



Marinha do Brasil
Centro de Instrução Almirante Graça Aranha
Curso De Aperfeiçoamento Para Oficial De Máquinas (APMA)

Marcelo Stanley Freire Braz

**A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO MARITIMA MEDIANTE
MUDANÇA NA MATRIZ**

Rio de Janeiro 2012

Marcelo Stanley Freire Braz

**A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO MARÍTIMA MEDIANTE MUDANÇA NA
MATRIZ**

Monografia apresentada ao curso de APMA,
na modalidade de formação para Chefe de
Máquinas, como requisito parcial para atender
a Regra III/2 da Convenção STCW.

Orientadora: Professora Mestre Denise Batista.

Rio de Janeiro 2012

Marcelo Stanley Freire Braz

A EVOLUÇÃO DA PROPULSÃO MARÍTIMA
MEDIANTE MUDANÇA NA MATRIZ

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como requisito parcial para obtenção de certificação STCW III / 2 do curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas.

Orientadora: Prof^ª. Mestra Denise Batista

Aprovada pelos membros da Banca Examinadora em _____ de março de 2012, com menção em _____ (_____).

Banca Examinadora

Rio de Janeiro, 2012

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais uma conquista e a minha professora Denise Batista que, com sua grande contribuição e sabedoria, auxiliou e enalteceu este trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo e força.

E a todos os amigos que contribuíram para que, se tornasse concreto, este trabalho.

DEDICATÓRIA

Ao meu Deus maravilhoso, pela oportunidade que me deu em crescer e aprender um ofício para toda a minha vida.

Ao meu pai, Manoel Braz Neto, como exemplo de perseverança, ética e de serenidade por me guiar pelos caminhos de honestidade.

À minha mãe, Tarcisia Araújo Freire, por seu cuidado carinhoso, apoio indispensável, paciência sobrenatural, dedicação integral e amor infinito.

“A genialidade é 1% inspiração e 99% transpiração.”
(Thomas Edison)

RESUMO

Com a evolução das primeiras embarcações desde a antiguidade, sempre se procurou encontrar um meio de propulsão, capaz de tornar possível a navegabilidade entre os países. Com o aparecimento dos primeiros motores de combustão interna, surgiu um mundo de possibilidades em adaptá-lo aos navios como meio motriz. O mundo estava passando por uma revolução industrial, a economia aumentando cada vez mais, necessitando assim, de navios para levar as diversas mercadorias. Com a descoberta de petróleo, alavancou o universo de idéias, para o desenvolvimento econômico mundial. Mas, o combustível fóssil também possibilitou a construção de inúmeros inventos. Hoje, os motores de navios, bem como os de carro, ônibus, são dependentes totalmente de combustível. Mas, o futuro deste motores começa a ser visto de maneira importante, devido a necessidade de se pensar em uma fonte de energia limpa. Embora seja o mundo dependente de petróleo, muitas nações estão procurando novas formas de energia, como a elétrica, eólica, energia proveniente das marés, de hidrogênio etc. São energias limpas ou verdes, que não afetam o meio ambiente. Países como a Dinamarca, Japão, Estados Unidos, entre outros, já usam com sucesso as novas tecnologias, presente em carros e navios. Segundo o professor sueco Kjell Aleklett em Maio de 2006, da Universidade Upsalla, tentou sintetizar o fim de uma era: a do petróleo. A expressão criada por ele indicaria o momento em que a produção mundial de óleo e gás atingiria seu ponto máximo, a partir do qual começaria inevitavelmente a declinar. O futuro da nossa maior fonte de energia, tem seus anos contados, previsões recentes apontam que teremos no máximo meio século de consumo deste combustível fóssil nas taxas atuais. Este trabalho, tem por objetivo mostrar o avanço dos diversos meios de propulsão usados em navios, e suas importância, tipos de energia motora e custos, bem como as suas adaptações às novas fontes de energia.

Palavras-chave: Energia, Propulsão, Combustível, Navios, Futuro, Motores, Países.

ABSTRACT

With the evolution of the first vessels from the antiquity, there always tried to be a way of propulsion, able to make the navigability possible between the countries. With the appearance of the first motors of internal combustion, a means world appeared in adapting it to the ships like propulsion. The world was passing by an industrial revolution, the economy increasing more and more, needing so, of ships in order that the oil discovery took much mercadorias. With, alavancou the ideas universe, to the world-wide economical development. But, the fuel fossil also made possible the construction of countless invents. Today, the ships motors, as well as those of car, bus, are dependent totally of fuel. But, the future of this begins motors being seen in important way, due to necessity of if thinking about a fountain of clean energy. Though it is the dependent world of oil, many nations are looking for the new forms of energy, like the electric one, eólica, tides, of hydrogen etc. it is clean or green energies, which do not affect the environment. Countries as Denmark, Japan, the United States, between others, already they use with success the new technologies, present in cars and ships. According to the Swedish teacher Kjell Aleklett, of the University Upsalla, it tried to summarize the end of an era: that of the oil. The expression created by him would indicate the moment in which the world-wide production of oil and gas would reach his very point, from which it would begin to go down inevitably. The future of our biggest fountain of energy, it has his counted years, recent foresight points that we will have at average most century of consumption of this fuel fossil in the current taxes. This work aims to show the progress of the various means of propulsion used on ships, and their importance, types of motor and energy costs, as well as their adaptation to new energy sources dependent fossil. Will be a gradual change, but with the certainty that the fuel is the future sure your order.

Keywords: Energy, Propulsion, Fuel, Ships, Future, Engine, Countries.

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES

%MCR	– Maximum Continuous Rating
ANCOR HANDLIN	– Manuseio de ancora
AT QUAY	– Atracado
BALLAST PUMP	– Bomba de lastro
BOW THRUSTER	– Propulsor de proa
HFO	– Heavy Fuel Oil
MARPOL	– Convenção que trata da poluição no mar
MDO	– Marine Diesel Oil
PIN	– Potência entrando
PLOSSES	– Potência perdida
POUT	– Potência que saindo
TRANSIT	– Trânsito
η	– Rendimento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1A	- Navio Beluga com sistema de velas na proa, para aproveitar o vento....	15
Figura 1B	-Jangada.....	16
Figura 1C	-Barco a Vapor.....	16
Figura 2	-Propulsor de navio a apor.....	17
Figura 3	- Conjunto completa de uma turbina a apor.....	19
Figura 4	-Rotor de uma turbina.....	19
Figura 5	- Navio tanque de propulsão a turbina.....	20
Figura 6	-Sistema de Vapor Superaquecido.....	20
Figura 7	- Navio aeródromo americano de propulsão nuclear.....	21
Figura 8	- Planta de um circuito de propulsão nuclear.....	21
Figura 9	- Fases de operação de uma turbina a gás.....	22
Figura 10	- Fases de operação de uma turbina a gás.....	23/24
Figura 11	- Fases de queima de uma turbina.....	24
Figura 12	- Gráfico das transformações termodinâmicas.....	26
Figura 13	- Diagrama em bloco de um circuito de uma turbina.....	30
Figura 14	- Funcionamento de uma máquina de Carnot.....	32
Figura 15	- Máquina de combustão externa.....	37
Figura 16	- Motor típico de 4 tempos.....	38
Figura 17	- Fases de um motor 4 tempos.....	39
Figura 18	- Fases do Motor a 2 tempos.....	40
Figura 19	- Motor a 2 tempos Marítimo de grande porte.....	40
Figura 20	- Fases do ciclo do motor Diesel de 4 tempos.....	41
Figura 21	- Motor Diesel Marítimo de 4 tempos.....	42
Figura 22	- Compressor de lóbulos acionado.....	43
Figura 23	- Motor Diesel de 2 tempos com janelas de admissão e de descarga.....	43
Figura 24	- Disposições de cilindro.....	46
Figura 25	-Bloco de Motor.....	48
Figura 26	-Cabeçote.....	49
Figura 27	-Cárter.....	49
Figura 28	- Anéis de Segmento.....	50
Figura 29	- Motor de grande porte de 2 tempos Marítimo.....	51
Figura 30	- Conectora instalada em um êmbolo.....	51
Figura 31	- Eixo de manivelas.....	52
Figura 32	-Volante.....	53
Figura 33	-Sistema de Transmissão por correias.....	54
Figura 34	-Sistema de transmissão por engrenagens.....	54
Figura 35	-Sistema de lubrificação.....	59
Figura 36	-Resfriamento indireto combinado por água doce do mar(ou de rio).....	59
Figura 37	-Resfriamento indireto sob quilha.....	60
Figura 38	-Sistema de admissão de ar.....	61
Figura 39	-Princípio de funcionamento de uma turbina mais compressor rotativo....	61
Figura 40	-Turbina mais compressor.....	62
Figura 41	-Motor com conjunto turbinas mais compressor de ar.....	62
Figura 42	-Bússola.....	63
Figura 43	-Linhas de campo.....	64
Figura 44	-Vetor força em uma carga elétrica imersa num campo magnético.....	67
Figura 45	-Exemplo de motor elétrico.....	67

Figura 46	-Motor Elétrico	75
Figura 47	-Diagrama simplificado de linha (voyce,2012)	77
Figura 48	-Destroyer tipo 45	77
Figura 49	-Motor de indução avançado(AIM)	78
Figura 50	-Motor de indução avançado (AIM)comparado a uma pessoa.....	78
Figura 51	-Motor Síncrono com Material supercondutor em alta temperatura	79
Figura 52	-Motor HTSAC(SMW-230RPM).....	79
Figura 53	-Protótipo do Motor Homopolar com Material Supercondutor em CC	79
Figura 54	-Sistema de acionamento Elétrico Integrado	80
Figura 55	-Diagrama em blocos de um Sistema de propulsão elétrica.....	80
Figura 56	-Configuração do Sistema elétrico.....	84
Figura 57	-Propulsores Elétricos	86
Figura 58	-Baterias	86
Figura 59	-Processo de Obtenção de Hidrogênio.....	96
Figura 60	-Forma de armazenamento de Hidrogênio	99
Figura 61	-Navio Oceanjet movido a Hidrogênio.....	102
Figura 62	-Protótipo jato Stratoliner movido a Hidrogênio	102
Figura 63	-Obtenção de Hidrogênio pela quebra de moléculas	103
Figura 64	-Motor que utiliza o Hidrogênio como combustível	104
Figura 65	-Barco de passageiro movido a Hidrogênio.....	104
Figura 66	-Ônibus movido a Hidrogênio	104

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 1 - SISTEMAS DE PROPULSÃO A REMO	14
1.1 Sistemas de Propulsão a Vela.....	14
1.2 Sistema de Propulsão a Vapor.....	16
1.3 Sistema de Propulsão de Turbina a Vapor.....	17
1.4 Propulsão Nuclear.....	21
1.5 Sistema de Propulsão de Turbina à Gás.....	22
1.6 Ciclo Brayton.....	23
1.7 Os Motores de Combustão Interna.....	25
1.8 Princípios de Termodinâmica.....	26
1.9 Equação Fundamental de estado.....	26
CAPÍTULO 2 - PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	28
2.1 Segunda Lei da Termodinâmica.....	28
2.2 Máquina de Carnot.....	31
2.3 Energia Interna e Entalpia	33
2.4 Elementos de uma Combustão	36
2.5 Máquinas de combustão Interna.....	37
2.6 Funcionamento dos motores de combustão interna	37
2.7 Ciclo operativo do motor Otto de 2 tempos	40
2.8 Funcionamento dos motores dos motores do Ciclo Diesel	41
2.9 Ciclo operativo do motor Diesel de 2 tempos.....	42
CAPÍTULO 3 - CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ALTERNATIVAS DE COMBUSTÃO INTERNA.	45
3.1 Motores de Êmbolos opostos.....	46
3.2 Vantagens e desvantagens do Motor Diesel sobre o Otto.....	47
3.3 Motores empregados na propulsão de embarcações.....	48
3.4 Tipos de transmissão.....	53
3.5 Sistema de Lubrificação.....	54
3.6 Finalidade do sistema de lubrificação.....	55
3.7 Composição básica do sistema de lubrificação.....	56
3.8 Tipos de Sistemas de resfriamento.....	57
3.9 Resfriamento Indireto Combinado por água doce e água do mar ou rio.....	58
CAPÍTULO 4 - RESFRIAMENTO INDIRETO SOB QUILHA	60
4.1 A Válvula Termostática.....	60
4.2 Sistema de admissão de ar.....	61
4.3 Magnetismo e Campo Magnético.....	63
4.4 Linhas de campo.....	64
4.5 A carga elétrica no campo magnético.....	64
4.6 Carga Elétrica imersa em campo magnético.....	65
4.7 Motores Elétricos.....	66
4.8 Máquina Elétrica elementar.....	67
4.9 Geração de força eletromotriz.....	69
CAPÍTULO 5 - MOTORES de C.C.	73
5.1 Motores Síncronos.....	73
5.2 Motores de Indução.....	74
5.3 Aplicações.....	76
5.4 Motores de Indução Trifásicos.....	80
5.5 Tipos de Rotor	82

5.6 Controle de Velocidade	83
5.7 Pilhas e acumuladores	84
5.8 O Hidrogênio	86
5.9 Distribuição de Hidrogênio.....	87
CAPÍTULO 6 - UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO	89
6.1 Chegando ao Futuro.....	89
6.2 Vantagens do Hidrogênio.....	91
6.3 Pesquisas do laboratório de Hidrogênio.....	91
6.4 O Hidrogênio como combustível	92
6.5 Composição do Hidrogênio	93
6.6 A produção de Hidrogênio	93
6.7 Usos potenciais para o Hidrogênio.....	97
6.8 A estocagem de hidrogênio	98
6.9 O custo do Hidrogênio.....	99
CAPÍTULO 7 - A PESQUISA DO HIDROGÊNIO	100
7.1 Cargueiros de Containeres.....	100
7.2 Turbinas a hidrogênio	101
7.3 Sistema de Combustível.....	101
CONCLUSÃO	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	106

INTRODUÇÃO

Neste trabalho deseja-se apresentar a evolução da propulsão marítima mediante mudança na matriz dos navios mercantes, onde é mostrada a evolução desses sistemas até os dias atuais, operação e instruções de funcionamento. Tal sistema, possui desde navios à vela, como os navios com propulsão a vapor até chegar aos navios com motor de combustão interna, que logo serão substituído por motores elétricos, existentes em algumas embarcações de guerra e catamarãs¹. Esse tipo de propulsão elétrica, já está sendo usado em alguns tipos de navios de médio e pequeno porte, possui como vantagem a utilização de energia elétrica, sem necessidade de combustível fóssil. Será uma grande vantagem de se usar energia limpa. Pretende-se apresentar neste trabalho, a Evolução da propulsão marítima mediante mudança na matriz e suas principais etapas de evolução no meio marítimo, visando entender, todas as transformações tecnológicas ocorrida na navegação. Descrevendo cada invento, desde o primeiro barco a vela até os navios com propulsores modernos a motor de combustão, de hidrogênio e os motores elétricos que cada vez mais está presente nas embarcações e que dominarão todos os navios futuramente, e que será o nosso foco, considerando o petróleo uma fonte esgotável. Para realizar este trabalho foram utilizados atividades de pesquisa, como em diversos sites e livros, visitas a navios mercantes, pesquisas juntamente com orientação de professores e profissionais que trabalharam nesta área.

¹ Pequena embarcação

CAPÍTULO 1

OS PRIMEIROS SISTEMAS DE PROPULSÃO

1.1 Sistemas de propulsão a Remo

Inventado por volta de 1050 pelos Vikings, Originários do sul da Escandinávia, os vikings foram os maiores navegadores e exploradores do Ocidente de sua época. Eles colonizaram a Islândia, a Groenlândia e até mesmo a costa nordeste do atual Labrador, no Canadá.

Os vikings possuíam dois tipos de navios. Os longos (langskips), ou drakkars, só eram usados em viagens curtas e para guerrear. Velozes e leves podiam ser carregados em terra pelos próprios guerreiros. Sua propulsão primária eram os remos. Nas grandes viagens de exploração ou colonização, faziam uso do knarr, muito maior que o langskip, chegando a 20 metros de comprimento. O knarr era movido basicamente por uma vela redonda e governado por um leme de esparrela.

As principais características das embarcações vikings era construção sólida e excelente navegabilidade. Os navios tinham proa e popa idênticas, e sua quilha profunda e casco curvo de madeira trincada cortavam bem as ondas, facilitando as singraduras no contra vento e o encalhe em praias. Até hoje os barcos de madeira no mundo apresentam algumas das soluções criadas pelos vikings. Em 1250 foi inventada o Leme de cadaste, que era fixado à popa e alinhado com a quilha, proporcionando maior governo às embarcações.

1.2 Sistemas de propulsão a Velas

Os barcos a vela foram inventados há cerca de 5000 anos, com o objetivo de transportar pessoas e mercadorias a locais longínquos. Fonte²

² Isabe.ionline.pt/

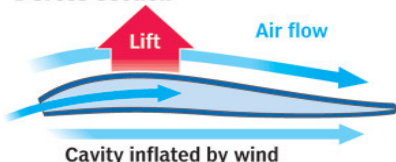
GIANT KITE WILL PULL SHIP ACROSS ATLANTIC

The world's first commercial cargo ship powered partially by a kite is making its maiden voyage from Germany to Venezuela. The designers of the computer-guided kite say it could cut fuel consumption by as much as 20% and help reduce carbon dioxide emissions

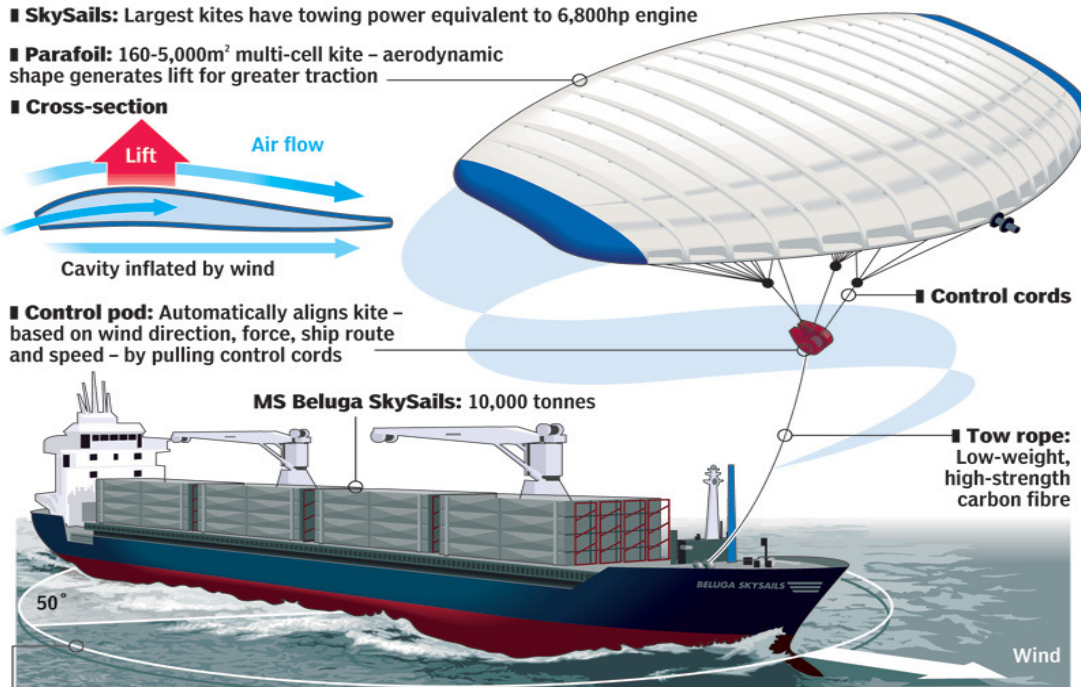
■ **SkySails:** Largest kites have towing power equivalent to 6,800hp engine

■ **Parafoil:** 160-5,000m² multi-cell kite – aerodynamic shape generates lift for greater traction

■ **Cross-section**

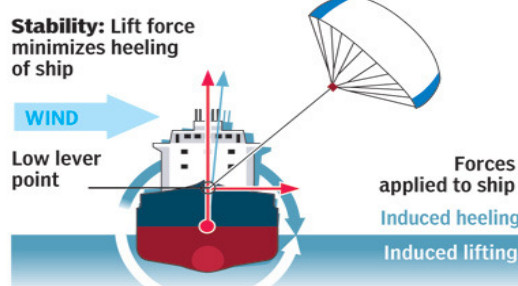
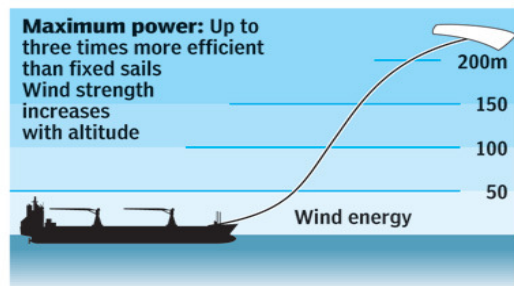


■ **Control pod:** Automatically aligns kite – based on wind direction, force, ship route and speed – by pulling control cords



■ **Sailing direction:** SkySail can be used to sail at up to 50° against wind

SkySail saving 10-35%



SOURCES: SKYSAILS, BELUGA GROUP, WINTECC PROJECT

GRAPHIC NEWS / NATIONAL POST

Figura1A: Navio Beluga com sistema de velas na proa, para aproveitar o vento³

³ Fonte: SkySails GmbH of Hamburg, Germany



Figura 1B: Jangada. Fonte⁴

1.3 Sistemas de propulsão a vapor

Um barco a vapor com rodas de pás é uma embarcação vista geralmente em águas fluviais e nos litorais, movida por uma caldeira que faz funcionar pelo vapor uma ou mais rodas de pás, também chamadas de roda de água, que funcionam como mecanismos de propulsão. Pode ser classificado como um dos tipos de Barco a vapor. As rodas de pás em navios, também podem funcionar movidas por motores a diesel, tração humana ou animal. As rodas de pás foram o primeiro mecanismo de propulsão de navios, atualmente substituídas quase totalmente por hélices helicoidais e outros tipos mais modernos usados na navegação marítima.

Este tipo de navio dominou a navegação a partir de 1800, indo até o final da segunda guerra mundial. A marinha mercante e de guerra, utilizou estes motores por um longo período, mas com a chegada do motor a diesel, foi perdendo espaço. Devido a economia que o motor diesel apresentava, foram largamente utilizadas na região Mississipe.



Figura 1C: Barco a vapor. Fonte⁵

⁴ Wikipédia

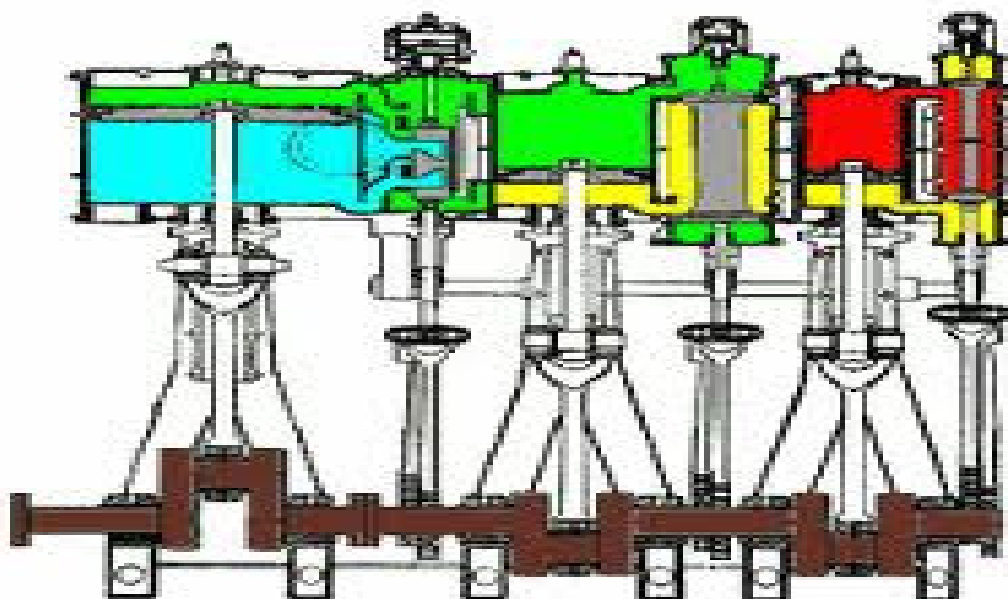


Figura 2: Propulsor de navio a vapor.

Fonte: <http://oceanlinerscard.arteblog.com.br/122276/Propulsor-de-navio-a-vapor>

1.4 Sistemas de propulsão de turbina a vapor

O uso da turbina na propulsão naval demandou muito tempo e encontrou inúmeras dificuldades antes de impor-se. O britânico Charles Algernon Parsons foi o primeiro a idealizar o fracionamento da pressão do vapor em muitas variações parciais, para reduzir a velocidade tanto do vapor como da rotação da turbina. Em 1886, na exposição marítima de Liverpool, já havia sido exibida uma turbina a vapor, com variações de pressão de 18.000 RPM, para produzir energia elétrica. Para demonstrar aos visitantes que as vibrações se amortizavam com o novo motor, este ficou suspenso no ar e pendurado por dois arames. A primeira aplicação de uma turbina Parsons ocorreu com o caça-torpedeiros inglês Turbina, dez anos depois da exposição de Liverpool, e em 1898 foram usadas turbinas Parsons de 1.100 RPM para a propulsão de mais caça torpedeiros: Viper (com 8 hélices), nos estaleiros de Wallsen, e Cobra, nos estaleiros Armstrong. Foram alcançados progressos notáveis e resultados ótimos no que se referia à velocidade e ao funcionamento, mas havia muito por fazer em relação ao consumo excessivo de vapor.-Foi muito usada nos barcos que cruzavam o canal da Mancha, no entanto, a propulsão marinha exigia cada vez mais potência e, conseqüentemente, os espaços para as turbinas de baixa pressão chegaram a atingir dimensões impossíveis. Para resolver esse inconveniente, recorreram-se a

⁵ Wikipédia enciclopédia.

mecanismos intermediários, como os redutores de engrenagens de dentes helicoidais, testados por ingleses e, mais tarde, por projetistas alemães. Dessa maneira, sem deixar de evoluir, a turbina se impôs amplamente na propulsão marinha e substituiu os velhos motores alternativos.

Turbina a Vapor é uma máquina térmica de combustão externa, ou seja, os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho – água/vapor. É um equipamento que aproveita a energia calorífica do vapor. Na fornalha, a água é aquecida até a sua temperatura de ebulição, se transformando em vapor. A energia calorífica do combustível é transformada em pressão. O vapor sob pressão é direcionado para a turbina. Ao chegar à turbina, a energia calorífica do vapor é transformada em energia cinética e, finalmente, em energia mecânica. Por ser uma máquina de combustão externa, há uma maior flexibilidade no tipo de combustível a ser utilizado na fornalha, podendo o mesmo ser: óleo pesado, diesel, borra, borra orgânica, etc. Uma máquina a vapor não cria energia, utiliza-se do vapor para transformar energia calorífica liberada pela queima de algum combustível a fim de produzir trabalho. O processo de transformação de água em vapor ocorre em um ambiente fechado, denominado fornalha, circundada por serpentinas de água que, após receberem o calor produzido pela queima do combustível, ganha temperatura e aumenta seu volume. A água agora, já na forma de vapor, ocupa um espaço nas serpentinas muito maior do que aquele ocupado anteriormente, tendo em vista seu ganho calorífico.

