

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

Tecnologia em Eletrônica Automotiva

**Italo Cavaleiro Marques
Pedro Nunes Figueira de Abreu**

Santo André
2013

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

Tecnologia em Eletrônica Automotiva

Italo Cavalheiro Marques

Pedro Nunes Figueira de Abreu

Ciclo Atkinson – Razões para sua utilização em veículos Híbridos

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

Orientador:

Prof. Me. Cleber Willian Gomes

Co-Orientador:

Prof. Dr. Reginaldo de Jesus Costa Farias

Santo André

2013

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 06 DE DEZEMBRO DE 2013.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA " **CICLO
ATKINSON – RAZÕES PARA SUA UTILIZAÇÃO EM VEÍCULOS
HÍBRIDOS** " DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. MSC CLEBER WILLIAN GOMES

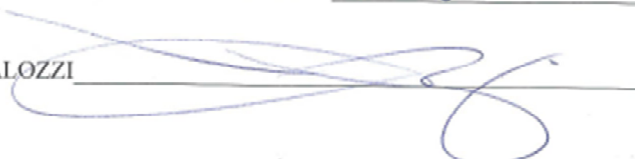


MEMBROS:

PROF. DR. REGINALDO DE JESUS COSTA FARIAS



PROF. HORÁCIO MALOZZI

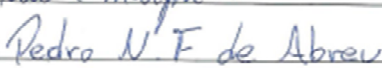


ALUNO:

ITALO CAVALHEIRO MARQUES



PEDRO NUNES FIGUEIRA DE ABREU

www.fatecsantoandre.com.br fatecstdo@gmail.com

Rua Prefeito Justino Paixão, 150 – Centro – Santo André – SP - CEP: 09020-130

Fone (0xx11) 4437-2215

CUTTER

Marques, Italo Cavaleiro
Ciclo Atkinson – Razões para sua utilização em veículos híbridos/ Italo Cavaleiro, Pedro Nunes Figueira. - Santo André, 2013.
– f: 39.

Trabalho de conclusão de curso – FATEC- Santo André.
Curso de Eletrônica Automotiva, 2013
Orientador: Me. Cleber Willian Gomes

Ciclo Atkinson Ciclo Otto Economia de combustível I.
Abreu, Pedro II. Ciclo Atkinson – Razões para sua utilização em veículos híbridos

CDD

Aos professores da FATEC Santo André, especialmente aos orientadores do projeto, às nossas famílias e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores Cleber Willian Gomes e Reginaldo de Jesus Costa Farias que sempre estiveram presentes nas nossas dificuldades nos orientando sobre a melhor maneira de resolvê-las. Somos gratos também à ajuda cedida pelo professor Wagner pela obtenção de contato com a empresa Toyota para esclarecimento de dúvidas e fornecimento de material de estudo, no qual tivemos contato com os engenheiros Edson Orikassa e Gustavo Noronha. E, por fim, a oportunidade de termos participado com este projeto no “Desafio Renault Experience”, que nos fez aperfeiçoar e corrigir diversos pontos do trabalho após sermos avaliados pela banca composta pelos professores Edson Kitani, Carlos Morioka, Wagner Massarope e Luiz Kanashiro que fizeram críticas de grande valor para melhoria no resultado final.

