

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecânica Automotiva

William Reis dos Santos

Santo André
2018

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecânica Automotiva

William Reis dos Santos

Motores de taxa de compressão variável

Trabalho de Conclusão de Curso entregue à Fatec Santo André como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica Automotiva.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Froés

Santo André
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

S237m

Santos, William Reis dos

Motores de taxa de compressão variável / William Reis dos Santos. - Santo André, 2018. – 54f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Fróes

1. Mecânica. 2. Motores. 3. Compressão. 4. Veículos. I.
Motores de taxa de compressão variável.

621.43

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 30 de Junho de 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“MOTORES DE TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL” DO ALUNO DO 6º
SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. MARCO AURÉLIO FRÓES 

MEMBROS:

PROF. ADRIANO RIBOLLA 

PROF. FERNANDO GARUP DALBO 

ALUNO:

WILLIAM REIS DOS SANTOS 

“Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que acreditaram em todos a
minha competência para conseguir chegar aos meus objetivos.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu o privilégio de crescer como pessoa e profissional que sempre protege a mim aos meus familiares e amigos. Depois agradeço a minha família que me apoia e me encoraja a buscar mais, e fazer coisas mais incríveis a cada dia, especialmente meus pais Antônio e Rosália, meu irmão Jackson e minha namorada Ana. Agradeço também aos meus colegas de faculdade que me inspiram a melhorar e me ajudam nos momentos de dificuldades.

RESUMO

Atualmente todos os setores vem buscando a diminuição dos problemas ambientais atrelado a um aumento de performance e rendimento dos produtos anteriores e fortificado pelo o incentivo dos governos no mundo todo, as indústrias vão tentando desenvolver soluções viáveis e que tenham um resultado satisfatório.

A indústria automotiva é uma das pioneiras a seguir o conceito de menor emissão e grande performance, um dos exemplos mais claros são todos os sistemas que foram criados e melhorados desde o início do século, podemos citar soluções como: motores de baixa cilindrada supereficientes, sistemas de injeção direta e estratificadas, introdução de motores turbo, comando variável de admissão e escape, melhoria no gerenciamento dos motores, introdução de motores híbridos e elétricos entre outras tantas inovações tecnológicas.

Com a legislação cada vez mais rígida e com grandes restrições, os motores de combustão interna estão começando a deixar de ser o principal sistema de propulsão das indústrias automotivas, além de que cada mais vai aumentando a viabilidade dos veículos de propulsão elétrica. Por essa concorrência acirrada com os novos propulsores os motores de combustão interna precisarão aumentar ainda mais sua baixa eficiência.

Essa monografia propõe um estudo sobre os motores de taxa de compressão variável, onde é mostrado o seu funcionamento, princípios de uso, eficiência e gerenciamento assim podendo avaliar a viabilidade, desempenho, durabilidade, eficiência e se realmente é uma inovação aplicável para aumentar o rendimento dos motores para uso em concepções híbridas ou com combustíveis renováveis.

Palavras chaves: taxa de compressão variável, ciclo de *Atkinson*, eficiência volumétrica, gerenciamento de motores, propulsão híbridas, combustíveis renováveis.

ABSTRACT

Currently all sectors have been seeking to decrease the environmental problems linked to an increase in performance and yield of previous products and fortified by the incentive of governments worldwide, industries are trying to develop viable solutions that have A satisfactory outcome.

The automotive industry is one of the pioneers following the concept of lesser emission and great performance, one of the clearest examples are all systems that have been created and improved since the beginning of the century, we can quote solutions such as: super-efficient low engines , direct and stratified injection systems, Turbo motors Introduction, variable admission and exhaust command, improvement in engine management, introduction of hybrid and electric motors among many other technological innovations.

With the increasingly rigid legislation and with large restrictions, internal combustion engines are starting to cease to be the main propulsion system of automotive industries, and that each more is increasing the viability of electric propulsion vehicles. By this fierce competition with the new thrusters the internal combustion engines will need to increase their low efficiency even more.

This monograph proposes a study on the variable compression rate engines, where it is shown its operation, principles of use, efficiency and management thus, can evaluate the viability, performance, durability, efficiency and If it really is an applicable innovation to increase the yield of engines for use in hybrid conceptions and for renewable fuels.

Key words: Variable compression ratio, Atkinson cycle, volumetric efficiency, engine management, hybrid propulsion, Renewable fuels.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1. MOTIVAÇÃO.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.3. CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2 ARQUITETURA DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	19
2.1 OBJETIVOS DO CAPÍTULO.....	19
2.2 COMPONENTES DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	19
2.2.1 <i>Bloco do Motor</i>	20
2.2.2 <i>Virabrequim</i>	22
2.2.3 <i>Pistão</i>	24
2.2.4 <i>Bielas</i>	25
2.2.5 <i>Cabeçote</i>	25
2.3 CONCEITOS DOS MCI	25
2.3.1 <i>Ciclo Otto</i>	25
2.3.2 <i>Densidade</i>	28
2.3.3 <i>Combustíveis</i>	28
2.3.3.1 Gasolina.....	29
2.3.3.2 Etanol.....	30
2.3.4 <i>Mistura ar combustível</i>	31
2.3.5 <i>Taxa de compressão</i>	33
2.3.5.1 Taxa de compressão estática	33
2.3.5.2 Taxa de compressão dinâmica	34
2.3.6 <i>Torque</i>	34
2.3.7 <i>Potência</i>	35
2.3.8 <i>Ciclo Atkinson</i>	35
3 MOTOR DE TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL.....	37
3.1 OBJETIVOS DO CAPÍTULO.....	37

3.2	CONCEITO.....	37
3.3	COMPONENTES DO <i>MULTILINK VARIABLE COMPRESSION RATIO ENGINE</i>	38
3.3.1	<i>Control Shaft</i>	38
3.3.2	<i>Control link</i>	41
3.3.3	<i>Multilink</i>	44
3.3.4	<i>Conjunto Upper Link – Pistão</i>	45
3.3.5	<i>Conjunto Atuador Harmônico – Braço alavanca</i>	47
3.4	FUNCIONAMENTO DO <i>MULTILINK VARIABLE COMPRESSION ENGINE</i>	49
3.4.1	<i>Determinação dos parâmetros</i>	49
3.4.2	<i>Alta taxa de compressão</i>	52
3.4.3	<i>Baixa taxa de compressão</i>	53
4	CONCLUSÕES	55
4.1	PROPOSTAS FUTURAS E NOVOS DESENVOLVIMENTOS	56
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

Lista de Figuras

Figura-1 Galerias de óleo lubrificante e de fluido de arrefecimento.	20
Figura-2 Bloco com cilindro usinado.	21
Figura-3 Bloco encamisado.	21
Figura-4 Mancais da árvore de manivelas.	22
Figura-5 Árvore de manivelas fundido.	23
Figura-6 Análise da amplitude das vibrações conforme a rotação e ordem de combustão.	24
Figura-7 Partes da Biela.	25
Figura-8 Pressões dentro da câmara de compressão.	26
Figura-9 Os quatro tempos do ciclo Otto.	27
Figura-10 Diagramas P-v Ciclo Atkinson.	36
Figura-11 Diagrama T-s do Ciclo Atkinson.	36
Figura-12 Conjunto Upper-lower-control link.	38
Figura-13 Detalhe Control Shaft.	39
Figura 14 Assento do <i>Control link</i> no motor VC-T.	39
Figura-15 Funcionamento do Control Link.	42
Figura-16 Taxa de compressão alta e baixa.	42
Figura-17 Traçado dos movimentos do sistema <i>Multilink</i>	43
Figura-18 <i>Control Link</i>	44
Figura-19 Multilink.	45
Figura-20 Força na lateral do cilindro.	46
Figura-21 Força desperdiçada na parede do cilindro.	47
Figura-22 Sentido de movimento do servo-atuador com o braço de alavanca.	48
Figura-23 Atuador Harmônico.	48
Figura-24 Funcionamento do sistema de variação de taxa de compressão.	49

Figura-25 Sinais recebidos para determinar a condição inicial de partida e de mudanças de parâmetros.....	50
Figura-26 Fluxograma da interpretação eletrônica para decisão da taxa de compressão.....	51
Figura-27 Comparação entre o curso mínimo e máximo do pistão.	52
Figura-28 Fluxo de movimento para chegar a taxa de compressão máxima.	53
Figura-29 Fluxo de movimento para chegar a taxa de compressão mínima.	54
Figura 30 Tipos de sistemas de variação de taxa de compressão.	56

Lista de Tabelas

Tabela-1 Características das misturas de álcool anidro e gasolina tipo A.....	29
Tabela-2 Propriedades dos combustíveis automotivos.	31
Tabela-3 Relação estequiométrica da mistura em função do combustível.....	32
Tabela-4 Especificação do material teste para o <i>Control shaft</i>	40
Tabela-5 Resultados da simulação de frequências naturais.	41

Lista de Abreviaturas

RG	<i>Raio de giro</i>
MCI	<i>Motor de Combustão interna</i>
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
MPa	<i>Mega Pascal (unidade de medida de pressão)</i>
IAD	<i>Índice Antidetonante</i>
MON	<i>Motor Octane Number</i>
PMI	<i>Ponto morto inferior</i>
PMS	<i>Ponto morto superior</i>
SI	<i>Spark ignition</i>
IOM	<i>Índice de Octanas do Motor</i>
TDC	<i>Top Dead Center</i>
PCI	<i>Poder Calorífico Inferior</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAM	<i>Computer-aided manufacturing</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>

1 Introdução

O motor de combustão interna foi uma das criações humanas mais benéficas, pois a partir disso outras criações foram possíveis e isso é devido ao fato desses motores serem implantados em vários setores.

Assim como as tecnologias no mundo foram sendo melhoradas, a indústria automotiva cada vez mais criou melhorias em busca de uma melhor eficiência, que nesse tipo de motor é relativamente baixa, e com a criação de legislações ambientais os motores tiveram que atender requisitos ainda mais apertados, conciliando com a relação custo-benefício que entregar.

Ao longo do tempo muitos engenheiros, técnicos e desenvolvedores de produtos buscaram alguma forma viável para que mudasse uma característica física fixa do motor, a taxa de compressão, que depende exclusivamente da medida do volume do cilindro e da câmara de combustão, portanto uma medida difícil de ser variada. Vários projetos foram desenvolvidos para tentar realizar a variação da taxa de compressão, porém muitos foram abandonados pela inviabilidade técnica ou financeira que essa evolução proporcionaria. Com o avanço dos processos de fabricação e melhoria nos processos de desenvolvimento e de teste via softwares o mundo automobilístico volta novamente o olhar para o desenvolvimento de novas soluções sobre esse tema.

Esse trabalho de graduação trata de desmistificar como funciona e qual é a viabilidade técnica e financeira dos novos motores que foram apresentados com a tecnologia de geometria de taxa de compressão variável, além de mostrar outros projetos passados e suas características técnicas e sua eficiência.

1.1. Motivação

A motivação para a escolha e desenvolvimento desse projeto é de conhecer a arquitetura diferente dos motores que podem mudar o mercado automobilístico daqui em diante. A propulsão movida a combustão interna está sendo repensada pelo mundo e com as melhorias e a viabilidade de outras formas de propulsão, os motores atuais devem ser implementados para que se reduza principalmente as emis-

sões de gases que comprometem a saúde do planeta e dos seres que vivem sobre ela, além de aumentar o rendimento e performance desses motores para que se aumente a competitividade ou pelo menos para que não se extinga a concepção desses tipos de motores.

Para diminuir a emissão de carbono dos derivados de petróleo, nosso país tem uma opção vantajosa, o etanol, que tem características semelhantes aos combustíveis fósseis porém com o benefício de ser um combustível renovável, onde cada carbono produzido na sua utilização é absorvido pela própria planta que serve para obtenção do combustível, com isso o ciclo é fechado e não há sobras, ao contrário dos combustíveis fósseis. Outra vantagem do etanol é que não há necessidade de mudança no sistema de motor de combustão interna já conhecido, porém não é obtido a melhor eficiência energética em termos de performance e índice de emissões pois os motores bicombustíveis têm taxa de compressão intermediária entre a gasolina e o etanol, dando a condição de funcionamento nos dois combustíveis, mas não obtendo a melhor condição de cada um deles. Com a adição de um sistema que altere a taxa de compressão física do motor o motor se adequará para qualquer mistura entre os combustíveis, encontrando a taxa de compressão que consiga melhor eficiência para qualquer teor de mistura dos dois combustíveis.

Outro motivo para a realização dessa monografia é a pouca informação e a carência de informações técnicas sobre esses tipos de motores, que é compreensível por ser uma tecnologia recente.