VANTAGENS DA TURBINA A VAPOR EM RELAÇÃO AO MOTOR DIESEL:

- 1 -Máquina rotativa, ou seja, sem movimentos alternativos, portanto, sem grandes impactos.
- 2 -Permite variações de velocidade de forma suave.
- 3 -Por possuir pouca área interna para lubrificação proporciona grande economia de custo em óleos lubrificantes.
- 4 -Fáceis controle e operação.
- 5 -Não produz fagulhas.
- 6 -Suporta longas jornadas de operação por não necessitar de grandes manutenções.
- 7 -Manutenção simples e econômica.

- 8 -Vida útil bem longa (mais de 25 anos).
- 9 -Menor peso da instalação em comparação com o motor diesel.
- 10 -Não necessita abertura da turbina para classificação.

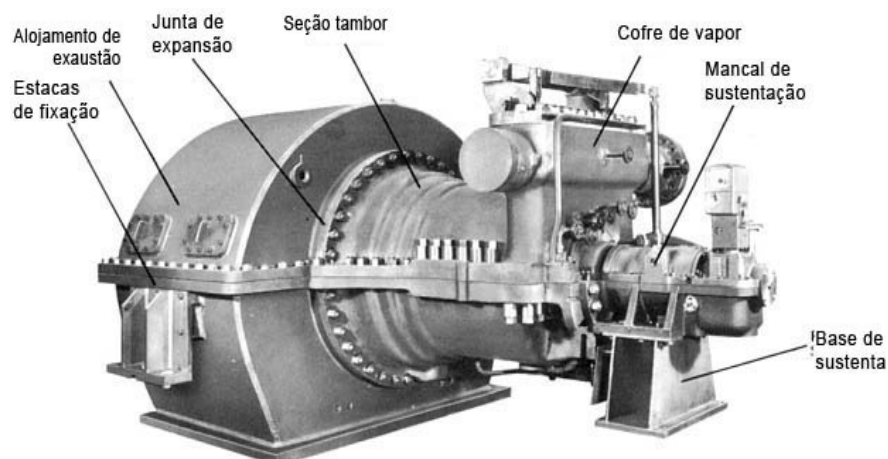


Figura 3: Conjunto completa de uma turbina a vapor. Fonte⁶



Figura 4: Rotor de uma turbina.
Fonte: EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.

⁶ EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.



Figura 5: Navio tanque de propulsão a turbina.

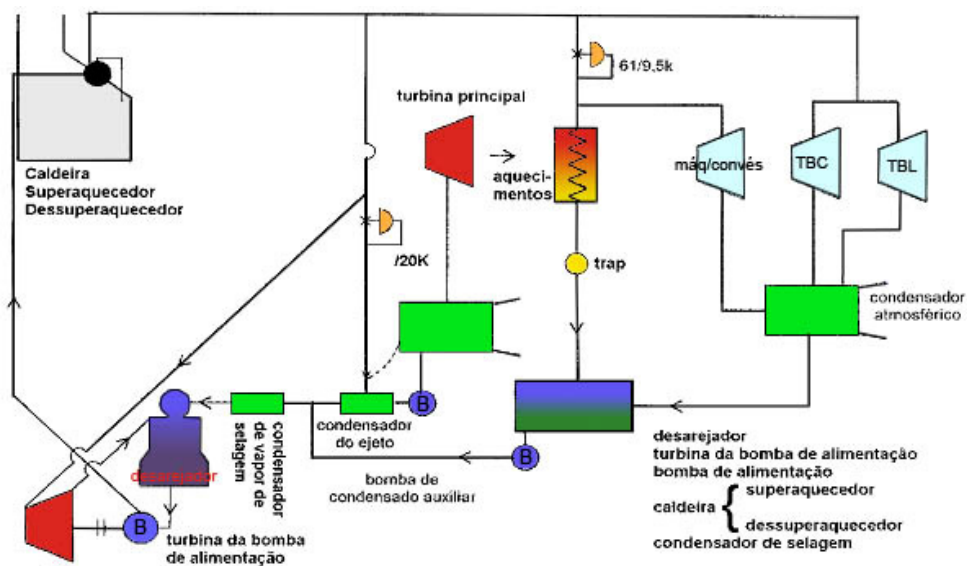


Figura 6: Sistema de vapor superaquecido. Fonte⁷

⁷ EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.

1.5 Propulsão nuclear:

É empregada em navios e submarinos. O primeiro foi o americano Nautilus que em 1958 realizou um cruzeiro sob o gelo do pólo norte. A seguir foram construídos em grande número neste país e na ex. URSS, Inglaterra e França. Tal embarcação chega a deslocar 20 mil toneladas desenvolvendo altíssima velocidade, logicamente a um alto custo. Se as pesquisas com fusão nuclear se tornarem realidade, teríamos uma fonte de energia praticamente ilimitada. Nela há a combinação de 2 núcleos leves (deutério e trítio), para originar um núcleo mais pesado (hélio).



Figura 7: Navio aeródromo americano de propulsão nuclear. Fonte⁸

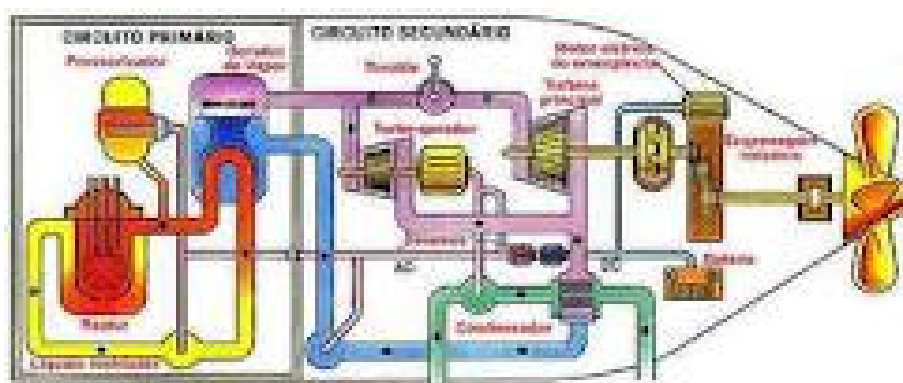


Figura 8: Planta de um circuito de propulsão nuclear. Fonte⁹

⁸ sciences/physicshttp://pt.shvoong.com/exact-sciences/physics/nuclear

⁹ portalmaritimo.com

1.6 Sistema de Propulsão de Turbina À Gás

A turbina a gás é tipicamente um motor de combustão interna, do tipo rotativo. Este tipo de máquina queima uma mistura de combustível e ar. Erroneamente, a falta de informações técnicas faz com que a maioria das pessoas pense que o combustível utilizado na combustão seja apenas um gás. Os gases provenientes da queima do combustível, ao “fugirem” para a atmosfera, produzem trabalho. Daí, a denominação de “turbina a gás”. O ar, após ser comprimido por um equipamento chamado de compressor, recebe o combustível injetado na câmara de combustão, o que resulta em uma queima que produz um gás com alta temperatura e alta pressão. Este gás, que é o produto da combustão de qualquer combustível, vai sofrer um processo de expansão através das palhetas rotativas da turbina, que, por sua vez, acionam o eixo da turbina, produzindo potência. Esta potência vai ser usada por um propulsor de navio, ou mesmo, por um gerador de energia elétrica.

A primeira tentativa de se produzir turbinas a gás data do início do século XX..Uma empresa francesa, em 1905., começou a produção de uma turbina com cerca de 400 HP de potência útil,, cuja rotação era de 4250 RPM(rotação por minuto).. Acontece que somente em 1911, a empresa HOLZWORTH fabricou a primeira turbina a gás economicamente viável..

Importante: Para que haja combustão é necessária a presença de ar, de combustível e de temperatura de ignição.

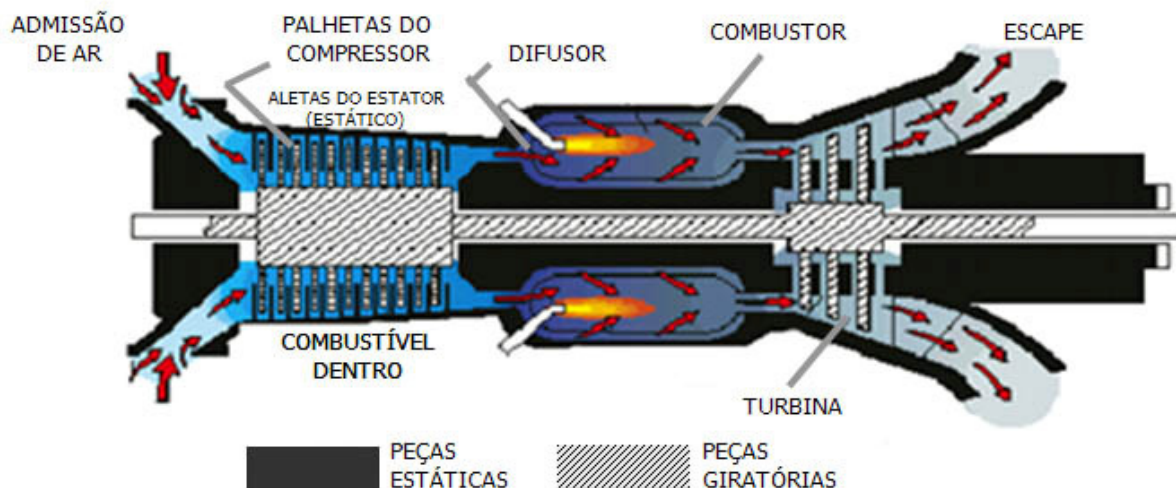
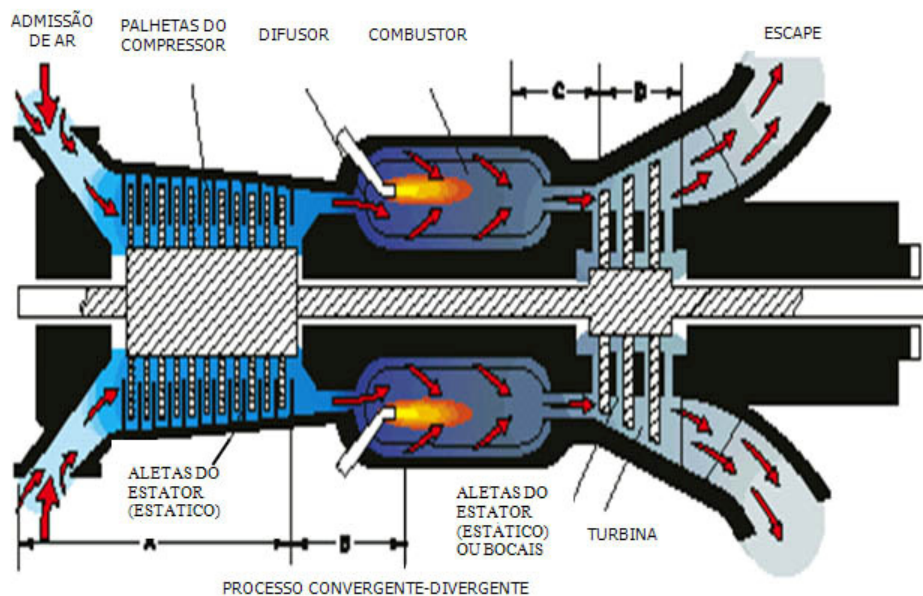


Figura 9 :Fases de operação de uma turbina a gás. Fonte¹⁰

¹⁰ EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.

O ar admitido no compressor é submetido a uma alta compressão, sendo a seguir direcionado para a câmara de combustão ou combustor. O combustível é, então, injetado na câmara de combustão, através dos bicos injetores, formando uma mistura com o ar anteriormente comprimido. Assim, ocorre a queima do combustível. Inicialmente, esse processo ocorre com a ajuda de uma centelha elétrica. Posteriormente, como você vai verificar, a combustão se autossustenta não havendo mais a necessidade da centelha elétrica. Essa combustão produz um gás de alta energia (com alta temperatura). As temperaturas atuais já estão maiores que 1800°C . Os gases a alta temperatura se expandem através da turbina, que transforma a energia térmica, da qual estão possuídos, em energia cinética e, finalmente, em energia mecânica, promovendo um movimento rotativo da turbina; esta, por sua vez, vai acionar o compressor, que vai comprimir o ar que participa lá do início do processo. Todas as turbinas a gás funcionam com base neste mesmo princípio. Existem variações quanto à construção, mas, independentemente do modelo de qualquer fabricante, contará sempre com Compressor, Câmara de Combustão e Turbina.

1.7 Ciclo Brayton



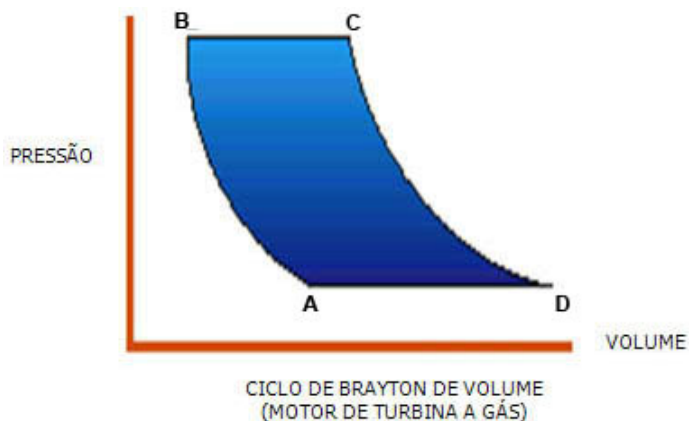


Figura 10: Fases de operação de uma turbina a gás. Fonte¹¹

A turbina tem basicamente as mesmas fases de um motor diesel: admissão, compressão, expansão e descarga.

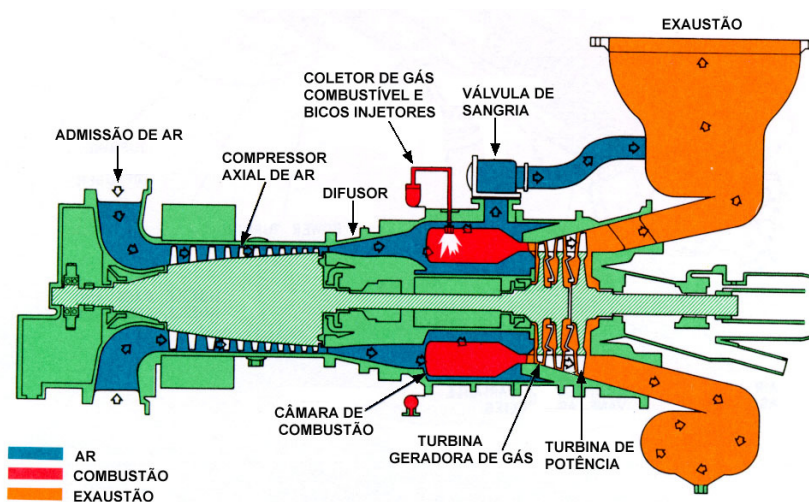


Figura 11: Fases de queima de uma turbina.

Compressão: momento em que o ar admitido é comprimido, aumentando sua pressão e temperatura com conseqüente redução do seu volume, mas sem aumentar sua velocidade.

Combustão: o ar comprimido no estágio anteriormente descrito recebe o combustível (pode ser, por exemplo, óleo diesel) que entra em combustão neste ambiente

¹¹ EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.

extremamente aquecido (por estar comprimido), gerando agora temperaturas mais altas que no estágio anterior, mas mantendo pressão constante.

Expansão: toda a energia produzida sob a forma de calor no estágio anterior passará por um sistema de expansão, em que sua temperatura e pressão vão diminuir, enquanto seu volume aumentará.

1.8 Os Motores de Combustão Interna

Até agora, tudo o que foi falado como fonte de propulsão, foram desde as primeiras fontes básicas de propulsão até a propulsão que faz uso de combustível fóssil. São as turbinas a vapor, motores a vapor, caldeiras e o motor a combustão, que permanece operacional em quase 95% dos navios. Aqui, falaremos sobre os motores de combustão interna, como seus conceitos básicos e os tipos existente hoje. Porém, o foco deste trabalho é mostrar os motores elétricos, que aos poucos, substituirá os motores de combustão. O tempo de vida útil do petróleo na terra, Segundo o professor sueco Kjell Aleklett em Maio de 2006, da Universidade Upsalla, afirma que em media mais uns 50 a 60 anos de existência.

Então, onde entrará os motores elétricos, tanto para carros, e os navios com propulsão elétrica, com 100% de uso de eletricidade, não havendo mais o combustível a bordo. Será então, o próximo assunto e principal razão desta monografia, a importância do uso de propulsão elétrica, em substituição a existente atualmente.

Voltaremos, um pouco ao passado falando das máquinas alternativas de combustão externa. Elas revolucionaram o mundo antes da descoberta das máquinas de combustão interna. Foi o engenheiro James Watt que patenteou a primeira máquina alternativa de combustão no ano de 1769. Essa máquina ficou conhecida como máquina alternativa a vapor.

Uma embarcação, que utilizou a máquina alternativa a vapor, foi o TITANIC, que possuía uma enorme máquina alternativa utilizada na propulsão daquele navio. As máquinas alternativas, a vapor foram utilizadas por muito tempo na propulsão e nos sistemas auxiliares dos navios, sendo também bastante utilizada nas locomotivas.



Figura 12: Gráfico das transformações termodinâmicas.

1.9 Princípios de Termodinâmica

Rendimento térmico - Da potência total (P_t) fornecida a um sistema, uma parte é aproveitada como potência útil (P_u) e uma parte é dissipada ou perdida, geralmente sob a forma de calor. Assim, o rendimento do sistema é definido pela relação entre a potência útil e a potência total, conforme a fórmula:

P_u = potência útil

P_t = potência total

Na prática, o rendimento de qualquer máquina não pode chegar a 100%, pois sempre há perdas.

1.10 Equação Fundamental de Estado

É a equação fundamental para o estudo inicial da termodinâmica, pois relaciona as três principais características de um gás: pressão, temperatura e volume.

$$PV = M \text{ MOL } RT$$

Onde:

P: pressão (N/m^2) M: massa molar

V: volume (m^3) T: temperatura absoluta (K)

R: constante universal dos gases

($R = 0,285 \text{ KJ/Kg.K}$)

Obs: Nota-se que 1 kg-mol de um gás ocupa 22,41m³ em 1,0132x10⁵ N/m² (1 atm) e 273 K, ou seja, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP's).

CAPÍTULO 2

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica estabelece que, durante qualquer ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é proporcional á integral cíclica do trabalho.

$$J \oint Q = \oint W$$

$\oint Q$: Calor líquido transferido durante o ciclo

$\oint W$: trabalho líquido durante o ciclo

J: fator de proporcionalidade.

Isto significa que para toda transformação na natureza existe um preço: a energia. Esta é a entidade que se faz presente em todo o Universo, sem ela é impossível qualquer transformação ou trabalho.

Ela está imersa em todo o Universo, concentrada em algumas regiões, rarefeita em outras, propagando-se em forma de ondas ou condensada em forma de matéria, como provou Einstein com a sua famosa equação: $E=mc^2$. Desta forma, a energia é uma só, mas pode se apresentar de diversas formas.

Por ser algo indestrutível, está constantemente mudando de forma. Exemplos de formas de como a energia pode se apresentar: mecânica, luminosa, sonora, elétrica, térmica e etc. Inevitavelmente, a primeira lei da termodinâmica rege todas as transformações do Universo, determinando que a energia se conserve.

Não diferentemente, esta condição conservacionista, imposta pela primeira lei, será responsável por guiar todo o estudo e análise do comportamento térmico dos motores e de outros equipamentos que utilizam calor e transformações gasosas. Em cálculos de ciclos e estudos de combustão, transferência de calor e fluxo de gases, a primeira lei da termodinâmica é freqüentemente utilizada em sistemas fechados e abertos.

2.1 Segunda Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica estabelece que, para um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual a integral cíclica do trabalho.

No entanto a primeira lei não impõe nenhuma restrição quanto à direção do fluxo de calor e trabalho. Um ciclo no qual uma determinada quantidade de calor é cedida pelo

sistema e uma quantidade equivalente de trabalho é recebida pelo sistema satisfaz a primeira lei, da mesma maneira que um ciclo onde as trocas de calor e trabalho se dão em sentido oposto.

Todavia sabemos da experiência não ser suficiente que um não viole a primeira lei para que ele ocorra. Esse tipo de evidencia experimental é que levou à formulação da segunda lei da termodinâmica.

Dessa forma, um ciclo somente ocorrerá se a primeira e segunda leis da termodinâmica forem satisfeitas.

O principal significado da segunda lei envolve o fato de que determinados processos ocorrem em determinada direção e não na oposta. Uma xícara de café quente esfria em virtude da troca de calor com o meio, mas o meio não cederá calor para a xícara de café quente. Um carro para subir uma colina consome gasolina, mas descendo-a o nível de gasolina no tanque não voltará ao inicial. Observações desse tipo, e diversas outras, são evidências da validade da segunda lei da termodinâmica.

Segundo Clausius¹², em 1850, a segunda lei pode ser facilmente descrita como: é impossível a troca natural de calor entre um corpo a uma dada temperatura e outro corpo a uma temperatura mais elevada que a do primeiro.

Desta forma a segunda lei atua como uma seta do tempo. Indica o sentido para qual um evento deve acontecer. Se não fosse por ela, e sim somente pela primeira lei, um determinado evento que na prática é irreversível poderia ser perfeitamente reversível.

Conforme tal, no Universo não haveria uma certa previsibilidade dos acontecimentos, o acaso poderia ser o fator determinante de todos os eventos, gerando um caos cósmico como um evento que acontece e logo após retrocede como era antes, sem haver uma certa continuidade temporal de todos os eventos.

Felizmente, a segunda lei está aqui para isto, determinar o que pode ou não acontecer tornando os fatos de certa maneira previsíveis e outros simplesmente utópicos. Como para todos os outros eventos, para um motor térmico funcionar, devem ser satisfeitas essas duas leis. Segundo Wylen & Sonntag, uma máquina térmica pode ser definida como um dispositivo que, operando segundo um ciclo termodinâmico, realiza um trabalho

¹² Wylen, Gordon J. Van & Sonntag, Richard E.: Fundamentos da Termodinâmica Clássica. P. 125

líquido positivo à custa da transferência de calor de um corpo em temperatura elevada e para um corpo em temperatura baixa.

Um motor de combustão interna, uma turbina a gás ou a vapor são exemplos de máquinas térmicas. Desta forma inevitavelmente, existirão duas fontes de calor para que haja a troca de calor entre elas: a fonte fria e a fonte quente. Na realidade a fonte quente, que adiciona calor ao sistema, é a combustão no interior dos cilindros, enquanto que a fonte fria representa o escape dos gases, retirando consigo calor do sistema.

A primeira lei não impõe qual das fontes deve receber calor e qual deve ceder. Determina apenas que a energia se conserve. Mas a segunda lei determina que o fluxo de energia seja da fonte quente (corpo de temperatura mais elevada) para a fonte fria (corpo de temperatura menos elevada), uma parte dessa energia é desviada para a realização do trabalho desejado.

Sendo assim, sempre uma parte dessa energia ficará retida na fonte fria. Se o objetivo de uma máquina é realizar um determinado trabalho, faz-se necessário que a energia produzida para a fonte quente não seja totalmente enviada à fonte fria. Já que é impossível evitar que a fonte fria fique sem receber energia, deve-se projetar máquinas em que a fonte fria receba o menos possível.

Eis aí o conceito de rendimento de uma máquina térmica, que é a relação entre a energia gerada para alimentar a fonte quente e o trabalho efetivamente realizado. O rendimento é de maneira geral expresso como:

$$n = \frac{W}{Q}$$

Onde W é a potência efetiva (útil) da máquina e Q é a potência (fluxo de energia) consumida pela máquina.

A figura a seguir demonstra esquematicamente uma turbina que gera trabalho utilizando a energia do vapor:

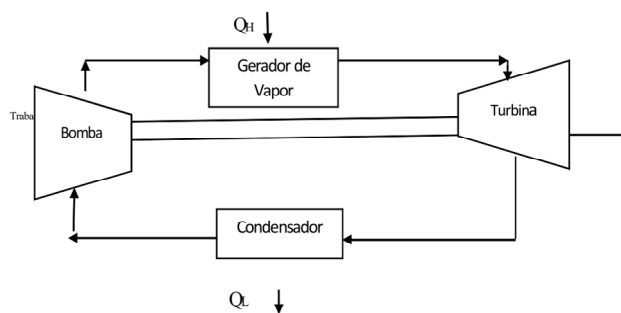


Figura 13: Diagrama em bloco de um circuito de uma turbina.

Q_L representa o calor recebido pela fonte fria e Q_H pela fonte quente. Como o trabalho é a diferença entre Q_H e Q_L , o rendimento ficará como:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Com base nesta exposição, a grande implicação da segunda lei na construção de máquinas é “que é impossível construir uma máquina térmica real que opere um ciclo que receba uma determinada quantidade de calor de um corpo em alta temperatura e produza igual quantidade de trabalho” (afirmação de Kelvin & Planck).

Ou seja, não existe máquina nenhuma com rendimento de 100%. O que resta é apenas pensar em ciclos práticos que tendam a maximizar o rendimento de tal forma que a fonte fria receba a menor quantidade de calor possível, desviando a maior quantidade possível de energia da fonte quente para a realização de trabalho.

2.2 Máquina térmica de Carnot

É uma máquina teórica que trabalha entre dois níveis de temperatura, operando em um ciclo (Ciclo de Carnot) proporcionando o maior rendimento possível. Este ciclo consiste nas seguintes transformações reversíveis:

- 1- Uma expansão isotérmica
- 2- Uma expansão adiabática
- 3- Uma compressão isotérmica
- 4- Uma compressão adiabática

Este ciclo apresenta as seguintes características:

- O rendimento térmico independe da natureza do fluido de trabalho
- O rendimento térmico só depende das temperaturas T_1 e T_2 das fontes quente e fria, respectivamente.
- O rendimento térmico é máximo entre T_1 e T_2 .

A figura 14 mostra graficamente em etapas o funcionamento de uma máquina de Carnot.

