

**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Mecânica**



**RELATÓRIO FINAL**

Trabalho de Graduação 2  
em Engenharia Mecânica

**“Hibridização, o conceito que move o futuro.”**

Autor: Gustavo Gomez Rodrigues  
Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Campinas, julho de 2020



**“Hibridização, o conceito que move o futuro.”**

Autor: **Gustavo Gomez Rodrigues**

Orientador: **Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini**

Curso: **Engenharia Mecânica**

Trabalho de Conclusão de Graduação, apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Campinas, 2020

S.P. – Brasil

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha avó, Alexandre Mota Rodrigues, Marissol Gomez Rodrigues e Ana Perea Gomez.



## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Sra. Marissol Gomez Rodrigues pela excelente revisão da formatação e da gramática deste documento.

Sra. Marissol Gomez Rodrigues e Sr. Alexandre Mota Rodrigues por todo o seu carinho, encorajamento e sacrifício imensuráveis em prol da minha formação tanto pessoal como acadêmica.

Sra. Ana Perea Gomez por toda força, carinho e pelo constante incentivo aos meus estudos.

Dra. Nathane Amorim Vescovi pelo seu apoio e companhia ao longo destes meses, em especial nestas últimas semanas.

Ao Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini pelo suporte técnico dado à construção deste trabalho.

	Resumo	8
	Abstract	9
	Lista de Figuras	10
	Nomenclatura	13
Capítulo 1	Introdução	15
Capítulo 2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Conceitos Fundamentais	
2.1.1	Apresentação do conceito de Motor	16
	2.1.1.1 Motor de Combustão Interna	
	2.1.1.2 Motor de Combustão Externa	
	2.1.1.3 Motor Físico	
	2.1.1.4 Motor Pneumático	
	2.1.1.5 Motor Hidráulico	
	2.1.1.6 Motor Elétrico	
	2.1.1.7 Motor Molecular	
2.1.2	Conceito de veículo	20
	2.1.2.1 Conceito de veículo automotor	



2.1.3	Introdução aos veículos Híbridos	20
	2.1.3.1 Conceito de Híbridização	20
	2.1.3.2 História dos veículos híbridos	21
	2.1.3.3 Tipos de configuração Híbrida	23
	2.1.3.3.1 Híbrido em Paralelo	
	2.1.3.3.2 Híbrido em Série	
	2.1.3.3.3 Híbrido Misto	
	2.1.3.4 Nomenclaturas utilizadas no ramo automobilístico	24
	2.1.3.4.1 <i>Micro Hybrid</i>	
	2.1.3.4.2 <i>Mild Hybrid</i>	
	2.1.3.4.3 <i>Full Hybrid</i>	
	2.1.3.4.4 <i>Plug-in</i>	
2.2	Ciclos termodinâmicos em motores de combustão interna	26
	2.2.0 Conceitos primordiais	27
	2.2.0.1 Cilindrada	
	2.2.0.2 Taxa de compressão	
	2.2.0.3 RPM	
	2.2.0.4 Motor 4 tempos	
	2.2.1 Ciclo Diesel	33
	2.2.2 Ciclo Otto	36
	2.2.3 Ciclo Atkinson	40
	2.2.4 Ciclo Budack	45
2.3	Detalhamento do ciclo Scuderi	48
	2.3.1 Estrutura física do motor Scuderi	48
	2.3.2 Horizontes do motor Scuderi	49
	2.3.3 Exemplos de operação de um motor Scuderi	50



	2.3.3.1	Operação em ciclo Otto	
	2.3.3.2	Operação em ciclo Atkinson	
	2.3.3.3	Operação como compressor puro	
	2.3.3.4	Operação como combustor puro	
Capítulo 3		Projeto de um tanque de ar para um veículo <i>Air Hybrid-Plug in</i> movido a motor Scuderi	
3.1		Definição de objetivos do projeto	54
3.1.1		Definição da autonomia durante modo <i>Air</i>	
3.2		Dados técnicos do motor tomado como referência	56
3.3		Cálculo da faixa de pressão de trabalho do tanque de ar	56
3.4		Dimensionamento do tanque	61
Capítulo 4		Análise dos cálculos e conclusão	62
		Referências Bibliográficas	64



## Resumo

Gustavo Gomez Rodrigues, "*Hibridização, o conceito que move o futuro*", Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Trabalho de Graduação, 2020, 65pp.

Primeiramente, busca-se apresentar o conceito de hibridização e como ele pode ser aplicado nos diversos tipos de veículos automotores. É mostrado então que o processo de hibridização possibilita aumentar a eficiência energética do veículo, e com isso torna atingíveis novos horizontes, nos âmbitos de emissões, desempenho e autonomia. Por fim, uma concepção não tradicional de motor é apresentada, o motor de ciclo Scuderi que é um motor híbrido pela sua própria natureza de concepção. Por fim, são apontadas diversas vantagens deste motor em relação aos tradicionais veículos híbridos elétricos.

Palavras Chave: Carro, Veículo, Híbrido, Hibridização, Emissões, Transporte, Elétrico, Powertrain, Motor, Combustão, Motores, Recarregável, Plug-in, Hybrid, Regenerativo, Scuderi, Atkinson.



## Abstract

Gustavo Gomez Rodrigues, "*Hybridization, the concept that powers the future*", University of Mechanical Engineering, State University of Campinas, Term paper, 2019, 65pp.

Firstly, it is presented the concept of hybridization and how it can be applied to various types of motor vehicles. It is then shown that the hybridization process makes it possible to increase the vehicle's energy efficiency, thereby making new horizons possible in terms of emissions, performance and autonomy. Finally, a nontraditional engine design is presented, the Scuderi cycle engine, which is a hybrid motor by its very nature of design and the various advantages of this motor over traditional hybrid electric vehicles are presented.

Keywords: Car, Vehicle, Hybrid, Hybridization, Emissions, Transportation, Electric, Powertrain, Engine, Combustion, Engines, Rechargeable, Plug-in, Scuderi, Atkinson, Regenerative.



UNICAMP

## Lista de Figuras

Figura 2.1.1.1 Motor de ciclo Otto.

Fonte: [vehiclemaintenanceandrepairs.com](http://vehiclemaintenanceandrepairs.com)

Figura 2.1.1.2 Esquema simplificado de Locomotiva a vapor.

Fonte: [qph.fs.quoracdn.net](http://qph.fs.quoracdn.net)

Figura 2.1.1.7 Veículo movido a motor orgânico.

Fonte: [images.fineartamerica.com](http://images.fineartamerica.com)

Figura 2.1.3.2 Veículo híbrido movido a motor orgânico e motor físico.

Fonte: [3.bp.blogspot.com](http://3.bp.blogspot.com)

Figura 2.1.3.2.1 Veículo híbrido movido a motor elétrico e motor de combustão interna.

Fonte: [www.classiccarweekly.net](http://www.classiccarweekly.net)

Figura 2.2.0.1 Cilindrada.

Fonte: [motorspot.com](http://motorspot.com)

Figura 2.2.0.2 Taxa de compressão.

Fonte: [educacaoautomotiva.com](http://educacaoautomotiva.com)

Figura 2.2.0.3 Taxa de compressão e eficiência térmica.

Fonte: [nuclear-power.net](http://nuclear-power.net)

Figura 2.2.0.3 Ilustração do RPM.

Fonte: [epi-eng.com](http://epi-eng.com)



Figura 2.2.0.4.1 1º Tempo Admissão.

Fonte: [www.motosblog.com.br](http://www.motosblog.com.br)

Figura 2.2.0.4.2 2º Tempo Compressão.

Fonte: [www.motosblog.com.br](http://www.motosblog.com.br)

Figura 2.2.0.4.3 3º Tempo Combustão.

Fonte: [www.motosblog.com.br](http://www.motosblog.com.br)

Figura 2.2.0.4.4 4º Tempo Escape.

Fonte: [www.motosblog.com.br](http://www.motosblog.com.br)

Figura 2.2.1.1 Ciclo Diesel em um diagrama Temperatura x Entropia.

Fonte: MORAN-SHAPIRO

Figura 2.2.1.2 Ciclo Diesel em um diagrama Pressão x Volume.

Fonte: MORAN-SHAPIRO

Figura 2.2.1.3 Os quatro tempos do motor ciclo Diesel.

Fonte: <http://www.antonioguilherme.web.br.com>

Figura 2.2.2.1 Ciclo Otto termodinâmico.

Fonte: MORAN-SHAPIRO

Figura 2.2.2.2 4 Tempos do Ciclo Otto.

Fonte: [cicloottomotorclub.com](http://cicloottomotorclub.com)

Figura 2.2.3.1 Ciclo Atkinson termodinâmico.

Fonte: Crosby Akbare.

Figura 2.2.3.2 Comparação Otto e Atkinson.

Fonte: Crosby Akbare.

Figura 2.2.3.3 Otto comparado ao Atkinson para uma mesma cilindrada.

Fonte: Crosby Akbare.

Figura 2.2.3.4 Comportamento das válvulas de admissão no ciclo Atkinson.

Fonte: toyotaengine.com

Figura 2.2.4.1 Budack vs Otto.

Fonte: roadandtrack.com

Figura 2.2.4.2 Comando de válvulas inteligente do motor Budack.

Fonte: newsletter.motor.com/engine.evolution

Figura 2.3.1 Motor Scuderi.

Fonte: treehugger.com

Figura 2.3.2 Motor Scuderi com diferentes tecnologias.

Fonte: scuderiengine.com

Figura 3.3.1 Pressão dentro da câmara de combustão.

Fonte: Desmond E. Winterbone FREng, BA, BSc, PhD, DSc, Ali Turan,  
in Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition)

Figura 3.3.1.2 Pressão dentro da câmara de combustão Tsi 1.0.

Fonte: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering

Figura 3.1.2 Temperatura VS ângulo de virabrequim.

Fonte: Desmond E. Winterbone FREng, BA, BSc, PhD, DSc, Ali Turan,  
in Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition), 2015



## Nomenclatura

### **Letras Latinas**

<b>C</b>	Curso percorrido pelo pistão	[cm]
<b>D</b>	Diâmetro do cilindro	[cm]
<b>N</b>	Número de cilindros do motor	
<b>V</b>	Tensão elétrica	[V]
<b>v</b>	Volume	[m <sup>3</sup> ]
<b>p</b>	Pressão	[Pa]
<b>T</b>	Temperatura	[°C]
<b>S</b>	Entropia	[J/K]
<b>L</b>	Litros	[L]

### **Letras Gregas**

$\pi$	número pi
-------	-----------

### **Superescritos**

+	tempo posterior
---	-----------------

### **Subscritos**

e	escoamento ( <i>in</i> tensão de)
---	-----------------------------------

### **Abreviações**

<b>PMI</b>	Ponto morto inferior
<b>PMS</b>	Ponto morto superior



**UNICAMP**

<b>Cc</b>	Centímetros cúbicos
<b>Tc</b>	Taxa de compressão calculada
<b>Vc</b>	Volume total de um cilindro
<b>Vcc</b>	Volume da câmara comprimida
<b>RPM</b>	Rotações por minuto
<b>CV</b>	Cavalo vapor
<b>HP</b>	<i>Horsepower</i>

### ***Siglas***

<b>DETF</b>	Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos
-------------	--



## Capítulo 1

### Introdução

Pode-se impulsionar um veículo de diversas formas, seja por meio de um motor elétrico, de um motor de combustão, ou até mesmo por meio de um motor a ar comprimido. O fato é que ocorrerá sempre uma transformação da energia de entrada no motor para energia cinética mecânica, responsável pelo movimento do veículo.

Os motores a combustão interna são os motores mais comumente usados para mover veículos na atualidade, contudo, estes motores apresentam apenas uma estreita faixa de operação onde a energia química armazenada no combustível é convertida com máxima eficácia para energia cinética. Ao longo dos anos muito se investiu para que esta conversão de energia se tornasse mais aprimorada. Novos sistemas de injeção de combustível e gerenciamento de motor foram desenvolvidos, modernos sistemas de transmissão foram projetados para manter o motor a combustão operando sempre o mais próximo da rotação e carga que potencializam sua eficácia.

O ponto em questão é que a eficiência exigida para os motores a combustão interna é cada vez maior. Requerendo assim, o emprego das mais modernas, e caras, tecnologias para satisfazer os níveis de emissões exigidos por Lei e também as necessidades do usuário.

Diante do encarecimento do veículo movido a motor de combustão interna, para que este se torne energeticamente eficiente e emita o mínimo de gases poluentes, tornou-se financeiramente atrativo e economicamente viável o processo de hibridização. Este processo possibilita atingir um alto nível de eficiência energética e reduz significativamente a quantidade de poluentes emitidos.

Diversos conceitos com relação a veículos híbridos serão esclarecidos a seguir neste trabalho.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 Conceitos Fundamentais

Durante este capítulo serão esclarecidos conceitos fundamentais para a compreensão do objetivo e da lógica do projeto de um veículo híbrido.

##### 2.1.1 Apresentação do conceito de Motor

Um motor é uma máquina projetada para converter uma forma de energia em energia mecânica. Um motor pode ser classificado em uma categoria de acordo com dois critérios: a forma de energia que ele aceita para criar movimento e o tipo de movimento que produz.

##### 2.1.1.1 Motor de Combustão Interna

O motor de combustão interna é um motor no qual a combustão de um combustível, geralmente combustíveis fósseis, ocorre com um agente oxidante, geralmente ar atmosférico, em uma câmara de combustão fechada. Em um motor de combustão interna, a expansão de gases de alta temperatura e alta pressão, provenientes da combustão, aplica força diretamente aos componentes do motor, como pistões (Figura 2.1.1.1), lâminas de turbina ou um bocal, e movendo-os à distância, gera trabalho mecânico.

