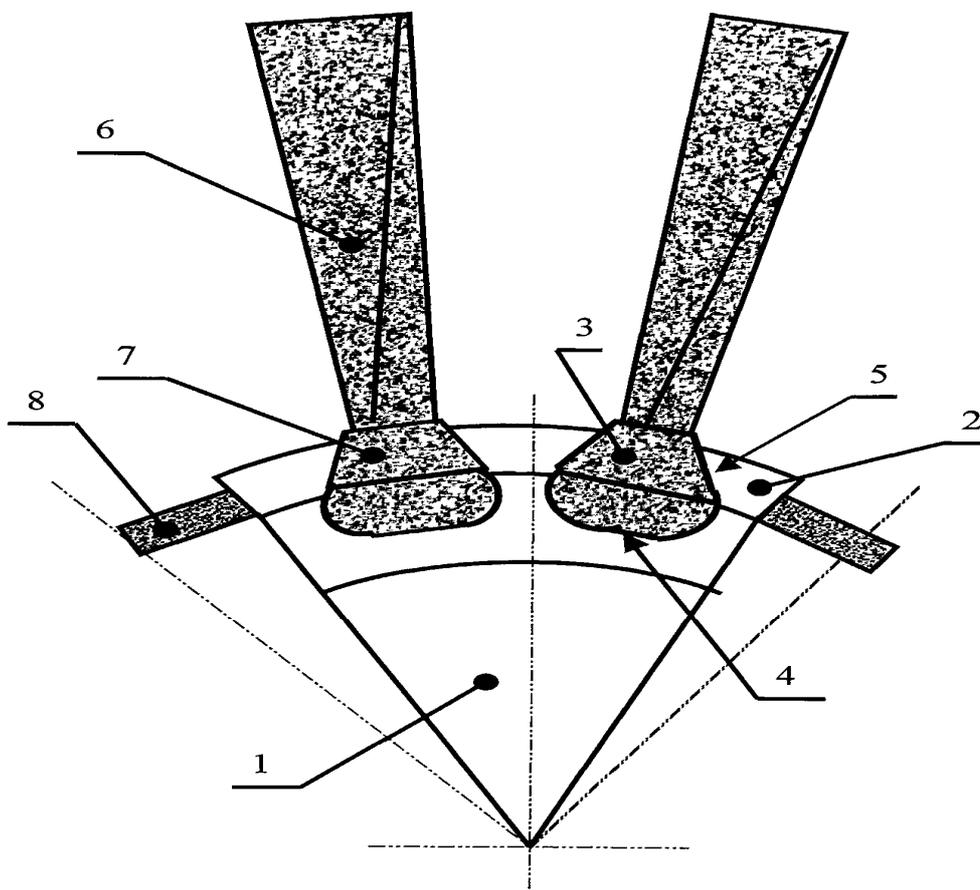
**Figura 6 - Turbina**

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. Os discos que recebem e alojam as palhetas são forjados e necessitam também de um bom resfriamento, em ambas as faces. Dessa forma este motor chega a ter rendimento de 90% a 92%, isto significa que grande parte da energia, quase toda, armazenada no fluido de trabalho é aproveitada para gerar trabalho e empuxo no estágio final da turbina.

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

- fixação por pino e trava;
- árvore de natal; e
- rabo de andorinha.



Фиг. 1

**Figura 7 - Fixação Rabo de Andorinha**

Os dois últimos métodos de fixação são os mais utilizados porque oferecem um maior nível de segurança da palheta.

Quando a turbina está fria, observa-se uma folga no alojamento das palhetas, para permitir a dilatação do material quando sofre dilatação térmica em operação. O tope das palhetas é frenado para melhorar a vibração e reduzir a fuga dos gases pelos topes, reduzindo as perdas. O balanceamento das turbinas é preciso e fundamental, é feito de forma eletrônica, inclusive após a execução de reparo nas palhetas móveis.