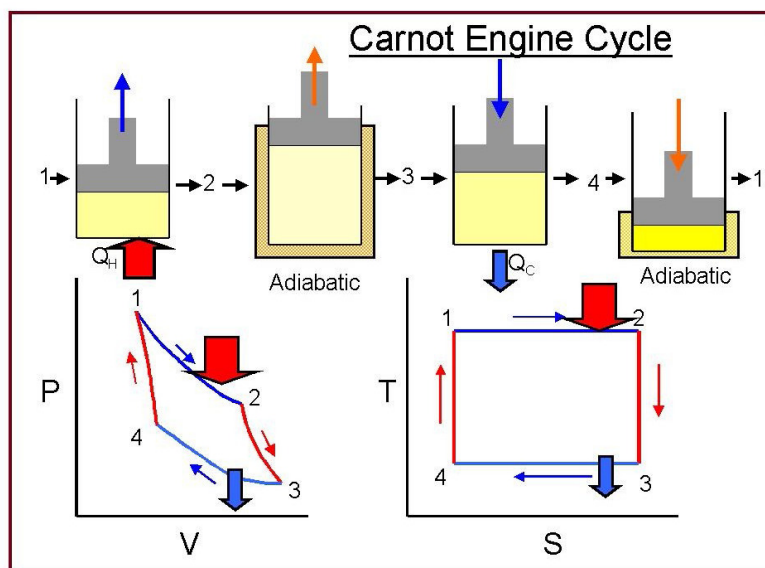


Figura 14: Funcionamento de uma máquina de Carnot Fonte¹³

Na máquina térmica reversível de Carnot, a energia que é rejeitada da fonte quente que não é convertida em trabalho é chamada de energia indisponível. O trabalho do ciclo ideal reversível é chamado de energia disponível. Lembrando que o rendimento é a relação entre a energia disponível (trabalho produzido) e a energia total oriunda da fonte quente. Este também pode ser escrito em função das temperaturas:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Onde T_2 é a temperatura da fonte quente e T_1 da fonte fria.

Igualando, temos:

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_2}{T_1} \text{ ou } Q_L = T_2 \left(\frac{Q_H}{T_1} \right)$$

Isto quer dizer que a quantidade de calor rejeitado para a fonte fria é fornecida a uma temperatura constante. Considerando um ciclo onde um diferencial dQ_H é fornecido e um diferencial dQ_L é rejeitado.

Neste evento, considera-se que as quantidades de calor são transferidas a temperatura constante não importando o tipo de processo envolvido.

Por isso escreve-se desta forma:

¹³ Irineu/CIABA/Belém.

$$\frac{dQ_L}{T_2} = \frac{Q_H}{T_1}$$

Em um ciclo real, a fonte fria é a atmosfera, sendo, portanto, T_2 a temperatura da atmosfera. Desta forma o calor rejeitado Q_L dos motores não será capaz de alterar a temperatura da atmosfera, por isso considera-se T_2 constante.

Teremos, portanto:

$$\int d\frac{Q_L}{T_2} = \frac{Q_L T_2}{T_2} = \text{const} \therefore \frac{Q_L}{T_2} = \int d\frac{Q_H}{T_1}$$

Assim, pode-se concluir que $\int d\frac{Q_H}{T_1}$ é um número constante para um dado processo de mudança entre dois estados, não importando como este ocorre, independente a que temperatura T_2 o calor Q_L é rejeitado.

Este número representa o que se chama de variação de entropia (representada pela letra S), que é uma propriedade de estado de um gás, de uma substância.

$$\Delta S = \int d\frac{Q_H}{T_1} = \frac{Q_L}{T_2}$$

Com base nisto, pode-se concluir que a entropia é a medida da energia indisponível, aquela que deixou de converter-se em trabalho. Naturalmente, toda transformação envolvendo fluxo de calor é irreversível, na qual o calor passa do corpo de temperatura maior para o de temperatura menor, percebe-se que existe um aumento da entropia. Isto significa que a energia indisponível aumenta.

Ou seja, já que a primeira lei determina que a energia se conserve, mas a segunda determina que a entropia sempre aumente, ocorre um processo constante de degradação da energia do Universo, diminuindo cada vez mais a energia disponível para ser usada como trabalho.

2.3 Energia Interna e Entalpia

Embora seja mais fácil estudar os ciclos usando calores específicos constantes, o que foi mostrado anteriormente que não o são, neste estudo será adotado calores específicos variantes, pois, desta forma, não se perde tanta precisão necessária a este estudo que se fosse usado calores específicos constantes.

Mas para tal, existe um caminho menos complicado do que trabalhar diretamente com calores específicos variantes, entalpia e energia interna. Energia interna e entalpia são definidas da seguinte forma:

$$e = e_0 + e(T)$$

$$h = h_0 + h(T)$$

Onde e_0 e h_0 são, respectivamente, a energia interna e entalpia do gás no zero absoluto. Sabe-se que estes dados são iguais para um gás neste estado.

Será usada a entalpia específica e a energia interna específica na forma numérica polinomial onde o índice i representa a espécie do gás.

Assim, Entalpia específica:

$$h_i(T) = R \text{ mol} \left(u_{i,1}T + u_{i,2}T^2 + u_{i,3}T^3 + u_{i,4}T^4 + u_{i,5}T^5 \right)$$

$$h_i(T) = R \text{ mol} \left[\sum_{j=1}^5 u_{ij}T^j \right]$$

Energia interna específica:

$$e_i(T) = h_i(T) - R \text{ mol} T$$

$$e_i(T) = R \text{ mol} \left(\left[\sum_{j=1}^5 u_{ij}T^j \right] - T \right)$$

Onde $u_{i,j}$ ($j=1$ até 5) representa os coeficientes polinomiais da espécie de gás i .

Sendo assim a entalpia específica e a energia interna específica são dadas da seguinte forma:

$$h_i = h_i(T) + h_{0,i}$$

$$e_i = e_i(T) + e_{0,i}$$

Onde $h_{0,i}$ e $e_{0,i}$ representam, respectivamente, a entalpia e a energia interna específicas no zero absoluto. Sendo M_R o número de mols dos reagentes e M_P o número de mols dos produtos, a primeira lei expressa classicamente por:

$$dq - dW = dE$$

Para uma combustão adiabática a volume constante, $dQ=0$ e $dW=0$.

$$dE = 0 \text{ ou } E_P - E_R = 0 \text{ P R}$$

A energia interna dos produtos é igual a dos reagentes.

$$E_P = M_P \sum (x_{ie} 0_i)_P = M_P (\sum (x_{ie} i)_P + \sum (x_{ie} 0_i))_P$$

$$E_R = M_R \sum (x_{ie} i)_R = M_R (\sum (x_{ie} 0_i)_R + \sum (x_{ie} i)_R)$$

Separando:

$$(E_0) P = M P e_{\square} P$$

$$E(T) P = M P e_{\square} P(T_{\square})$$

$$(E_0) \square = M P e_{\square} \square$$

$$E(T) \square = M \square e_{\square}(T_{\square})$$

Como dito anteriormente são iguais as energias internas dos produtos e dos reagentes.

$$E P = E R$$

$$M p e_{\square} p + M p e_{\square} P(T p) = M r e_{\square} r + M r e_{\square} r(T r)$$

$$\Delta E_{\square} = M p e_{\square} p - M r e_{\square} r$$

Substituindo as que ações e igualando, encontra-se:

$$M p e_{\square} P(T P) = M \square e_{\square}(T_{\square} - \Delta E_{\square})$$

Esta expressão acima serve para encontrar a temperatura dos produtos (T_p) se a temperatura dos reagentes (T_R) for conhecida. O termo E_0 , que significa calor de reação no zero absoluto pode ser obtido a partir de uma reação a temperatura constante T_s em um calorímetro de volume constante. Um calorímetro de volume constante e imerso em um tanque de água em uma temperatura T_S .

Apesar da combustão ser uma reação do tipo exotérmica, os produtos, por estarem em um calorímetro imerso em água por todos os lados, voltarão à temperatura dos reagentes (T_S). O calor absorvido pela superfície circundante de água é chamado de calor da reação (Q_{VS}). Aplicando a primeira lei tem-se:

$$Q_V = E P - E R$$

$$dW = 0 \text{ e } dV = 0$$

Logo, tem-se:

$$E P = M R e_{\square} R + M R e_{\square} R(T_s)$$

$$E P = M P e_{\square} P + M P e_{\square} P(T_s)$$

Substituindo todas as equações de energia, encontra-se a variação:

$$\Delta E_{\square} = Q_{VS} - M P e_{\square} P(T_s) + M R e_{\square} R(T_s)$$

Para casos gerais onde o volume varia e onde há perdas de calor, a primeira lei poderá se apresentar na seguinte forma:

2.4 Elementos de uma combustão

Segue abaixo, os elementos de uma combustão em ordem que possibilita tornar compreensível o entendimento da mesma.

Combustão: A combustão é uma reação química com desprendimento de luz e de calor. Para que se processe essa reação, dois agentes químicos têm que estar presentes: o combustível e o comburente. Além disso, é indispensável que a temperatura do combustível corresponda pelo menos à do seu ponto de ignição.

Combustível - É tudo aquilo que é capaz de entrar em combustão: óleo Diesel, gasolina, madeira, carvão, papel, pano, estopa, tinta, etc. Na nossa disciplina, a palavra combustível estará sempre associada a produtos derivados do petróleo como a gasolina, o óleo Diesel e o óleo pesado.

Comburente - É todo elemento que, associando-se quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão. O oxigênio, presente no ar atmosférico, é o comburente mais facilmente encontrado na natureza. O ar atmosférico é constituído de aproximadamente 76% de Nitrogênio, 23% de oxigênio e 1% de outros gases. O Nitrogênio é, na realidade, um gás inerte, ou seja, um gás que não queima.

Ponto de ignição – É a temperatura mínima na qual o combustível desprende vapores capazes de se inflamarem e continuarem queimando mesmo quando se lhe retira a fonte externa de calor. Cada combustível tem a sua própria temperatura de ignição. A temperatura de ignição não deve ser confundida com o ponto de fulgor do combustível, que é a temperatura mínima na qual o combustível desprende vapores capazes de se inflamarem quando em contato com uma fonte externa de calor, mas uma vez retirada essa fonte a combustão extingue-se.

2.5 Máquinas de combustão interna

As máquinas de combustão são classificadas em duas categorias: as de combustão externa e as de combustão interna.

Máquina de combustão externa é aquela em que a queima do combustível ocorre fora dela ou, mais precisamente, numa caldeira onde o calor da combustão é utilizado para produzir o vapor d'água que vai movimentar a máquina. Como exemplo podemos citar a turbina a vapor mostrada de forma elementar na instalação da usina térmica e a antiga máquina alternativa a vapor mostrada na instalação da figura abaixo.

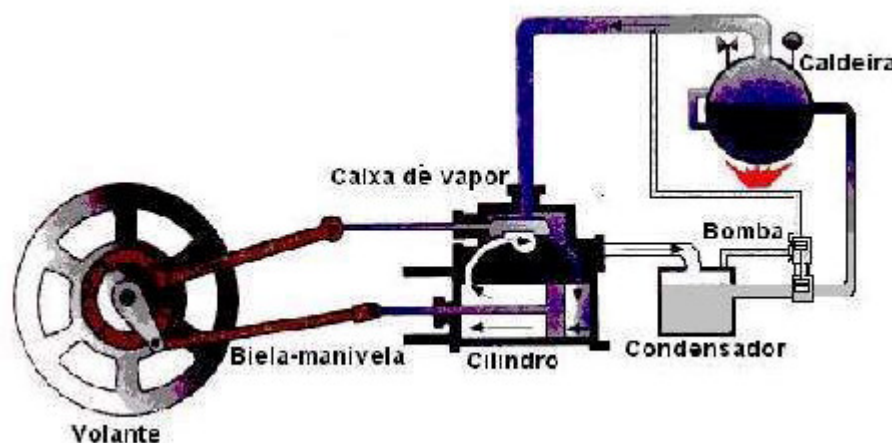


Figura 15: Máquina de combustão externa. Fonte¹⁴

2.6 Funcionamento dos motores de combustão interna

Abaixo temos a sequência de funcionamento de um motor de combustão em partes.

Ciclo - A palavra ciclo pode ser definida como o conjunto de transformações que se sucedem na mesma ordem e se repete com lei periódica. No caso do motor térmico, pode ser melhor entendido como a evolução da massa gasosa no interior do cilindro, com variação de pressão, volume e temperatura.

Tanto o motor Otto, quanto o Diesel, funcionam segundo os ciclos de dois e de 4 tempos.

¹⁴ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

Ciclo operativo do motor Otto de 4 Tempos:

Os motores de 4 tempos necessitam de duas voltas completas do eixo de manivelas (720°) para a realização de um ciclo; isso equivale a 4 cursos do êmbolo. A figura mostra as fases do ciclo que são:

- a) aspiração;
- b) compressão;
- c) combustão e expansão; e
- d) descarga.

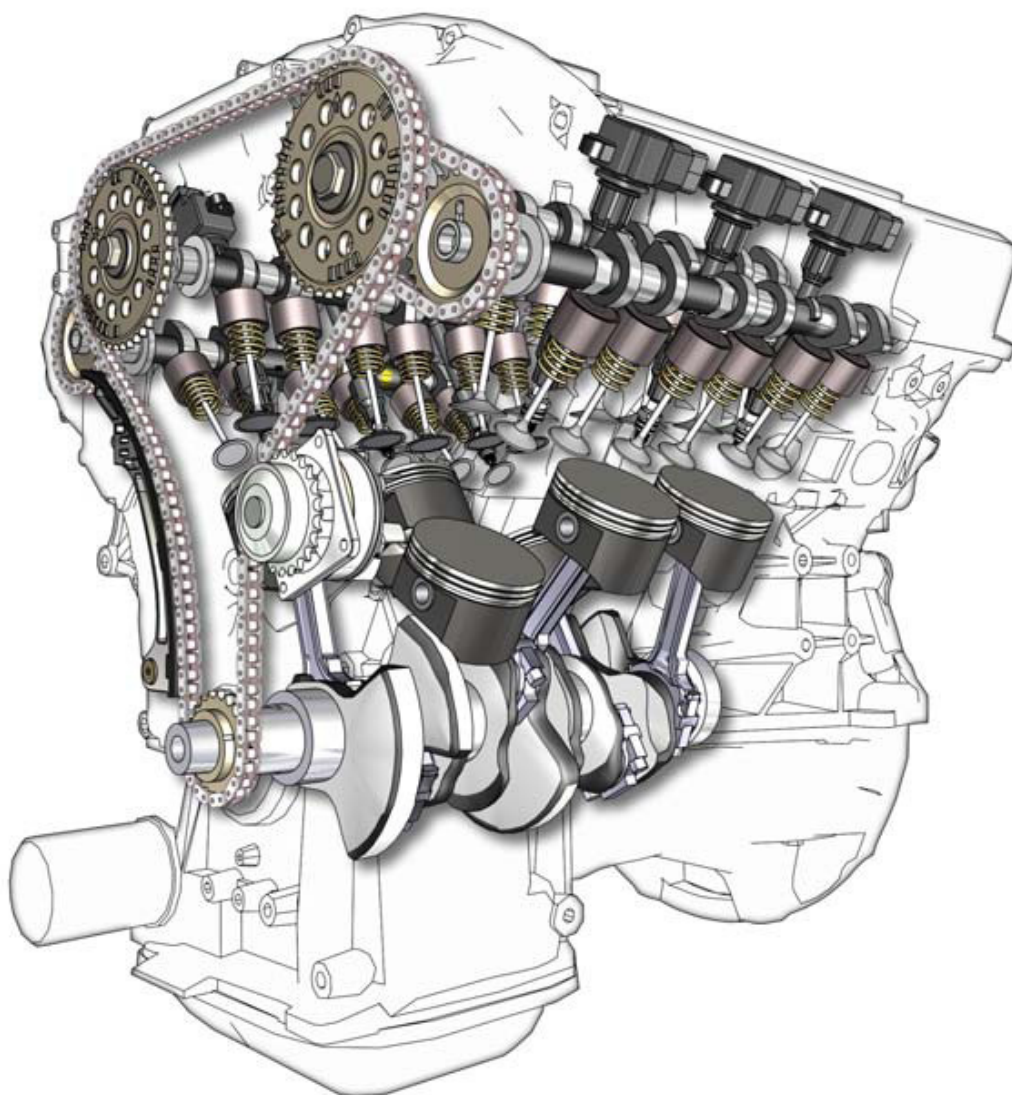


Figura 16: Motor típico de 4 tempos. Fonte¹⁵

¹⁵ BOSCH, ROBERT GmbH. *Automotive Handbook*. 1993. Alemanha.

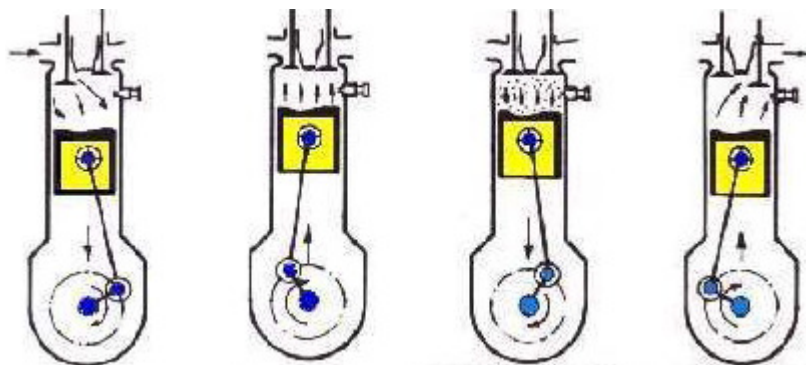


Figura 17: Fases de um motor 4 tempos. Fonte¹⁶

a) Aspiração - Com a válvula de aspiração abrindo e a de descarga fechada, o êmbolo desloca-se do seu PMS (ponto morto superior) para o PMI (ponto morto inferior), criando um vácuo no interior do cilindro, permitindo assim que uma mistura de ar + gasolina (ou ar + álcool) penetre no mesmo.

b) Compressão - Após o fechamento da válvula de aspiração, o êmbolo deslocasse do PMI para o PMS, comprimindo a mistura ar + combustível na câmara de combustão. O volume da carga fica então reduzido a uma fração do volume que havia no princípio do curso.

c) Combustão e expansão - Ainda no final da compressão, uma centelha elétrica é deflagrada pela vela no interior da câmara de combustão, dando início à queima da mistura comprimida. A temperatura dos gases cresce rapidamente, aumentando assim a pressão no interior da câmara e empurrando energicamente o êmbolo em direção ao seu PMI. É comum encontrarmos em algumas publicações o termo explosão ao invés de combustão, mas na verdade o que se pretende no caso é apenas dizer que no motor de explosão a combustão no motor Otto ocorre com maior velocidade do que nos motores Diesel.

d) Descarga - Pouco antes de o êmbolo atingir o seu PMI, abre-se a válvula de descarga e os gases da combustão, que ainda estão a uma pressão considerável, começam a sair espontaneamente do cilindro. Durante o retorno do êmbolo ao seu PMS, ele expulsa o restante dos gases da combustão, encerrando o ciclo.

¹⁶ BOSCH, ROBERT GmbH. *Automotive Handbook*. 1993. Alemanha

2.7 Ciclo operativo do motor Otto de 2 Tempos

Nos motores de 2 tempos o ciclo completo se realiza em apenas uma rotação do eixo de manivelas (360°), o que equivale a dois cursos do êmbolo. As fases do ciclo são as seguintes:

- a) Admissão ou carga / compressão; e
- b) Combustão e expansão / descarga e lavagem

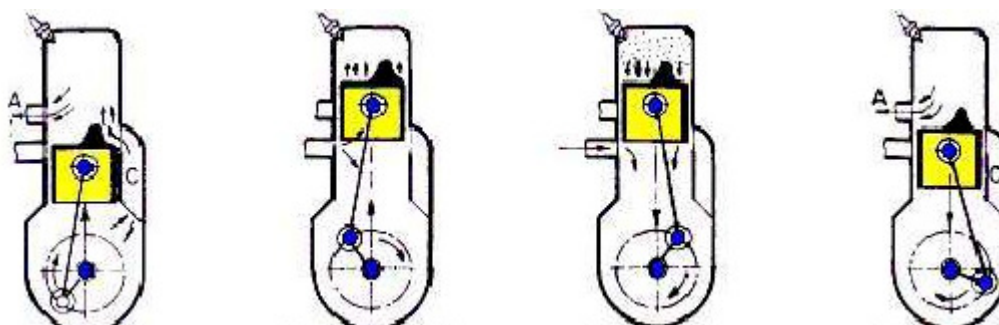


Figura 18: Fases do Motor a 2 tempos. Fonte¹⁷

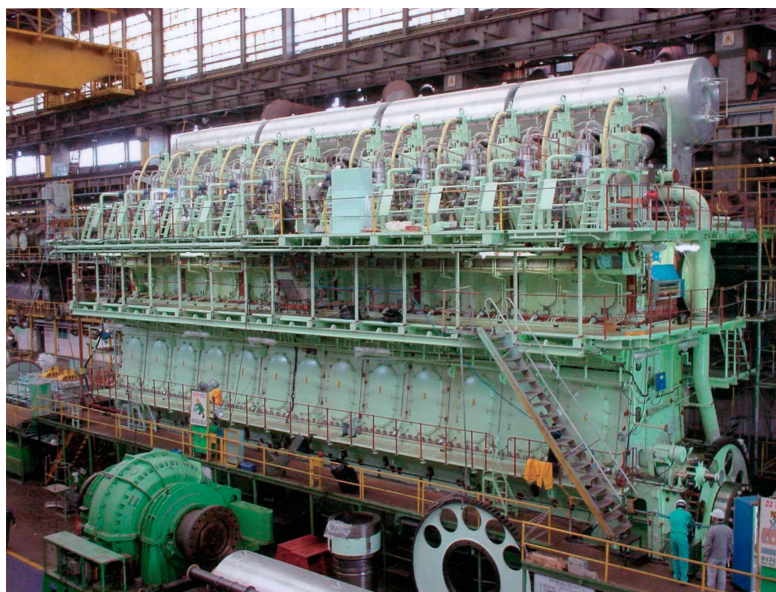


Figura 19: Motor a 2 tempos Marítimo de grande porte. Fonte¹⁸

a) Admissão ou carga / compressão – O êmbolo parte do PMI para o PMS, provocando uma queda de pressão no cárter. A primeira fração desse curso destina-se ainda à lavagem e à carga do cilindro, enquanto a segunda corresponde à fase de

¹⁷ BOSCH, ROBERT GmbH. *Automotive Handbook*. 1993. Alemanha

¹⁸ Wartisila.

compressão. Ao final desse curso, a borda inferior do êmbolo descobre a janela de entrada da mistura no cárter, sendo que esta penetra no mesmo por causa do vácuo criado em decorrência da subida do êmbolo para o PMS. Você viu que esse motor não possui válvulas e sim janelas de admissão (C) e de descarga (A).

b) Combustão e expansão / descarga e lavagem – Estando o êmbolo bem próximo do PMS, uma centelha elétrica é deflagrada entre os eletrodos da vela de ignição e a mistura se inflama dando origem a um aumento de pressão. Os gases em expansão atuam sobre o êmbolo empurrando-o energicamente para baixo. A mistura ar + combustível admitida anteriormente no cárter é então comprimida pela parte inferior do êmbolo. Antes de chegar ao PMI, o êmbolo descobre a janela de admissão C, e a mistura comprimida no cárter passa para o interior do mesmo realizando a lavagem. Uma rotação do eixo de manivelas, o motor de 2 tempos realiza todas as fases do motor de 4 tempos.

2.8 Funcionamento dos motores do ciclo Diesel

A principal diferença entre o motor do ciclo Diesel e o do ciclo Otto consiste no fato de que, no Diesel, a inflamação do combustível não é feita por meio de uma centelha elétrica e sim, pela elevada temperatura do ar submetido a uma forte compressão no cilindro.

Ciclo operativo do motor Diesel de 4 tempos:

Atente para a figura e acompanhe a descrição das fases do ciclo que são:

- a) aspiração;
- b) compressão;
- c) combustão e expansão; e
- d) descarga ou escape.

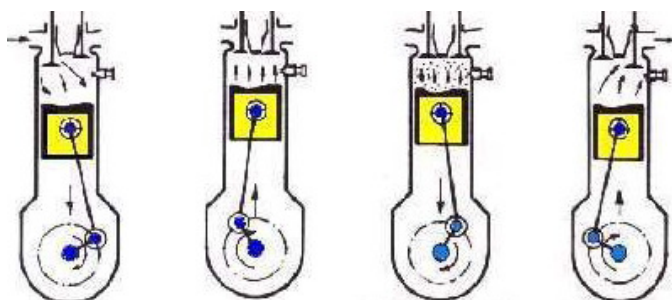


Figura 20: Fases do ciclo do motor Diesel de 4 tempos. Fonte¹⁹

¹⁹ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

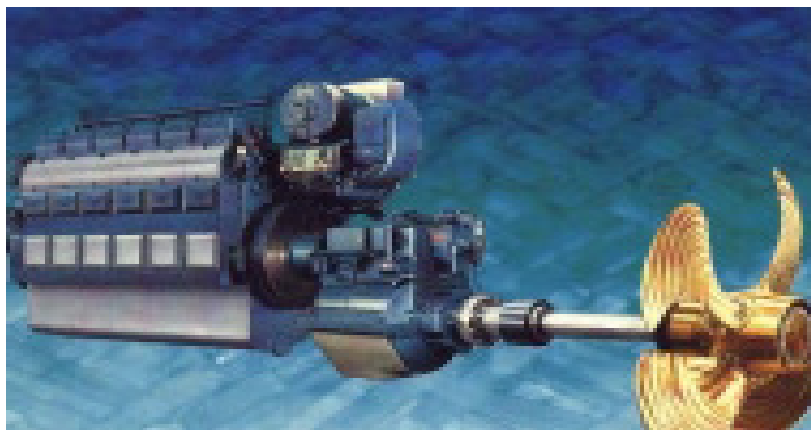


Figura 21: Motor Diesel Marítimo de 4 tempos. Fonte²⁰

2.9 Ciclo operativo do motor Diesel de 2 Tempos

Nesse tipo de motor o ar é levemente comprimido antes de ser admitido no cilindro. Vários são os métodos utilizados para elevar a pressão do ar de alimentação. Um deles é mostrado na figura ao lado. Trata-se de um compressor de lóbulos acionado mecanicamente pelo próprio motor. Mais tarde você conhecerá outro sistema muito mais usado para tal fim e que consta de um turbo compressor acionado pelos próprios gases de descarga do motor.

O ciclo de 2 tempos torna-se mais interessante para o motor Diesel do que para o Otto, já que nesse último a lavagem é efetuada apenas com ar, o que significa economia de combustível. O motor pode possuir janelas de admissão e janelas de descarga, ou janelas de admissão e válvula de descarga na cabeça.

O ciclo operativo do motor de 2 tempos com janelas de admissão e válvula de descarga na cabeça resume-se então no seguinte:

Ao se deslocar do PMI para o PMS, o êmbolo cobre as janelas de admissão e logo em seguida a válvula de descarga fecha, permitindo que o ar, admitido anteriormente no cilindro, seja comprimido. Um pouco antes do êmbolo atingir o PMS o combustível é injetado e queimado na câmara de combustão.