1.2. Objetivos

Baseado nas motivações discutidas na seção 1.1, esse trabalho de graduação visa dar bases técnicas sobre os conceitos dos motores de taxa de compressão variável, lembrando conceitos da mecânica clássica, e apresentando teorias que embora não sejam novas para o tema de motores é pouco falado em artigos técnicos como o ciclo de Atkinson e Miller

A proposta desse trabalho também é demonstrar as características da arquitetura estrutural desses motores, apresentando em cálculos e as comparando com os

modelos já existentes e mostrando as diferenças e colocando suas qualidades dessa nova tecnologia.

1.3. Contribuições Esperadas

As contribuições estão relacionadas com os objetivos descritos na subseção 1.2 e são elas:

- a) Criação de bibliografia tecnológica sobre motores de taxa de compressão variável;
- b) Incentivar através do conhecimento técnico a utilização de tecnologias que intensifique o uso de combustíveis renováveis, aumentando a performance através da utilização de mecanismos que aproveitem a melhor característica das misturas de combustíveis que temos no Brasil.
- c) Informar sobre a viabilidade desses motores para que nos próximos anos possa ser utilizado juntos com motores elétricos, formando propulsores híbridos mais eficientes que emitam menos poluentes na atmosfera.

1.4. Organização do Trabalho

Este projeto de graduação está dividido em 3 partes, sendo por capítulos respectivamente temos:

No Capítulo 1 será apresentado os fundamentos teóricos sobre os motores de combustão interna, mostrando as teorias da mecânica clássica automotiva e o que acontece com a combustão devido as variáveis de combustível, compressão, tipo de queima e rendimento térmico da expansão volumétrica dos gases.

Em seguida no capítulo 2 é reservado para apresentar o conceito dos ciclos que alteram momentaneamente a taxa de compressão sobre o motor convencional, e mostrar o novo conceitos e projetos de motores de taxa de compressão demonstrando as características estruturais e o funcionamento do dispositivo que altera a taxa de compressão no interior do cilindro.

No capítulo 3 são destrinchados os cálculos e os conceitos envolvidos para comparar a nova tecnologia com os motores convencionais e demonstrar alteração que deve ser realizada para integrar o sistema de variação de taxa de compressão.

2 Arquitetura dos motores de combustão interna

2.1 Objetivos do Capítulo

As seções seguintes atribuem conhecimentos prévios sobre os componentes e sistemas que integram o motor de combustão interna assim como as definições dos seus conceitos.

2.2 Componentes dos motores de combustão interna

Para podermos analisar todo o processo de desenvolvimento da performance de um motor e como as variáveis do projeto podem influenciar a performance final, assim como na determinação das condições de uso que vai ser utilizada, irei abordar-se-ão as principais partes do motor a combustão interna convencional para que assim possamos aprofundar os conceitos envolvidos em todo processo.

Os componentes integram basicamente um motor de combustão interna são: bloco do motor, pistões, bielas, pino, árvore de manivelas, cárter e cabeçote. Esses componentes citados já descrevem algumas das variáveis da determinação da performance, basicamente o dimensional desse conjunto prediz o resultado que previamente se espera.

Além do dimensional envolvido temos algumas outras variáveis que convém determinar para se alcançar um melhor rendimento, atributos como material que vai ser utilizado, o tipo de acabamento, processos de tratamento do material e disposição do design do componente. A seguir abordarei cada componente e as influências das variáveis em cada uma delas.

2.2.1 Bloco do Motor

O bloco do motor é o componente de sustentação dos demais componentes que o integram, em toda sua estrutura temos dutos que são denominados como galerias, por onde passam óleo lubrificante e o fluido de arrefecimento (figura 1). Essas galerias são isoladas uma das outras e do interior do cilindro com a função de transporte dos fluidos que irão realizar o trabalho de lubrificação e de arrefecimento do bloco e de outros componentes do sistema motor.

Figura-1 Galerias de óleo lubrificante e de fluido de arrefecimento.



Fonte: Extraído de <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/original-truck-diesel-engine-block-3935936-cheap-sale-manufacture-6bt-cylinder-block-price-60279783321.html>

Esse componente deve ser de material que suporte condições de vibrações constantes, resistência suficiente para suportar as pressões que são impostas dentro do cilindro, ter uma boa usinabilidade, ser leve e com obtenção relativamente fácil e barata. Os materiais largamente utilizados atualmente são o alumínio e o ferro fundido cinzento.

O design do bloco varia conforme o projeto do motor podendo ter de um a dezesseis cilindros, e sua disposição pode ser em formato de “V”, vertical (motor em linha) e horizontal (motor *Boxer*).

Figura-2 Bloco com cilindro usinado.



Fonte: Extraído de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Motorblock_4_Zylinder_Wassergekühlt_Aluminium.jpg

Figura-3 Bloco encamisado.



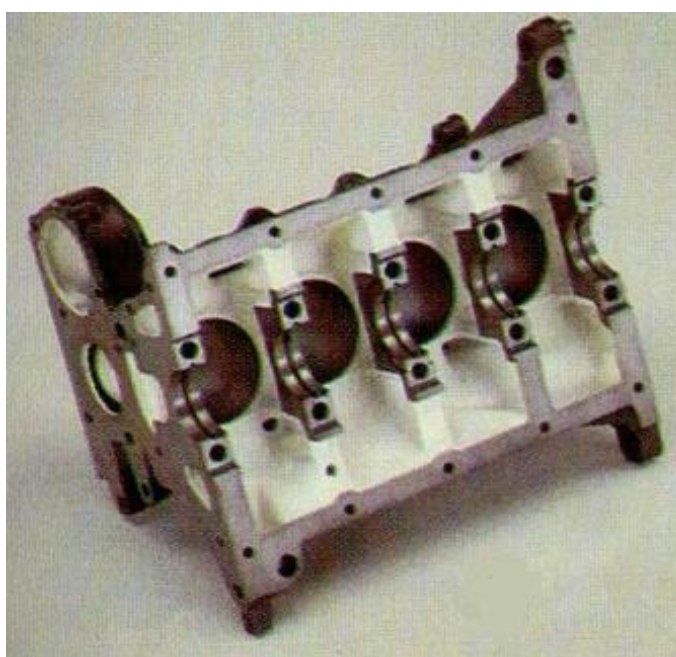
Fonte: Extraído <https://www.flatout.com.br/project-cars-279-a-reconstrucao-do-motor-do-meu-honda-fit/>

No corpo bloco do motor encontramos mancais que suportam a árvore de manivelas e em alguns tipos de blocos também há mancais para o comando de válvulas. Na superfície lateral do bloco do motor há duas cavidades para a instala-

ção das bombas de óleo e bomba d'água. Por fim em temos uma dezena de furações roscadas que permitem a junção das outras partes que compõe o motor, como o cabeçote e o cárter, e seus agregados.

O bloco do motor pode ser também classificado pelo seu tipo de cilindro, quanto a essa divisão são duas: blocos com cilindro usinado em sua própria estrutura (figura 2) e blocos “encamisados” (figura 3), esse último ainda pode ser dividido em dois tipos, elas são: camisas úmidas e camisas secas.

Figura-4 Mancais da árvore de manivelas.



Fonte: Extraído de <http://enginengenharia.blogspot.com.br/2012/05/conheca-o-motor-por-dentro-saiba-quais.html>

2.2.2 Virabrequim

O virabrequim, também conhecido como árvore de manivelas, girabrequim ou eixo de cambota é um componente de função indispensável para o funcionamento do motor (figura 5).

Com suas extensões de haste, converte o movimento alternado dos pistões transmitidos pelas bielas em movimento rotativo, disponibilizando o torque efetivo na extremidade da árvore de manivelas. As forças que agem na árvore de manivelas são caracterizadas por periodicidades altamente variáveis e variam muito conforme a loca-

lização. Estes torques, momentos de flexão e as vibrações secundárias geradas por eles representam fatores de tensão tão intensos que suas propriedades estruturais e padrões de resposta de vibrações repousam em cálculos precisos e dimensões definidas cuidadosamente. Árvores de manivelas submetidas a altas tensões são normalmente forjadas, em motores menores e com menos tensões são geralmente fundidas, apresentando vantagens de menor peso e custo baixo. (BLUCHER, 2005)

Figura-5 Árvore de manivelas fundido.

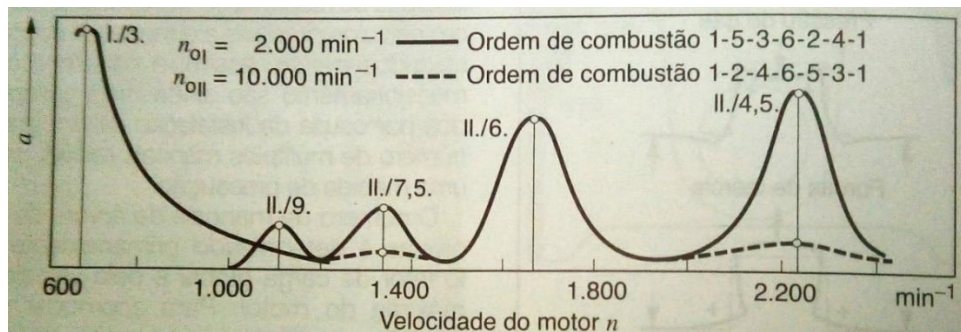


Fonte: Extraído de <http://www.scaniaofertas.com.br/arvore-de-manivelas/>

Esse componente sofre grandes variações de carga e rotação (figura 6), e conforme cada tipo de projeto temos uma resposta nas frequências de ressonância que é causada pela flexão dos componentes. A oscilação rotativa tem uma proporcionalidade quanto ao número de cilindros, a vibração do conjunto virabrequim, bielas e pistões se tornam cada vez mais críticas com maiores números de cilindros. Quanto maior o número do ângulo da árvore de manivelas maior as forças tangenciais que são submetidas, resultando em vibrações. Essas vibrações devem ser amortecidas a um nível aceitável, para isso utiliza-se amortecedores de massa ou do tipo viscoso.

A árvore de manivelas é o componente físico responsável de criar o torque instantâneo através de uma dimensão chamada raio de giro. O raio de giro funciona como um braço de alavanca criando o torque através da força aplicada pela expansão volumétrica dos gases na cabeça do pistão dentro da cama de combustão multiplicado pela a distância entre o centro de giro do eixo do virabrequim e o centro de giro do mancal moente.

Figura-6 Análise da amplitude das vibrações conforme a rotação e ordem de combustão.



Fonte: Bosch (2005)

2.2.3 Pistão

O pistão é um dos principais componentes do sistema, a tecnologia ao passar dos anos foi designando novas funções para esta peça. Para manter o desempenho o pistão deve atender uma variedade de funções, elas são:

- Transmitir a força gerada pela a expansão volumétrica dos gases na combustão para as bielas;
- São prolongamentos para definir os percursos das bielas dentro do cilindro;
- Apoiam a força normal aplicada contra aa paredes do cilindro, enquanto a pressão do cilindro é transportada para a barra de ligação;
- Veda a câmara de combustão da árvore de manivelas;
- Absorvem calor para transferência subsequente ao sistema de arrefecimento.

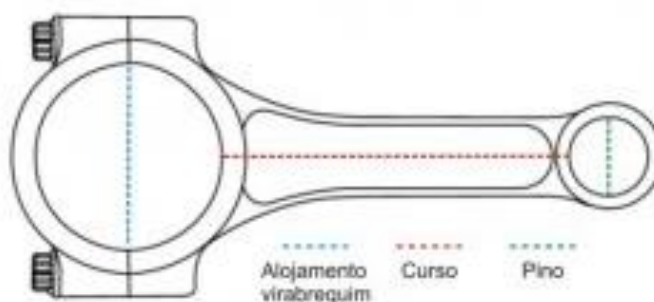
O design do pistão e a configuração do pino do êmbolo, utilizados para transferir as forças do gás de combustão à barra de ligação são determinados pelo formato da câmara de combustão, incluindo a geometria da coroa do pistão, enquanto outras variáveis incluem o processo de combustão selecionado e a pressão associada a máxima.

A prioridade é operar o pistão o mais levemente possível em uma unidade capaz de suportar forças intensas durante a operação, em um ambiente com temperaturas que podem atingir os limites físicos dos materiais utilizados em sua fabricação, a definição precisa das dimensões do pistão, pino do êmbolo e buchas do pino do êmbolo são essenciais para atingir este objetivo. (BLUCHER, 2005)

2.2.4 Bielas

A biela é um elemento de junção entre o pistão e a árvore de manivelas, é um componente que é submetida à compressão de tração e esforços de flexão, alojando ao mesmo tempo as buchas do pino do êmbolo e rolamentos da árvore de manivelas. O comprimento da biela é determinado pelo curso do pistão e raio do contrapeso: assim, a altura do motor também pode ser um fator importante.