RESUMO

O motor de ciclo Atkinson, criado em 1886, apresenta melhor desempenho nos quesitos consumo de combustível e emissões atmosféricas, quando comparado aos motores de ciclo Otto, por esta razão este motor tem sido utilizado em veículos Híbridos. Este trabalho apresenta dados sobre o funcionamento de motores dos ciclos Otto e Atkinson e as vantagens e desvantagens de cada um, através de estudos comparativos. Para a realização destes estudos foram coletados dados de funcionamento (torque, potência, consumo específico, pressão média efetiva, perfil dos comes de admissão, tempo de abertura das válvulas e ocorrência do Pumping Loss) dos ciclos, obtidos em testes realizados por diversas empresas, pioneiras em tecnologia, como a Toyota Motors e Tata Motors. Os resultados obtidos foram comparados visando apresentar as vantagens e desvantagens de cada ciclo. A análise dos dados e os estudos acerca dos mesmos permitiu identificar as principais características, qualidades e deficiências de cada ciclo e permite visualizar aquilo que cada um apresenta de melhor em relação ao outro. Provando que o ciclo Atkinson apresenta resultados de emissão de poluentes e consumo, porém com uma pequena redução de torque e potência máxima, fatores tornam o ciclo Atkinson mais vantajoso em relação ao ciclo Otto para sua atual aplicação em veículos Híbridos.

Palavras chaves: Economia de combustível, índice de emissões, estudos comparativos, vantagens e desvantagens, Ciclo Atkinson, Ciclo Otto.

ABSTRACT

The Atkinson cycle engine, built in 1886, has a better performance in the categories of fuel consumption and emissions compared to the Otto cycle engines. Given this feature, this engine has been used in hybrid vehicles. This paper presents data on the operation of Otto and Atkinson cycle engines, and the advantages and disadvantages of each, through comparative studies. In order to perform these studies, operating data were collected from the cycles (torque, power, specific fuel consumption, mean effective pressure, intake cam profile, valve opening time and Pumping Loss), obtained in tests conducted by various companies, pioneers in technology, like Toyota Motors and Tata Motors. The results were compared in order to show the advantages and disadvantages of each cycle. Data analysis and studies about them identified the main characteristics, strengths and weaknesses of each cycle, also revealing their best features in a comparison to the other. The study attests that the Atkinson cycle presents results of emissions and consumption, but with a slight reduction in torque and maximum power. Such factors make the Atkinson cycle more advantageous compared to the Otto cycle when currently applied in hybrid vehicles.

Keywords: fuel economy, emissions index, comparative studies, advantages and disadvantages, Atkinson Cycle, Otto Cycle.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS.....	15
CONVENÇÕES E LISTA DE SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1. Motivação e Contribuições Esperadas	17
1.2. Objetivos	17
1.3. Organização do Trabalho	18
2 INTRODUÇÃO A VEÍCULOS HÍBRIDOS	19
2.1 Configurações	19
3 A HISTÓRIA DO MOTOR DE CICLO ATKINSON	23
4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	24
4.1 Comparação “ $P \times V$ ” entre ciclos Atkinson e Otto	25
4.2 Rendimento térmico dos motores.....	26
4.3 Comando de válvulas e cames de admissão	30
4.4 Análise do tempo de fechamento da válvula de admissão	32
4.5 Estratégia de redução no Pumping Loss	34
4.6 Comparação entre BSFC x Potência nos motores de Ciclo Atkinson e Otto	35
4.7 Relação entre IVC x BSFC x BMEP no motor de ciclo Atkinson.....	36
5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	39
5.1 O Inovar – Auto.....	39

5.2	Etiquetagem.....	40
6	DISCUSSÕES FINAIS E CONCLUSÃO	41
6.1	Áreas de Aplicação das Contribuições desta Tese	41
6.2	Propostas Futuras de Pesquisa.....	41
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Lista de Figuras

