MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

GABRIEL BORGES MAVROPOULOS

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PROPULSÃO: implementação das turbinas a gás e motores elétricos como propulsão principal em navios mercantes.

RIO DE JANEIRO

2015

GABRIEL BORGES MAVROPOULOS

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PROPULSÃO: implementação das turbinas a gás e motores elétricos como propulsão principal em navios mercantes.

Trabalho de curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: Msc. Eng. **Paulo** Roberto Batista **Pinto**

RIO DE JANEIRO

2015

GABRIEL BORGES MAVROPOULOS

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PROPULSÃO: implementação das turbinas a gás e motores elétricos como propulsão principal em navios mercantes.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Msc. Eng. **Paulo** Roberto Batista **Pinto**

_____

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, como forma de agradecimento pelos ensinamentos, apoio e amor transmitido por eles para que eu conseguisse atingir meus almejos. E ao meu avô, Antoine Constantin Mavropoulos, que transbordava amor e solidariedade por onde passava e que eu tive o indescritível prazer de poder conviver e amar. Que o senhor descanse em paz, vô.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de estar aqui.

À minha família que contribuiu para minha educação, formação de caráter e moral, em especial aos meus pais, Marilia Ayres Borges e George Constantin Mavropoulos, que sempre me apoiaram em tudo, dos quais tenho honra em ser filho.

Ao meu orientador, Paulo Roberto Batista Pinto, pelos conhecimentos transmitidos não somente ao longo da execução desse trabalho como ao longo da minha formação neste Centro, pela paciência, compreensão e cooperação para a execução do mesmo e para minha formação profissional.

Às amizades as quais sou extremamente grato por ter construído aqui dentro e às que não se perderam lá fora ao longo deste período de formação, em especial ao Arthur Lemos, Ronaldo Nicacio, Samuel Marambaia, Guilherme Sena, Gustavo Thomé, Ricardo Junior, André Rosário, Lucas Alves, Yago Vasques, Carlos Maia, Filipe Torquato, Gustavo Silva, João Pedro Astolfi, Antônio Teixeira, Yago Reis, e a Larissa Ferreira Cazarim, Tatiana Perry e Ana Luiza. Levarei vocês no coração para sempre.

À minha cadela, Manu, que apesar de toda minha distância, sempre me esperava em casa com alegria e conseguia me contagiar com seu carinho, fidelidade e amor.

EPÍGRAFE

“ E como a felicidade pode se transformar na insatisfação, assim o desespero pode sumir no despertar de uma nova primavera. Com cada dia, pode nascer um outro entendimento de nosso estado, nossos laços e objetivos. ”

(SUN TZU)

RESUMO

As turbinas a gás vêm sendo implementadas em navios mercantes como maquinas propulsoras principais, substituindo os motores a diesel. Devido a grande preocupação dos armadores com os gastos, estes têm buscado economizar nos combustíveis - como gasolina sem chumbo, querosene, óleo diesel convencional, biodiesel, óleos vegetais e gorduras, além de metanol, etanol e combustíveis gasosos sem a necessidade de aditivos promotores de ignição – e vêm se satisfazendo com os resultados obtidos com as turbinas, que além de serem mais econômicas, possuem a operação mais suave, manutenção mais simples, espaço ocupado menor, diminuição na vibração e no nível de ruídos, número reduzido de peças moveis quando comparado a um V8 americano e uma ótima relação potência/peso. Todavia, sua implementação no cenário mercante ainda é questionada. Sua construção não é barata, devido ao fato das turbinas atingirem altíssimas temperaturas, o que aumenta o custo de projeto; a predisposição humana de refutação ao novo, se irá funcionar ou não e a manutenção do que já funciona, dentre outros fatores que questionam a ampliação da aplicação das turbinas a gás no meio marítimo para substituir os motores Diesel em sua maioria. Porém, na busca da sustentabilidade e preservação do meio ambiente, redução do uso de combustíveis fosseis poluentes, com a injeção de novas tecnologias que apliquem cada vez mais fontes de energia renováveis no meio marítimo, as turbinas a gás, como fonte produtora principal de energia elétrica a bordo, e os motores elétricos, como consumidoras desta energia para propulsão principal das embarcações, formam uma dupla que atinge alto nível de eficiência e rendimento e são fortes concorrentes como propulsão alternativa aos antigos motores diesel.

Palavras-chave: turbina a gás; motores elétricos; propulsão alternativa; motores diesel.

ABSTRACT

Gas turbines have been being implemented on merchant ships as main propulsion machinery, replacing the diesel engines. Due to the great concern of shipowners with spending this have sought to save on fuel - as unleaded gasoline, kerosene, conventional diesel, biodiesel, vegetable oils and fats, as well as methanol, ethanol and gaseous fuels without the need for promoters additives ignition - and come up satisfying to the results obtained with the turbines, which in addition to being more economical, have a smoother operation, easier maintenance, smaller footprint, decrease in vibration and noise levels, reduced number of moving parts when compared to an American V8 and an excellent power / weight ratio. However, its implementation in the merchant scenario is still questioned. Its construction is not cheap, due to the fact that the turbines reach very high temperatures, which increases the cost of the project; human predisposition to refute the new, whether it will work or not and maintaining what already works, among other factors challenging the extension of the application of gas turbines in the marine environment to replace diesel engines mostly. However, in the pursuit of sustainability and preserving the environment, reducing the use of fossil polluting fuels, with the injection of new technologies to implement more and more renewable energy sources in the marine environment, gas turbines as the main production source of energy electricity on board, and electric motors, as consumers of this energy for main propulsion of vessels, form a duo that achieves high level of efficiency and performance and are strong competitors as an alternative to the old diesel propulsion.

Key-words: gas turbine; electric motor; alternative propulsion; diesel propulsion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Nicolas Leonard Sadi Carnot

Figura 2 "*Aeolipile"* de Hero

Figura 3 O primeiro automóvel

Figura 4 Turbina de John Barber

Figura 5 Turbina desenvolvida por Stolze

Figura 6 Fragatas Classe "Niterói" F40 e F42

Figura 7 Fases da operação de uma turbina

Figura 8 Compressor axial

Figura 9 Compressor radial

Figura 10 Câmara de combustão

Figura 11 Turbina de Laval

Figura 12 Turbina Curtis

Figura 13 Turbina Rateau

Figura 14 Turbina Curtis-Rateau

Figura 15 Descrição ciclo aberto

Figura 16 Descrição ciclo fechado

Figura 17 Descrição de um ciclo simples

Figura 18 Descrição ciclo combinado

Figura 19 Gráfico TxS e PxV do ciclo Brayton

Figura 20 Comparação ciclo Diesel x Brayton

Figura 21 Exemplificação dos processos de ação e reação

Figura 22 Diagrama esquemático de motor turbofan e turboélice

Figura 23 Turbina Rolls-Royce RB 211, modelo H63

Figura 24 Vista explodida de um motor elétrico

Figura 25 Ligação em Delta ou triangulo com valor de tensão usado a bordo

Figura 26 Inversor de frequência WEG

Figura 27 Sistema CODOG de propulsão

Figura 28 Sistema CODAG de propulsão

Figura 29 Sistema COGOG de propulsão

Figura 30 Sistema CODLAG de propulsão

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TG: turbina a gás

NM: navio mercante

CA: corrente alternada

CC: corrente contínua

MIT: motor indução trifásico

MW: megawatt

CODOG: combined Diesel or Gas

COGOG: combined Gas or Gas

CODLAG: Combined Diesel-eletric and Gas

CODAG: Combined Diesel and Gas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1. Objetivo 12

1.2. Conceitos básicos 13

2. HISTÓRICO 15

3. DESCRIÇÃO DE UMA TURBINA A GÁS 19

3.1. Componentes principais 20

3.1.1. Compressor 20

3.1.2. Câmara de combustão 22

3.1.3. Turbina 24

3.1.4. Componentes secundários 29

3.2. Ciclo Brayton 29

3.3. Comparação entre ciclo Brayton e ciclo Diesel 31

3.4. Tipos de turbina 33

3.5. Aplicação das turbinas a gás. 33

4. DESCRIÇÃO DE UM MOTOR ELETRICO 37

4.1. Tipos de motores elétricos e seus funcionamentos 37

4.2. Partida dos motores elétricos 39

5. SISTEMAS DE PROPULSAO 41

5.1. Tipos de sistemas de propulsão 41

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 46

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

1. INTRODUÇÃO

Devido a crescente preocupação mundial por inovações tecnológicas que visem a preservação do meio ambiente, a conscientização do uso de recursos renováveis e dos não-renováveis de forma econômica e sucinta, a diminuição do uso dos combustíveis fósseis, a turbina a gás vem surgindo, no ambiente marítimo, como coadjuvante na propulsão dos navios mercantes. Juntamente com os motores elétricos, essas maquinas térmicas tem ganho espaço como propulsoras dos navios mercantes (NM) por serem consideravelmente mais vantajosas quando comparadas aos motores de combustão interna e aos obsoletos navios movidos por turbinas a vapor, estas ainda presentes em sistemas nucleares e de cogeração de energia.

As turbinas a gás (TG) são um equipamento pertencente ao grupo das máquinas de combustão interna, juntamente com os motores Diesel e Otto, aos quais se assemelham em diversos aspectos. Possuem faixa de operação que varia de pequenas potências (100 kW) a grandes potências (180 MW).

Seu campo de aplicação é o mais variado e o mais amplo entre os diversos tipos de motores. Inicialmente, foram desenvolvidas objetivando fornecimento de trabalho mecânico. Porém, seu desenvolvimento pleno ocorreu em virtude do seu uso como elemento propulsor na indústria aeronáutica. Enquanto fornecedores de trabalho mecânico, as TG têm sido utilizadas, de maneira geral, como elemento propulsor para navios, aviões, no setor automotivo, ferroviário e como elemento acionador de estações *booster* de bombeamento (oleodutos e gasodutos), assim como também na geração de eletricidade, principalmente das centrais de ponta e sistema *stand-by* e em locais onde o peso e o volume são levados em conta como os casos das plataformas *Offshore* de extração de petróleo. Também são usadas em locais remotos e de difícil acesso e instalação, pois sua alta confiabilidade aliada à simplicidade de operação permite inclusive que elas sejam operadas à distância. (MARTINELLI JUNIOR, 2002)

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como propósito apresentar as TG como meios alternativos de propulsão e geração de energia nos NM, apresentando breve histórico, sua estrutura, ciclos térmicos envolvidos; vantagens e desvantagens, comparações com outros equipamentos utilizados para propulsão marítima, a formação do conjunto turbogerador e seu funcionamento;

sua aplicação no cenário atual, em conjunto com os motores elétricos. Mostrar a importância da inovação na propulsão marítima, com o intuito de conscientizar para minimizar a utilização de equipamentos que necessitem de combustíveis fosseis não-renováveis e que sejam agressivos ao meio ambiente.

1.2 Conceitos básicos

Para o completo entendimento deste trabalho, faz-se necessário definir alguns termos e leis termodinâmicas:

Lei zero: "*se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com um terceiro, estarão em equilíbrio térmico entre si".* [1]

1ª lei da termodinâmica: "*O calor recebido por um sistema é igual à soma entre a variação de energia interna do sistema e o trabalho efetuado por este".* [1]

2ª lei da termodinâmica (enunciado de Kelvin-Planck): "*É impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho".* [2]

E os termos referenciais:

a) Calor: forma de energia transferida de um sistema a uma dada temperatura a outro sistema ou meio, em temperatura inferior, devido a diferença de temperatura entre os dois.

b) Energia: quantidade de trabalho que um sistema é capaz de fornecer em um determinado período de tempo. Pode ser transmitida ou transformada de varias formas, cinética, mecânica, química, elétrica.

c) Trabalho: em um ciclo termodinâmico, o trabalho realizado é equivalente a área interna do ciclo, num diagrama pressão x volume.

d) Termodinâmica: é a parte da física que estuda as leis que descrevem a troca de calor (energia) e o trabalho realizado em um processo físico qualquer.