Figura-7 Partes da Biela



Fonte: Extraído de <http://www.lionmotors.com.br/biela-motor-dodge-dakota-2-5-8v-98-diesel-1kg.html>

2.2.5 Cabeçote

O cabeçote do cilindro veda a extremidade superior do bloco e cilindros. Ele aloja as válvulas de troca de gás, assim como as velas e/ou injetores de combustível. Junto com o pistão, também assegura o formato desejado da câmara de combustão. Na grande maioria dos motores de carro de passeio o comando de válvulas também é montado no cabeçote do motor. A distinção das configurações básicas do design do cabeçote seguiu a linha do fluxo das válvulas de admissão e escape onde pode se ter dois tipos: cabeçote de contra fluxo e de fluxo cruzado. (BLUCHER, 2005)

2.3 Conceitos dos MCI

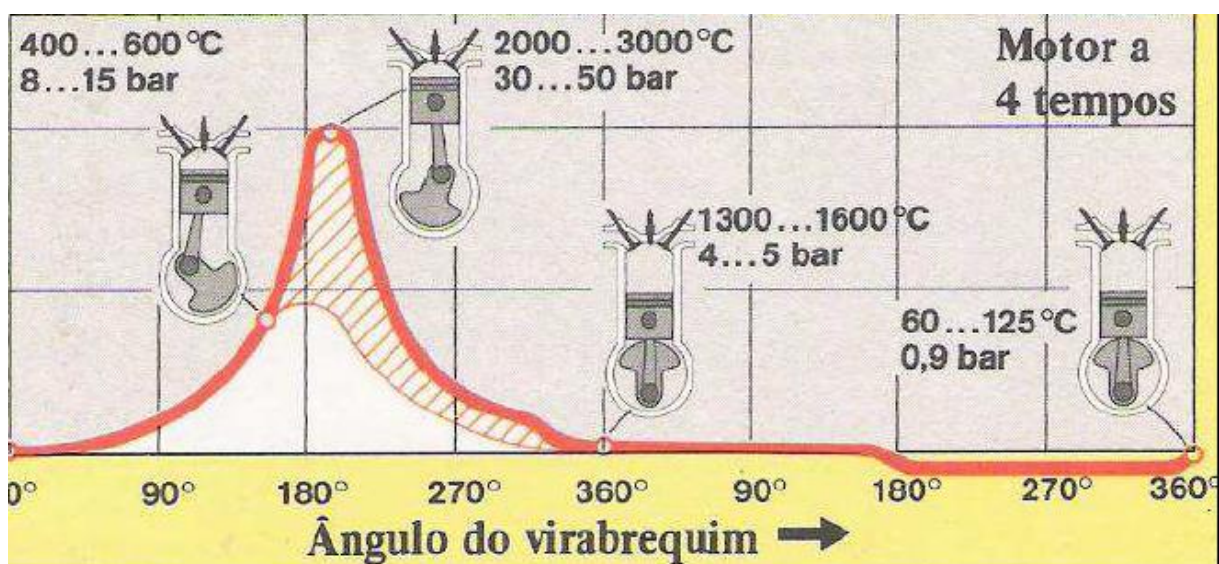
2.3.1 Ciclo Otto

O motor de ignição por centelha (Motor SI) é um motor com pistão de mistura ar combustível de formação interna ou externa. A formação externa de mistura geralmente produz misturas homogêneas, enquanto a mistura formada internamente é altamente heterogênea no momento da ignição. O tempo de formação de mis-

tura e a distribuição do combustível na câmara de combustão são fatores importantes que influenciam no grau de homogeneização que pode ser atingido pela formação interna da mistura. (BLUCHER, 2005)

Em ambos os casos, a mistura é comprimida em aproximadamente 20~30bar no tempo de compressão para gerar uma temperatura final de compressão de 400~500°C. Porém essas condições são insuficientes para a auto inflamação da mistura ar-combustível, então por esse motivo é induzido uma centelha elétrica para inflamar a mistura aumentando a temperatura e a pressão realizando trabalho na cabeça do pistão.

Figura-8 Pressões dentro da câmara de compressão.



Fonte: Froés

Considerando a busca pela a mistura ideal, que é impossível devido as condições de velocidade e carga de ar admitida, há formação de mistura imperfeita, onde existem diversos tipos de tecnologias que tentam aproximar da queima ideal. No caso dos motores de ciclo Otto o controle básico para encontrar a mistura ideal para as condições transitórias é o cálculo da ECU para a massa de ar admitida, com todos os fatores que são analisados pelos sensores do motor como carga desejada, temperatura e pressão ambiente. Com a massa de ar conhecida a ECU do motor consegue saber a quantidade necessária de massa de combustível para manter o regime de carga, atender as normas emissões e manter as condições operacionais dos componentes.

O processo de combustão é realizado por 4 tempos que são infinitamente reproduzidos enquanto o motor está em funcionamento, assim descrito na figura 9:

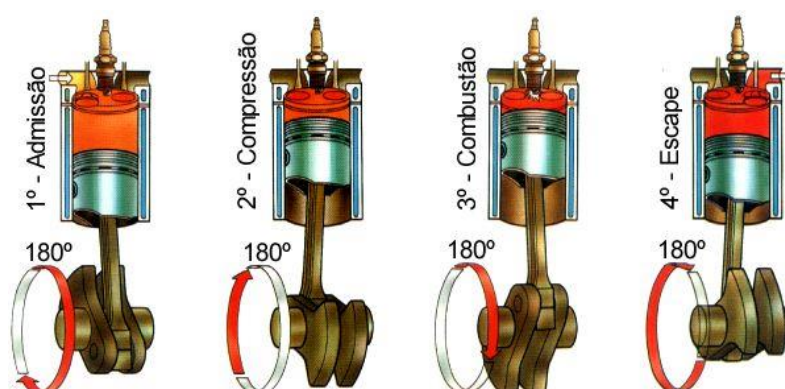
O chamado 1º tempo motor, corresponde ao tempo de admissão, “durante o qual a mistura ar-combustível é aspirada para o interior do cilindro do motor. Neste momento, a válvula de admissão encontra-se aberta”. Nesta etapa, o êmbolo se desloca do PMS ao PMI, nesse processo o pistão cria uma pressão negativa no coletor de admissão aspirando o ar frontal do motor para dentro do cilindro.

O 2º tempo motor é denominado curso de compressão, durante o qual, ocorre uma elevação da pressão no interior do cilindro em uma conseqüente redução do volume da mistura, nesta etapa, tanto a válvula de admissão quanto a de escape encontram-se fechadas. O movimento do êmbolo nesta etapa varia entre PMI e PMS.

A ignição da mistura ocorre no 3º tempo motor, quando a centelha produzida pela vela de ignição causa uma combustão na mistura ar-combustível. Devido ao aumento de pressão, em decorrência da expansão dos gases, o êmbolo se desloca do PMS ao PMI realizando trabalho.

Após a queima da mistura, ocorre o 4º tempo motor, a exaustão, quando os gases resultantes da queima são expelidos do cilindro através da válvula de escape impelidos pelo movimento do êmbolo que se desloca de PMI a PMS. (OBERT, 1971).

Figura-9 Os quatro tempos do ciclo Otto



Fonte: Extraído de <https://arcomariaje2000.wordpress.com/2015/04/11/motores-termicos/>

2.3.2 Densidade

A densidade é uma propriedade da matéria que relaciona massa e volume. Em outras palavras, ela define a quantidade de massa de uma substância contida por unidade de volume. A expressão básica é a seguinte:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Temos também o conceito de densidade absoluta ou massa específica de um gás que é a relação entre a massa e o volume do gás, considerando condições de pressão e temperatura previamente estabelecidas. A densidade absoluta de um gás depende da pressão e da temperatura em que o gás se encontra; isso ocorre não por causa da massa, pois ela não depende da pressão e da temperatura, mas o volume. A densidade do gás é inversamente proporcional à sua temperatura.

Esses conceitos ajudam a entender as diferenças entre os combustíveis e a quantidade de energia criada na combustão entre o ar e o combustível. (PELOTAS, 2013)

2.3.3 Combustíveis

Combustíveis são substâncias químicas que emitem calor ao reagirem com o oxigênio, num processo de combustão. Esta propriedade permite que uma quantidade de massa de um combustível desempenhe o papel de reservatório de energia, capaz de armazená-la em sua estrutura química até o momento de ser usada. A quantidade de energia, sob a forma de calor, que um combustível pode fornecer quando queimado completamente chama-se poder calorífico. (DE LANA, 2007).

Durante a combustão ideal a mistura composta por combustível e ar que será injetada na câmara de combustão deve ser oxidada uniformemente e em seguida entrar em ignição através da centelha produzida pela vela de ignição. Porém, na maioria das vezes, na combustão real a frente de chama, que provoca a queima da mistura, não alcança uma porção da mistura que sofre um grande aquecimento e não resistindo a alta temperatura entra em autoignição. Este fenômeno provoca a chamada detonação que causa danos ao pistão e as válvulas (BOSCH, 2005).

2.3.3.1 Gasolina

A gasolina é composta de hidrocarbonetos derivados do petróleo constituídos de quatro a doze átomos de carbono com pontos de ebulição que variam entre 30 e 220° C. A gasolina é produzida através da mistura de dois, três ou mais componentes obtidos em diferentes processos de refino e pode receber aditivos especiais para aumentar seu desempenho (IBP, 2010).

A gasolina sem tratamento apresenta baixa octanagem, por isso torna-se necessário a adição de componentes resistentes a detonação como é o caso dos hidrocarbonetos cíclico, aditivos oxigenados como o etanol e o éter que tem efeitos positivos quanto ao aumento de octanagem da gasolina.

O etanol possui elevado índice de octanas, e por isso é misturado com a gasolina para aumentar sua octanagem e resistência a detonação. A cada 5% de etanol adicionado à gasolina aumentam-se o índice de octanas em duas unidades. A adição de etanol além de melhorar a qualidade antidetonante da gasolina ainda auxilia na redução das emissões de gases poluentes. (VOLCI, 2007)

A tabela 1 apresenta a relação do aumento de octanagem da gasolina comum brasileira, expressa pelo IOM (Índice de Octanas do Motor), conforme aumenta a porcentagem de álcool anidro (etanol) à mistura:

Tabela-1 Características das misturas de álcool anidro e gasolina tipo A

Misturas (% em volume)	A	B	C	D	E	F
Gasolina tipo A	100	95	90	85	80	75
Etanol	0	5	10	15	20	25
Densidade à 20,4°C	0,721	0,724	0,722	0,723	0,733	0,736
Índice de Octanas do Motor	73,1	76,1	76,8	81	83,4	85,6

Fonte: Extraído de Volci, 2007

Mesmo com a porcentagem de etanol e os aditivos presentes para melhorar a resistência a detonação da gasolina, ela ainda apresenta baixa resistência à detonação se comparada a outros combustíveis também estudados neste trabalho.

Por este motivo, motores movidos a gasolina devem apresentar taxas de compressão menores para não propiciar a sua autoignição.

2.3.3.2 Etanol

O álcool etílico, conhecido como etanol, é obtido através de três fontes possíveis: plantas e matérias ricas em açúcares (como a cana de açúcar), plantas ricas em amidos (como a mandioca, a batata e o milho) e plantas ricas em celulose (como a madeira, o bambu, o aguapé). (VOLCI, 2007)

O etanol utilizado como combustível no Brasil tem duas particularidades: alta resistência à detonação e baixo poder calorífico. A alta resistência à detonação do etanol possibilita a utilização de taxas de compressão mais elevadas, porém o baixo poder calorífico faz com que o combustível gera pouca energia durante a queima, o que requer uma mistura de ar-combustível mais rica, pois o motor necessita de mais combustível para obter o mesmo trabalho e por esse motivo os motores à álcool gastam mais em volume do que a gasolina num percurso igual com as mesmas condições de pressão atmosférica e temperatura ambiente.

Veículos movidos somente a etanol têm taxa de compressão mais elevadas e veículos flex que têm taxa de compressão intermediária mais próxima a 14:1 são veículos que tem um funcionamento mais econômico com combustível a etanol.

Os motores com o combustível a etanol geram mais potência que os motores com combustível a gasolina, pois têm a necessidade de utilizar mais energia térmica proveniente do ar de admissão para se vaporizar, calor vaporiz (tabela 2), reduzindo a temperatura do ar de admissão na mistura com o etanol, aumentando proporcionalmente a densidade do ar, sendo assim pode se colocar mais ar dentro da câmara de combustão, gerando uma pressão de compressão maior e proporcionalmente maior pressão de combustão, resultando em maiores níveis de potência e torque comparado a utilização da gasolina no motor de combustão interna.

