

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

**BRUNO FERNANDES NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE TURBO COMPRESSÃO**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**BRUNO FERNANDES NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE TURBO COMPRESSÃO**

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

Orientador (a): Ricardo de Lima Barreto  
Inspetor naval 2004 - CIAGA Vistoriador naval  
2006, ABS. Group services do Brasil.

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**BRUNO FERNANDES NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE TURBO COMPRESSÃO**

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

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

Orientador: Ricardo de Lima Barreto

Inspetor naval 2004 - CIAGA Vistoriador naval 2006, ABS. Group services do Brasil.

---

Assinatura do Orientador

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

Dedico este trabalho a todos as pessoas do qual necessitem de aprender ou consultar informações sobre turbo compressores e seus sistemas. Aos alunos da minha Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante (EFOMM) que este trabalho lhes rendam um grande conhecimento sobre o equipamento e que lhe sirva de fonte de inspiração a fim de buscar e lutar pela realização de seus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda a minha família e amigos pelo total apoio, essencial para essa grande conquista. Aos meus mestres pela inspiração e motivação ao longo dos três anos, tais exemplos foram essenciais para eu manter a voga de estudo e a cabeça erguida. A minha equipe do grêmio de máquinas, em especial o vice-presidente Matheus Vasconcellos, por me ajudar a manter o GMAQ crescendo e ao meu orientador Ricardo de Lima Barreto por me guiar nessa etapa.

"Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser; que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver".

(Amyr Klink)

## RESUMO

A primeira pessoa a registrar a ideia de suprir o motor diesel com ar pressurizado, foi por ninguém menos que o Dr. Rudolf Diesel, já em 1896. A utilização de um turbo compressor para este fim, no entanto, foi resultado do trabalho do suíço, Alfred Büchi. Este sistema alimenta uma turbina com a energia cinética dos gases de escape do motor transformando a em pressão. 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 tornar-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.

Palavra-chave: Motor Diesel. Rudolf Diesel. Turbocharger. Turbo Compressão.

## **ABSTRACT**

Rudolf Diesel was first person to notice the advantages of increasing the pressure inside the combustion chamber, Alfred Buchi developed the main concept of turbochargers. This system supply air 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. Analysing those benefits we find a incredible reduction in NOx emission that allows the engine to run inside restricted areas.

Key-words: Brazilian Merchant. Marine engineer. Diesel Engine. Turbocharger ABB. Rudolf Diesel. Alfred Buchi.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Retrato do Rudolf Diesel	11
Figura 2	Foto do primeiro prótipo de uma máquina alternativa	11
Figura 3	Ciclo termodinâmico de um motor diesel ideal	15
Figura 4	Turbo compressor modelo TCA 33	15
Figura 5	Navio Dorthe Maersk	19
Figura 6	Diagrama dos pulsos de pressão	21
Figura 7	Sistema de Turbo compressão	22
Figura 8	Gráfico do fluxo massa de ar	24
Figura 9	Gráfico turbo lag	25
Figura 10	Modelo matemático de escoamento	26
Figura 11	Modelo escoamento Garret GT 2860R	27
Figura 12	Sistema VGT Honeywell, anel de bocal	29
Figura 13	Sistema VTG ABB, variação por pá rotativa	29
Figura 14	Sistema Wastegate	30
Figura 15	Foto do navio tanque, Stena President	31

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
2	<b>O MOTOR A DIESEL</b>	11
2.1	<b>Desenvolvimento do motor marítimo</b>	12
2.2	<b>Ciclo Diesel</b>	14
3	<b>O TURBO COMPRESSOR</b>	15
3.1	<b>História do turbo compressor</b>	15
3.1.1	Auguste Rateau	16
3.1.2	Alfred Büchi	17
3.2	<b>Primeiros testes com motor diesel</b>	17
3.3	<b>Desenvolvimento em série</b>	19
3.4	<b>Funcionamento do turbo compressor</b>	20
3.5	<b>Sistema de turbo compressão</b>	22
4	<b>VARIAÇÃO DA ÁREA DA TURBINA</b>	23
4.1	<b>Controle do Fluxo de massa de ar</b>	24
4.2	<b>Aceleração da turbina</b>	25
4.3	<b>Mapa de escoamento</b>	26
4.4	<b>Variação da geometria da turbina</b>	28
4.5	<b>Válvula de alívio</b>	30
4.6	<b>Teste de campo</b>	31
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	32
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	33

# 1 INTRODUÇÃO

A aplicação pesada, de motores a diesel, só é realidade devido a alta eficiência destes sistemas em comparação a outras alternativas. Hoje em dia, a comprovada superioridade não se dá apenas sobre a alta taxa de compressão da qual é utilizada nos motores de ignição espontânea, mas também sobre a questão da redução do óxido de nitrogênio (NOx), principal gás causador do efeito estufa.

No passado, o desenvolvimento do turbo compressor só foi possível devido ao invento da injeção direta de combustível. O propósito era 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.

Hoje, o objetivo mais atrativo ao uso do turbo compressor é otimizar o sistema motriz a fim de reduzir as emissões de poluentes, com o objetivo de tanto manter e aumentar a eficiência da queima quanto atender as atuais e futuras legislações mundiais na questão de emissão de gases danosos ao meio ambiente.

O uso do turbo compressor, já está consolidado nos projetos de motores a diesel. A inovação decorre na incrementação de sistemas suplementares. Pesquisas de aumento da eficiência estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de sistemas mais robustos e complexos como a reutilização da energia do gás de exaustão e o sistema de variação da geometria da turbina (VTG).

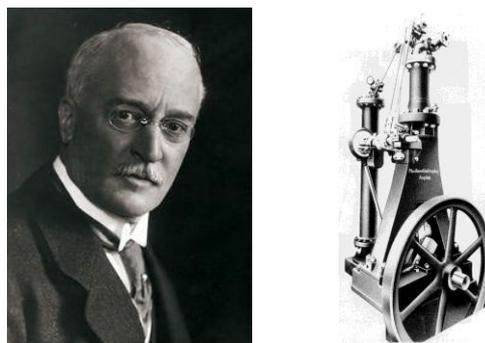
## 2 O MOTOR A DIESEL

Rudolf Diesel (figura 1) 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, contudo 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, Figura 2 – Máquina alternativa a vapor



fonte: [www.dieselduck.info](http://www.dieselduck.info)

