

Sobrealimentação automóvel

Adriano Bessa Pinto ^{#1}, Steven da Conceição Valente ^{*2}

[#] *Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 471
4200 - 072 Porto, Portugal*

¹ *1070186@isep.ipp.pt*

² *1111599@isep.ipp.pt*

Resumo — Neste trabalho é abordado o tema da sobrealimentação automóvel, mais especificamente a sobrealimentação por turbo. É descrito os vários tipos de sobrealimentação existentes. Também descreve-se os vários componentes, variações de turbo alimentações existentes e o controlo e manutenção necessários. Por fim além das conclusões retiradas do trabalho dá-se exemplos de turbos utilizados em automóveis e de futuras evoluções.

Palavras-Chave – Sobrealimentação, automóveis, turbo alimentador, turbocompressores

I. INTRODUÇÃO

A potência máxima que um motor pode gerar é limitada pela quantidade de combustível que pode ser queimada dentro do cilindro do motor. Isto é limitado pela quantidade de ar que é introduzida em cada cilindro a cada ciclo.

Se o ar induzido for comprimido para uma densidade superior à do meio ambiente, antes da entrada no cilindro, a potência máxima que um motor de dimensões fixas pode entregar irá aumentar. Isto é o propósito principal da sobrealimentação.

O termo sobrealimentação refere-se ao aumento da densidade do ar (ou mistura) pelo aumento da pressão anteriormente a cilindro do motor. Três métodos básicos são utilizados para realizar isto. O primeiro é a sobrealimentação mecânica onde o motor comprime o ar.

O segundo método é a sobrealimentação por turbo onde um sistema – composto por um compressor e uma turbina num único eixo – é utilizado para aumentar a densidade do ar de entrada (ou mistura). A energia existente no vapor de exaustão do motor é utilizada para mover a turbina do sistema que actua o compressor que aumenta a densidade do fluido de entrada em cada um dos cilindros.

O terceiro método – sobrealimentação por onda de pressão – utiliza a acção de ondas nos sistemas de admissão e exaustão para comprimir a mistura admitida. O uso de afinação do colectador de admissão e exaustão para aumentar a eficiência volumétrica é um exemplo de um método para aumentar a densidade do ar. Um exemplo de um dispositivo de sobrealimentação por onda de pressão é o *Complex*, que utiliza a pressão existente no vapor de exaustão para

comprimir a mistura admitida pelo contacto directo dos fluidos em canais de fluxo estreito.

Os arranjos mais comuns utilizam uma sobrealimentação mecânica ou sobrealimentação por turbo. Combinações de um compressor movido pelo motor e de um turbo também são utilizadas. A utilização 2 níveis de sobrealimentação por turbo é viável para providenciar muito altas pressões de aceleração (4 a 7 atmosferas (atm)) para obter um motor de pressão efectiva média mais alta. *Turbocompound*, isto é, uso de uma segunda turbina na exaustão ligada directamente à cambota do motor, é um método alternativo de aumentar a potência do motor (e eficiência). Resfriamento de carga com trocador de calor (um *aftercooler* ou *intercooler*) após a compressão, mas anteriormente à entrada no cilindro, pode ser utilizada para aumentar ainda mais a densidade do ar ou da mistura.

A sobrealimentação é utilizada em motores de 4 ciclos para aumentar a potência por unidade de volume deslocada. Alguma forma de sobrealimentação é necessária nos motores de 2 ciclos para aumentar a pressão do ar fresco (ou mistura) acima da pressão de exaustão para que o cilindro possa ser eficientemente limpo. Com um aumento adicional nos motores de 2 ciclos, a potência também é aumentada.[1]

II. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO TURBO

A alimentação turbo fez 100 anos em 2005 - mas o sonho do seu inventor, o Dr. Alfred J Büchi, tem mais ressonância no século 21 do que quando ele concebeu o conceito, na Suíça em 1905.

Hoje a potência ainda define o turbo, mas este também tem um papel importante a desempenhar na redução do tamanho do motor, controle das emissões e redução do CO₂.

Na Tabela 2 é apresentada a evolução da sobrealimentação turbo através da história, momentos mais importantes, para ver o quão longe a tecnologia chegou. No Anexo 1 pode-se encontrar uma cronologia mais detalhada.[2]

Tabela 1 – Cronologia da Evolução do Turbo

Ano	Evento
1905	Dr. Alfred Büchi J (Engenheiro suíço) patenteou a primeira turbo alimentação dando assim início à era do turbo.
1925	Dr. Büchi patenteou a primeira aplicação da alimentação turbo com o seu sistema de turbo alimentação por pulso.
1984	A Ford, Chrysler, Dodge, Plymouth e Pontiac lançam os primeiros carros com sistemas turbos combinado com injeção electrónica de combustível sequencial multiponto.
1991	A FIAT coloca um turbo alimentador VGT no Croma, igualando-o a um motor diesel de 1,9 litros com injeção directa.
2000	A Smart introduz motores diesel e a gasolina turbo de 0,6 litros – o micro turbo GT12 da Garrett® com design patenteado de rolamento integrais é apresentado no motor a gasolina.

Uma das marcas reconhecidas na construção de turbos é a Garrett. A evolução do turbo VNT™ da Garrett® começou em 1990 quando o TD2502 foi lançado com base no modelo TB25. Controlado por um actuador de pressão ligado por uma mangueira directamente na saída do compressor e a tecnologia em sua forma mais simples é a seguinte: as palhetas posicionadas na posição de vazão mínima (fechada) de ar para o motor. Isto para baixas rotações. Em altas rotações, as palhetas se abrem. Isto permite que a rotação do eixo rotor turbina e rotor compressor maximizem em condições de baixa rotação para dar lugar ao torque rápido, e ainda assim permitir o fluxo de gás em alta e reduzir a pressão de retorno para potência máxima do motor.

O princípio VNT™ foi então aplicado na gama GT de turbos e o desenvolvimento tem tomado em relação à versão original (chamado de geração 0) até a 3ª geração, actual. Os turbos têm sido reforçados pelas últimas optimizações. As gerações diferentes de VNT™ podem ser identificadas por seus números de modelo, começando com GT (1ª geração), GTA (2ª geração), GTB (3ª geração) e GTC (optimizando a 3ª geração). Cada uma dessas gerações representa uma melhoria significativa no design, desempenho e durabilidade do mecanismo VNT™.[3]

O design avançado do turbo da última geração 3 permite optimizar a escolha do material de cada componente para atender aos requisitos de desempenho dos clientes OEM. Para o conjunto de Vanes (palhetas),s utiliza-se 8 diferentes materiais, cada um escolhido especificamente para o trabalho que tem de executar. Algumas peças são também nitradas, que proporciona melhor dureza, resistência ao desgaste, à fadiga e resistência à corrosão.

