

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE MÁQUINAS - APMA

ANIBAL PANTOJA BARACHO

TURBOCHARGER

RIO DE JANEIRO
2016

ANIBAL PANTOJA BARACHO

TURBOCHARGER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 emendada.

Orientador : Swami Novaes Chamarelli

RIO DE JANEIRO

2016

ANIBAL PANTOJA BARACHO

TURBOCHARGER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 emendada.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Professor Swami Novaes Chamarelli

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedico este trabalho a minha querida neta : Maria Beatriz Baracho de Castro , que pela sua simples existência me inspirou a confiança de deixar um legado de amor e determinação, para que ela possa no futuro se orgulhar e ter a certeza de que os nossos sonhos são possíveis conforme nossa força de vontade.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer;

Aos meus pais (in memoriam) pelo amor incondicional;

A minha esposa e companheira pela compreensão, incentivo, carinho e amor ;

A toda minha família que sempre confiou em mim;

Aos amigos, companheiros de trabalho e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação, cito em especial meu Chefe de Máquinas e amigo particular Alcion Bernadino, que com certeza irão continuar presentes em minha vida;

À empresa de Navegação Elcano, na figura do Diretor de RH e todos os membros do RH que me auxiliaram, que abdicaram de meu trabalho a bordo para me colocar em uma sala de aula para ampliar meus conhecimentos, além de me motivarem e confiarem em mim.

Aos meus colegas da turma de APMA-1 2016 que tornaram um período de longa dedicação em algo divertido.

Agradecer é admitir que houve um momento em que se precisou de alguém; é reconhecer que o homem jamais poderá lograr para si o dom de ser autossuficiente. Ninguém se faz sozinho: sempre é preciso um olhar de apoio, uma palavra de incentivo, um gesto de compreensão, uma atitude de amor. A vocês, que no anonimato compartilharam dos meus ideais, compreenderam-me, incentivaram-me, mesmo que no silêncio e na distância, o meu muito obrigado.

“Mais importante que a vontade de vencer,
é a coragem de começar.”
(Roger Stankewski)

“Cada adversidade traz consigo a semente de um equivalente
ou maior benefício”
(Napoleão Hill)

RESUMO

Dr. Rudolf Diesel foi a primeira pessoa a registrar a ideia de suprir o motor diesel com ar pressurizado, já em 1896. A utilização de um turbo compressor para este fim, no entanto, foi resultado do trabalho do francês Auguste Rateau e posteriormente do suíço, Alfred Büchi. Este sistema alimenta uma turbina com a energia cinética dos gases de escape do motor transformando em rotação que acionará um compressor responsável por pressurizar o ar de admissão. Para a utilização em larga escala de forma rentável, o turbo compressor por si só não basta, necessita de um sistema auxiliar complementar a fim de retirar dele um maior desempenho e torná-lo eficiente em uma larga faixa de operação quando acoplado a um motor. Quando analisamos seus benefícios, pela possibilidade de maior pressão dentro do cilindro ocasiona uma melhor queima do combustível, maior potência desenvolvida e redução dos níveis de óxido de nitrogênio (NOx), certificando o motor a operar em zonas com emissão de poluentes controladas.

Palavras-chave: Motor Diesel. Rudolf Diesel. Turbocharger. Turbo Compressão. Turbocarregador.

ABSTRACT

Rudolf Diesel was first person to notice the advantages of increasing the pressure inside the combustion chamber, Auguste Rateau and Alfred Buchi developed the main concept of turbochargers. This system supply ar in high pressure and density to burn with fuel increasing the output power transformed inside the engine. The use of turbocharger in large scale only became possible when attached to an auxiliary system that makes him more efficient in low rotations. Analyzing those benefits we find a incredible reduction in NOx emission that allows the engine to run inside restricted areas.

Key-words: Marine Engineer. Diesel Engine. Turbocharger . Rudolf Diesel. Auguste Rateau . Alfred Buchi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Dr. Rudolf Diesel	11
Figura 2:	Máquina Alternativa a Vapor	12
Figura 3:	Ciclo Diesel	13
Figura 4:	Turbocharger Marítimo	14
Figura 5:	Fotografia Auguste Rateau	15
Figura 6:	Fotografia Alfred Buchi	16
Figura 7:	Navio Dorthe Maersk	19
Figura 8:	Gráfico da Energia Térmica Total	19
Figura 9:	Turbocompressor em Corte e componentes detalhados	20
Figura 10:	Funcionamento do Turbocompressor	22
Figura 11:	Sistema turbocompressão e seus componentes	23
Figura 12:	Gráfico Turbo Lag	25
Figura 13:	Seção de um Turbocharger com Geometria Variável	27
Figura 14:	Funcionamento da Turbina de Geometria Variável	28
Figura 15:	Turbocharger com Wastegate valve	29
Figura 16:	Navio Tanque Sterna President	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MOTOR DIESEL	11
2.1	O Ciclo diesel	12
3	O TURBOCOMPRESSOR	14
3.1	Auguste Rateau	15
3.2	Alfred Buchi	16
3.3	Primeiro teste com motores diesel	17
3.4	Início do Desenvolvimento em série	18
3.5	Energia para alimentar um turbocompressor	19
3.6	Componentes de um turbocompressor	20
4	FUNCIONAMENTO DO TURBOCOMPRESSOR	22
4.1	Sistema de turbo compressão	23
4.1.1	Boost (Aumento de Pressão)	24
4.1.2	Turbo Lag	25
4.1.3	Boost Threshold	26
4.2	Turbina de geometria variável	27
4.3	Wastegate	28
4.4	Válvula de alívio/ blow-off valve/ anti surge	29
4.5	Intercooler	30
4.6	Teste de campo no Sterna President	30
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

A ampla aplicabilidade dos motores a diesel, nos dias de hoje, em maquinários pesados e gerais, só é realidade devido a alta eficiência destes sistemas em comparação a outras alternativas. A comprovada superioridade não se dá apenas sobre a alta taxa de compressão da qual é utilizada nos motores de ignição espontânea, mas também com o advento da otimização da queima e conseqüente redução da emissão dos óxidos de nitrogênio (NOx), que são os principais gases causadores do efeito estufa.

No início do século passado quando o turbocharger surgiu, o seu aprimoramento prático só se tornou possível devido a invenção do sistema de injeção direta de combustível. O propósito do turbo carregador é aumentar a massa e a pressão ar disponível ao motor. Para o mesmo volume, o aumento da densidade do ar disponível ao processo de combustão, mais combustível poderá ser injetado e queimado com mais eficiência.

O uso do turbo compressor, já está consolidado nos projetos de motores a diesel. A inovação decorre na incrementação de sistemas suplementares de alta precisão do sistema de injeção de combustível. Pesquisas de aumento da eficiência estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de sistemas mais robustos e complexos como o sistema de variação da geometria da turbina (VTG), que permite por meio da regulagem do empalhetamento da turbina, proporcionar ao turbocompressor máxima eficiência independente de sua rotação e do fluxo de gases de exaustão.

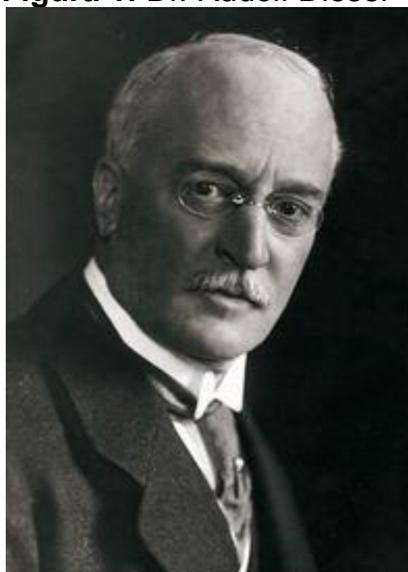
2 O MOTOR A DIESEL

Rudolf Diesel nasceu no ano de 1858 em Paris. Teve sua educação em engenharia, no instituto politécnico de Munich. Após a sua graduação trabalhou como engenheiro de refrigeração, porém sua paixão era o design de motores. Rudolf Diesel projetou diversos tipos de máquinas térmicas, inclusive uma baseada na utilização de energia solar.