## 2.1 DESENVOLVIMENTO DO MOTOR MARÍTIMO

Apesar de alguns contratempos, o motor diesel para propulsão de navios tornou-se cada vez mais popular nos anos do pós segunda-guerra. O desenvolvimento do motor continuou mesmo durante a guerra e foi fortemente intensificado imediatamente após. Na reunião anual da Sociedade Alemã de Tecnologia Marítima (STG) em 1951, uma apresentação intitulada "Desenvolvimento de Motores Diesel na Alemanha após a Guerra", descreveu os fatores de progresso essenciais que contribuíram para um aumento de eficiência e confiabilidade. O orador informou não só sobre as variadas melhorias e novidades sobre partes individuais do motor e sobrealimentação, mas também sobre a "instalação de motores para o processamento de óleo pesado". O período foi caracterizado por um trabalho intenso no uso de óleos residuais pesados em motores a diesel de navio, o objetivo era superar a desvantagem final do motor diesel em comparação os navios com propulsão a vapor:

Os motores modernos beneficiam-se do desenvolvimento que veio com a introdução do controle eletrônico, particularmente de injeção de combustível. A idéia de injeção eletrônica é ainda muito mais antiga. Já em 1979, a tecnologia de injeção common rail foi testada em uma velocidade lenta, em motores de dois tempos da MAN, em Augsburg. Esta tecnologia falhou devido ao ceticismo da indústria de transporte marítimo, naquela época sobre qualquer eletrônica embarcada.

Levaram outros 20 anos até que os primeiros motores ferroviários foram trazidos para o mercado. Mas, então, o desenvolvimento era ininterrupto: Em um período de apenas seis anos, entre 2001 e 2006, todos os principais fabricantes de motores diesel lançaram esses tipos de motores controlados eletronicamente. O desenvolvimento dos motores de dois e quatro tempos ocorreram quase paralelamente. Controle eletrônico de parâmetros essenciais, tais como injeção de combustível e controle de válvulas de escape, permitiu uma otimização de todas as faixas de carga do motor, abrindo completamente novas oportunidades para reduzir ainda mais os níveis de emissões e consumo de combustível.

Em 1912, a STG já havia manifestado sua opinião sobre a demanda crescente de resíduos de óleo pesado: "No cenário de propulsão de navios, devemos e vamos usar, no futuro, apenas os resíduos. Para além de algumas exceções insignificantes que permanecem após o processo de destilação de petróleo bruto. Esses resíduos que até agora têm sido somente descartados". Demorou quatro décadas, até que os primeiros passos foram tomadas.

A observação da STG transmitia os muitos problemas e dúvidas dos quais tiveram de ser superados. Na década de 1950, foram desenvolvidos motores de dois tempos, capazes de queimar óleos pesados que consistem principalmente de resíduos. A combustão de óleos pesados em motores a diesel, não só exigiu mudanças no projeto do motor. Uma vez que os óleos pesados são extremamente de espessura e contém água, bem como a matéria sólida, um sistema de processamento de combustível, sofisticado, teve de ser desenvolvido. Um sistema está instalado nos navios até hoje, com este desenvolvimento, o motor diesel, finalmente, tornou-se o modo dominante de propulsão de navios, e a participação de motores de dois tempos "heavy fuel oil" compatível foi de 80%.

Inúmeras melhorias no projeto seguiriam nos próximos anos, não apenas para dois tempos, mas também nos motores de quatro tempos, que se tornaram capazes de queimar óleo pesado. As melhorias incluíram o uso de materiais com alta resistência mecânica e resistentes ao calor, materiais, práticas cada vez melhores de processamento e de fundição, injeção de combustível em alta pressão e sistemas de sobre alimentação inteligentes. Todos estes desenvolvimentos foram destinados a aumentar a eficiência, a viabilidade e a saída do motor a diesel.

As pressões e temperaturas que poderiam ser implementadas se tornaram mais altas. Na década de 1950, a pressão de trabalho média de um motor a diesel de quatro tempos sobre alimentado foi entre 12 e 14 bar, subindo para 18 bar na década de 1980, 23 bar na década de 1990 e até 27 bar hoje. No mesmo período, as pressões de ignição aumentaram de 80 bar para mais de 200.

## 2.2 O CICLO DIESEL

Devido a 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.

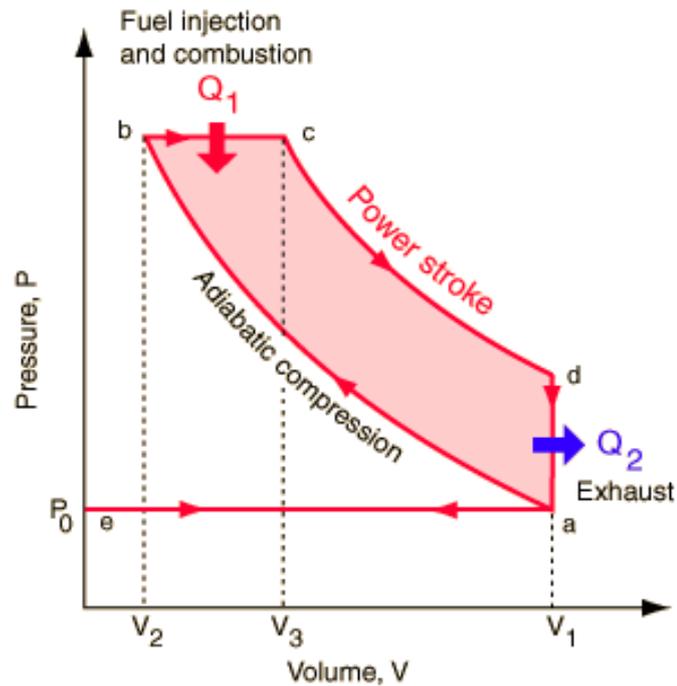
A – b: a massa de ar é comprimida, pela inércia armazenada no volante do motor a massa de ar é comprimida de forma adiabática, elevando sua pressão a ideal para que a combustão do óleo ocorra.

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.