Para perceber melhor a evolução da tecnologia turbo, na Tabela 2 é apresentada uma comparação entre um dos primeiros turbos existentes e um dos actuais.

Tabela 2 – Comparação de turbos [4]

	1626	2002
Modelo do turbo	TO5	GT2560
Modelo do carro	Oldsmobile Jetfire	Ford Focus RS
Cilindros do motor	V8	4
Capacidade do motor (litros)	3,5	2
Potência (cv)	215	215
Eficiência máxima do compressor	58% a 1.5:1 e 5,4 kg/min	>78% a 2.0:1 e 9 kg/min.
Velocidade máxima (r.p.m)	90.000	146.000
Peso (kg)	11	7

III. TIPOS DE SOBREALIMENTAÇÃO

A sobrealimentação é a operação que consiste em introduzir nos cilindros de um motor de combustão interna uma quantidade de ar (motores diesel) ou de mistura (motores de explosão) superior à que poderia ser naturalmente aspirada. Torna-se desejável tanto para compensar as quebras de densidade do ar em altitude como ainda, e sobretudo, para elevar a potência do motor por unidade de volume útil (cilindrada) e por ciclo (rotação).

A sobrealimentação efectua-se por compressão prévia utilizando compressores volumétricos accionados directamente pelo motor (sobrealimentação mecânica) ou, preferentemente, utilizando para este fim a energia dos gases de escape, fazendo-os incidir sobre uma turbina que, por sua vez, movimenta um compressor centrífugo (turbo-alimentação).

A. Sobrealimentação mecânica

O compressor de accionamento mecânico também conhecido por Compressor Volumétrico ou de deslocamento positivo não é nenhuma novidade, já é usado desde há muito tempo, a Volkswagen já utilizava um compressor centrífugo inventado em França em 1905. Ford e Toyota usaram um compressor do tipo *Roots* inventado em 1854. A utilização do compressor volumétrico esteve em desuso a nível comercial até que em finais da década de 80 teve um novo impulso quando fabricantes como Lancia e Volkswagen iniciaram a sua aplicação em modelos de grande fabricação em série.

Os compressores volumétricos são bombas de ar. Este mecanismo pode produzir facilmente uns 50% mais de potência do que os motores atmosféricos do mesmo tamanho. Os antigos compressores produziam um ruído considerável mas os actuais são muito mais silenciosos.

Como ocorre com os alternadores, os compressores volumétricos são accionados pelo movimento natural do motor, geralmente por uma correia, noutras ocasiões, por uma corrente ou conjunto de engrenagens. Giram a uma velocidade de 10.000 a 15.000 rpm, pelo que são muito mais lentos que os turbocompressores. A pressão de sobrealimentação está limitada pela velocidade do motor (não é necessária válvula de descarga como nos turbocompressores).

Devido à sua forma de accionamento oferecem um maior par motor a baixas rpm que um turbocompressor. Outra vantagem do compressor volumétrico frente ao turbocompressor é que tem uma resposta mais rápida (não sofre do efeito "lag" do turbo). A desvantagem principal do compressor é que rouba potência ao motor devido ao seu accionamento mecânico e esta perda aumenta à medida que sobe o regime de voltas do motor, pelo que não facilita um rendimento eficaz do motor.

Existem diferentes tipos de compressores volumétricos como: *Roots*, *Lysholm*, *G*, *Sprintex*, e alguns mais mas menos importantes. O funcionamento baseia-se principalmente na aspiração de ar que entra numa câmara e que diminui de volume.

1) Compressor Roots

O compressor de deslocamento mais popular é o de tipo *Roots*, denominado "compressor de lóbulos". Neste caso existe um par de rotores em forma de "oito" ligados a rodas dentadas que giram à mesma velocidade mas em sentidos contrários bombeiam e comprimem o ar conjuntamente. Este compressor mais que comprimir o ar o que realmente faz é impulsioná-lo.

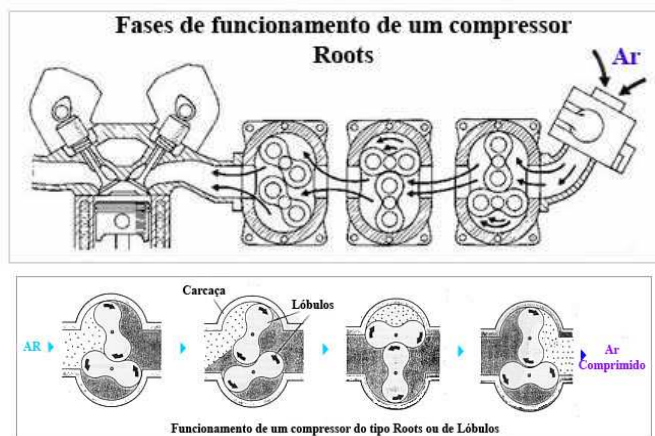


Figura 1 - Funcionamento de um compressor do tipo Roots [5]

Os rotores apoiam-se nuns eixos. Tendo em conta de que nunca se tocam entre si, não se desgastam. Em ocasiões, os lóbulos são helicoidais e, noutras, de corte recto. Esta versão prática com rotores de dois óvulos origina uma pressão relativamente baixa, e consegue criá-la muito rápido ao aumentar o regime de voltas.

A potência absorvida situa-se, para uma sobrepessão de 0,6 bares e passagem máxima de ar, em 12,2 cv. O rendimento do compressor *Roots* não é muito alto e mais, piora com o aumento do regime de voltas. A capacidade de incremento só supera os 50% numa gama muito limitada. O ar comprimido sobe de temperatura extraordinariamente.

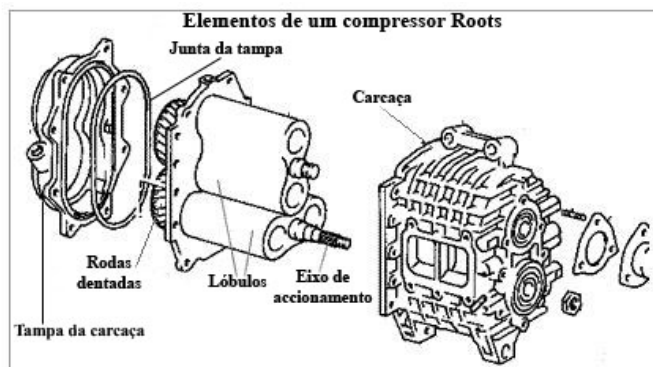


Figura 2 - Componente de um Compressor Roots [5]

Os compressores de lóbulos tendem a "pulsar" a baixas velocidades, não obstante, os de rotores helicoidais tendem a aumentar ao máximo as ditas pulsações. Os rotores podem ter dois ou três lóbulos. Um rotor de três lóbulos tende a pulsar menos que um de dois. O rotor de três lóbulos dá melhores resultados graças a uma maior complexidade na sua construção, para se mover só necessitava roubar ao motor 8 cavalos de potência, para conseguir 0,6 bares de pressão. Quando o motor não está submetido a uma grande carga, a descarga do colector de admissão, gira os rotores como um moinho de vento, roubando por tanto menos potencia do motor.