A força expansiva dos gases resultantes da queima empurra energicamente o êmbolo para o PMI. Um pouco antes do êmbolo descobrir as janelas de admissão, a válvula de descarga abre e uma boa parte dos gases da combustão é descarregada. Assim

²⁰ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

que o êmbolo descobre as janelas de admissão, o ar fresco enviado pelo compressor é admitido no cilindro e expulsa o restante dos gases, efetuando em seguida a carga de ar para o novo ciclo, ao tempo em que fecha a válvula de descarga.

Vamos observar agora a figura abaixo e compreender o funcionamento do motor Diesel de 2 tempos com janelas de admissão e de descarga. Na verdade, existem muitos deles funcionando por aí, embora a preferência atual seja pelos que utilizam janelas de admissão e válvulas de descarga na cabeça.

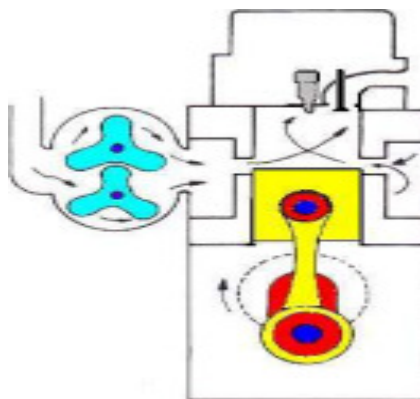


Figura 22: Compressor de lóbulos acionado mecanicamente pelo próprio motor. Fonte²¹

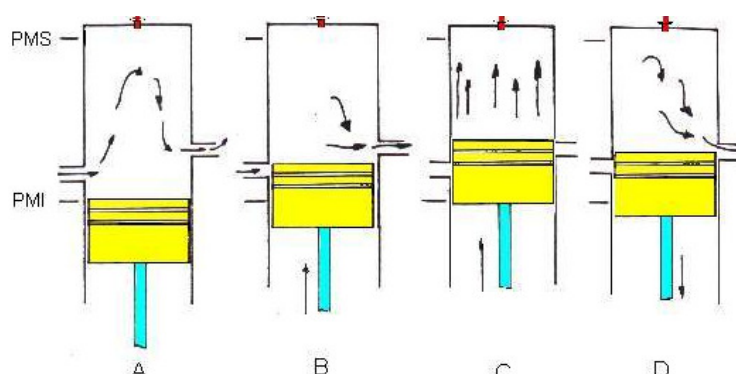


Figura 23: Motor Diesel de 2 tempos com janelas de admissão e de descarga. Fonte²²

Deslocando-se do PMI para o PMS, o êmbolo cobre primeiramente as janelas de admissão (que são as mais baixas), interrompendo o suprimento de ar vindo do compressor de lóbulos para o cilindro.

Entretanto, continua saindo ar pelas janelas de descarga que ainda encontram-se abertas. Prosseguindo o seu caminho em direção ao PMS, o êmbolo cobre as janelas de

²¹ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

²² VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

descarga, iniciando assim a fase de compressão. Em seu movimento para cima o êmbolo comprime cada vez mais o ar, até que, próximo do PMS, o combustível é injetado, inflamando-se por causa da elevada temperatura do ar comprimido. A força expansiva dos gases empurra então o êmbolo para baixo.

Antes de chegar ao PMI, o êmbolo descobre as janelas de descarga e, em virtude da considerável pressão ainda reinante nos gases, a maior parte é descarregada para o exterior. Continuando o seu caminho para baixo, o êmbolo descobre as janelas de admissão permitindo que o ar fresco, vindo do compressor, penetre no cilindro expulsando o restante dos gases (lavagem).

CAPÍTULO 3

CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ALTERNATIVAS DE COMBUSTÃO INTERNA

Podemos classificar os motores alternativos de combustão interna levando em conta uma série de fatores.; ciclo, número de tempos, disposição dos cilindros, número de cilindros, rpm, processo de alimentação de ar, tipo de sistema de injeção, aplicação, potência, etc.

Esta classificação poderá ser tanto mais extensa quanto maior for o conhecimento que você adquirir ao longo dos seus estudos e de sua experiência profissional. Por enquanto trataremos o assunto de forma simplificada:

- a) Quanto ao ciclo:
 - ciclo OTTO; e
 - ciclo DIESEL
- b) Quanto ao número de tempos:
 - de 2 tempos; e
 - de 4 tempos.
- c) Quanto à disposição dos cilindros:
 - em linha;
 - em “V” ;
 - de cilindros radiais;
 - de êmbolos opostos; e
 - de cilindros opostos.

Motores em linha – são aqueles em que os cilindros são dispostos verticalmente numa mesma linha.

Motores em V – são constituídos por dois blocos de cilindros em linha dispostos entre si segundo um determinado ângulo (45, 60 ou 90°).

Motores radiais – são aqueles em que os cilindros são dispostos radialmente a intervalos angulares iguais, em torno de um mesmo eixo de manivelas.

Motores de cilindros opostos – são constituídos por dois ou mais cilindros dispostos em lados opostos a um mesmo eixo de manivelas sob um ângulo de 180°.

3.1 Motores de êmbolos opostos

Caracterizam-se por possuir um só cilindro para cada dois êmbolos em oposição, sendo a câmara de combustão formada pelas faces dos dois êmbolos no final da compressão.

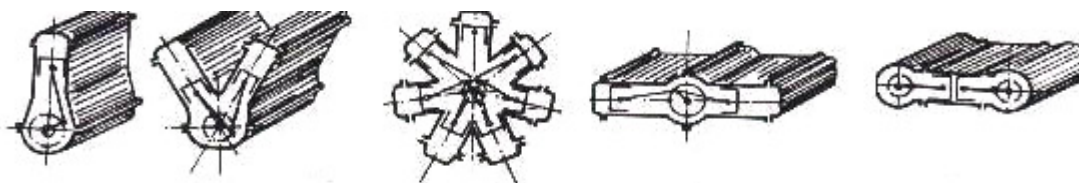


Figura 24: Disposições de cilindro. Fonte²³

d) Quanto à rotação:

- de baixa (até 350 rpm);
- de média: (de 350 a 1000 rpm); e
- de alta (de 1000 rpm em diante).

e) Quanto ao uso ou aplicação:

- estacionários terrestres;
- terrestres automotivos;
- de aviação; e
- marítimos.

f) Quanto ao número de cilindros: O número de cilindros é um dado importante na classificação dos motores. Entretanto, não se adotam na prática expressões como, monocilíndrico, bicilíndrico, tricilíndrico, policilíndrico, etc. O comum mesmo é dizer: motor de 1 cilindro, motor de 2 cilindros, motor de 3 cilindros, e assim sucessivamente.

g) Quanto ao método de injeção de combustível: de injeção direta (o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão do motor) de injeção indireta. (o combustível é injetado numa pré-câmara ou antecâmara de combustão e depois a combustão se propaga para a câmara principal)

h) Quanto ao combustível utilizado:

- gasolina;

²³VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

- álcool;
 - óleo Diesel;
 - óleo pesado; e
 - gás.
- i) Quanto ao método de alimentação de ar:
- de aspiração natural; e
 - superalimentados.

3.2 Vantagens e desvantagens do motor Diesel sobre o Otto

Desde que foram inventados, há mais de um século, os motores Diesel e Otto sempre dividiram espaços no campo das aplicações. Naturalmente, cada um deles com suas vantagens e desvantagens pode oferecer maior ou menor adequação a um determinado tipo de trabalho, levando-se em conta principalmente os fatores economia e praticidade.

As vantagens mais significativas do motor Diesel sobre o Otto são:

- o motor Diesel queima combustível mais barato;
- o combustível utilizado no Diesel é menos volátil e, portanto, oferece maior segurança no transporte e no armazenamento;
- o rendimento total do motor Diesel é maior, ultrapassando hoje os 40%;
- menor número de peças;
- não necessita de um sistema elétrico de ignição;
- melhor adaptação e economia ao ciclo a dois tempos por fazer a lavagem apenas

com ar; e

- maior durabilidade.

As principais desvantagens são:

- necessita de maior robustez porque trabalha com pressões mais elevadas;
- seu sistema de combustível é mais complexo;
- funcionamento mais ruidoso;
- partida mais difícil;
- maior número de peças; e
- maior preço por unidade de potência.

De um modo geral podemos dizer que o motor Diesel é mais adequado às grandes potências (ônibus, caminhões, grupos Diesel geradores de eletricidade e navios. O motor Otto, por sua vez, é mais adequado às pequenas potências (automóveis, moto).

3.3 Motores empregados na propulsão de embarcações

Principais componentes do motor:

Um motor Diesel é constituído por um grande número de peças fixas e móveis.

Nesta unidade de ensino, você vai identificar esses componentes principais, conhecer suas particularidades e saber da finalidade de cada componente. Começaremos pelos principais componentes fixos que são: bloco, cabeçote e cárter.

Bloco - é a maior peça fixa do motor. É normalmente construído com uma liga especial de ferro fundido.

Normalmente os blocos dos motores contêm: os orifícios dos cilindros e câmaras para água de resfriamento. O bloco é uma peça inteiriça nos motores de pequeno porte, sendo construído em duas ou mais seções nos motores de grande porte. Nesse caso, as seções são ligadas por meio de parafusos.

Para evitar o desgaste do bloco, os cilindros recebem camisas do tipo seca ou molhada. Conforme o caso, essas camisas são introduzidas nos cilindros de maneira que a água de resfriamento entre em contato com elas ou não. A figura abaixo dá uma idéia do que acabamos de explicar.

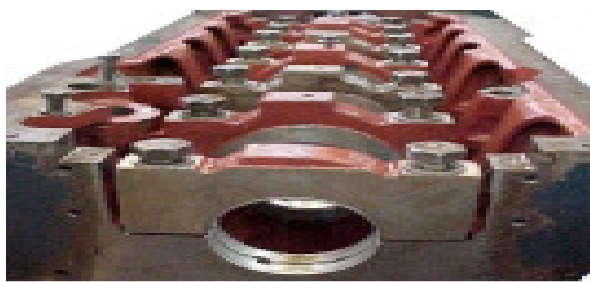


Figura 25- Bloco de um motor. Fonte²⁴

Cabeçote - Também chamado cabeça ou culatra, é a peça que fecha o cilindro e que, juntamente com a face superior do êmbolo forma a câmara de combustão. O cabeçote

²⁴ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

é fixado ao bloco por meio de parafusos, colocando-se entre os dois uma junta que nos motores de pequeno porte é feita de e material metálico nas partes mais sujeitas a pressão.

Nos motores de pequeno porte é construído em uma ou duas seções, sendo que nos de médio e grande porte é individual, ou seja, um para cada cilindro. No cabeçote são instaladas as válvulas de aspiração e/ou descarga, os balancins, e os injetores de combustível, etc. Assim como o bloco de cilindros, os cabeçotes dos motores possuem espaços ociosos para a circulação da água de resfriamento.



Figura 26: Cabeçote. Fonte²⁵

Cárter - É um depósito com a forma aproximada de uma banheira e destinado a armazenar o óleo lubrificante do motor. É aparafusado à parte inferior do bloco, mediante a inserção de uma junta de material macio como cortiça, papelão, etc. Nos motores de pequeno porte é normalmente construído com uma liga de alumínio sendo que nos de médio e grande porte costumam ser de aço fundido ou forjado.

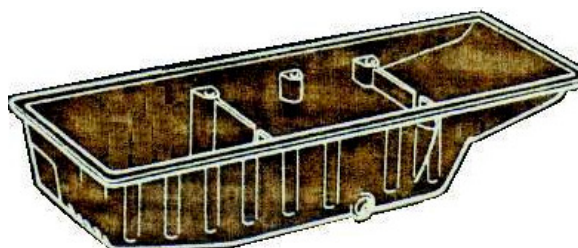


Figura 27: Cárter. Fonte²⁶

Êmbolo - é a peça do motor que se desloca alternativamente no interior do cilindro, recebendo diretamente o impulso dos gases da combustão. É durante o seu movimento

²⁵ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

²⁶ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

alternado que se verifica a transformação da energia térmica da queima do combustível em energia mecânica transmitida ao eixo de manivelas pela conectora.

Os êmbolos dos motores de pequeno porte são normalmente inteiriços e confeccionados com uma liga de alumínio e silício.

Nos de grande porte a coroa é construída separadamente em aço fundido, e parafusada ao restante do corpo do êmbolo. Observe na figura que na sua parte mais alta (coroa), estão situadas as canaletas (escatéis), que servem para alojar os anéis de segmento de compressão e de raspa de óleo. Na parte intermediária, denominada corpo, fica o alojamento do pino do êmbolo; a parte que fica abaixo do corpo chama-se saia. A figura mostra um êmbolo de um motor Diesel de 4 tempos com cabeça (1), anéis de compressão (2), anel raspa (3), pino (4), trava ou retém (5) e saia (6).

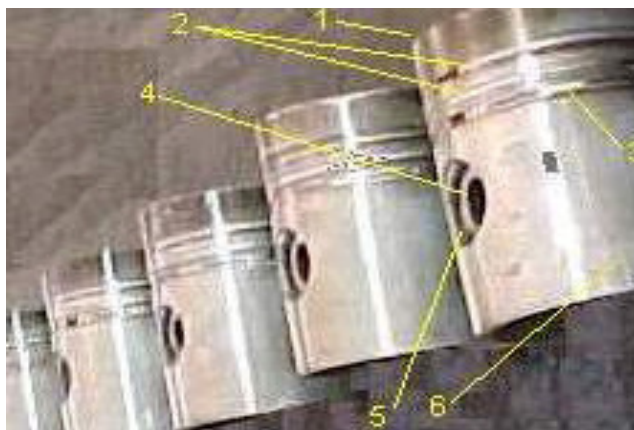


Figura 28: Anéis de Segmento. Fonte²⁷

Nos motores de grande porte o êmbolo não se liga diretamente à biela e sim a uma haste. Pela sua outra extremidade, essa haste do êmbolo é fixada a uma cruzeta. É no pino dessa cruzeta que articula o pé da conectora.

²⁷ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

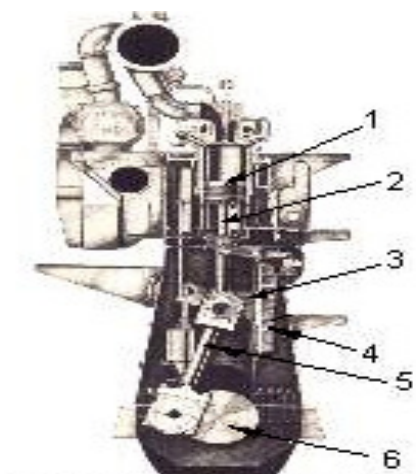


Figura 29: Motor de grande porte de 2 tempos Marítimo. Fonte²⁸

Cruzeta trabalha deslizando em duas peças guias fixadas à estrutura do motor denominadas paralelos da cruzeta. Essas peças garantem o movimento da haste do êmbolo sem sair da linha de centro do cilindro. Portanto, a haste do êmbolo não se movimenta com obliquidade como faz a conectora.

Conectora ou Biela - É a peça do motor cuja função é transmitir o movimento do êmbolo ao eixo de manivelas, imprimindo-lhe um movimento rotativo. É normalmente construída de aço forjado. Costuma-se dividir a conectora em três partes: pé, corpo e cabeça.

O pé da conectora é a parte onde é instalado o mancal tipo bucha, destinado a receber o pino do êmbolo; o corpo vem logo em seguida, e a cabeça é a parte onde fica o mancal bipartido que articula no eixo de manivelas. A figura mostra uma conectora instalada em um êmbolo.

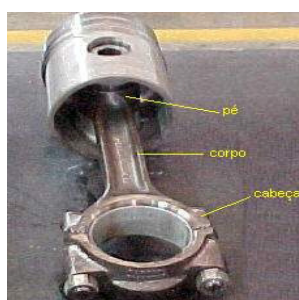


Figura 30: Conectora instalada em um êmbolo. Fonte²⁹

²⁸VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

²⁹VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

Eixo de manivelas - É a peça encarregada de transformar, com o auxílio da conectora, o movimento alternado do êmbolo em rotativo. Sua construção requer técnica apurada, sendo forjado, usinado, e balanceado tanto estática quanto dinamicamente. É o componente de maior comprimento do motor.

O eixo de manivelas, também conhecido como virabrequim, ou árvore de manivelas, é o elemento que transmite a potência do motor ao seu utilizador. É normalmente forjado em liga de aço, sendo o componente móvel de maior custo do motor.

O eixo de manivelas trabalha nos mancais fixos, os quais são dotados de casquilhos substituíveis, construídos da mesma forma que os do mancal móvel da cabeça da conectora que acabamos de estudar. Esses casquilhos, também chamados de bronzinas, são lubrificados sob pressão. A figura mostra um eixo de manivelas e a nomenclatura de suas partes. Conforme indicado na figura abaixo, as partes do eixo de manivelas são:

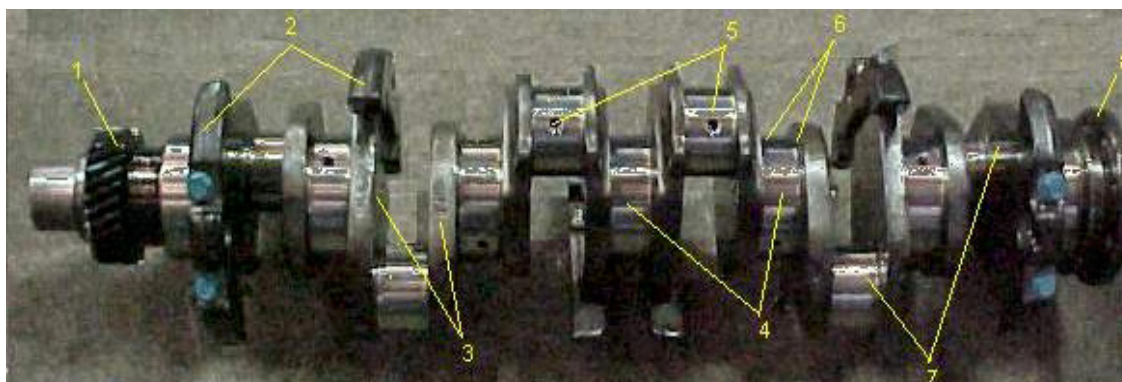


Figura 31: Eixo de manivelas. Fonte³⁰

Volante - é um disco de grande peso, normalmente fixado a uma das extremidades do eixo de manivelas. Sua finalidade é armazenar uma parte da energia mecânica produzida no motor durante o tempo de trabalho útil (expansão), para vencer a resistência dos tempos não motrizes, principalmente o de compressão. É normalmente uma peça inteiriça nos motores pequenos, podendo ser construído em duas metades nos de grande porte. A sua fixação ao eixo de manivelas é feita por meio de chaveta e parafuso(s). O volante pode possuir ou não uma coroa dentada denominada cremalheira do volante. Nos motores de pequeno porte a cremalheira serve para permitir o engraze do pinhão de um motor de arranque, e nos motores de grande porte serve para o engraze do pinhão do mecanismo da catraca, que é um dispositivo acionado por motor elétrico utilizado para

³⁰ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

girar lentamente o MCP (motor de combustão principal), nos casos de inspeção, regulagem ou reparos no mesmo. A figura abaixo ilustra o que explicamos.



Figura 32: Volante. Fonte³¹

Balacim - É uma peça que, articulando no eixo (9), fixo ao seu suporte, recebe o movimento da vareta e o transfere à válvula de admissão ou de descarga. O balancim possui em uma de suas extremidades um parafuso com porca para permitir o ajuste da folga entre a sua outra extremidade e o topo da haste da válvula, quando a mesma encontrasse totalmente fechada. Essa folga visa prevenir a válvula contra os efeitos da dilatação térmica causada pelo calor dos gases da combustão. Se não houvesse essa folga, a dilatação linear da sua haste não deixaria que ela fechasse completamente, chegando “inclusive” a impedir o funcionamento do motor por falta de compressão suficiente.

3.4 Tipos de transmissão

Você já viu que a transmissão do movimento do eixo de manivelas ao eixo de cames pode ser feita por engrenagens. Agora você precisa saber que, além da transmissão por engrenagens, existem ainda a transmissão por correia dentada (a), a transmissão por corrente (b) e a transmissão mista (c). A transmissão por correia é particularmente utilizada em motores de pequeno porte, como os de automóveis. Veja na figura os três tipos de transmissão de que tratamos.

³¹ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

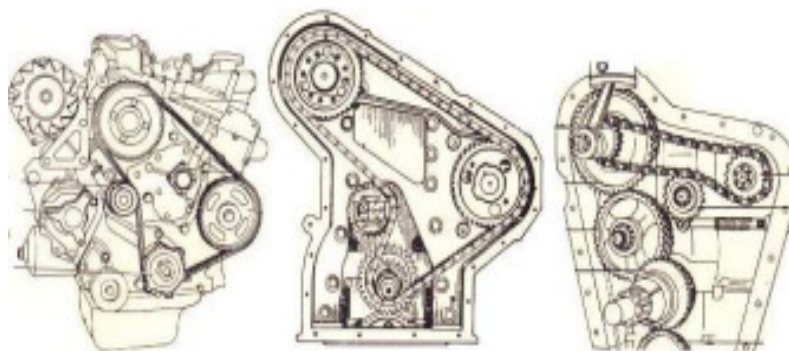


Figura 33: Sistema de transmissão por correias. Fonte³²

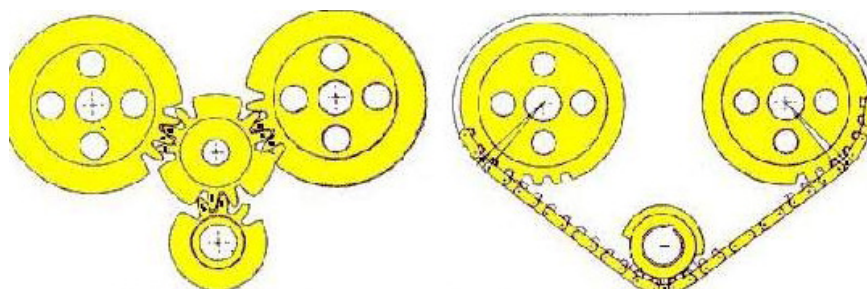


Figura 34: Sistema de transmissão por engrenagens. Fonte³³

3.5 Sistema de lubrificação

Os motores térmicos, e em particular os Diesel apresentam, pela sua própria natureza, problemas de lubrificação difíceis de serem equacionados, levando-se em conta os seguintes fatores:

- a) motor desenvolve elevadas temperaturas durante a combustão.
- b) as pressões exercidas pelo ar comprimido no final da compressão são muito elevadas.
- c) não há como evitar-se a formação de fuligem e outras matérias carbonáceas oriundas da combustão.
- d) o motor consome combustíveis com teores de enxofre relativamente superiores aos utilizados nos motores de explosão.

Por causa desses problemas, os engenheiros especializados em lubrificação sempre se preocuparam com a obtenção de lubrificantes com propriedades adequadas a cada tipo de aplicação.

³² VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

³³ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

Um motor marítimo de grande porte, por exemplo, utiliza vários tipos de óleos lubrificantes, podendo ser um armazenado no poceto para o sistema de lubrificação principal, um para o eixo de cames, outro para as camisas dos cilindros, um para o turbo compressor, outro para o regulador de velocidade, etc. É claro que isso acontece porque procura-se obter os melhores resultados possíveis utilizando-se lubrificantes com propriedades específicas para cada tipo de trabalho.

3.6 Finalidade do sistema de lubrificação

A principal finalidade do sistema de lubrificação do motor é reduzir o atrito entre as peças que trabalham com movimento relativo. Isto é conseguido mediante o estabelecimento de um fluxo contínuo de lubrificante entre essas peças. Ocorre, entretanto, que além de desempenhar sua função principal, o lubrificante acaba realizando funções secundárias de particular importância para o motor. Entre as funções secundárias desempenhadas pelo lubrificante do motor Diesel destacamos:

- a) resfriamento
- b) vedação
- c) limpeza
- d) amortecimento de choques
- e) proteção contra ataques químicos.

a) O resfriamento ocorre porque, enquanto lubrifica, o óleo absorve parte do calor gerado pelo atrito entre as peças do motor e o transfere para o exterior em um trocador de calor denominado resfriador de óleo lubrificante. Por outro lado, em alguns motores de grande porte uma ramificação do sistema de lubrificação é utilizada para circular o óleo nos espaços ociosos existentes nas coroas dos êmbolos, com o propósito de remover dos mesmos o excesso de calor oriundo da combustão. Isto é feito com o auxílio de tubos telescópicos, que serão estudados num outro momento por entendermos que o assunto tem mais afinidade com o sistema de resfriamento do motor.

b) No que diz respeito à vedação, a película de óleo lubrificante entre os anéis de segmento e as paredes dos cilindros intensificam a vedação do ar e dos gases, principalmente nas fases de compressão, combustão e expansão, nas quais a pressão no interior do cilindro é bastante elevada.

c) Com relação à limpeza, o lubrificante circulando no sistema deve ser capaz de desagregar e arrastar consigo as impurezas que se formam no mesmo, principalmente as oriundas dos resíduos da combustão. Essa limpeza deve-se a uma propriedade do óleo denominada detergência, que é da maior importância, pois as impurezas podem obstruir parcial ou totalmente, tubos, galerias e orifícios de passagem do lubrificante.

d) A função de amortecer choques deve-se ao fato de que a película de óleo em determinados mancais, como por exemplo o da conectora, sofre cargas muito elevadas, principalmente no instante da combustão. O lubrificante deverá, por suas propriedades de resistência de película, suportar esses aumentos de carga e de pressão, de maneira a impedir o contato metálico entre as telhas dos mancais e o eixo.

e) A película de óleo lubrificante deve ainda proteger contra os ataques químicos todas as superfícies com as quais entra em contato.

3.7 Composição básica do sistema de lubrificação

O sistema de lubrificação do motor Diesel é constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- a) reservatório de óleo lubrificante
- b) ralo
- c) bomba
- d) filtro
- e) resfriador

a) O reservatório de óleo lubrificante pode ser o cárter que você conheceu na unidade anterior, ou um tanque abaixo do mesmo e com ele comunicado, denominado poceto. Naturalmente, quando há poceto na instalação o cárter é do tipo seco. É o caso típico dos motores Diesel de grande porte. Não havendo poceto, o cárter é do tipo alagado ou úmido, como é o caso dos motores de pequeno porte.

b) O ralo é um protetor de chapa multiperfurada instalado na extremidade do tubo de sucção da bomba, com o propósito de impedir que corpos estranhos como trapo, estopa e outros, por vezes esquecidos nos reservatórios após uma limpeza, penetrem no corpo da mesma, comprometendo o seu funcionamento.