**Figura 8 - Fixação “Árvore de Natal” (Fir Tree Root)**

## CAPÍTULO IV

### 4 Sistemas Auxiliares de Turbina a Gás

Os seguintes sistemas fazem parte de uma Turbina a Gás e auxiliam a operação da turbina:

- Sistema de proteção;
- Sistema de ar;
- Sistema de partida;
- Sistema de óleo lubrificante e óleo de comando hidráulico;
- Sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial;
- Sistema de combustível; e
- Casulo das turbo-máquinas.

Apesar de citar todos esses sistemas auxiliares apenas alguns deles serão comentados abaixo:

#### 4.1 Sistema de Proteção

##### 4.1.1 Sensores de Vibração e Temperatura dos Mancais

O eixo do conjunto gerador de gás e o eixo da turbina de potência são apoiados em mancais radiais e axiais, do tipo pastilhas deslizantes (tilting pads bearings) ou de rolamentos (Ball bearings), sendo esse último mais aplicado nos geradores de gás aero derivados. Nesses mancais são feitas monitorações de vibração radial através de sensores por deslocamento e aceleração. A monitoração de temperatura é feita nos mancais de escora e nos drenos de óleo dos mancais radiais utilizando sensores tipo termo resistência.

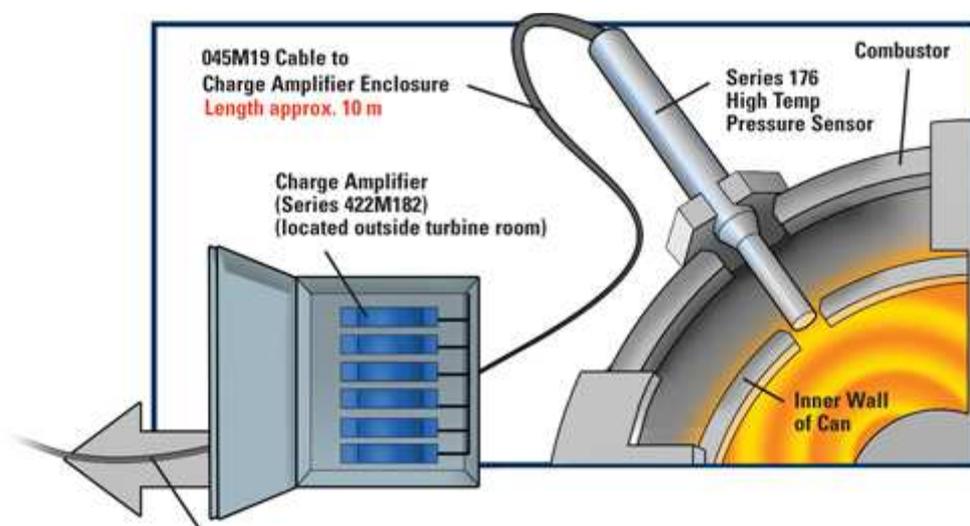
##### 4.1.2 Sensores de Temperatura dos Gases Gerados

Constituído de termopares normalmente instalados entre a exaustão da turbina geradora de gás e a admissão da turbina de potência, 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.

### 4.1.3 Sensores de Velocidade

Utilizando sensores magnéticos (SEs) montados sobre engrenagens instaladas nos eixos geradores de gás (GG) e turbina de potência (PT), a monitoração das velocidades são itens de limitação na operação da turbina. No eixo da turbina PT, além dos sensores normalmente instalados, são utilizados também sensores reserva de emergência de sobre velocidade (backup overspeed), pois a turbina PT é uma turbina livre, portando aumentando as necessidades de monitoração de sobre velocidade.



**Figura 9 - Sensor de temperatura e pressão**

## 4.2 Sistema de Ar

O sistema de ar das turbinas é, normalmente, dividido em cinco subsistemas:

- Sistema de filtragem de ar de admissão para o gerador de gás;
- Sistema de ar de combustão;
- Sistema de ar de referência para controle;
- Sistema de ar de resfriamento; e
- Sistema de ar de selagem dos mancais.

### **4.2.1 Sistema de Filtragem do 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 com três a 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 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.

### **4.2.2 Sistema de Ar de Combustão**

O ar admitido depois de 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.