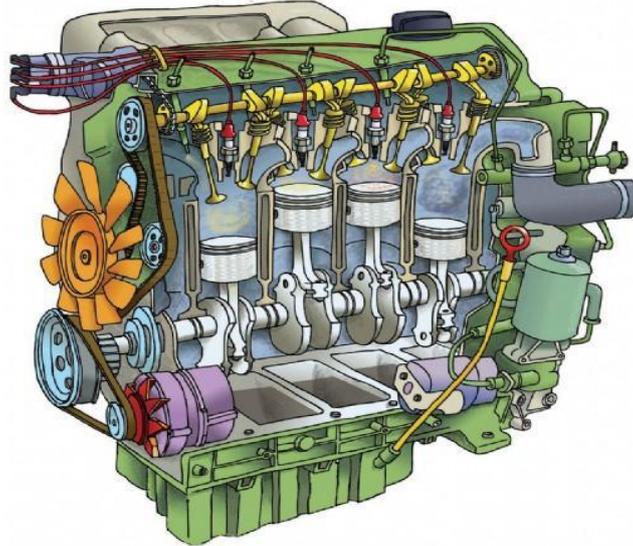


Figura 2.1.1.1 Motor de ciclo Otto. Fonte: [vehiclemaintenanceandrepairs.com](http://vehiclemaintenanceandrepairs.com)

Motores de combustão interna do tipo ciclo Otto e Diesel encontraram ampla aplicação no setor de transportes

### **2.1.1.2 Motor de Combustão Externa**

Neste tipo de motor o combustível, geralmente carvão, é queimado em uma câmara aberta. A câmara por sua vez é usada para aquecer um fluido de trabalho, geralmente vapor, através do qual a conversão de energia térmica em trabalho mecânico é finalmente realizada.

Motores de combustão externa foram amplamente utilizados no setor de transportes para locomotivas e embarcações à vapor.

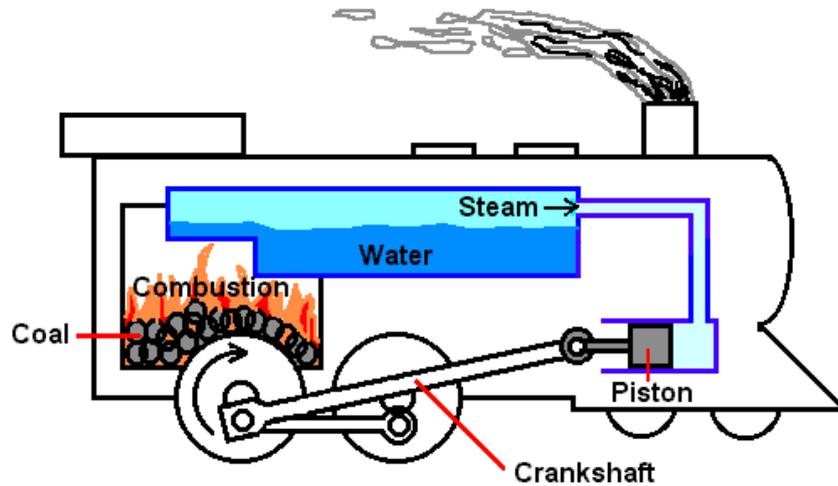


Figura 2.1.1.2 Esquema simplificado de Locomotiva a vapor.

Fonte: qph.fs.quoracdn.net

### 2.1.1.3 Motor Físico

Alguns motores trabalham com energia cinética ou potencial, por exemplo, a vela de um barco a vela, atua como um motor transformando energia cinética do ar em movimento em energia cinética para o barco. Outras formas de energia potencial incluem gases comprimidos (como motores pneumáticos), fluidos comprimidos (motores hidráulicos), molas (motores de relojoaria) e elásticos.

### 2.1.1.4 Motor Pneumático

O motor pneumático, também chamado de motor de ar comprimido, é um tipo particular de motor físico que executa o trabalho mecânico explorando a expansão do ar fortemente comprimido. Motores pneumáticos geralmente convertem o ar comprimido em trabalho mecânico através de movimento linear ou rotativo.

O movimento linear pode vir de um diafragma ou de um atuador de pistão, enquanto o movimento rotativo é fornecido por um motor de palhetas do tipo pneumático ou por um motor de pistão pneumático. Os motores pneumáticos encontraram amplo sucesso na indústria de ferramentas manuais e tentativas contínuas estão sendo feitas para expandir seu uso para o setor de transporte.



#### **2.1.1.5 Motor Hidráulico**

É um tipo específico de motor físico. Um motor hidráulico é aquele que deriva sua energia de um fluido pressurizado. Este tipo de motor pode ser usado para movimentar cargas pesadas ou simplesmente para produzir movimento.

Os projetos de motores hidráulicos são semelhantes aos das bombas hidráulicas. Algumas diferenças estruturais estão associadas ao fluxo de potência reversa através da máquina hidráulica que também opera no modo de motor hidráulico. Ao contrário das bombas hidráulicas, no motor hidráulico, o fluido de trabalho é fornecido à entrada sob pressão e o torque é eliminado do eixo na saída.

Veículos já estão sendo equipados com motores hidráulicos, visto que este tipo de motor apresenta a excelente capacidade de operar em modo regenerativo. Ou seja, ele é capaz de fornecer potência mecânica ou atuar armazenando energia mecânica em forma de fluido pressurizado.

#### **2.1.1.6 Motor Elétrico**

O motor elétrico é uma máquina elétrica rotativa que transforma a energia elétrica de entrada, aplicada aos terminais de alimentação, em energia mecânica no eixo de saída do motor.

Os motores elétricos podem ser alimentados por corrente contínua, a partir de uma ou mais baterias, ou por corrente alternada proveniente de uma rede de distribuição elétrica central.

Os motores elétricos podem ser classificados pela fonte de energia elétrica, por sua construção interna e por sua aplicação. Atualmente motores elétricos são aplicados no setor de transportes em metrô, trens, teleféricos, ônibus e até mesmo patinetes.

#### **2.1.1.7 Motor Orgânico**

Os motores orgânicos são motores normalmente acionados por uma reação química, mas não são motores térmicos. Como exemplo tem-se os motores encontrados nos seres vivos, capazes de transformar a energia química proveniente dos alimentos em potência mecânica. Veículos com base em tração animal exploram a potência mecânica proveniente deste tipo de motor.



Figura 2.1.1.7 Veículo movido a motor orgânico.

Fonte: images.fineartamerica.com

## 2.1.2 Conceito de veículo

O veículo é qualquer mecanismo destinado ao transporte de pessoas ou mercadorias. Isto quer dizer que a palavra veículo é um termo geral que especifica o transporte como um todo. Em outras palavras, pode-se especificar melhor o tipo de veículo que se quer mencionar, por exemplo, veículo marítimo, sem motor, terrestre ou espacial.

### 2.1.2.1 Conceito de veículo automotor

Por veículo automotor deve-se entender aquele que é dotado de motor próprio, e, portanto, capaz de se locomover em virtude do impulso (propulsão) ali produzido. Serão os carros, caminhonetes, ônibus, caminhões, tratores, motocicletas (e assemelhados), mas também as embarcações e aeronaves.

## 2.1.3 Introdução aos veículos Híbridos

### 2.1.3.1 Conceito de Híbridização

Um veículo híbrido é, por definição, um veículo que utiliza dois ou mais tipos distintos de motores trabalhando em conjunto para promover seu movimento. Os



motores podem estar associados em diferentes combinações que serão tratadas nos tópicos a seguir.

No setor automobilístico a combinação de motores mais comumente utilizada envolve um motor tipo combustão interna e um motor do tipo elétrico. Contudo, o conceito de veículo híbrido extrapola esta combinação comum e falando sobre os híbridos do passado fica clara a imensidão de combinações classificadas como veículos híbridos.

Antes de citar os primeiros veículos híbridos da história, vale ressaltar que uma combinação entre dois ou mais motores que possuem o mesmo princípio de funcionamento, ou seja, motores do mesmo tipo, não configura um veículo híbrido. Por exemplo, um carro com um motor ciclo Diesel e um motor ciclo Otto não configuraria um veículo híbrido, pois ambos os motores são do tipo combustão interna.

### **2.1.3.2 História dos veículos híbridos**

O primeiro veículo híbrido foi uma invenção cuja data se perde no tempo. Há notícias das primeiras embarcações a vela nas redondezas do Mar Mediterrâneo, com fenícios, gregos e também com romanos por volta de 800 a.C. O fato é que estas embarcações eram capazes apenas de aproveitar o vento a favor de sua trajetória, pois utilizavam velas rudimentares e quando não havia vento, ou quando a direção desejada não favorecia o uso da vela, escravos e até mesmo soldados moviam a embarcação através de remos. Com isso configurou-se o primeiro veículo híbrido da história, uma embarcação que combinava dois diferentes tipos de motores, o motor físico (vela) capaz de transformar energia cinética do ar em movimento em energia mecânica e um motor orgânico (remadores), capaz de transformar a energia proveniente dos alimentos ingeridos em energia mecânica.



Figura 2.1.3.2 Veículo híbrido movido a motor orgânico e motor físico. Fonte: [3.bp.blogspot.com](http://3.bp.blogspot.com)

Existem controvérsias sobre qual teria sido realmente o primeiro carro híbrido, mas todas datam de uma época em que os próprios carros convencionais ainda estavam se popularizando. O modelo mais antigo conhecido é de 1896, nomeado Armstrong Phaeton.



Figura 2.1.3.2.1 Veículo híbrido movido a motor elétrico e motor de combustão interna. Fonte: [www.classiccarweekly.net](http://www.classiccarweekly.net)



Ele foi feito a partir de uma encomenda da Roger Mechanical Carriage Company ao engenheiro elétrico Harry E. Dey, que ainda teve que recorrer a uma terceira empresa, a Armstrong Electric, para criar o primeiro protótipo.

Apesar da aparência de uma charrete com volante, o Armstrong Phaeton foi uma das maiores inovações da indústria automotiva, especialmente para sua época. O veículo era equipado com um motor a gasolina de 6,5 litros e 2 cilindros que trabalhava em conjunto a um propulsor elétrico, o híbrido podia rodar utilizando apenas um dos dois motores.

Ele também tinha uma bateria que era recarregada por um dínamo nos freios, além de uma ignição que usava a energia acumulada da bateria, eliminando a necessidade de uma alavanca para dar a partida.

### **2.1.3.3 Tipos de configuração Híbrida**

#### **2.1.3.3.1 Híbrido em Paralelo**

Nesta classificação ambos os motores são capazes de gerar movimento, por isso diz-se que funcionam paralelamente. Como exemplo, as embarcações a vela historicamente citadas. A vela por si só era capaz de gerar movimento, os remadores também eram capazes de gerar movimento de maneira independente e com isso, era possível ter o movimento proveniente de um, outro ou de ambos simultaneamente. Esta configuração possibilita uma escolha inteligente de qual motor utilizar. No exemplo citado, caso houvesse vento na direção desejada, podia-se utilizar apenas a vela como propulsor. Caso não houvesse vento algum, poderia se utilizar apenas a força dos remadores. Caso uma alta velocidade fosse necessária, poderia se combinar potência total, vela e remadores ao mesmo tempo.

#### **2.1.3.3.2 Híbrido em Série**

Na configuração em série, apenas um dos motores é capaz de gerar movimento, e o outro motor atua de forma secundária. Uma combinação interessante para híbridos em série consiste em utilizar um motor elétrico para tracionar o veículo e um motor a combustão interna atuando para gerar energia elétrica e recarregar as baterias. Neste caso o motor a combustão não está diretamente ligado às rodas, a única atuação dele ocorre de maneira indireta ao



movimento do carro, acoplado a um gerador elétrico ele é capaz de fornecer carga às baterias, mas não de mover o carro por si só.

#### **2.1.3.3.3 Híbrido Misto**

É o sistema mais comum empregado no ramo automobilístico atualmente, consiste numa combinação em que um dos motores atua de maneira indireta no movimento, mas pode também atuar de maneira direta. Como exemplo, um veículo no qual um motor elétrico fornece tração às rodas e um motor a combustão interna pode, tanto fornecer tração às rodas, como operar gerando energia para recarregar as baterias.

#### **2.1.3.4 Nomenclaturas utilizadas no ramo automobilístico**

A seguir estão as principais nomenclaturas utilizadas no ramo automobilístico. Essas nomenclaturas referem-se a híbridos compostos por motores elétricos e a combustão interna.

##### **2.1.3.4.1 Micro Híbrido ou “*Micro-Hybrid*”**

Entram nessa classificação os veículos comuns movidos apenas a motor de combustão interna acrescidos de duas funções. A primeira é conhecida como “start/stop”, responsável por desligar o motor nos semáforos ou durante congestionamentos e em seguida ligá-lo novamente para arrancar com o veículo. A segunda é a frenagem regenerativa, que utiliza o mesmo motor de arranque/alternador para regenerar um pouco de energia da frenagem e armazená-la na bateria normal do carro.

Não há nenhuma ajuda da parte elétrica para locomoção e os benefícios em consumo e emissões vão dos 3 aos 8% dependendo do tipo de percurso (em trechos urbanos atuam mais) e do tipo de motor ( motores maiores poupam mais).

Esta classe não configura um veículo híbrido por definição, mas é frequentemente utilizada no ramo automobilístico.

#### 2.1.3.4.2 Semi-híbrido ou “*Mild-Hybrid*”

Para entrar nesta classificação o veículo deve possuir uma bateria além da bateria convencional de 12V e um motor elétrico de dimensões significativas. O veículo classificado como *Mild-Hybrid* geralmente usa um sistema de tração e regeneração elétrico que funciona a 48V capaz de fornecer uma potência na ordem de 15CV.

Em termos de acelerações é preciso que o condutor tenha uma boa sensibilidade para notar o desempenho extra fornecido pelo motor elétrico. Já durante as desacelerações e frenagens uma parcela significativa da energia que seria dissipada termicamente por freios comuns consegue ser regenerada e então armazenada na bateria de 48V.

Vale ressaltar que este sistema não permite a condução em modo puramente elétrico.

Os benefícios mais relevantes estão na redução do consumo entre 10 e 15% quando comparado ao mesmo carro movido apenas pelo motor de combustão.

#### 2.1.3.4.3 Híbrido ou “*Full-Hybrid*”

Também conhecidos por “*self-charging Hybrid*” ou híbrido auto-recarregável, a grande maioria dos carros que recebem o título de *Full-Hybrid* empregam um conceito proveniente do primeiro Toyota Prius. O modelo Prius lançado em 1997 foi o híbrido pioneiro para a produção em massa. Os *Full-Hybrid* utilizam em sua maioria um motor a gasolina que funciona segundo o ciclo Atkinson, capaz de atingir níveis de eficiência muito acima do tradicional ciclo Otto como será visto no decorrer deste trabalho.