Tabela-2 Propriedades dos combustíveis automotivos.

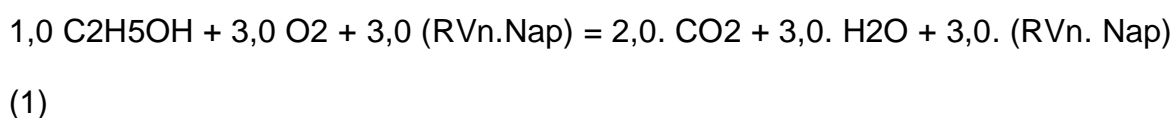
Combustível	Gasolina E27	Etanol E100
Estequiometria	13,2:1	8,9:1
Poder Calorífico (kcal/kg)	9600	6100
Calor vaporiz (kcal/kg)	101	201

Fonte: Froés (201-?)

2.3.4 Mistura ar combustível

A mistura de ar/combustível calculada pelo módulo eletrônico depende da quantidade de mistura admitida pelo motor e pode ser considerada estequiométrica se a quantidade de oxigênio presente na mistura for a suficiente para reagir completamente com a massa de combustível injetada. Uma combustão ideal, ou estequiométrica, resulta em dióxido de carbono (CO₂), vapor de água (H₂O) e gases inertes, como o nitrogênio que teoricamente não participa da combustão apenas faz parte do volume de ar admitido (PUJATTI, 2007).

Para exemplificar, abaixo está descrito uma equação de balanceamento de uma molécula de álcool etílico (C₂H₅OH) com ar atmosférico:



Na qual:

NAP = Nitrogênio aparente (concentração volumétrica de N₂ e demais elementos componentes do ar atmosférico não reagem no processo de combustão);

RVN = Razão volumétrica entre NAP e O₂, presente na atmosfera.

A partir dos números de mols apresentado em cada componente na equação (2), é possível determinar a quantidade de ar e de combustível necessário para uma combustão ideal, ou seja, estequiométrica. Abaixo estão as equações de

massa de ar e combustível consumidos em uma reação estequiométrica, necessárias para definir a razão de A/C (Ar/Combustível) ideal:

- Massa de ar consumida na reação (M_{ar}):

$$M_{ar} = [3 \cdot (1 + 3,764) \text{ mol}] \cdot [28,960 \text{ g / mol}] = 413,89 \text{ g} \quad (2)$$

- Massa de combustível consumida na reação (M_{comb}):

$$M_{comb} = [1 \text{ mol}] \cdot [(24 + 6 + 16) \text{ g / mol}] = 46,0 \text{ g} \quad (3)$$

- Razão estequiométrica (A/C):

$$A/C = M_{ar} / M_{comb} = 9,0, \text{ ou seja, } A/C(s) = 9: 1 \quad (4)$$

A relação estequiométrica da mistura varia de acordo com o tipo de combustível utilizado (tabela 3), tendo-se como referência a concentração de O_2 presente no ar atmosférico. A tabela abaixo exemplifica as diferentes relações estequiométricas que variam de acordo com o combustível utilizado (PUJATTI, 2007).

Tabela-3 Relação estequiométrica da mistura em função do combustível.

Combustível	A/F – Relação ar combustível (Kg/Kg)
Gasolina Pura (E0)	14,7:1
Etanol (E100)	9,0:1
Gasolina Comum (E22)	13,2:1
Diesel	15,2:1

Fonte: Pujatti (2007)

Dessa forma, tem-se de maneira direta a condição de operação de um motor a combustão interna a partir da análise do fator lambda que define para valores diferentes de 1 para o excesso ou a falta de ar presente na combustão.

Em situações de $\lambda < 1,00$ representam uma condição de mistura rica, ou seja, a mistura está com falta de ar e excesso de combustível se comparado a estequiométrica. Esta condição de funcionamento possibilita o motor atingir a potência máxima e aquecimento na fase de partida a frio.

Já quando o fator esteja $\Lambda > 1$, a mistura possivelmente está empobrecida de combustível e com excesso de ar. Nesta faixa são alcançadas as melhores condições de economia de combustível, porém a potência útil do motor é menor.

As condições de funcionamento do motor que exigem variação a composição da mistura, são: partida do motor, aquecimento, marcha lenta, cargas parciais, aceleração rápida, plena carga e desaceleração (PUJATTI, 2007).

2.3.5 Taxa de compressão

É a expressão utilizada para determinar a razão do volume no interior do cilindro quando o pistão está em ponto morto inferior em comparação com quando ele está em ponto morto superior. Quanto maior a taxa de compressão mais eficiente é o motor e menor o consumo de combustível a uma dada potência, ocasionando um melhor aproveitamento energético, já que permite uma maior temperatura de combustão para uma quantidade de combustível. Em decorrência da maior temperatura a velocidade da reação de queima do combustível será maior, fazendo com que a força motriz gerada da expansão dos gases de combustão chegue em um ponto mais cedo, aumentando o período de trabalho útil do pistão.

2.3.5.1 Taxa de compressão estática

É a taxa de compressão oriunda da construção física do projeto do motor. Essa taxa é calculada através da divisão do volume do cilindro quando o pistão se encontra em ponto morto inferior pelo volume do mesmo quando o pistão se encontra em ponto morto superior. Nessa conta são considerados como volume da câmara de combustão a soma do volume da altura total de compressão, volume da coroa do pistão, volume da vela de ignição, volume da junta do cabeçote já instalada, volume do cabeçote e volume da folga do pistão.

Podemos tomar como exemplo um motor 2.0 de 4 cilindros com volume unitário do cilindro igual a 450cm^3 e volume de câmara de combustão de 50cm^3 . A taxa de compressão desse motor será a razão entre a soma do volume do cilindro com a câmara de combustão dividido pelo volume da câmara de combustão, assim sendo a taxa de compressão estática desse motor é igual a 10:1.

2.3.5.2 Taxa de compressão dinâmica

A taxa de compressão dinâmica se difere da estática, pois leva em consideração a eficiência volumétrica do motor. A eficiência volumétrica pode ser caracterizada pelo quanto do volume teórico foi aspirado pelo motor no ciclo de admissão. A eficiência volumétrica pode variar conforme o diâmetro, o comprimento, geometria, ângulos e o volume do coletor de admissão e de escape; do diâmetro e da localização das válvulas no cabeçote; quantidade e ângulos de assentamento de válvulas; geometria do pistão; levante, cruzamento, duração e ângulo de centro do comando de válvulas; diâmetro, comprimento e pareamento do coletor de escape.

A eficiência volumétrica nos permite enxergar a porcentagem de preenchimento do cilindro para um determinado regime de trabalho do motor.

Podemos tomar como exemplo um motor 2.0 de 4 cilindros com volume unitário do cilindro igual a 450cm^3 e volume de câmara de combustão de 50cm^3 . Supondo que esse motor tenha uma eficiência volumétrica de 95% em 4500 rpm, isto é, no regime de 4500 rpm o motor está aspirando no ciclo de admissão 475cm^3 . Como o volume de câmara de combustão se mantém fixo e igual a 50cm^3 , a taxa de compressão dinâmica desse motor no regime de 5000 rpm é igual a 9,5:1.

2.3.6 Torque

É um momento de forças que causam a rotação do motor aumentando proporcionalmente com a rotação do motor até seu nível máximo. A partir deste ponto, inicia-se a perda do torque pois, em regimes elevados, os tempos de admissão e escape são reduzidos, o que ocasiona uma queima de combustível não perfeita.

O torque é calculado pela fórmula $T = F \cdot d$, na qual a força "F" representa a força gerada pela expansão dos gases na câmara, que empurra o pistão para baixo e "d" representa a distância que existe entre a linha de centro do eixo de manivelas e o centro do diâmetro da biela, onde: T= Torque (N.m) F= Força (N) D = distância (m)

2.3.7 Potência

Para um motor de combustão interna, são definidas quatro potências:

1. Potência Térmica é o calor fornecido por unidade de tempo pela queima do combustível; onde: PCI é o poder calorífico inferior do combustível, ou seja, energia por unidade de massa, m_c é a vazão em massa de combustível que o motor consome.
2. Potência indicada (W_i) é a potência desenvolvida na cabeça dos pistões;
3. Potência de atrito (W_f) é a potência consumida pelas resistências internas do motor;
4. Potência efetiva (W_e) é a potência medida no eixo do motor.

Onde W_e pode ser expresso em função do torque (T) e do número de rotação do motor (n), normalmente expresso em rotações por minuto ou rpm.

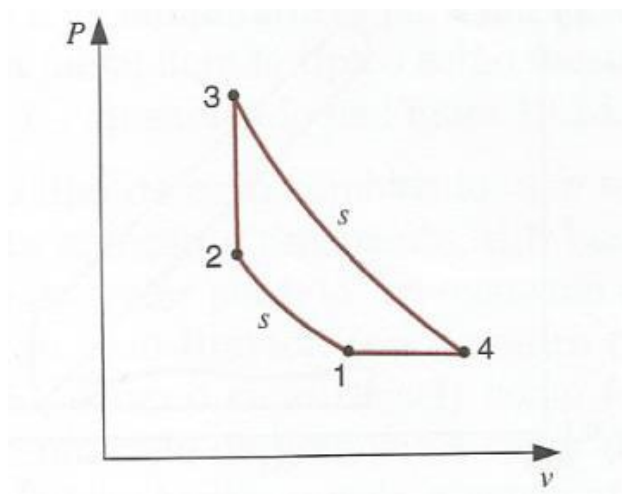
$$W_e = \omega \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot T$$

Onde é a velocidade angular do motor.

2.3.8 Ciclo Atkinson

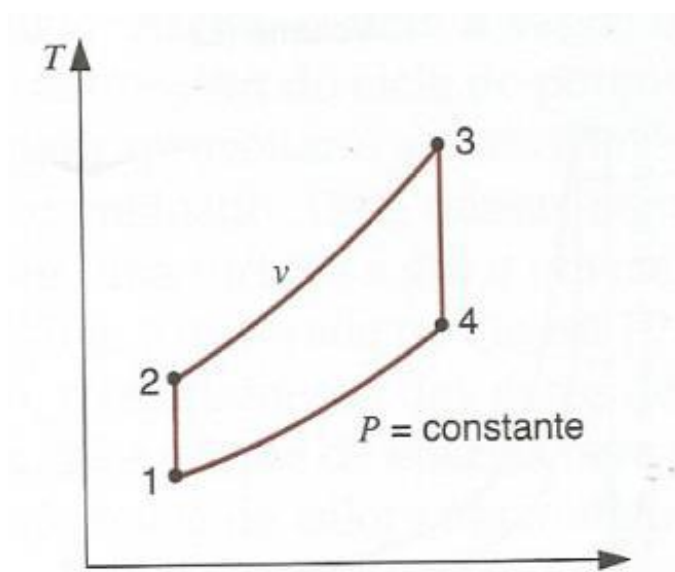
O Ciclo *Atkinson* é um ciclo com poucas diferenças em relação ao ciclo Otto. Com esse ciclo, tem-se uma relação de expansão maior do que a de compressão de modo que o processo de rejeição de calor pode ocorrer a pressão constante. A alta relação de expansão permite que seja obtido mais trabalho, o que faz com que esse ciclo tenha uma eficiência maior que a do ciclo *Otto*. Mecanicamente, o movimento do pistão, nesse ciclo, é mais complicado e deve ser feito mantendo-se as válvulas de compressão menor que a nominal. Os quatro processos do ciclo são mostrados nos diagramas Pv e T-s nas figuras 10 e 11 respectivamente:

Figura-10 Diagramas P-v Ciclo Atkinson



Fonte: Bosch (2005)

Figura-11 Diagrama T-s do Ciclo Atkinson



Fonte: Bosch (2005)

Esse ciclo é o modelo para os motores híbridos utilizados na Ford Escapade e no Toyota Prius. Esse ciclo apresenta eficiência maior que a do ciclo *Otto* para uma mesma relação de compressão. No entanto, em razão do curso de expansão maior, eles tendem a produzir uma potência menor para um motor de mesmo tamanho. Na configuração do motor híbrido, o pico de potência na aceleração é produzido pelo motor elétrico consumindo energia da bateria.