Figura 1 - Veículo Híbrido – FAST CAR DESIGN [Extraído de (Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos), página 16].....	19
Figura 2 – Configuração híbrido série – FONTE: FORD MOTOR COMPANY [Extraído de (Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos), página 17]	20
Figura 3 - Configuração híbrido paralelo – FONTE: FORD MOTOR COMPANY [Extraído de (Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos), página 19].....	21
Figura 4 - Configuração híbrido série/paralelo – FONTE: FORD MOTOR COMPANY [Extraído de (Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos), página 19]	22
Figura 5 - Motor ciclo Atkinson original – FONTE: Building the ATKINSON CYCLE ENGINE, página 9.....	24
Figura 6 - Conceito original do motor de ciclo Atkinson – FONTE: Clothoid [Adaptado de (Vídeo Youtube “Atkinson Cycle Engine”)].....	24
Figura 7 - Funcionamento da válvula de admissão na configuração atual do ciclo Atkinson – FONTE: GGN	25
Figura 8 - Características do came de acionamento de válvulas – FONTE: Pé no estribo Comando de Válvulas, página 2.....	30
Figura 9 - Levante do Came de Admissão – FONTE: Pé no estribo Comando de Válvulas, página 3	31
Figura 10 - Ângulo de fechamento da válvula de admissão – FONTE: SAE International 2009-01-1061 [Extraído e adaptado de (Development of New 1.8-Liter Engine for Hybrid Vehicles), figura 11]	33
Figura 11 - Etiqueta Inmetro – FONTE: INMETRO	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características motor Atkinson Toyota - FONTE: SAE International 2009-01-1061 [Extraído e adaptado de (Development of New 1.8-Liter Engine for Hybrid Vehicles), Tabela 1]	28
Tabela 2 - Características motor Atkinson TATA – Adaptado de: Application of Atkinson Cycle to Improve IC Engine Efficiency.	37

Lista de Abreviaturas

PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
DPMI	Depois do Ponto Morto Inferior
AO	Abertura da válvula de admissão no ciclo Otto
AA	Abertura da válvula de admissão no ciclo Atkinson
VVT-i	Variable Valve Timing-intelligent (Comando de válvulas variável controlado eletronicamente)
IVC	Intake Valve Close (Ângulo de fechamento da válvula de admissão)
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption (Consumo específico de combustível)
BMEP	Brake Mensure Effective Pressure (Pressão media efetiva)
IPI	Imposto sobre Produtos industrializados
CO ₂	Dióxido de Carbono
TDC	Top Dead Center (Ponto Morto Superior)
BDC	Bottom Dead Center (Ponto Morto Inferior)

Convenções e Lista de Símbolos

Na notação das equações ao longo do texto adotam-se as seguintes convenções:

T	Tera - 10^{12}
W	Watts - Unidade de medida de energia
h	Hora
V	Volume
P	Pressão
rv	Relação de compressão para ciclo Atkinson
v	Volume da câmara de combustão
RC_1	Menor relação de compressão
RC	Relação de compressão
k	Kappa
V_t	Volume do cilindro
R	Raio
mm	Milímetro - Unidade de medida de comprimento
mm^3	Milímetros cúbicos - Unidade de medida de volume
γ	Gama
Rad	Radiano - Unidade de medida angular
cc	Cilindrada
rpm	Rotações por minuto
N	Newton - Unidade de medida de torque
m	Metro - Unidade de medida de comprimento
K	Kilo - 10^3
g	Gramma - Unidade de medida de massa
λ	Fator Lambda
Pe	Potência no eixo
Nr	Rotação do motor

1 Introdução

Atualmente uma das grandes preocupações da sociedade é a preservação do meio ambiente. Devido a isso os novos regimes de emissões estão cada vez mais rígidos em relação ao limite de emissões determinados pelo Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE). Atualmente a frota mundial de veículos é de aproximadamente 1 bilhão de unidades e estudos apontam que esse número irá crescer para 1,7 bilhões até 2035. Esse número elevado de veículos é preocupante quando se fala em preservação ambiental e motores com menor índice de emissões se tornam tendência mundial.

Veículos híbridos, que em sua maioria utilizam motores de ciclo Atkinson, diminuem consideravelmente o índice de emissões e se mostram vantajosos também em relação a veículos puramente elétricos. Se considerarmos toda a frota nacional composta por veículos elétricos, seria necessário gerar 60 TWh de energia para suprir a necessidade, enquanto que se 67% fosse híbrida e o restante elétrica esse número seria reduzido para 63 TWh.