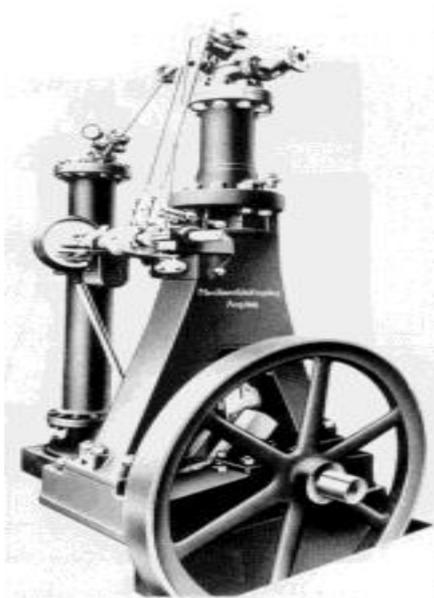
Em 1893, Diesel publicou um artigo cujo título "O motor de combustão interna" descrevendo um sistema de combustão mono cilíndrico. Em 1894, Diesel foi quase morto por sua criação quando esta explodiu, conteúdo foi o primeiro a provar que o combustível poderia entrar em ignição na ausência da centelha. No dia 23 de fevereiro de 1897 patenteou o projeto como "Internal combustion engine" (máquina de combustão interna – figura 2), o motor a diesel era inicialmente desenvolvido para trabalhar com óleo vegetal. Entretanto, foi dado ao produto mais abundante obtido no primeiro estágio do refino do óleo pesado o nome de diesel, em sua homenagem.

Seu reconhecimento veio não só pela sua criação, mas sim por se tornar um respeitado engenheiro. Sua invenção possui dois pontos notáveis, a relação da transferência de calor a processos através das leis da física e sua criatividade no design mecânico o qual foram motivados pela capacidade do Rudolf de enxergar as necessidades humanas. Devido a época, a simplicidade e a enorme aplicação, os motores a diesel foram rapidamente e largamente incorporados ao mundo, revolucionando a industrialização, substituindo diversos sistemas mecânicos a vapor que até então movimentavam fábricas, trens, navios, etc.

Figura 1: Dr. Rudolf Diesel



Fonte: www.dieselduck.info.

Figura 2: Máquina alternativa a vapor

Fonte: www.dieselduck.info.

2.1 O ciclo diesel

Devido à necessidade dos navios transportarem maiores quantidades de carga, estes estão se tornando cada vez maiores e mais pesados. Nos tradicionais, de grande porte, o motor responsável pela propulsão geralmente apresenta alto torque e baixa rotação.

O fato notável do ciclo diesel é pela combustão ser causada essencialmente pela combinação dos fatores da compressão da mistura ar + combustível. Devemos ter em mente que quanto maior o cilindro no qual o pistão faz o seu movimento alternado, maior a quantidade de combustível que pode ser admitida e, como consequência, maior a potência entregue.

Por didática analisaremos o ciclo termodinâmico ideal em quatro partes ilustrada na (figura 3).

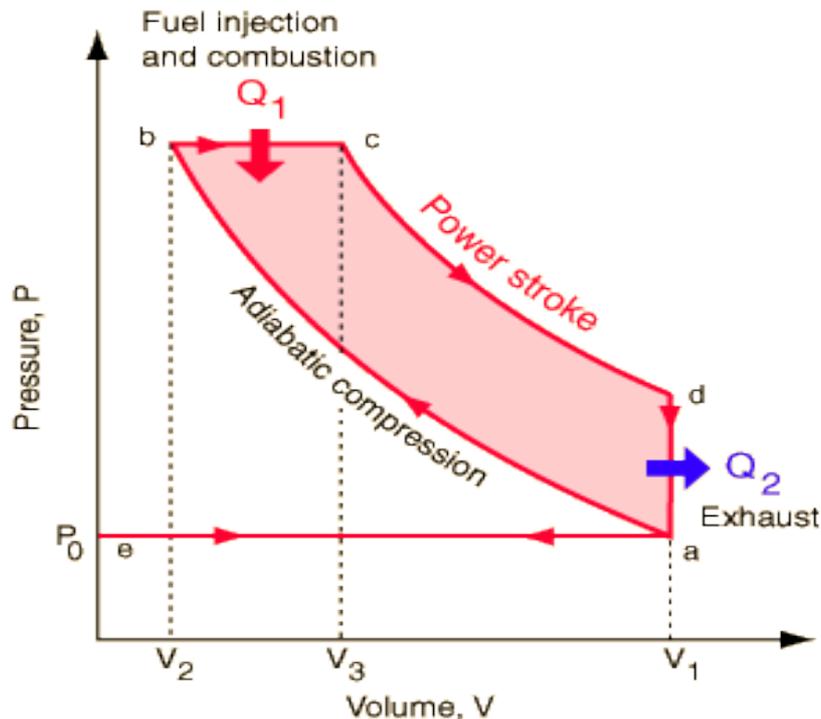
E – a: a massa de ar é injetada no cilindro por diferença de pressão, a pressão positiva no caixão do ar de lavagem é superior a pressão na câmara e suficiente para que o ar “limpo” flua naturalmente para compor a nova mistura, inclusive expulsando alguma restante proveniente da queima anterior. A – b: a massa de ar é comprimida, pela inércia armazenada no volante do motor a massa de ar é comprimida de forma adiabática, elevando sua pressão a ideal para que a combustão do óleo ocorra.

B – c: o combustível é injetado e sua queima ocorre de forma espontânea. Devido a alta pressão e temperatura a autoignição ocorre de forma isobárica.

C – d: imediatamente após a combustão, o sistema realiza trabalho diretamente sobre o eixo. Devido a liberação da energia contida no combustível, o sistema transforma a energia química em vários outros tipos de energia como térmica, vibração, sonora e inclusive a energia mecânica do qual é utilizada para produzir movimento.

D – a: o produto da combustão é expelido. Novamente devido a diferença de pressão existente dentro do cilindro e a atmosfera, os gases produzidos dentro do cilindro tendem a fluir para fora da câmara. 15

Figura 3: Ciclo diesel

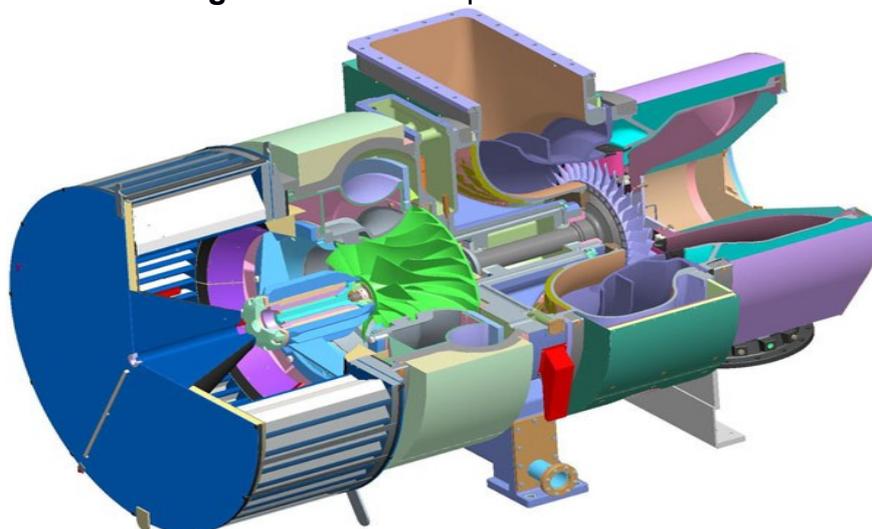


Fonte: en.wikipedia.com.

3 O TURBO COMPRESSOR

De acordo com a Garrett (Honeywell, 2008), um turboalimentador é um componente que torna o motor mais potente, sem aumentar seu tamanho e peso. A potência do motor está limitada a quantidade de ar que ele pode aspirar. O turboalimentador fornece maior quantidade de ar ao motor, fazendo com que o combustível seja queimado de maneira mais eficiente, com melhor aproveitamento e consequente aumento de potência.

Figura 4: Turbocompressor Marítimo



Fonte: Mitsubishi Turbocharger.