O motor a combustão opera carregando as baterias ou fornecendo tração às rodas. Já o motor elétrico, que é relativamente grande, atua na tração e regeneração. A bateria também é consideravelmente grande, sendo continuamente carregada pela regeneração na frenagem e desaceleração, bem como pelo próprio motor a gasolina, se houver tal necessidade.

O sistema pode operar em três modos: apenas com o motor elétrico, apenas com o motor a gasolina, ou em modo híbrido com os dois motores operantes.



Caso o condutor escolha o modo 100% elétrico, o veículo ficará limitado a uma baixa velocidade e o condutor deverá realizar apenas pressões leves no acelerador. Mesmo com todas estas restrições, este modo dura apenas alguns minutos ou quilômetros seguidos. Isto porque o sistema não foi projetado para esta utilização.

A melhor forma de operar este veículo é permitir que a gestão eletrônica inteligente atue decidindo como otimizar a utilização dos motores e das baterias. Esta gestão depende principalmente de fatores como o nível de carga da bateria, o torque requisitado pelo condutor e a energia necessária para cada situação.

A gestão contínua da carga e descarga da bateria permite que o sistema elétrico esteja sempre apto a ajudar o motor a gasolina, reduzindo drasticamente o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes. No caso da Toyota, foi anunciada uma redução no consumo entre 30 e 40%, em face de um motor convencional a gasolina.

#### **2.1.3.4.4 Híbrido “Plug-in”**

Para esta classificação, o sistema híbrido recebe um motor elétrico mais potente e uma bateria muito maior. O que possibilita circular em modo 100% elétrico durante cerca de 50 km, quando com as baterias completamente recarregadas. À medida que as baterias se descarregam o veículo passa a trabalhar como um híbrido.

Esta configuração apresenta como principal vantagem a emissão zero de poluentes em trechos curtos. Contudo, apresenta as desvantagens como o maior peso devido a grande bateria e a necessidade de que o condutor manuseie cabos elétricos diariamente.

## **2.2 Ciclos termodinâmicos em motores de combustão interna**

Desde o início do século 21 os veículos híbridos que mais obtiveram sucesso empregam uma associação híbrida elétrica, como lhes foi apresentado até esta parte do trabalho. E para elevar a eficiência energética do veículo híbrido elétrico, os motores de combustão interna passaram a adotar outros ciclos termodinâmicos além do tradicional ciclo Otto. O presente capítulo tem por objetivo descrever e comparar cada um destes ciclos.



Durante a graduação de engenharia mecânica muito se estuda sobre os ciclos termodinâmicos ideais. Estes ciclos teóricos operam com gases ideais, sem que nenhum tipo de irreversibilidade esteja presente e tem-se ainda apenas uma transferência de calor para dentro da câmara, e não uma combustão como ocorre de fato nos motores. Por estes motivos o foco aqui dado será à dinâmica dos ciclos reais que ocorrem nos motores de combustão interna 4 tempos.

## 2.2.0 Conceitos primordiais

Antes de abordar cada ciclo termodinâmico faz-se necessário esclarecer os seguintes conceitos base:

### 2.2.0.1 Cilindrada

As cilindradas de um motor são calculadas de acordo com o diâmetro e o curso de um pistão, sempre dados em milímetros (mm). Utilizamos a seguinte expressão matemática na determinação da cilindrada de um motor a combustão:

$$V_{cilindrada} = N * (\pi * d^2 / 4) * C$$

Onde:

N = Número de cilindros do motor

$\pi = 3,14$

d = diâmetro do cilindro em centímetros

C = curso do pistão no interior do cilindro em centímetros

Na figura 2.2.0.1 pode-se visualizar melhor estas dimensões e também os pontos chamados de PMI (ponto morto inferior) e PMS (ponto morto superior). Por exemplo, um motor de 4 cilindros que possui em cada cilindro uma câmara de combustão de volume 250cc, terá a cilindrada total de 1000cc ou, como mais vulgarmente chamamos, será um motor 1.0. Estes conceitos serão necessários para melhor compreensão dos assuntos que serão tratados mais adiante neste trabalho.

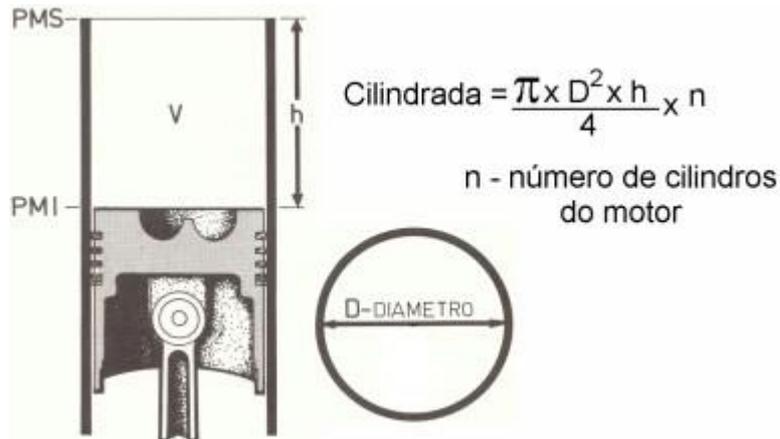


Figura 2.2.0.1 Cilindrada. Fonte: motorspot.com

### 2.2.0.2 Taxa de compressão

A taxa de compressão é um conceito intrínseco aos motores a combustão interna. É um valor numérico adimensional representando a proporção entre o volume aspirado somado ao volume da câmara de combustão em relação ao volume da câmara de combustão.

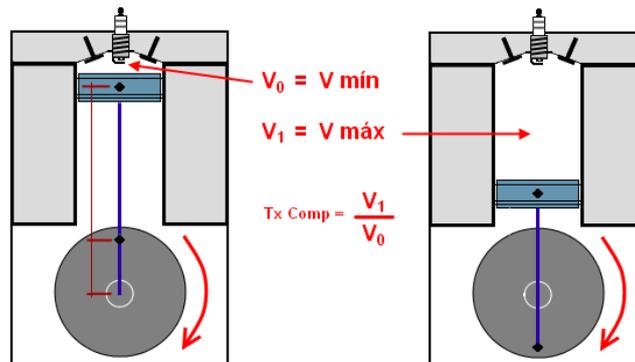


Figura 2.2.0.2 Taxa de compressão. Fonte: educacaoautomotiva.com

A taxa é calculada da seguinte forma:

$$Tc = (V_{cc} + V_c) / V_c \text{ onde:}$$

$V_c$  = Volume total de um cilindro (cilindrada do motor / nº de cilindros)

$V_{cc}$  = volume da câmara (volume mínimo)

Mais à frente será explicado que motores ciclo Otto trabalham com taxa de compressão da ordem de 8:1 até 12:1 na gasolina e de até 15:1 no Etanol. Já motores ciclo Diesel trabalham com taxas de compressão maiores, da ordem de 15:1 até 25:1.

A taxa de compressão está diretamente ligada à eficiência térmica de um motor. Quanto maior a taxa de compressão melhor se aproveita o calor proveniente da combustão, ou seja, quanto maior a taxa de compressão maior a eficiência energética de um motor.

Diesel cycle efficiency vs. compression ratio

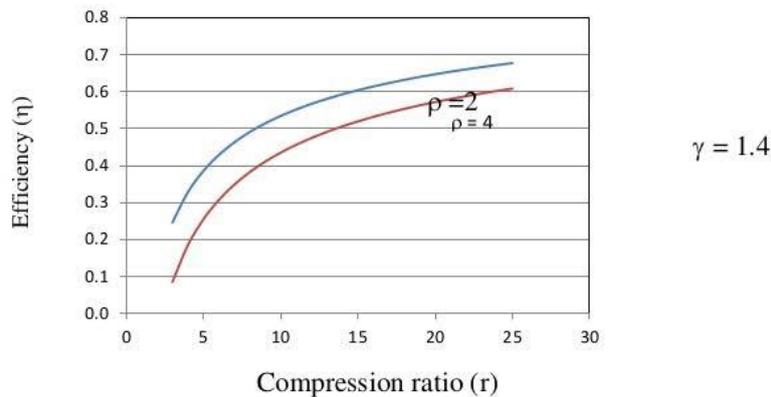


Figura 2.2.0.3 Taxa de compressão e eficiência térmica. Fonte:

<https://www.nuclear-power.net>

### 2.2.0.3 RPM

O RPM nada mais é do que o número de rotações por minuto que um eixo completa em torno de si mesmo. Esta medição é amplamente usada em máquinas rotativas em geral e no caso particular de um motor o RPM indica no número de voltas que o virabrequim completa em torno de seu próprio eixo no decorrer de um minuto. Na figura 2.2.0.3 o centro de rotação do virabrequim é representado pelo ponto com as coordenadas em vermelho.

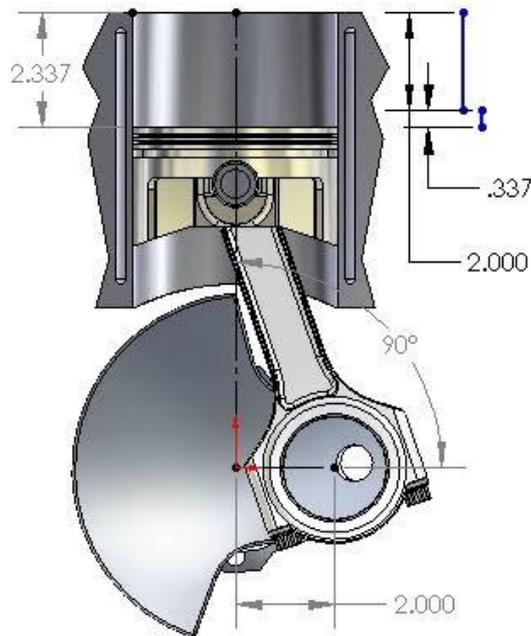


Figura 2.2.0.3 Ilustração do RPM. Fonte: epi-eng.com

A seguir será visto que motores a Diesel trabalham com rotações mais baixas do que um motor ciclo Otto.

#### 2.2.0.4 Os quatro tempos

Mais a frente, serão tratados os ciclos Diesel, Otto, Atkinson e Budack, cada um dos ciclos possui suas devidas particularidades, mas todos operam em um processo de 4 tempos. Como se tratam de motores de combustão interna cada um dos tempos ocorre para um movimento específico do pistão (ascendente ou descendente) e para uma posição específica das válvulas do cabeçote (abertas ou fechadas). Segue um detalhamento do processo que ocorre em cada um dos 4 tempos.



UNICAMP

## 1 Admissão:

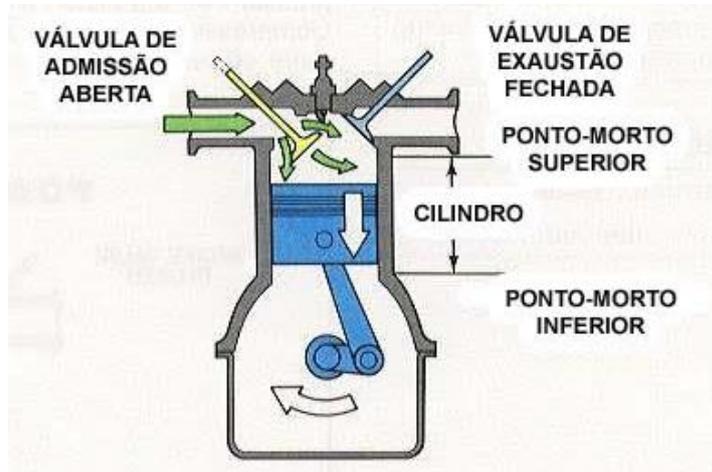


Figura 2.2.0.4.1 1º Tempo Admissão. Fonte: motosblog.com.br

O primeiro tempo (admissão), tem início com a válvula de admissão aberta, a de escape fechada e com o pistão em movimento descendente. Ar fresco é então aspirado para o interior da câmara de combustão.

## 2 Compressão:

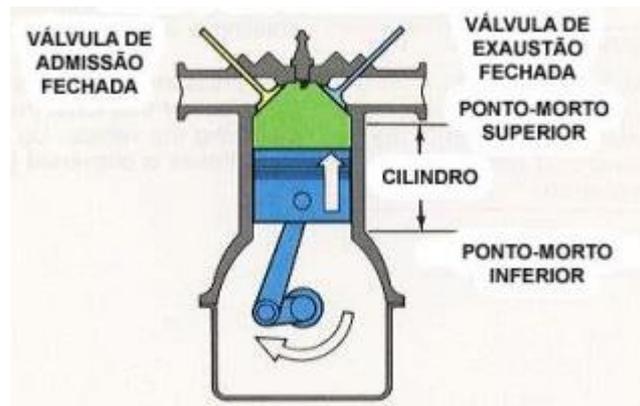


Figura 2.2.0.4.2 2º Tempo Compressão. Fonte: motosblog.com.br

O segundo tempo do ciclo, tem início com o pistão em ponto morto inferior e com ambas as válvulas (de admissão e de escape) fechadas. Na medida em que o pistão sobe, a massa contida no cilindro é comprimida. Nesta fase do ciclo, trabalho termodinâmico é fornecido ao gás e tem-se, portanto, um consumo de potência.



UNICAMP

### 3 Combustão/Expansão:

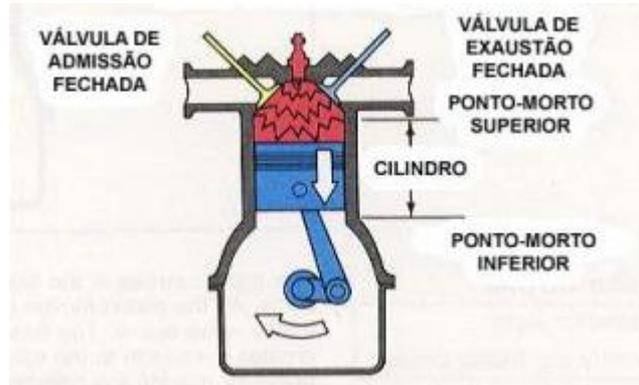


Figura 2.2.0.4.3 3º Tempo Combustão. Fonte: motosblog.com.br

Com o pistão se aproximando do ponto morto superior, tem início o terceiro tempo, caracterizado pelo processo da combustão. A combustão é uma reação química exotérmica que libera grande quantidade de calor, com isso, a pressão e a temperatura no interior da câmara aumentam à medida que a reação de queima ocorre. Durante o movimento descendente do pistão os gases resultantes da combustão, a alta temperatura e alta pressão fornecem trabalho termodinâmico. O fim do terceiro tempo só ocorre quando o pistão chega ao PMI.