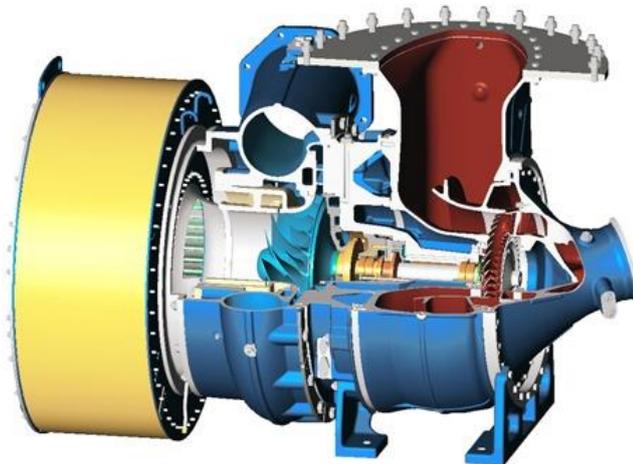
Figura 3: Ciclo diesel



fonte: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

### 3 O TURBO COMPRESSOR

Figura 4: Turbo compressor



fonte: [www.marinediesels.info](http://www.marinediesels.info)

Os gases de descarga, provenientes do motor, a certa temperatura e pressão, fluem através do invólucro de entrada do gás de descarga e do anel expansor (nozzle ring) para o rotor da turbina. “De toda energia gerada por um motor de

combustão interna, apenas um terço é aproveitado para movimento do virabrequim, outro terço se dissipa através do sistema de refrigeração e o terço restante se desperdiça como gases de escape.” (SANTOS; VERAS; CARVALHO, 2002), porém é um erro comum pensar que o rotor da turbina (lado quente) é acionado unicamente pela energia cinética da exaustão dos gases. Mesmo que a energia cinética do fluxo contribua para o trabalho do rotor da turbina, a grande maioria da energia transferida vem de diferentes fontes.

### **2.1.1 AUGUSTE RATEAU**

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

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 flúidos, 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.

### 2.1.2 ALFRED BUCHI

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 idéia 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 usa-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 idéia, 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 idéia 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%.

### 3.2 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.

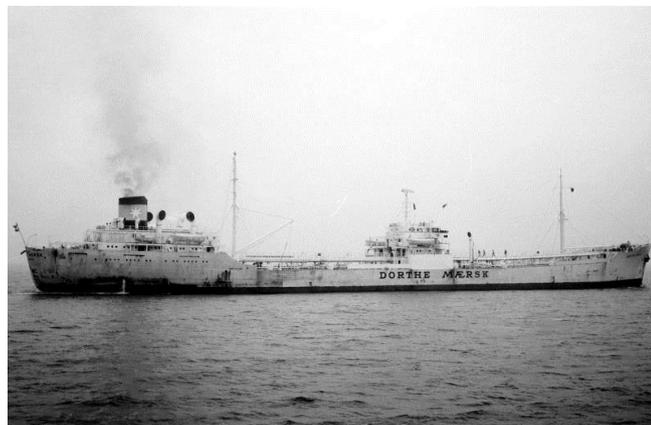
Logo após a Segunda Guerra Mundial, os motores de dois tempos com a turbina acionada pelos gases de descarga dependiam de um ventilador para a troca gasosa. Até o momento, elas apresentavam uma significativa dificuldade devido à baixa eficiência da turbina e do compressor. Assim que compressores e turbinas 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.

### 3.3 O INICIO 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 (figura 5), 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 5 – Navio Dorthe Maersk



fonte: [www.shipspotting.com](http://www.shipspotting.com)

### 3.4 FUNCIONAMENTO DO TURBO COMPRESSOR

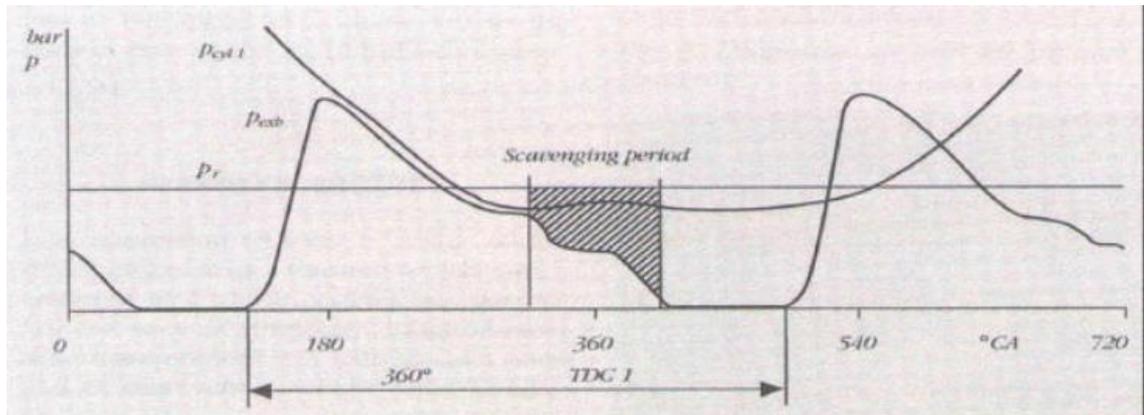
O turbo compressor comprime o ar usado para admissão a uma pressão de até quatro vezes a pressão atmosférica. Essa maior quantidade de ar, permite que mais combustível possa ser queimado como consequência o aumento da potência do motor. Podendo então uma maior potência ser entregue, a partir de um determinado 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.

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 (figura 6) 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.

Figura 6: Diagrama dos pulsos de pressão



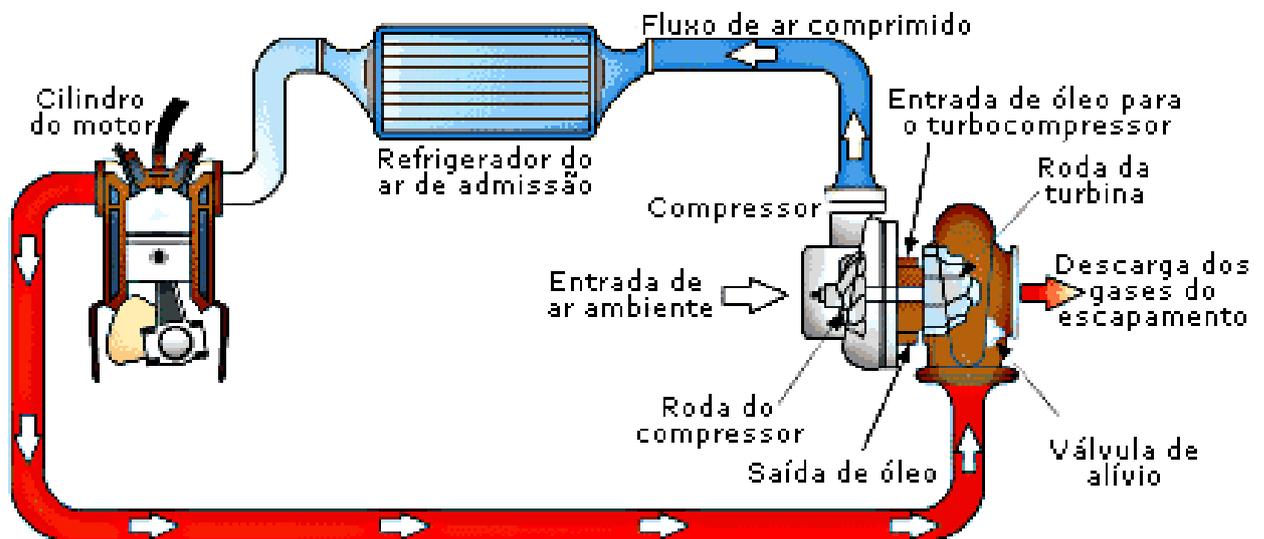
fonte: [www.fueltech.com.br](http://www.fueltech.com.br)