A altas rotações, mover o compressor, supõe para o motor uma grande perda de potência, para reduzir este esforço marcas como a japonesa Mazda utilizam um compressor com poleia de accionamento de diâmetro variável. Isto consegue-se por meio de uma poleia que é acoplada ao compressor por meio de um sistema de electroíman como o que utiliza o compressor do ar condicionado. Por meio de um botão põem-se em funcionamento o compressor à vontade do condutor.

O compressor cujo funcionamento está baseado no princípio *Roots*, uma característica deste tipo de compressores é a sua capacidade para manter o giro quando se produz uma mudança de velocidades. O compressor é accionado mecanicamente pelo veio de excêntricos do motor mediante uma correia que move entre outros dispositivos, a bomba de água, que forma conjunto com a embraiagem magnética que liga ou desliga a transmissão de movimento ao compressor. A conexão e desconexão da transmissão de movimento ao compressor são geridas pela Centralina da injeção (ECU).

2) Compressor "G"

Os compressores utilizados pela Volkswagen, chamado compressor centrífugo ou compressor "G", apresenta uma forma nas suas câmaras similar a esta letra. As peças alojadas

no seu interior movem-se num movimento excêntrico (não giram). Caracteriza-se por um elemento disposto excêntricamente com estrutura espiral em ambos os lados (espiras móveis), que dá lugar, junto com as carcaças (cárter fixo), também em espiral, a câmaras de volume variável. Deixou de se utilizar na década de 90 devido aos seus problemas de lubrificação e estanquidade. O compressor G era montado nos modelos VW Pólo, Corrado e Golf com os conhecidos motores G40 e G60.

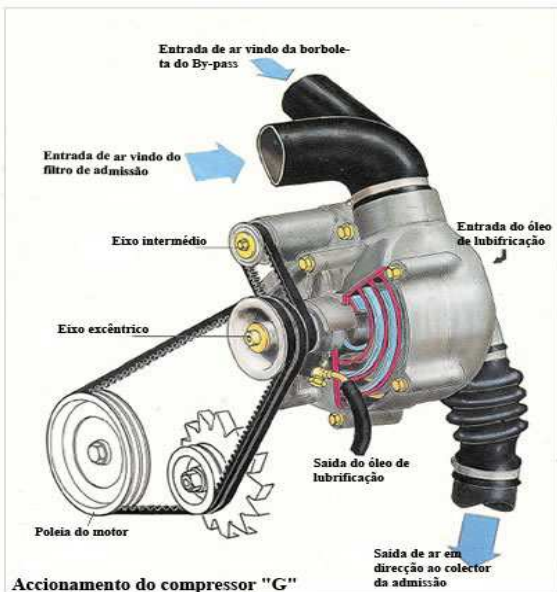


Figura 3 - Compressor G [5]

Devido a que os compressores não funcionam pela acção dos gases de escape, não aquecem, por isso a lubrificação não constitui um problema tão importante como ocorre nos turbocompressores. De facto, as unidades de compressores do tipo *Roots* lubrificam-se com o seu próprio fluxo de óleo SAE 90 das engrenagens (o mesmo da caixa de velocidades). Os compressores são máquinas muito fiáveis, se bem que a sujidade é o seu grande inimigo. As fugas de descarga (do lado da admissão) atraem o pó, que pode arruinar o compressor. As fugas de ar do lado da saída do compressor diminuem o rendimento do motor. Por outra parte, as fugas de descarga podem confundir a Centralina (ECU), fazendo com que a mistura resulte demasiado pobre. Além disso uma fuga no lado da pressão aumenta em excesso a riqueza da mistura. O sensor de oxigénio (sonda Lambda) destes sistemas capazes é de regular a riqueza da mistura de ar e combustível analisando as características do gás queimado, só pode introduzir correcções menores na mistura não pode contrariar o efeito de uma fuga importante. As fugas normalmente são acompanhadas de um som (silvo) que se consegue localizar facilmente escutando a sua procedência.

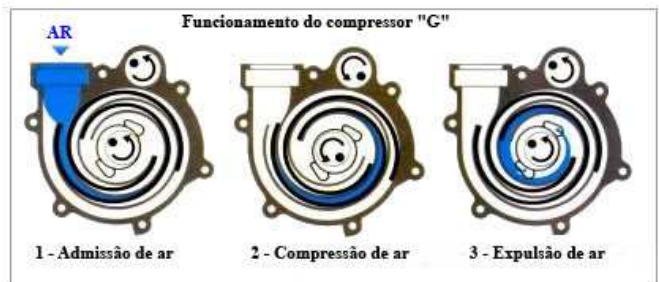


Figura 4 - Funcionamento de um compressor G [5]

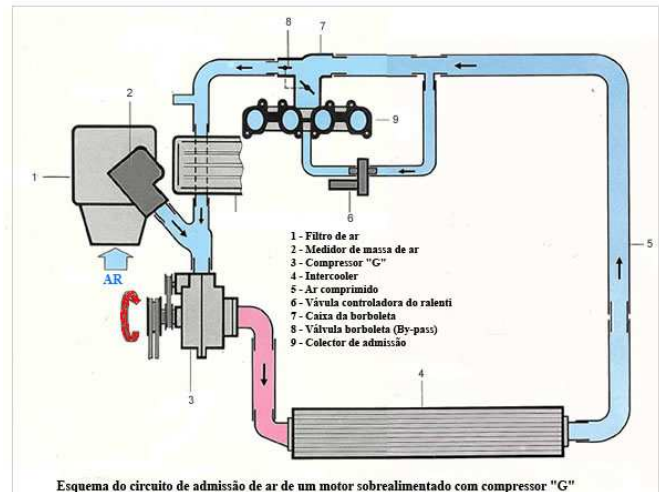


Figura 5 - Esquema de um motor sobrealimentado com um compressor G [5]

B. Sobrealimentação por turbo

Um turbocompressor ou turbo, é um compressor de ar que é usado para admissão forçada de um motor de combustão interna.