Esta é a fase na qual o motor efetivamente obtém potência.

### 4 Escape:

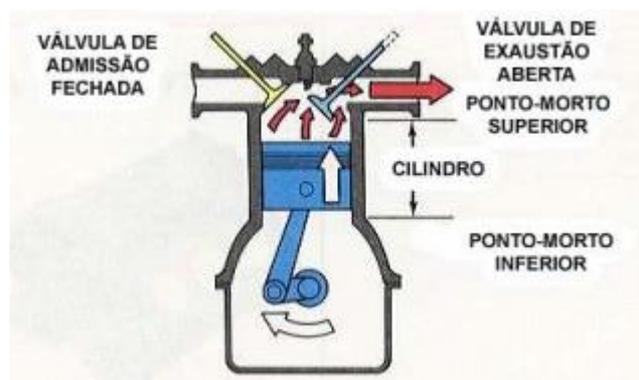


Figura 2.2.0.4.4 4º Tempo Escape. Fonte: motosblog.com.br

O quarto tempo tem início com o pistão em PMI, abre-se então a válvula de escape e na medida em que o pistão sobe, os gases de escape são expulsos da câmara de combustão.

### 2.2.1 Ciclo Diesel

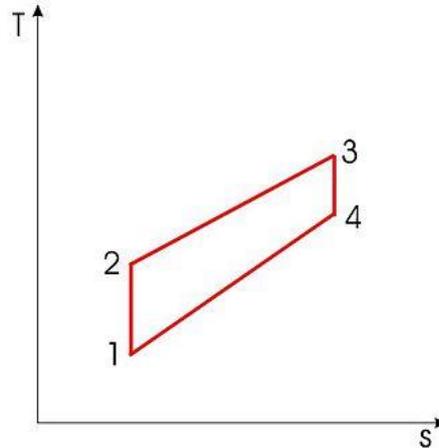


Figura 2.2.1.1 Ciclo Diesel em um diagrama Temperatura x Entropia.

Fonte: MORAN-SHAPIRO

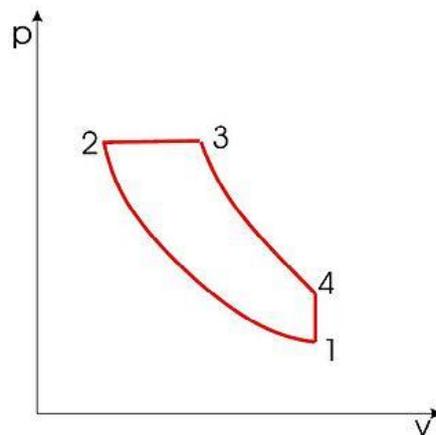


Figura 2.2.1.2 Ciclo Diesel em um diagrama Pressão x Volume.

Fonte: MORAN-SHAPIRO

#### Ciclo Diesel teórico

O ciclo Diesel termodinâmico teórico representado acima nas figuras 2.2.1.1 e 2.2.1.2 consiste em um ciclo internamente reversível que segue os quatro pontos destacados nos diagramas  $p \times v$  e  $T \times s$ . O ciclo opera em uma câmara cilindro pistão fechada, para a qual podemos fornecer ou remover calor. Durante o processo 2-3 note que o calor é fornecido à pressão constante.

No ciclo teórico tem-se uma câmara fechada onde não há nem entrada nem saída de gás ou combustível. O calor é fornecido e removido da câmara. No interior

da câmara tem-se apenas um gás ideal, que lá permanece sem qualquer alteração. Já no ciclo real, cujos processos serão descritos abaixo, temos um motor que opera com ar atmosférico, além disso, dentro da câmara é injetado combustível para que ocorra uma combustão. A cada novo ciclo o gás produto da combustão é expulso da câmara e uma nova quantidade de ar atmosférico é admitida.

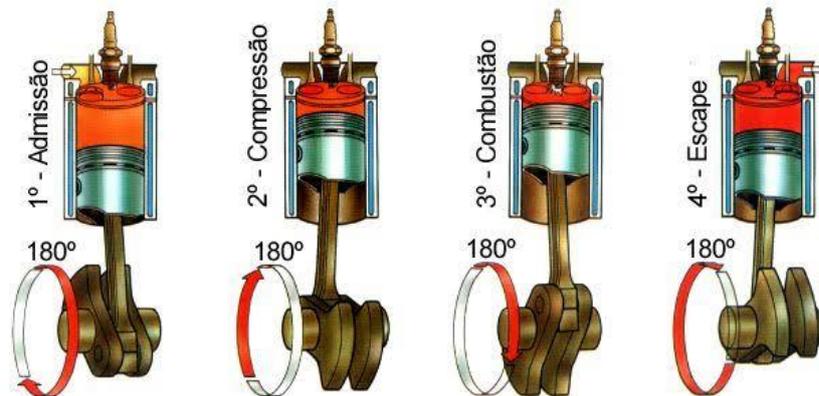


Figura 2.2.1.3 Os quatro tempos do motor ciclo Diesel. Fonte:

<http://www.antonioguilherme.web.br.com>

### **Características marcantes de um motor Diesel:**

- O combustível usado nos motores ciclo Diesel recebeu o nome de óleo Diesel. O óleo diesel é um combustível de aspecto oleoso (como o nome sugere) obtido a partir da destilação fracionada (refino) do petróleo. Sua composição é considerada complexa porque possui substâncias como hidrocarbonetos de cadeia longa e compostos orgânicos com nitrogênio, oxigênio e enxofre.

-De todos os produtos derivados do petróleo (como a gasolina, óleo lubrificante e querosene), o óleo diesel é mais abundante, ou seja, é a fração em maior quantidade no petróleo.

- A combustão ocorre de maneira espontânea, isto é, estes motores não utilizam artefatos como velas de ignição por centelha. Nos motores Diesel, usa-se uma taxa de compressão bastante elevada, entre 15:1 e 25:1, com isso, o ar atmosférico foi tão comprimido que se encontra em uma temperatura alta o suficiente para desencadear o início da combustão.



- No ciclo teórico Diesel, o processo de fornecimento de calor ocorre à pressão constante, já em um motor real, como a frente de chama do Diesel se propaga mais lentamente do que quando comparada ao Etanol e Gasolina é necessário trabalhar com um RPM mais baixo. Motores usados em ônibus e caminhões trabalham com um giro máximo em torno de 3500 rotações por minuto.

Em cada uma das etapas do ciclo real tem-se os processos abaixo descritos para os 4 tempos de um motor Diesel:

### **1 Admissão:**

Com a válvula de admissão aberta e a de escape fechada o pistão desce do PMS ao PMI e ar fresco entra na câmara de combustão.

### **2 Compressão:**

Esta parte do ciclo tem início com o pistão em ponto morto inferior e com ambas as válvulas (de admissão e de escape) fechadas, na medida em que o pistão sobe, o ar atmosférico que está dentro do cilindro é comprimido. Nesta fase do ciclo, trabalho termodinâmico é fornecido ao gás no interior do cilindro e tem-se, portanto, um consumo de potência.

### **3 Combustão/Expansão:**

Com o pistão se aproximando do ponto morto superior o combustível, em finas gotículas, começa a ser pulverizado. Ao ser injetado diretamente na câmara de combustão e encontrar ar comprimido à alta pressão e alta temperatura inicia-se, espontaneamente, o processo de combustão. A frente de chama do óleo Diesel em combustão tem uma propagação relativamente lenta, com isto durante o início do movimento de descida do pistão a combustão continua a ocorrer, mantendo assim a pressão no interior da câmara de combustão constante durante breve parte da descida do pistão.

Com o fim da combustão no processo acima descrito o pistão continua o movimento de descida para que agora ocorra o processo de expansão, no qual os gases resultantes da combustão a alta temperatura e alta pressão fornecem trabalho termodinâmico. O fim da fase 3 só ocorre quando o pistão chega ao PMI. Esta é a fase na qual o motor efetivamente obtém potência.



UNICAMP

#### 4 Escape:

Com o pistão em PMI abre-se a válvula de escape e na media em que o pistão sobe, os gases resultantes do processo de combustão são expulsos da câmara.

#### Aplicação em veículos híbridos

Pelo fato dos motores ciclo Diesel trabalharem com combustão espontânea não se faz necessário o uso de velas de ignição, com isso o espaço que seria ocupado pelas velas de ignição pode ser ocupado por válvulas de admissão e escape maiores. Com isto, obtém-se maior potência e torque. Além disto, uma característica natural do combustível óleo Diesel é sua grande resistência para o início da combustão. Permitindo assim o uso de uma taxa de compressão elevada (da ordem de 15:1 até 25:1). A taxa de compressão está diretamente associada à eficiência térmica de um motor.

Porém, um dos principais pontos negativos de um motor Diesel é sua alta emissão de material particulado. Apesar da grande evolução perante o quesito emissões, os motores Diesel ainda emitem significativamente mais gases poluentes do que motores de ciclo Otto, e por isso, não foram aplicados em veículos híbridos de passeio.

#### 2.2.2 Ciclo Otto

### Ciclo Otto - Diagramas p-v e T-s

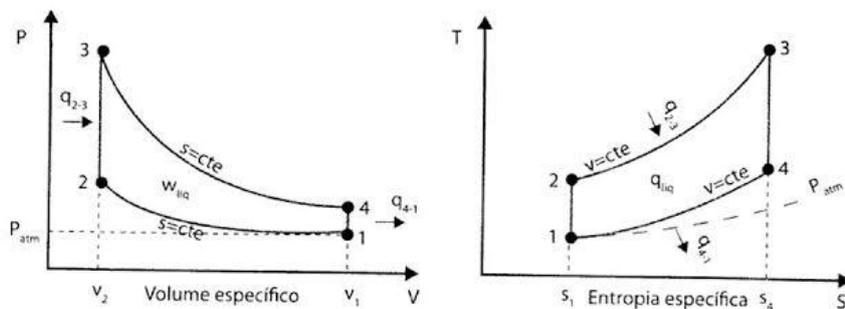


Figura 2.2.2.1 Ciclo Otto termodinâmico. Fonte: MORAN-SHAPIRO

### **Ciclo Otto teórico**

O ciclo Otto teórico acima retratado na figura 2.2.2.1, consiste em um ciclo internamente reversível que segue os quatro pontos destacados nos diagramas  $p \times v$  e  $T \times s$ . O ciclo opera em uma câmara cilindro pistão fechada, para a qual podemos fornecer ou remover calor. Para o ciclo Otto o calor é fornecido a volume constante durante o processo 2-3.

No ciclo teórico tem-se uma câmara fechada onde não há nem entrada nem saída de gás ou combustível. O calor é fornecido e removido da câmara. No interior da câmara tem-se apenas um gás ideal, que lá permanece sem qualquer alteração. Já no ciclo real, cujos processos serão descritos abaixo, temos um motor que opera com ar atmosférico, além disso, dentro da câmara ocorre uma combustão. A cada novo ciclo o gás produto da combustão é expulso da câmara e uma nova quantidade de ar atmosférico é admitida.

#### **Características marcantes de um motor ciclo Otto:**

- Estes motores são dotados de velas de ignição, estes dispositivos permitem, por meio do disparo de uma centelha elétrica, que se force o início da combustão no instante em que se desejar.

- Diferentes combustíveis podem ser utilizados nos motores de ciclo Otto. Mantendo-se todo o hardware de um motor ciclo Otto (bloco, pistão, biela, etc) e mudando-se apenas a programação do gerenciador eletrônico responsável pela dosagem da mistura ar combustível e do ângulo de ignição, podemos operar um mesmo motor com etanol, gasolina, metanol, GNV, gás de hidrogênio, entre outros combustíveis de fácil gaseificação.

- A taxa de compressão dos motores Otto varia entre 8:1 e 12.5:1 para motores a gasolina, e pode chegar até 16:1 em motores que operam exclusivamente com metanol.

- Motores ciclo Otto de alto desempenho, como os usados nos fórmula 1, podem atingir rotações de até 20.000 rpm. Entretanto, carros de passeio trabalham com um limite de giro na casa dos 6800 rpm.

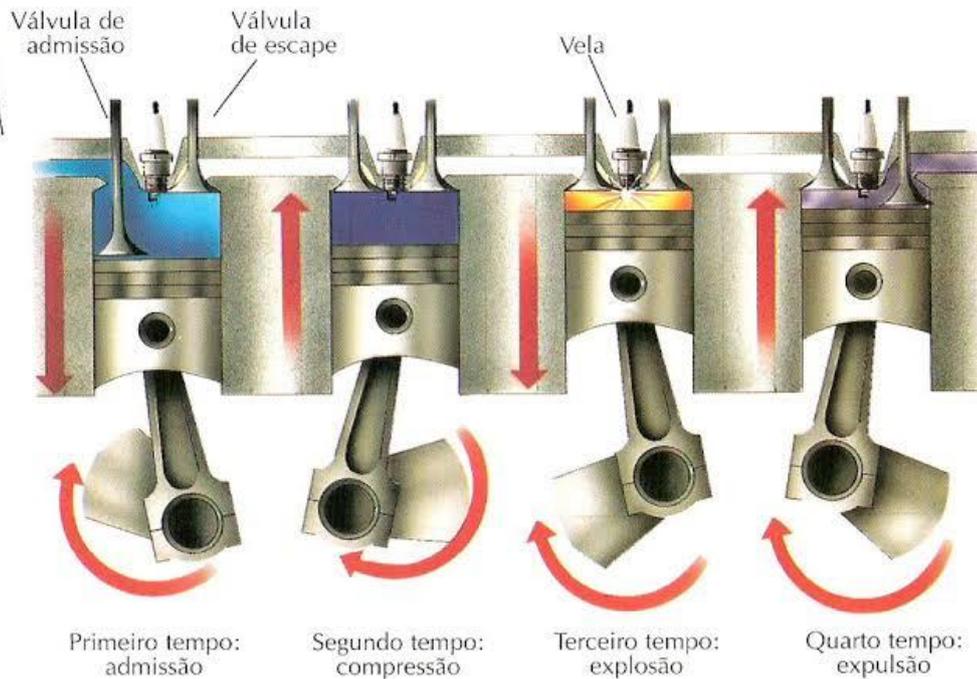


Figura 2.2.2.2 4 Os tempos do Ciclo Otto.