Isto é um fenômeno mensurável, colocando-se um termômetro na entrada e saída do turbo, será notada uma diferença na temperatura. Isto significa que: “a quantidade de trabalho realizado pelo turbo compressor é determinada pela diferença entre a pressão de entrada e saída”, Isto porque Aumentando a pressão na saída, elevar-se-a a diferença de pressão, os gases da exaustão poderão se expandir melhor e gerar mais energia. Esta energia acionará a turbina, acionando a turbina mais rapidamente.

Os gases de descarga, após realizarem trabalho, deixam o turbo compressor em direção ao tubulão de descarga, dando continuidade ao processo. O compressor aspira o ar necessário para a operação do motor através do filtro. O ar entra axialmente e é descarregado radialmente nas partes interna da voluta. A velocidade do ar é aumentada pela ação das palhetas do compressor, assim essa velocidade é convertida em pressão através do difusor da voluta.

### 3.5 SISTEMA DE TURBO COMPRESSÃO

Figura 7: Sistema de Turbo Compressão



fonte: [www.spaturbo.com.br](http://www.spaturbo.com.br)

A turbina é acionada pelo gás de descarga de forma que, esta é posicionada após a válvula de descarga a fim de aproveitar a alta pressão. Isto significa que precisamos de um coletor especialmente dimensionado para resgatar a mesma pressão e o mesmo poder energético de todas as câmaras, para que não ocorra uma sobre pressão em determinado cilindro devido a má distribuição do escoamento do gás.

Na saída do compressor, o ar comprimido que alimentará o motor, passa por um sistema de refrigeração, a fim de baixar sua temperatura devido a compressão e aumentar a sua densidade (maior massa de ar por volume) com o objetivo de oferecer um maior substrato de ar disponível para a queima.

A figura 7, mostra conceitualmente a localização relativa do turbo compressor em relação ao cilindro e suas válvulas de admissão e escape, bem como a tubulação que é necessária para ligar-la a câmara. No entanto, um trocador de calor tem a desvantagem de que ele introduz uma defasagem ao tempo de resposta de aceleração do sistema. Na condição de cruzeiro, quando o acelerador é subitamente aberto, o compressor agora precisa primeiro pressurizar o ar dentro do trocador de calor (aftercooler) antes de poder alimentar o motor. Isso faz com que ocorra um

atraso entre o momento em que o acelerador é acionado ao tempo que o motor responde. No entanto, a temperatura de ar mais baixa permite que mais energia possa ser gerada a partir do aumento dos componentes (ar + combustível), assim como permite uma operação do motor mais estável e o fornecimento de energia relativamente constante.

#### **4 A VARIAÇÃO DA ÁREA DA TURBINA**

Devido às diferentes características (alternativas) de fluxo do fluido de exaustão do motor de combustão interna, os dispositivos de máquinas roto dinâmicas, ou seja, o compressor e a turbina se tornam uma tarefa difícil no que diz respeito ao sincronismo e acoplamento ao motor. O motor de combustão interna funciona como uma bomba de deslocamento positivo, onde seus deslocamentos de gases acompanham uma taxa de fluxo linearmente parecido com a velocidade do motor.

A faixa operacional de um motor a diesel para serviços pesados é de 100 a 200 rpm, enquanto motores menores podem trabalhar em uma faixa operacional ainda mais ampla. Surge a questão de como obter uma elevada densidade de ar na entrada, ao longo de toda a faixa de operação de modo que motores de menores tamanhos também possam se utilizar do turbo, sem sacrificar a energia de saída da turbina. A resposta se daria num equipamento com características semelhantes a de uma válvula, isto é, partindo da seguinte equação: “a proporção de pressão através da turbina é proporcional a densidade e o quadrado da velocidade de fluxo”.

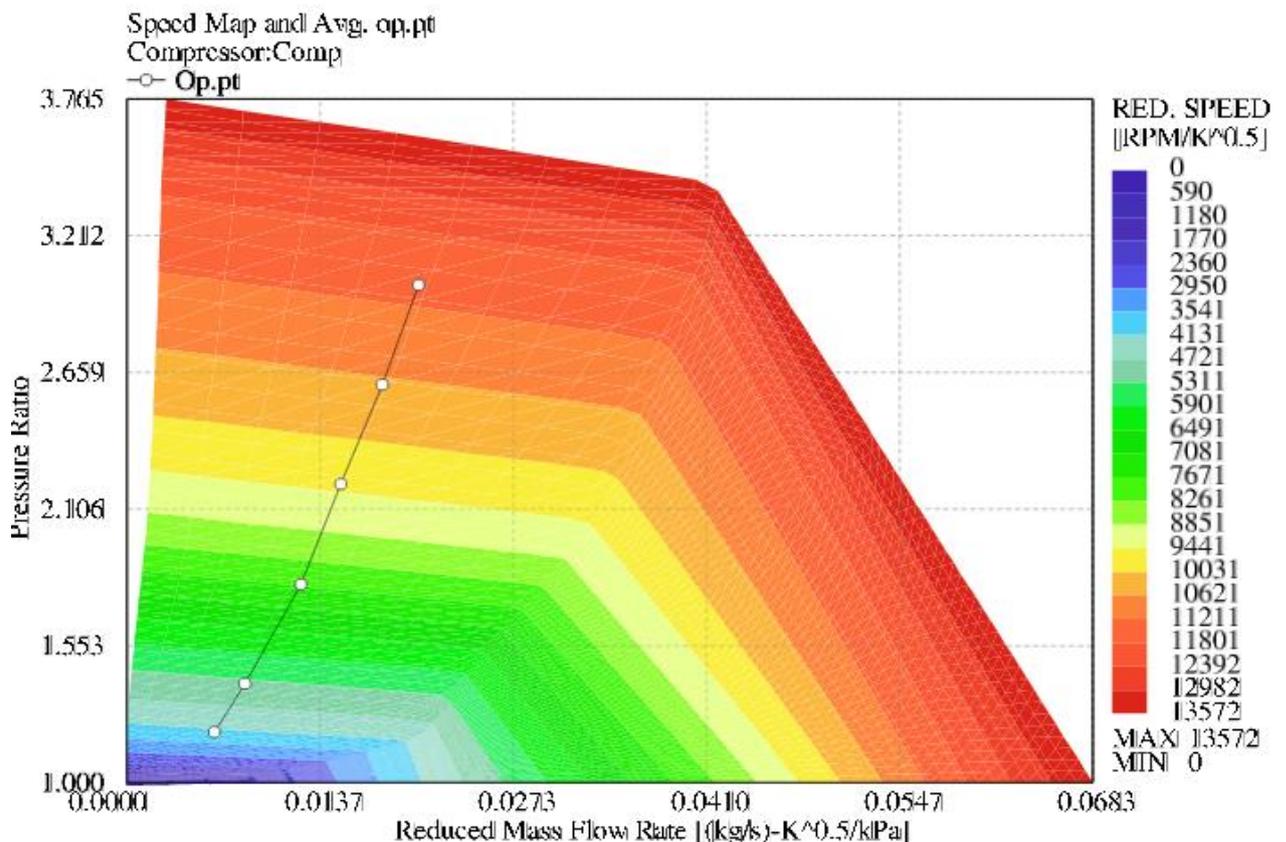
Em motores de baixa rotação, o coeficiente de expansão é pequeno em toda a turbina, portanto a potência de saída também é pequena. Pensando nisso, os engenheiros pensaram em uma forma de controlar essa pressão de saída em toda a faixa de operação do motor, desde a baixa rotação até a mais alta. Desenvolveram uma “válvula reguladora” na admissão da turbina, com isso gerencia-se de forma eficiente a pressão de saída, reduzindo e até eliminando as limitações de uma turbina em motores de baixa velocidade, isto é, que apresentam baixa taxa de fluxo de massa de ar.