Como uma forma de sobrealimentação, o turbo aumenta a densidade do ar que entra no motor para criar mais potência. Um turbo tem o compressor movido por uma turbina, impulsionada pela própria exaustão do motor, ao invés de accionamento mecânico directo como acontece com muitas outras sobrealimentações.

Os primeiros fabricantes referiam-se a turbocompressores. No entanto, o termo foi rapidamente abreviado para turbo. Existe hoje em dia alguma confusão, já que o termo turbocompressor é às vezes utilizado para motores que utilizam turbos accionados pelos gases de escape em combinação com um compressor movido pela cambota do motor ("*twincharging*"). Algumas empresas continuam a utilizar turbocompressor no seu sentido original, utilizando-se por vezes também a expressão turbo alimentador.

O turbo é uma pequena turbina radial movida pela energia dos gases de escape de um motor. Um turbo alimentador é composto por uma turbina e um compressor num veio comum. A turbina converte a exaustão de calor e pressão para forçar a rotação, que por sua vez é usada para accionar o compressor.

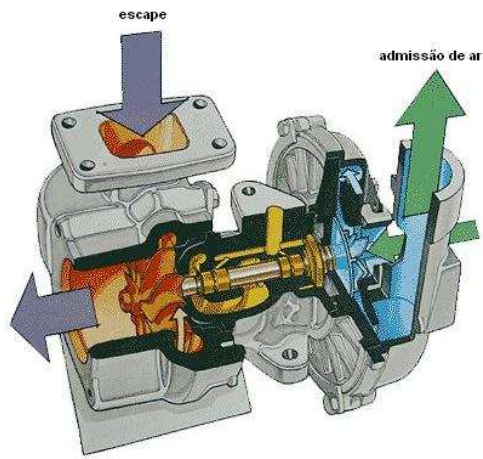


Figura 6 - Representação de um turbo alimentador [6]

C. Sobrealimentação por onda de pressão

Como referido anteriormente além das sobrealimentações mecânica e por turbo existe ainda uma terceira, por onda de pressão, pela dificuldade de explicar o modo de funcionamento, sem um exemplo, em seguida, dá-se o exemplo do *Comprex*.

O *Comprex* aproveita as vantagens do turbo compressor e do compressor volumétrico para fazer uma máquina mais eficaz em princípio, mas logo veremos que também tem os seus inconvenientes. Transfere a energia entre os gases de escape e o ar de alimentação por meio de umas "ondas de pressão" geradas entre as finas paredes radiais de um tambor, que gira graças a uma conexão directa com o veio de excêntricos. Combina por tanto o funcionamento de um turbo compressor ao aproveitar-se da energia dos gases de escape do motor, se bem que o accionamento do seu rotor só requer uma parte muito pequena de potência do motor para o mantimento do processo das "ondas de pressão". Este tipo de compressor funciona muito bem nos motores diesel, mas apresenta desvantagens com a sua complexidade mecânica, funcionamento ruidoso e custos de fabrico.

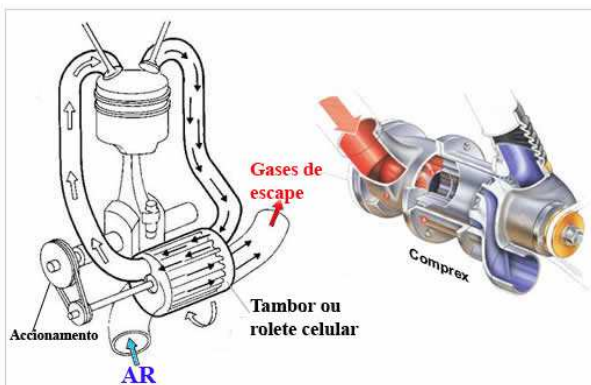


Figura 7 - Modo de funcionamento do Comprex [5]

A. Modo de funcionamento

O objectivo de um turbo é o mesmo que o de um compressor, para melhorar a eficiência volumétrica do motor, resolvendo uma de suas limitações cardeais. Um motor de automóvel naturalmente aspirado usa apenas o curso de um pistão para baixo para criar uma área de baixa pressão, a fim de extrair o ar para dentro do cilindro através das válvulas de admissão. A pressão na atmosfera não é mais do que 1 bar (cerca de 14,7 psi), de modo que, em última instância será um limite para a diferença de pressão entre as válvulas de admissão e, portanto, a quantidade de ar que entra na câmara de combustão. Uma vez que o turbo aumenta a pressão no ponto onde o ar está a entrar no cilindro, uma grande massa de ar (oxigénio) será forçada pela entrada aumentando a pressão no bloco. O fluxo de ar adicional torna possível manter a pressão na câmara de combustão e a mistura correcta de combustível/ar de admissão, mesmo a altas rotações do motor, aumentando a potência e o binário (torque) do motor.

A vantagem do turbo é óbvia - em vez de desperdiçar energia térmica através do escape, pode-se fazer uso dessa energia para aumentar a potência do motor. Ao dirigir os gases de escape para girar uma turbina, que acciona uma outra turbina para bombear ar fresco nas câmaras de combustão com uma pressão superior à atmosfera normal, um motor de pequena capacidade pode debitar uma potência comparável à de concorrentes muito maiores. Por exemplo, se um motor de 2,0-litros trabalhar turbo-alimentado com 1,5 bar pressão de alimentação, este iguala um motor de 3,0-litros naturalmente aspirado. Como resultado, o tamanho e o peso do motor pode ser muito reduzido, conduzindo portanto, a uma melhor aceleração, condução e travagem. O consumo de combustível não é necessariamente melhor neste caso. Um turbo reduz consumo específico, ou seja, reduz o consumo em g/kWh ou g/cvh. Isto significa que se um motor naturalmente aspirado de 60 cv conseguir debitar 80 cv com um turbo, este terá um consumo melhor se utilizarmos 60 cv em ambos os casos, e um consumo similar ou ligeiramente pior se debitar os 80 cv (em relação ao consumo a 60 cv sem turbo). Desta forma podemos afirmar que um turbo baixa o consumo de combustível de um motor.

O compressor aspira o ar ambiente e bombeia-o para o colector de admissão a pressão aumentada, resultando numa maior massa de ar que entra nos cilindros em cada curso de admissão.

B. Componentes

O turbo tem quatro componentes principais. A turbina (quase sempre uma turbina radial) e o rotor impelidor/compressor, que estão cada um contidos na sua própria carcaça cónica em lados opostos do terceiro componente, a parte central do conjunto rotativo (*center housing/hub rotating assembly* - CHRA).