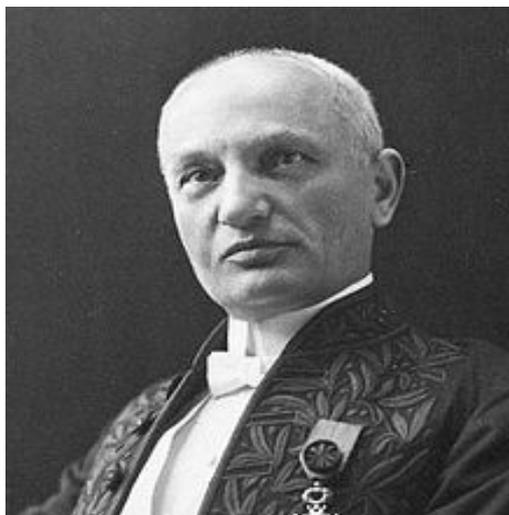
A pressão de superalimentação típica fornecida por um turbocompressor é de 6 a 8 libras por polegada quadrada ($lb\ pol^2$). Como a pressão atmosférica normal é de aproximadamente $14,7lb\ pol^2$ ao nível do mar, o turbo coloca 50% mais ar no motor. Com isso, espera-se um ganho de 50% na potência do motor, mas, por não haver eficiência na mesma proporção, é normal atingir um ganho de 30% a 40%.

Uma causa da ineficiência vem do fato de que a potência para girar a turbina não é livre. Ter uma turbina no fluxo de escapamento aumenta a restrição de saída dos gases queimados. Isso significa que, no curso de escapamento, o motor tem que empurrar uma contrapressão. Isso faz diminuir um pouco a potência. (HOWSTUFFWORKS, 2008).

3.1 Auguste Rateau

Auguste Rateau foi um dos pioneiros no desenvolvimento da máquina turbo compressora.

Figura 5: Fotografia de Auguste Rateau



Fonte: fr.wikipedia.com.

No final do século 19, um gênio francês, professor Auguste Rateau, inventou o compressor centrífugo. Por volta de 1899, Auguste desenvolveu um protótipo com rotação de 20000 RPM que comprimia a taxa de $0.5\text{m}^3/\text{s}$ o ar atmosférico para a pressão de 1.5 bar (absoluto).

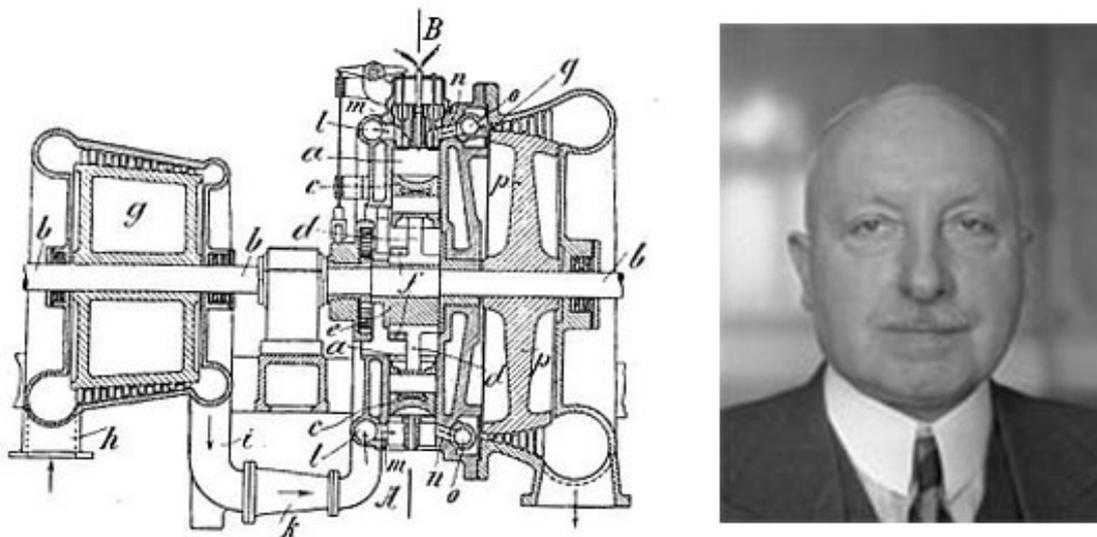
Em 1905, fundou a empresa S.A Rateau, criando em escala industrial o primeiro compressor com 5 estágios montados sobre um único eixo.

Esta incrível máquina, logo foi introduzida nas maiores indústrias de processamento de fluidos, se tornou o compressor mais utilizado por ser capaz de trabalhar com todos os tipos de gases e misturas, desde os mais leves (com menor massa molar) aos mais pesados (maior massa molar), alcançando a pressões de até 800 bar.

Em 1906, a Brown Boveri & Cie comprou a licença de Rateau e construiu o primeiro (experimental) compressor centrífugo para a combustão da turbina a gás. Apesar dos testes serem promissores, ela começou a produção em larga escala direcionada apenas para suprir as necessidades das indústrias químicas e mineradoras.

3.2 Alfred Büchi

Figura 6: Primeiro Turbocompressor e seu inventor Alfred Büchi



Fonte: new.abb.com.

Alfred Büchi estudou no Instituto Federal Politécnico de Zurich, graduando em 1903. Foi durante esse ano que ele começou sua pesquisa com a tecnologia de turbo alimentação para aumentar a eficiência do motor de combustão. Em 1905, patenteou a ideia de que os motores de combustão interna teriam uma baixa eficiência devido ao fato de que dois terços de energia são desperdiçados na energia da exaustão. Ele queria capturar essa energia e usá-la como forma de aumentar a eficiência.

Büchi desenvolveu um projeto e o nomeou de “highly supercharged compound engine”. Seria um Motor diesel quatro tempos, um compressor e uma turbina a vapor montados em um eixo comum.

A Tecnologia era simples e idêntica aos turbos compressores atuais. A potência é aumentada, forçando e introduzindo uma elevada massa de ar nos cilindros, com a energia do gás de exaustão usado para acionar a turbina.

Na Sulzer trabalhou no departamento de pesquisa de motores diesel, onde nunca parou de investir em sua ideia, os benefícios da turbo alimentação.

Em 1911 criou uma planta experimental que abriu a oportunidade de desenvolver uma tecnologia mais adiante, Büchi produziu o primeiro protótipo em 1915. Ele demonstrou como poderia ser usado em aviões em contra partida ao problema da

perda de potência devido à baixa pressão em altas altitudes, sua demonstração foi um fracasso.

Apesar de o Turbo compressor funcionar, não era tão confiável e não poderia manter a pressão requerida. Ele apresentou o protótipo a empresas como a antiga Brown Boveri (atual ABB), porém nenhuma se interessou pela ideia por ser considerada indesejada e não econômica. Felizmente, o fracasso em sua demonstração nunca o deteve e ele continuou seu trabalho registrando uma segunda patente, "scavenging patent" em 1915. Dez anos depois (1925), Büchi obteve sucesso produzindo um turbo compressor rentável, ele acoplou o seu turbo compressor em um motor a diesel, aumentando seu rendimento em cerca de 40%.

Anos depois, a invenção de Büchi alcançou aplicação prática. O primeiro uso da tecnologia de turboalimentação foi para grandes motores marítimos, quando o Ministério dos Transportes alemão encomendou a construção dos "Preussen" e "Hansestadt Danzig" navios de passageiros em 1923. Ambos os navios possuíam motores diesel de dez cilindros com saída impulsionado de 2500 cavalos de potência por turbocompressores projetados por Büchi e construído sob a sua supervisão por Brown Boveri (BBC) (agora ABB)

3.3 Primeiros testes com motores diesel

Uma mudança na política interna da Brown Boveri veio em 1923 com a publicação, na Alemanha, de um relatório em ensaios de sobre alimentação de baixa pressão realizada pela MAN.

Estes ensaios, em um motor quatro tempos com 160 RPM, mostrou que com uma pressão de carga de ar de 1,35 bar a potência do motor aumentou 33%, mesmo após a retirada do ventilador de acionamento elétrico (blower).

O uso de gás de escape para acionar o compressor prometeu um aumento de 6-8% na potência bem como o consumo de combustível mais reduzido. Além de tudo isso, a pressão de operação, a combustão temperaturas e a carga de calor nas paredes todos permaneceram dentro dos limites aceitáveis.

Em 1932, uma decisão importante projeto foi feito. Agora que uma solução de otimização técnica foi encontrado, os engenheiros de design da Brown Boveri passaram a formular especificações para uma carta padronizada de turbo compressores. Este ofereceu nove tamanhos, o que corresponde ao compressor, diâmetros variando 110-750 mm. Unidades de eixo horizontal foram denotadas Vtx e a máquinas de eixo vertical Vty.

Muitas de suas características, tais como auto-lubrificação de rolamentos, refrigeração a água e a ampla utilização de peças sobressalentes, foram projetados para tornar o serviço e o trabalho mais fácil, mas a decisão de fazer a produção em série dos turbos compressores modulares foi fundamental, pois significava que eles poderiam ser instalados em uma enorme gama de motores.