Fonte: cicloottomotorclube.com

Em cada uma das etapas do ciclo real têm-se os processos abaixo descritos para os 4 tempos de um motor Otto:

### 1 Admissão:

Com a válvula de admissão aberta e a de escape fechada o pistão desce do PMS ao PMI e uma mistura de ar fresco com combustível vaporizado entra na câmara de combustão.

### 2 Compressão:

Esta parte do ciclo tem início com o pistão em ponto morto inferior e com ambas as válvulas (de admissão e de escape) fechadas, na medida em que o pistão sobe, o ar atmosférico que está dentro do cilindro é comprimido. Nesta fase do ciclo, trabalho termodinâmico é fornecido ao ar no interior do cilindro e tem-se, portanto, um consumo de potência.

### 3 Combustão/Expansão:

Com o pistão se aproximando do ponto morto superior a mistura de ar e combustível é incendiada por uma centelha elétrica. Ocorre então uma queima tão rápida, que durante esse intervalo de tempo o pistão praticamente não teve tempo



para se mover. Por isso diz-se que o fornecimento de calor no ciclo Otto ocorre a volume constante.

Com o fim da rápida combustão no processo acima descrito o pistão continua o movimento de descida para que agora ocorra o processo de expansão, no qual os gases resultantes da combustão a alta temperatura e alta pressão fornecem trabalho termodinâmico. O fim da fase 3 só ocorre quando o pistão chega ao PMI.

Esta é a fase na qual o motor efetivamente obtém potência.

#### **4 Escape:**

Com o pistão em PMI abre-se a válvula de escape e na medida em que o pistão sobe, os gases resultantes do processo de combustão são expulsos da câmara.

#### **Aplicação em veículos híbridos**

Devido a sua versatilidade, o motor de ciclo Otto foi e é o tipo de motor mais utilizado para veículos de passeio. A indústria automobilística avançou muito no desenvolvimento de tecnologias que trouxeram mais potência e melhor economia de combustível ao ciclo Otto, tais como: o uso da injeção direta de combustível (assim como sempre foi usado nos motores Diesel), uso de comandos de válvulas capazes de variar o ângulo de abertura das válvulas e também o quanto e por quanto tempo as válvulas abrem, destaca-se ainda o recurso de *cylinder deactivation*, recurso este que permite o desligamento de alguns dos cilindros do motor.

O fato é que todo investimento feito nas tecnologias relacionadas ao ciclo Otto tornaram estes motores super eficientes. A hibridização Otto-elétrica está sendo amplamente difundida em âmbito mundial. O foco principal foram as categorias Mild-Hybrid operando em tensão de 48V e Micro-Hybrid operando nos tradicionais 12V.

## 2.2.3 Ciclo Atkinson

### Ciclo Atkinson teórico

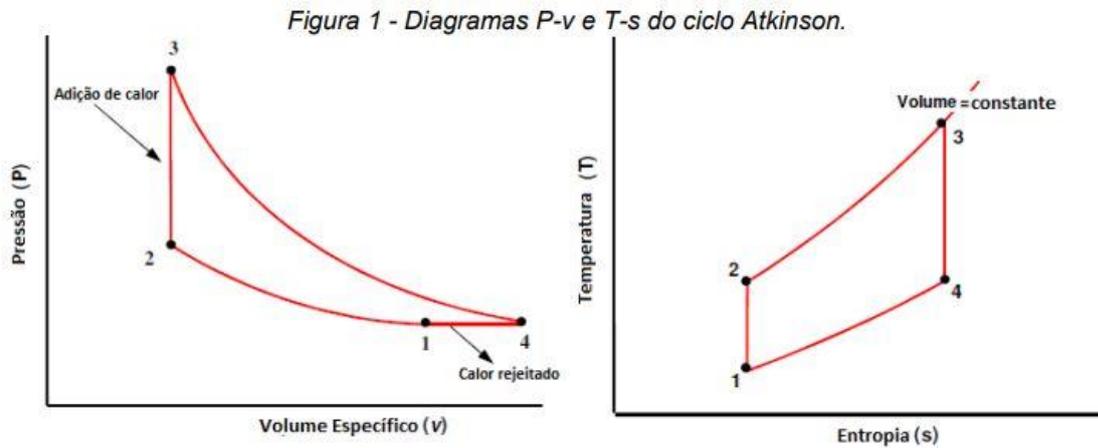


Figura 2.2.3.1 Ciclo Atkinson termodinâmico. Fonte: Crosby Akbare.

O ciclo Atkinson teórico acima retratado na figura 2.2.3.1, consiste em um ciclo internamente reversível que segue os quatro pontos destacados nos diagramas  $p \times v$  e  $T \times s$ . O ciclo opera em uma câmara cilindro pistão fechada, para a qual podemos fornecer ou remover calor.

Os diagramas apresentados na Figura 2.2.3.1, de acordo com Maheshwar, descrevem uma compressão isentrópica entre 1-2, em seguida acontece uma combustão a volume constante entre 2-3, onde então ocorre uma expansão isentrópica entre 3-4. O fim do ciclo acontece com uma rejeição de calor a pressão constante, voltando às condições iniciais do processo.

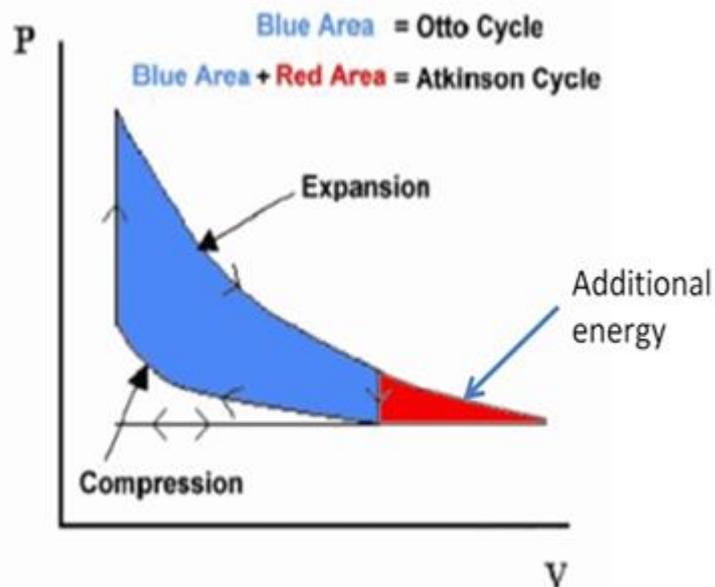


Figura 2.2.3.2 Comparação Otto e Atkinson. Fonte: Crosby Akbare.

Segundo Akbare, o modelo ideal Atkinson de ar padrão assume que não ocorrem perdas e considera os calores específicos do ar como constantes. É um modelo simplificado, porém serve como base para o desenvolvimento de outros modelos reais que aplicam esse ciclo. Na comparação feita na figura 2.2.3.2 percebe-se que o ciclo Atkinson expande os gases até uma menor pressão e temperatura do que quando comparado ao ciclo Otto. Com isso o ciclo Atkinson é capaz de transformar uma maior parcela da energia química presente no combustível em energia mecânica, quando comparado ao ciclo Otto.

## Comparison of Otto and Atkinson Cycles

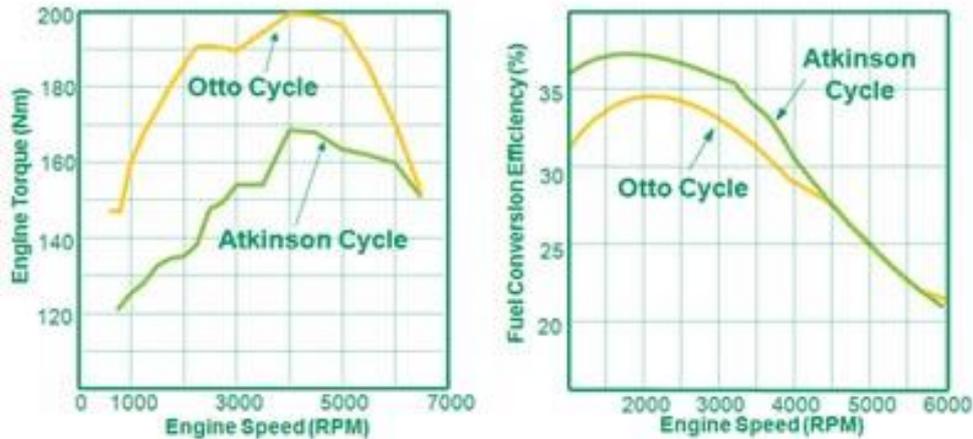


Figura 2.2.3.3 Otto comparado ao Atkinson para uma mesma cilindrada.

Fonte: Crosby Akbare.

Ao se comparar um motor ciclo Otto a um motor ciclo Atkinson de mesma cilindrada, constata-se que maior torque e potência serão obtidos no ciclo Otto, porém a eficiência na conversão da energia química do combustível para energia mecânica será maior para o ciclo Atkinson.

Desprezando-nos dos ciclos termodinâmicos teóricos e focando no ciclo real, cujos processos serão descritos abaixo, temos um motor que opera com ar atmosférico, além disso, dentro da câmara ocorre uma combustão. E a cada novo ciclo o gás produto da combustão é expulso da câmara e uma nova quantidade de ar atmosférico é admitida.

### **Características marcantes de um motor ciclo Atkinson:**

Um motor ciclo Atkinson em sua construção é extremamente semelhante a um motor ciclo Otto. As faixas de rpm e os combustíveis utilizados também são os mesmos. A real diferença está no tempo de abertura das válvulas de admissão, isso será explicado abaixo de maneira detalhada para cada um dos 4 tempos.

Comparando motores ciclo Otto e Atkinson agora não mais pela cilindrada, mas sim pelo volume de ar comprimido, teremos as seguintes equivalências. Segundo dados divulgados pela montadora Toyota, um motor Atkinson que comprime 1.4L terá um curso de expansão de 1.9L e fornecerá uma potência equivalente de um motor Otto de 1.5L.

### 1 Admissão:

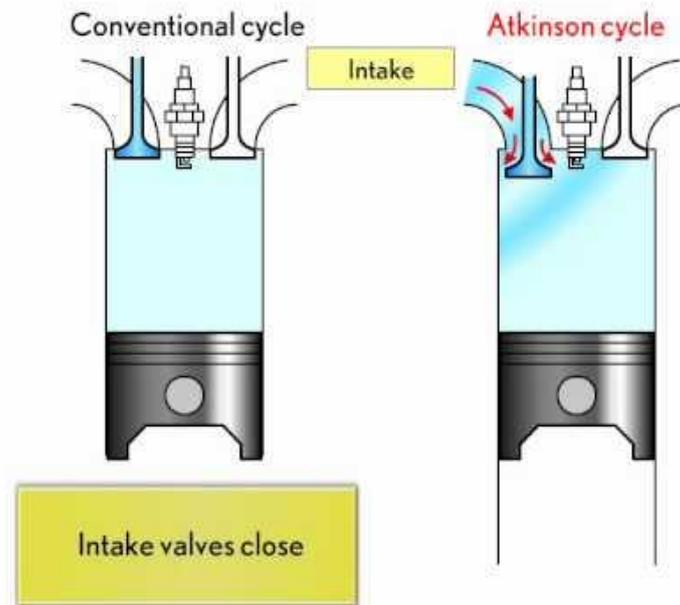


Figura 2.2.3.4 Comportamento das válvulas de admissão no ciclo Atkinson.

Fonte: toyotaengine.com

É neste tempo que o motor Atkinson se diferencia do motor Otto. A admissão tem início com o pistão em PMS em movimento descendente, com as válvulas de admissão abertas, ar fresco é aspirado para dentro do cilindro. Diferentemente do motor Otto, quando o pistão atinge o PMI as válvulas continuam abertas (veja a figura 2.2.3.4). À medida que o pistão inicia o movimento ascendente, as válvulas de admissão permanecem abertas e uma parte do ar que havia sido aspirado acaba por ser expulso, retornando para o coletor de admissão. Finalmente as válvulas de admissão se fecham, prossegue-se então para o tempo seguinte que será a compressão.



UNICAMP

## **2 Compressão:**

Esta parte do ciclo não tem início com o pistão em ponto morto inferior como seria no caso do ciclo Otto. Com o pistão um pouco acima do PMI, e em movimento ascendente, é que todas as válvulas serão fechadas, só neste ponto terá início a compressão para o ciclo Atkinson. Nesta fase do ciclo, trabalho termodinâmico é fornecido ao ar no interior do cilindro e tem-se, portanto, um consumo de potência.

## **3 Combustão/Expansão:**

Com o pistão se aproximando do ponto morto superior o ar fresco comprimido recebe um jato fino e disperso de combustível, a mistura é então incendiada por uma centelha elétrica. Ocorre a seguir uma queima tão rápida do combustível, que durante esse intervalo de tempo o pistão praticamente não tem tempo para se mover. Por isso diz-se que o fornecimento de calor no ciclo Atkinson, assim como no Otto, ocorre a volume constante.

Com o fim da rápida combustão no processo acima descrito o pistão continua o movimento de descida para que agora ocorra o processo de expansão, no qual os gases resultantes da combustão a alta temperatura e alta pressão fornecem trabalho termodinâmico. O fim da fase 3 só ocorre quando o pistão chega ao PMI.

Esta é a fase da qual o motor efetivamente obtém potência. No ciclo Atkinson o curso que o pistão percorre expandindo é maior do que o curso que o pistão percorre comprimindo, por isso diz-se que estes motores possuem um curso de compressão reduzido em relação ao curso de expansão.

## **4 Escape:**

Com o pistão em PMI abre-se a válvula de escape e na medida em que o pistão sobe, os gases resultantes do processo de combustão são expulsos da câmara.

## **Aplicação em veículos híbridos**

Veículos híbridos-elétricos de todas as categorias recebem motores ciclo Atkinson, mas em especial a categoria *Full-Hybrid* na qual se encaixam o Toyota Prius (veículo híbrido mais vendido do mundo) e também o recém lançado Toyota Corolla, o primeiro veículo híbrido com tecnologia *flex-fuel* do mundo.