Figura 8 - À esquerda, a ligação de drenagem de óleo em bronze. À direita, a tubagem em malha de aço de alimentação de óleo e as ligações para a de linha de refrigeração. [6]



Figura 9 - Lado do rotor impelidor, compressor, com a tampa removida [6]



Figura 10 - Lado da turbina, com a tampa removida. [6]



Figura 11 - Uma válvula de descarga (*wastegate*) instalada ao lado do turbo. [6]

As carcaças instaladas em torno do rotor do compressor e da turbina, aspiram e direccionam o fluxo de gás através das rodas enquanto giram. O tamanho e a forma podem ditar algumas características de desempenho do turbo alimentador em geral. Muitas vezes o conjunto turbo estará disponível no

fabricante, com múltiplas escolhas da carcaça da turbina e por vezes também para o compressor. Isto permite que o projectista do motor possa adaptar e definir os compromissos entre o desempenho, resposta e eficiência consoante a aplicação ou preferência. Os modelos *Twin-Scroll* têm duas entradas de gases de escape, uma com um ângulo nitidamente menor e mais agudo, para uma resposta rápida e um ângulo maior e mais obtuso para o desempenho de pico.

O tamanho das rodas de turbina e de compressor também dita a quantidade de ar ou gases de escape que pode fluir através do sistema, e a eficiência relativa em que operam. Geralmente, quanto maior o rotor da turbina e o rotor do compressor, maior a capacidade de fluxo. Medições e formas podem variar, assim como curvatura e número de lâminas nas rodas. Turbos de geometria variável são o desenvolvimento destas ideias.

O CHRA abriga o eixo que liga o rotor do compressor e a turbina, incluindo um sistema de rolamentos de suspensão do eixo, permitindo que ela rode a muito alta velocidade com um mínimo de fricção. Por exemplo, em aplicações automóveis, a CHRA geralmente usa um casquilho ou rolamento de esferas lubrificado pelo fornecimento constante de óleo do motor pressurizado. O CHRA pode também ser considerado "refrigerado a água" por ter um ponto de entrada e saída de líquido refrigerante do motor. Os modelos refrigerados a água existem para manter o óleo de lubrificação mais frio, evitando que o óleo coza, devido ao calor extremo encontrado na turbina. O desenvolvimento de rolamentos (casquilhos) de película de ar removeu este risco.

V. TURBO DE GEOMETRIA VARIÁVEL

Os turbos convencionais têm o inconveniente de que a baixas rotações do motor o rodete da turbina apenas é impulsionado pelos gases de escape, pelo que o motor se comporta como se fosse atmosférico. Uma solução para isto é utilizar um turbo pequeno de baixa pressão que comece a comprimir o ar aspirado pelo motor desde rotações muito baixas, mas isto tem um inconveniente, é que a altas rotações do motor o turbo de baixa pressão não tem capacidade suficiente para comprimir todo o ar que necessita o motor, por tanto, a potência que ganhamos a baixas rotações vamos perde-la em altas. Para corrigir este inconveniente procurou-se a solução de dotar uma mesma máquina "sopradora" da capacidade de comprimir o ar com eficácia tanto a baixas rotações como em altas, para isso desenvolveram-se os turbocompressores de geometria variável.

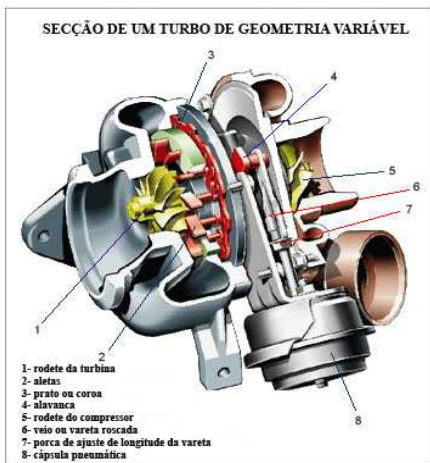


Figura 12 - Turbo de geometria variável (TGV) [5]

O turbo TGV (Geometria Variável) diferencia-se do turbo convencional pela utilização de um prato ou coroa no qual estão montados umas aletas móveis que podem ser orientadas (todas em conjunto) num ângulo determinado mediante um mecanismo de vareta e alavanca empurradas por uma cápsula pneumática, sistema parecido com o utilizado na válvula wastegate.

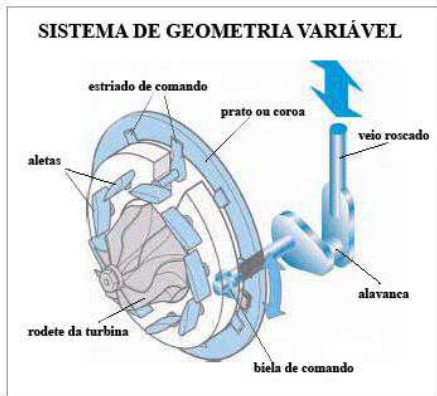


Figura 13 - Esquema de um sistema de geometria variável [5]

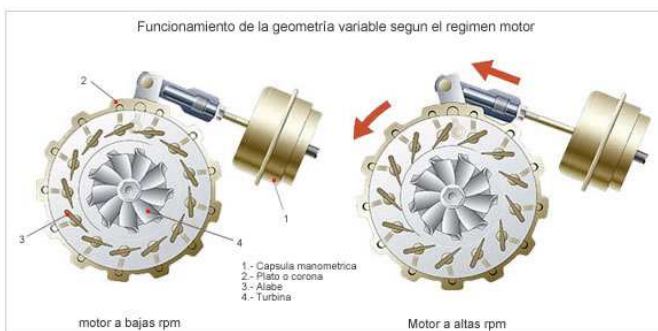


Figura 14 - Funcionamento de um turbo de geometria variável [5]

A. Gestão electrónica da pressão do turbo

Com a utilização da gestão electrónica tanto nos motores de gasolina como nos diesel, a regulação do controlo da pressão do turbo já não se deixa nas mãos de uma válvula de accionamento mecânico como é a válvula wastegate, que esta submetida a altas temperaturas, e os seus componentes como: a mola e a membrana; sofrem deformações e desgastes que influem num mau controlo da pressão do turbo, além de que no têm em conta factores tão importantes para o bom funcionamento do motor como são a altitude e a temperatura ambiente.