A Brown Boveri já sinalizava seu interesse na turbo compressão no ano de 1925, com a compra da patente "Curtis". Esta abrangia o chamado sistema em série, em que o turbo compressor envia o ar comprimido arrefecido para dentro do caixão do ar de lavagem, assim garantindo a partida e operação á baixa carga.

Um estudo interno da Brown Boveri, em 1934 também lidou com a sobre alimentação de um motor diesel dois tempos de 5000 hp. Ele mostrou que um sistema com turbo compressor e aftercooler, a plena carga do turbo compressor poderia enviar ar suficiente para que o motor também funcione a plena carga.

Mais tarde, em 1940, testes foram realizados com um protótipo VTx 750 de fluxo radial em um motor Sulzer dois tempos de 7500hp. Os resultados, porém, foram decepcionantes, e mais testes foram interrompidos.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, os motores de dois tempos com a turbina acionada pelos gases de descarga dependiam de um ventilador para a troca gasosa.

Até o momento, elas apresentavam uma significativa dificuldade devido à baixa eficiência da turbina e do compressor. Assim que compressores e turbinas com maior eficiência foram desenvolvidos, fez da turbo alimentação de motores marítimos uma proposta prática. Depois disso, o uso do turbo compressor aumentou rapidamente, ajudando o motor diesel de dois tempos a alcançar uma superioridade absoluta, com o direito de conduzir o funcionamento lento dos motores marítimos.

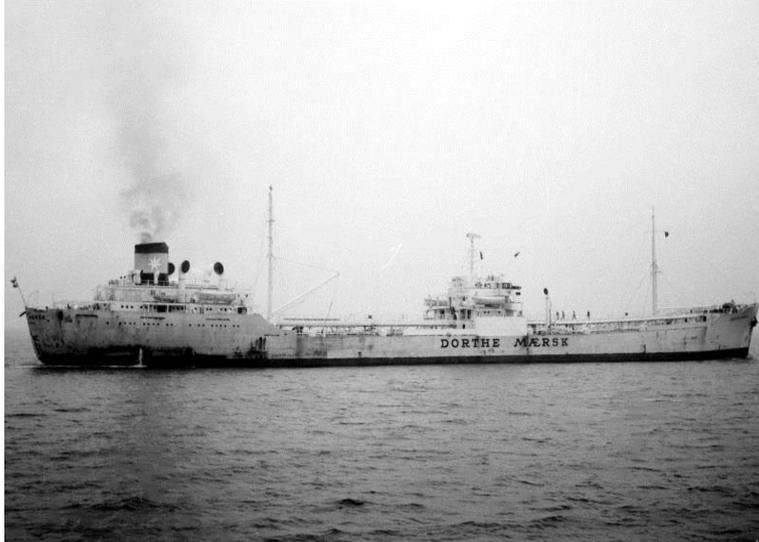
3.4 Início do desenvolvimento em série

O avanço nas pesquisas da tecnologia do turbo preparou o terreno para o próximo ato. Em outubro de 1952, foi lançado o navio tanque de 18.000 toneladas, o Dorthe Maersk, sendo o primeiro navio a ser propulsionado por um motor MAN B & W, 6 cilindros turbo diesel dois tempos.

Entre os anos de 1955 e 1975 o foco muda para o alto desenvolvimento da indústria naval na Ásia. Durante este período, metade da demanda da construção naval,

do mundo, mudou-se para estaleiros no Japão, enquanto estaleiros ocidentais passaram de 80% para menos de 40% em sua carta de construção.

Figura 7: Navio Dorthe Maersk



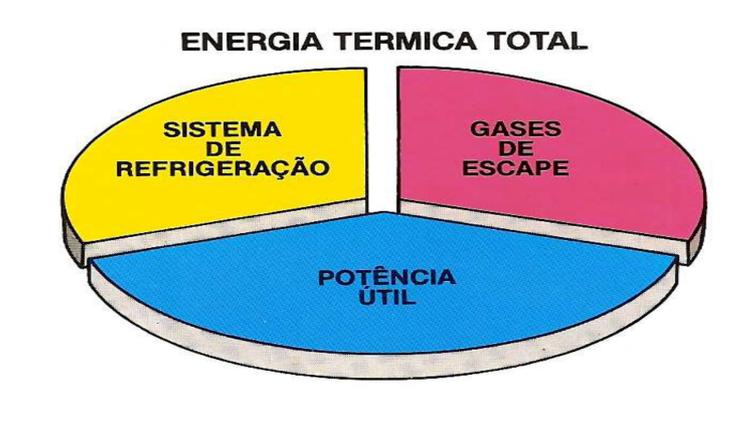
Fonte: www.shipspotting.com.

3.5 Energia para alimentar um turbocompressor

“De toda energia gerada por um motor de combustão interna, apenas um terço é aproveitado para movimento do girabrequim, outro terço se dissipa através do sistema de refrigeração e o terço restante se desperdiça como gases de escape.” (SANTOS; VERAS; CARVALHO, 2002)

O turbo alimentador aproveita-se da energia das fases de escape; o rotor da turbina reage à pressão e velocidade destes gases girando e, por estar unido a um eixo comum, faz girar o rotor do compressor, no outro extremo, à mesma velocidade, comprimido assim o ar que entra no cilindro a uma pressão de até 3 vezes a atmosférica.

Figura 8: Gráfico da energia térmica total



Fonte: GARRET.

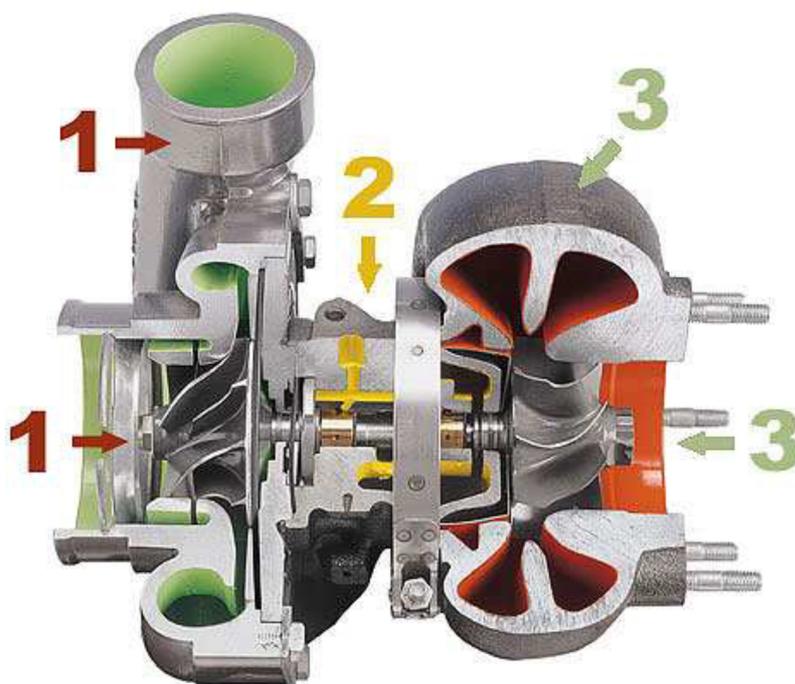
O turboalimentador aproveita-se da energia das fases de escape; o rotor da turbina reage à pressão e velocidade destes gases girando e, por estar unido a um eixo comum, faz girar o rotor do compressor, no outro extremo, à mesma velocidade, comprimido assim o ar que entra no cilindro a uma pressão de até 3 vezes a atmosférica.

3.6 Componentes de um turbocompressor

O turbocompressor é composto de um compressor de ar centrífugo, diretamente ligado a uma turbina centrípeta. O rotor do compressor e o rotor da turbina estão ligados por um eixo suportados por mancais flutuantes, alojados em uma carcaça central. O compressor centrífugo consiste de uma carcaça de alumínio e um rotor. A turbina centrípeta é formada por uma carcaça de ferro fundido e pelo eixo rotor. A carcaça central incorpora o prato do compressor, protetor térmico, anéis trava dos mancais, mancais radiais, mancal de encosto, colar centrífugo, anéis de pistão e anel de vedação.

Podem-se identificar através da figura seguinte, os principais componentes de um turbocompressor e suas respectivas descrições.

Figura 9: Turbocompressor em corte e componentes detalhados



Fonte: Masterpower.