### **4.2.3 Sistema de Ar de Referência para Controle**

Uma tomada de ar proveniente da descarga do compressor de ar (PCD ou P2) é direcionada para ser utilizado como referência no sistema de controle de combustível e/ou sistema de controle do fluxo de ar do compressor axial.

### **4.2.4 Sistema de Ar de Resfriamento**

Considera-se que aproximadamente 75% do ar admitido e comprimido é utilizado como resfriamento 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, 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 dos primeiros estágios e as faces dos discos das rodas das turbinas.

#### **4.2.5 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 Gerador de Gás (GG) da inércia, proporcionando um fluxo de ar para purgar o GG, PT, duto de exaustão e recuperador de calor, quando utilizado. Após o ciclo de purga é iniciada a ignição seguida da combustão, aonde a sustentação da rotação pelo motor de partida, o incremento de combustível e o torque no eixo do motor vão reduzindo e a velocidade, de rotação do eixo da turbina, 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. Em todos os sistemas, o acoplamento entre o sistema de partida e o eixo do conjunto Gerador de Gás é feito através de um conjunto mecânico com catracas, denominado embreagem livre, cujo acoplamento e desacoplamento são feito automaticamente através de força centrífuga.

Os sistemas de partida utilizados podem ser dos seguintes tipos:

- Elétrico;
- Hidráulico;
- Eletro-hidráulico; e
- Pneumático.

### **4.3.1 Elétrico**

Utiliza um motor elétrico cujo suprimento é feito através de um variador de frequência que controla a velocidade do motor através da variação de frequência. Pode ser utilizado também motor elétrico com duas velocidades, através de alteração dos polos na gaveta de comando do motor.

### **4.3.2 Hidráulico**

Utiliza um motor hidráulico cujo fluido motriz é oriundo de uma unidade hidráulica a parte. Geralmente o fluido utilizado é um óleo mineral.

### **4.3.3 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.

### **4.3.4 Pneumático**

Utiliza uma turbina cujo fluido motriz é o gás natural ou ar comprimido.

## **4.4 Sistema de Óleo Lubrificante do Sistema Hidráulico**

Os sistemas de óleo lubrificante têm a finalidade de suprir óleo, do tipo mineral para turbinas industriais de porte leve e pesado ou tipo sintético para geradores de gás aero derivados (turbinas utilizadas na aviação), sendo que as turbinas a gás quando são utilizadas em instalações navais são consideradas industriais, 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, atuador das palhetas variáveis guia de entrada 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 Combustível**

O sistema combustível da turbina tem a finalidade de suprir diesel, gás, querosene, ou qualquer outro óleo combustível que for utilizado para a combustão na turbina, 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 usa injeção eletrônica direta, isto é, ele dosa automaticamente o combustível durante a partida, aceleração, operação normal, desaceleração e comutação e faz a injeção desse combustível diretamente dentro da câmara de combustão.