Para descrever como funciona um sistema de regulação da pressão do turbo, temos um esquema (figura inferior) que pertence a um motor diesel (1.9 TDi) no qual se vêem todos os elementos que intervêm no controlo da pressão do turbo. A Gestão Electrónica Diesel (EDC Electronic Diesel Control) interpõe uma electroválvula de controlo da pressão (3) entre o colector de admissão e a válvula wastegate (4) que controla a todo momento a pressão que chega à válvula wastegate. Como se vê no circuito de controlo da pressão do turbo, é similar a um circuito de controlo convencional com a única diferença da incorporação da electroválvula de controlo (3).



Figura 15 - Esquema do circuito de controlo da pressão de um turbo convencional [5]

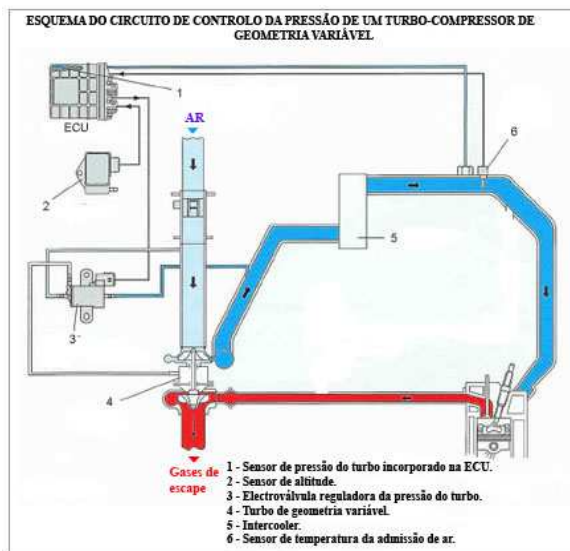


Figura 16 - Esquema do circuito de controlo da pressão de um turbo de geometria variável [5]

As características principais deste sistema são:

- Permite ultrapassar o valor máximo da pressão do turbo.
- Tem corte de injeção a altas rotações.
- Proporciona uma boa resposta ao acelerador em toda a margem de rotações.
- A velocidade do turbocompressor pode subir até às 110.000 r.p.m.

B. Recomendações de manutenção e cuidados para os turbocompressores

O turbocompressor está desenhado para durar o mesmo tempo que o motor (dizem os construtores). Não necessita de manutenção especial. Para garantir que a vida útil do turbo corresponda com a do motor, devem-se cumprir as seguintes instruções de manutenção:

- Intervalos de muda de óleo curtos.
- Muda de filtro de óleo, sempre.
- Controlo da pressão do óleo.
- Manutenção do filtro de ar.

Em 90% das falhas que se produzem nos turbos as causas são:

- Penetração de corpos estranhos na turbina ou no compressor.
- Sujidade no óleo.
- Utilização de óleo desadequado.
- Altas temperaturas nos gases de escape (deficiências no sistema de ignição e alimentação).

Estas falhas podem ser evitadas com uma manutenção frequente.

C. A lubrificação do turbo

Como o turbo está submetido a altas temperaturas de funcionamento, a lubrificação dos elementos móveis (suportes e eixo comum) é muito comprometida; por ser submetido a altas temperaturas e desequilíbrios dinâmicos existe o risco de uma má escolha ou muda tardia do óleo provocar o aparecimento de película e restos de carvão nos assentos do eixo comum, o que pode provocar vibrações com distintas frequências que ao entrar em ressonância podem provocar micro-gripagens. Além de que o eixo está sujeito a todo o momento a grandes contrastes de temperatura, em que o calor do extremo mais quente é transmitido ao extremo mais frio, o vem acentuar as exigências de lubrificação, deve-se por isso utilizar óleos homologados pela API e a ACEA e ter em conta o país onde se vive.

É recomendável que após uma utilização severa do motor em percursos longos e altas velocidades, não parar de imediato o motor, deixa-lo ao ralenti durante um mínimo de 30 seg. para garantir uma lubrificação e refrigeração adequadas. A explicação é simples e pura física; o lado mais exposto ao calor (turbina) pode sobreaquecer demasiado se desligar-se o motor de imediato depois de uma utilização intensiva do motor, tendo em conta que o óleo arde a 221°C pode-se carbonizar o turbo.

A lubrificação nos turbos de geometria variável é ainda mais exigente, porque além das normais peças móveis do turbo tradicional, tem que lubrificar todo o conjunto da alavancas e varetas que são movidas pelo depressor pneumático, ao apanhar sujidades (impurezas de má qualidade do óleo) as guias e comportas prendem e o turbo deixa de trabalhar correctamente provocando perda de potência no motor.

VII. CARROS SOBREALIMENTADOS

A. BMW M3 (atmosférico) vs 335i (bi-turbo) [7]

O M3, com seu motor V8 4.0 de 420 cv, tem vantagem na potência sobre o 335i, de 306 cv, mas a potência específica é praticamente igual em ambos os "modelos": 105 cv/l no M3, 102 cv/l no 335i. Mas é graças ao sistema bi-turbo instalado no propulsor 3.0 de seis cilindros em linha que o 335i leva uma enorme vantagem na curva de torque. As duas turbinas funcionam com baixa pressão e têm como principal função disponibilizar o torque máximo, de 40,8 kgfm, já a baixíssimos 1.400 rpm (veja box), enquanto no M3 o torque máximo é o mesmo, mas aparece apenas às 3.900 rpm. O M3 consegue, mesmo assim, acelerar de zero a 100 km/h em 4,8 segundos, apenas meio segundo a menos que o 335i. Dirigir o 335i (ou seria melhor dizer "pilotar"?) é uma experiência única. Com o torque máximo disponível até os 5.000 rpm, ele sempre responde prontamente ao comando do acelerador



Figura 17 –bi-turbo de um BMW 335i [7]

B. BMW 335i (turbos em série) vs 335d (turbos em paralelo)

Na infografia, Figura 18, os dois pequenos turbos aparecem a azul, sendo que cada uma das turbinas está ligada a um grupo de três cilindros. A ausência de atraso na resposta as solicitações do acelerador faz com que, quando este é pressionado, o motor responda como um atmosférico de maior capacidade: ou seja, as curvas transientes igualam-se rapidamente às de plena carga representadas no gráfico à direita. Outro segredo deste motor é a baixa pressão de sobrealimentação utilizada, na casa dos 0,6 a 0,7 bar.