O ciclo Atkinson apresenta menor índice de emissões e menor consumo do que o ciclo Otto em sua aplicação, mesmo sem estar vinculado a veículos híbridos. Portanto, a expansão de sua utilização para toda a gama de veículos de passeio se torna interessante, visando as vantagens que isso pode apresentar

1.1. Motivação e Contribuições Esperadas

A motivação deste trabalho está baseada no fato de que com o desenvolvimento do mesmo, será gerado um volume considerável de material sobre um tema pouco explorado, que causará evolução no seu estudo e proporcionará conhecimento técnico para utilização deste tipo de tecnologia que atende às futuras regulamentações ambientais, proporcionando maior colaboração para a preservação do meio ambiente.

1.2. Objetivos

Conforme pesquisas bibliográficas constata-se a carência de literaturas que demonstrem o funcionamento, principais características e vantagens do motor de ciclo Atkinson em relação ao motor de ciclo Otto e também as vantagens de sua utilização em

veículos Híbridos. Desta forma ao final deste projeto pretende-se disponibilizar uma referência deste assunto para a implementação de motores com este funcionamento em veículos que seguem uma tendência mundial de sustentabilidade.

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado de modo que possamos entender o funcionamento do ciclo Atkinson e compará-lo ao ciclo Otto, apresentando suas vantagens e desvantagens e as possibilidades de aplicação desse motor.

No Capítulo dois (Introdução a veículos híbridos) descrevem-se o princípio de funcionamento de um veículo híbrido e suas diversas configurações. O Capítulo três (A história do motor de ciclo Atkinson) apresenta brevemente a biografia de James Atkinson e as dificuldades enfrentadas na época para introdução de seu ciclo. No Capítulo quatro (Princípio de funcionamento), apresenta-se o funcionamento do motor de ciclo Atkinson original, as adaptações realizadas até chegar ao modelo atual, e as análises comparativas com o motor de ciclo Otto, mostrando suas vantagens e desvantagens.

O Capítulo cinco (Viabilidade técnica e econômica) apresenta o programa Inovar-Auto, no qual este projeto atende os requisitos exigidos e as qualificações conforme etiquetagem do Inmetro.

2 Introdução a veículos Híbridos

Um automóvel normal funciona somente com um motor à combustão interna. Em contrapartida, um automóvel híbrido funciona utilizando uma combinação de energias, através de um motor à combustão e um elétrico, como ilustrado na Figura 1. Esses veículos contêm algumas configurações, que são conhecidas como Híbrido Série, Híbrido Paralelo e Híbrido Misto, que combinam as duas configurações anteriores.