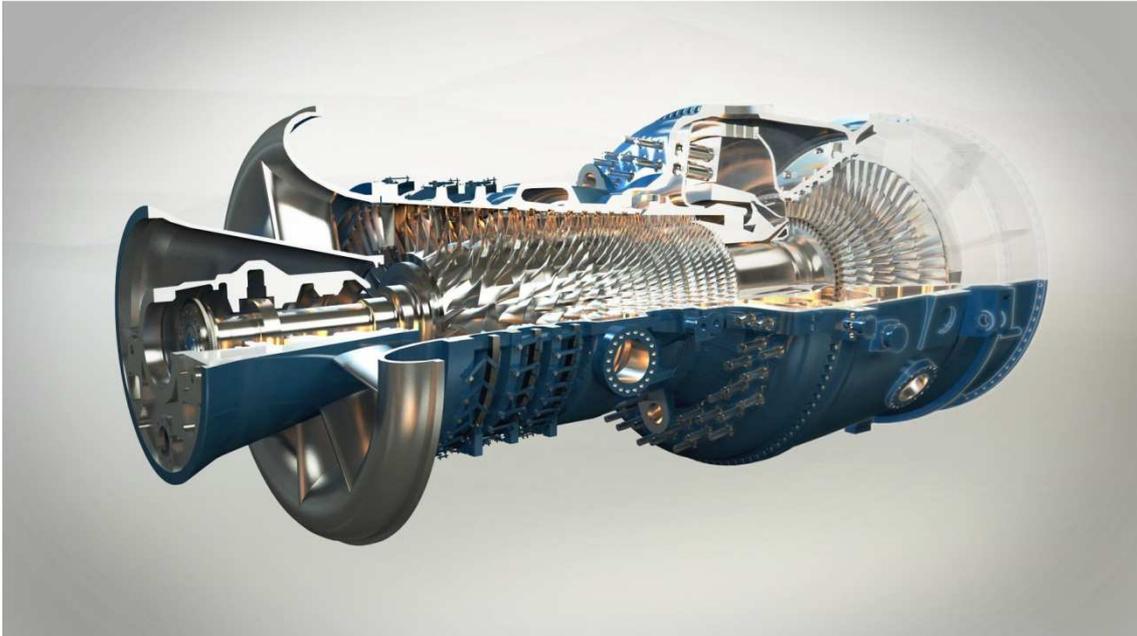
O sistema de controle recebe os sinais de NGG, NPT, T5, T1, referência da junção fria, sinal de retorno da dosadora de combustível e ponto de ajuste NGG ou NPT e os fornece para o controlador de combustível. O controlador de combustível processa esses sinais e gera um sinal de saída para um atuador que 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 solenoides de comando e alívio, válvulas controladoras de pressão e vazão, sensores e transmissores de pressão e temperatura, ignitor e coletor de gás e diesel com os bicos injetores.

#### **4.6 Casulo de Proteção da Turbo Máquina**

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 a manutenção. É pressurizado para manter a turbo máquina 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>).



**Figura 10 - Casulo de Proteção**

## CAPÍTULO V

### 5 Fundamentos da Termodinâmica ligados a Turbina a Gás

O ar ao escoar pela turbina sofre variações de pressão e velocidade, como já foi falado. Essas variações exigem um tamanho e forma adequada de dutos, através dos quais se processa o escoamento. 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 energia cinética. Estas formas, entretanto, aplicam-se quando a velocidade do fluido em escoamento é subsônica 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 turbulência 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 turbulência 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, a equação que se aplica em cada estágio do ciclo para medir as variações de pressão, volume e temperatura é a equação de Boyle para fluidos perfeitos.

$$P.V = n.R.T$$

**Equação de Boyle**

## CAPÍTULO VI

### 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 “*Power Turbine Enter Temperature*” (PTET). 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 podem chegar a mais 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.

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.

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.

$$\eta = w/qf = 1 + qc/qf$$

onde qc e qf são respectivamente as quantidades de calor cedida e fornecida

#### **Equação do Rendimento no Ciclo de Brayton**

Por exemplo, na turbina Olympus TM3B, fabricada pela montadora inglesa Rolls Royce, 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 essa turbina é obrigada a diluir a mistura ar/combustível a proporções de 250 kg de ar para 1 kg de combustível.



**Figura 11 - Turbina Olympus TM3B retirada de um avião XJ784 Vulcan**

## CAPÍTULO VII

### 7 Utilização da Turbina a Gás

#### 7.1 Produção de Energia Elétrica

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 deste trabalho, é um conjunto composto por:

- Admissão de ar;
- Compressão de ar;
- Câmaras de combustão;
- Turbinas; e
- 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 outro equipamento, que neste caso é acoplado ao eixo, chamado de gerador, produzindo assim energia elétrica.

##### 7.1.1 Vantagens

- 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).

### 7.1.2 Desvantagens

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

### 7.1.3 Geração de Energia a Bordo

RMS Queen Mary 2 é um transatlântico de linha oceânica. É o maior transatlântico construído após o Queen Elizabeth 2 em 1969, a empresa proprietária é a Cunard Line. Este navio, atualmente, é o único que utiliza turbinas a gás para a geração de energia de bordo, para isso ele faz uso de duas turbinas General Electric LM2500, produzindo aproximadamente 25.060 KW de energia cada uma. Este navio utiliza um moderno sistema de propulsão elétrica, o “azimutal podded drive” (AZIPOD®) e para gerar a energia necessária para o funcionamento de seus quatro AZIPODS® ele utiliza quatro motores diesel Wärtsilä 46C-CR, gerando aproximadamente 16.800 KW.