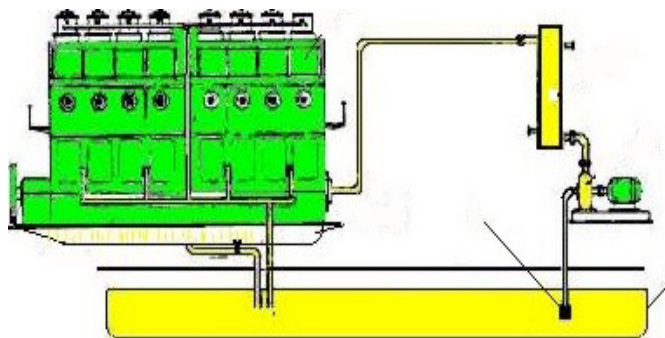


Figura 35: Sistema de Lubrificação. Fonte³⁴

3.8 Tipos de sistemas de resfriamento

Os sistemas de resfriamento utilizados nos motores Diesel e de explosão podem ser divididos em diretos e indiretos. Entre os sistemas de resfriamento do tipo direto encontramos: o resfriamento por ar, que por sua vez pode utilizar a ventilação natural ou a ventilação forçada, e o resfriamento por água, que utiliza apenas a água do mar ou do rio.

a) Resfriamento direto por ar

Trata-se de um sistema pouco utilizado nos dias de hoje. Costuma aparecer em motores de motocicletas e pequenos veículos. O sistema pode apresentar-se de duas formas: com ventilação natural ou com ventilação forçada. Em qualquer das formas, os cilindros do motor são dotados de aletas para aumentar a superfície de contato com o ar. No sistema de resfriamento com ventilação natural, utilizado em alguns tipos de motocicletas, a eficiência do resfriamento depende fundamentalmente do deslocamento do veículo. No sistema de resfriamento por ar com ventilação forçada, uma ventoinha é instalada na extremidade do eixo de manivelas, forçando o ar por um conduto em direção às aletas dos cilindros. As figuras mostram os arranjos que acabamos de descrever.

b) Resfriamento direto por água

Foi o primeiro sistema de resfriamento por água utilizado nas embarcações. Trata-se de um sistema rudimentar e obsoleto que hoje só é utilizado em motores de embarcações miúdas que navegam em rios, pois o efeito da corrosão não é muito acentuado. Na sua forma mais comum, o resfriamento direto por água é obtido da maneira mostrada na figura.

³⁴ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

3.9 Resfriamento indireto combinado por água doce e água do mar (ou do rio)

Este é, sem dúvida alguma, o sistema mais empregado nos navios mercantes de médio e de grande porte. Nele, uma bomba centrífuga, acionada por motor elétrico ou pelo próprio motor de combustão, é utilizada para circular água doce pelos espaços apropriados no interior do motor. Essa água passa por dentro de um aparelho denominado resfriador de água doce, onde troca calor com a água do mar ou do rio que passa pelo interior dos tubos ou das placas do mesmo. Essa água é aspirada do mar ou rio por uma bomba centrífuga dependente ou independente do motor, e descarregada para o resfriador, de onde retorna novamente ao mar ou rio. A figura 31A mostra um sistema de resfriamento simplificado utilizado em navios de médio e de grande porte. funcionamento do sistema é o seguinte: a bomba de água doce envia a água para a parte inferior do bloco do motor. Passando pelos espaços apropriados, ela sai aquecida pela parte superior do mesmo. Então ela entra no resfriador para trocar calor com a água do mar proveniente da bomba de água salgada. Do resfriador a água doce é novamente aspirada pela bomba que a envia para o motor. Um tanque elevado, denominado tanque de expansão e/ou compensação é comunicado com o sistema, e, como o próprio nome sugere, tem duas finalidades:

- Absorver o aumento do volume da água aquecida sem danos para o sistema, daí o nome de tanque de expansão.

- Compensar possíveis perdas de água pelos engaxetamentos de válvulas, juntas, selos mecânicos deficientes, perdas por evaporação etc., justificando também a denominação de tanque de compensação.

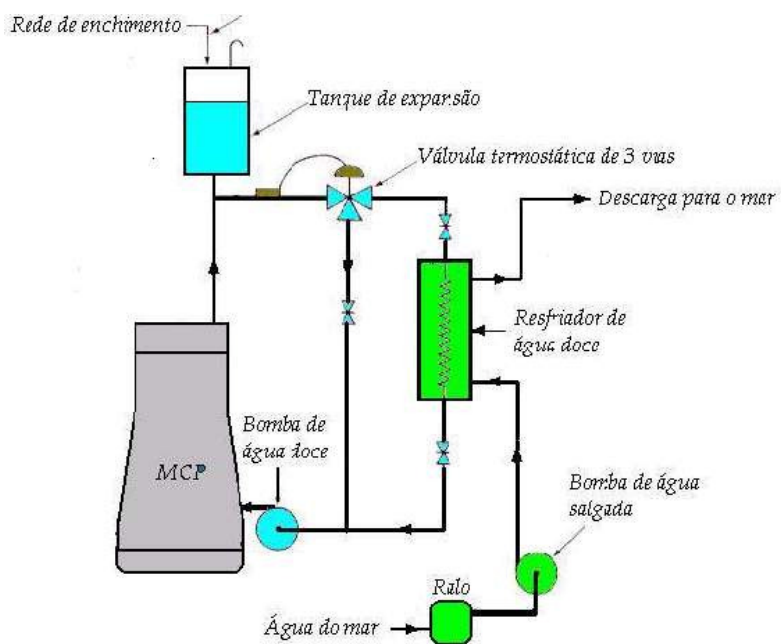


Figura 36: Resfriamento indireto combinado por água doce e água do mar(ou de rio). Fonte³⁵

³⁵ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

CAPÍTULO 4

RESFRIAMENTO INDIRETO SOB QUILHA

O resfriamento indireto sob quilha é também um sistema de resfriamento combinado porque utiliza as ações arrefecedoras da água doce e da água do mar ou do rio. Embora rapidamente, ele será estudado aqui por causa da sua larga aplicação em barcos de pesca que navegam em águas lamacentas ou arenosas. Nesse sistema, que é mostrado na figura 31A, vários tubos de resfriamento são dispostos longitudinalmente e fixados na parte exterior do fundo da embarcação.

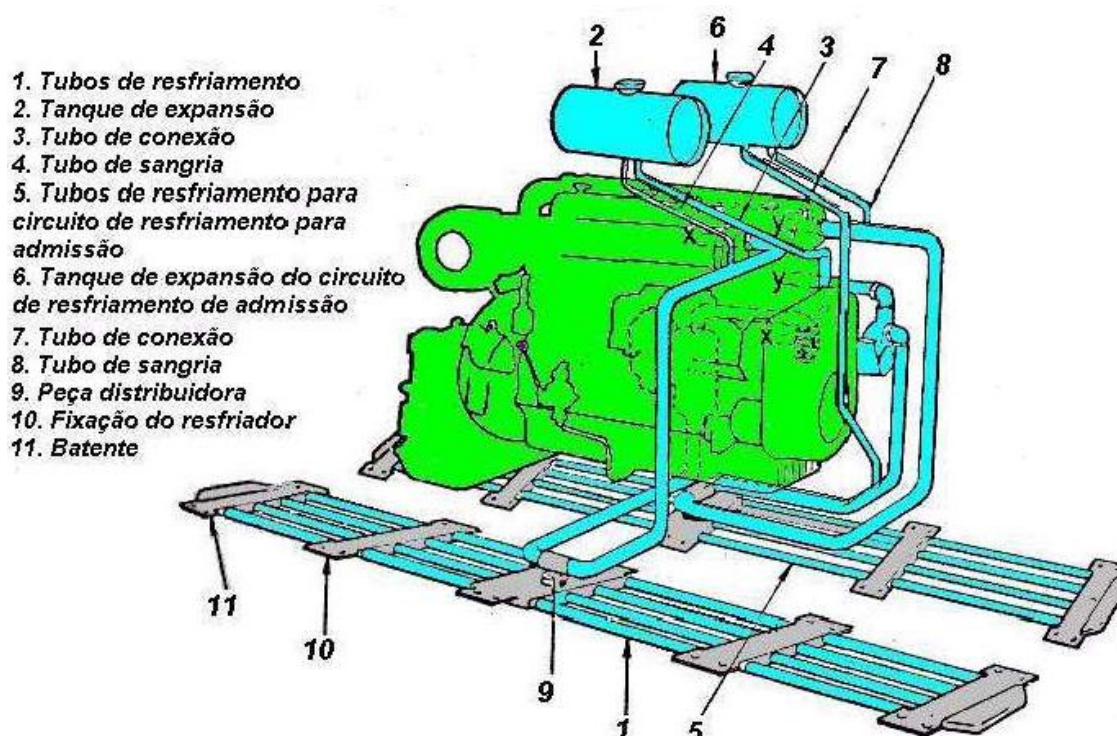


Figura 37: Resfriamento indireto sob quilha. Fonte³⁶

4.1 A válvula termostática (a)

Tem por finalidade controlar o fluxo da água de resfriamento por dentro ou por fora do radiador, quando a temperatura da mesma é muito alta ou muito baixa para sistema.

³⁶ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

Assim, ela deve manter a temperatura da água de circulação dentro das condições desejadas.

Observe a mudança na direção do fluxo na figura.

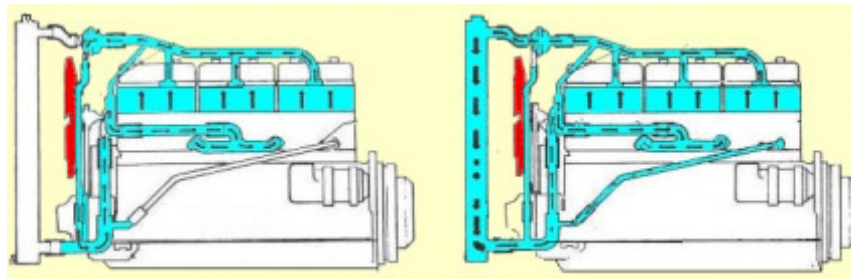


Figura 38: Válvula Termostática. Fonte³⁷

4.2 Sistema de admissão de ar

De acordo com o processo de alimentação de ar, o motor Diesel pode ser classificado como: de aspiração natural ou superalimentado.

Motor de aspiração natural é aquele que aspira o ar nas condições em que ele se encontra na atmosfera; ou seja, na pressão e temperatura que nós, seres humanos, aspiramos. Por sua vez, o motor superalimentado é aquele em que o ar aspirado da atmosfera é comprimido antes de ser enviado aos cilindros do motor. Essa compressão, na maioria das vezes, é feita por meio de um compressor rotativo acionado por uma turbina, como mostra a figura.

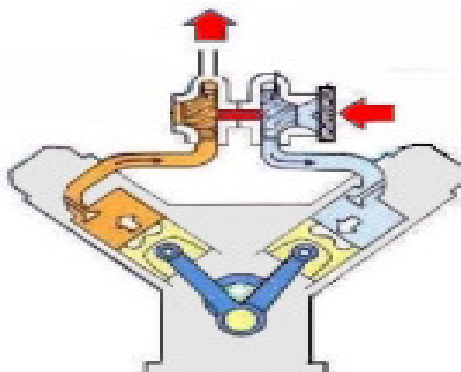


Figura 39: Princípio de funcionamento de uma Turbina mais compressor rotativo. Fonte³⁸

³⁷ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

³⁸ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

O conjunto formado por essas duas máquinas é denominado turbo compressor.

Quando esse dispositivo é usado, os motores superalimentados são também denominados de turbo-alimentados ou turbo carregados.

O turbo compressor é constituído de uma turbina e de um compressor rotativo, ambos de simples estágio, acionados por um mesmo eixo. Os gases de descarga do motor, atuando na roda empalhetada da turbina, fazem girar o eixo comum à turbina e ao compressor que é do tipo centrífugo. Assim, a turbina reaproveita uma parte da energia cinética contida nos gases de descarga do motor que seria perdida na atmosfera. Através de um filtro, o ar aspirado da atmosfera ambiente é comprimido no compressor rotativo. a finalidade da superalimentação é aumentar a potência do motor, sem aumentar consideravelmente o seu tamanho. É lógico que para que isso seja possível, as peças do motor precisam ser mais resistentes para suportar as maiores pressões e temperaturas de trabalho.



Figura 40: Turbina mais compressor rotativo. Fonte³⁹

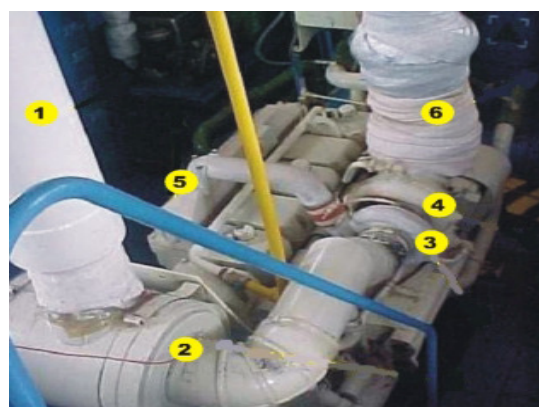


Figura 41: Motor com conjunto Turbina mais Compressor de ar. Fonte⁴⁰

- 1) tubo de sucção de ar; 2) filtro de ar; 3) compressor; 4) turbina;
5) resfriador de ar; e 6) coletor de gases de descarga

³⁹ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

⁴⁰ VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961

4.3 Magnetismo e Campo Magnético

Neste tópico, explicaremos o funcionamento e aplicações dos motores elétricos para o meio marítimo. Mas, para começar o estudo e entendimento de um motor elétrico, precisamos entender o princípio de magnetismo. A atração magnética entre certos materiais é uma propriedade física que sempre despertou interesse e que já era conhecida na antiguidade (cerca do século VII a.C.) em uma colônia grega chamada Magnésia, daí o nome magnetismo. Certas pedras que conhecemos como magnetita, ou simplesmente pedra ímã (do francês *aimant*, que quer dizer amante), exerciam forças de atração em pedaços de ferro, outras pedras e materiais à base de ferro em geral.

Durante muito tempo o magnetismo permaneceu como curiosidade. Uma aplicação prática de muita importância e muito antiga para o magnetismo é a bússola. Existem registros de que já era usada pelos chineses por volta do século VII. A bússola é um ímã que utiliza o magnetismo natural da terra para indicar os pólos Norte e Sul e, por isso, sempre foi importante para a navegação. Na Marinha usamos a expressão agulha magnética em vez de bússola, embora nem sempre a bússola tenha forma de agulha.

Hoje temos ímãs naturais e ímãs artificiais. O ímã natural é a magnetita ou pedra ímã. Sabemos que a magnetita é o tetróxido de ferro (Fe_3O_4) e que os óxidos de ferro, além do próprio ferro e compostos ferrosos em geral, apresentam importantes propriedades magnéticas. Os ímãs artificiais são fabricados com diversos formatos e com intensidade de magnetismo mais forte ou mais fraca, de acordo com a aplicação. Exemplos de aplicações para ímãs artificiais são alto-falantes, instrumentos de medidas elétricas (como amperímetros), motores e geradores elétricos. Uma bobina percorrida por corrente elétrica gera campo magnético e se comporta como um ímã, que chamamos eletroímã.



Figura 42: Bússola. Fonte⁴¹

⁴¹ EAD- Marinha do Brasil/DPC.

A propriedade mais importante, mais fácil de observar e que chama mais a atenção é a força de atração ou repulsão que os ímãs exercem entre si e também sobre o ferro e seus compostos. A atração ou repulsão entre dois ímãs depende de quais extremidades são colocadas próximas. Isso levou à denominação das extremidades dos ímãs de pólos norte e sul. Todo ímã tem pólo norte e pólo sul, que são os pólos magnéticos.

Pólos iguais se repelem, ou seja, o pólo norte de um ímã repele o pólo norte de outro ímã, o mesmo ocorrendo com o pólo sul.

Pólos diferentes se atraem, ou seja, o pólo norte de um ímã atrai o pólo sul de outro ímã e vice-versa.

4.4 Linhas de Campo

- Onde existe maior concentração (ou densidade) de linhas, o campo é mais forte.
- Uma bússola colocada dentro de um campo magnético se alinha tangencialmente à linha de campo no ponto em que se encontra

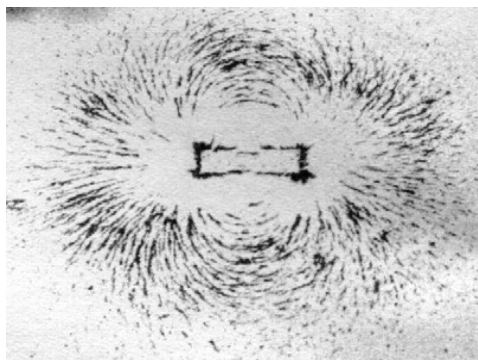


Figura 43: Linhas de campo. Fonte⁴²

4.5 A carga elétrica no campo magnético

Uma forma de definir o campo magnético é definir sua relação com a carga elétrica em movimento. Vale lembrar que o campo elétrico também foi definido a partir da relação entre força e carga elétrica:

⁴¹ EAD- Marinha do Brasil/DPC.

Campo elétrico

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$$

Campo magnético

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

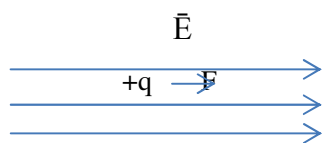
O assunto eletromagnetismo é muito, muito interessante, mas atenção especial tem que ser dada à matemática que está associada ao estudo desta matéria. A questão é que o campo magnético, suas forças resultantes de atração e repulsão e, conseqüentemente, o funcionamento de motores, geradores, transformadores, relés, bobinas, eletroímãs em geral, e muito mais, só pode ser compreendido com um mínimo de raciocínio abstrato, pois os campos elétrico e magnético se distribuem pelo espaço (em três dimensões) e são descritos matematicamente por vetores. Não se trata de complicar a matéria, mas usar ferramentas matemáticas sem as quais não dá para descrever o que está acontecendo com os campos. Imagine que você tem que executar uma tarefa simples (em tese): trocar uma peça em um motor.

4.6 Carga elétrica imersa em campo magnético

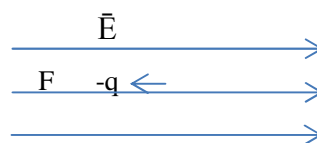
$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$ (o vetor força é igual ao produto da carga elétrica pelo vetor campo elétrico).

Força e campo são vetores, mas a carga é um número simples (uma grandeza escalar).

Todo vetor tem direção, sentido e módulo (a sua intensidade). A direção da força é a mesma do campo elétrico. O módulo tem valor igual ao produto da carga pelo campo ($\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$). O sentido depende do sinal da carga. Se a carga é positiva o sentido da força é o mesmo do campo e se a carga é negativa o sentido da força é o oposto ao do campo.



a) **Carga positiva** – Nesta carga o vetor força tem o mesmo sentido do vetor campo elétrico.



b) **Carga negativa** – nesta carga o vetor força sentido oposto ao do campo elétrico.

Figura 44: Vetor força em uma carga elétrica imersa em campo elétrico uniforme.

No caso da força em uma carga elétrica imersa num campo magnético, a situação merece um pouco mais de atenção.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}.$$

onde:

\vec{v} é o vetor velocidade da carga;

q é a carga;

\vec{B} é o vetor campo magnético.

A força é o resultado de um produto vetorial entre $\vec{q} \cdot \vec{v}$ e \vec{B} . O produto vetorial é um vetor (a força) com:

Direção: perpendicular ao plano definido pelos vetores \vec{v} e \vec{B} .

Módulo: a intensidade da força é o seu módulo que é calculado de acordo com a regra do produto vetorial.

$$F = q \cdot v B \sin \alpha$$

Onde:

q é o valor da carga elétrica em coulombs;

v é a velocidade da carga em m/s;

B é o valor do campo magnético em tesla (T);

α é o ângulo entre o vetor velocidade e o vetor campo magnético e $\sin \alpha$ é o seno deste ângulo.

Sentido: é dado pela regra da mão direita.

4.7 Motores Elétricos

As máquinas elétricas são equipamentos destinados à conversão eletromecânica de energia. Como o nome indica, são equipamentos que convertem energia mecânica em energia elétrica ou, vice-versa, energia elétrica em energia mecânica. Temos geradores, que recebem energia mecânica proveniente de um acionador (uma turbina hidráulica, a vapor ou a gás, um motor diesel ou a gasolina, um catavento, etc.) e geram energia elétrica para alimentar um determinado sistema elétrico (Furnas, Ribeirão das Lajes, uma base naval, um navio, um veículo, etc.).

Os motores fazem o contrário: recebem energia elétrica de um sistema e a convertem em energia mecânica para movimentar outros equipamentos (elevadores, guindastes, bombas hidráulicas, compressores, ventiladores, etc.), veículos e até embarcações (submarinos, por exemplo).



Figura 45: Exemplo de Motor elétrico. Fonte⁴³

Praticamente todos os equipamentos que utilizam energia elétrica para conversão em energia mecânica, ou vice-versa, têm os seus princípios de funcionamento assentados na interação entre circuitos elétricos através de campos magnéticos.

4.8 Máquina Elétrica Elementar

É evidente que um gerador, como foi mostrado no item anterior, teria muitos inconvenientes. Em primeiro lugar, para que o seu funcionamento fosse mais prolongado, o acionador teria que efetuar movimentos alternados do elemento gerador, o que não seria muito prático. O motor, então, não funcionaria por muito tempo. Vamos apresentar, inicialmente, duas alternativas para solução do problema. Na primeira, o campo, que passaremos a chamar também de campo principal, será mantido estacionário e vamos deslocar o(s) elemento(s) no seu interior; na segunda alternativa, é o campo principal que vai se movimentar, enquanto o(s) elemento(s) fica(m) estacionário(s).

Campo estacionário:

Nesta solução, o campo é mantido estacionário; vamos efetuar alteração no circuito magnético para dotar o elemento de movimento rotativo. Imagine um cilindro, capaz de ser

⁴³ EAD- Marinha do Brasil/DPC.

acionado no interior do circuito magnético, transportando o elemento na sua periferia. O circuito magnético agora é composto de uma parte fixa, que passa a receber a denominação de núcleo do estator, e de uma parte móvel, com o formato cilíndrico, também de material ferromagnético, que será o núcleo do rotor; observamos também dois entreferros.

O condutor elementar, agora assentado em ranhura longitudinal na periferia do núcleo do rotor (mais adiante veremos o porquê), será deslocado para a direita sob o pólo N, retornando para a esquerda sob o pólo S, e assim sucessivamente. Uma fonte de energia mecânica qualquer vai prover o movimento rotacional ao cilindro. A força eletromotriz gerada no elemento é alternada; mas isto não tem jeito. A distribuição das linhas de fluxo no entreferro agora merece uma reconsideração.

Devido ao formato curvo do entreferro, acompanhando grande parte da curvatura do rotor, a densidade de fluxo é praticamente uniforme nestes trechos, reduzindo quando se aproxima de um plano eqüidistante dos dois pólos, denominado plano neutro. A densidade de fluxo é praticamente uniforme nestes trechos, reduzindo quando se aproxima de um plano eqüidistante dos dois pólos, denominado plano neutro. As linhas de fluxo entram e saem do rotor perpendicularmente à sua superfície; por esta razão, os elementos do rotor, ao cruzarem o campo magnético, sempre o fazem perpendicularmente às linhas de fluxo.

Considerando positivo o fluxo emanado pelo pólo norte que entra no rotor, e negativo o fluxo que sai do rotor e entra no pólo sul, temos uma curva de densidade de fluxo na superfície do rotor semelhante à que se vê à direita da figura anterior. Ao ser acionado o rotor, o elemento vai cortar as linhas de fluxo perpendicularmente. Com o auxílio da regra da mão direita.

Anéis coletores, onde cada terminal da bobina é ligado a um anel, de material condutor (cobre), firmemente solidário ao eixo, mas isolado eletricamente dele. Os anéis, portanto, giram com o rotor. Sobre cada anel desliza, estacionária, uma escova de material condutor bem macio (carbono em pó prensado), para não desgastar o anel. As escovas levarão para o circuito exterior a tensão como foi gerada na bobina.

Como cada terminal é alternadamente positivo e negativo em relação ao outro, as escovas transferem para fora da máquina uma tensão alternada. Esta primeira máquina aqui apresentada já é um alternador real, embora bastante elementar. Alternadores de grande potência com campo estacionário e armadura no rotor não são encontrados.

Comutador – onde cada terminal da bobina é ligado a uma seção de um anel bipartido, também de material condutor (cobre), firmemente solidário ao eixo, mas isolado eletricamente dele. Tal componente é denominado, tradicionalmente, de coletor. As seções do anel, que recebem a denominação de teclas, são isoladas entre si. O coletor gira com o rotor. Sobre o coletor deslizam, estacionárias, duas escovas medida que o rotor gira, e os lados da bobina trocam de posição, as escovas estão sempre ligadas ao elemento que está na parte superior (ou na inferior), em determinado instante.

4.9 Geração da força eletromotriz

O enrolamento da armadura pode ser executado em anel ou em tambor. O enrolamento em anel só é utilizado para fins didáticos, por apresentar maior facilidade de visualização; por motivos já discutidos, sua aplicação industrial é comprometida. O enrolamento em tambor pode ser do tipo imbricado ou ondulado. Não existe muita diferença para o enrolamento em anel, em termos conceituais; portanto, é com este tipo de enrolamento que vamos iniciar esta análise do funcionamento de um gerador real.

Seja um estator com dois pólos; o enrolamento de campo, alimentado com CC por uma fonte externa, é percorrido por uma corrente I_f e introduz uma força magnetomotriz no circuito magnético, estabelecendo um fluxo magnético. Relembre o seu trajeto pelo rotor, estator e núcleos polares. Vamos supor que este rotor seja dotado de apenas 16 elementos e esteja sendo acionado a uma determinada velocidade (rotações por minuto), no sentido dos ponteiros.

Expressão da fem: O valor da fem gerada na armadura, em qualquer instante, é a soma das forças eletromotrizes instantâneas geradas em todos os elementos situados, neste instante, entre duas escovas. Quando o elemento atravessa o espaço sob um pólo, a sua fem varia de zero até um máximo, permanece com esse valor durante a maior parte do trajeto, e novamente se reduz a zero.

Do capítulo anterior obtivemos a expressão da força eletromotriz média gerada em um elemento quando se desloca entre duas escovas.

e médio = $P \Phi S/60$ onde S é a velocidade do gerador, medida em rotações por minuto (rpm), P é o número de pólos e Φ é o fluxo que entra ou sai da cada pólo. Se a armadura possuir Z elementos, distribuídos em P' caminhos em paralelo, cada caminho terá Z / P' elementos ligados em série, e a fem gerada entre duas escovas será: $E = (Z /$

$P') \cdot (P / 60) \Phi S$. Se cada elemento fizer parte de bobina com n voltas, a fem entre escovas será:

$E = (n Z P / 60 P') \Phi S$ Considerando que o termo entre parênteses é uma constante $K = n Z P / 60 P'$, relacionada com o induzido e o seu enrolamento, podemos simplificar a expressão da fem em uma máquina de CC; $E = K \Phi S$.