#### 4.1 CONTROLE DO FLUXO DA MASSA DE AR

A taxa de fluxo volumétrico através do compressor é controlada pela área de entrada e velocidade do fluxo de gás no impelidor da turbina. A velocidade de rotação do impelidor controla o escoamento tangencial de fluxo no compressor, assim, a entrada de energia é limitada pela velocidade máxima do compressor, devido a limitações das propriedades de material do compressor.

Uma vez que a velocidade de rotação não influencia diretamente na taxa de fluxo de massa de ar para o rotor, a sua faixa de operação é relativamente pequena. Como demonstrado por Baines (2005), a faixa de vazão para compressor centrífugo é exponencialmente decrescente com a taxa de pressão, do qual é limitada por uma zona de “estrangulamento” como apresentado na figura 8.

Figura 8 – Gráfico de Fluxo da Massa de ar

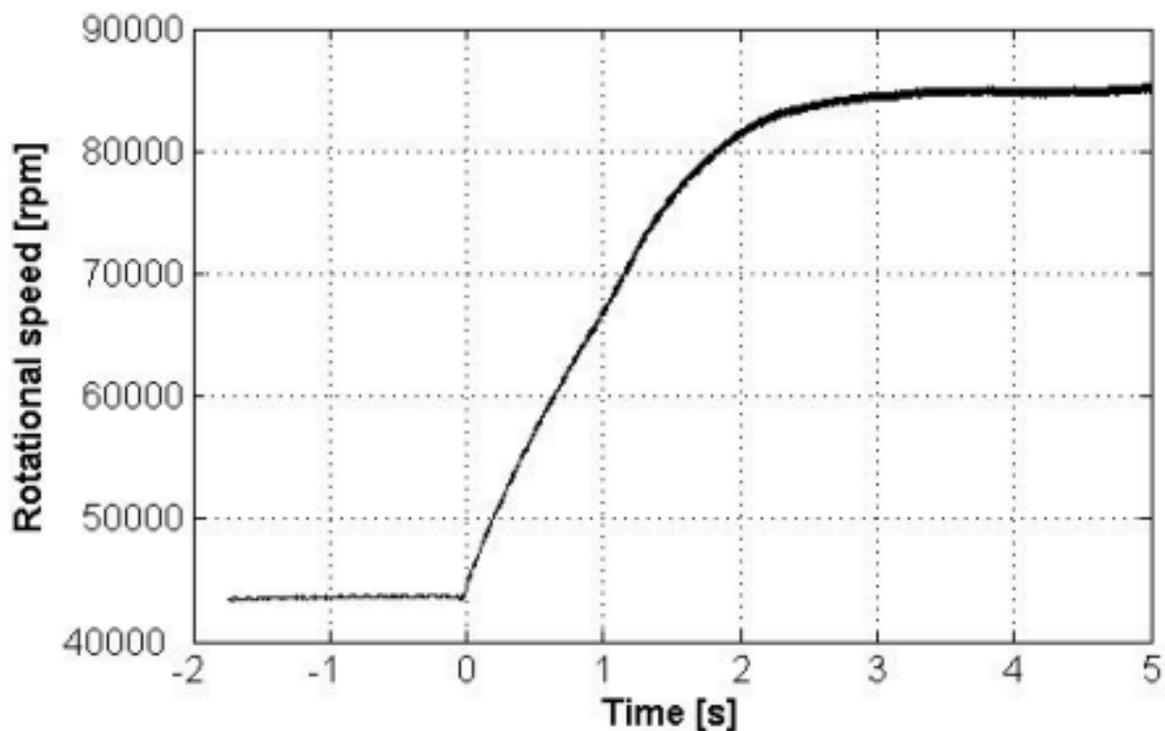


fonte: Manual ABB, Turbo compressor modelo VTR 4

## 4.2 ACELERAÇÃO DA TURBINA – “TURBO LAG”

Pela falta de ligação mecânica entre o turbo compressor e o eixo de manivelas. A energia fornecida a turbina deve acelerar o conjunto do eixo do turbo compressor para então tornar possível que o compressor produza um aumento de pressão . O tempo que leva para o turbo compressor começar girar é chamado “turbo lag” (Figura 9). A figura a baixo mostra um exemplo típico do processo de aceleração de um turbo compressor para uma demanda de carga total instantânea. Para melhorar a sua resposta de baixo desempenho em baixas velocidades, um turbo compressor menor poderá ser utilizado, mas ele se tornará um problema em altas rotações do motor.