---

[1]GASPAR, A. **Fisica**. São Paulo, v.2, Ática, 2002.

[2]Disponível em: www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Termodinamica/2leidatermodinamica.php. Acessado em 23/06/2015

e) Energia interna: é a soma das energias cinéticas dos átomos e moléculas que se encontram no interior de um sistema e das energias potenciais associadas às suas mútuas interações, isto é, é a energia total contida num sistema fechado.[3]

f) Sistema: se caracteriza por um conjunto de propriedades como energia, temperatura, pressão, volume e número de partículas presentes. Podem ser abertos ou fechados

g) Temperatura: grau de agitação das moléculas de um sistema.

h) Entropia: grandeza associada ao grau de "desordem", irreversibilidade de um sistema. Parcela de energia de um sistema que não pode mais ser transformada em trabalho.

i) Evolução isobárica: parte de um ciclo onde a pressão se mantém constante durante sua evolução.

j) Evolução isentrópica: parte de um ciclo onde a entropia do sistema permanece a mesma.

k) Evolução adiabática: parte de um ciclo onde se considera nula a troca de calor.

Figura 1 – Nicolas Leonard Sadi Carnot

Fonte: http://3.bp.blogspot.com/_AE5mnd8luGs/TLNcvUcNHPI/AAAAAAAAAIc/yQlSxXxsew4/s320/sadi+carnot.jpg

[3] Disponível em: http://www.infopedia.pt/login?ru=apoio/artigos/$energia-interna. Acessado em: 23/06/2015

2. HISTÓRICO

Primeiro vamos ressaltar a semelhança entre as turbinas a gás e as turbinas a vapor, pois elas possuem uma história em comum e a ideia para ambas surgiu simultaneamente. (GIAMPAOLO, 2006).

Em 130 AC, aproximadamente, Hero de Alexandria, filósofo e matemático grego, verificou o efeito da reação do ar quente ou vapor, produzidos a partir de uma caldeira, movimentando uma roda através de dois bocais. A esse objeto ele deu o nome de "*Aeolipile"*.

Figura 2 – O *"Aeolipile"* de Hero

Fonte: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/TRC/Rockets/history_of_rockets.html

Com isso, Hero utilizou empiricamente o princípio da ação e reação, então descoberto mais tarde por Isaac Newton, e que veio a ser anunciado, em 1687, como a terceira lei de Newton: "*Para cada ação, haverá uma reação de mesma intensidade e força, mas em sentido oposto"*.

Com isso, Newton vislumbrou um veículo movido através de jatos de vapor, dando assim, base para a propulsão moderna. Observa-se na figura 3, o triciclo inventado no ano de 1769 pelo engenheiro francês Nicolas Joseph Cugnot (1725-1804), baseado no veículo vislumbrado por Newton e que é considerado como o primeiro automóvel.

Figura 3 – O primeiro automóvel

Fonte: http://www.sinaldetransito.com.br/img/curiosidades/primeiro_acidente.jpg

Em 1791 foi registrada a patente de um motor movido por turbina a gás pelo inglês John Barber, que funcionava sobre o ciclo termodinâmico das TG modernas. O motor empregava os componentes utilizados hoje para a produção de gases na turbina: um compressor, uma câmara de combustão e roda de turbina. Porém, este projeto nunca saiu do papel.

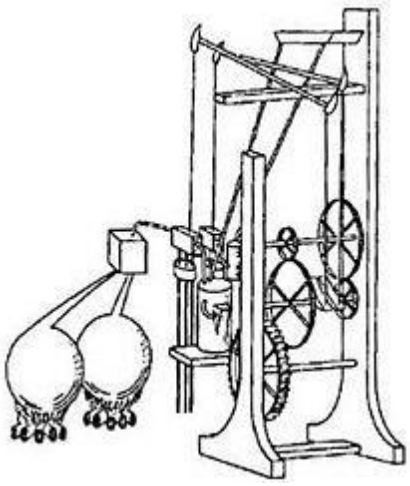


Figura 4 – Turbina de John Barber

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/John_Barber_(engineer)

No ano de 1808, John Dumball imaginou uma turbina múltiplos estágios. Todavia, não pensou em um estágio estacionário entre as fases rotacionais para transformar o fluxo nas fases posteriores, conceito que é a base de uma turbina axial atualmente.

Em 1837, na França, Bresson teve ideia de usar uma espécie de ventilador para movimentar ar, misturando com gás combustível e posteriormente queimado. Os produtos da combustão seriam resfriados com mais ar e então, usados para mover as laminas de uma turbina. Não há evidencias de que este dispositivo tenha sido construído.

Como veremos adiante, pode-se observar que Dumball e Bresson utilizaram todos os componentes de uma turbina com combustão a pressão constante. Contudo, somente entre os anos de 1900 e 1904 que a primeira TG foi realmente construída, por J.F. Stolze. O equipamento possuía compressão em varias etapas com fluxo axial. Foi testado durante 4 anos, mas seu funcionamento não foi efetivo.

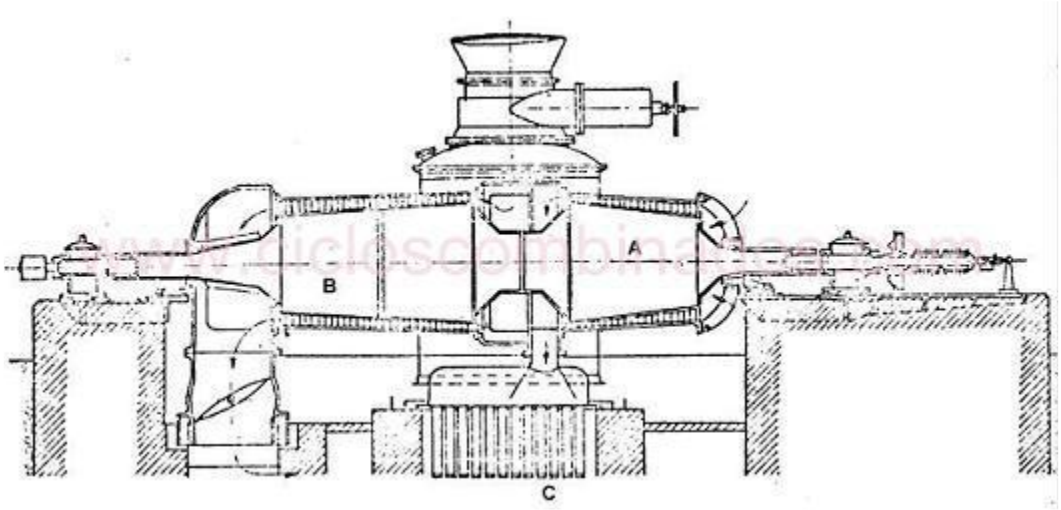


Figura 5 – Turbina desenvolvida por Stolze

Fonte: http://opex-energy.com/en/ciclos/principios_de_Gas_CTCC.html

No século XIX, o desenvolvimento dos estudos teóricos da termodinâmica foi o responsável pelo surgimento de melhores protótipos de turbinas. No início do século XX, outros projetos foram criados visando o aprimoramento das TG, porém, todos esbarravam na questão da potência efetiva obtida, na eficiência da turbina. O verdadeiro salto veio quando testes e estudos começaram a ser realizados para a utilização das turbinas no ramo aeronáutico, antes da segunda guerra mundial. O motivo do investimento deveu-se ao baixo peso e pequeno volume, fatores observados até hoje nas aeronaves e nos NM. A primeira turbina voltada para o ramo aeronáutico foi produzida por Frank Whitlle, no ano de 1937. E assim também avançou o estudo da aerodinâmica que, conjuntamente com o avanço no investimento das TG, consolidou o uso, a expansão e a evolução das TG no meio aeronáutico.

Na década de 50, as turbinas aeronáuticas foram modificadas para uso industrial, e são as denominadas aeroderivativas. Outras, também industriais, de concepção mais pesada, são as catalogadas como “heavy duty”. A turbina industrial pode queimar componentes mais pesados tendo maior flexibilidade que a aeronáutica, quanto à escolha do tipo de combustível a

ser empregado. E já nos anos 70, aproximadamente 100% dos aviões de grande porte já tinham como sua propulsão as turbinas a gás.

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

Esse desenvolvimento nos acompanha até os dias atuais, e hoje as TG tem aplicação não só no campo industrial ou na propulsão aeronáutica, mas também na geração de energia elétrica, propulsão naval, acionamento de equipamentos e em ciclos combinados. A ver, ultimamente a TG tem sido o melhor meio de produção de energia nas plataformas *offshore*.

No Brasil, a Marinha do Brasil (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.

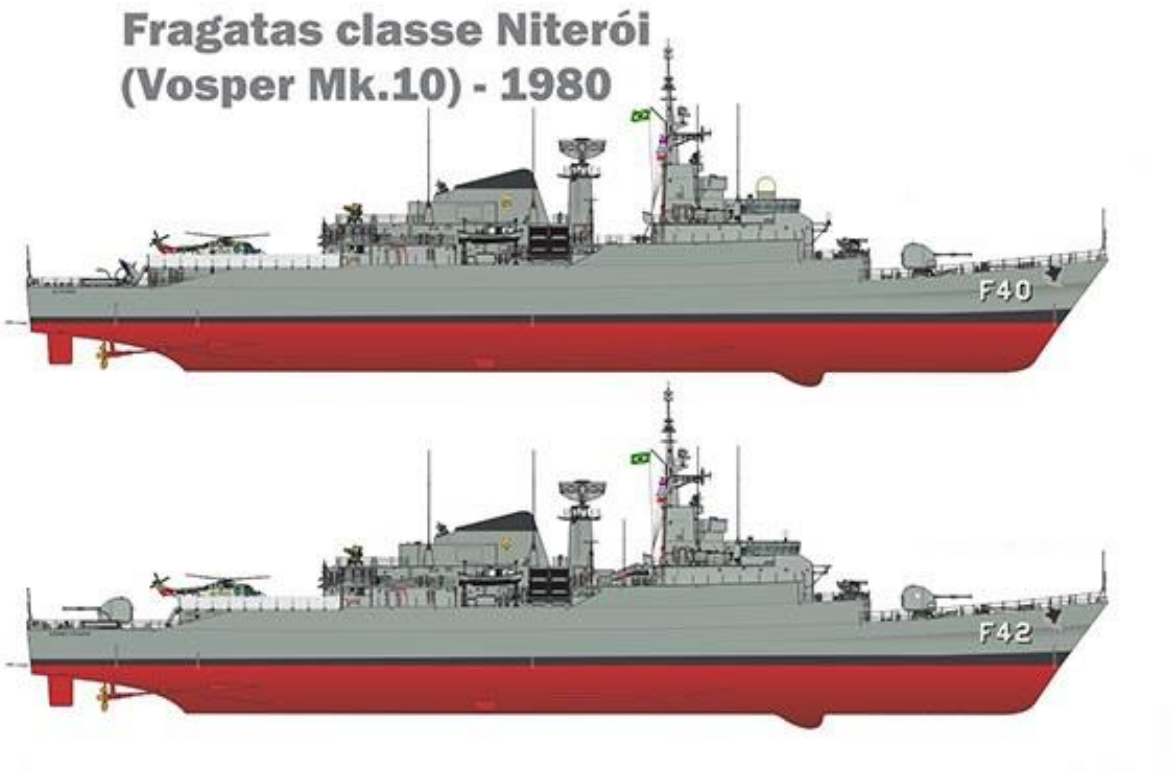


Figura 6 – Fragatas Classe “Niterói” F40 e F42

Fonte: http://www.naval.com.br/blog/wp-content/uploads/2012/08/Fragatas-2.jpg

3. DESCRIÇÃO DE UMA TURBINA A GÁS

As TG são máquinas rotativas de combustão interna que são constituídas basicamente por um compressor, uma câmara de combustão ou combustor e a turbina propriamente dita. É uma máquina térmica que visa basicamente a conversão da energia contida no combustível em potência de eixo: a energia potencial contida nos gases provenientes da combustão do fluido de trabalho é que aciona geradores elétricos ou é usada para propulsão aérea ou marítima.