Circuito Elétrico: É a maneira mais adequada de tratar os problemas elétricos. Uma vez conhecidos os diversos parâmetros da máquina, como ela é excitada e como gera força eletromotriz, podemos colocar tais componentes em um circuito, de forma que possamos analisar o seu comportamento sem que precisemos acioná-la.

Auto excitação: O gerador que temos utilizado até agora, por ter o seu campo alimentado por uma fonte externa, é denominado gerador com excitação separada. Se utilizarmos parte da energia produzida na armadura para prover a excitação da máquina, teremos o que se denomina gerador auto-excitado. Isto, entretanto, só é possível se o circuito magnético do gerador for capaz de permanecer com um magnetismo residual após ser desligado.

Gerador Shunt: onde ligamos o circuito de campo ao circuito da armadura e acrescentamos um reostato R_r (que, conforme veremos, servirá para controlar a corrente de excitação e, conseqüentemente, a tensão gerada). Com o fechamento de sw, teremos uma malha fechada em que vai circular uma corrente $I_f = E / (R_a + R_f + R_r)$. O que está produzindo essa corrente é a força eletromotriz, que é função dessa mesma corrente, responsável pela força magnetomotriz para produzir o fluxo necessário. É a própria Curva de Saturação do gerador, no lado direito da malha, também chamado de circuito gerador. $E = f(\Phi, S) = f(I_f, S)$. Do lado esquerdo da malha temos o circuito de campo, também chamada Curva de Resistência de Campo $I_f = V / (R_f + R_r)$. Finalmente, podemos ainda retirar do circuito uma relação entre V e E : $V = E - I_f R_a$ Como I_f e R_a são muito pequenos, V e E são praticamente iguais. Vamos efetuar um acompanhamento gráfico do que deve estar ocorrendo ocorrer nos circuitos gerador e indutor. Para isto, colocaremos a curva de saturação ($E = f(I_f)$) e a curva de resistência do circuito de campo ($I_f = f(V)$) prontas para figurarem no mesmo gráfico, o que acontecerá ao ser fechada a chave sw.

Geradores Compound - Existem também geradores com excitação composta (ou gerador compound), que possuem as duas formas de excitação.

Como o campo shunt deve consumir apenas uma pequena parcela da energia gerada pela armadura, ele deve ser construído com muitas voltas de fio fino, o que lhe irá conferir

uma alta resistência, e será percorrido por uma corrente I_{sh} muito pequena. A fmm $N_{sh}I_{sh}$ do campo shunt, entretanto, será bem alta. O campo série, por sua vez, como será percorrido por uma corrente bem mais alta, deve oferecer pouca resistência à passagem desta corrente; por isto deve ser construído com poucas voltas de fio grosso. A sua fmm $N_s I_s$, apesar de poucas voltas, não será pequena. Os geradores série e compound serão analisados com maiores detalhes quando estudarmos a máquina sob carga.

Controle da Tensão Gerada: Qualquer gerador, seja de CC ou CA, é uma máquina que transforma grande quantidade de energia, na maioria das vezes, em uma razão bem elevada. Não há como não se preocupar quando conduzimos uma instalação que envolve potência da ordem de MW. Imagine um gerador shunt: analisando o gráfico através do qual foi descrito o processo de auto-excitação dessas máquinas, observamos que a Curva de Saturação ($E = f(I_f)$) e a Curva de Resistência de Campo ($I_f = f(V)$) podem se cruzar em outros pontos. Basta que: a) seja variada a velocidade S : a curva $E = f(I_f)$ se modifica, subindo ou descendo, e corta a curva de Resistência de Campo acima ou abaixo, aumentando ou diminuindo E_o (força eletromotriz gerada sem carga ainda sobre o gerador).

A Máquina sob carga: Até agora temos analisado o gerador de CC sem que ele tenha cumprido a sua função principal, que é transformar energia mecânica em energia elétrica. Exceto em geradores shunt, onde a armadura gera uma pequena corrente para prover a sua própria excitação, temos apenas observado uma ddp nos seus terminais, evidência de que há uma força eletromotriz sendo gerada. O gerador não alimentou ainda cargas elétricas e, portanto, nenhuma corrente está sendo debitada.

$$V = E_o - I_a R_a = K \Phi \omega$$

Vamos utilizar inicialmente um gerador com excitação separada.

Gerador shunt auto-excitado - Até agora nos referimos a geradores com excitação separada; para o nosso modelo se tornar auto-excitado, teremos que efetuar alterações no circuito e nas fórmulas. Em um gerador shunt, teremos: $V = E - I_a R_a$, $I_f = I_{SH} = V / (R_r + R_{SH})$, $I_a = I_{SH} + I$

Gerador shunt alimentando carga.

No gerador shunt o fluxo ainda sofre uma alteração quando a carga aumenta.

Observando-se o circuito elétrico e as fórmulas, conclui-se que a corrente de campo, que passou a ser produzida pela própria armadura, diminui se a tensão terminal diminuir. E é o que vai acontecer, provocando uma variação do fluxo devido à variação de I_f ($\Delta \Phi \Delta I_f$) e, conseqüentemente, da fem:

$$E = K (\Phi_0 - \Delta\Phi_{RA} - \Delta\Phi_{\Delta I F}) S$$

A tensão terminal sofre uma redução adicional em relação ao gerador com excitação separada sem campo série (curva A)). A partir de certo ponto, além do valor nominal da corrente, essa redução se acentua.

$$\text{Gerador shunt : } V = E - I_a R_a$$

$$I_f = I_{SH} = V / (R_R + R_{sh})$$

$$I_a = I_{SH} + I$$

Gerador Série – Imagine agora um gerador que só tenha o campo série, Se o circuito da armadura estiver aberto, sua tensão terminal será muito baixa, devida apenas ao magnetismo residual. Ao ser fechado o circuito da armadura e aplicada uma carga, ele se auto-excita, como se fosse um gerador shunt. A grande diferença é que, apesar da alta corrente, o fluxo gerado pelo campo série não é tão grande como seria pelo campo shunt, e a R_A terá uma influência mais acentuada sobre a tensão terminal e a corrente desta máquina.

$$E = K (\Phi_{res} + \Phi_S - \Delta\Phi_{RA}) S$$

Enquanto os outros tipos de gerador são avaliados pela capacidade de manter a tensão terminal com o aumento da carga (corrente), o gerador série deve manter a corrente com aumento da carga (tensão terminal). Por este motivo o gerador série é chamado de gerador de corrente constante. Como a tensão terminal é baixa e a corrente debitada é alta, depreende-se que a resistência da carga varia entre zero (curto-circuito) e pequenos valores.

CAPÍTULO 5

MOTORES DE CC

Vimos, anteriormente, que ao se colocar carga em um gerador de CC, surge uma corrente na armadura, devido ao fechamento do seu circuito. A origem desta corrente é a fem desenvolvida na armadura; uma das conseqüências é o efeito motor que se desenvolve na armadura, que produz um torque T_r contrário ao movimento do gerador. As partes móveis de um sistema de geração: uma máquina de CC, na função de gerador, acionada por uma turbina, através de engrenagem redutora.

O efeito motor pode ser utilizado, nesta mesma máquina, para produzir energia mecânica, se a sua armadura receber energia elétrica de uma fonte externa. Nestas condições, a máquina vai exercer as funções de motor e ficará capacitada a acionar uma carga mecânica como, por exemplo, um guincho ou um guindaste.

5.1 Motores Síncronos

Da mesma forma que um gerador de CC pode funcionar como motor, e vice versa, o Motor Síncrono nada mais é do que um Alternador funcionando como motor. Esta situação é muito comum quando dois alternadores estão em paralelo e um deles ainda está sem carga; se o seu acionador tem a sua potência reduzida por qualquer motivo, ele passa a receber energia e desenvolve torque próprio, funcionando como motor, na velocidade síncrona. Nesta condição dizemos que tal alternador está sendo “arrastado” pelo outro.

DESCRIÇÃO: Mas é também um motor trifásico, com o estator igual a um motor de indução trifásico, e um rotor igual ao de um alternador. Por tais motivos, e se o leitor já possuir algum conhecimento de alternadores e de motores de indução, acreditamos poder dispensar uma apresentação mais detalhada deste motor, pois seria redundante, e ir direto ao seu funcionamento.

FUNCIONAMENTO: Pelas razões acima apresentadas, podemos compreender o funcionamento do Motor Síncrono de duas maneiras: partindo de um alternador em paralelo com outro, ou de um motor de indução.

A) Dois alternadores em paralelo - Na figura abaixo, vemos dois alternadores em paralelo perfeito, com tensões geradas iguais ($E_1 = E_2$), sem carga elétrica, e os respectivos acionadores. Como estão sem carga, o torque resistente que cada alternador

oferece ao seu acionador é devido às perdas mecânicas (atrito e ventilação, porque estão girando) e magnéticas (histerese e correntes parasitas, porque estão excitados). Não há corrente entre eles pois, no circuito comum, E_1 e E_2 se anulam. Se o acionador do alternador 2 for retirado, o que corresponderia a uma redução radical da potência fornecida pelo seu acionador, como mostrado na figura abaixo, haverá uma tendência de o alternador 2 cair de velocidade em relação ao alternador 1, provocando uma defasagem entre E_1 e E_2 . Dois alternadores em paralelo perfeito, sem carga, um deles tem o seu acionador desligado. A diferença de fase entre as tensões geradas faz surgir, no circuito comum, uma corrente I_0 tal que $I_0 = (E_1 - E_2) / 2Z_a$. Tal corrente é muito indutiva, devido às impedâncias internas de cada alternador, atrasando-se de quase 90° em relação à $(E_1 - E_2)$. Entretanto, podemos ver que ela está quase em fase com E_1 , o que significa que o alternador 1 aumentou a sua potência debitada, assumindo certa carga. $P_1 = E_1 I_0 \cos (E_1 - I_0)$. Esta mesma corrente está defasada de cerca de 180° em relação a E_2 , significando que o alternador 2 está “debitando potência negativa”, ou seja, está recebendo energia e funcionando como motor. $P_2 = E_2 I_0 \cos (-E_2 - I_0)$. A sincronia será mantida, pois o alternador 2, agora promovido a motor síncrono, gera o próprio torque para vencer as suas perdas, alimentado pelo alternador 1. O torque resistente oferecido pelo alternador 1 agora é maior, pois quem fornece a energia para acionar as duas máquinas é o seu acionador. Um motor, na realidade, em situação normal, recebe alimentação de um sistema elétrico, cuja geração pode estar a milhares de quilômetros. Assim, ao invés de analisar o funcionamento do motor síncrono junto a um alternador, devemos considerar a tensão V fornecida pelo sistema.

5.2 Motor de Indução

Alguns aspectos do funcionamento do motor síncrono são mais bem compreendidos se chegarmos a ele através de um motor de indução. Embora a explicação que se segue deva ser suficiente. Imagine um motor de indução, como mostrado abaixo, em cujo rotor gaiola-de-esquilo selecionamos alguns elementos. Não há carga no eixo; somente as perdas internas (mecânicas e magnéticas). O motor está dando partida, seu estator acabou de ser alimentado e já produz um campo girante.



Figura.46: Motor Elétrico. Fonte⁴⁴

No instante mostrado, em que o fluxo produzido pelo estator, girando à velocidade síncrona, passa sobre os elementos no sentido dos ponteiros do relógio, indicamos também a direção das fem geradas nos elementos. O fluxo produzido pelo rotor, mesmo estando ainda parado, acompanha o fluxo do estator na velocidade síncrona, o rotor ainda está parado, a altíssima corrente que vai circular nos elementos do rotor produzirá um fluxo (Φ_R) para a direita, enquanto o fluxo (Φ_S) produzido pelo estator já terá se deslocado da direção vertical. A defasagem entre a tensão gerada nos elementos e a corrente é devida à indutância dos elementos, cuja reatância é alta na partida (enquanto o rotor ainda está parado).

O fluxo produzido pelo rotor, mesmo estando ainda parado, acompanha o fluxo do estator na velocidade síncrona, tendência do rotor (que está livre para girar) é de se alinhar ao campo do estator, produzindo um momento (torque) que pode ser representado por $TP = K \Phi_S \Phi_R \text{sen}(\Phi_S - \Phi_R)$. Este torque faz com que o motor parta, já que $TP > TR$, e acelere. À medida que ganha velocidade, a fem gerada nos elementos do rotor diminui. Como não há carga no eixo ($TR = 0$) e somente cargas internas, o rotor atinge quase a velocidade síncrona, onde a fem gerada e a corrente nos elementos do rotor são praticamente nulas.

Assim, o fluxo Φ_R é praticamente nulo e, apesar da defasagem entre Φ_S e Φ_R ser quase 90° (o que corresponde a uma defasagem quase igual a zero entre a tensão gerada e a corrente no rotor), o TP é também é quase igual a zero. $TP = K \Phi_S \Phi_R \text{sen}(\Phi_S - \Phi_R)$.

⁴⁴ EAD- Marinha do Brasil/DPC.

5.3 Aplicações

O motor síncrono é um motor de velocidade constante, qualquer que seja o valor da carga (até um certo limite, é lógico). É, portanto, utilizado para acionar máquinas que necessitam de velocidade uniforme (como, por exemplo, ferramentas de corte em que a qualidade do produto se relacione com a velocidade de avanço da ferramenta empregada) e máquinas de grande potência. Uma outra aplicação importante de MS é na correção do fator de potência de instalações elétricas, como se fosse um capacitor colocado em paralelo com outras cargas, normalmente muito indutivas. Se o MS já estiver com a aplicação anterior, basta que o operador do sistema (ou da máquina) controle (manual ou automaticamente) a sua excitação de modo que o fator de potência da instalação fique sempre próximo do ideal.

Os destroyers do Tipo 45 terão uma configuração de dois eixos propulsores, cada eixo associado a um conjunto gerador e turbina a gás, na praça de máquinas de vante, e conversor de potência e motor elétrico de indução, na praça de máquinas de ré. A turbina a gás marítima Rolls Royce/Northrop Grumman WR-21, baseada na família “Trent” de turbinas de aviação comercial da Rolls Royce, é o cume de um programa de desenvolvimento de nove anos, de 480 milhões de Dólares, financiados pelas Marinhas dos EUA, do Reino Unido e da França. Cada turbina a gás, com potência de 25 MW, alimentará um alternador síncrono de 21 MW, gerando corrente alternada para alimentar o conversor de potência.

A empresa “ALSTOM Power Conversion” foi selecionada para fornecer o restante da arquitetura do sistema elétrico integrado de força e propulsão, com valor estimado para os três navios iniciais da ordem de 64 milhões de Dólares. O escopo de fornecimento inclui os conversores de potência tipo Moduladores de Largura de Pulso e motores de indução avançados de 20 MW.

A configuração simplificada do sistema da propulsão é apresentada na figura 39.

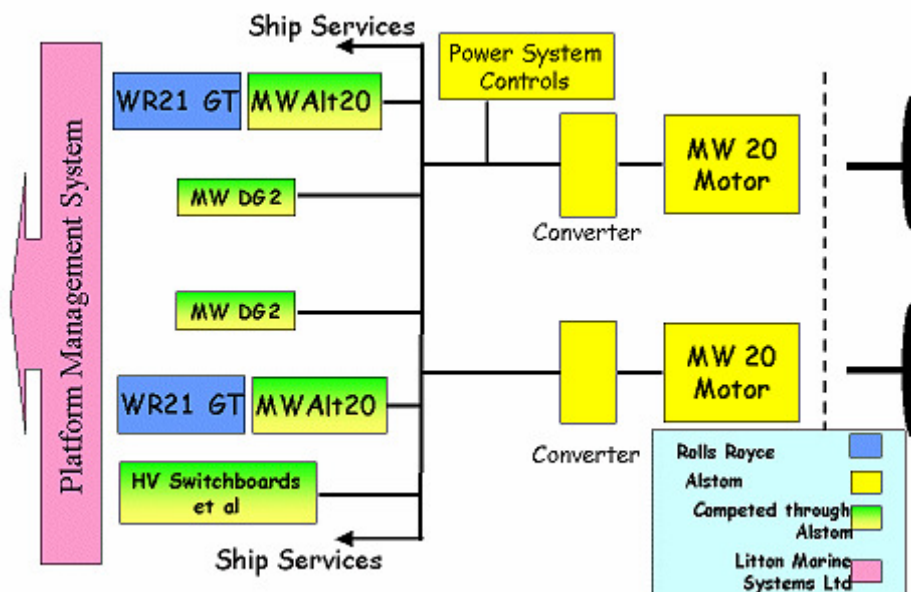


Figura 47 : Tipo 45 – Diagrama simplificado de linha (Voyce, 2002). Fonte⁴⁵

Como o diferencial deste sistema são os componentes elétricos, serão detalhadas, a seguir, as características dos principais equipamentos, que são os conversores e os motores de propulsão.



Figura 48: Destroyer Tipo 45. Fonte⁴⁶

⁴⁵ <http://www.naval-technology.com/projects/horizon/>; acesso em junho de 2006.

⁴⁶ <http://www.naval-technology.com/projects/horizon/>; acesso em junho de 2006



Figura 49: Motor de Indução Avançado (AIM). Fonte⁴⁷

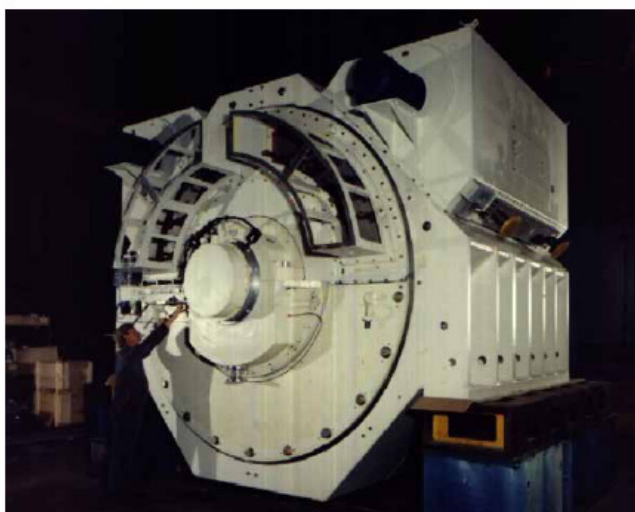


Figura 50: Motor de Indução Avançado (AIM) comparado a uma pessoa. Fonte⁴⁸

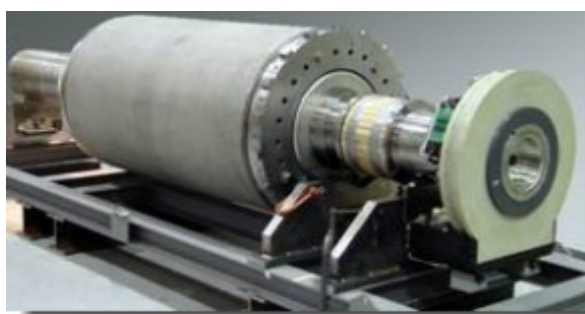


Figura 51: Motor Síncrono com material supercondutor em alta temperatura. Fonte⁴⁹

⁴⁷ SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C., 2002, "Direct Drive Marine Propulsion Motors", *ICEM Conference*, Brugge

⁴⁸ SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C., 2002, "Direct Drive Marine Propulsion Motors", *ICEM Conference*, Brugge

⁴⁹ SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C., 2002, "Direct Drive Marine Propulsion Motors", *ICEM Conference*, Brugge



Figura 52: Motor HTSAC (5 MW – 230 rpm). Fonte⁵⁰

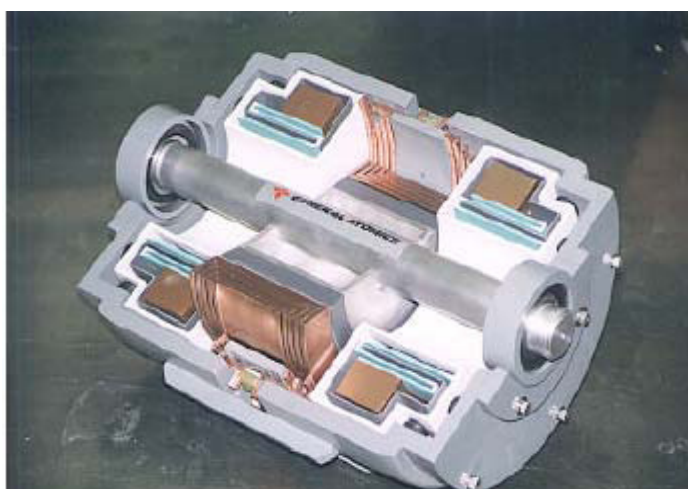


Figura 53: Protótipo do Motor Homopolar com Material Supercondutor em CC. Fonte⁵¹

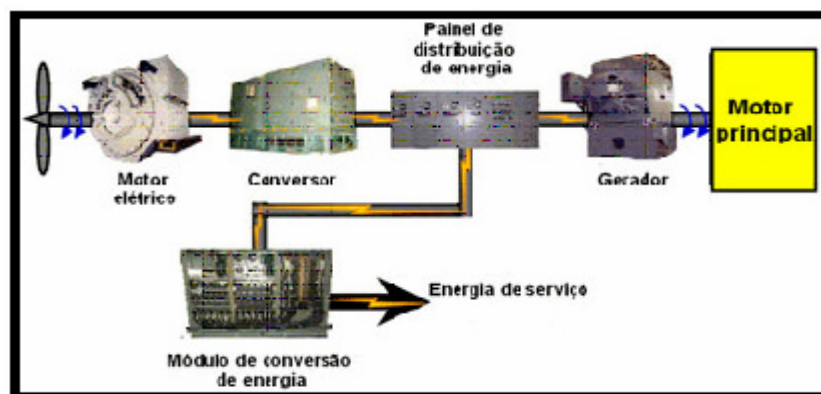


Figura 54: Sistema de Aacionamento Elétrico Integrado. Fonte⁵²

⁵⁰ SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C., 2002, “Direct Drive Marine Propulsion Motors”, *ICEM Conference*, Brugge.

⁵¹ SMITH, S., WILLIAMSON, S., HODGE, C., 2002, “Direct Drive Marine Propulsion Motors”, *ICEM Conference*, Brugge.

⁵² PEREIRA, N., N., BRINATI, H., L., 2006, “Estudo do Impacto da Propulsão Diesel-Elétrica Na Emissão de Gases Poluentes”,

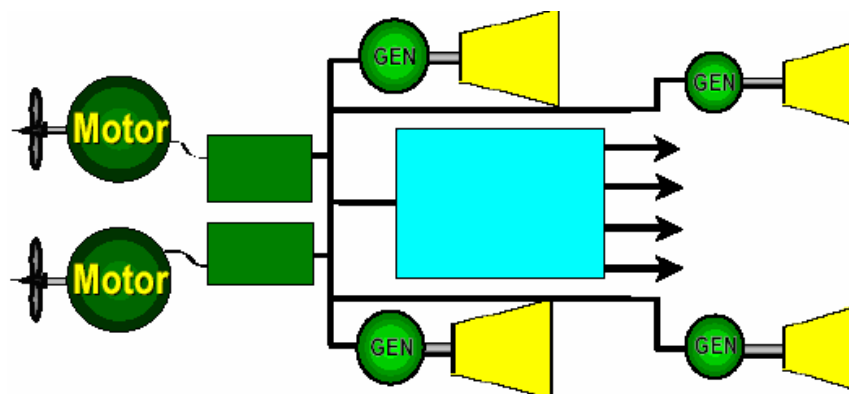


Figura 55: Diagrama em blocos de um Sistema de Propulsão Elétrica. Fonte⁵³

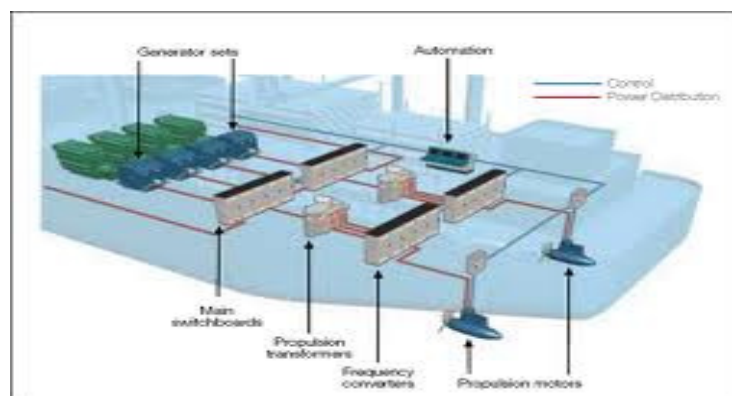


Figura 56: Configuração do Sistema Elétrico. Fonte⁵⁴

5.4 Motores de Indução Trifásicos

Uma das razões para a extensa aplicação da corrente alternada na conversão eletromecânica de energia é a existência do motor de indução. São máquinas simples e robustas, que aliam uma alta performance a uma manutenção barata para acionar a grande maioria dos mecanismos que não necessitam de apurado controle de velocidade, tais como ventiladores, bombas, compressores, guinchos, guindastes, elevadores, etc.

Neste capítulo vamos apresentar o funcionamento dessas máquinas e dos métodos de partida e controle de velocidade, procurando criar condições para compreendermos os critérios de seleção de motores de indução para as diversas aplicações.

⁵³ ALVES, RENATA NUNES Propulsão Elétrica de Navios RJ.

⁵⁴ ALVES, RENATA NUNES Propulsão Elétrica de Navios RJ.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: Motores de Indução (MI) um disco de material condutor não magnético, livre para girar em torno de um eixo, sofre a influência de um ímã permanente que gira sobre ele, sem tocá-lo, em torno de um eixo coincidente com o seu eixo.

O resultado é que o disco também gira, a uma velocidade menor que a do ímã. A explicação é simples: considerando um elemento radial do disco, com comprimento l , e analisando a ação do campo magnético B se deslocando transversalmente sobre ele a uma velocidade v , vamos concluir que neste elemento deve surgir uma força eletromotriz $e = Blv$. Na figura 8.2(a), supondo o pólo sul do ímã permanente se deslocando para a esquerda, a uma velocidade v , é como se o elemento se deslocasse para a direita, atravessando o campo magnético com a mesma velocidade v . Estator: O estator de um motor de indução trifásico é semelhante ao de um alternador.

Embora no seu projeto não persistam preocupações com os fatores de passo e de distribuição, as outras regras permanecem: os elementos são colocados em ranhuras, as ligações entre os elementos podem ser em anel, imbricado, ondulado ou espiral, etc.

O estator do alternador, quando passa a alimentar uma carga, produz um campo girante (Reação da Armadura); o enrolamento do estator do motor de indução vai produzir fluxo magnético girante tão logo é alimentado. Este fluxo, cuja direção vai mudar continuamente como se fosse o ímã da experiência anterior girando a uma alta velocidade, é também denominado campo girante. Para produzi-lo.

O estator do motor de indução trifásico possui três enrolamentos distintos, que poderão ser ligados à linha trifásica em estrela ou em triângulo. Vemos abaixo duas formas de se representar a ligação em estrela dos enrolamentos do estator.