1 - Carcaça compressora e rotor do compressor: O compressor de ar centrífugo tem a função de aspirar o ar atmosférico e comprimi-lo para o interior do cilindro, chegando a atingir até três vezes a pressão atmosférica.

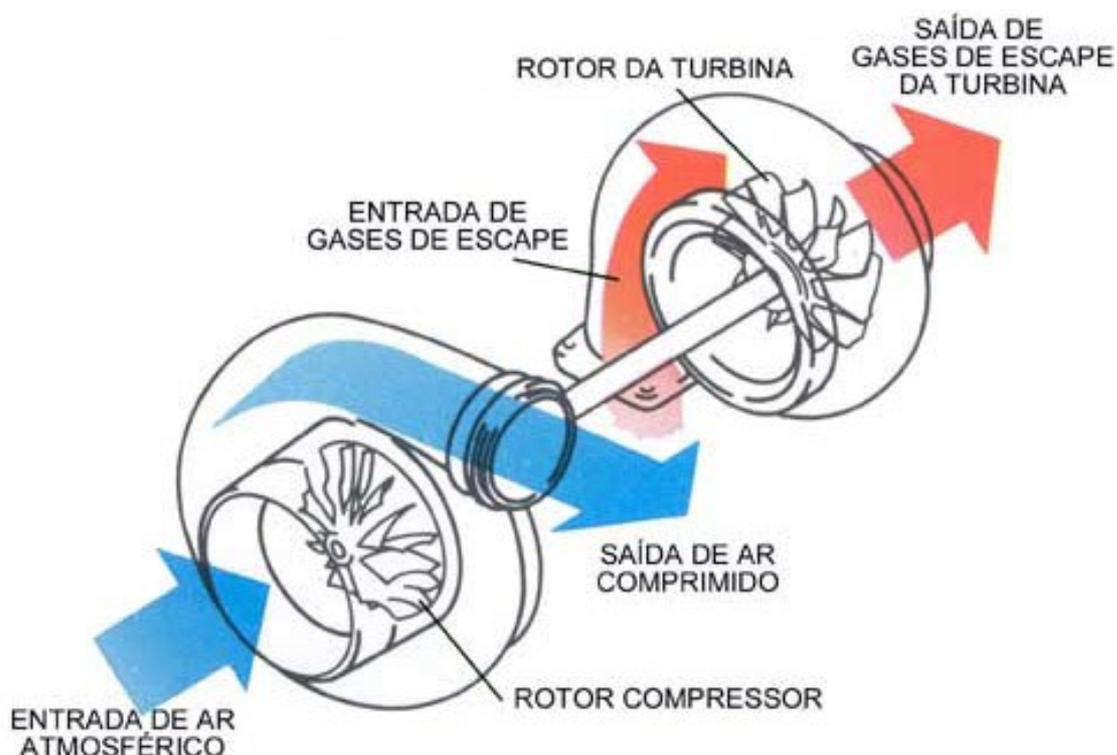
2 - Carcaça central: recebe óleo lubrificante do próprio motor e serve de sustentação ao conjunto eixo da turbina e rotor do compressor que flutuam sob mancais radiais.

3 - Eixo e carcaça da turbina: a turbina centrípeta é acionada pela energia térmica dos gases de escape e tem a função de impulsionar o compressor centrífugo.

4 FUNCIONAMENTO DO TURBO COMPRESSOR

O turbo compressor comprime o ar usado para admissão a uma pressão de até quatro vezes a pressão atmosférica. Essa maior quantidade de ar, permite que mais combustível possa ser queimado como consequência o aumento da potência do motor. Podendo então uma maior potência ser entregue, a partir de um determinado porte do motor ocorre uma economia de combustível, e redução nas emissões. Um motor de aspiração natural tem uma oferta limitada de ar para a combustão.

Figura 10: Funcionamento Turbocompressor



Fonte: www.spaturbo.com.

O compressor centrífugo puxa o ar através de uma roda rotativa no seu centro (impelidor), as moléculas de ar a uma velocidade elevada, fluem radialmente para fora através de uma caixa em forma de concha (voluta). A velocidade do ar é mais lenta depois de sair da voluta, o qual converte a energia cinética em energia de pressão. Este tipo de compressor é um dispositivo de alta velocidade. Os turbo compressores atuais são utilizados na faixa de 80.000 a 130.000 rpm. Um motor normal pode ser executado em apenas 2.500-4.000 rpm. De toda a energia química do combustível disponível para a

queima no motor, cerca de 40% é desperdiçada no escapamento. Um turbo compressor usa parte dessa energia para rotacionar seu compressor a partir da turbina.

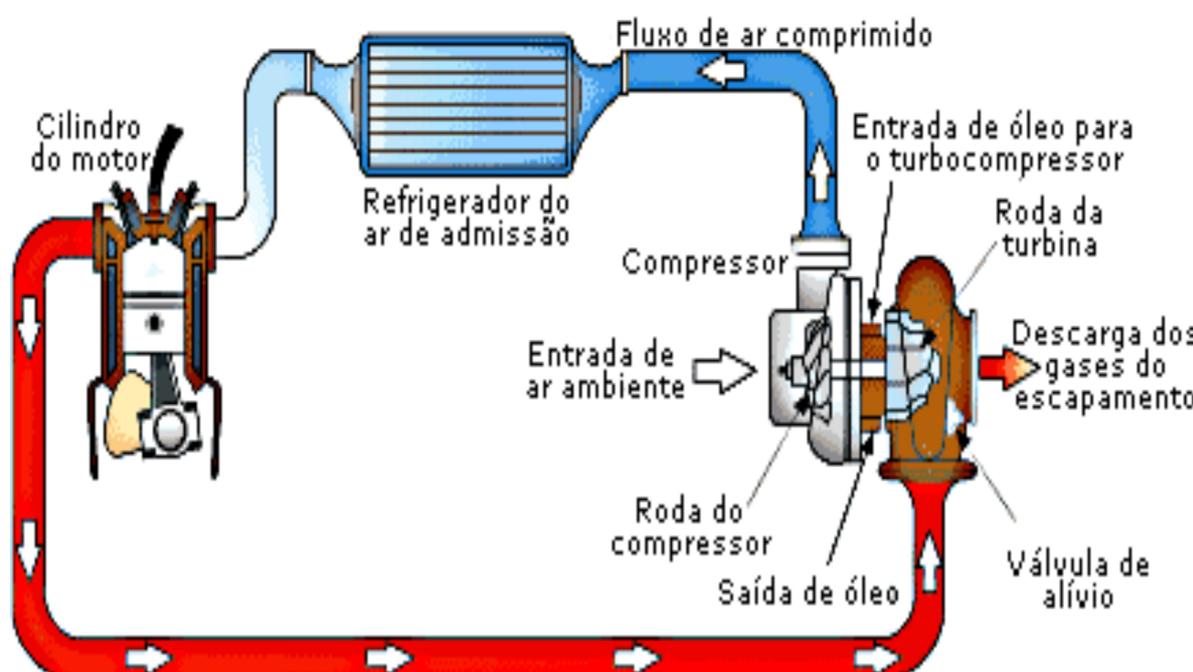
Temos uma relação entre temperatura, volume, e pressão quando falamos de gases. Alta temperatura, alta pressão, e baixo volume são todos estados de alta energia, e baixa temperatura, baixa pressão, e grande volume são estados de baixa energia.

Os gases de descarga misturados a outros pulsos da exaustão chegam à entrada do turbo, uma área restrita. Neste ponto, os gases de exaustão tem um altíssimo nível de energia. Quando ele passa pelo difusor para dentro do corpo da turbina, passará de uma área restrita para uma área maior. Assim, ele expande, esfria, desacelera, liberando toda energia, fazendo com que o rotor da turbina seja acionado e recuperando parte da energia, que de outra forma teria sido perdida.

4.1 Sistema de turbo compressão

Os gases de combustão, ao saírem dos canos coletores de escape, são direcionados para a entrada da turbina e empurram as suas pás, fazendo-as girar.

Figura 11: Sistema do Turbocompressor com seus componentes



Fonte: www.spaturbo.com.

O eixo da turbina, que está conectado ao compressor de ar, faz girar as suas pás, e o ar de admissão é forçado a passar pelos filtros, entrando no compressor, onde é

comprimido e se aquece, e segue pela tubulação de admissão até o trocador de calor onde se resfria, e vai pelos coletores de admissão até os cilindros do motor.