3 Motor de taxa de compressão variável

3.1 Objetivos do Capítulo

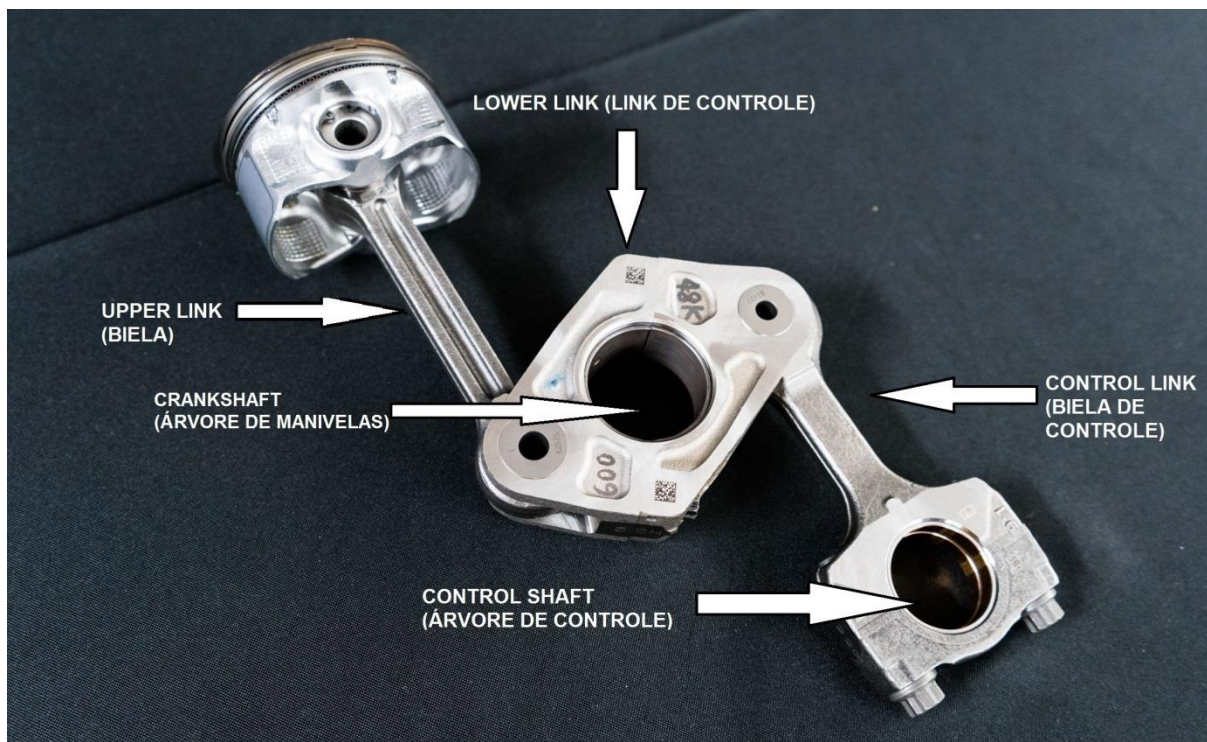
As seções seguintes detalham cada componente do sistema, mostrando sua função e particularidades do funcionamento do conjunto, além de explicar sobre o gerenciamento para a determinação da taxa de compressão no motor, levando em consideração estratégias previamente programadas para as diferentes condições que são submetidas um motor.

3.2 Conceito

O conceito do motor com taxa de compressão variável desenvolvido pela Nissan gira em torno do mecanismo de *Multilink*, que é resumidamente um sistema que interliga dois braços de alavanca num eixo com rolamento, permitindo assim a liberdade de movimentação dos braços com diferentes relações entre si (figura 12).

No caso desse sistema num motor de compressão interna do tipo *Multilink*, um dos braços (*upper link*) tem seu ponto de liberdade fixo que é exatamente a biela que interliga o pistão à árvore de manivelas. Porém na árvore de manivelas temos para cada moente um conjunto de link de controle (*lower link*) que é a união entre a biela e a biela de controle (*control link*), esse último sendo o ponto com variação de seu deslocamento vertical. A biela de controle é ligada do link de controle à árvore de controle através de um braço de controle ligado a um atuador redutor harmônico de alta precisão. Abaixo temos a configuração padrão do motor com taxa de compressão variável:

Figura-12 Conjunto Upper-lower-control link



Fonte: Extraído de <http://wardsauto.com/engines/infiniti-s-variable-compression-engine-packs-punch>

A variação do conjunto é causada pelo movimento rotacional da árvore de controle, que é um eixo com moente decentralizado, tomado por um Servo motor-reductor elétrico chamado de atuador harmônico.

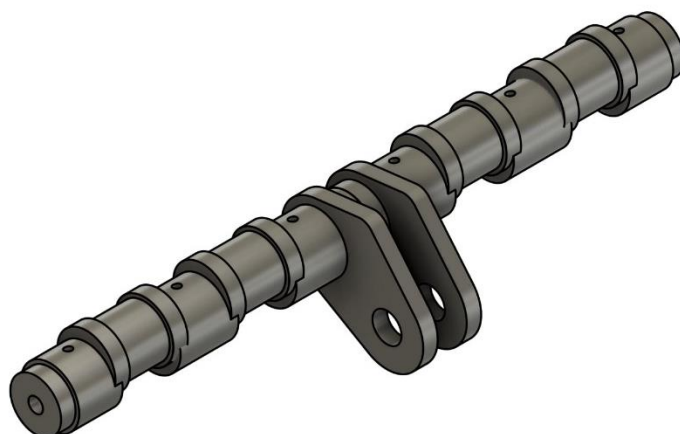
3.3 Componentes do *Multilink Variable Compression Ratio Engine*

3.3.1 *Control Shaft*

A árvore de controle (*control shaft*) é um dos componentes que foram desenvolvidos para implementar o motor convencional para conseguir realizar o feito de mudar a taxa de compressão.

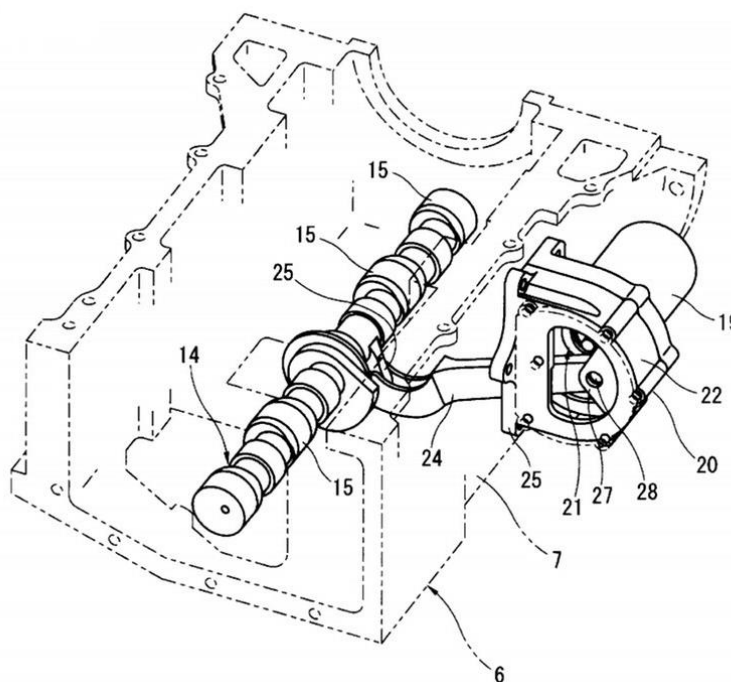
Este componente une a biela de controle (*control link*) ao servo-motor atuador e tem a função de quando o atuador reductor movimentar seu curso angulado transmita esse movimento à biela de controle movimentando-a no eixo z, ou seja, com movimentos ascendentes ou movimentos descendentes.

Figura-13 Detalhe Control Shaft



Fonte: Reis (2018)

Para realizar a função de movimentar o link de controle é necessário que o moente que abrigará o mancal da biela de controle seja decentralizado do munhão que é sustentado por mancais no bloco do motor. A figura 14 ilustra o local onde é apoiada a árvore de controle:

Figura 14 Assento do *Control link* no motor VC-T.

Fonte: Nohara (2002)

O *control link* é suportado por mancais no bloco do motor, sendo que é aplicado o um filme de lubrificação chamado de *hydrodynamic journal bearing* onde são suportadas cargas radiais por esforços causados pelo produto da pressão da expansão volumétrica dos gases da combustão nos moentes e a distância a que esses moentes estão dos mancais do link de controle.

O sistema de lubrificação hidrodinâmica é aquele no qual a superfície do eixo rotor, nesse caso o link de controle é separado do mancal por um mínimo filme de óleo pressurizado pela a força centrífuga que o rotor impõe sobre o lubrificante.

O *control shaft* é um componente que dependendo do projeto pode ser feito de diferentes ligas, entre elas podemos citar o ferro fundido e ligas de alumínio. Para a escolha do material deve se levar em consideração os momentos de força e os modos de vibração para a condição de máximo estresse do componente, onde é determinado pelas as características máximas de potência e torque, o que remete para a determinação da pressão máxima de combustão. Os modos de vibração dependem exclusivamente das formas, dimensões e o tipo de material da estrutura. São calculados através de resoluções de integrais em nós em programas CAD/CAM ou de forma teórica com pouca aproximação através de equações envolvendo matrizes. Os resultados de simulação dos modos de vibração do *Control Shaft* são apresentados na tabela 4 e 5:

Tabela-4 Especificação do material teste para o *Control shaft*

Alumínio	
Densidade	2,7E-06 kg/mm ³
Módulo de elasticidade	68900 MPa
Limite de elasticidade	275 MPa
Limite de tensão à tração	310 MPa
Condutividade térmica	0,23 W/mm.°C
Coefficiente de expansão térmica	2,36E-05/°C

Fonte: Reis (2018)

Resultados:

Tabela-5 Resultados da simulação de frequências naturais.

Frequências	Participação X	Participação Y	Participação Z
Modo 1: 3826 Hz	0	0	76.6411006
Modo 2: 5375 Hz	0.035399999	0.0066	0.0045
Modo 3: 6186 Hz	0	0	10.0470997
Modo 4: 10429 Hz	0.0113	0.284299999	0.0031
Modo 5: 10918 Hz	0.120599999	0.0248	0.012300001
Modo 6: 11323 Hz	0.076000002	0.025300001	0.542599987
Modo 7: 11475 Hz	5.75120002	0.092199998	0.0002
Modo 8: 12281 Hz	0.016	4.5398999	0.1239

Fonte: Reis (2018)

Em suma as frequências naturais encontradas, que são as causadoras de danos à estrutura não se aplicam a condição de trabalho desse sistema, sendo assim os problemas devido ao encontro de frequências naturais é nulo.

3.3.2 Control link

O *Control link* ou biela de controle é o dispositivo que une o link de controle (*Multilink*) e a árvore de controle (*Control shaft*), é um componente igual uma biela de um motor convencional, porém ao contrário de sua função de transmitir a força elástica dos gases de combustão na cabeça do êmbolo para a árvore de manivelas, no motor de taxa de compressão variável do tipo *multilink* sua função é realizar o movimento de rotação de uma ponta do mecanismo *multilink*, através do movimento do *Control shaft*.

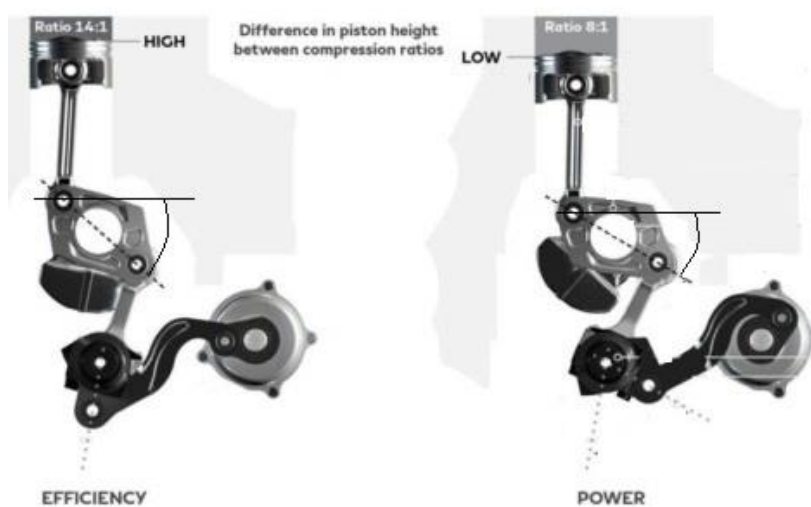
Figura-15 Funcionamento do Control Link.



Fonte: Extraído de <http://autoweek.com/article/technology/variable-compression-engine-are-coming-infiniti-near-you>

O movimento do *control link* é limitado pelo o *multilink* e o *control shaft*, sendo assim somente sendo um instrumento de ligação e transmissão da regulação do ângulo entre os pinos do mecanismo do *multilink*.