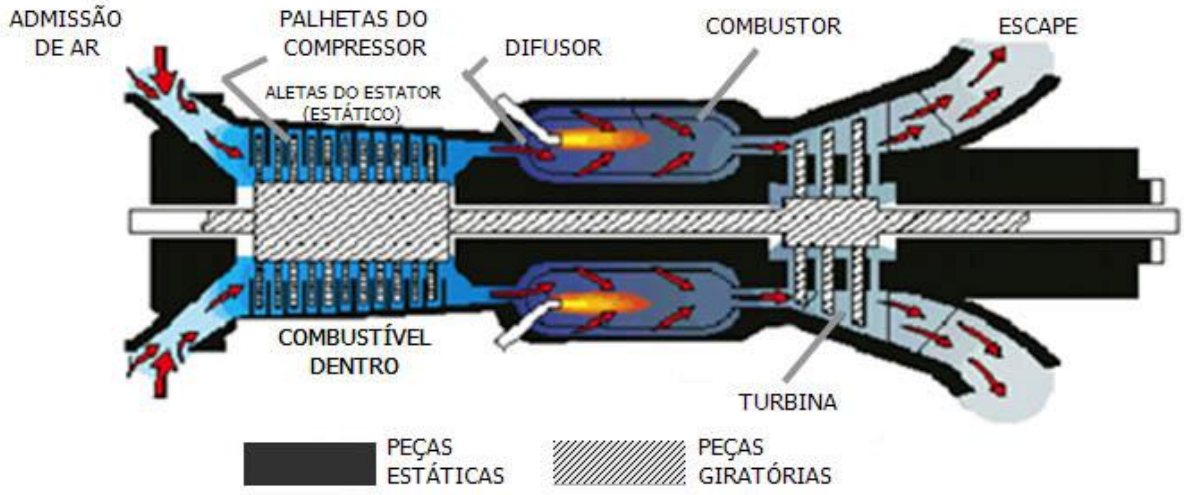


Figura 7 – Fases da operação de uma turbina.

Fonte: aero.upm.es

O funcionamento de uma turbina baseia-se, inicialmente, na compressão do fluido de trabalho, aumentando sua energia interna, misturando-o com combustível a ser queimado e então, expandindo-o na turbina.

Explicando melhor a sequência de eventos que ocorrem dentro da TG, é necessário que a expansão do fluido ocorra após a compressão do mesmo e que esse também tenha sua energia interna aumentada, pois assim, ao se expandir através da turbina, conseguirá gerar torque de eixo suficiente para movimentar o compressor e dependendo dos parâmetros, da relação de pressão e temperatura de entrada na turbina, é capaz ainda de produzir torque para que, quando conectada a um gerador, a turbina produza energia elétrica. Este aumento de energia interna é produzido através da queima do combustível, que é introduzido com o ar já pressurizado, proveniente do compressor, em uma câmara de combustão, onde são misturados em proporções corretas para atomizar a queima.

3.1 Componentes principais

Citaremos a seguir os elementos essenciais para o funcionamento de uma TG.

3.1.1 Compressor

Elemento composto por estágios, estes definidos pelo conjunto de uma fileira de palhetas fixas (estator) que transforma a energia cinética do ar admitido em pressão e de uma fileira de palhetas rotativas (rotor), que impõe movimento ao ar, aumentam sua velocidade. O anel de palhetas estatoras tem a finalidade de direcionar o ar para incidir com um ângulo favorável sobre as palhetas do próximo rotor e promover a desaceleração do fluxo de ar para ocorrer a transformação da energia de velocidade em aumento de pressão e temperatura (efeito difusor).

Existem dois tipos de compressores: o axial e o radial. Em uma turbina, eles também são divididos em compressores de baixa e alta pressão, por onde o fluido passa primeiro e por fim, respectivamente.

Os compressores axiais são constituídos por vários estágios, cada um deles composto por uma fileira de pás do estator e uma fileira de pás do rotor. Cada estágio é responsável por aumentar a pressão do fluido, e a razão de pressão de um estágio para o outro é de 1,1 a 1,4. Com vários estágios, pode-se atingir, no total, uma razão de pressão acima de 40. São ditos compressores axiais porque o fluido atravessa o equipamento na direção paralela ao eixo de rotação.

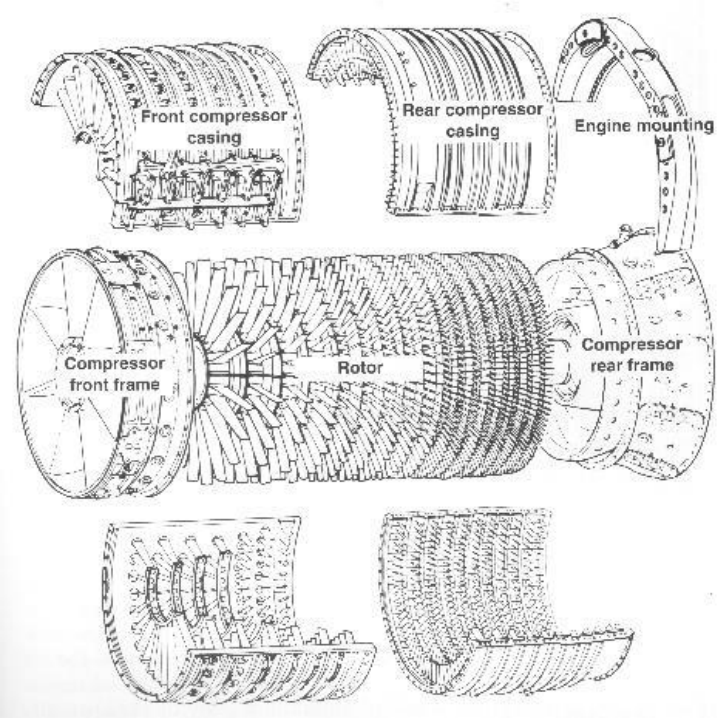


Figura 8 – compressor axial.

Fonte: http://www.iran-eng.com/showthread.php/123981

Os compressores do tipo axial são geralmente utilizados em turbinas de médio e grande porte, mas também podem ser encontrados em turbinas de pequeno porte. As principais perdas de potência se dão devido ao ângulo de incidência do fluido nas pás do rotor e do estator, perda de energia cinética do fluido que deixa o estator, a não vedação perfeita na carenagem da turbina, ocasionando vazamento do fluido, dentre outros. Para assegurar máxima eficiência e flexibilidade, o compressor pode ser dividido em uma seção de alta e uma de baixa pressão.

Os compressores radiais são utilizados em turbinas de pequeno porte. O fluido entra no sentido axial e sai no sentido radial. As pás têm a função de diminuir o número de Mach* na boca do rotor, evitando ondas de choque. Possui projeto de construção mais simples que o compressor axial e foi o primeiro tipo utilizado na aviação de caça, já na segunda guerra.

*Obs.: Número de Mach (Ma) de um escoamento é uma grandeza adimensional definida pela relação entre a velocidade (c) desse escoamento e a velocidade do som no meio (c_s):

$$Ma = \frac{c}{Cs}$$

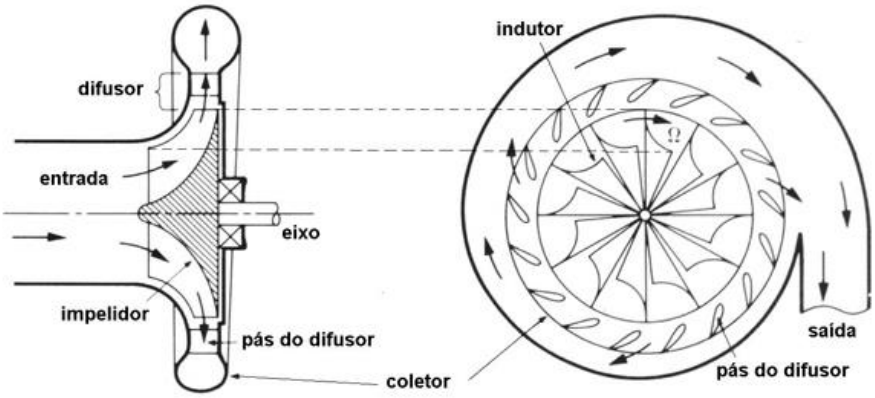


Figura 9 – compressor radial

Fonte: http://canalpiloto.com.br/por-dentro-dos-motores-a-reacao/

O compressor axial é mais eficiente do que o radial, porém, o radial é mais estável, possui uma maior faixa de operação, onde a vazão não é blocada (atinge um máximo) e nem a razão de pressão atinja a linha onde ocorre o fenômeno *surge*. Este máximo é atingido quando a velocidade de escoamento do fluido atinge a velocidade do som (Mach 1). E o fenômeno *surge* ocorre quando a razão de pressão é maior que um certo nível para uma dada vazão, fazendo com que o fluido, em pequenos intervalos de tempo, inverta seu sentido na turbina, causando vibrações excessivas e ruídos. O ponto de operação da turbina é, geralmente, próximo ao ponto de *surge*, pois é aí sua maior eficiência.

De todo o ar admitido pelo compressor, apenas 30% é direcionado para a combustão. O restante é, praticamente, utilizado só para o resfriamento da carcaça da turbina, da câmara de combustão (na casa de 2000ºC) e das paletas, o que permite o uso de pós queimadores.

3.1.2 Câmara de combustão

É o local onde ocorre o aumento de energia interna do fluido de trabalho; onde o combustível é introduzido a alta pressão, de forma atomizada, e queima a uma pressão praticamente constante. A temperatura de combustão dentro da câmara pode chegar a 1800ºC. Podem ser do tipo anular, tubular, ou tubo-anular. As turbinas industriais de porte pesado normalmente utilizam a tubular, as de porte leve a anular e as turbinas derivadas do ramo

aeronáutico utilizam a tubo-anular ou anular. Normalmente as turbinas a gás tem sua câmara de combustão dividida em 4 seções principais:

a) transição de entrada: ar com pressão vindo do compressor entra na câmara;
b) zona primaria: onde se encontram o ignitor e os injetores de combustível. É onde ocorre a combustão do gás;
c) zona secundária: ocorre a diluição dos gases vindos da zona primaria, com o objetivo de homogeneizar e preservar a câmara de combustão, mantendo a chama no meio, evitando o contato com a parede da câmara e mantendo sua temperatura numa faixa segura.
d) transição de saída: os gases da zona secundária se preparam para entrar no primeiro estágio da turbina.

A zona primaria da turbina deve ser bem projetada, pois deve manter a chama estável para que ela não apague e para que a eficiência da turbina não caia. Porém, sempre existe uma perda de carga devido a turbulência gerada pela configuração da câmara.

A ignição inicial se dá através de uma centelha elétrica provocada por uma vela, semelhantes aos presentes nos motores Otto, normalmente presente em três câmaras somente. Após a ignição, a combustão se sustenta e não se faz mais necessário o uso das velas. Todas as câmaras de combustão estão conectadas através de um buraco na parede dos combustores, formando um “anel”, como pode ser visto na figura 10 logo abaixo.