Ao ser comprimido, o ar de admissão está a cerca de 20°C, e como é aquecido a cerca de 120°C, precisa ser resfriado. O seu trocador de calor, é chamado de Intercooler, a fim de baixar sua temperatura que se elevou devido a compressão e aumentar a sua densidade (maior massa de ar por volume), pois a medida que se resfria o fluido, ele terá sua densidade potencializada. Isso tem como objetivo oferecer um maior substrato de ar disponível para a queima de combustível no motor.

O turbocompressor recebe óleo lubrificante e água de refrigeração do motor. Como o turbocharger é acionado pelos gases de escapamento, é preciso que eles tenham suficiente velocidade, para que possam fazer as pás da turbina se moverem com alta velocidade, e isto só ocorre quando o motor está acelerado, em alta rotação. Logo, o turbocompressor sem meios adaptacionais não funciona em marcha lenta, ou em baixas velocidades. Para que ele entre em funcionamento, é preciso acelerar o motor, e mesmo assim, se passam alguns segundos até que o turbocompressor atinja a velocidade necessária. É importante esclarecer que não é recomendado aplicar carga a um motor turbinado logo depois da partida, pois não existe uma boa lubrificação do mancal do compressor neste momento. Deve-se sempre esperar alguns minutos para que o óleo lubrificante se esquite, e possa entrar nas frestas entre as peças do mancal do turbocompressor, garantindo assim uma boa lubrificação. Da mesma maneira deve-se esperar alguns minutos com o motor em marcha lenta acelerada, sem carga, antes de desligar o motor.

4.1.1 Boost (aumento de pressão)

Em aplicações de sistemas de propulsão, boost refere-se ao valor pelo qual a pressão do coletor de admissão excede a pressão atmosférica. Este é representativo da pressão de ar adicional que é conseguido sobre o que seria obtida sem a indução forçada. O boost level pode ser mostrado em um medidor de pressão (boost gauge), geralmente em bar, psi ou possivelmente kPa.

Em aplicações do turbocompressor em motores do ciclo diesel ou otto, pressão do turbo(boost) é limitado a manter o sistema do motor em condição segura, incluindo o turbocompressor, dentro da sua faixa de operação design térmico e mecânico. A condição de Over-Booster de um motor frequentemente pode causar danos em diversas formas, incluindo a pré-ignição superaquecimento e superesforços à estrutura do motor.

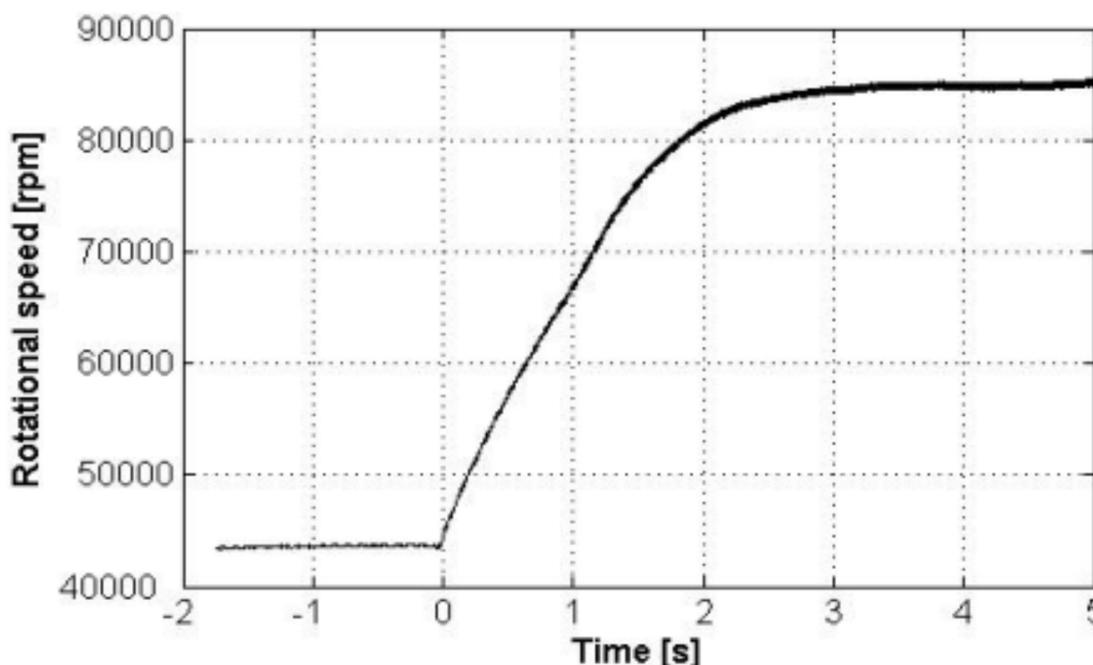
Por exemplo, para evitar bater pino (*engine knocking*) e os danos físicos relacionados com o motor, a pressão do coletor de admissão não deve ficar muito alta, assim, a pressão no coletor de admissão do motor deve ser controlada por alguns meios, como: a válvula de descarga (*wastegate valve*), que redireciona o excesso de energia (vazão dos gases de descarga) que é normalmente encaminhada para a turbina, possa, assim, passar por uma tubulação de by-pass e seguir diretamente para o tubo de escape, reduzindo assim o *boost*. O acionamento da válvula de alívio é feito pela ECU (Unidade Central Eletrônica).

4.1.2 Turbo lag

Lag turbocompressor (turbo lag) é o tempo necessário para mudar a potência do motor em resposta a uma mudança do acelerador, ou seja, é o atraso entre a ação sobre acelerador e a resposta em potência que o motor entregará. Isto é devido ao tempo requerido para o sistema de gases de exaustão consiga acionar o empalhetamento da turbina e gerar o impulso necessário. Inércia de rotação e fricção são os principais contribuintes para lag turbocompressor.

O compressor acionado diretamente pelo eixo de manivelas ou por motor elétrico não sofre este problema.

Figura 12: Gráfico do Turbo Lag



Fonte: www.f2motorsports.com.

Outras configurações, principalmente em motores do tipo V, utilizar dois turbos de tamanho idêntico, mas menores, cada um alimentado por um conjunto separado de

fluxos de escape do motor. Os dois turbos menores produzem o mesmo (ou mais) valor total de boost em relação a um único maior turbo, mas sendo eles menores, podem atingir o seu RPM ideal, e entrega impulso (*booster*), assim, melhor, mais rápido. Uma tal disposição de turbo é normalmente referido como um sistema de duplo-turbo paralelo (*parallel twin-turbo system*).

A retardação pode ser reduzida baixando a inércia de rotação da turbina; por exemplo, através da utilização de peças mais leves para permitir que a turbina seja impulsionada com mais facilidade de modo que o desenvolvimento rotacional ocorra com mais rapidez. Turbinas de cerâmica são uma grande ajuda neste sentido. Infelizmente, a sua relativa fragilidade limita o aumento máximo que pode fornecer. Outra maneira de reduzir o atraso é para alterar a relação de aspecto da turbina, reduzindo o diâmetro e o aumento do caminho de comprimento de fluxo de gás. O Lag também é reduzido pelo uso de rolamentos de folha em vez de rolamentos convencionais. Isto reduz o atrito e contribui para a aceleração mais rápida do conjunto rotativo do turbo. Em motores diesel modernos, este problema de atraso é amenizado através da utilização de um turbocompressor de geometria variável (*Variable-Geometry Turbochargers – VGTs*).

Electrical boosting ("E-boosting") é uma nova tecnologia em desenvolvimento; ele usa um motor elétrico de alta velocidade para conduzir o empalhetamento da turbina à velocidade quando a vazão dos gases de descarga é insuficiente para atender a demanda exigida pelo compressor. Esse implemento tem uma ação efetiva sobre o Lag.

4.1.3 Boost threshold

O "*Boost Threshold*" de um sistema de turbocompressor representa o limite da região, ou seja, o valor mais baixo dentro do qual o compressor funciona eficientemente. Abaixo de uma determinada taxa de fluxo, o compressor produz impulso (*booster*) insignificante. Mais recentes desenvolvimentos do turbocompressor e do motor têm vindo a reduzir o "*boost threshold*".