Devido a melhor eficiência energética associada ao ciclo Atkinson, algumas montadoras já estão substituindo, até mesmo nos veículos movidos puramente a combustão, os tradicionais motores de ciclo Otto por motores que operam em ciclo Atkinson.

## 2.2.4 Ciclo Budack

### Ciclo teórico Budack

Não existe um ciclo termodinâmico denominado ciclo Budack. O nome ciclo Budack foi dado pela Volkswagen ao seu motor capaz de operar tanto no ciclo termodinâmico Otto quanto no ciclo Atkinson.

### Características marcantes de um motor ciclo Budack:

A montadora Volkswagen patenteou e lançou no mercado alguns motores que receberam o nome de ciclo Budack. Estes motores operam segundo uma leve modificação em relação aos motores Atkinson acima descritos, mas conseguem também operar segundo o ciclo Otto. Contudo, os ciclos teóricos termodinâmicos que os descrevem, continuam sendo os mesmos ciclos Atkinson e Otto, ou seja, não existe um ciclo termodinâmico teórico nomeado Budack.

A principal diferença operacional em relação aos motores Atkinson está no movimento de abertura e fechamento das válvulas de admissão. Para um melhor entendimento segue uma explicação de cada um dos 4 tempos do motor de ciclo Budack operando em ciclo Atkinson.

Vale ressaltar que os motores Budack são turbo-alimentados e possuem portanto, além de uma ótima eficiência energética, uma grande potência específica.

## 1 Admissão

O tempo da admissão tem início com o pistão em PMS e com as válvulas de admissão abertas. À medida que o pistão desce ar fresco vai sendo admitido. Durante o movimento descendente do pistão, todas as válvulas são fechadas antes que o pistão chegue ao PMI. Com isto o curso de compressão fica reduzido em relação ao curso de expansão, obtendo assim o mesmo efeito explorado nos motores Atkinson.

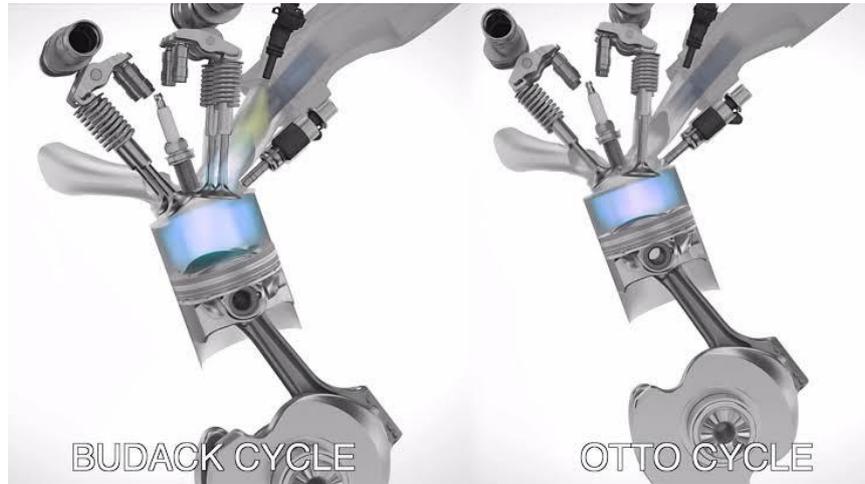


Figura 2.2.4.1 Budack vs Otto. Fonte: roadandtrack.com

Note na figura 2.2.4.1 que no ciclo Budack as válvulas de admissão são fechadas mais cedo quando em comparação ao ciclo Otto. Já, como foi visto no tópico anterior, nos motores Atkinson as válvulas de admissão são fechadas mais tarde quando em comparação ao ciclo Otto.

## 2 Compressão

Com o fim da admissão no tempo 1, o pistão continua seu movimento de descida, agora com todas as válvulas fechadas ocorre uma expansão primária do ar fresco que foi admitido até que o pistão chegue ao PMI.

Assim que o pistão inicia seu movimento de subida ocorre uma recompressão do ar até que esta atinja novamente o volume que tinha no fim da admissão. O trabalho termodinâmico necessário para recomprimir o ar fresco até este ponto tem exatamente o valor oposto do trabalho necessário para a fase de expansão primária, portanto, estas duas fases produzem um trabalho total nulo ao longo de um ciclo.

Atingido o ponto no qual as válvulas de admissão foram fechadas tem início o processo da compressão. O pistão sobe e comprime o ar contido em seu interior até chegar ao PMS.



### 3 Expansão

Com o pistão se aproximando do ponto morto superior o ar fresco comprimido recebe um jato fino e disperso de combustível, a mistura é então incendiada por uma centelha elétrica. Ocorre a seguir uma queima tão rápida do combustível, que durante esse intervalo de tempo o pistão praticamente não tem tempo para se mover. Por isso diz-se que o fornecimento de calor no ciclo termodinâmico Atkinson (ciclo no qual o motor Budack pode operar) , assim como no Otto, ocorre a volume constante.

Com o fim da rápida combustão no processo acima descrito o pistão continua o movimento de descida para que agora ocorra o processo de expansão, no qual os gases resultantes da combustão a alta temperatura e alta pressão fornecem trabalho termodinâmico. O fim da fase 3 só ocorre quando o pistão chega ao PMI.

Esta é a fase da qual o motor efetivamente obtém potência. No ciclo Atkinson o curso que o pistão percorre expandindo é maior do que o curso que o pistão percorre comprimindo, por isso diz-se que estes motores possuem um curso de compressão reduzido em relação ao curso de expansão.

#### 4 Escape:

Com o pistão em PMI abre-se a válvula de escape e na media em que o pistão sobe, os gases resultantes do processo de combustão são expulsos da câmara.

#### Aplicação em veículos híbridos

Por ser um motor de alta eficiência energética associada, o Motor Budack é frequentemente utilizado em veículos híbridos elétricos das categorias *Micro-Hybrid* e *Mild-Hybrid*. Abaixo segue uma ilustração (Figura 2.2.4.2) que mostra o dispositivo que permite variar o ciclo de operação do motor Budack de ciclo Atkinson, usado para menores solicitações de torque e potência, para o ciclo Otto, usado quando a potência solicitada é grande.

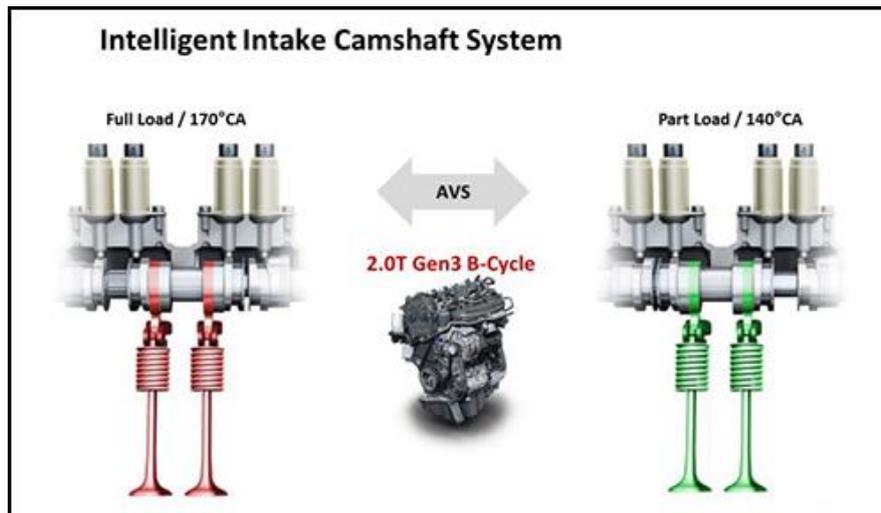


Figura 2.2.4.2 Comando de válvulas inteligente do motor Budack.

Fonte: [newsletter.motor.com/engine.evolution](http://newsletter.motor.com/engine.evolution)

## 2.3 Detalhamento do ciclo Scuderi

Um motor de ciclo Scuderi parte do pressuposto que nos motores acima vistos um grande problema ocorre por comprimir e expandir o gás na mesma câmara. Por conta disto, os motores Budack, Otto, Atkinson e Diesel acabam por buscar um conjunto pistão e câmara de compressão que não pode ser otimizado como compressor e nem como expensor. Para estes motores acima descritos, precisa-se encontrar um meio termo, que acaba por não ser ótimo nem para o ciclo de compressão, nem para o ciclo da expansão.

### 2.3.1 Estrutura física do motor Scuderi

A grande ideia do motor Scuderi é justamente separar em diferentes câmaras o processo de compressão e o processo de expansão, ver na figura 2.2.5.1. Com isto, consegue-se um compressor otimizado, que acaba por ser muito mais eficiente. E otimiza-se também a câmara de combustão para que esta seja mais eficiente do que uma câmara de combustão dos motores tradicionais.

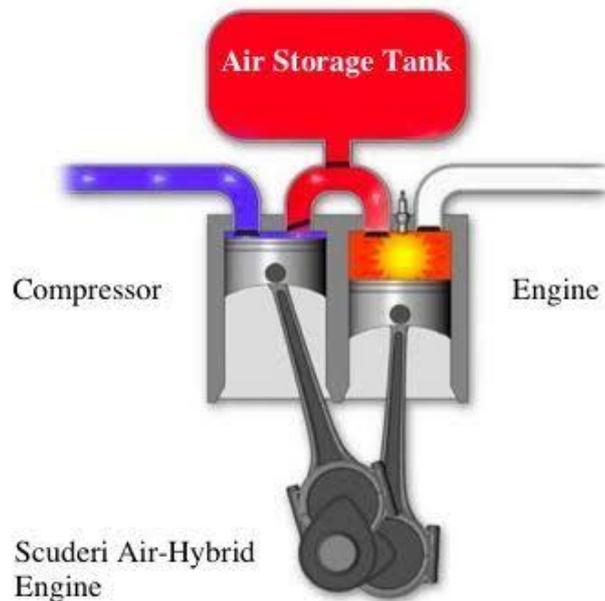


Figura 2.3.1 Motor Scuderi. Fonte: treehugger.com

### 2.3.2 Horizontes do motor Scuderi

#### Taxa de compressão variável

Como na concepção construtiva deste motor o compressor funciona de maneira independente, é possível comandar este compressor para comprimir o ar aspirado em diferentes pressões, obtendo, portanto, diferentes taxas de compressão. Pode-se inclusive, trabalhar com uma taxa de compressão continuamente variável. Esta tecnologia é empregue atualmente no veículo Volkswagen Tiguan modelo 2018 vendida nos Estados Unidos da América com motor que opera em ciclo Budack. Ao variar quando as válvulas de admissão se abrem ou fecham este motor acaba por indiretamente variar a cilindrada, e desta maneira altera por consequência a taxa de compressão.

#### Cilindrada variável

Por ter uma câmara onde ocorre unicamente o processo de combustão/expansão pode-se, ao variar a abertura das válvulas desta câmara, obter uma cilindrada variável. Como descrito acima no caso da VW Tiguan.

#### Atuação pura como combustor ou compressor

Pode-se, pelo processo de *Cylinder Deactivation*, desligar os cilindros responsáveis pela compressão, atuando puramente como combustor. É possível



fazer o contrário também, por meio da desativação dos cilindros responsáveis pela combustão, obtém-se uma atuação pura de compressor.

### **Capacidade de operar em diferentes ciclos termodinâmicos teóricos.**

Tendo em vista a possibilidade de variar a taxa de compressão e de atuar puramente como compressor ou combustor, o motor Scuderi não possui nenhuma restrição quanto à operação nos diversos ciclos termodinâmicos acima descritos. É viável, portanto, operar em ciclo Atkinson, ciclo Otto e até mesmo ciclo Diesel, e é possível inclusive operar só nas etapas que produzem ou consomem potência destes ciclos.

### **Maior eficiência energética**

Uma grande vantagem obtida pelo motor Scuderi é possuir uma eficiência energética superior a qualquer outro motor, quando ambos operam segundo o mesmo ciclo termodinâmico, quando equiparados pelo valor da potência produzida. Seja esta comparação feita com motores Budack, Atkinson, Otto ou Diesel.

### **2.3.3 Exemplos de operação de um motor Scuderi**

Pela sua própria estrutura de concepção, um motor Scuderi permite armazenar energia em forma de ar comprimido, por isso este motor se encaixa na categoria *Air-Hybrid*. Esta categoria comporta veículos híbridos que possuem motores que tanto produzem potência a partir de ar comprimido, quanto a partir de uma combustão interna. Seguem abaixo alguns exemplos dos modos de operação mais energeticamente interessantes de um veículo com motor de ciclo Scuderi.

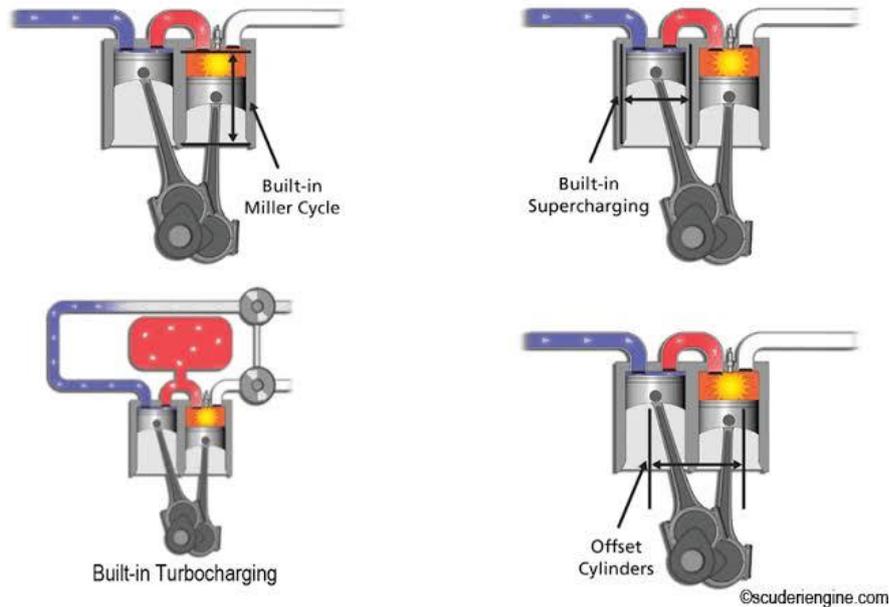


Figura 2.3.2 Motor Scuderi com diferentes tecnologias.