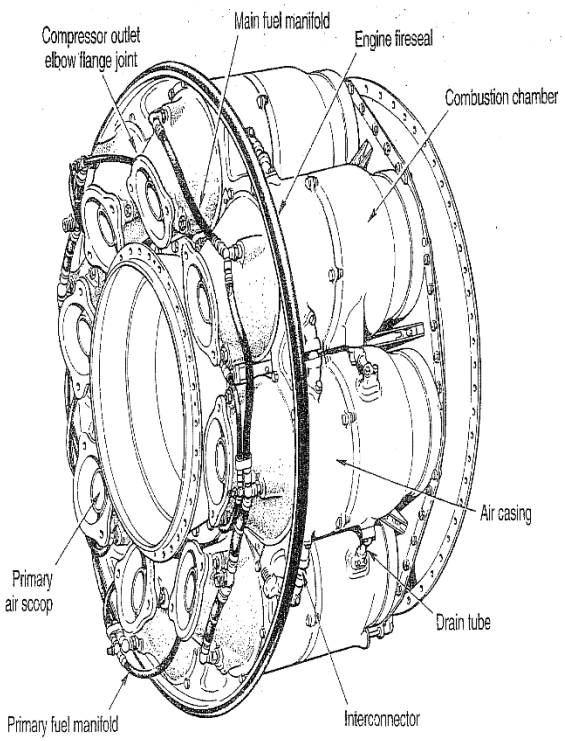


Figura 10 – câmaras de combustão

Fonte: G.F.C. Rogers and Y.R. Maybew. Gas turbine theory. 4ª Ed. Londres: 1996

Os gases produzidos na combustão são expandidos a uma alta velocidade através dos estágios da turbina, para que a energia contida nos gases seja transformada em potência de eixo. A câmara de combustão é uma das partes das TG que sofrem maior desgaste, assim como os queimadores, devido as altíssimas temperaturas atingidas no interior dos combustores.

3.1.3 Turbina

A turbina é o último estágio por onde o fluido de trabalho passa. É acionada através dos gases provenientes da combustão, que passam primeiro pela turbina de alta pressão, que aciona o compressor de alta pressão. Os gases de escape, após passarem pela turbina de alta pressão, passam pela turbina de baixa pressão, esta que aciona o compressor de baixa pressão. Por fim, os gases de escape saem, de fato, da TG.

Os estágios da turbina podem ser divididos de acordo com o número de filas de palhetas móveis:

a) ação simples ou Laval (uma fileira) – expansão do vapor ocorre completamente no bocal, fornecendo um fluxo de alta velocidade para o rotor, baixo rendimento, simplicidade de projeto e construção. Utilizadas para pequenas potências.

Figura 11 – turbina de Laval.

Fonte: arquivo pessoal.

b) Curtis – duas ou mais fileiras intercaladas por palhetas fixas; escalonamento de velocidade;

Figura 12 – turbina Curtis.

Fonte: arquivo pessoal.

c) Rateau – arranjo com duas ou mais turbinas de Laval em série (escalonamento de pressões); obtém-se velocidades mais adequadas nas palhetas móveis e podem apresentar maiores dimensões, conforme o número de estágios e;

Figura 13 – turbina Rateau

Fonte: arquivo pessoal.

d) Curtis-Rateau – combinação de estágios Curtis e Rateau. Possui velocidades ideais nas palhetas, maiores rendimentos, permiti o uso de materiais mais baratos e leves, menos nos estágios iniciais. São turbinas mais curtas.

Figura 14 – turbina Curtis-Rateau

Fonte: arquivo pessoal.

As turbinas também podem ser classificadas de acordo com seu ciclo, aberto ou fechado e simples ou combinado. E também de acordo com seu princípio de funcionamento, se de ação ou de reação.

Classificação de acordo com o ciclo:

a) aberto: o fluido de trabalho não retorna ao início do ciclo. Passa pelo compressor, é levado ao combustor onde é misturado com o combustível e entra em combustão. Após, os gases da combustão se expandem pela turbina e saem pelo bocal de exaustão.

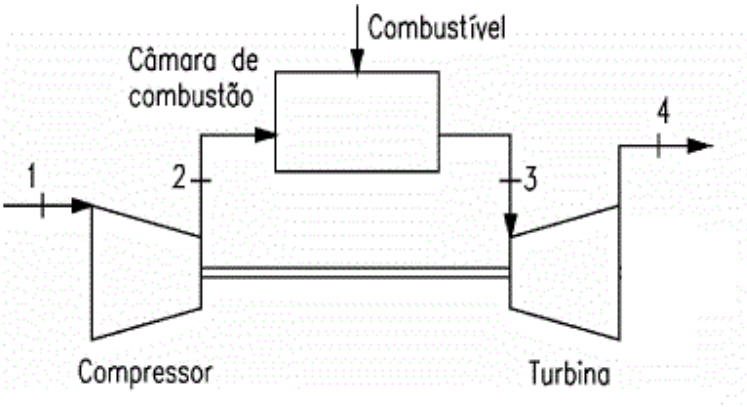


Figura 15 – descrição ciclo aberto

Fonte: de MENEZES, E. do L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas.** 2011. 35p. Dissertação (Graduação em Tecnologia em Construção Naval), Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2011.

b) fechado: o fluido de trabalho retorna ao início do ciclo. Para isso, o combustível é queimado fora do sistema e utiliza-se um trocador de calor para fornecer a energia da combustão necessária para o fluido de trabalho.

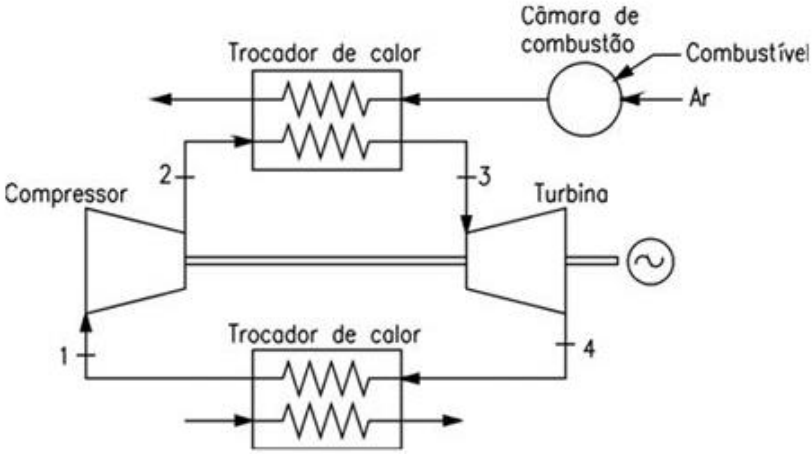


Figura 16 – descrição ciclo fechado

Fonte: de MENEZES, E. do L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas.** 2011. 35p. Dissertação (Graduação em Tecnologia em Construção Naval), Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2011.

Este ciclo possui algumas vantagens sobre o aberto, como a utilização de combustíveis sólidos, evita a erosão das palhetas da turbina, elimina-se o uso de filtros, é possível uso de altas pressões em todo o ciclo reduzindo o tamanho da turbomáquina em relação a potência requerida. Mas há a necessidade de um sistema externo de aquecimento do fluido de trabalho, envolvendo um ciclo auxiliar com uma diferença de temperatura entre os gases.

Já no ciclo simples, a TG opera isoladamente.

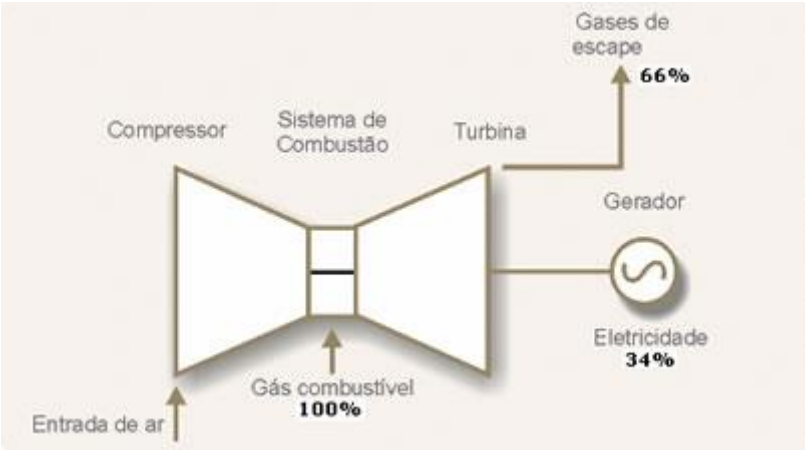


Figura 17 – descrição de um ciclo simples

Fonte: http://www.gasnet.com.br/termeletricas/ciclo.asp

Como podemos observar na figura 17, de 100% dos gases utilizados na TG, 66 % são gases de escape e apenas 34% são utilizados para produção de energia elétrica, quando se tem acoplado a turbina um gerador elétrico. A partir dessa observação, percebe-se a necessidade da utilização de um ciclo combinado e a cogeração de energia elétrica, para um melhor aproveitamento do combustível e pela redução de custos e de emissão de poluentes.

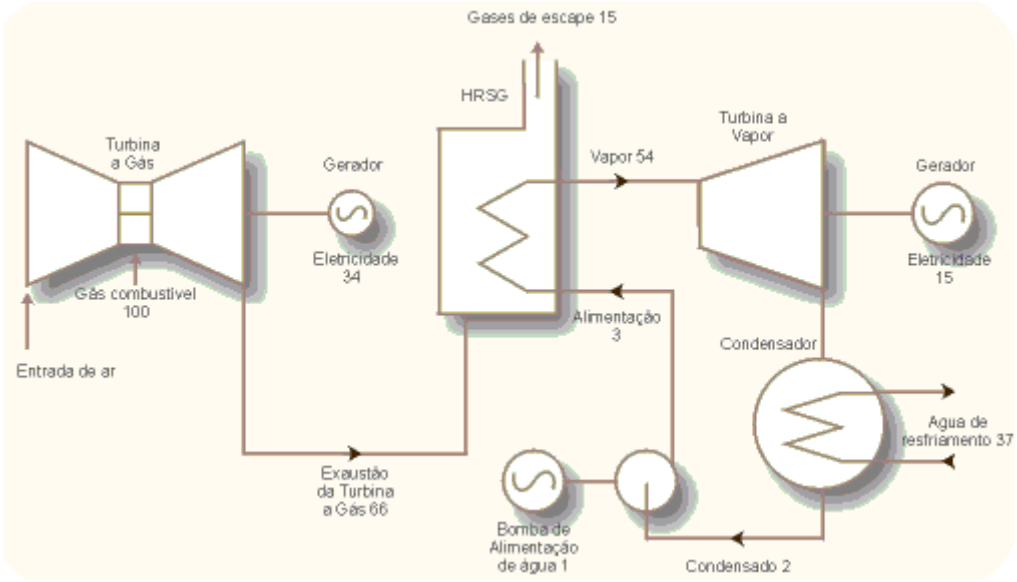


Figura 18 – descrição ciclo combinado

Fonte: http://www.gasnet.com.br/termeletricas/ciclo.asp

3.1.4 Componentes secundários

A seguir listaremos alguns componentes auxiliares, tais como:

a) interconector;
b) queimador;
c) tubos de lubrificação;
d) estator;
e) carcaça intermediária (conjunto de engrenagens, motor de partida, bomba de óleo combustível, de óleo lubrificante)

3.2 Ciclo Brayton

Dentre os vários processos termodinâmicos que descrevem o funcionamento das diversas máquinas térmicas – como o ciclo Diesel, Sabathé e o Otto, para motores de combustão interna; o ciclo de Rankine para turbinas a vapor, dentre outros – o ciclo termodinâmico que representa a TG simples é o ciclo Brayton.

Conforme dito anteriormente, o arranjo mais simples de funcionamento de uma turbina é com um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina propriamente dita. O compressor é acionado pela turbina, à qual é ligado por um eixo (ver figura 15) e parte do trabalho desta é utilizado para essa finalidade. O trabalho da turbina, descontando o trabalho cedido para acionar o compressor, é a energia útil do sistema, e pode ser utilizada de duas formas distintas, como veremos mais adiante.

O ciclo Brayton é descrito basicamente por duas evoluções adiabáticas e duas evoluções isobáricas.