**Figura 12 - RMS Queen Mary 2**

## 7.2 Propulsão a Jato

O motor a jato foi desenvolvido em 1937 pelo, então, piloto de testes da Força Aérea Real Frank Whittle.

A primeira ideia desse projeto surgiu na década de 20, mas foi então rejeitada pela Força Aérea. Rejeição essa que logo foi superada com o auxílio da Força Aérea Real que acabou contribuindo para o aperfeiçoamento do projeto que foi implantado em 1937.

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. Então o que os fez tão diferentes e avançados pra época?

- 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.

Concluimos então que a grande diferença entre os dois é a razão potência-peso onde os motores de reação, turbinas a jato, proporcionam uma potência incrível comparada com o peso do aparelho.



**Figura 13 - Turbinas Rolls Royce Trent970 em um Airbus A-380**

### 7.3 Propulsão Naval

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.

Com algumas exceções, quase todas as turbinas a gás utilizadas em navios são adaptadas a partir de motores aeronáuticos. Uma das adaptações feitas 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-aeródromo (relação de 5 HP por tonelada). A grande aceleração inicial 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 motor diesel para velocidades baixas.

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 motor diesel. Hoje, a turbina a gás equipa quase todas as escoltas da Marinha, com exceção do contratorpedeiro Pará. Além das Fragatas classe Niterói (que possuem duas turbinas Olympus), a MB possui Corvetas da classe Inhaúma, equipadas com uma única turbina LM-5200 por Corveta.



**Figura 14 - Fragata Classe Niterói da MB**

Resumidamente as principais vantagens da turbina a gás na propulsão naval 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; e
- Menor consumo de óleo lubrificante.

## CAPÍTULO VIII

### 8 Co-Geração

#### 8.1 Definição de Co-Geração

A co-geração é a produção simultânea de duas formas de energia úteis através de uma única fonte de energia primária, como o gás natural, o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), a biomassa e etc. A vantagem principal é o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia.

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 de 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 motores, por exemplo, uma turbina a gás. A energia térmica é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor, pode-se usar os gases superaquecidos que são descarregados pela turbina para aquecer água em uma caldeira, por exemplo, eliminando o custo com combustível necessário normalmente para os queimadores da caldeira.

##### 8.1.1 Definição de Chiller de Absorção

Descoberta pelo escocês Nairn em 1777, a refrigeração por absorção tem por "pai" o francês Ferdinand Carré (1824-1900), que em 1859 patenteou a primeira máquina de absorção de funcionamento contínuo, usando o par amônia-água.

Os sistemas de refrigeração por absorção de vapores são ciclos de refrigeração operados a calor, onde um fluido secundário ou absorvente, na fase líquida, é responsável por absorver o fluido primário ou refrigerante, na forma de vapor. Ciclos de refrigeração operados a calor são assim definidos, porque a energia responsável por operar o ciclo é majoritariamente térmica.

Água quente, vapor (baixa pressão e alta pressão) e gases de combustão são algumas das fontes de calor utilizadas para operar equipamentos de absorção, cuja energia térmica pode ser obtida a partir dos seguintes meios:

- Aproveitamento de rejeitos de calor de processos industriais e comerciais;
- Cogeração;
- Energia solar; e
- Queima direta (biomassa, biodiesel, gás natural, biogás).

Os sistemas de refrigeração por absorção podem ser classificados segundo os fluidos de trabalho empregados. São três as tecnologias comercialmente consagradas:

- Amônia-água;
- Amônia-água-hidrogênio; e
- Água-brometo de lítio.



**Figura 15 - Chiller de Absorção**

## 8.2 Energia na Exaustão da Turbina a Gás

Na saída da turbina a gás os gases de exaustão apresentam ainda uma temperatura relativamente elevada, da ordem de 480 a 600°C. Estes gases possuem um elevado conteúdo energético, da ordem de 50 a 70% da energia contida no combustível utilizado na turbina.