Fonte: scuderiengine.com

### 2.3.3.1 Operação em ciclo Otto

Para operar em ciclo Otto um motor Scuderi deve comprimir o ar até a mesma pressão do que o ar que será admitido para a combustão. Como retratado na parte inferior direita da imagem 2.2.5.3. Um motor Scuderi pode operar no ciclo Otto com diferentes cilindradas e diferentes taxas de compressão.

### 2.3.3.2 Operação em ciclo Atkinson

Para operar em ciclo Atkinson um motor Scuderi deve operar com um curso de compressão reduzido quando comparado ao curso de expansão. Isso pode ser feito variando a abertura das válvulas de admissão como descrito no motor Budack.

### 2.3.3.3 Operação como compressor puro

Imagine que o condutor de um veículo equipado com motor Scuderi vai em direção a praia. Durante o longo trecho de descida da serra pouco torque será requisitado pelo condutor, possibilitando assim desativar os cilindros de combustão. Com isso, o consumo de combustível é cessado por completo. Além de não



requisitar praticamente nenhum torque ao longo da descida o condutor irá ainda frear o veículo durante longos períodos, e é exatamente nesse tipo de condução em que o motor Scuderi opera, convenientemente, como um compressor puro.

Ao desligar os cilindros de combustão e continuar somente comprimindo gás, o motor Scuderi consome potência, agindo, portanto, como um freio para o veículo. Com isso, ar comprimido vai sendo estocado em um tanque no interior do veículo, para que seja utilizado posteriormente. O que ocorre neste caso é uma frenagem regenerativa, onde temos energia mecânica cinética sendo transformada e armazenada na forma de ar comprimido.

Este ar comprimido ao ser expandido apenas, sem que haja combustão, é capaz de gerar torque. Este torque seria muito útil para impulsionar o motor durante os primeiros giros de uma partida, ou até mesmo impulsionar o veículo por um pequeno trajeto.

#### **2.3.3.4 Operação como combustor puro (Modo Air)**

Imagine agora que este condutor finalmente termina de descer a serra e chega à praia. Ele possui agora um veículo com um tanque cheio de ar comprimido. Assim sendo, este motor não precisa mais comprimir ar durante certo tempo, portanto, os cilindros de compressão serão desativados. Desta maneira o ar fornecido aos pistões da câmara de combustão não seria comprimido durante o momento atual, o ar comprimido seria proveniente do tanque de armazenamento.

Ao operar como combustor puro o motor Scuderi terá maior capacidade de entregar potência ao motorista, tendo em vista que o termo de consumo de potência da expressão abaixo, que é proveniente da compressão, será anulado.

Expressão para potência fornecida por um motor:

$$Pot.Tot = Pcomb - Pcomp \quad [KW]$$

Onde:

*Pot.Tot*=Potência total do motor em KW

*Pcomb*=Potência produzida durante a combustão em KW

*Pcomp*= Potência consumida durante a compressão em KW



Operando como combustor puro este motor terá um excelente consumo de combustível, pois não estará queimando combustível para comprimir ar (como ocorre em motores Atkinson e Otto), visto que isso foi feito durante a frenagem regenerativa.

### **Comparativo de um veículo *Air-Hybrid* com um *Hybrid-Eletric***

Ambos os híbridos possuem frenagem regenerativa, um ótimo consumo de combustível e também a capacidade de serem tidos em versões *plug-in*, capazes de serem recarregadas em um ponto específico. O veículo de motor Scuderi seria recarregado em casa, ou em qualquer outro ponto de recarga onde seja possível instalar um compressor de ar elétrico associado a um tanque. Com isso o tanque de ar no interior do veículo pode ser rapidamente reabastecido de ar pressurizado.

Ao partir com o tanque de ar cheio o veículo a motor Scuderi consumirá pouquíssimo combustível, pois estará operando com combustor puro. Da mesma forma que um híbrido elétrico ao partir da garagem com as baterias cheias terá um consumo baixíssimo de combustível, visto que poderá se mover predominantemente pelos motores elétricos.

Ao se comparar um cilindro de ar com 8 KWh de energia armazenada a uma bateria que armazena a mesma quantidade de energia, temos os seguintes malefícios ao lidar com a bateria:

- Preço, pois o cilindro de ar é significativamente mais barato do que a bateria.
- Dificuldade em reciclar, enquanto a bateria é um artefato de difícil reciclagem por conter diversos reagentes químicos em seu interior o cilindro de ar é de simples reciclagem.
- Vida útil limitada, enquanto uma bateria suporta apenas uma quantidade finita de ciclos, o tanque pode ser pressurizado e despressurizado sem sofrer qualquer desgaste.
- Tempo muito maior de recarga, para fazer uma recarga completa da bateria leva-se em torno de 8 horas, já para o cilindro, em alguns minutos a repressurização é concluída.



UNICAMP

## Capítulo 3

### Projeto de um tanque de ar para um veículo *Air Hybrid- Plug-in* movido a motor Scuderi

#### 3.1 Definição dos objetivos do projeto

É fato que a indústria automobilística é conservadora quanto a mudanças, e principalmente quando se trata do motor do veículo. Além de uma detalhada etapa de projeto e dimensionamento dos componentes internos do motor, muito estudo é dedicado à análise de falhas que podem ser desencadeadas devido ao estresse térmico, vibratório e físico aos quais os componentes estão expostos.

A evolução dos motores acontece geralmente com a adição de uma nova tecnologia a uma motorização cujo projeto já foi amplamente testado e validado. Por exemplo, dada montadora fabrica um motor há 10 anos para um mercado. Devido a uma nova norma de emissão de poluentes a montadora precisará tomar alguma providência, pois o seu consagrado motor não se enquadra mais aos níveis exigidos pela constituição daquele país.

A decisão óbvia para a montadora é aquela que se mostra mais confiável do ponto de vista da durabilidade e mais atrativa do ponto de vista econômico. Por estes dois motivos a solução adotada pela montadora será sempre aquela que menos se distancia do seu já consagrado motor, pois pelo lado da confiabilidade já existe uma sólida base, e pelo viés econômico já existe toda uma linha de fabricação e montagem pronta e operante.

Como descrito neste exemplo, uma solução que consista em apenas somar uma nova tecnologia ao antigo e confiável projeto existente será de imediato a favorita. Esta foi a lógica com que a maioria das montadoras realizou o seu processo evolutivo ao longo dos anos, implementando pequenas novas tecnologias ao seu consolidado projeto de motorização.

Assim ocorreu com a adoção de catalizadores, injeções eletrônicas de combustível, comandos de válvulas variáveis, turbo-compressores, funcionamento em ciclo Atkinson e agora o próximo passo que se mostra confiável e economicamente viável é a hibridização elétrica leve. Bastaria a montadora



adicionar um pequeno motor elétrico e uma pequena bateria 48V ao seu já conhecido motor.

Por este motivo o motor ciclo de ciclo Scuderi não foi interessante até os dias de hoje. Ele exige uma completa reestruturação do que já existe, seja em termos das linhas de fabricação ou do projeto dos componentes em si. Novos esforços térmicos precisariam ser estudados, novos problemas de vibrações precisariam ser resolvidos, além de uma reestruturação total das linhas de fabricação e montagem.

Justamente por exigir essa completa mudança no modo de fabricação de um veículo o motor Scuderi só terá chances de ser aplicado caso as outras opções da montadora para se enquadrar na legislação de emissões também não consigam se integrar ao motor já empregue nos seus veículos. Isso não ocorre no nível *Mild-Hybrid* (hibridização elétrica leve 48V), ou seja, devemos analisar um nível mais à frente no quesito emissões, os veículos *Full-Hybrid-Plug-in*. Sistemas estes que já exigem grandes e pesadas baterias, caros motores elétricos e certamente exigem uma reformulação completa do projeto de motor, transmissão e do próprio Layout de fábrica.

E é justamente este o objetivo deste trabalho de graduação, idealizar um veículo movido a motor Scuderi capaz de fazer frente aos híbridos elétricos *Plug-in*. Pois esta seria a primeira vez na história que um motor de ciclo Scuderi poderia ser cogitado por uma montadora para aplicação em linha.

O veículo aqui mostrado será um *Hybrid-Air-Plug-in* com capacidade de se mover em modo “Air”, ou seja, no seu modo de operação mais econômico, no qual não há compressão de ar atmosférico e todo o ar admitido nas câmaras de combustão deverá ser proveniente de um armazenador de ar a alta pressão no interior do veículo.

### **3.1.1 Definição da autonomia do veículo durante modo *Air***

O veículo híbrido elétrico mais vendido do mundo, como já foi mencionado anteriormente é o Toyota Prius, em sua segunda versão lançada em 2016, o chamado Prius Prime com tecnologia *Plug-in*, permitia ao condutor que ao partir com as baterias completamente recarregadas operar em modo puramente elétrico por cerca de 40 quilômetros (25 milhas).



Como o intuito deste projeto é justamente fazer frente aos híbridos elétricos *Plug-in* a meta para autonomia com operação em modo *Air* será de 40 quilômetros.

### 3.2 Dados técnicos do motor tomado como referência

O motor escolhido como referência será o motor EA211 1.0 TSI que equipa os veículos Polo e Virtus da Volkswagen. Este motor foi escolhido por apresentar uma alta eficiência energética e tolerar altas pressões na câmara de combustão. Para o dado trecho de 40 KM este motor apresenta um consumo de 42,2 Kg de ar atmosférico (informação proveniente do ciclo NBR 6601 NBR 6601 - FTP-75 de emissões realizado pelo Inmetro). Portanto, os dados fornecidos pelo fabricante na ficha técnica do veículo que serão posteriormente utilizados nos cálculos são:

**Cilindros:** 3 em linha

**Diâmetro dos cilindros:** 74,5mm

**Curso dos pistões:** 76,4mm

**Taxa de compressão:** 10,5:1

**Cilindrada:** 999cm<sup>3</sup>

**Máxima pressão de turbo:** 1350 mbar

**Máxima pressão de coletor de admissão:** 2100mbar

**Mínima pressão no coletor de admissão para gerar torque:** 400mbar

**Máxima pressão tolerada na câmara de combustão:** 350bar

**Consumo médio de ar em 40 Km:** 42,2Kg

### 3.3 Cálculo da faixa de pressão de trabalho do armazenador de ar

Como no motor de ciclo Scuderi o tempo de combustão tem início com o pistão em PMS e com o ar já comprimido sendo admitido na câmara de combustão, devemos então calcular a pressão mínima e máxima com que este ar comprimido deve ser admitido. Partindo então das pressões iniciais com que nosso motor base admite o ar sendo estas, mínima de 400mbar e máxima de 2100mbar. Sabendo da taxa de compressão do motor pode-se calcular as pressões máximas e mínimas com que o ar chega com o pistão em PMS. Adotando o modelo de gás ideal para o ar que será comprimido podemos então usar a fórmula:



UNICAMP

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

**Onde:**

P= Pressão em atm (atmosfera padrão);

V= Volume em L (litros);

n= número de mols;

R = constante de valor 0,082 [(atm\*L)/(mol\*K)];

T= Temperatura em K (Kelvin);

**Do motor tomado como referência temos:**

Pi\_min= 400 mbar;

Pi\_max= 2100 mbar;

Vi= 0,33333 L;

Ti= 273,15 K (adotado para CNTP);

Transformando as unidades das pressões iniciais para atm:

Sabendo que: 1 atm= 1013,25 mbar;

**Temos:**

Pi\_min= 400 mbar = 0,394769 atm;

Pi\_max= 2100 mbar = 2,072539 atm;

**Encontramos então n\_min e n\_max:**

$n_{\min} = (0,394769 \cdot 0,33333) / (273,15 \cdot 0,082);$

$n_{\min} = 0,005875 \text{ mol};$

$n_{\max} = (2,072539 \cdot 0,33333) / (273,15 \cdot 0,082);$

$n_{\max} = 0,030844 \text{ mol};$

**Adotando que o número de mols permanece constante ao longo da compressão, sabendo que o volume final é 10,5 vezes menor do que o inicial e considerando a temperatura de armazenamento do ar no cilindro igual a temperatura ambiente temos:**

$V_f = 0,3333/10,5 = 0,031746 \text{ L};$   
 $Pf_{\min} = (0,005875 \cdot 0,082 \cdot 273,15) / 0,031746;$   
 $Pf_{\min} = 4,145089 \text{ atm};$   
 $Pf_{\max} = (0,030844 \cdot 0,082 \cdot 273,15) / 0,031746;$   
 $Pf_{\max} = 21,761896 \text{ atm};$

Ao compararmos estas pressões de câmara calculadas com valores provenientes da literatura, fica evidente que as pressões calculadas são muito inferiores ao que ocorre realmente nos motores ciclo Otto. Como ilustra-se abaixo na figura 3.3.1 e na figura 3.3.1.2

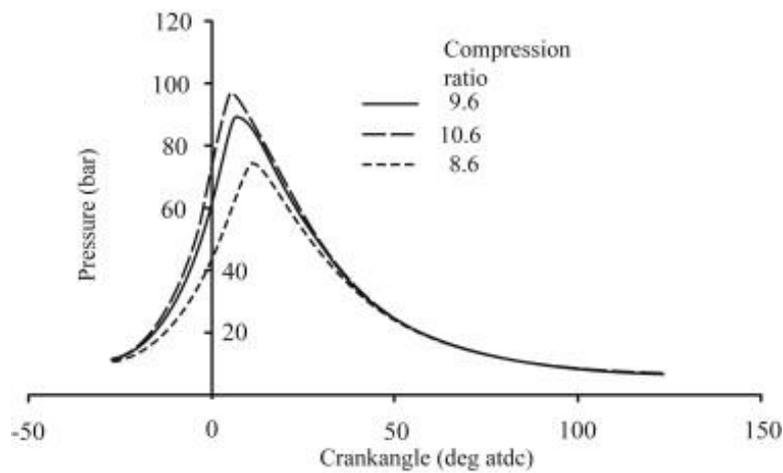
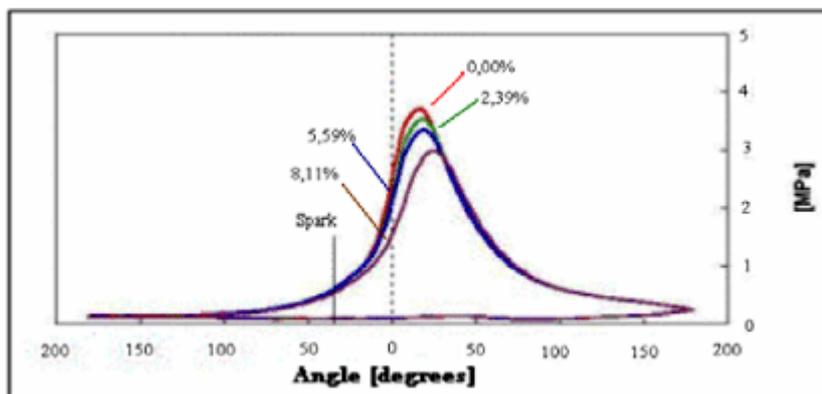