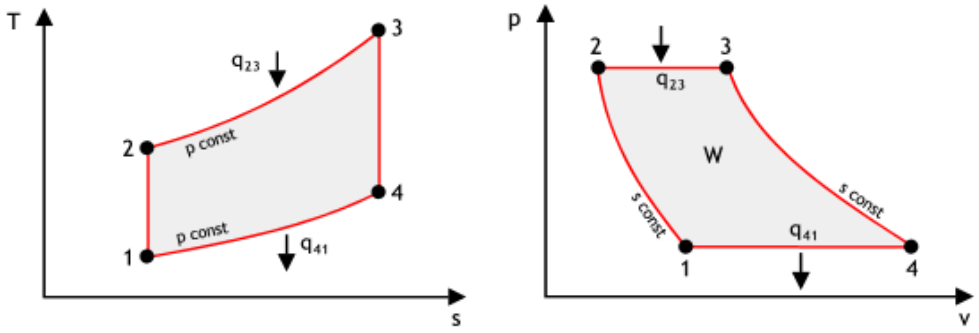


Figura 19 – gráfico TxS e PxV do ciclo Brayton

Fonte: http://www.mspc.eng.br/termo/termod0530.shtml

O 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 consequente aumento de entalpia (1-2). Comprimido, o ar é direcionado às câmaras, onde mistura-se com o combustível possibilitando queima e aquecimento, à pressão constante (2-3). Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura, se expandem conforme passam pela turbina, uma evolução isoentrópica (3-4). 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. Em uma turbina real, o

processo (4) - (1), considerado isobárico, não existe, e é utilizado somente para o estudo termodinâmico do ciclo. Porém, como já visto, em ciclos mistos ou combinados, podemos ter a presença de um equipamento que preveja a passagem dos gases de escape por um trocador de calor e o aproveitamento de parte de sua energia.

Aprofundando o estudo da eficiência térmica do ciclo Brayton, é possível observar através de fórmulas matemáticas baseadas na Primeira Lei da termodinâmica e na consideração de que os processos são isentrópicos e isobáricos, ao final do desenvolvimento, que bastaria aumentar a pressão de combustão da turbina para que a eficiência fosse consideravelmente elevada. Porém, esse aumento de pressão leva a grandes perdas no compressor além da necessidade de se atingir temperaturas muito elevadas, incompatível com os materiais utilizados atualmente, que é, inclusive, um dos principais fatores obstrutores na construção de uma turbina: não se possui materiais que suportem as elevadas temperaturas atingidas.

No ciclo real, a compressão exercida pelo compressor e a expansão na turbina não são isoentrópicos. Em outras palavras, estes processos não são reversíveis, e a entropia se modifica durante os processos. Outro fator que diferencia o ciclo real do ideal é o atrito do fluido que resulta em perda de pressão na câmara de combustão, nos trocadores de calor e na entrada e saída dos tubos de exaustão.

3.3 Comparação entre o ciclo Brayton e o ciclo Diesel

Os ciclos Diesel e Brayton são dois ciclos utilizados para descrever o funcionamento de máquinas térmicas de combustão interna que possuem algumas semelhanças, vantagens e desvantagens de um em relação ao outro.

Ao analisarmos os processos que são desenvolvidos ao longo do ciclo, a sequência é a mesma: admissão, compressão, combustão e exaustão. O ciclo Diesel é descrito por uma compressão adiabática, seguida da combustão isobárica, expansão adiabática e exaustão dos gases de combustão a volume constante. E em seguida, aspiração ou admissão do ar para iniciar o ciclo novamente; pode ser de dois ou quatro tempos, com aspiração forcada ou não. Sua diferença, em se tratando de ciclo termodinâmico, para o ciclo Brayton, é apenas a exaustão, que acontece de forma isobárica neste, e isovolumétrica naquele.

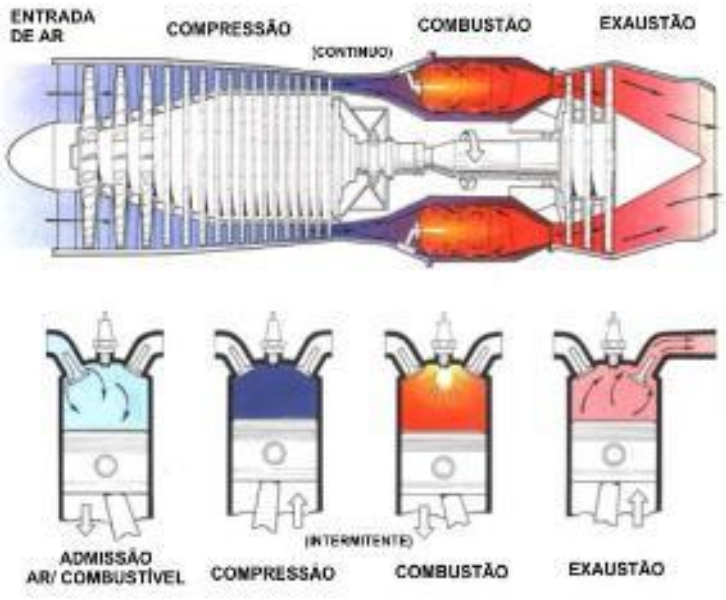


Figura 20 – comparação ciclo Diesel x Brayton

Fonte: http://autoentusiastas.com.br/2014/11/anatomia-de-uma-turbina-automobilistica/comment-page-1/

Observando a parte de aplicação prática das máquinas térmicas, vemos que existem diversos fatores que favorecem a instalação das TG a bordo em relação aos motores Diesel, como os seguintes:

a) segurança na instalação;
b) manutenção mais simples: a manutenção a ser realizada em uma TG geralmente é feita por horas de funcionamento das peças. Essas são trocadas quando atingem sua hora máxima de funcionamento. A câmara de combustão, os queimadores e o motor de partida são exceções, pois são os componentes que mais sofrem desgaste em uma turbina, podendo então ter uma manutenção mais frequente;
c) operação mais suave;
d) peso e espaço ocupado bem menores;
e) vibração e nível de ruídos consideravelmente menores;
f) relação peso x potência quatro vezes menor, ou seja, para o mesmo peso do equipamento, a turbina a gás possui quatro vezes maior potência;
g) permitem rápida partida mesmo em temperatura baixa, aceleram-se rapidamente e se ajustam prontamente às variações de carga.

As TG possuem desvantagens também. A principal é que, comparadas a motores a pistão do mesmo tamanho, elas são caras. Por girar a velocidade muito alta e por causa das altas

temperaturas de operação, o projeto e a construção são difíceis, tanto do ponto de vista da engenharia quanto dos materiais. Elas também tendem a consumir mais combustível quando operando em baixa rotação, e preferem uma carga constante a carga variável. Por isso são bem utilizadas para a propulsão, em aviões a jato, e para a produção de energia elétrica em usinas, a bordo, ou em plataformas, como citaremos a seguir

3.4 Tipos de turbina

As TG podem ser dividas em turbinas de ação e de reação.

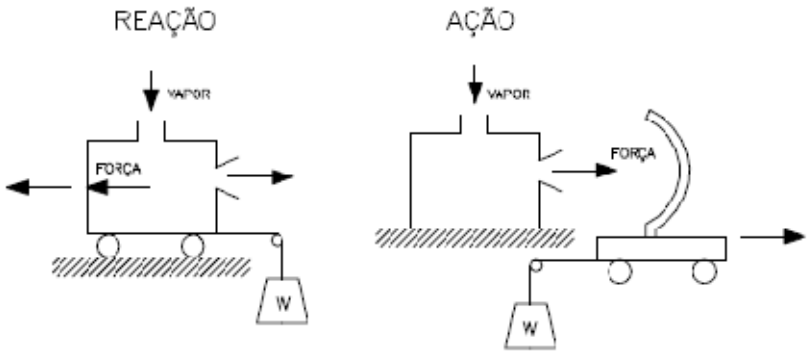


Figura 21 – exemplificação dos processos de ação e reação

Fonte: http://let-therebe-rock.blogspot.com.br/2013/05/turbinas-vapor.html

Se o expansor for fixo e os gases da combustão forem direcionados a ele, contra um anteparo móvel, a força de ação dos gases irá deslocar o anteparo, na direção dos gases, levantando o peso W. Se, entretanto, o expansor puder mover-se, a força de reação, que atua sobre ele, fará com que se desloque, em direção oposta à dos gases, levantando o peso W. Em ambos os casos a energia dos gases foi transformada em energia cinética no expansor e esta energia cinética, então, convertida em trabalho.

3.5 Aplicação das turbinas a gás

Como já foi falado anteriormente, as turbinas atuam tanto no campo aeronáutico como meio propulsor dos aviões a jato e como principais produtoras de energia elétrica. Na aviação, o equipamento sofre uma implementação: é adicionada uma ventoinha, como pás enormes de ventilador na entrada da turbina. No estágio final da turbina, um eixo que vai até a

frente do motor e que aciona essas pás, é movimentado pelos gases de descarga. A propulsão por turbinas acontece devido ao fenômeno do empuxo. E é por isso que são colocadas essas pás enormes - que possuem por volta de 3 metros de diâmetro nos grandes jatos, para aumentar consideravelmente a quantidade de ar que é entregue a turbina, e consequentemente, aumentar o empuxo. As TG que são destinadas a essa finalidade são chamadas de turbofan ou turboélice. Um motor turboélice é similar a um turbofan, que foi citado acima, mas em vez de um ventilador ele tem uma hélice convencional na parte da frente. O eixo de saída é conectado a uma caixa de redução para diminuir a velocidade, e o eixo de saída da caixa de redução gira uma hélice.

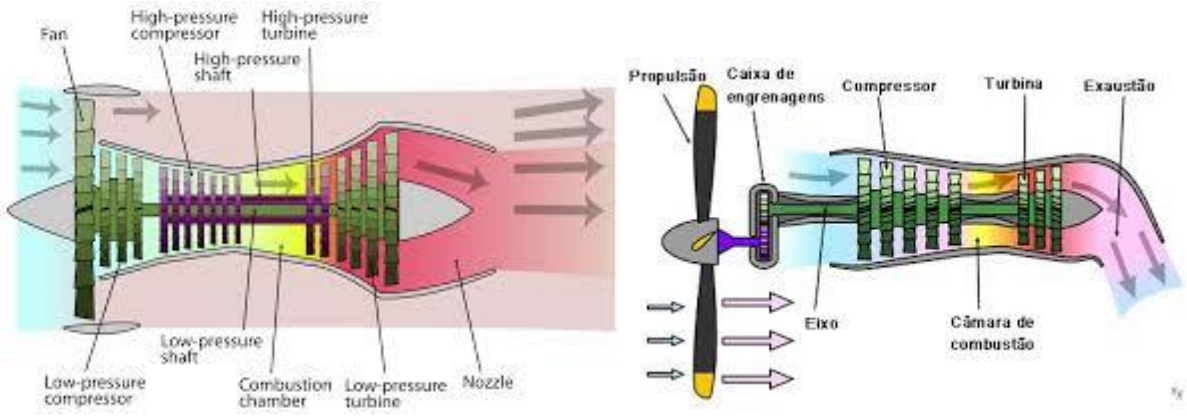


Figura 22 – diagrama esquemático de motor turbofan e turboélice

Fonte: en.wikipedia.org

As turbinas destinadas a produção de energia elétrica tanto em navios, quanto em plataformas são de extrema importância para qualquer tipo de operação que venha a ser realizada, tanto em navios quanto em plataformas, e atualmente são consideradas o coração das plataformas nas quais são utilizadas por ser a geração de energia elétrica fator essencial para o funcionamento de todos os equipamentos necessários. As turbinas utilizadas nas plataformas marítimas de produção de petróleo têm potência de 15 MW a 25 MW e rotação de 12 a 20 mil rpm (AVELINO, 2008).

As turbinas utilizadas nas plataformas marítimas de produção de petróleo têm potência de 15 MW a 25 MW e rotação de 12 a 20 mil rpm (AVELINO, 2008). Um esquema que pode ser utilizado em uma plataforma, é disposição de três turbinas a gás, cada uma acoplada em serie a geradores elétricos de corrente alternada, com os três conjuntos ligados em paralelo, mas apenas dois desses conjuntos sendo usados, ficando um de reserva. Essa disposição pode variar, dependendo da capacidade energética requerida pela plataforma.