Enrolamento do Estator: Embora possa facilitar a apresentação do campo girante em um motor de indução, a utilização de enrolamentos concentrados em torno dos núcleos de peças polares não favorece o desempenho do motor, bem como a sua relação potência/peso fica muito reduzida. Podemos observar, na comparação entre as figuras abaixo, que se obtém o mesmo efeito se forem utilizados enrolamentos distribuídos no núcleo do estator, embora não seja usual em máquinas de dois pólos, com os lados de bobina instalados em ranhuras.

Enrolamento do Rotor: O rotor de um motor real guarda algumas semelhanças com o disco da experiência; também no seu enrolamento deverão ser induzidas forças eletromotrizes e geradas correntes para produzir forças mecânicas. Um rotor cilíndrico (ao

invés de um disco), construído com material ferromagnético (para fazer parte do circuito magnético), em lâminas justapostas e isoladas entre si (para reduzir as perdas por correntes parasitas), possui ranhuras no sentido axial.

Nestas ranhuras são instalados os elementos condutores onde serão geradas, por indução provocada pelo deslocamento do campo girante, forças eletromotrizes, correntes e desenvolvido o torque que fará com que o rotor se movimente. **FORMAÇÃO DO TORQUE:** Para descrever como se forma o torque em um motor de indução real, vamos utilizar um rotor do tipo Gaiola de Esquilo, onde todos os elementos geradores de torque são curto-circuitados nas extremidades.

Descrição: Na partida do motor, ao ser alimentado o enrolamento do estator (de P pólos) com uma tensão alternada (de frequência f), um campo magnético passa a se deslocar, conforme já vimos, em torno do rotor a uma velocidade $N_s = 120f/P$. Na figura abaixo estão mostrados os vetores representativos do campo girante sobre os elementos do rotor e da velocidade relativa de cada um; o rotor ainda está parado.

5.5 Tipos de Rotor

Já vimos que existem, basicamente, dois tipos de rotor: o rotor gaiola de esquilo (GE) e o rotor bobinado, que já foram apresentados de maneira superficial.

Um rotor GE, além de ter a sua técnica de fabricação mais simples em relação a todos os outros tipos de rotor (aí incluídos até os de máquinas de CC), uma vez concluído, pode ser instalado em um estator de qualquer número de pólos, ao contrário do rotor bobinado. Outros detalhes de construção, também influem bastante no desempenho dessas máquinas:

- a) o material com que são confeccionados os elementos do rotor interfere no valor de R_2 ;
- b) o diâmetro dos elementos também modifica R_2 ;
- c) a posição dos elementos no interior da ranhura influencia o valor de X_2 : quanto mais profunda, maior a reatância do rotor;
- d) a forma das ranhuras: quanto mais fechadas ou profundas, maior a reatância X_2 .

Para efetuarmos uma comparação justa entre os diversos tipos de rotor, vamos considerar que:

a) todos os estatores são iguais. Isto quer dizer que todos possuem aproximadamente a mesma potência;

b) todos os rotores possuem as mesmas dimensões e o mesmo número de ranhuras;

Os tipos de rotor recebem uma classificação adicional, atribuída por entidades organizadoras de normas técnicas (NEMA, ABNT, etc.), que os relaciona às diversas aplicações.

Rotor Gaiola de Esquilo de baixa resistência (classe A)

Possui um torque de partida não muito alto, cerca de 150% do seu torque nominal, com uma alta corrente na partida; possui boa regulação de velocidade e é, devido à forma de construção, um rotor que pode ser considerado barato. Como possui baixa resistência, também apresenta bom rendimento. Suas curvas de torque e corrente estão apresentadas abaixo.

5.6 Controle de Velocidade

Os motores de indução trifásicos são máquinas de velocidade aproximadamente constante; entre a situação de sem carga e a da carga nominal, a velocidade varia muito pouco, como se pode observar na sua fórmula $N_R = N_S (1-s) = (120 f / P) (1-s)$.

Se desejarmos modificar a sua velocidade, quando aciona certa carga, os recursos são escassos, restritos aos parâmetros presentes na sua fórmula, ou seja, a frequência (f) o número de pólos (P) (estas duas alterando a velocidade síncrona) e o deslizamento (s). I – Alteração da frequência (f) - como a alimentação é por frequência industrial (50 ou 60 H2), não haveria como alterar este parâmetro, a não ser com o auxílio de dispositivos eletrônicos, como retificadores e inversores.

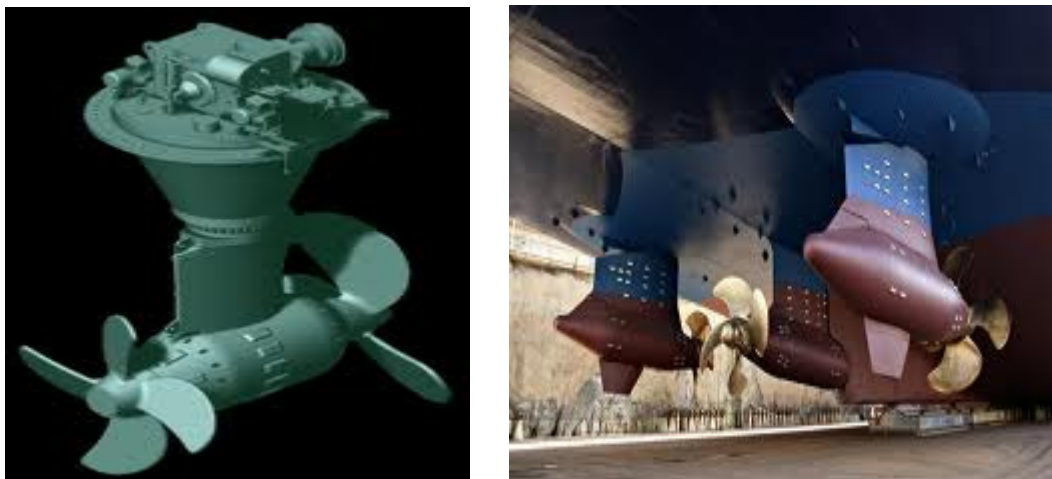


Figura 57: Propulsores elétricos. Fonte⁵⁵

5.7 Pilhas e Acumuladores

Ao longo deste trabalho abordamos os tipos de propulsão, motores de combustão e motores elétricos, que fazem uso de fontes de tensão contínua. Então, entra ao importância das Baterias e acumuladores, que são exemplos de fonte de tensão contínua. Uma reação química interna produz energia elétrica, formando uma força eletromotriz (fem). A fem produz uma tensão final nos terminais da bateria que chamamos simplesmente de ddp (diferença de potencial).

A invenção foi feita pelo físico italiano Alessandro Volta e, em sua homenagem, a unidade de medida de fem (e ddp) é o volt.

As baterias são formadas por duas ou mais unidades de produção de tensão, que são as células voltaicas ou pilhas. Cada célula é formada basicamente por dois eletrodos de diferentes tipos de metal, imersos em um eletrólito, que é uma solução contendo íons. Isto é fácil de se obter. O sal comum (sal de cozinha) é um composto químico de cloro e sódio: o cloreto de sódio. Dissolvido em água, o cloreto de sódio se divide em íons positivos (sódio) e íons negativos (cloro). Existem muitos outros exemplos de soluções que contêm íons.

A reação química entre os eletrodos e o eletrólito produz a tensão. Quando o eletrólito é líquido, temos a pilha úmida. Quando o eletrólito é em forma de pasta ou gel, temos a pilha seca. Uma experiência simples é usar suco de limão como eletrólito e um pedaço de cobre e um de zinco como eletrodos. Pode ser feita, usando um limão ou um

⁵⁵ APMA/Hidrodinâmica CIAGA - RJ

copo com suco de limão. Água salgada também serve como eletrólito. Íons do eletrólito reagem com os eletrodos de metal. O zinco receberá íons negativos, tornando-se o terminal negativo. O cobre irá se tornar o terminal positivo. Outra possibilidade é usar uma moeda ou outro objeto de prata como um dos eletrodos, papel toalha embebido com suco de limão como eletrólito e uma fita de magnésio como o outro eletrodo. A prata fica positiva e o magnésio fica negativo. Se um condutor for colocado (externamente) entre os eletrodos, irá circular uma corrente de íons através do eletrólito e uma corrente de elétrons através do condutor. Se conectarmos duas ou mais células em série, formaremos uma bateria, onde a tensão total será a soma das tensões das células. As células podem ser classificadas como primárias ou secundárias.

Células primárias são aquelas que não podem ser recarregadas.

Quando a tensão diminui muito, em virtude do esgotamento da energia armazenada, não é possível recolocar energia por meio da inversão da reação química. Exemplos de pilhas primárias são as que usamos comumente em lanternas e rádios portáteis. Essas pilhas são descartáveis. Células secundárias são aquelas que podem ser recarregadas (acumuladores). Nesse tipo de célula, o eletrólito pode retornar às condições originais.

A recarga é uma reposição da energia armazenada, que é realizada fazendo-se passar uma corrente elétrica no sentido inverso ao que a célula produz quando está sendo usada para alimentar um circuito elétrico. Os tipos mais comuns de baterias são:

Bateria chumbo-ácido: É formada pela associação série de células chumbo-ácido, onde cada célula possui eletrodos de chumbo (peróxido de chumbo para o eletrodo positivo e chumbo esponjoso para o eletrodo negativo) e o eletrólito é uma solução de ácido sulfúrico diluído em água. Cada célula gera um pouco mais de 2V. É comum associar seis células para produzir uma tensão um pouco acima de 12V. Este tipo de bateria é muito usada em automóveis e embarcações como lanchas, veleiros e navios. Estes últimos costumam usar várias baterias chumbo-ácido em conjunto. Estas baterias são secundárias, ou seja, são recarregáveis. De fato, sempre que o motor está ligado, um alternador que fica acoplado ao eixo do motor está gerando tensão alternada, que é retificada (transformada em tensão contínua) e empregada para recarregar as baterias.

Quando estão com carga plena, podem fornecer corrente elétrica de elevado valor, como as que são necessárias para a partida dos motores de combustão interna (centenas de ampères). Quando usadas com o motor desligado, as baterias não estão em recarga e se

forem usadas durante muito tempo, podem descarregar completamente. Mesmo que apenas parcialmente descarregadas, é possível que não possam fazer partir um motor.

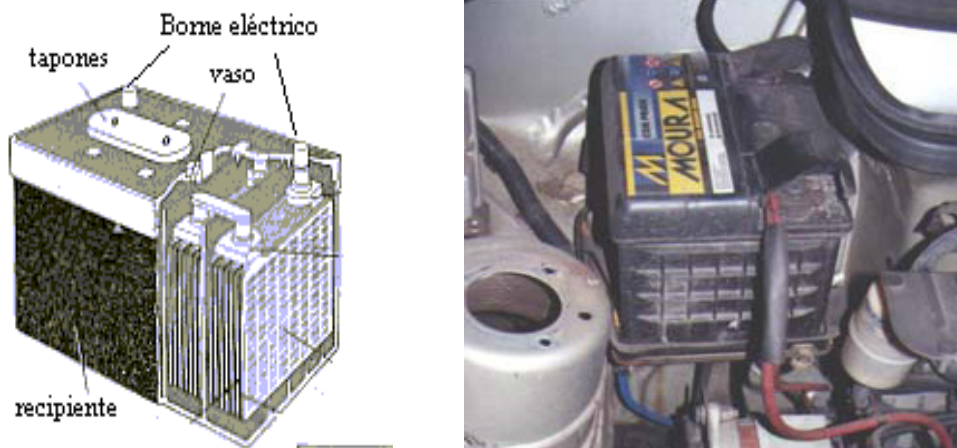


Figura 58: Baterias. Fonte⁵⁶

5.8 O hidrogênio

O Hidrogênio será a próxima transição energética. Com a entrada do hidrogênio no sector energético de alguns países, avizinha-se uma nova Era para a energia, que terá uma contribuição importante para a diversificação energética. A comunidade internacional reconhece o hidrogênio como o componente-chave de um sistema energético limpo e sustentável, utilizado como vetor energético nos sectores elétrico, industrial, comercial, residencial e transportes.

O hidrogênio é produzido através de tecnologias limpas, como a eletrólise a partir das energias renováveis ou da energia nuclear, ou através do *reforming* dos combustíveis fósseis, com a captura do dióxido de carbono (ver caixa). O hidrogênio é depois armazenado, transportado através de caminhões ou gasodutos e utilizado em pilhas de combustível, turbinas ou motores para produzir eletricidade ou para utilização direta no sector dos transportes.

⁵⁶ EAD Marinha do Brasil /DPC Ensino Profissional Marítimo.

A produção do hidrogênio:

O hidrogênio não existe na Natureza no seu estado molecular. Encontra-se na composição de algumas matérias como o gás natural (aproximadamente 95% do gás natural é constituído por metano – CH₄), a biomassa (celulosa), os hidrocarbonetos (carvão, petróleo) e a água.

Todos os métodos de produção de hidrogênio estão baseados na sua separação a partir dos materiais que o contêm. Existem vários processos desenvolvidos e em fase de comercialização, e outros em desenvolvimento. Atualmente, são utilizados dois métodos primários de separação: o térmico e o químico. Um terceiro método, o biológico, está em fase de desenvolvimento. Na Europa, 95% do hidrogênio é extraído do gás natural (cerca de 8 milhões de toneladas anuais), através do *reforming* do vapor de metano – processo térmico. Em menor quantidade, a Europa produz o hidrogênio eletroquimicamente a partir da água, quando é necessário hidrogênio de maior pureza. Este processo, denominado eletrólise da água, faz passar uma corrente elétrica através da água, separando o hidrogênio e o oxigênio.

A eletricidade necessária a este processo pode provir de qualquer uma das energias renováveis (vento, sol, geotermia, energia nuclear e hidráulica). As tecnologias de exploração das energias renováveis, como os aerogeradores, podem gerar eletricidade para produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água, sem qualquer emissão de gases de efeito de estufa.

Uma das grandes vantagens do hidrogênio é a capacidade de ser produzido a partir de um vasto leque de recursos energéticos e matérias-primas, permitindo a cada país ou região utilizar os que mais se adequem à sua realidade. Para as Regiões da Macaronésia, que possuem um elevado potencial em energias renováveis endógenas e têm constrangimentos económicos associados ao sobre custo das importações, a eletrólise apresenta-se com um método interessante para a produção de hidrogênio.

5.9 Distribuição de hidrogénio

Em certas regiões da Europa existe uma rede de distribuição de hidrogênio para a indústria da refinaria. Frequentemente as centrais de produção transportam o hidrogênio através de caminhões cisterna para os utilizadores industriais finais. À medida que a procura do hidrogênio vai aumentando, a indústria responderá construindo expandindo a

rede de distribuição, transporte e abastecimento, utilizando tecnologias modernas para a construção dessas infraestruturas.

CAPÍTULO 6

UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO

A pilha de combustível é uma tecnologia de conversão da energia química em energia eléctrica, que utiliza, entre outros combustíveis, o Hidrogénio. O princípio da pilha de combustível baseia-se no processo eletroquímico que combina diretamente o hidrogénio com o oxigénio do ar, a uma temperatura da ordem dos 100 a 400°C, produzindo eletricidade e vapor de água. Para além de ser um processo de produção de eletricidade livre da emissão de elementos poluentes, as pilhas de combustível são silenciosas e podem alcançar eficiências duas a três vezes superiores às dos motores de combustão interna. A estrutura modular das pilhas de combustível permite uma maior adaptação a diferentes aplicações, desde as portáteis (50-100 W) até à produção centralizada de eletricidade (1-200 MW). As pilhas de combustível têm contudo uma produção relativamente dispendiosa, quando comparada com os motores de combustão interna. Necessitará de desenvolvimentos futuros para incrementar a sua durabilidade e baixar os custos de produção, a fim de se tornarem economicamente competitivas.

O hidrogénio pode ainda ser utilizado em motores de combustão interna, requerendo apenas pequenas modificações. A utilização do hidrogénio como combustível é mais limpa e eficiente que a da gasolina, fazendo, no curto prazo, do motor de combustão a hidrogénio, uma solução atrativa como tecnologia de transição para a economia do hidrogénio. Pelo contrário, as pilhas de combustível a hidrogénio, que comparativamente apresentam maiores eficiências e menores emissões, presumivelmente só alcançarão o patamar da competitividade no longo prazo.

6.1 Chegando ao futuro

Tal como em tudo o que exige mudança, a transição para a economia do hidrogénio far-se-á de forma faseada. Os avanços tecnológicos e a aceitação das novas tecnologias nos mercados marcarão as diferentes fases. Paralelamente, serão feitos esforços para educar o público no sentido da aceitação deste novo vetor energético na Sociedade. Os governos deverão ter um papel preponderante no incentivo à investigação e desenvolvimento, assim como, na elaboração de códigos e normas de segurança para a utilização do hidrogénio.

No que diz respeito às Regiões da Macaronésia, o hidrogênio pode gerar novas oportunidades de desenvolvimento econômico, nomeadamente através da sua introdução na indústria local, tornando-a mais competitiva.

A transição para a economia do hidrogénio requer um esforço significativo em investimentos. No entanto, a adopção de uma política precursora nesta área poderá colocar a Macaronésia na vanguarda da economia do hidrogénio, à semelhança do acontece em algumas outras regiões insulares no Mundo. Hidrogênio: o combustível do século XXI entrará em cena nos próximos dez anos.

O Brasil se encontra na vanguarda no que se refere às pesquisas que vão contribuir para o uso do hidrogênio como combustível e na geração de energia. “Em alguns anos, já teremos geradores de energia nas indústrias e nas próprias residências e carros movidos a hidrogênio circulando pelas ruas”, antecipa o professor Paulo Emílio de Miranda, que coordena o Laboratório de Hidrogênio da Coppe. Esse laboratório é um dos condutores do trabalho que vem sendo desenvolvido no Brasil, cujo objetivo é viabilizar o uso do hidrogênio como combustível e como fonte de energia. Para isso, pesquisadores da Coppe vêm buscando formas de tornar seguro seu armazenamento.

Nesse mesmo laboratório, cientistas estão desenvolvendo pilhas a combustível de óxido sólido, que são geradores de energia elétrica baseados no uso do hidrogênio. Foi na Coppe, aliás, que surgiu a primeira pilha a combustível do país, no início da década de 1980. “Estamos falando de uma fonte de energia renovável, inesgotável e não poluente que trará benefícios para toda a sociedade”, afirma o pesquisador ressaltando que os órgãos de fomento à pesquisa e os fundos setoriais terão papel decisivo no desenvolvimento dos projetos relacionados ao hidrogênio no país.

Paulo Emílio aposta na adesão da iniciativa privada nesse movimento:

A tendência é que surjam muitas empresas especializadas na comercialização de produtos e processos de aproveitamento do hidrogênio. As próprias empresas de geração de energia terão de se readaptar para não perder espaço.

Segundo o pesquisador, muitas dessas empresas já estão fazendo as adaptações necessárias para que, no futuro, possam ser fornecedoras do sistema baseado no hidrogênio:

“A Petrobras, por exemplo, já não mais se apresenta apenas como uma empresa de petróleo, mas de energia em geral”, acentua. O especialista acrescenta que o fortalecimento

dessa “indústria” é condição indispensável para a viabilização dos projetos de geração de energia e da utilização do hidrogênio como combustível, pois somente assim será possível reduzir os custos de implantação dos projetos que vêm sendo desenvolvidos.

“Não há dúvida de que o hidrogênio será uma das principais fontes de energia do futuro”, afirma o professor da COPPE, que se diverte ao lembrar que essa é uma idéia antiga e faz parte das antológicas previsões de Júlio Verne, referindo-se ao livro *A ilha misteriosa*, publicado em 1874, no qual o escritor projeta um mundo onde a água e o hidrogênio seriam o “carvão do futuro”.

6.2 Vantagens do hidrogênio

1 - Veículos movidos a hidrogênio não terão motor à combustão. Os motores serão elétricos, o que evitará a poluição do meio ambiente.

2 - O processo de geração de energia é descentralizado. Não será necessário construir hidrelétricas gigantescas, como Itaipu. O hidrogênio pode ser produzido a partir de várias fontes: água, combustíveis fósseis e biomassa. Essa produção pode ainda ser feita com o aproveitamento da energia solar ou eólica.

3 - Fonte renovável, inesgotável e não poluente. A produção de energia pode ser realizada em qualquer lugar.

4 - A geração de energia por meio de pilhas a combustível é pelo menos duas vezes mais eficaz do que a obtida pelos processos tradicionais.

6.3 Pesquisas do Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ

A - Produção de materiais metálicos sólidos para armazenar grande quantidade do elemento químico hidrogênio.

Basta aquecer o material que os átomos de hidrogênio se difundem até a superfície do material armazenador, onde se recombinam e formam o gás.

B - Desenvolvimento de pilha a combustível de óxido sólido

Processo químico onde não há combustão. Usa gás natural como combustível.

C - Produção de hidrogênio e materiais carbonosos (ricos em carbono)

Processo de beneficiamento de combustível fóssil não poluente que não emite gases responsáveis pelo efeito estufa. Permite a produção de hidrogênio para geração de energia e “seqüestra” o carbono do gás natural.

Cronograma para o uso do hidrogênio como energia e combustível: fonte de 2002 a 2020	
Prazo	Cenário previsto
5 anos	Indústria automobilística lança em escala pré-comercial protótipos de veículos movidos a hidrogênio; cresce o número de aparelhos eletrônicos que utilizam a energia gerada a partir de hidrogênio.
10 anos	Geradores de energia à base de hidrogênio são instalados em unidades residenciais e empresas; começa a produção comercial de veículos que utilizam esse tipo de combustível.
20 anos	A utilização do hidrogênio é disseminada por toda a sociedade, tanto como combustível quanto na geração de energia. O uso massificado do elemento reduz os custos de implantação dos sistemas.

Fonte⁵⁷

6.4 O Hidrogênio como Combustível

Desde o início do século XIX, os cientistas identificaram o hidrogênio como uma fonte potencial de combustível. Os usos atuais do hidrogênio incluem processos industriais, combustível para foguetes e propulsão para cápsulas espaciais. Com pesquisa e desenvolvimento mais avançados, este combustível também pode ser utilizado como uma fonte alternativa de energia para o aquecimento e iluminação de residências, geração de eletricidade e como combustível de automóveis. Quando produzido de fontes e tecnologias

⁵⁷ HYMAC (03/MAC/4.3/C4) – Projeto cofinanciado pela UE–INTERREG IIIAMC, FEDER e pela Vice-Presidência do Governo Regional da Madeira.

renováveis, como hidráulica, solar ou eólica, o hidrogênio torna-se um combustível renovável.

6.5 Composição do Hidrogênio

O hidrogênio é o mais simples e mais comum elemento do universo. Possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido - 52.000 BTU - British Thermal Units (Unidades Térmicas Britânicas) por libra (ou 120,7kJ por grama). Além disso, quando resfriado ao estado líquido, este combustível de baixo peso molecular ocupa um espaço equivalente a 1/700 daquele que ocuparia no estado gasoso. Esta é uma das razões pelas quais o hidrogênio é utilizado como combustível para propulsão de foguetes e cápsulas espaciais, que requerem combustíveis de baixo peso, compactos e com grande capacidade de armazenamento de energia. No estado natural e sob condições normais, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. O hidrogênio molecular (H₂) existe como dois átomos ligados pelo compartilhamento de elétrons - ligação covalente. Cada átomo é composto por um próton e um elétron. Alguns cientistas acreditam que este elemento dá origem a todos os demais por processos de fusão nuclear.

O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no metano, e na maioria dos compostos orgânicos. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece sozinho como um único elemento. Quando queimado com oxigênio puro, os únicos produtos são calor e água. Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio, alguns óxidos de nitrogênio (NOX) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis.

6.6 A Produção de Hidrogênio

O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações na água permite produzir hidrogênio e então utilizá-lo como combustível. Existem muitos processos que podem ser utilizados para quebrar estas ligações. A seguir estão descritos alguns métodos para a produção de hidrogênio e que ou estão atualmente em uso ou sob pesquisa e desenvolvimento.

A maior parte do hidrogênio produzido no mundo (principalmente nos Estados Unidos) em escala industrial é pelo processo de reforma de vapor, ou como um subproduto

do refino de petróleo e produção de compostos químicos. A reforma de vapor utiliza energia térmica para separar o hidrogênio do carbono no metano ou metanol, e envolve a reação destes combustíveis com vapor em superfícies catalíticas. O primeiro passo da reação decompõe o combustível em água e monóxido de carbono (CO). Então, uma reação posterior transforma o monóxido de carbono e a água em dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂). Estas reações ocorrem sob temperaturas de 200°C ou maiores. Outro modo de produzir hidrogênio é por eletrólise, onde os elementos da água, o hidrogênio e o oxigênio, são separados pela passagem de uma corrente elétrica. A adição de um eletrólito como um sal aumenta a condutividade da água e melhora a eficiência do processo.

A carga elétrica quebra a ligação química entre os átomos de hidrogênio e o de oxigênio e separa os componentes atômicos, criando partículas carregadas (íons). Os íons se formam em dois pólos: o anodo, polarizado positivamente, e o catodo, polarizado negativamente. O hidrogênio se concentra no cátodo e o anodo atrai o oxigênio. Uma voltagem de 1,24V é necessária para separar os átomos de oxigênio e de hidrogênio em água pura a uma temperatura de 25°C e uma pressão de 1,03kg/cm². Esta tensão varia conforme a pressão ou a temperatura são alteradas.

A menor quantidade de eletricidade necessária pra eletrolisar um mol de água é de 65,3 Watts-horas (a 25°C). A produção de um metro cúbico de hidrogênio requer 0,14kilowatts-hora (kWh) de energia elétrica (ou 4,8kWh por metro cúbico). Fontes renováveis de energia podem produzir eletricidade por eletrólise. Por exemplo, o Centro de Pesquisas em Energia da Humboldt State University projetou e construiu um sistema solar de hidrogênio autossuficiente.

O sistema usa um arranjo fotovoltaico de 9,2kilowatts (kW) para fornecer energia a um compressor que faz a aeração dos tanques de peixes. A energia não utilizada para movimentar o compressor aciona um eletrolisador bipolar alcalino de 7,2kW. O eletrolisador pode produzir 53 pés cúbicos padrões de hidrogênio por hora (25 litros por minuto). A unidade está operando sem supervisão desde 1993. Quando o arranjo fotovoltaico não fornece energia suficiente, o hidrogênio fornece combustível para uma célula de combustível por membrana de troca fotônica de 1,5kW para fornecer a energia necessária aos compressores.

A eletrólise de vapor é uma variação do processo convencional de eletrólise. Uma parte da energia necessária para decompor a água é adicionada na forma de calor ao invés de eletricidade, tornando o processo mais eficiente que a eletrólise convencional. A 2500°C

a água se decompõe em hidrogênio e oxigênio. Este calor pode ser fornecido por um dispositivo de concentração de energia solar. O problema neste processo é impedir a recombinação do hidrogênio e do oxigênio sob as altas temperaturas utilizadas no processo. A decomposição termoquímica da água utiliza produtos químicos como o brometo ou o iodeto, assistidos pelo calor.