Fazendo uso da co-geração podemos chegar ao aproveitamento de 92% da energia contida nesses gases de descarga da turbina, que inicialmente, isto é, sem fazer uso da co-geração, seriam jogados para a atmosfera e desperdiçados. 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 frequentes para esta energia são a utilização dos gases quentes para secagem, geração de vapor através de uma caldeira de recuperação, aquecimento de fluido térmico e condicionamento ambiental.

As figuras abaixo ajudam a sintetizar a ideia do uso de turbinas a gás no processo de co-geração:

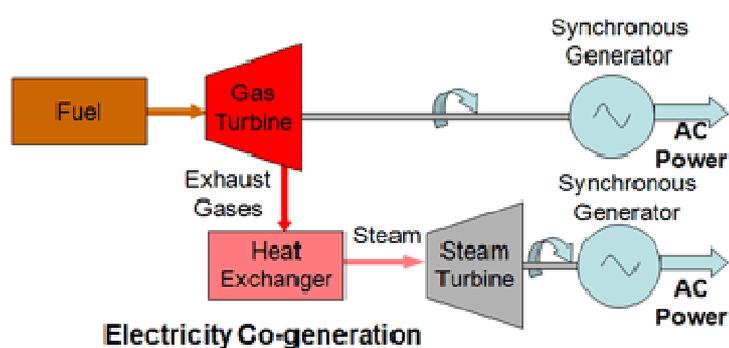
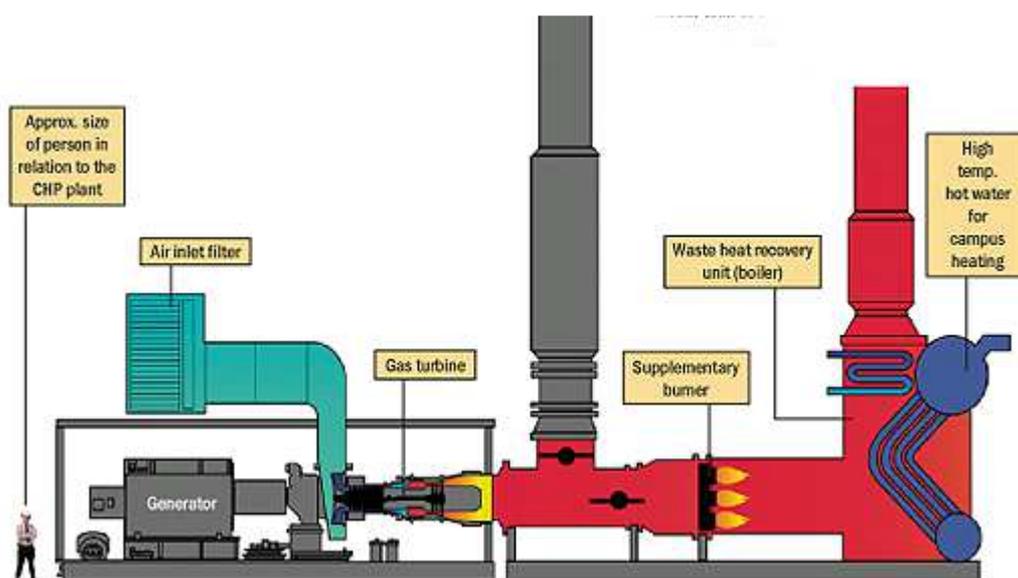