A utilização de uma máquina de reserva é de suma importância em qualquer tipo de embarcação que não se tenha disponibilidade de uma manutenção de forma rápida, caso alguma avaria seja constatada, pois assim, se evitam eventuais falhas na operação e o funcionamento contínuo. Isso é observado em diversos equipamentos a bordo: bombas de alimentação, filtros, compressores, trocadores de calor, dentre outros, justamente para se evitar a interrupção da operação em caso de avaria ou de alguma manutenção, seja ela preventiva, corretiva ou preditiva.

O gerador é acoplado à turbina por meio de uma caixa de redução de velocidades porque a rotação da turbina é de 5 a 10 vezes maior que a do gerador. Como a geração é trifásica em 13,8 kV, a saída da potência elétrica passa por um transformador abaixador para a tensão de consumo, que é de 440 Volts (AVELINO, 2008). As fases a partir da geração de potência mecânica feita pela TG até a formação da energia elétrica passam pela caixa de redução, o gerador, disjuntor e o transformador. Mostrando a importância das turbinas e seu amplo uso a Rolls-Royce lançou um modelo de sua família de turbinas industriais RB 211, a H63, uma turbina de 44MW que gerou pelo menos mais 30% de potência, de forma mais eficiente que as anteriores.

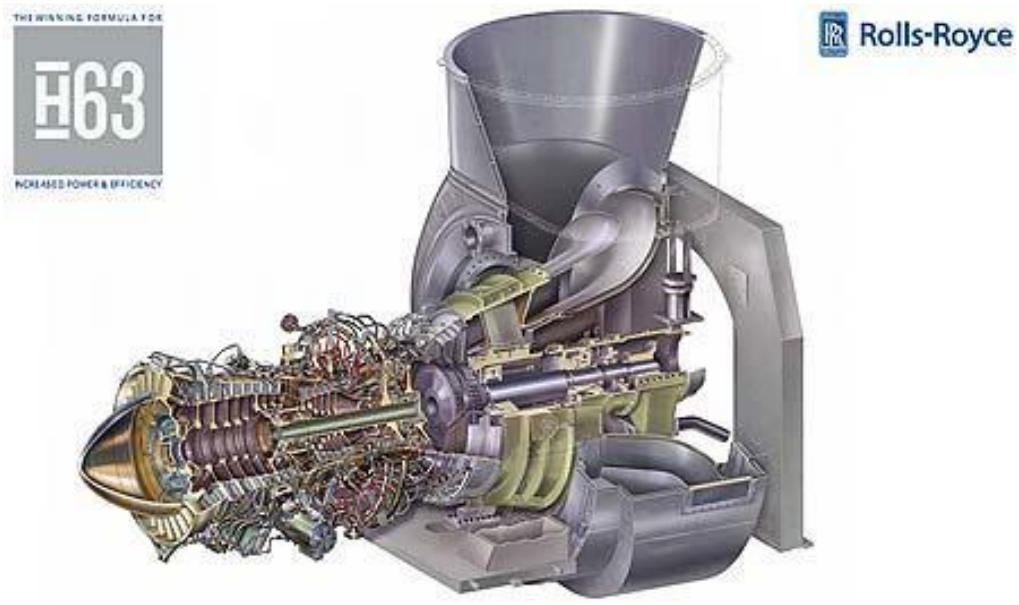


Figura 23 – turbina Rolls-Royce RB 211, modelo H63

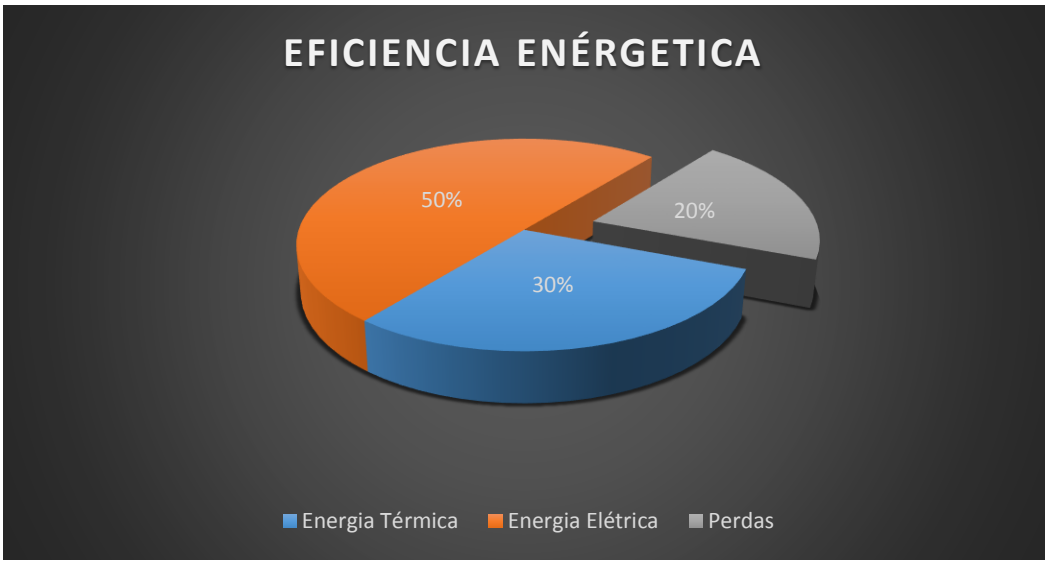
Fonte: www.compressoronline.cn

Esse desenvolvimento sempre tem como objetivo a melhoria da confiabilidade, facilidade de manutenção, rápida instalação e, ao mesmo tempo, maiores níveis de eficiência e potência. Vale ressaltar que a turbina H63 chega ao estágio de carga total a partir de uma partida a frio em dez

minutos, e é capaz de mudar de combustível liquido para gás e vice-versa, sem qualquer interrupção da carga, em qualquer nível de potência.

A cogeração é outro conceito aplicado ultimamente que permite a produção simultânea de alguns tipos de energia, a partir do mesmo combustível, Gás Natural, por exemplo. E quando se dispõe desse, uma boa solução para a aplicação da cogeração é uma TG. Nesta solução, a relação vapor-eletricidade pode se adaptar com maior flexibilidade às necessidades normais das indústrias. O balanço da eficiência energética de uma turbina a gás para 100% de energia primária é de 30% de energia elétrica, 50% de energia térmica e 20% de perdas (vide gráfico abaixo).

Gráfico 1 – relação de eficiência energética



Fonte: LIMA, L. J. B. et al. **Gás natural: geração de energia.** Macaé. 2010.

As turbinas a gás têm se tornado máquinas ideais e cada vez mais adotadas em embarcações offshore, como embarcações FPSO (Floating Production, Storage and Offloading), onde podem ser usadas para produção de energia elétrica e acionamento mecânico, devido ao seu pequeno peso, projeto compacto e pequeno tamanho ocupado, ratificando a crescente presença desta no meio marítimo, devido a suas diversas vantagens e aplicações diversificadas. Como o objetivo desta dissertação é citar a aplicação a bordo das TG como principais produtoras de energia elétrica para a propulsão marítima através de motores elétricos, iremos agora abordar a descrição dos motores elétricos (funcionamento, equipamentos, tipos e aplicações) de forma rápida e sucinta, para então explicar a aplicação conjunta de fato dos dois equipamentos.

4. DESCRICÃO DE UM MOTOR ELETRICO

Neste capitulo, iremos apenas apresentar os tipos de motores elétricos e descrever o funcionamento, vantagens e desvantagens, componentes dos motores trifásicos de indução (MIT) de CA (corrente alternada), que são os mais usados a bordo, devido ao seu aspecto construtivo, facilidade de manutenção, velocidade praticamente constante dentre outros fatores.

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica; assim, ao ligarmos um motor à rede, ele irá absorver uma dada quantidade de energia elétrica, e em troca aciona uma carga, por exemplo, um hélice. A energia elétrica pode ser transmitida por corrente alternada ou corrente contínua. Porém, a transmissão por corrente alternada é mais comumente usada por seus valores de tensão poderem ser alterados com facilidade, o que facilita a produção e a transmissão da mesma desde a fonte geradora. A bordo possuímos transformadores (dispositivo que permite elevar ou abaixar os valores de tensão ou corrente em um circuito de CA) elevadores e abaixadores de tensão, que permitem a variação da tensão.

4.1 Tipos de motores elétricos e seus funcionamentos

Os motores elétricos em geral são divididos em duas partes: rotor (parte móvel) e estator (parte fixa). Subdividem-se em motores CA (monofásicos ou trifásicos) e motores CC (corrente contínua).

Os tipos de motores são:

a) Motores monofásicos de CA (síncrono e assíncrono), onde os assíncronos podem ser de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado; os síncronos são de imã permanente e de relutância.
b) Motores trifásicos de CA (indução ou assíncrono), onde os assíncronos são de gaiola ou de anéis; os de indução são de imã permanente, pólos salientes ou pólos lisos.

O motor de indução ou assíncrono é o tipo de motor elétrico mais utilizado e difundido, para motorização de processos industriais. Sua principal vantagem é a construção bastante simples e robusta, o que possibilitou sua fabricação a um custo mais baixo que outros tipos de motores. São empregados para uma grande variedade de aplicações, desde alguns watts até alguns MW

(megawatts), por isso, podem ser utilizados nos navios, cuja potência requerida atinge a casa de MW. Os motores de indução (tanto trifásicos como monofásicos) possuem no estator um jogo de bobinas que produzem um campo magnético. No interior do motor, apoiada sobre mancais, encontra-se a parte móvel, o rotor. É composto por um enrolamento feito por simples condutores ou barras postas em curto-circuito entre si (rotor em curto ou em gaiola de esquilo) ou podem também possuir um outro tipo de enrolamento, cujos extremos são levados a anéis coletores isolados eletricamente do eixo e entre si e onde se apoiam as escovas de carvão, que nos permitem ligar o motor a um circuito externo. O enrolamento de um motor de indução, onde se conecta a energia elétrica, é distribuído ao redor do estator e produz no entreferro um campo magnético girante que roda com sincronia à frequência da rede elétrica. Conforme o campo magnético gira, o fluxo magnético "corta" os condutores dos enrolamentos do rotor gaiola de esquilo, gerando uma tensão elétrica nos mesmos e, como consequência, uma corrente nestes enrolamentos, e esta produz um fluxo magnético oposto ao criado no estator. Então, as correntes que circulam no enrolamento da gaiola por indução criam uma distribuição de força magneto-motriz que interage com a distribuição de campo para produzir um torque em uma só direção. Esta inter-relação entre os fluxos do rotor e do estator produz este torque e faz com que o rotor siga o movimento do fluxo magnético do estator.