Figura 9 – Gráfico do Turbo Lag



fonte: [www.f2motorsports.com](http://www.f2motorsports.com)

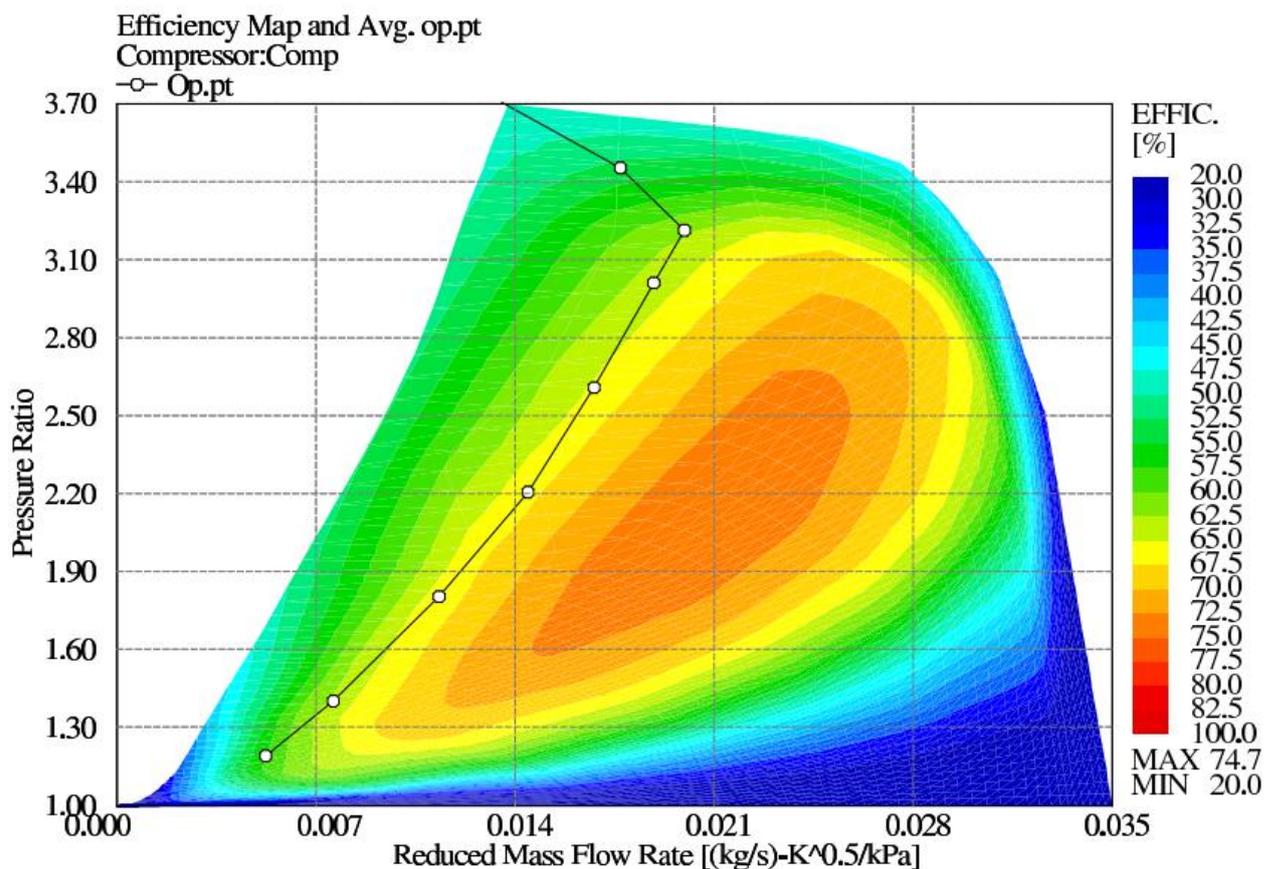
Devido a sua massa inercial e a alta necessidade de taxa de fluxo, para a mesma pressão de acionamento ele responderá com baixo desempenho de velocidade. Pela baixa aceleração mecânica dos gases de descarga, não será suficiente para o turbocompressor produzir aumento de pressão, ou seja, há uma velocidade limite de impulso, que não deve ser confundido com “turbo lag”. Uma maneira de melhorar estes problemas é a utilização turbinas de geometria variável, que de muitas

maneiras melhorou o sistema de turbo compressão em geral, possibilitando melhor correspondência as diversas linhas de motores. Uma solução para contornar estas barreiras é o sistema de variação da geometria da turbina.

### 4.3 MAPA DE ESCOAMENTO – “FLOW MAP”

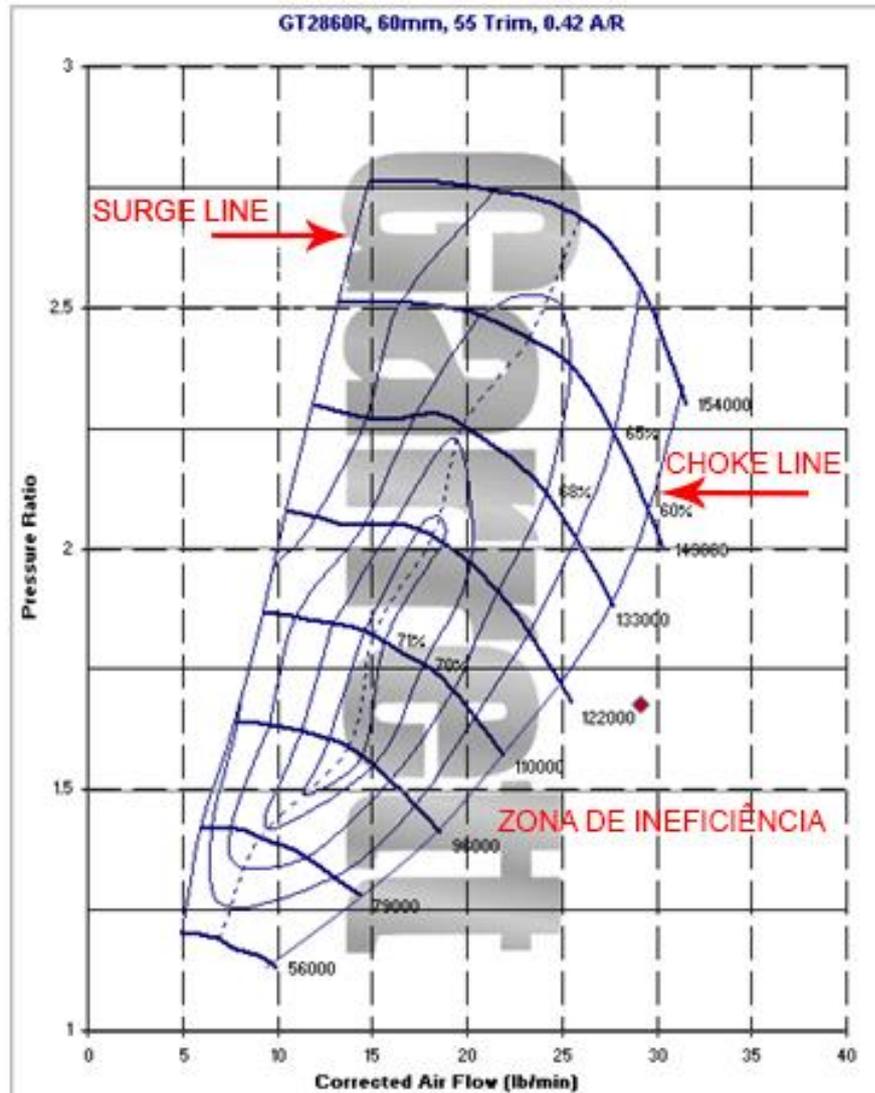
Junto do turbo compressor, o fabricante envia o mapa de escoamento (figura 10), específico daquele turbo compressor. Esse gráfico mostra a vazão de ar que o turbo pode suportar em vários níveis de pressão, em função da velocidade de rotação aproximada e da eficiência global.