Figura 16 – Co-geração de Energia Elétrica



**Figura 17 – Co-geração de Energia Elétrica e Vapor**

## CAPÍTULO IX

### 9 Sistema Combinado Diesel e Gás - CODAG

#### 9.1 Definição do Sistema CODAG

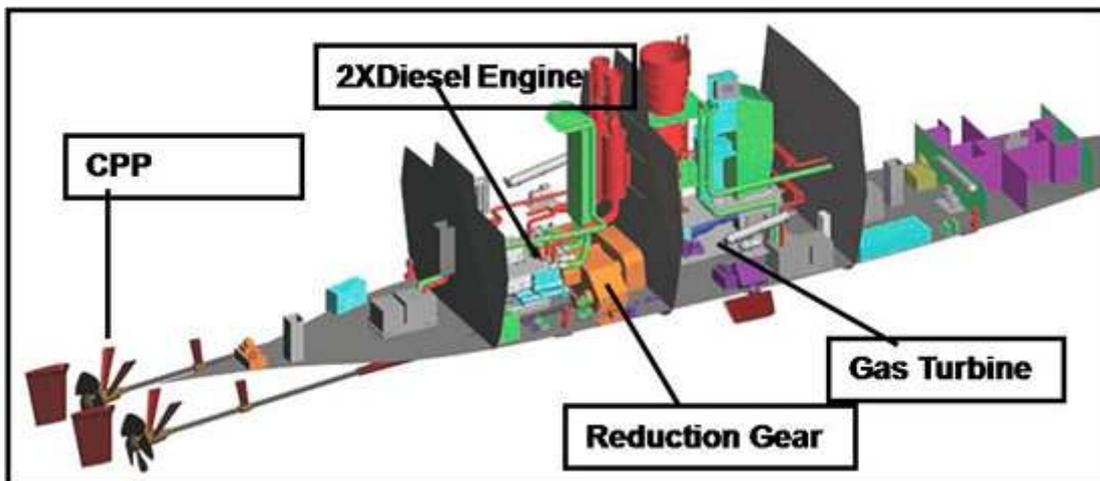
O Sistema Combinado Diesel e Gás, é uma estrutura utilizada na propulsão de navios que necessitam de uma velocidade máxima, consideravelmente maior do que a sua velocidade de cruzeiro normal. Em particular os navios de guerra, tais como fragatas ou corvetas, costumam usar esse modelo.

O sistema foi lançado nas Fragatas Alemãs Classe Köln em 1958.

#### 9.2 Funcionamento do Sistema CODAG

Consiste de dois ou quatro motores a diesel para o cruzeiro e uma ou duas turbinas a gás de alta rotação, que podem ser ligadas durante a viagem, quando houver uma necessidade de manobra em alta velocidade. Na maioria dos casos, a diferença de potência dos motores diesel e turbinas é grande para hélices de passo variável, então para limitar as rotações do eixo propulsor, de modo que os motores diesel possam continuar a operação necessários caixas de câmbio especiais multivelocidade.

A velocidade de cruzeiro comum de navios de guerra, equipados com o sistema CODAG, utilizam apenas o motor diesel, que é de 20 nós, sendo que a velocidade máxima com a turbina ligada pode ser superior a 30 nós.



**Figura 18 - Esquema simplificado do Sistema CODAG**

A Marinha do Brasil emprega esse sistema em seus navios de guerra mais novos, as fragatas Classe Niterói, nas corvetas Classe Inhaúma e no NAe São Paulo.



**Figura 19 - NDCC Almirante Saboia, Fragata Niterói e Corveta Frontin**

## 9.3 Variações do Sistema CODAG

### 9.3.1 CODAG WARP

“*Combined Diesel and Gas Water Jet and Refined Propeller*” é um modelo desenvolvido pela *Blohm + Voss*, inicialmente destinado aos Iates da linha MEKO. Foi aperfeiçoado pelas Marinhas de Guerra no mundo inteiro, e atualmente é empregado em alguns navios da Marinha Italiana. O Sistema CODAG WARP usa dois motores a diesel para movimentar duas hélices em um arranjo CODAD (*Combined Diesel and Diesel*), e um jato de água central alimentado por uma turbina a gás. O jato de água (Water Jet) em marcha lenta não causa arrasto, e ainda, o seu bico posicionado mais a ré, não afeta o tamanho dos hélices.

### 9.3.2 CODLAG

O modelo “*Combined Diesel-Electric and Gas*” usa motores elétricos que são ligados aos eixos de transmissão, os quais são alimentados por geradores a diesel. Para velocidades mais altas, acima da velocidade de cruzeiro, uma turbina a gás é acionada, atuando em conjunto com os geradores, através de uma caixa de ligação cruzada.