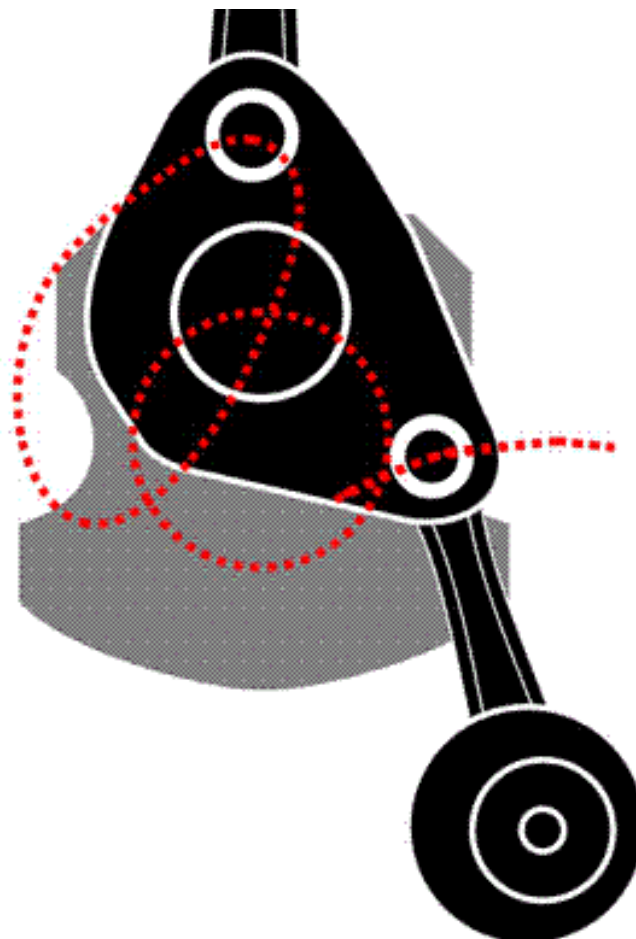
Figura-16 Taxa de compressão alta e baixa.



Fonte: Extraído de <https://motorchase.com/en/2016/08/new-infiniti-vc-t-variable-compression-ratio-engine-work/>

O percurso de movimento do *control link* é semicircular, mesmo no instante do movimento de variação do ângulo dos pinos do *control link* e do *upper link*.

Figura-17 Traçado dos movimentos do sistema *Multilink*.



Fonte: Extraído de <https://www.topgear.com.ph/news/technology-news/nissan-s-crazy-multi-link-engine-explained-a36-20160828>

O movimento do *control link* é limitado pelo o *multilink* e o *control shaft*, sendo assim somente sendo um instrumento de ligação e transmissão da regulação do ângulo entre os pinos do mecanismo do *multilink*.

Figura-18 *Control Link*

Fonte: Extraído de <https://www.caranddriver.com/photo-gallery/infinitis-kr20-variable-compression-turbocharged-engine-prototype-drive-gallery#37>

3.3.3 *Multilink*

O *Multilink* ou link de controle é o componente chave do sistema, interligando o *upper link* com o *control link* à árvore de manivelas do motor. É o mecanismo que recebe a força elástica da combustão da mistura ar-combustível na câmara de combustão através do êmbolo e do *upper link* transformando o percurso linear do pistão em movimento rotacional na árvore de manivelas em uma de suas extremidades, assim como num motor convencional a biela realiza esse trabalho de forma bastante simples. Esse dispositivo vai além da nobre função da biela nos motores convencionais, embora igualmente simples no sistema de variação de taxa de compressão do tipo *multilink*, a outra extremidade do dispositivo recebe o control link que atuado pelo *control shaft* realiza a alteração do ângulo entre o seu próprio pino de ligação ao link de controle com o pino de ligação do *upper link*, alterando assim o ponto morto superior, ou seja, altera na realidade o curso total do pistão, resultando na muda da taxa de compressão estática e dinâmica.

O link de controle é dividido em duas partes, conectadas por dois parafusos, para facilitar a montagem a árvore de manivelas. É uma peça muito solicitada em sua condição de trabalho, para isso deve suportar altas tensões torcionais, vibração e desgaste pela condição dinâmica na qual é submetida, para os motores concebidos pela Infiniti, o link de controle é uma fabricado em liga de alumínio forjada e compactada, pois alia a resistência às condições acima ditas com uma menor densidade, ou seja, menor massa comparado a outros tipos de materiais com mesmas características de fabricação.

Figura-19 Multilink



Fonte: Extraído de <https://www.caranddriver.com/photo-gallery/infinitis-kr20-variable-compression-turbocharged-engine-prototype-drive-gallery#38>

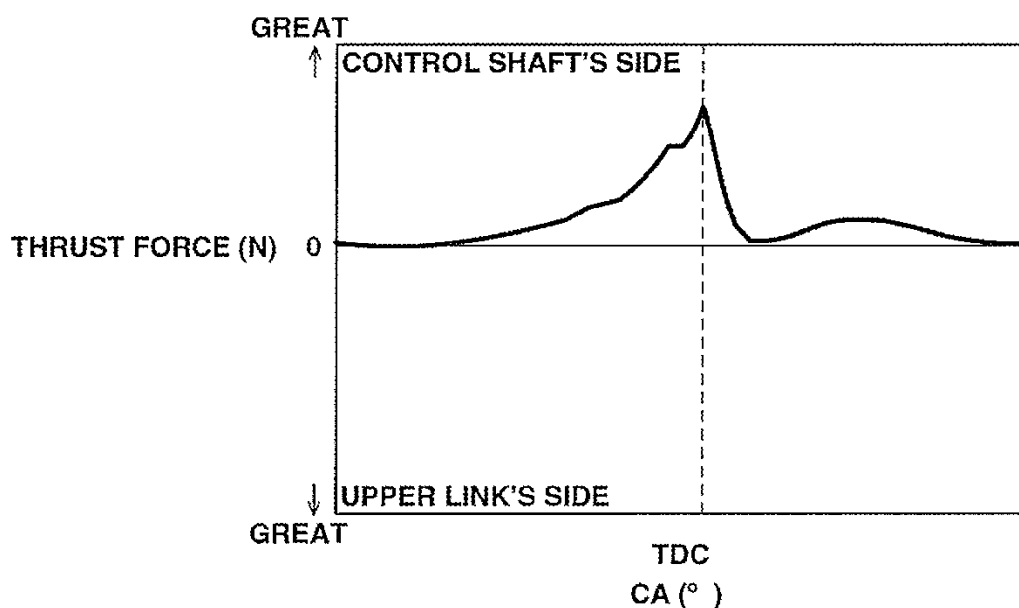
3.3.4 Conjunto *Upper Link* – Pistão

Esse componente é o conjunto que se aproxima do conjunto Pistão – biela dos motores convencionais, com uma particularidade. A diferença entre o novo sistema está no *upper link* que ao contrário da biela convencional não tem um colo para o mancal de moentes da árvore de manivelas.

O motivo para que não tenha esse colo é porque a biela do sistema de variação da taxa de compressão é conectada à árvore de manivelas pelo, antes visto, link de controle por meio de pino e não diretamente como nos motores convencionais.

A tecnologia investida nos pistões são as mesmas que encontramos em motores convencionais. São pistões forjados e compactados, porém com menos massa, pois não há necessidade de aumentar a resistência nas saias do pistão porque o sistema *multilink* melhora a relação biela-manivela (R/L), diminuindo o ângulo entre o centro do pino do pistão e a distância máxima do raio dos moentes da árvore de manivelas, diminuindo os custos na fabricação do pistão e amenizando o desperdício de energia da pressão de combustão dissipada em forma de calor na parede dos cilindros.

Figura-20 Força na lateral do cilindro.

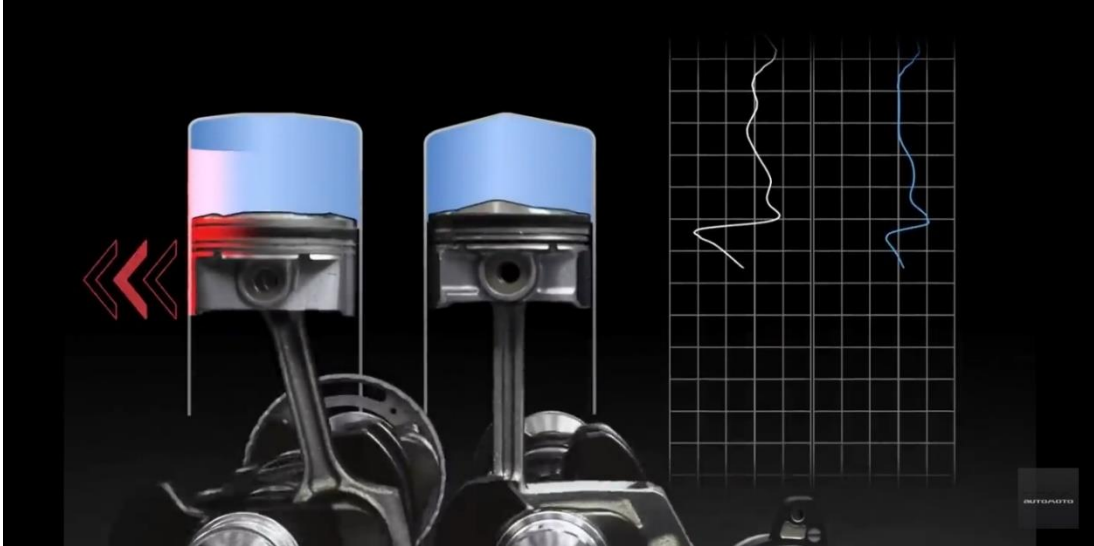


Fonte: SATORU; TANABE, TAKASHI; MOTOKI; KATSUYA (2003)

A figura 20 demonstra a energia perdida com fricção da parede do cilindro pelo ângulo da árvore de manivelas. Note que a energia tem um pico no TDC (Ponto morto superior) e logo em seguida a força cai a zero no momento que há a inflexão e no momento de aproveitamento da energia que a pressão de combustão a resistência

tribológica é diminuta comparado aos sistemas convencionais, sendo assim o rendimento do conjunto é beneficiado (Figura 21).

Figura-21 Força desperdiçada na parede do cilindro.



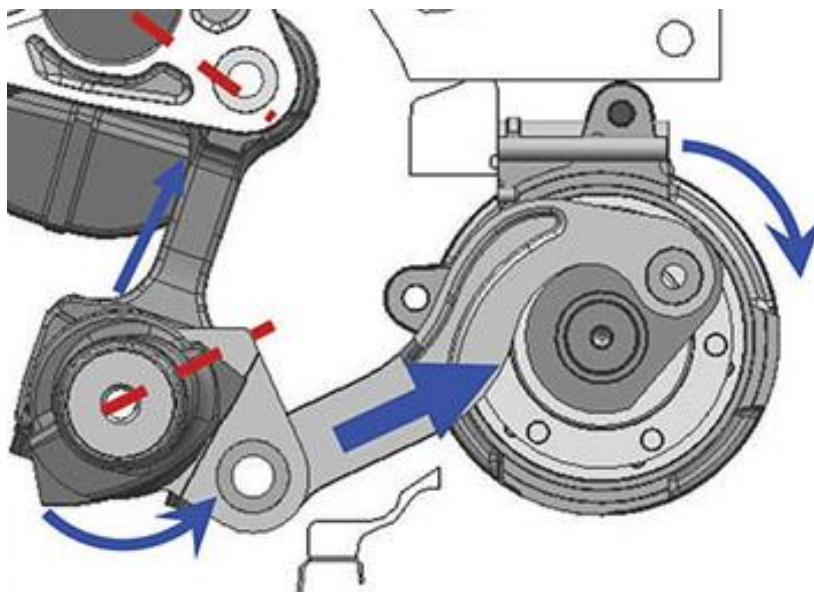
Fonte: Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=9qkqp39eLc8>

3.3.5 Conjunto Atuador Harmônico – Braço alavanca

O conjunto atuador – braço de alavanca é o sistema que recebe as informações do módulo de controle do motor e realiza a atuação do servo motor que rotaciona escrevendo um movimento semicircular, onde atrelado vai uma haste que é conectada a árvore de controle.

Quando atuado o servo motor movimenta a haste que realiza um movimento de um braço com força suficiente para movimentar a árvore de controle da biela de controle.