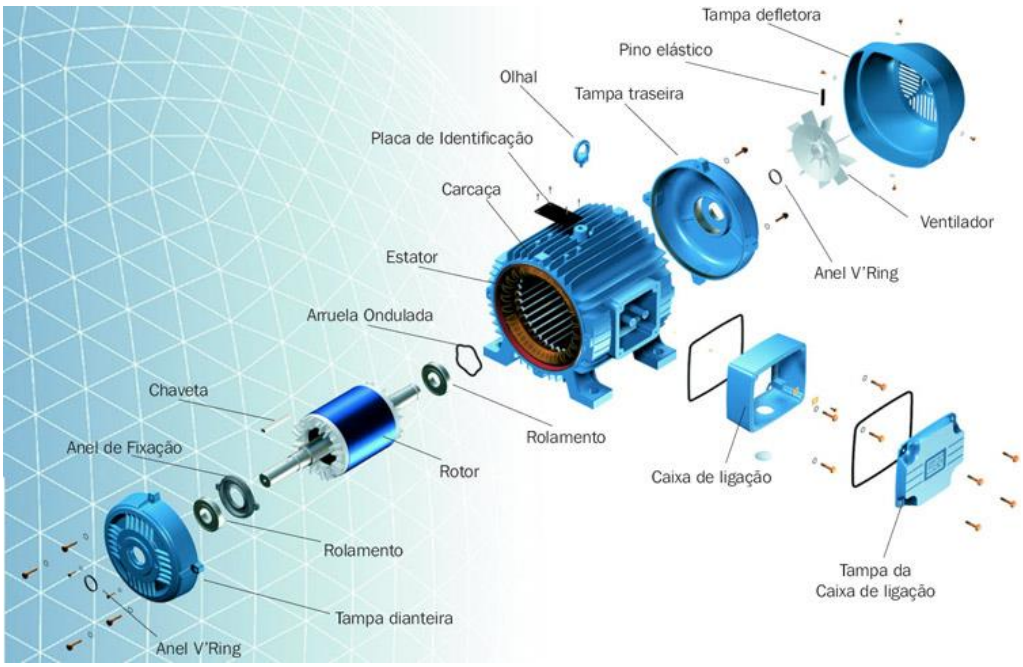


Figura 24 – vista explodida de um motor elétrico

Fonte: www.roncatec.com.br

4.2 Partida dos motores elétricos

Existem dois tipos de ligação das bobinas do MIT que são comumente utilizadas para sua partida. São chamadas de partida em delta e partida em estrela. Partimos inicialmente o motor em estrela (também chamada de ligação Y), que nos possibilita atingir altas velocidades e corrente de partida considerada aceitável. Como nos NM, priorizamos o torque para podermos movimentar a imensa carga do navio, e sendo a configuração delta responsável por nos fornecer um maior torque, alguns segundos após a partida do motor a configuração de ligação das bobinas é alterada automaticamente para a configuração delta e assim é mantida durante o funcionamento do motor.

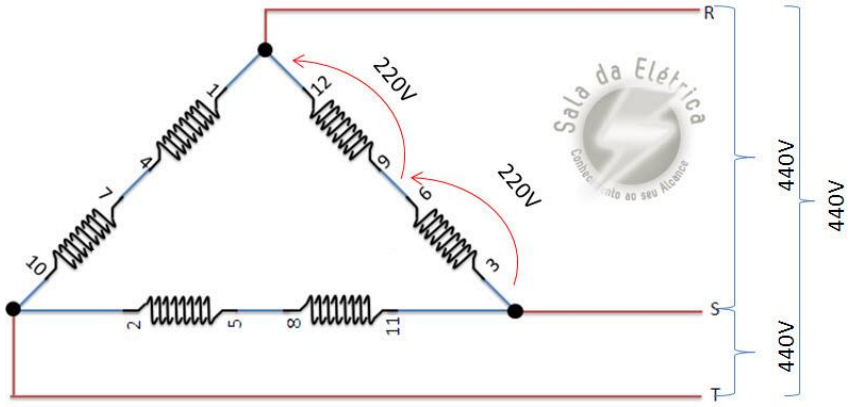


Figura 25 – ligação em Delta ou triangulo com valor de tensão usado a bordo

Fonte: www.saladeeletrica.com.br

Essa desvantagem dos MIT (ter uma alta corrente de partida) é compensada pela ligação estrela ou Y e também por inversores de frequência instalados junto com o motor, que auxiliam também na variação de velocidade do motor, outra desvantagem dos motores, a dificuldade em variar sua velocidade, que os inversores de frequência conseguem contornar com facilidade. Os inversores de frequência são dispositivos elétricos que convertem a potência da rede alternada senoidal (ou tensão contínua) em tensão contínua em um barramento CC, e finalmente convertem esta última em uma tensão de amplitude e período variáveis. Substituem os antigos sistemas de variação de velocidade mecânicos, como polias e variadores hidráulicos, além de atuarem como elementos de proteção contra sobrecarga, desbalanceamento de fases, queda de tensão, etc.

Figura 26 – inversor de frequência WEG

Fonte: www.weg.net

Agora, falaremos enfim, da união do motor elétrico com a TG cuja utilização a bordo para propulsão dos NM tem aumentado. Serão também citados brevemente dois outros tipos de propulsão, apenas por caráter de conhecimento.

5. SISTEMAS DE PROPULSÃO

A propulsão na área naval é qualquer forma de produção de energia mecânica que promova o deslocamento das embarcações, desde navios gaseiros, cruzeiros, entre outros, a barcos a vela ou a remo.

O sistema de propulsão envolve alguns equipamentos, tais como caixa redutora de engrenagens, maquina térmica, acoplamento, eixo e no final do eixo, o hélice. Pode ser feito de duas formas:

a) direta: quando o eixo e a máquina térmica operam com bom rendimento a mesma rotação. A máquina térmica aciona diretamente o eixo propulsor, e esse, em sua extremidade, o hélice;
b) indireta: quando a máquina térmica opera em bom rendimento com uma rotação superior à do hélice que aciona. Neste caso, a máquina térmica aciona, através de uma caixa de engrenagens, o eixo propulsor, e este aciona o hélice em sua extremidade.

5.1 Tipos de sistemas de propulsão

Existem diversos sistemas de propulsão para embarcações. Diversos conjuntos, arranjos das máquinas térmicas, como o CODOG (Combined Diesel or Gas), COGOG (Combined Gas or Gas), CODLAG (Combined Diesel-eletric and Gas), CODAG (Combined Diesel and Gas), propulsão a jato, nuclear, turbo-bomba, Diesel-eletrica convencional e Azipod e a propulsão turbina a gás juntamente com motor elétrico. De forma breve, serão apresentados os três primeiros arranjos, pois são arranjos onde se observa a utilização de TG, e o arranjo TG + MIT.

a) CODOG: é um tipo de sistema de propulsão para embarcações que necessitam uma velocidade máxima superior a velocidade chamada velocidade de cruzeiro. Aplicado em navios de guerra modernos, como fragatas e corvetas. Para cada eixo propulsor existe um motor Diesel para velocidade de cruzeiro e uma TG conectada para casos de arranques necessários. Os dois estão conectados através de acoplamentos e somente um deles proporciona movimento ao navio por vez, diferente do sistema CODAG, onde as duas máquinas térmicas podem ser usadas ao mesmo tempo para propulsão da embarcação. A vantagem do CODOG em relação ao CODAG é um

sistema de engrenagens mais simples, porém são necessárias um número maior de TG para se obter a mesma força propulsora. O consumo de combustível a alta velocidade no sistema CODOG é menor quando comparado ao CODAG. Abaixo, podemos ver um diagrama do esquema dos dois sistemas.

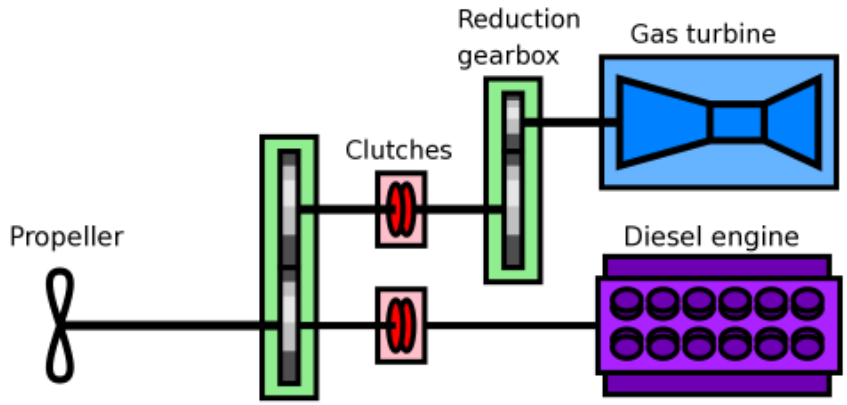


Figura 27 – sistema CODOG de propulsão

Fonte: https://es.wikipedia.org/wiki/CODOG

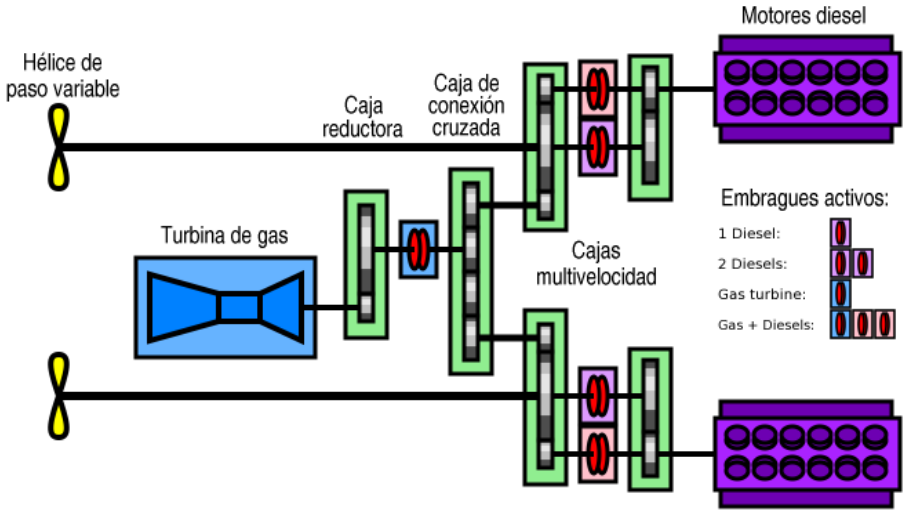


Figura 28 – sistema CODAG de propulsão

Fonte: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:CODAG-diagram-es.png

b) COGOG: é um tipo de sistema de propulsão para navios que usa turbinas a gás, de alta eficiência e baixo débito para navegar em velocidade de cruzeiro e uma de alto débito para altas velocidades. Um acoplamento existente permite selecionar qual turbina utilizar, mas não é possível usar as duas ao mesmo tempo. Esse sistema tem a vantagem de não precisar de pesadas, não confiáveis e caras caixas de engrenagem. A razão pela qual se utiliza uma turbina menor para navegar em velocidade de

cruzeiro é que uma turbina pequena, com 100% de funcionamento é mais eficiente do que uma turbina maior, sendo usada apenas 50%.

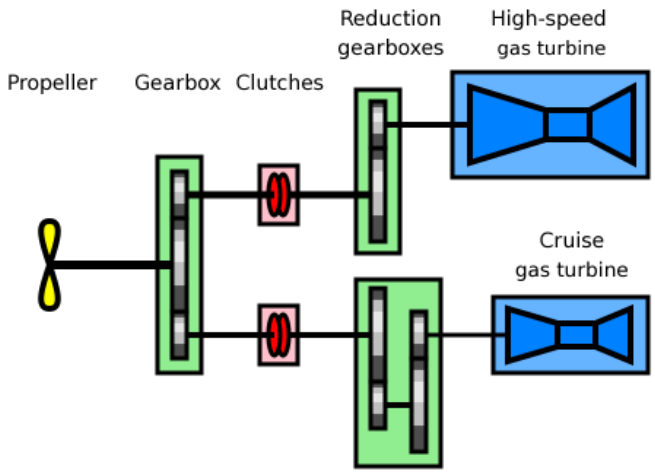


Figura 29 – sistema COGOG de propulsão

Fonte: http://www.ebah.com.br/content/ABAAABRUIAA/trabalho-embarcacoes-propulsao-naval-codog-cogog

c) CODLAG: é uma modificação do sistema CODOG. A diferença é a combinação do Diesel com um motor elétrico ou a turbina a gás. Os elementos são o mesmo, mas não é possível utilizar as duas máquinas térmicas simultaneamente. Emprega o uso de um motor elétrico, usualmente conectados a dois eixos de propulsão. Assim como nos sistemas anteriores, para velocidade de cruzeiro utiliza-se o motor Diesel e para altas velocidades, a turbina é acionada, através de uma caixa de engrenagem.