Este arranjo combina o motor diesel utilizado na propulsão, e na geração de energia elétrica, reduzindo o custo do serviço, exigindo muito menos manutenção. Além disso, os motores elétricos trabalham de forma eficaz numa larga gama de rotações e podem ser ligados diretamente ao eixo do hélice propulsor, de modo que, uma caixa de velocidades mais simples, pode ser usada para combinar a saída mecânica de sistemas de turbina e motores diesel-elétrico.

Outra vantagem da transmissão diesel-elétrica, é que sem a necessidade de uma ligação mecânica, os geradores a diesel podem ser desacoplados acusticamente do casco do navio, o que torna a operação, menos ruidosa. Este sistema tem sido amplamente utilizado por submarinos militares, mas começa a fazer sucesso também nos navios antisubmarino.



**Figura 20 - CODAG WARP**

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os dados apresentados neste trabalho de monografia, podemos inferir a seguinte análise:

- A turbina a gás é uma incrível máquina de combustão interna que vem desempenhando ao longo dos anos uma notória e importante participação no progresso e desenvolvimento de diversas nações, sendo por meios navais ou aéreos, pelos dados apresentados no trabalho acima, podemos afirmar que este equipamento deverá num futuro não muito distante, participar mais substancialmente nas atividades do meio marítimo, tanto em plataformas, gerando energia, como em navios, mercantes e de marinha de guerra, gerando a potência, no eixo ou elétrica, necessária para a boa operação dos sistemas de bordo;
- No meio naval a turbina é um dos principais meios de propulsão, principalmente em navios de guerra onde altas velocidades e partidas rápidas são exigidas e de vital importância para a segurança dos navios que estão sendo empregados em exercícios ou operações reais, mantendo a soberania de sua bandeira sobre o mar ou protegendo sua marinha mercante. Neste tipo de embarcação pode-se apontar a relação peso x potência muito satisfatória para os tipos de operação dos navios;
- A turbina a gás vem ganhando um grande espaço na participação de sistemas de co-geração com a geração simultânea de energia elétrica ou mecânica e energia térmica, antes produzidos com os motores convencionais a diesel. Com a vantagem de maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia nas formas citadas e o consumo de combustível, as turbinas vêm substituindo os, até então usados, motores de combustão interna convencional; e
- No meio aeronáutico as turbinas a gás vem passando por grandes avanços tecnológicos em um curto período de tempo. Há alguns anos os motores radiais de combustão interna, que foram usados durante muitos anos na aviação de transporte e de combate, foram substituídos pelos motores a jato, que apresentam um resultado satisfatório no seu uso para este fim, culminando na possibilidade da produção de aviões cada vez maiores, a exemplo do “A-380”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - <http://www.energia.sp.gov.br>, acessado em 19/04/2014.
- 2 - [http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_a\\_g%C3%A1s](http://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_a_g%C3%A1s), acessado em 23/04/2014.
- 3 - OBERT, Edward F. Motores de combustão interna, 2.ed.Porto Alegre: Editora Globo, 1971.
- 4 - H, Cohen, GFC, Rogers, HLH, Saravanamuttoo. Gas turbine theory. London: Longman Group Limited, 1972.
- 5 - TAGART, Robert. Marine Propulsion: Principles & Evolution. Houston, Texas: Gulf Publication Company.
- 6 - CAMACHO, Ricardo Montez. Moderno Sistema de Propulsão das Embarcações Mercantes, 2006.
- 7 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce\\_Trent\\_900](http://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Trent_900), acessado em 29/06/2014.
- 8 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Niteroi-class\\_frigate](http://en.wikipedia.org/wiki/Niteroi-class_frigate), acessado em 02/07/2014.
- 9 - [http://www.lete.poli.usp.br/PME2517\\_files/sistRefrigeracaoAbsorcao.pdf](http://www.lete.poli.usp.br/PME2517_files/sistRefrigeracaoAbsorcao.pdf), acessado em 07/07/2014.
- 10 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Combined\\_diesel\\_and\\_gas](http://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_and_gas), acessado em 08/08/2014.
- 11 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Combined\\_diesel-electric\\_and\\_gas](http://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel-electric_and_gas), acessado em 08/08/2014.
- 12 - <http://www.naval-technology.com/projects/meko/meko4.html>, acessado em 08/08/2014