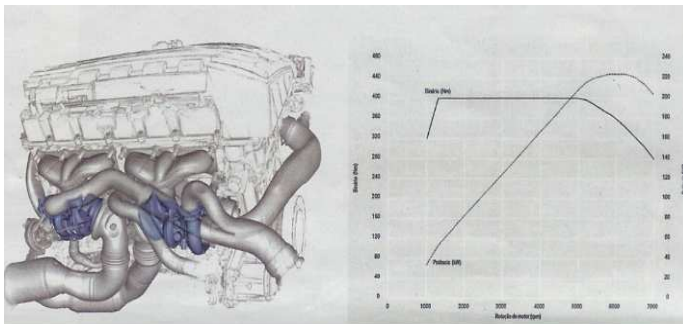


Figura 18 – Motor bi-turbo série do 335i [8]

O esquema de sobrealimentação do 335d, Figura 19, é mais complicado. EM traços gerais, o turbo pequeno de alta pressão é responsável pelos valores de binário a baixo regime, ao passo que o turbo de maiores dimensões (elevado caudal) garante a potencia nas rotações mais elevadas. Em médios regimes e certas situações de carga de acelerador, funcionam os dois, com o grande a pré-comprimir para o pequeno. Isto permite atingir pressões mais elevadas.

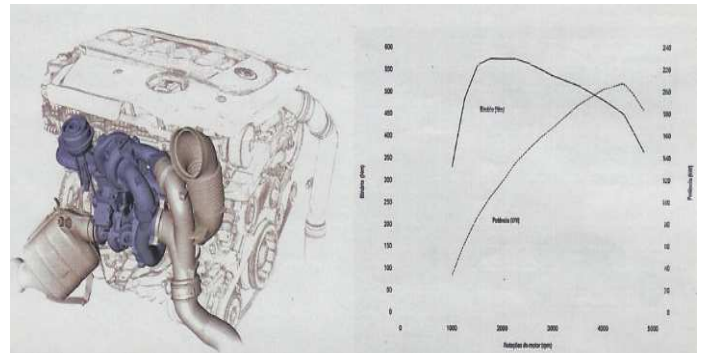


Figura 19 - Motor bi-turbo paralelo do 335i [8]

VIII. CONCLUSÃO

Com este trabalho pode-se concluir que houve uma grande evolução na tecnologia turbo desde do princípio até actualmente. Dependendo do custo e dos benefícios pretendidos existe diferentes soluções para a instalação do turbo para permitir uma sobrealimentação com sucesso.

Conclui-se também que a sobrealimentação actualmente mais aplicada é a turbo aplicando um turbocompressor com geometria variável. Para aumentar a performance em certos momentos do funcionamento do motor utiliza-se diferentes configurações de 2 turbos: em série, se queremos aumentar a potência geral do motor ou paralelo para aumentar mais a potência no início do funcionamento.

REFERENCES

- [1] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 1998, ISBN 0-07-100499-8
- [2] Turbo Evolution Timeline [7/11/2011], http://www.honeywell.com/sites/ts/tt/100Years_Turbo3_C83869114-FF16-C7FE-13F7-7CD478B60F02_H6470A0D1-554D-CF34-4086-9E97AA11107E.htm
- [3] Garrett - A evolução do turbo alimentador VNT™ da Garrett® [06/01/2012], <http://www.br.garretbulletin.com/espaco-para-tecnologia/a-evolucao-do-turboalimentador-vnt-da-garrett>
- [4] Nasscom [06/01/2012], <http://www.nasscom.in/100-Years-of-Turbo-55359>
- [5] Pcdiga – Turbos e Compressores [7/12/2011], <http://www.pcdiga.net/showthread.php?t=17697>
- [6] Munin – Sobrealimentações turbo e outras [24/10/2011], <http://munin.pt/prov/turbo.html>
- [7] Motorshow – BMW M3 vs 335i[6/01/2012], <http://www.motorshow.com.br/edicoes/294/artigo62431-1.htm>
- [8] Fórum da Autohoje, <http://forum.autohoje.com/forum-geral/19830-bmw-335i-os-turbos.html>

Anexo 1 - Cronograma detalhado da evolução do turbo

Ano - Evento no Turbo

1905 - Dr. Alfred J Büchi (Engenheiro suíço) patenteou a primeira turbo alimentação dando assim início à era do turbo.

1920 - O avião biplano *Lepere* com turbo alimentação marca o novo recorde de altitude de 33.113 pés.

1925 - Dois navios alemães são equipados com motores de 2.000 hp diesel turbo.

1925 - Dr. Büchi patenteou a primeira aplicação da alimentação turbo com o seu sistema de turbo alimentação por pulso.

1936 - John Clifford Garrett estabelece a Corporação Garrett, na Califórnia, EUA.

1940 - A tecnologia Turbo dissemina-se através de aplicação na marinha, na indústria e em locomotivas.

1951 - O engenheiro Ted von der Nuell, da Garrett, defende o bocal variável controlado como o melhor conceito para um *dumper* turbo alimentado.

1953 - A empresa Caterpillar testa o primeiro turbo alimentador desenvolvido pela Garrett. O turbo alimentador Garrett® T15 começa a ser produzido em 1954.

1955 - O tractor D9 Caterpillar, equipado com Garrett® T15, torna-se o primeiro veículo a diesel turbo alimentado americano de produção.

1955 - A Caterpillar DW-21 usa o Garrett® T15, juntamente com uma *wastegate* controlada pela relação de pressão entre a pressão anteriormente e a pressão posterior a ela - considerado como o primeira *wastegate* em veículos terrestres;

1962 - O Oldsmobile Jetfire Turbo Rocket, equipado com Garrett® T05 com *wastegate* integrada, é o primeiro automóvel de passageiros turbo alimentado de produção.

1966 - Os turbos alimentadores são introduzidos pela primeira vez em motores de ignição por faísca no Indianápolis 500.

1967 - A empresa de tractores agrícolas Deere seleccionam o turbo alimentador Garrett ® T04 para os seus tractores - a indústria inteira de tractores logo segue o exemplo.

1968 - Bobby Unser é o primeiro vencedor do Indianápolis 500 em um carro turbo alimentado - o Garrett® TE06 melhorava o motor Offenhauser de 2,75 litros.

1973 - O "Oil Shock" desempenha um papel importante na aceleração da adopção da turbo alimentação nos EUA e na Europa.

1974 - O Garrett® T04B marca o início da era do mercado em grande escala do turbo na Europa para camiões e motores comerciais.

1977 - A Saab revela um motor a gasolina de 2 litros turbo, com o Garrett® T3.

1977 - A Renault inaugura a era turbo na Fórmula 1, sendo a primeiro a correr com um motor 1,5 litros com um turbo da Garrett®.

1978 - O Daimler Benz Mercedes 300 Turbo Diesel é lançado com o turbo alimentador Garrett ® T03 *wastegate*.