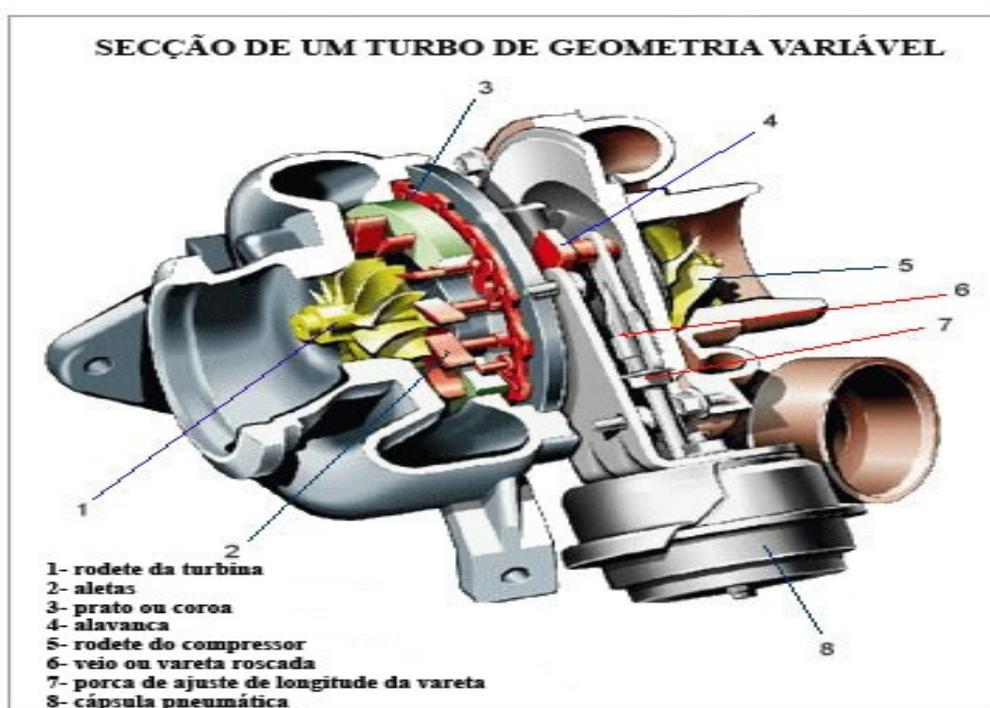
Turbocompressores começar a produzir impulso apenas quando uma certa quantidade de energia cinética está presente nos gases de escape. Sem fluxo de gás de escape adequada para rodar as pás da turbina, o turbocompressor não pode produzir a força necessária para comprimir o ar que entra no motor. O "*boost threshold*" é determinado pelo peso do motor, rotação do motor e o tamanho do turbocompressor. A velocidade de funcionamento (RPM), a qual é suficiente o fluxo de gases de escape para

produzir rotação sobre o empalhetamento da turbina a fim de comprimir o ar que entra no motor é chamado de "*RPM boost threshold*". Reduzir esse limite pode melhorar a resposta do acelerador.

4.2 Turbina de geometria variável

Turbocompressores de geometria variável utilizam aletas móveis para ajustar o fluxo de ar para a turbina, simulando diversos turbocompressores de tamanhos diferentes, otimizando, assim, a curva de potência. As aletas são colocadas na frente da turbina como um conjunto de paredes ligeiramente sobrepostas. O seu ângulo é ajustado por um atuador para aumentar ou bloquear o fluxo de ar para a turbina. Esta variação mantém a velocidade de descarga e contrapressão ao longo das rotações do motor. O resultado pe que o turbocompressor aumenta a eficiência de combustível sem um nível notável de turbo lag.

Figura 13: Seção de um Turbocharger com Geometria Variável



Fonte: divulgação Garret.

Como resultado, é possível regular o fluxo de gás para funcionar com um turbo pequeno em baixas velocidades, fornecendo assim maiores níveis de torque ao motor. No caso de velocidades mais elevadas, o turbo configura-se automaticamente para proporcionar o desempenho de um turbo de maiores dimensões, gerando maior potência

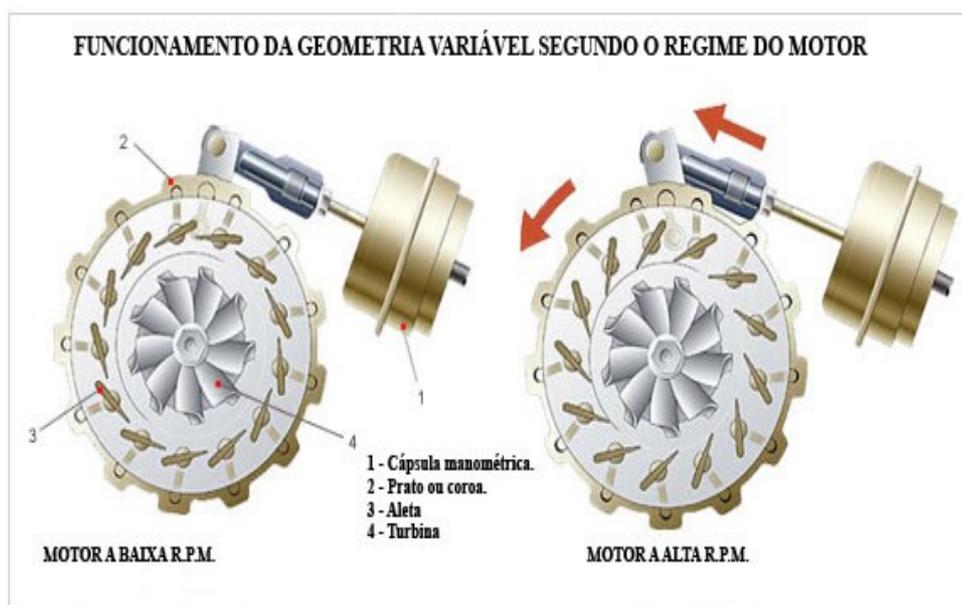
A tecnologia de geometria variável tem, como principal característica, a utilização de aletas móveis na turbina. Em baixas rotações, quando a vazão de ar e de

gases do motor é relativamente baixa, as aletas permanecem mais fechadas, reduzindo a área de passagem, o que aumenta a velocidade dos gases. Com a maior velocidade dos gases, o rotor da turbina gira mais rápido, aumentando a pressão de sobrealimentação e o torque do motor.

Nas altas rotações, quando a vazão de ar e de gases é maior, as aletas ficam mais abertas, o que reduz a contrapressão gerada pela turbina, e assim, possibilita alta potência para o motor. Em síntese, a geometria variável permite que o motor obtenha a pressão de sobrealimentação ideal, independente da faixa de rotação. Portanto, o motor sempre atuará com valor superior ao seu Threshold, obtendo assim alto valor de desempenho do turbocompressor mesmo em baixas rotações.

Além disso, a tecnologia do Turbo de Geometria Variável proporciona torque elevado em baixas rotações, melhora o comportamento dinâmico, ou seja, rápida resposta a variações de carga e a principal vantagem do ponto de vista do armador: o consumo de combustível. Adicionalmente, acentua a recirculação dos gases de descarga, contribuindo para a redução da emissão de Nox (óxidos de nitrogênio).

Figura 14: Funcionamento da Turbina de Geometria Variável



Fonte: divulgação Garret.

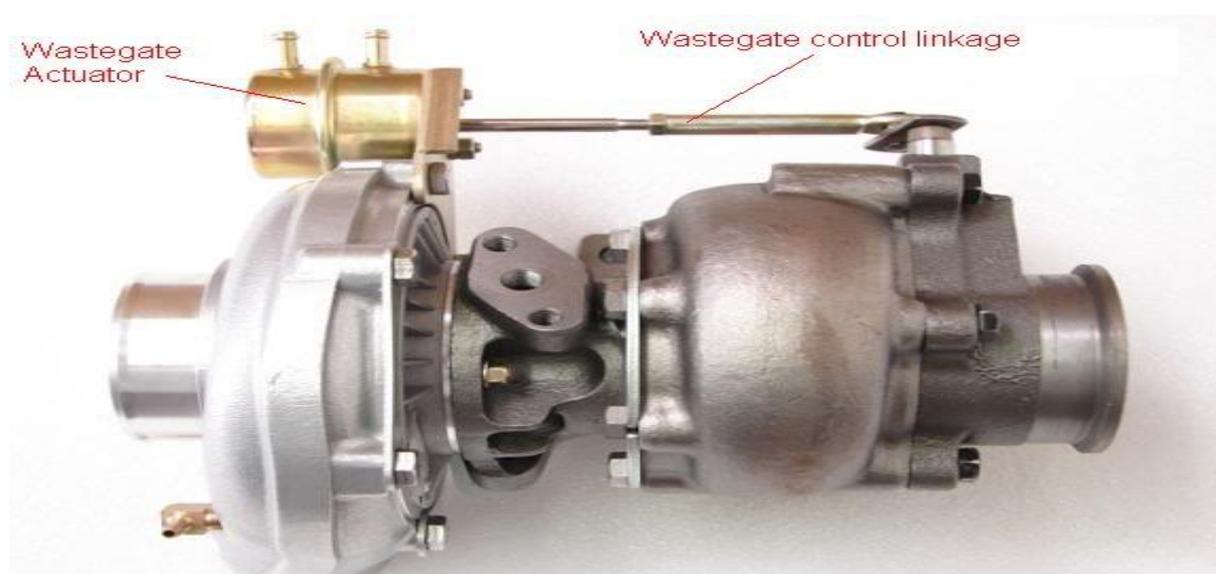
4.3 Wastegate

Um turbocompressor é um dispositivo retroalimentador. Quanto mais pressão é produzida na admissão do ar, mais exaustão de escape se produz devido ao aumento do fluxo de gases de descarga, conseqüentemente a pressão e a rotação na turbina se