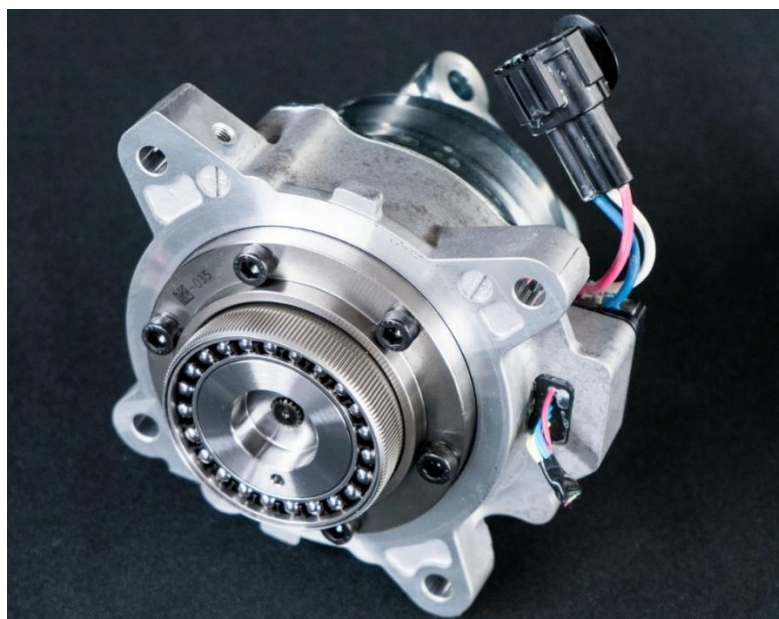
Figura-22 Sentido de movimento do servo-atuador com o braço de alavanca.



Fonte: Extraído de <http://www.autonews.com/article/20171120/OEM06/171129970/infiniti-turbo-engine-fuel-efficiency-performance>

O movimento do servo motor não ultrapassa 300°, que é o suficiente para que consiga a redução do percurso do êmbolo de 6 milímetros no ponto morto superior.

Figura-23 Atuador Harmônico.



Fonte: Extraído de <https://www.caranddriver.com/photo-gallery/infinitis-kr20-variable-compression-turbocharged-engine-prototype-drive-gallery#36>

3.4 Funcionamento do *Multilink Variable Compression engine*

3.4.1 Determinação dos parâmetros

Os motores que receberam o sistema de variação de taxa de compressão deverão ter no mínimo um controle básico de comando de válvulas variado, pois para aliar as vantagens da mudança da taxa deve proporcionar um leque de opções em tempos de abertura e fechamento de válvulas de admissão e escape como o cruzamento de válvulas.

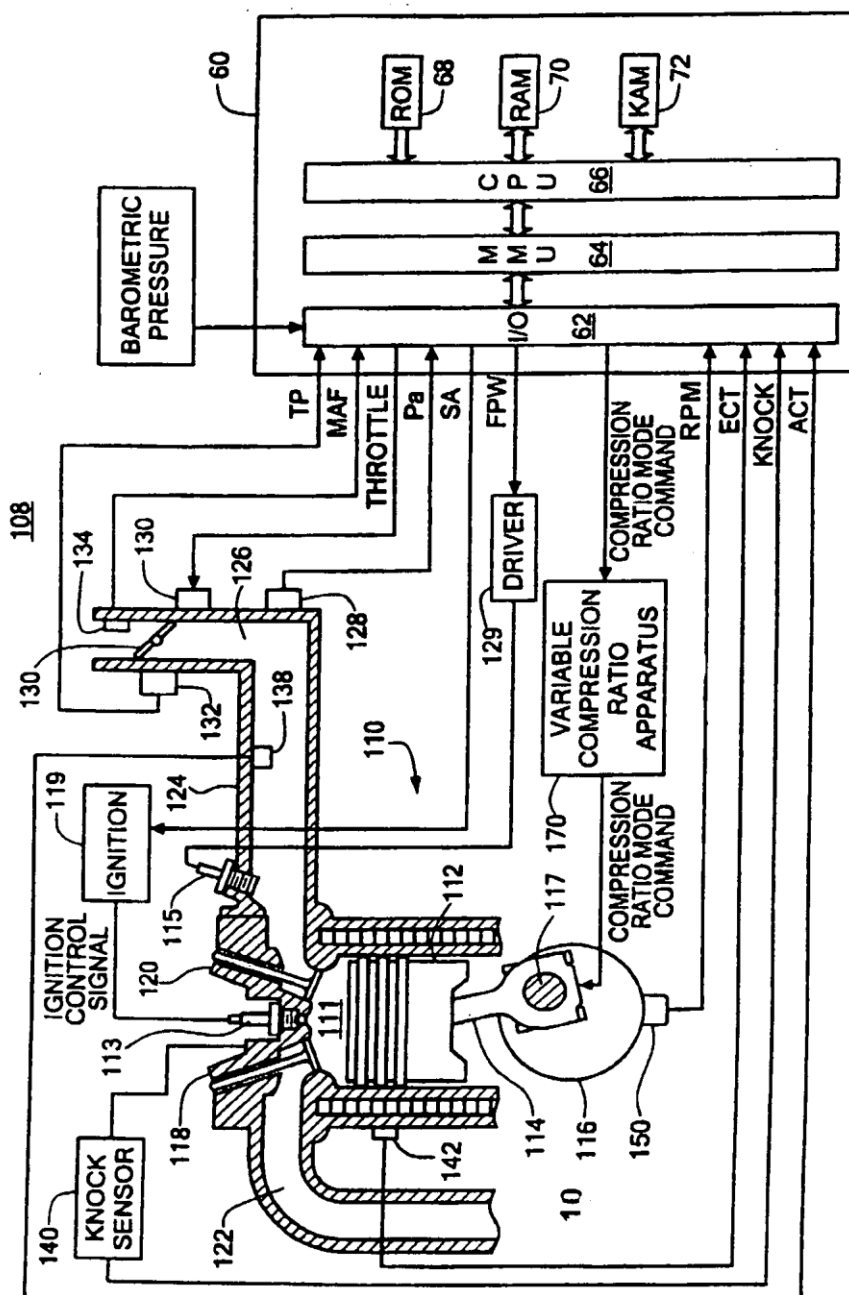
O processo inicial da determinação da taxa de compressão depende de fatores de carga, condições físicas e respostas dos sensores como: pressão atmosférica, temperatura do ar, temperatura do motor, sensor de etanol, entre outros.

Figura-24 Funcionamento do sistema de variação de taxa de compressão.



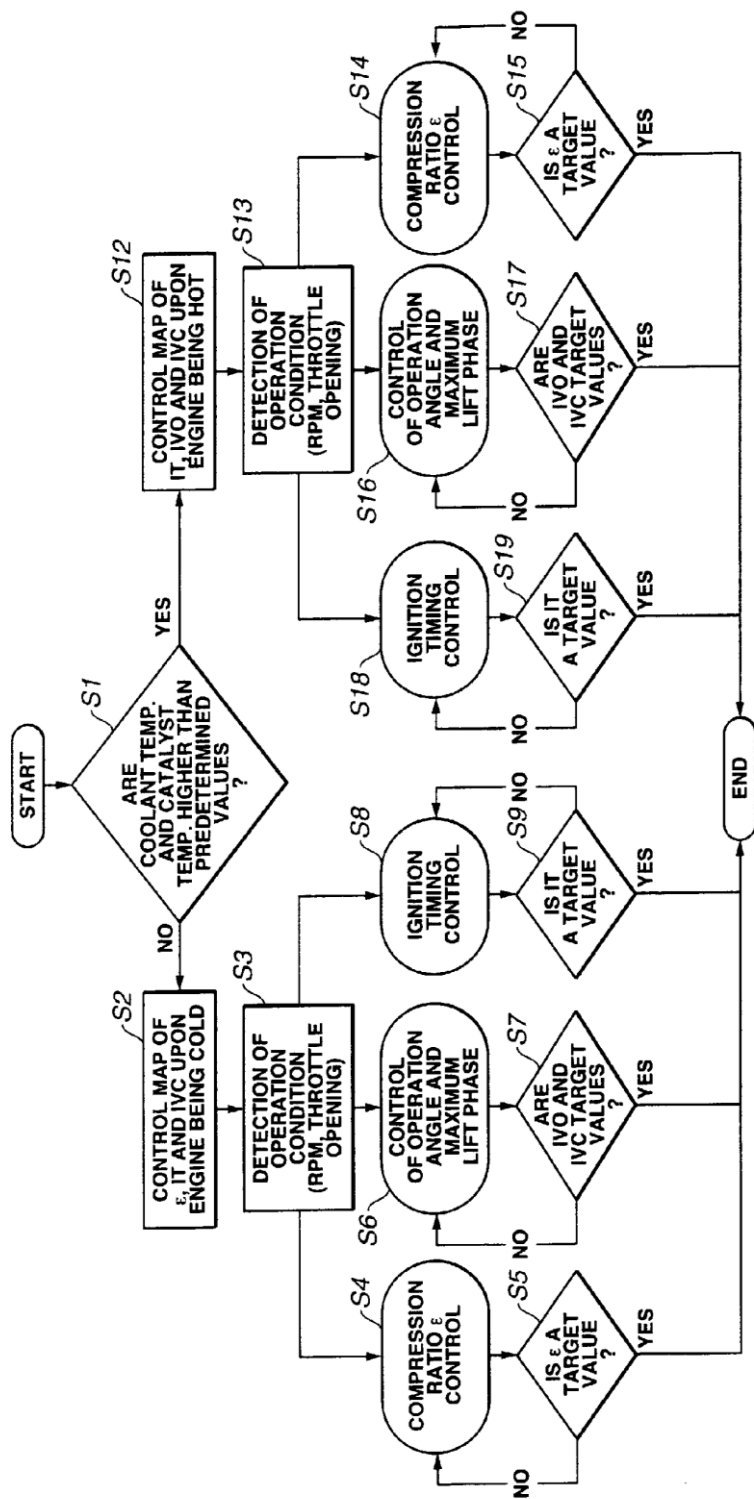
Fonte: Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=9qkqp39eLc8>

Figura-25 Sinais recebidos para determinar a condição inicial de partida e de mudanças de parâmetros.



Fonte: Christopher Glugla (2005)

Figura-26 Fluxograma da interpretação eletrônica para decisão da taxa de compressão.



Fonte: Tsuneyasu Nohara; Yoshiaki Tanaka; Shinichi Takemura; Shunichi Aoyama (2002)

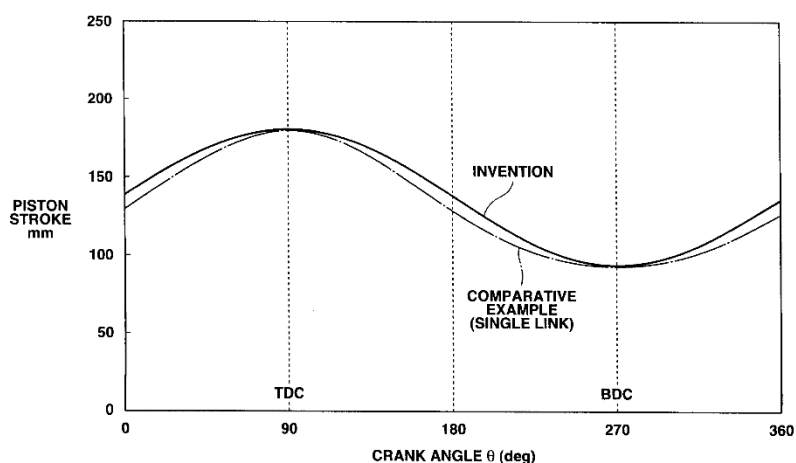
3.4.2 Alta taxa de compressão

Quando o motor tem uma baixa carga e alta rotação o veículo está numa situação de velocidade alta e condição de cruzeiro com o único objetivo de manter a velocidade aproveitando a inércia do movimento.

A condição acima é muito favorável para uma condição de alta compressão pois queremos uma grande eficiência térmica para obtermos menores taxas de emissões de gases e menor consumo.

Um motor com a taxa de compressão variável atuaria nessa condição aumentando a taxa de compressão. Para motores de combustão interna do ciclo *Otto*, o aumento da taxa de compressão aumenta também o risco de termos um problema de autoignição, pois que causa uma força contrária à subida do êmbolo causando o que muitos chamam de “batida de pino” que na realidade é a detonação. Nos veículos com motores convencionais, esse problema é solucionado atrasando o ponto de ignição. No motor de taxa de compressão variável a condição descrita acima resolveria com a alteração da taxa de compressão para maiores níveis.

Figura-27 Comparação entre o curso mínimo e máximo do pistão.



Fonte: Shunichi Aoyama; Ryosuke Hiyoshi; Takanobu Sugiyama; Shinichi Takemura (2002)

O processo de aumentar a taxa de compressão é atrelado ao controle de comando de válvulas, onde quando começa o procedimento de atuar o servo motor para movimentar a árvore de comando da biela de controle do *multilink*, o comando de admissão adianta proporcionalmente enquanto o comando de escape se for variável, atrasa totalmente, para conseguir o maior cruzamento do sistema. O cruza-

mento vai garantir que ocorro o ciclo *Atkinson* e o motor funcione num sistema de EGR (recirculação de gases de escape) onde diminuirá consideravelmente os níveis de consumo e de emissão de monóxido de carbono.