   Esse sistema, por utilizar-se de um motor Diesel para propulsão e um motor elétrico para produção de energia reduz consideravelmente custos de serviço, pois reduz o número de máquinas térmicas a bordo, e como consequência, há uma diminuição na necessidade de manutenção. Ressalta-se também que, os motores elétricos operam eficientemente em uma ampla faixa de rotações e também podem ser conectados diretamente ao eixo propulsor, podendo-se, assim, dispor-se de uma caixa de engrenagens não complexa para combinar o uso dos motores com a energia mecânica transmitida pela TG. Outra vantagem do sistema Diesel-elétrico de propulsão é o fato de não ser necessário uma ligação mecânica, os diesel geradores podem ser desacoplados de forma acústica do costado do navio, reduzindo o ruído nessa operação. Por isso, o uso desse arranjo vem crescendo em submarinos militares, mas também beneficia navios de superfície, como antissubmarinos.

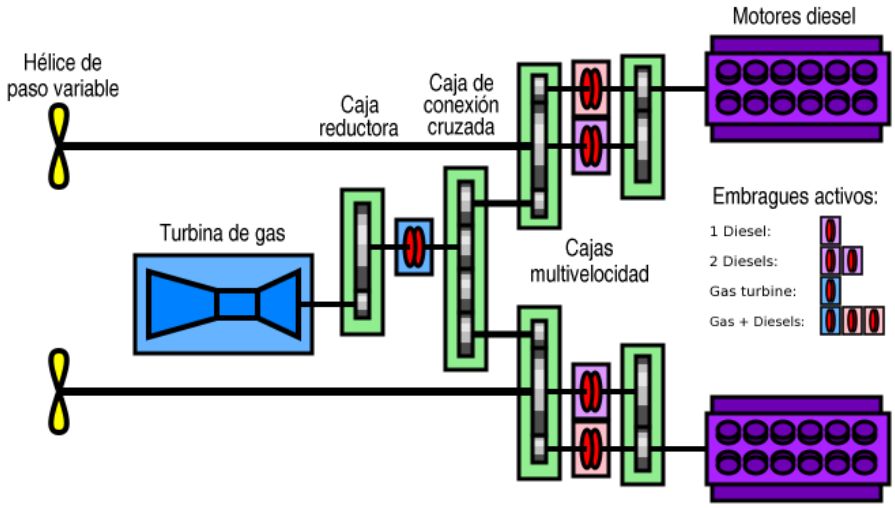


Figura 30 – sistema CODLAG de propulsão

Fonte: www.farinha0.tripod.com

O sistema de propulsão que utiliza os motores elétricos em conjunto com as TG também vem se impondo na área marítima. Como já foi citado, a utilização de motores elétricos permite um acoplamento conjugado com as TG sem a necessidade de caixas de engrenagens complexas, podendo atuar em conjunto com as mesmas no debito de energia para propulsão do navio. Porém, nesse sistema, utiliza-se a TG para a produção de energia elétrica para os motores elétricos, e estes são acoplados diretamente ao eixo propulsor. As turbinas destinadas a produção de energia elétrica são chamadas de turbinas de potência.

As TG são máquinas que possuem maior rendimento quando são exigidas e operam em 100%, de forma constante. Para produção de energia elétrica isso é perfeito. Mantém-se a rotação constante (relacionada diretamente com a frequência) de forma a não variar a tensão a bordo e assim, obtém-se energia elétrica constante para o funcionamento dos motores elétricos e todos os outros equipamentos a bordo.

Os motores elétricos por sua vez, como podem operar em uma ampla faixa de rotações, não apresentam problemas quando, por exemplo, a embarcação passa por um mar revolto, onde muitas vezes o hélice chega a ficar por inteiro fora da água, disparando sua rotação, pois a resistência ao avanço se torna nula de repente. E também quando essa resistência aumenta bruscamente, quando o navio se encontra embicado devido as vagas (ao sobe e desce do navio) nessa condição de mar. Este controle de rotação pode ser feito com sensores de rotação que atuam diretamente com os inversores de frequência e estes reduzem de forma adequada e suave a rotação dos motores, evitando a sobrecarga, o dispêndio exagerado de energia elétrica nos rolamentos do motor, que se transforma em energia térmica, aumentando o desgaste das peças

e encurtando seu tempo de vida útil, diminuindo o intervalo entre uma manutenção e outra. Claro que, quando se utilizam motores diesel para propulsão, existem meios de se controlar o disparo ou a redução inesperada da rotação da hélice: existe o regulador e o limitador de velocidade, que atua cortando o combustível para o motor até este voltar a velocidade limite de segurança ou aumentando a quantidade de combustível quando este sobe em uma vaga, onde a carga aumenta consideravelmente. Mas a manutenção que deve ser realizada nos motores, apesar desse controle de rotação, acaba sendo maior e mais difícil, um número maior de pessoas é requerido para se realizar a manutenção.

Quando em sobrecarga, os vários tipos de propulsão se comportam de maneira diferente. A máquina alternativa e o motor diesel são máquinas de conjugado motor constante. Isto significa que, mantendo-se constante a admissão de vapor/ar na máquina alternativa, ou a injeção de óleo no motor diesel, o conjugado permanecerá constante, independente do número de rotações.

Já as turbinas e os motores elétricos são máquinas de potência constante, que aumentam o conjugado motor quando diminui o número de rotações. Deste modo, quando for aumentada a resistência à propulsão do navio, pelo aumento de deslocamento ou por efeito de ondas e ventos contrários, a perda de velocidade em um navio movido a turbina ou a motor elétrico é bem menor, cerca de um terço do que seria se o mesmo fosse movido a máquina alternativa ou a motor diesel. Ao mesmo tempo, contudo, aumentam no primeiro caso os esforços no eixo e no propulsor. Daí uma exigência feita pelas Sociedades Classificadoras: eixos de maior diâmetro e pás mais fortes nos propulsores dos navios movidos a turbina ou a motor elétrico. Há ainda uma diferença sensível entre navio cargueiro e navio de passageiro: enquanto no primeiro tem-se interesse em diminuir o espaço longitudinal ocupado pelo arranjo propulsor para destiná-lo à carga, nos navios de passageiros, isto não tem importância. Ao contrário, prefere-se aumentar o espaço disponível para os passageiros acima da flutuação, facilitando a instalação da turbina, cujo comprimento ocupa um espaço maior que seu volume. Nos cargueiros modernos, procura-se colocar as caldeiras por cima das turbinas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi visto ao longo desta dissertação, as turbinas a gás são máquinas complexas, com particularidades, prós e contras em sua utilização na área naval. Já disseminada nas plataformas como meio principal de produção de energia elétrica, tendem a crescer cada vez mais, devido a necessidade de grandes investimentos para a área que favoreçam sua aplicação no ramo naval devido a "recém" descoberta do Pré-sal.

Pôde-se observar também que as turbinas são máquinas primárias que se adequam melhor a função de motor principal no conjunto gerador de energia, devido a manutenção mais simples, relação de peso para a mesma potência produzida muito menor que em motores diesel, segurança na instalação, diminuição de vibrações e ruídos, o que está diretamente relacionado com o conforto do trabalho, gasto ínfimo de lubrificante, versatilidade e economia de combustível, considerável diferença no espaço ocupado por todo o conjunto necessário para seu funcionamento, podendo ser aplicada tanto com motores diesel quanto com motores elétricos. E devido ao cenário mundial atual, de preocupação cada vez maior com redução de emissão de poluentes, de consumo de combustíveis fósseis, de preservação do meio ambiente, e claro, a constante preocupação gerada pelo sistema mundial capitalista, o lucro, os motores elétricos tem ganhado destaque, pois são máquinas não poluentes, operando através de forma de energia limpa, e são consideravelmente mais econômicos que motores diesel, pelas vantagens apresentadas nesse trabalho.

As embarcações que apresentam o sistema de propulsão COGOG possuem vantagem em relação as embarcações que utilizam o sistema diesel como propulsão principal, devido aos quesitos citados acima, e também pelas turbinas possuírem rápida partida, capaz de, a partir da máquina fria, atingir a rotação de funcionamento máxima em pouquíssimo tempo. Porém, o sistema COGOG pode ser considerado um sistema não ultrapassado, mas menos ideal do que a aplicação do sistema de TG + MIT.

Sua consolidada presença nas plataformas aquece o ramo e beneficia as turbinas. Empresas como a Rolls-Royce, Siemens e a General Electric dominam o mercado, e a disputa entre elas faz com que novas tecnologias sejam descobertas e melhorem seu funcionamento. Recentemente, está sendo desenvolvida uma turbina a gás que funcionará com dióxido de carbono supercrítico (S-CO2). O termo supercrítico refere-se ao estado semilíquido do CO2,

obtido com valores acima do limite de temperatura e pressão. Fluidos supercríticos são muito utilizados na indústria pois tem a capacidade de penetrar em materiais como um gás, mas também são capazes de dissolver algumas substâncias como a graxa. Por essa razão, as turbinas poderiam operar com elevada eficiência térmica, gerar cerca de 6MW, além da redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes. A empresa responsável pelo desenvolvimento da turbina afirma que essa tecnologia poderá ter uma eficiência de 30 a 60% superior à das turbinas usadas nas termoelétricas movidas a gás natural.

Portanto, por todos os motivos apresentados nesse trabalho, podemos concluir que a troca dos motores diesel pelo conjunto turbina a gás/motor elétrico é uma excelente alternativa para o cenário mundial atual na configuração de sistemas de propulsão alternativa e de geração de energia no *offshore*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R. N. **Propulsão elétrica de navios.** 2007. 180p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ANDRADE, E. S. de MACEDO. **Máquinas elétricas.** 2004. 83p. Itabira. Centro de Formação Profissional Pedro Martins Guerra. 2004.

BICALHO, R.G; de ALMEIDA, E.L.F. **Turbina a gás: oportunidades e desafios.** [S.l.]. [200-]. 8v.

BRAIN, M. **O funcionamento básico de uma turbina a gás.** Disponivel em < http://ciencia.hsw.uol.com.br/turbina-a-gas3.htm > acessado em 05/05/2015.

de ANDRADE, A. S. **Máquinas térmicas AT - 056.** Universidade Federal do Paraná – Curso de Engenharia Industrial Madeireira. [S.l.] [2011?].

de ANDRADE, A. S. **Máquinas térmicas AT – 101.** Universidade Federal do Paraná – Curso de Engenharia Industrial Madeireira. [S.l.] [2011?].

de MENEZES, E. do L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas.** 2011. 35p. Dissertação (Graduação em Tecnologia em Construção Naval), Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2011.

de SOUZA, D. D. **Apostila de inspeção e manutenção dos sistemas elétricos em unidades marítimas.** 2012. 1ª ed. 65p.

DIESELNUTZ. **Turbinas a gás: ainda distantes da condição de sucessoras do Diesel.** Disponível em < http://dzulnutz.blogspot.com.br/search/label/combust%C3%ADveis%20alternativos > acessado em 05/05/2015.

FARIA, V. P. **Modelagem e controle de microturbina a gás do tipo split-shaft.** 2009. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Fluidos), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LIMA, L. J. B. et al. **Gás natural: geração de energia.** Macaé. 2010. Orientador: Prof. André Aleixo Manzela.

OLIVEIRA, F. **Rio vira polo de turbinas para aviação e petróleo.** Disponível em < http://www.defesanet.com.br/tecnologia/noticia/7796/Rio-vira-polo-de-turbinas-para-aviacao-e-petroleo/ > acessado em 12/05/2015.

PIMY, S. **Combine gas or gas e o sistema de Combined diesel or gas.**

SCHIAVO, A. C. **Motores à reação.** [S.l.]. 1984.

TECNOLOGICA, Inovação. **Nova tecnologia de turbina a gás usa CO2 supercrítico.** Disponível em < http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=turbina-ciclo-brayton-co2-supercritico&id=010115150824#.Vel48ze5fqB > acessado em 28/08/2015.

VICTOR, L. C. M. **Princípios básicos de turbinas a gás.** Disponível em < http://www.ebah.com.br/content/ABAAABNPAAD/principios-basicos-turbina-a-gas > acessado em 04/05/2015.

WIKIPEDIA. Enciclopédia online. **Combined diesel or gas**. Disponível em < https://es.wikipedia.org/wiki/CODOG > acessado em 13/05/2015.