Figura 10 – Modelo matemático de escoamento



fonte: manual ABB, Turbo compressor modelo VTR 4

Figura 11 – Modelo de escoamento Garret GT 2860R



fonte: manual do produto

A determinada eficiência, (figura 11) à esquerda o gráfico é limitado pela “surge line”. Mais a esquerda dessa linha acontece o retardamento do fluxo de ar na entrada do compressor. Com uma vazão muito pequena e a uma razão de pressão muito alta, o ar deixa de aderir ao lado de sucção das paletas do compressor resultando na interrupção do processo de descarga do compressor. O ar através do compressor é revertido até alcançar uma razão de pressão estável com fluxo positivo do ar, a pressão aumenta novamente e o ciclo se repete. Esta instabilidade do escoamento continua em certa frequência e provoca um ruído conhecido como “surging”.

A vazão máxima atingida por um compressor centrífugo é na entrada do compressor (*inducer*). Quando o escoamento alcança a velocidade do som, não é possível nenhum aumento de vazão adicional. Este limite é caracterizado pela “*choke line*” vista no gráfico ( figura 11).

Na zona de ineficiência, enquanto aparentemente o turbo possa comprimir essa grande quantidade de ar com este ganho de pressão, o ar será excessivamente aquecido, submetendo o “after cooler” a uma alta demanda e excessiva pressão de retorno no motor “*back pressure*”.

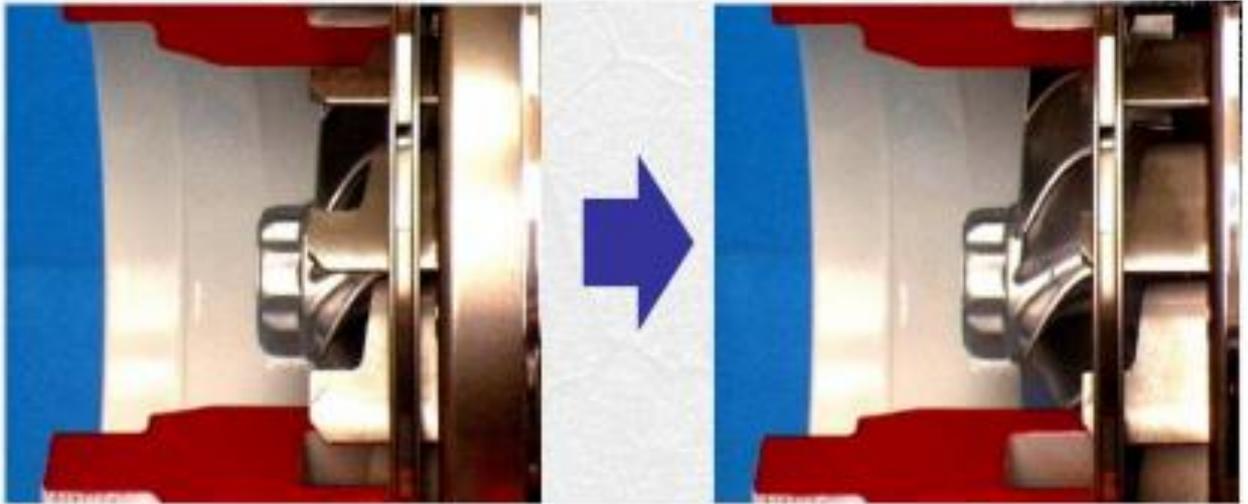
#### **4.4 VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DA TURBINA**

Existem diversas soluções para a variação da geometria da turbina, exemplo: a ABB turbochargers com seu sistema VTG, a MAN com o sistema VTA, a Cummins com o VGT.

Em baixas rotações o sistema é mantido fechado para elevar a pressão montante da turbina, assim, a energia isentrópica dos escapamentos aumenta. Em altas velocidades do motor, a área de entrada é aumentada para evitar sobre pressão na turbina, e pressão alta no coletor de descarga.

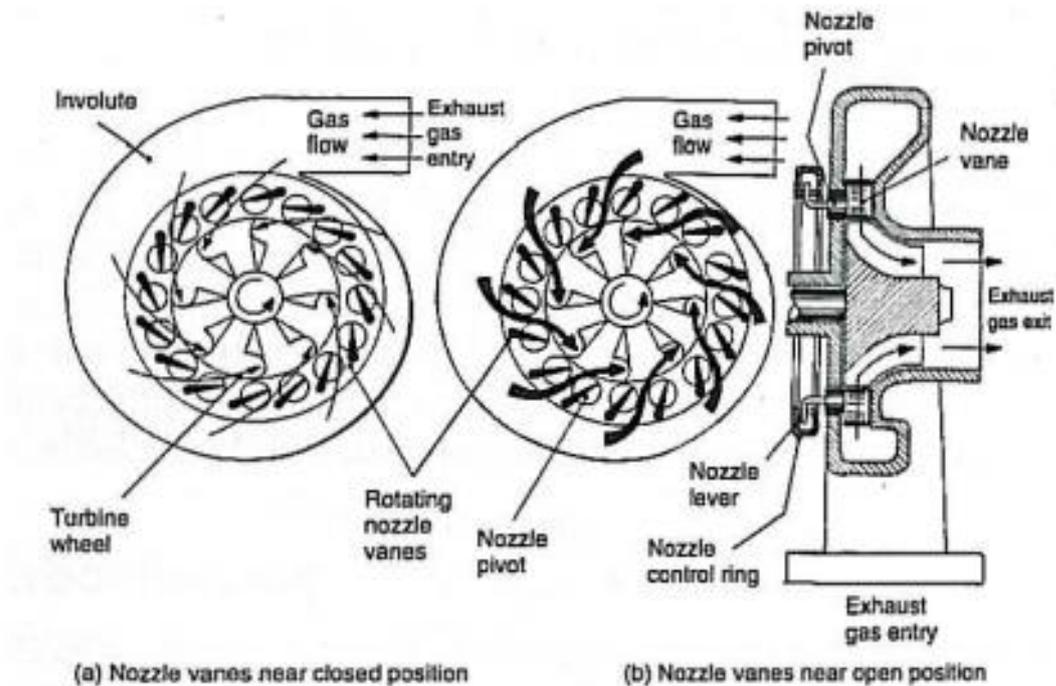
A área de entrada é ajustada essencialmente em dois aspectos, por um anel de bocal deslizante mecanismo (figura 12), ou girando as pás do hélice (figura 13). O deslizamento do mecanismo de argolas do bocal mantém as lâminas de bicos fixos e muda a área de entrada devido a um movimento axial da parede deslizante. Fazendo rodar as pás de bico, a área entre as lâminas assim como as alterações do ângulo de palhetas.