Esse efeito do cruzamento de válvulas diminui a potência efetiva do motor, mas como o objetivo é ser mais eficiente num regime de alta que não demanda tanta carga, o efeito não é notório, pois o resultado é um alto rendimento térmico da mistura e um baixo consumo de combustível. Nesse momento se houver turbo com geometria variável, o turbo funcionará com sua voluta com abertura máxima.

Se estiver utilizando etanol como combustível podemos ter compressões na faixa de 14:1, bem próximo da faixa ideal que deve manter para a utilização do pleno rendimento do combustível renovável.

Figura-28 Fluxo de movimento para chegar a taxa de compressão máxima.



Fonte: Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=9qkqp39eLc8>

3.4.3 Baixa taxa de compressão.

Para as condições de baixa compressão quando em motores turbo, se utiliza desse artifício para diminuir a taxa de compressão dinâmica, pois para aliar performance e emissões junto com durabilidade é necessário manter o equilíbrio com a pressão de compressão dinâmica final.

O módulo eletrônico do motor identifica que é necessário utilizar uma baixa compressão quando existem pelo menos um dos seguintes fatores: a gasolina tiver

pouco percentual de etanol em sua composição (<1% de etanol), tiver uma situação de alta carga e baixa rotação e combustível com octanagem muito baixa.

Para obter performance elevada, a variação do comando de válvulas entra em funcionamento para obter baixo cruzamento de válvula e o sistema de ignição adiantar o ponto de centelha. Se houver injeção direta pode utilizar em favor da baixa taxa de compressão, onde pode atuar com pré-injeção para que a mistura fique mais heterogênea nos locais mais longe da vela e uma mistura mais rica acumulada próximo a vela de ignição.

Para aproveitar ainda mais a condição de mudança da taxa de compressão para valores baixos pode se unir a tecnologia de turbo com geometria variável, onde nesse momento a voluta diminui de tamanho para a diminuição do turbo lag e aumentar o enchimento da câmara de combustão, não oferecendo risco de uma alta taxa de compressão não diminuir a vida útil dos componentes do motor.

Para que haja a diminuição da taxa de compressão o atuador harmônico rotaciona puxando o braço atuador rotacionando a árvore de comando empurrando a biela de controle e o pino dele para cima, esse movimento puxa para baixo através do pino da biela o êmbolo cerca de 6 milimetro antes do ponto morto superior do motor sem variação.

Figura-29 Fluxo de movimento para chegar a taxa de compressão mínima.



Fonte: Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=9qkqp39eLc8>

4 Conclusões

O sistema de variação da taxa de compressão criado pela Nissan, que atualmente está aplicado aos veículos da linha Infiniti é um grande avanço para os motores de combustão interna pois estamos pensando cada vez em menores impactos que nossas ações causam no meio ambiente. Cada vez que as legislações aumentam os requisitos mais perto do fim da vida dos motores de combustão interna em produção em série pois estamos chegando no máximo de rendimento que um motor pode entregar, com tecnologias que se adaptam aos fatores variáveis do processo de geração de trabalho de um sistema motriz a combustão.

Temos a variação de praticamente todos os sistemas do motor, para que consigamos o melhor rendimento para qualquer situação, entre eles podemos adicionar o controle da taxa de compressão, que é um fator crucial para entregar resultados sólidos com performance e eficiência mesmo com a grande variabilidade dos fatores que são intrínsecos ao processo.

Para o nosso país, esse sistema é de grande valor pois temos uma grande problemática devido ao combustível comercializado, o que reduz ao sistema a entrega da eficiência e baixa emissão desejada. Podemos abrir maiores leques de estratégias nos processos de gerenciamento do motor para obtermos para qualquer mudança das variáveis uma atuação mais eficiente contribuindo para o atendimento dos requisitos legais e aumentando a vida dos motores de combustão interna em larga escala, pelo menos em situações mais específicas como em motores híbridos.

Concluí que para manter o progresso dos motores de combustão interna e não comprometer os lucros das montadoras o sistema de variação de taxa de compressão do tipo *multilink* é viável devido às poucas mudanças nas peças estruturais, não sendo necessário um remodelamento completo da disposição dos elementos nem cuidados especiais com condições que possam gerar modo de falhas. Pelo o que esse sistema entrega em eficiência, desempenho e redução de emissão de gases aliado ao investimento relativamente menor do que outras tecnologias são muito plausíveis o desenvolvimento em motores convencionais nas montadoras, principalmente, que detenham o mercado brasileiro.

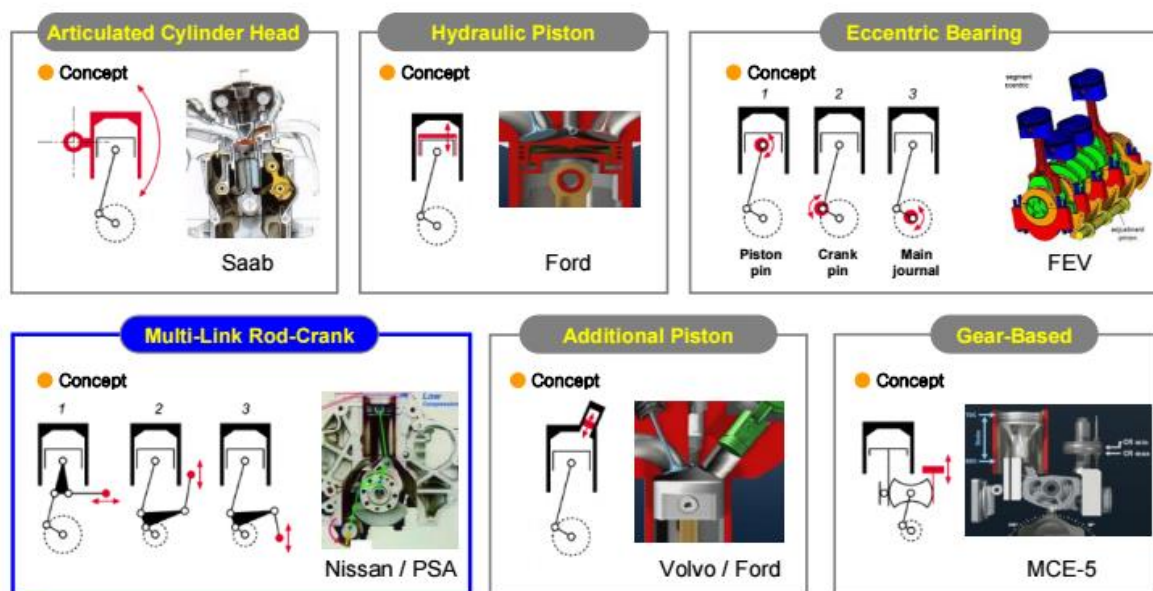
4.1 Propostas Futuras e novos desenvolvimentos

Em paralelo com o sistema de taxa de compressão variável *multilink* temos sistemas que estão sendo implementado, algum por muitos anos, que também conseguem o feito de alterar essa configuração física do motor, entre eles pode ser citado:

- Conceito de cabeçote articulado (Saab)
- Conceito por pistão hidráulico (Ford)
- Conceito de rolamento excêntrico (FEV)
- Conceito com pistão adicional (Volvo/Ford)
- Conceito de pistão dentado (MCE-5)

Todos esses sistemas teoricamente conseguem reproduzir os resultados de alteração da taxa de compressão do motor, porém o resultado mais eficaz é o sistema *multilink*, tanto que ele já é produzido em série em veículos da Infiniti, feito que nenhum outro sistema comentado conseguiu, abaixo está a esquematização dos conceitos apresentados em comparação ao sistema *multilink*:

Figura-30 Tipos de sistemas de variação de taxa de compressão.



Fonte: Hoog-Wook Lee, Won Gyu Kim, Myung-Rae Cho, Jin Woo Cho, Sang Hee Lee (201-?)

5 Referências bibliográficas

BOSCH. Manual de Tecnologia Automotiva. Edgard Blucher. São Paulo, 2005.

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna: volume 1 / Franco Brunetti. – São Paulo: Blücher, 2012.

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna: volume 2 / Franco Brunetti. – São Paulo: Blücher, 2012.

DE LANA, Carlos Roberto. Química do automóvel (1): Combustão da gasolina e do álcool, 2007. Disponível em: <

<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/quimica/quimica-do-automovel-1-combustao-da-gasolina-e-do-alcool.htm?cmpid=copiaecola>>. Acesso em: 07 de out. 2017.

ERIKSON, Danilo de Paula; ALIELLIO, Gabriel Santos, *Desempenho do motor de combustão interna utilizando diferentes tipos de gasolina e etanol*. 2017. 84f. Projeto de Graduação – FATEC Santo André, Santo André, 2017.

GARCIA, Álvaro Cesar, *Análise conceitual dos turbocompressores em motores de Ciclo Otto*. 2016.137f. Projeto de Graduação – FATEC Santo André, Santo André, 2016.

PEREIRA, Leonardo Pedreira, *Aplicação do ciclo Otto e do ciclo Atkinson em um motor de combustão interna rotativo com taxa de compressão variável*. 2017. 133f. Projeto de Graduação – PUC Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Gérard, D., Besson, M., Hardy, J., Croguennec, S. et al. (2008) “*HCCI Combustion on a Diesel VCR Engine*,” SAE Technical Paper 2008-01-1187 doi: 10.4271/2008-01-1187

Tanaka, Y., Hiyoshi, R., Takemura, S., Ikeda, Y. et al. (2007) “*A Study of a Compression Ratio Control Mechanism for a Multiple-Link Variable Compression Ratio Engine*,” SAE Technical Paper 2007-01-3547 doi: 10.4271/2007-01-3547

Hiyoshi, R., Aoyama, S., Takemura, S., Ushijima, K. et al. (2006) “*A Study of a Multiple-link Variable Compression Ratio System for Improving Engine Performance*,” SAE Technical Paper 2006-01-0616 doi: 10.4271/2006-01-0616

- Takahashi, N., Aoyama, S., Moteki, K., and Hiyoshi, R. (2005) "A Study Concerning the Noise and Vibration Characteristics of an Engine with Multiple-Link Variable Compression Ratio Mechanism," SAE Technical Paper 2005-01-1134 doi: 10.4271/2005-01-1134
- Moteki, K., Aoyama, S., Ushijima, K., Hiyoshi, R. et al. (2003) "A Study of a Variable Compression Ratio System with a Multi-Link Mechanism," SAE Technical Paper 2003-01-0921 doi: 10.4271/2003-01-0921
- Michihiro Y., Akinobu Y., Shuichi N., Nissan Motor Co Ltd, *Compression ratio control for internal combustion engine*. Japão patente US 5450824 A. 1991-01-31
- Grundy, J., Kiley, L., and Brevick, E. (1976) "AVCR 1360-2 High Specific Output-Variable Compression Ratio Diesel Engine," SAE Technical Paper 760051 doi: 10.4271/760051
- TRUETT, Richard. *Infiniti plays with power*, 2017. Disponível em: < <http://www.autonews.com/article/20171120/OEM06/171129970/infiniti-turbo-engine-fuel-efficiency-performance> >. Acesso em: 18 de mar. 2018.
- Shunichi A., Ryosuke H., Takanobu S., Shinichi T., Nissan Motor Co Ltd, *Control system and method for an internal combustion engine with variable compression ratio*. Japão patente EP1363002A1. 2002-05-16
- Shunichi A., Ryosuke H., Takanobu S., Shinichi T., Nissan Motor Co Ltd, *Variable compression ratio system for internal combustion engine and method for controlling the system*. EUA patente US20040083992A1. 2002-11-05
- Christopher G., Ford Global Technologies LLC, *Variable compression ratio scheduling at idle speed conditions*. EUA patente US20070125322A1. 2005-12-01
- Satoru O., Takashi T., Katsuya M., Nissan Motor Co Ltd, *Multi-link piston-crank mechanism for internal combustion engine*. EUA patente US20160208662A1. 2013-08-27
- TAMAYO, Niky. *We try to make sense of Nissan's crazy multi-link engine*, 2016. Disponível em: < <https://www.topgear.com.ph/news/technology-news/nissan-s-crazy-multi-link-engine-explained-a36-20160828> >. Acesso em: 19 de set. 2017.

RUFFO, Gustavo Henrique. *Will make its public debut at the Paris Motor Show*. 2016. Disponível em: < <http://www.motortrend.com/news/infiniti-prepares-worlds-first-variable-compression-engine-for-2018/>> Acesso em: 05 de mai. 2018.