1978 - O Renault 2,0 litros Alpine é o primeiro carro impulsionado por um turbo da Garrett® impulsionado carro a vencer as 24 Horas de Le Mans.

1978 - A Renault revela o famoso motor R5 turbo alimentado a gasolina- o primeiro de uma longa era de motores turbo a gasolina.

1978 - A empresa de automóveis Buick começa a produção do primeiro automóvel V6 turbo impulsionado pelo Garrett® T3 *wastegate* turbo.

1979 - A Peugeot lança o 604 turbo diesel, contribuindo para a ampla adopção de motores turbos diesel por uma importante empresa pioneira na tecnologia diesel.

1979 - Um Saab 99 turbo com um Garrett® turbo, conduzido por Stig Blomqvist, é o primeiro carro turbo a vencer uma corrida do *World Rally*.

1980 - O Pontiac Firebird Trans Am marca o início da produção de carro V8 de produção com o Garrett ® T3 *wastegate* turbo.

1980 - O Volvo 240GL a gasolina é lançado com o turbo Garrett ® T3 *wastegate*.

1982 - O Garrett® T2 é desenvolvido para os motores de automóveis de passageiros, em geral com menos de 2,5 litros.

1982 - A Rolls Royce lança o primeiro Bentley Mulsanne Turbo - um motor a gasolina de 6,75 litros usando um único turbo alimentador Garrett ® T04B juntamente com uma *wastegate* Normalair-Garrett separada.

1984 - A Peugeot lança o seu inovador 205 T16 no *World Rally* impulsionado com um turbo Garrett ® com um *intercooler* ar-para-ar.

1984 - A Ford, Chrysler, Dodge, Plymouth e Pontiac lançam os primeiros carros com sistemas turbos combinado com injeção electrónica de combustível sequencial multi-ponto.

1985 - O VW Golf TD 1,6 litros turbo toma o mercado automóvel como uma tempestade.

1987 - A Buick introduz o Regal Grand National GNX, contendo um turbo Garrett® Ceramic Turbine Wheel T3/T4 wastegate e intercooler.

1987 - A Lancia vence o primeiro de um recorde de seis consecutivos campeonatos de *World Rally* por fabricantes, todos impulsionados por turbo alimentadores Garrett®. O primeiro foi um Lancia Delta HF 4WD.

1988 - A Nissan Motors apresenta o Garrett® Ball Bearing T2 no seu motor a gasolina do seu modelo Silvia. A Nissan adopta a tecnologia de rolamento de esferas Garrett® com um turbo alimentador T04S no campeonato GTP da IMSA (International Association MotorSport). A Nissan ganhou o campeonato de 1988 até 1991.

1989 - A Nissan Diesel adopta o turbo Garrett® TD4501 como o primeiro turbo VNT para produção mundialmente no seu motor de 12,6 litros para camiões pesados.

1989 - O motor do Nissan Skyline GT-R de 2,6 litros e 6 cilindros em linha motor é equipado com os turbos gémeos Garrett® TE2701 com turbinas de cerâmica.

1990 - O Chrysler Dodge Shelby-Daytona Turbo-Z com o intercooler é o primeiro carro a utilizar o turbo VNT™ da Garrett® com controlo electrónico por impulso.

1991 - A FIAT coloca um turbo alimentador VGT no Croma, igualando-o a um motor diesel de 1,9 litros com injeção directa.

1992 - A Caterpillar é o primeiro adoptante da tecnologia de compressor *boreless* da Garrett® para o seu motor 3406 para camião de auto-estrada.

1993 - A Nissan Motors apresenta o Garrett® *ball bearing* T3/T25 no motor a gasolina 2.0L 240hp para seu Silvia S14.

1994 - A Toyota define o recorde geral no *Pike Peak International Hillclimb*, terminando o curso de 12 milhas (22 km) que se eleva a partir de 2900 metros até 4300 metros de altitude em 10 minutos e 4,06 segundo em um Celica conduzido por Rod Millen, com um turbo Garrett® ball bearing T04S.

1995 - O VNT™ Multivane é desenvolvido para o motor diesel 1.9 litros de injeção directa da Volkswagen-Audi. Esta configuração de motor revoluciona a reputação TDI.

1997 - O primeiro turbo Garrett® ball bearing para motores a gasóleo comerciais faz sua estreia no motor Diesel PF6T da Nissan.

1998 - A Internacional adopta o Garrett® GTP38 wastegate no seu motor de 7.3L Power Stroke, que está instalado no Ford F250 e F350.

1998 - VW Golf e Audi A4 são os carros de lançamento para a segunda geração da tecnologia VNT™ da Garrett®.

1999 - BMW incorpora a tecnologia REA da Garrett® no seu motor V8 turbo diesel para os Série 7.

2000 - Os turbos VNT™ Double Axle da Garrett são introduzidos nos motores para autocarros da DDC Série 50.

2000 - Os carros Audi acabam todos nas 3 posições do pódio pela primeira vez em Le Mans com o seu motor V8 de 2,6 litros turbo alimentado pela Garrett® utilizando turbos gémeos.

2000 - A Smart introduz motores diesel e a gasolina turbo de 0,6 litros - o micro turbo GT12 da Garrett® com design patenteado de rolamento integrais é apresentado no motor a gasolina.

2000 - A Audi lança o A8 TDI 2,5 litro e 3,3 litros V8.

2001 - A Internacional selecciona os turbo alimentadores AVNT™ (GT37 e GT40 AVNT™) da Garrett® para seus motores que vão para camiões de viagens internacionais.

2002 - A Internacional adopta o GT37 AVNT™ da Garrett® para os motores de *Power Stroke* que vão para Ford F250 e F350.

2003 - A Bentley acaba nos 1º e 2º lugares na corrida de Le Mans, e a Audi acaba nos 3º e 4º, pela quarta vez consecutiva o grupo VW acaba nas 3 posições do pódio.

2003 - A Ford traz o Focus RS turbo a gasolina para o mercado.

2003 - A Caterpillar adopta a série de turbos da Garrett® para os seus motores ACERT de camiões de auto-estrada. O camião Kenworth é um dos equipados com motores ACERT.

2004 - O grupo PSA ganha o seu terceiro Campeonato Mundial de Rali FIA por Fabricantes consecutivo com a ajuda dos turbo alimentadores da Garrett® (Peugeot em 2002 e Citroen em 2003 e 2004). A Audi ocupa os 3 lugares do pódio em Le Mans novamente e sendo o 5º ano consecutivo para o grupo VW.

2004 - O BMW Série 1 é apresentado com a terceira geração da tecnologia VNT™ da Garrett®.