Figura 3.3.1 Pressão dentro da câmara de combustão. Fonte: Desmond E. Winterbone FREng, BA, BSc, PhD, DSc, Ali Turan, in Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition)



15

Figura 3.3.1.2 Pressão dentro da câmara de combustão Tsi 1.0. Fonte: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering

Para o motor acima descrito pela literatura, percebe-se que as pressões atingidas para zero grau do virabrequim (PMS) a pressão no motor com taxa de compressão de 10,6:1 é de aproximadamente 60 bar, ou 59,21 atm. Valor este que está muito acima dos 21,76 atm aqui calculados, mesmo o motor do exemplo sendo naturalmente aspirado ( $P_i$  em torno de 0,95 bar) e o motor referência para cálculo sendo turbo alimentado ( $P_i$  em torno de 2,1 bar). Ao compararmos então com o motor tomado como referência, observa-se a pressão de 220bar em 0 graus do virabrequim. Por que as pressões calculadas para PMS se mostraram tão baixas quando comparadas com a literatura? Aqui está a resposta:

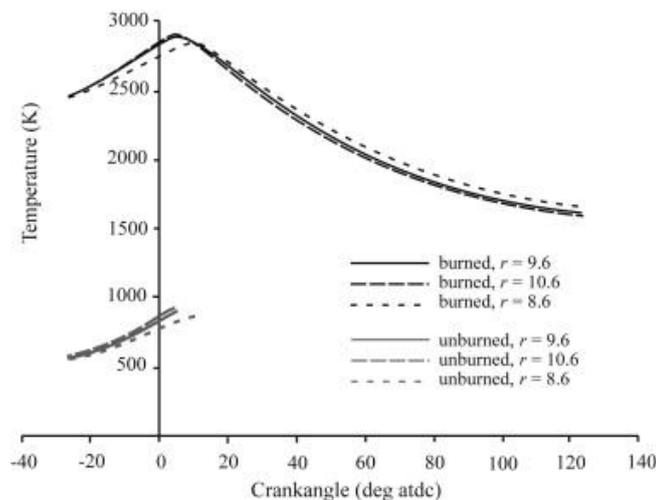


Figura 3.1.2 Temperatura VS ângulo de virabrequim. Fonte: Desmond E. Winterbone FREng, BA, BSc, PhD, DSc, Ali Turan, in Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition), 2015

No caso de um motor ciclo Otto como o que foi tomado por referência, a centelha que desencadeia a combustão ocorre, dependendo da condição de rotação e carga do motor, de  $40^\circ$  a  $10^\circ$  antes que o pistão chegue em PMS. Desta forma, quando o pistão chega em PMS a pressão contida no interior da câmara não é proveniente apenas de uma compressão de ar como foi calculado. A pressão no interior da câmara será maior, devido à própria combustão que já se iniciou instantes antes.



No motor de ciclo Scuderi, é fisicamente impossível disparar a centelha antes que o pistão chegue ao PMS, pois o ar só será admitido depois do momento em que o pistão esteja em PMS. A centelha no caso do motor Scuderi só poderá ser disparada após o fechamento da válvula de admissão do ar comprimido, ou seja, este é um motor que, por natureza de concepção só pode trabalhar com valores de ângulo de ignição inferiores a aproximadamente  $-5^\circ$  do virabrequim (posição em que ambas as válvulas se fecham no motor Scuderi).

Como fica claro após interpretação da figura 3.1.2 é que caso não haja centelha, a temperatura no interior da câmara de combustão para o ponto  $0^\circ$  é muito inferior à temperatura neste mesmo ponto para o caso de uma centelha já disparada. As temperaturas são em Kelvin, 770 para mistura não queimada versus 2600 para a mistura já em processo de combustão. Já os valores para pressão no interior da câmara também se mostram muito distintos para casos em que houve ou não o início da combustão.

### 3.3.1 Alterações geométricas no motor para operar em ciclo Scuderi

Para alcançarem-se valores de  $P_{f\_max}$  da mesma ordem de magnitude do motor referência, ou seja, 220 bar no ponto 0 graus do virabrequim, iremos calcular as alterações necessárias na geometria do motor.

Uma proposta razoável seria elevar a taxa de compressão e elevar também a pressão de turbo. Para isso, utilizando valores razoáveis afim de não fugir da zona de eficiência térmica tanto do turbo compressor quanto da própria câmara de compressão, chegamos a 1.8 bar de pressão turbo totalizando 2800mbar de pressão de admissão. E para a taxa de compressão calcularemos o valor necessário. Refazendo os cálculos teríamos:

$$P_{i\_min} = 400 \text{ mbar} = 0,394769 \text{ atm};$$

$$P_{i\_max} = \mathbf{2800 \text{ mbar} = 2,763385 \text{ atm}};$$

**Encontramos os novos valores de  $n_{min}$  e  $n_{max}$ :**

$$n_{min} = (0,394769 * 0,33333) / (273,15 * 0,082);$$

$$n_{min} = 0,005875 \text{ mol};$$



$$n_{\text{max}} = (2,763385 * 0,333333) / (273,15 * 0,082);$$

$$n_{\text{max}} = 0,041125 \text{ mol};$$

**Sendo T.c. a taxa de compressão e V.c. o volume comprimido:**

$$V_f = 0,3333 / T.c. = V.c. \text{ L};$$

$$P_{f_{\text{min}}} = (0,005875 * 0,082 * 273,15) / V.c.;$$

$$P_{f_{\text{max}}} = (0,041125 * 0,082 * 273,15) / V.c.;$$

$$P_{f_{\text{max}}} = 217,123456 \text{ atm (220 bar)};$$

$$V.c = 0,004243;$$

$$P_{f_{\text{min}}} = 31,013437 \text{ atm};$$

$$T.c. = 78,56:1$$

### 3.4 Dimensionamento do tanque de ar pressurizado

Dadas as pressões máximas e mínimas de trabalho provenientes dos cálculos do tópico 3.3, sabe-se que partindo da pressão máxima de 220 bar e descarregando até uma pressão de 31,4 bar o tanque deve ser capaz de descarregar 42,2 Kg de ar. Para determinar o seu volume prosseguiremos da seguinte maneira:

- A 31,4 bar de pressão o tanque irá conter uma massa de ar =  $m_r$
- A 220 bar de pressão o tanque irá conter uma massa de ar = 42,2 +  $m_r$
- O volume do tanque será constante ao longo do processo
- A temperatura será considerada constante, uma vez que a descarga de massa ocorrerá de forma gradual, permitindo que o tanque de ar esteja sempre em equilíbrio térmico com o meio em que se encontra (valor temperatura CNTP = 273,15 k)

- Pelo modelo de ar como gás ideal massa molar = 28,9645 g;

$$- P \cdot V = (m/M) \cdot R \cdot T$$

- R para gases ideais assume o valor de 0,082 [L · atm · K<sup>-1</sup> · mol<sup>-1</sup>]

Obteremos então o seguinte sistema com 2 equações e 2 incógnitas:

$$1P_{\text{max}} \quad 217,123456 \cdot V_t = (42200 + m_r) \cdot 0,082 \cdot 273,15 / 28,9645;$$

$$2P_{\text{min}} \quad 31,013437 \cdot V_t = m_r \cdot 0,082 \cdot 273,15 / 28,9645;$$



UNICAMP

Multiplicando ambas equações por 28,9645 obtemos:

$$1P_{max} \quad 6288,872341 * V_t = (42200 + m_r) * 0,082 * 273,15);$$

$$2P_{min} \quad 898,288696 * V_t = m_r * 0,082 * 273,15;$$

Isolando a variável  $m_r$  na equação 2 temos:

$$m_r = V_t * 898,288696 / (0,082 * 273,15);$$

$$m_r = 40,105218 * V_t;$$

Substituindo então este valor na equação 1 obtemos  $V_t$ :

$$6288,872341 * V_t = (42200 + 40,105218 * V_t) * 0,082 * 273,15;$$

$$6288,872341 * V_t = (945208 + 898,288696 * V_t)$$

$$5390,583637 * V_t = 945208;$$

$$V_t = 175,4 \text{ L}$$

## Capítulo 4

### Análise dos cálculos e conclusão

O automóvel como o conhecemos é resultado de mais de um século de pesquisa e evolução tecnológica trazidas pelas mais diferentes empresas do ramo. Uma comparação de um automóvel atual com os primeiros que foram produzidos deixa claro o que a evolução não foi apenas do automóvel, mas sim da Engenharia e da ciência como um todo. Assim como no passado, novas tecnologias continuam sendo desenvolvidas e incorporadas aos automóveis. Leis ambientais, regulamentos de emissões e questões econômicas relacionadas ao comércio, transporte e extração do petróleo ultimamente têm dado impulso extra aos veículos com alta eficiência energética. Como a geração de energia elétrica ainda não possui uma matriz baseada em energias renováveis em âmbito mundial, o grande foco foi para o setor de veículos híbridos, que aliam menores níveis de emissão de gases poluentes a alta eficiência energética.

Veículos híbridos não são nenhuma novidade na história da engenharia e datam de antes mesmo do aparecimento dos automóveis, como mostrado no início deste trabalho. Entretanto, só recentemente receberam os holofotes da indústria e da ciência. Veículos híbridos elétricos plug in fabricados em série atualmente são



capazes de rodar mais 50km utilizando apenas o motor elétrico, o que gera uma emissão de gases poluentes nula neste trecho. Mesmo quando funcionando com o motor de combustão interna associado ao elétrico, ainda é possível obter níveis de economia de combustível de 30 a 40% em relação aos motores convencionais a gasolina. Obter um resultado semelhante a este com um motor Scuderi e um cilindro de ar comprimido seria incrível, não só pelo ponto de vista do custo e complexidade de fabricação de uma bateria moderna, mas também pela facilidade de fabricar e futuramente descartar o cilindro de ar sem agredir o meio ambiente.

Pesquisas focadas em veículos híbridos continuam sendo realizadas e prometem muito para um futuro próximo, não só no setor de híbridos combustão-elétrico, mas também para híbridos combustão-pneumático.

Como explicitado anteriormente, muitos desafios de engenharia precisam ser solucionados para que um motor de ciclo Scuderi saia da teoria e seja utilizado em veículos comerciais. Análises térmicas, vibratórias e relacionadas a fadiga ainda precisam ser feitas. Contudo, sob o ponto de vista termodinâmico a implantação de um veículo Air-Hybrid-Plug-in movido a motor Scuderi se mostrou exequível. Os cálculos acima realizados indicaram que com pressões de turbo e admissão razoáveis, aliadas a uma elevação da taxa de compressão o volume necessário para o tanque seria de 175,4 litros.

Um tanque armazenador de ar comprimido com este volume poderia facilmente ser fixado no porta-malas dos veículos tomados como base para este trabalho. O Volkswagen Virtus conta com um porta-malas de 521 litros de volume interno, já a versão hatch back possui um porta-malas menor com 300 litros de capacidade. Em ambos os veículos instalar um armazenador com capacidade para 175,4 L não seria uma tarefa difícil.

Aqui se encerra este trabalho indicando progresso para a hibridização ar. Pelos cálculos aqui realizados, um veículo equipado com motor de ciclo Scuderi e um tanque de ar comprimido seria uma alternativa plausível aos veículos híbridos elétricos plug in atuais.



## Referências Bibliográficas

- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**, Nova Iorque, EUA, McGraw-Hill, 1988, 930 p.
- GALLO, W. L. R. **Apostila Motores de Combustão**, Universidade Estadual de Campinas, 1986
- GLINTON, S. **Automakers Set To Steer Customers To Hybrids**. Disponível em: <<http://kunc.org/post/automakers-set-steer-customers-hybrids>>. Acesso em: 20 de setembro de 2019
- HAJIMIRI, M. H.; SALMASI, F. R. A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery, **IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles**, pp 1 – 5, 2006.
- LOPES, Juliana. **Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série**. 2008. 178 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- REIS, Nuno Alexandre Oliveira. **O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade**. 2008. 108p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- BANOWETZ, D. L. **Synthesis and analysis of variable, non-uniform stroke piston engine mechanisms** 1999, 90f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica e Mecanismos)- Lehigh University, 1999.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna: volume 1**. São Paulo: Blucher, 2012
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna: volume 2**. São Paulo: Blucher, 2012
- California Energy Commission (CEC). New engine Technology for California's combined heat and power market, **Teconge, Inc.**, p.1-115, March 2013.



CHEN, J.; CHINN, J.; WAN, K.; YAN, B. **Internal Combustion Engine: Atkinson Cycle Efficiency and Power comparison to Otto cycle**, MAE 113A, June, 2013

CROSBY, I.; AKBARI, P. Thermodynamic analysis of the Atkinson Cycle.

In: Scientific Cooperations International Workshops on Engineering Branches, 2014, Istanbul/Turkey. **Anais...** Istanbul/Turkey: Koc University, 2014.

MOTA-Francisco. **Híbrido, “mild-hybrid” e “plug-in”: afinal qual é o melhor?**- 2019-Disponível em <<https://targa67.motor24.pt/hibrido-mild-hybrid-e-plug-in-afinal-qual-e-o-melhor>> Acesso em: 20 de setembro de 2019

**Tipos de Motores.** Disponível em <<https://pt.demotor.net/tipos-motor>>. Acesso em: 20 de setembro de 2019.

Desmond E. Winterbone FREng, BA, BSc, PhD, DSc, Ali Turan, in *Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition)*, 2015

J. N. de S. Vianna<sup>I</sup>; A. do V. Reis<sup>I</sup>; A. B. de S. Oliveira<sup>I</sup>; A. G. Fraga<sup>II</sup>; M. T. de Sousa<sup>III</sup>, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*