tornará maior e poderá ultrapassar o valor máximo suportado por sua estrutura mecânica e material . Diante disso é necessário implementar um dispositivo que limitará o valor da pressão na turbina . A condição de máxima eficiência do compressor é estabelecida dentro de parâmetros de velocidade de rotação ideal da turbina.

O wastegate é uma válvula que abre ao excedemos a pressão desejada, e permite que o fluxo de gases “bypasse” a turbina, ao invés de atravessá-la. Isto diminui a diferença de pressão na saída da turbina, desacelerando-a. Esse controle de pressão, usando um caminho alternativo para os gases de descarga é feito mediante a abertura de uma passagem que é liberada através da pressão sobre uma mola graduada.

Figura 15: Turbocharger com Wastegate valve



Fonte: www.mazdaspeedforuns.org.

4.4 Válvula de alívio / blow off valve / anti-surge

Essa válvula é utilizada nos sistemas de turbocompressor para evitar que o compressor sofra a com a condição de Surge. Quando ocorre alguma interrupção do fluxo de ar para o motor, como por exemplo: fechamento da válvula borboleta do acelerador, a pressão do ar de admissão tende a acumular-se na tubulação e retornar ao compressor podendo causar danos para a estrutura do empalhetamento. Isto é porque o fluxo reverso do ar de volta ao turbocompressor pode submeter a uma alta pressão interna e velocidade de rotação.

Para evitar que isso aconteça, uma válvula de alívio é instalada entre o turbocompressor e a válvula borboleta de distribuição de ar de admissão. Estes são

conhecidos como um anti-surge, bypass, turbo-relief valve, blow-off valve. É uma válvula de alívio de pressão, e é normalmente operado pelo vácuo do coletor de admissão. Essa sobrepressão na admissão pode ser aliviada para a atmosfera ou ser recirculada para retornar ao compressor.

4.5 Intercooler

O intercooler é um resfriador intermediário instalado entre o turbo compressor e o motor, cuja função é baixar a temperatura do ar antes da entrada no motor, assim, entrando ar frio e comprimido, a massa de ar admitida será maior.

Portanto, um turbo compressor instalado em um motor Diesel facilitará o preenchimento do cilindro, introduzindo uma massa de ar maior que a normalmente aspirada, aumentando a taxa de compressão real. Se for instalado um intercooler, a massa de ar introduzida será ainda maior, aumentando ainda mais a taxa de compressão real do motor.

O intercooler é um trocador de calor onde temos o ar de admissão do motor passando pelo interior das tubulações de modo que ele troca calor com o fluxo de ar atmosférico que passará pelas alhetas de sua estrutura ou também podemos ter trocador de calor que usa o resfriamento através da água do mar

4.6 Teste de campo no Stena President

Figura 16 : Navio Tanque Stena President



Fonte: www.worldmaritimenews.com.

O primeiro turbo compressor com o sistema de geometria variável (VTA) da MAN, entrou em operação em um dos motores marítimos, abordo do petroleiro Stena President em setembro de 2007. A embarcação tem uma planta de propulsão com dois motores MAN B&W de seis cilindros 6S46MC-C de dois tempos, de baixa velocidade.

Para efeito de comparação operacional os dois motores possuem condições idênticas, um motor foi equipado com um turbo compressor modelo TCA55 sem o VTA e o segundo com o mesmo TCA55 mas com o VTA. Experiência durante o primeiro ano de operação excedeu as expectativas para a tecnologia VTA em termos de seu efeito sobre o funcionamento do motor e da sua resistência a incrustação causada pelo óleo pesado (HFO).

Com mais de 12.000 horas de funcionamento, o sistema VTA esta 100% livre de problemas, proporcionou uma maior economia de combustível do que o esperado. Dependendo da carga do motor, a redução do consumo específico do motor equipado com VTA foi de 4,4 g / kWh em comparação com o padrão, 2,5 % para mais de economia. Para o motor 6S46MCC avaliado, entregando no hélice 7.860 kW e operando com 72% de carga por mais de 6.000 horas por ano. A economia de combustível total foi de 150 toneladas de HFO por ano, em torno de 100 mil dólares americanos, com base em um preço de abastecimento nos EUA \$700/ton para HFO de 380 cSt viscosidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho pode-se concluir que houve uma grande evolução na tecnologia de turbo compressão, desde a primeira ideia até os projetos atuais. A sobrealimentação dos motores pode aumentar em até 30% a 35% a sua potência e o torque de 35% a 40% em relação ao mesmo motor aspirado. Praticamente, todos os projetos de motores Diesel hoje em dia já nascem turboalimentados. Para que os motores atuais atendam as exigências de desempenho, emissões e consumo de combustível o turbocompressor é obrigatório assegurar que todos os cuidados necessários devido às maiores cargas mecânicas e térmicas já foram tomados no projeto. O turbocompressor também pode ser um ótimo aliado na estratégia de emissões, ajudando, por exemplo, no controle de quantidade de gás de escape que é recirculado.

A sobrealimentação visa ao aumento da potência específica, mas, em geral, no motor Diesel acaba implicando num aumento do rendimento global por razões, como: as perdas mecânicas não aumentam proporcionalmente ao aumento de potência, propiciando uma melhor eficiência mecânica ; as perdas de calor seguem a mesma observação, principalmente quando se utiliza o intercooler ; pode haver saldo positivo de trabalho entre a admissão e o escape

O uso do turbocompressor implica em pequena redução de taxa de compressão, assim como otimização da qualidade de mistura. Materiais mais nobres associados à alta capacidade computacional dos módulos de controle, *Engine Control Unit* – ECU, sensores e atuadores permitem que fabricantes hoje trabalhem com misturas próximas da estequiométrica e até mais pobres em algumas situações, o que favorece a redução de consumo de combustível. Diante disso, o sistema de propulsão com motor turboalimentado faz com que tenha desempenho equivalente de um motor naturalmente aspirado de cilindrada maior, só que com consumo de combustível menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB Turbo System. A Century of Turbocharging, Turbo Magazine 2/2005.

ABB Turbocharging, "Variable Turbine Geometry - VTG", Folheto do produto.

ABB Turbocharging, "Tips for the operator", Turbo Magazine 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BRUNETTI ,Franco. **Motores de combustã interna**. Volume 2/ Franco Brunetti – São Paulo: Blucher, 2002.

GARRETT 10 Perguntas e 10 Maneiras de obter melhor proveito do seu Turbo Garrett. São Paulo, 1996.

GARRET. Em 50 anos de turbo, emissões e consumos dos motores caíram mais de 60%. Disponível em <http://garret.com.br/noticia-2013-02-19.php>. Acesso em: abr2016.

HOWSTUFFWORKS – Como Tudo Funciona. Como funcionam os turbocompressores. Disponível em: <<http://carros.hsw.uol.com.br/turbocompressores.htm> >. Acesso em: abr2016.

WIKIPEDIA. **Turbocharger**. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/turbocharger>>. Acesso em: abr2016.

Martin's duck. The Historical Perspective. Disponível em: <www.dieselduck.info/library/index.html>. Acesso em: abr2016.

SUPER TWO STROKE. "Two-Stroke Design Ready for the future". Disponível em: www.supertwostroke.com/mgxroot/page_10759.html>. Acesso em: abr2016.

TURBOCHARGERSNZ LTD. "About turbochargers". Disponível em: www.turbochargersnz.com/about_turbochargers.html>. Acesso em: abr2016.