Figura 12 – Sistema VGT Honeywell, Variação por anel de bocal.



fonte: folheto do produto VGT Honeywell

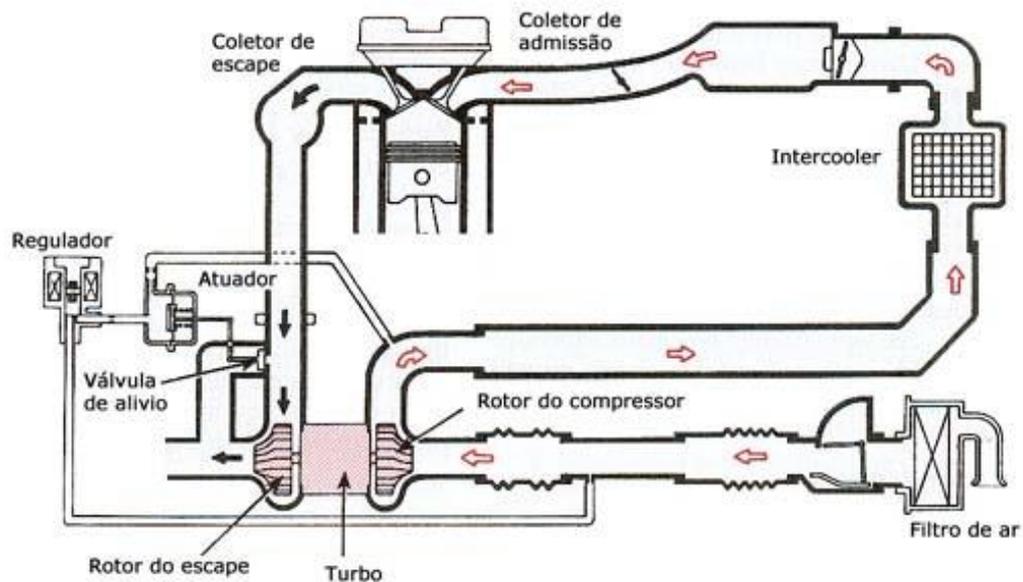
Figura 13 – Sistema VTG ABB, Variação por pá rotativa



Fonte: ABB Turbocharger VTG

## 4.5 VÁLVULA DE ALÍVIO – “WASTE GATE”

Figura 14 – Válvula de alívio



fonte: [www.spaturbo.com.br](http://www.spaturbo.com.br)

Alguns sistemas de turbo compressores estão equipados com uma válvula de alívio. Este dispositivo permite que parte dos gases de escape “bypasssem” a turbina. Com este controle, os turbocompressores podem ser desenvolvidos para terem melhor desempenho em baixas rotações. A válvula de alívio é composta por uma válvula, um atuador, e um regulador. O regulador é composto por um diafragma e uma mola.

A válvula está localizada em um ramal de desvio do escape (figura 14). A baixa pressão, a mola empurra o atuador contra o diafragma movendo a articulação fechando a válvula de alívio. Em alta pressão a mola é comprimida contra o outro lado do diafragma. Com o aumento da pressão de sobre alimentação, há um aumento da rotação do motor, o diafragma move contra a pressão da mola para abrir a válvula e permite que uma porção dos gases de escape para contornem a turbina através do ramal de desvio. A válvula de alívio é predefinida de fábrica e nenhuma regulagem pode ser feita.

## 4.6 TESTE DE CAMPO NO STENA PRESIDENT

Figura 15 – Navio Tanque Stena President



fonte: [www.shipspotting.com](http://www.shipspotting.com)

O primeiro turbo compressor com o sistema VTA da MAN, entrou em operação em um dos motores marítimos, abordo do petroleiro Stena President (figura 11) 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 idéia até os projetos atuais. Diversos são os fatores a serem considerados no que diz respeito a utilização para determinado caso. Dependendo do custo e dos benefícios pretendidos existem diferentes soluções para a instalação do turbo a fim de permitir uma sobre alimentação com sucesso. Conclui-se também que o sistema de controle mais aplicado é o de geometria variável, dentre os benefícios os mais notáveis são: o desempenho em baixa rotação, maior controle no fluxo e pressão de sobre alimentação, e a redução dos gases poluentes em acordo com a MARPOL anexo VI, tendo assim maior controle e permitindo ao navio estar certificado ao TIER II, III e até o IV (futuro).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABB Turbocharger division, "Turbocharging in Switzerland", Turbo Magazine 1/2010.

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

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

Martin's duck. The Historical Perspective. Disponível em:  
[www.dieselduck.info/library/index.html](http://www.dieselduck.info/library/index.html).

Emily Reiter. Turbo charger systems. Disponível em: <http://www.marineinsight.com>.

Winkler Niklas, "Transient simulations of heavy-duty diesel engines with focus on the turbine", Publicação técnica no Royal Institute of Technology, Abril 2008

Rehnberg U. Angstrom H-E. & Olofsson U. 2006 " Instantaneous On-Engine Turbine Efficiency for an SI engine in the closed waste gate region for 2 different turbochargers" SAE Publicação número. 2006-01-3389

SUPER TWO STROKE. "Two-Stroke Design Ready for the future". Disponível em:  
[www.supertwostroke.com/mgxroot/page\\_10759.html](http://www.supertwostroke.com/mgxroot/page_10759.html)

TURBOCHARGERSNZ LTD. "About turbochargers". Disponível em:  
[www.turbochargersnz.com/about\\_turbochargers.html](http://www.turbochargersnz.com/about_turbochargers.html)