Esta combinação provoca a decomposição da molécula de água. Este processo possui várias etapas - usualmente três - para atingir o processo inteiro. Processos foto eletroquímicos utilizam dois tipos de sistemas eletroquímicos para produzir hidrogênio. Um utiliza complexos metálicos hidrossolúveis como catalisadores, enquanto que o outro utiliza superfícies semicondutoras. Quando o complexo metálico se dissolve, absorve energia solar e produz uma carga elétrica que inicia a reação de decomposição da água. Este processo imita a fotossíntese. O outro método utiliza eletrodos semicondutores em uma célula fotoquímica para converter a energia eletromagnética em química.

A superfície semicondutora possui duas funções: absorver a energia solar e agir como um eletrodo. A corrosão induzida pela luz limita o tempo de vida útil do semicondutor. Processos biológicos e fotobiológicos utilizam algas e bactérias para produzir hidrogênio. Sob condições específicas, os pigmentos em certos tipos de algas absorvem energia solar. As enzimas na célula de energia agem como catalisadores para decompor as moléculas de água. Algumas bactérias também são capazes de produzir hidrogênio, mas diferentemente das algas necessitam de substratos para seu crescimento. Os organismos não apenas produzem hidrogênio, mas também podem limpar poluição ambiental. Recentemente, uma pesquisa iniciada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos levou à descoberta de um mecanismo para produzir quantidades significativas de hidrogênio a partir de algas.

Há 60 anos os cientistas sabem que as algas produzem pequenas quantidades de hidrogênio, mas não haviam encontrado um método factível para aumentar esta produção. Cientistas da Universidade da Califórnia em conjunto com o Laboratório Nacional de Energia Renovável encontraram a solução. Após permitir que a cultura de algas crescesse sob condições normais, os pesquisadores privaram-nas de enxofre e oxigênio. Após muitos dias gerando hidrogênio, a cultura de algas foi colocada novamente sob as condições normais por alguns poucos dias, permitindo assim que armazenassem mais energia. O processo pode ser repetido várias vezes. A produção de hidrogênio por algas pode eventualmente promover um meio prático e de baixo custo para a conversão de luz solar

em hidrogênio. Outra fonte de hidrogênio por processos naturais utiliza o metano e o metanol. O metano (CH_4) é um componente do "biogás", produzido por bactérias anaeróbicas. Estas bactérias são encontradas em grande quantidade no ambiente. Elas quebram, ou digerem, matéria orgânica na ausência de oxigênio e produzem o "biogás" como resíduo metabólico.

Fontes de biogás incluem os lixões, o esterco de gado ou porcos e as estações de tratamento de águas e esgotos. O metano também é o principal componente do gás natural (um grande combustível utilizado para aquecimento e geradoras de energia elétrica) produzido por bactérias anaeróbicas há milhões de anos atrás. O etanol é produzido pela fermentação da biomassa. A maior parte do etanol combustível dos Estados Unidos é produzido pela fermentação do milho. Estados Unidos, Japão, Canadá e França têm investigado a decomposição térmica da água, uma técnica radicalmente diferente para geração de hidrogênio. Este processo utiliza calor em temperaturas acima de 3000°C para decompor as moléculas de água.

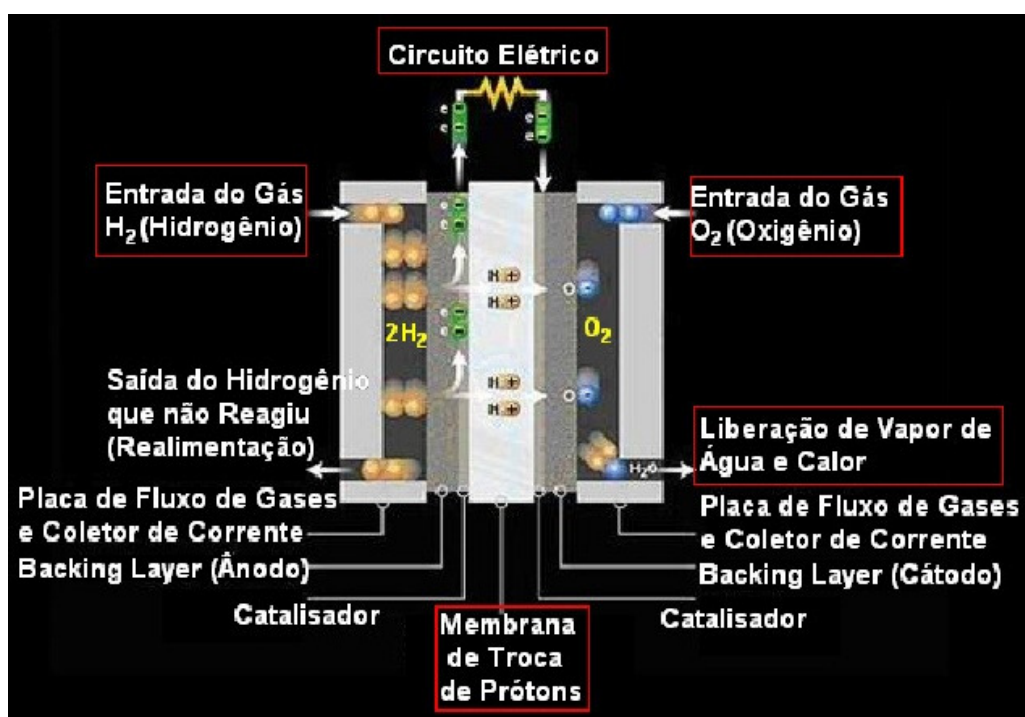


Figura 59: Processo de obtenção de Hidrogênio. Fonte⁵⁸

⁵⁸ www.inovacaotecnologica.com.br

6.7 Usos Potenciais para o Hidrogênio

Os setores de transporte, industrial e residencial nos Estados Unidos têm utilizado hidrogênio há muitos anos. No início do século XIX muitas pessoas utilizaram um combustível denominado "gás da cidade", que era uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono. Muitos países, incluindo o Brasil e a Alemanha, continuam distribuindo este combustível. Aeronaves (dirigíveis e balões) usam hidrogênio para transporte. Atualmente, algumas indústrias utilizam hidrogênio para refinar petróleo, e para produzir amônia e metanol.

As naves espaciais utilizam hidrogênio como combustível para seus foguetes. Com pesquisas futuras, o hidrogênio pode fornecer eletricidade e combustível para os setores residencial, comercial, industrial e de transporte, criando uma nova economia energética. Quando armazenado adequadamente, o hidrogênio combustível pode ser queimado tanto no estado gasoso quanto no líquido. Os motores de veículos e os fornos industriais podem facilmente ser convertidos para utilizar hidrogênio como combustível. Desde a década de 1950, o hidrogênio abastece alguns aviões. Fabricantes de automóveis desenvolveram carros movidos a hidrogênio. A queima de hidrogênio é 50% mais eficiente que a da gasolina e gera menos poluição ambiental.

O hidrogênio apresenta uma maior velocidade de combustão, limites mais altos de inflamabilidade, temperaturas de detonação mais altas, queima mais quente e necessita de menor energia de ignição que a gasolina. Isto quer dizer que o hidrogênio queima mais rapidamente, mas traz consigo os perigos de pré-ignição e flashback. Apesar de o hidrogênio apresentar suas vantagens como combustível para veículos, ainda tem um longo caminho de desenvolvimento a percorrer antes de poder ser utilizado como um substituto para a gasolina.

As células de energia utilizam um tipo de tecnologia que usam o hidrogênio para produzir energia útil. Nestas células, o processo de eletrólise é revertido para combinar o hidrogênio e o oxigênio através de um processo eletroquímico, que produz eletricidade, calor e água. O Programa Espacial dos Estados Unidos tem utilizado as células de energia para fornecer eletricidade às cápsulas espaciais há décadas. Células de energia capazes de fornecer eletricidade para mover os motores de automóveis e ônibus têm sido desenvolvidas. Muitas companhias estão desenvolvendo células de energia para usinas estacionárias. Uma célula de energia funciona como uma bateria que nunca pára de

funcionar e não precisa de recarga. Ela irá produzir eletricidade e calor sempre que um combustível (no caso, o hidrogênio) for fornecido. Uma célula de energia consiste de dois eletrodos - um negativo (ânodo) e um positivo (cátodo) - imersos em um eletrólito. O hidrogênio é inserido na célula pelo anodo, e o oxigênio pelo catodo. Ativados por um catalisador, os átomos de hidrogênio separam-se em prótons e elétrons, que tomam caminhos diferentes no cátodo. Os elétrons saem por um circuito externo, gerando eletricidade.

Os prótons migram através do eletrólito ao cátodo, onde se reúnem com o oxigênio e os elétrons para gerar água e calor. As células de energia podem ser utilizadas para mover os motores de veículos ou para fornecer eletricidade e calor às edificações. O hidrogênio pode ser considerado como uma forma de armazenar energia produzida de fontes renováveis como a solar, eólica, hídrica, geotérmica ou biológica. Por exemplo, quando o sol estiver se pondo, sistemas fotovoltaicos podem fornecer a eletricidade necessária para produzir o hidrogênio por eletrólise. O hidrogênio pode então ser estocado e queimado como um combustível, ou para operar uma célula de energia para gerar eletricidade à noite ou sob tempo nebuloso.

6.8 A Estocagem de Hidrogênio: Um Problema Ainda Não Resolvido

Para se utilizar o hidrogênio em larga escala de maneira segura, sistemas práticos de estocagem devem ser desenvolvidos, especialmente para os automóveis. Apesar de o hidrogênio poder ser estocado no estado líquido, este é um processo difícil porque deve ser resfriado a -253°C . A refrigeração do hidrogênio a esta temperatura utiliza o equivalente a 25 ou 30% de sua energia total, e requer materiais e manipulação especiais. Para resfriar aproximadamente 0,5kg de hidrogênio são necessários 5kWh de energia elétrica.

O hidrogênio também pode ser armazenado como gás, que utiliza muito menos energia que aquela necessária para fazer hidrogênio líquido. Sendo estocado no estado gasoso, deve ser pressurizado para se estocar uma quantidade razoável. Para utilização em larga escala, o gás pressurizado pode ser estocado em cavernas ou minas. O gás hidrogênio pode então ser encanado e levado às residências da mesma maneira que o gás natural. Apesar desta técnica de estocagem ser útil para a utilização do hidrogênio como combustível de aquecimento, não o é para utilização em veículos porque os tanques de metal pressurizados necessários para estocar o hidrogênio são muito caros. Um método de

estocagem de hidrogênio potencialmente mais eficiente é na forma de hidretos. Os hidretos são compostos químicos formados por hidrogênio e um metal. As pesquisas atuais estão focando o hidreto de magnésio.

Certas ligas metálicas como as de magnésio-níquel, magnésio-cobre e ferro-titânio, absorvem hidrogênio e o liberam quando aquecidos. Os hidretos, entretanto, estocam pouca energia por unidade de massa. As pesquisas atualmente procuram um composto que seja capaz de armazenar uma grande quantidade de hidrogênio com uma elevada densidade energética, liberar o hidrogênio como combustível, reagir rapidamente e possuir um custo acessível.

6.9 O Custo do Hidrogênio

Atualmente, a maneira economicamente mais viável para se produzir hidrogênio é pela reforma de vapor. De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos, em 1995 o custo estava em US\$7,39 por milhão de BTU (US\$7,00 por giga joule) em plantas de grande escala. Este cálculo assume o custo do gás natural de US\$2,43 por milhão de BTU (US\$2,30 por giga joule). Isto equivalente a US\$0,93 por galão (\$0,24 por litro) de gasolina. A produção de hidrogênio por eletrólise utilizando hidroeletricidade, considerando taxas de horários de baixo consumo, custa entre US\$10,55 e US\$21,10 por milhão de BTU (US\$10,00 a US\$20,00 por giga joule).



Figura 60: Forma de armazenamento de Hidrogênio. Fonte⁵⁹

⁵⁹ www.inovacaotecnologica.com.br

CAPÍTULO 7

A PESQUISA EM HIDROGÊNIO

Reconhecendo o potencial do hidrogênio combustível, o Departamento de Energia dos Estados Unidos e organizações privadas fundaram programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) por muitos anos. O Governo Federal americano aloca em média 18 milhões de dólares por ano na pesquisa de hidrogênio combustível. Os trabalhos atuais nos Estados Unidos incluem pesquisas no Laboratório Nacional de Energia Renovável, na Universidade A & M, Texas, no Laboratório Nacional de Brookhaven, e no Instituto de Energia Neutra Hawaii.

O Centro de Energia Solar na Flórida conduz pesquisas em hidrogênio pelo Programa de Energia Renovável, com objetivos de longo prazo sob a orientação do Departamento de Energia dos Estados Unidos para o desenvolvimento de um reator para fotoeletricamente decompor a água em hidrogênio e oxigênio e para sintetizar quimicamente uma membrana eletrolítica para eletrólise sob altas temperaturas. Outra pesquisa do Departamento de Energia é o desenvolvimento de um processo para reformar o gás natural ao hidrogênio para produção on-site de blendas de hidrogênio-metano que sejam aplicáveis a automóveis. Para que se possa utilizar hidrogênio em larga escala, os pesquisadores devem desenvolver meios mais práticos e econômicos para estocar e produzir o hidrogênio. Fonte⁶⁰

7.1 Cargueiros de contêineres

A idéia é de um grupo de engenheiros ingleses, que acredita ter encontrado a solução para as demoradas viagens dos navios cargueiros. Eles não pretendem substituir os atuais gigantes transatlânticos, mas querem criar uma alternativa para as empresas que precisam enviar seus produtos para o outro lado do mundo de uma forma muito mais rápida do que atualmente. Os navios cargueiros atuais são verdadeiros mastodontes marinhos, medindo 335 metros de comprimento e carregando 8.500 contêineres a uma

⁶⁰ alkimia.tripod.com

velocidade máxima de 46 km/h (25 nós). E, no mundo do transporte marítimo, maior tem sido sempre sinônimo de melhor. Mas a idéia dos engenheiros Ivo Veldhuis e Howard Stone, da Universidade de Southampton, é reduzir o tamanho desses navios de contêineres para apenas 175 metros, construindo-os com uma capacidade para 600 contêineres - ou 600 TEU, a unidade utilizada no transporte marítimo. TEU, significa "Twenty-foot Equivalent Unit", ou unidade equivalente a vinte pés, a capacidade dos contêineres-padrão. A vantagem é que esses navios poderiam cruzar os mares à incrível velocidade de 120 km/h (65 nós).

A quantidade de viagens feitas entre os congestionados portos do mundo inteiro poderia ser mais do que duplicada, sem contar com sua característica de "entrega expressa", feita em um tempo hoje inalcançável por via marítima, e sem os elevados custos do transporte aéreo.

7.2 Turbinas a hidrogênio

O Hydrogen Oceanjet 600, como foi batizado o novo navio, que ainda está em fase de projeto, deverá ser alimentado exclusivamente por hidrogênio líquido e ter como propulsores quatro gigantescas turbinas, iguais às utilizadas nos Boeing 747. Cada uma dessas turbinas tem uma capacidade de 49,2 megawatts de potência quando alimentadas por hidrogênio.

Para transformar essa potência de propulsão em impulso para a frente, o Oceanjet 600 não utilizará hélices, mas jatos de água, que possuem uma maior eficiência em altas velocidades. A força das turbinas é tão grande que elas permitirão a construção de quadro jatos de água, cada um com 2,5 metros de diâmetro. O sistema de jatos faz com que a água gire em seu interior, permitindo um elevado nível de controle na direção do navio. Para evitar a resistência das ondas, o Oceanjet foi projetado como um catamarã, com cascos finos conhecidos como semi-SWATH ("Small Water plane Area Twin Hull").

7.3 Sistema de combustível

Não foi à toa que os engenheiros escolheram o hidrogênio como combustível. "Se você quisesse manter essa velocidade por um longo tempo, utilizando óleo diesel, você teria que carregar cerca de 3.000 toneladas - este é o mesmo peso da carga do navio," explica Ivo. Hidrogênio líquido é muito mais leve e mais eficiente. Ele libera muito mais

energia por kilograma do que os combustíveis convencionais. Para não desperdiçar nada, os engenheiros projetaram um sistema de combustível que funciona tanto com hidrogênio líquido quanto gasoso. Cada turbina exigirá 0,86 kg de hidrogênio líquido por segundo para manter a velocidade do navio em 120 km/h. Isto representa 176 m³ de hidrogênio por hora. Para viajar entre os portos de Yokohama, no Japão, e Los Angeles, nos Estados Unidos, uma distância de 18.500 km, o Oceanjet precisará de 14.500 m³ de capacidade em seus tanques de combustível. Serão 10 tanques separados, mas interconectados, com uma capacidade de 1.000 toneladas de hidrogênio líquido.



Figura 61: Navio Oceanjet movido a Hidrogênio. Fonte⁶¹



Figura 62: Protótipo jato Stratoliner movido a Hidrogênio. Fonte⁶²

⁶¹ www.inovacaotecnologica.com.br

⁶² Lockheed Martin/USA

Avião movido a hidrogênio tem design baseado em pássaro Jato Stratoliner conta com asas maiores que as encontradas nos modelos de hoje e quatro turbinas movidas a hidrogênio. Com design inspirado em pássaro protótipo de jato usa motores a hidrogênio para planar a 20 mil metros. Pouco importa que o jato Stratoliner seja apenas um exercício de imaginação do designer inglês William Brown. A beleza do desenho e a ideia de voar a 20 mil metros de altitude mexem com qualquer um. As linhas do avião são inspiradas no fuselo, um pássaro de bico e pernas longas, que detém o recorde de horas ininterruptas de voo. Natural das tundras do Polo Norte, ele viaja mais de 11 mil quilômetros durante a migração para terras mais quentes. Para voar mais alto e mais longe que os aviões normais, o Stratoliner conta com asas maiores que as encontradas nos modelos de hoje e quatro turbinas movidas a hidrogênio. Essa parte, pelo menos, não é um sonho assim tão distante. A NASA, agência espacial americana, já testa motores que usam hidrogênio resfriado a temperaturas inferiores aos 150 °C negativos para equipar seus veículos espaciais. Isso tudo faz com que o protótipo de avião seja ambientalmente correto e consiga viajar para qualquer canto do planeta sem precisar fazer nenhuma escala. Resta saber se a Lockheed Martin, fabricante americana de aviões que encomendou o projeto, vai conseguir transformá-lo em realidade. Fonte⁶³

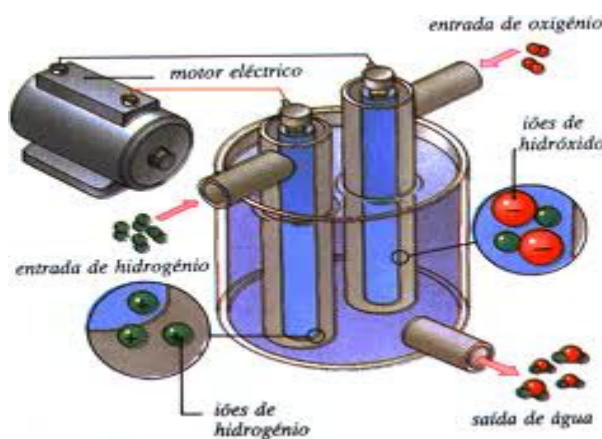


Figura 63: Obtenção de hidrogênio pela quebra de moléculas. Fonte⁶⁴

⁶³ Revista Exame de São Paulo-Reportagem exibida pela revista em 19 de novembro de 2011, onde a revista questiona sobre a Lockheed Martin, na fabricação do avião Stratoliner.

⁶⁴ www.inovacaotecnologica.com.br

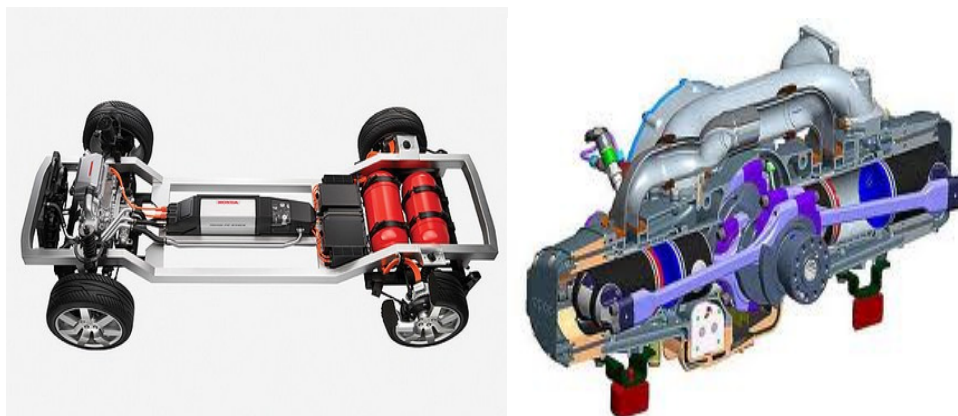


Figura 64: Motor que utiliza o hidrogênio como combustível . Fonte⁶⁵



Figura 65: Barco de passageiro movido a hidrogênio. Fonte⁶⁶



Figura 66: Ônibus movido a hidrogênio. Fonte⁶⁷

⁶⁵ www.inovacaotecnologica.com.br

⁶⁶ <http://www.ecofriend.org/>

⁶⁷ ANBA/ Estudos e Projetos (Finep)

CONCLUSÃO

Pode-se dizer que a Evolução da Propulsão Marítima mediante mudança da matriz, já chegou e está crescendo a passos largos. Está aos poucos tomando o lugar da atual fonte de energia que é o petróleo. O Hidrogênio Líquido será sem dúvida, uma fonte energética inteligente, pelo fato de não poluir e ser considerada uma energia limpa, que hoje em dia, é de muita importância mundial. Ambos precisarão um do outro, enquanto a propulsão desloca o navio, submarino ou outro tipo de embarcação, o combustível fornece a força química para tal operação e trabalho. Ônibus e demais veículos, em breve já terão esse sistema embarcado em seus motores. Com o uso do Hidrogênio em embarcações, não existirá mais os motores de combustão interna, mas sim motores elétricos e inversores, que serão adaptados às caixas de engrenagens e eixos dos propulsores das embarcações, com a ausência de motores de combustão, não haverá poluição ao meio ambiente, a tecnologia embarcada dos navios, será uma nova forma de rever conceitos do que aprendemos por muito tempo. Então, o hidrogênio Líquido como fonte de energia para o uso em navios, mudará em muito a forma e tamanho de uma embarcação, ou seja, como ela será projetada e construída. A praça de máquinas, será menor e mais silenciosa, a temperatura ambiente será agradável para os trabalhadores na praça de máquinas. Tendo-se uma casa de máquinas menor, pelo fato da ausência dos grandes motores de combustão, certamente em um projeto de uma embarcação os engenheiros poderão construir navios com mais espaços para as cargas, o que é muito importante para o armador, que visa o lucro de seu navio. Sem dúvida, estamos diante de uma nova era tecnológica e progresso para o mundo, onde deveremos mudar os nossos conceitos sobre combustível, entender e aceitar que o combustível fóssil está com os seus dias contados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENSON, Rowland S. & WHITEHOUSE, N. D.: Internal Combustion Engines: A detailed introduction to the thermodynamics of spark and compression ignition engines, their design and development. Pergamon Press, 1979.
- BENATMANE, M. The Electric Ship Technology Demonstrator. International Conference on Electric Ship - Proceedings, Ankara, Turkey. 1998.
- BUCKNALL, R.W.G. Electric Drives, Lectures from the MSc Course in Marine Engineering at University College London, London, UK. 2001.
- BOLTON, M. T. W. e Hinton, M. J. Electric Weapons – Adding Power to the Punch, All Electric Ship Conference, Versailles, France. 2005.
- BOSE, B., K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, USA. 2002.
- BOULANGER, P. e ADAM, B. *Motores Diesel*. Editora Hemus São Paulo. SP.
- BOSH, ROBERT GmbH. Automotive Handbook. Alemanha. 1993.
- CNO Executive Board (2001) Executive Summary Roadmap to an Electric Naval Force, Naval Research Advisory Committee, USA.
- FLÔRES, L.F.V. *Sistemas Térmicos I*. Apostila. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. MG.
- GOLDEMBERG, J. & MACEDO, I. *The Brazilian Alcohol Program – Na Overview*. Energy for Sustainable Development, Vol. 1, n.º 1, pp. 17 – 22.
- JONES, C. Morgan. Diesel operator's guide. New York: Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1956.
- JEBSEN, G. M. (2001) Electric Warship Technology Overview, Office of Naval Research, USA.
- LIPO, T., A., ZHAO, Y., “Modeling and Control of a Multi-Phase Induction Machine with Structural Unbalance”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, Nº 3, pp. 578-584, Sep. 1996.
- MOONEY, David A. et al.: Mechanical Engineering Thermodynamics, Prentice-Hall, Gran-Bretanha, 1957, 2 ed..
- MATTICK, D., Benatmane, M., McVea, N., e Gerrard, R. (2005) The Electric Ship Technology Demonstrator: 12 Inches to the Foot, All Electric Ship Conference Proceedings, Versailles, France.
- MOONEY, David A. et al.: Mechanical Engineering Thermodynamics, Prentice-Hall, Gran-Bretanha, 1957, 2 ed.
- OBERT, Edward F.: Internal Combustion Engines: Analysis and Practice, Scranton, Pensilvania, International Textbook Company, 1962, 2 ed..
- RICARDO, Happy R. et al: The High Speed Internal-Combustion Engine. Blackie & Son Limited, 4a. Ed, Glasgow, 1962.
- SOUZA, Zulcy de, Elementos de Máquinas Térmicas, Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1980.

SOUZA, Z. Elementos de Máquinas Térmicas.. Rio de Janeiro. RJ, Editora Campus-EFEI. 1980.

STONE, RICHARD. Internal Combustion Engines. Society of Automotive Engineers, Inc. 2nd Edition.1993. Warrendale, PA, USA.

TAYLOR, CHARLES F.: Análise dos Motores de Combustão Interna. Vol 1 & 2, 2. ed., Edgard Blucher Ltda., São Paulo, Brasil, 1995.

US NAVY. Bureau of Naval Personnel. Submarine Main Propulsion Diesel. Consulant by Standards and Curriculum Division. Washington, 1976.

VON SYDOW, Hermano Alfredo Hebert. Manual de máquinas de combustão interna. Rio de Janeiro: Escola Naval, 1961.

VOYCE, J. Warship Electrical Power & Propulsion Systems, Ship Design Lecture at University College London, London, UK. 2002.

YOUNG, S. S., Newell, J. M., e Little, G. T. Electric Warship VII – The Reality,Journal of Marine Design and Operations, London, UK. 2001.

WYLEN, Gordon John Van & SONNTAG, Richard E.: Fundamentos da Termodinâmica Clássica. Ed. Edgard Blücher Ltda, Michigan, EUA, 1976.