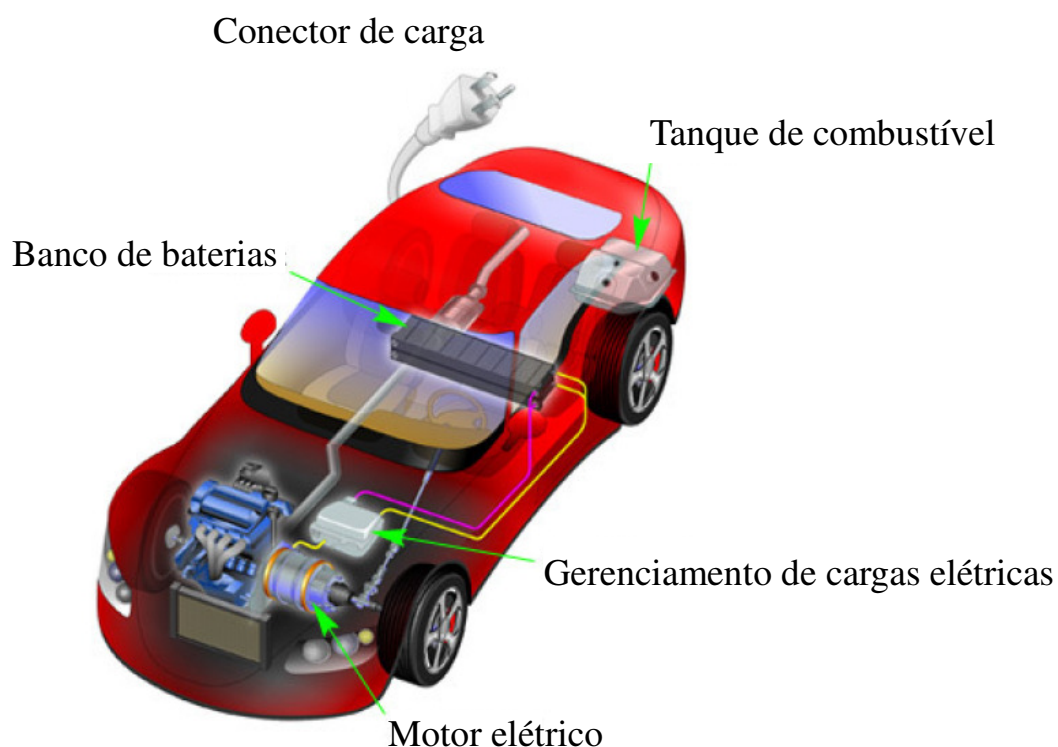


Figura 1 - Veículo Híbrido

2.1 Configurações

2.1.1 Configuração Série

Um veículo utilizando a arquitetura em série não possui nenhuma conexão mecânica entre o motor à combustão e o motor utilizado para a tração do veículo. De uma forma geral, nessa arquitetura, podemos considerar o carro totalmente elétrico (pois em tese é apenas o motor elétrico que traciona as rodas), possuindo um sistema interno de geração de energia

conduzido pelo motor à combustão que, conectado a um gerador, fornece energia elétrica para carregar a bateria e também alimentar o motor elétrico para a tração do veículo. A Figura 2 mostra a arquitetura desta configuração.

Isso permite que o motor à combustão interna opere em sua faixa de trabalho mais eficiente, possibilitando assim o uso de motores menores e mais leves do que aqueles comumente utilizados em veículos a combustão interna atualmente.

Se o sistema possuir baterias, essas podem alimentar o motor elétrico com a energia armazenada (previamente gerada pelo motor à combustão interna ou sistemas de regeneração). Se a arquitetura não possuir baterias, o motor à combustão deve operar durante o tempo todo, gerando energia elétrica para alimentar as cargas elétricas, assim como o motor elétrico para tração do veículo.

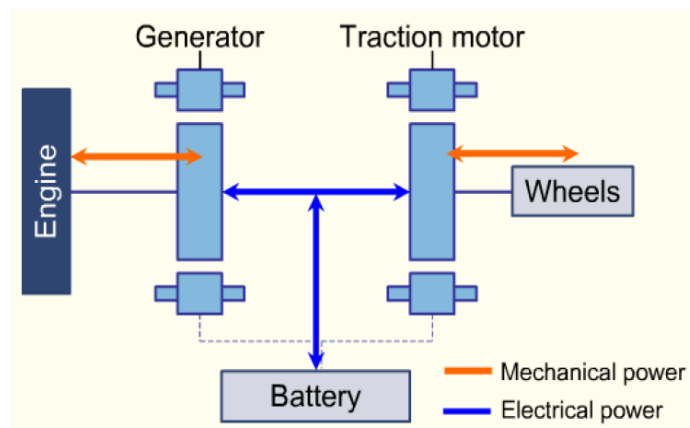


Figura 2 – Configuração híbrido série

2.1.2 Configuração Paralelo

Sistemas híbridos-paralelo são dotados de transmissão mecânica, baseada nas utilizadas em veículos à combustão interna, que conectam o motor elétrico e o motor à combustão às rodas do veículo, ilustrado pela Figura 3. Tipicamente, o sistema em paralelo mantém desligado o motor à combustão interna quando o veículo está em baixas velocidades ou parado. Baterias de capacidade elevada são necessárias para esse sistema a fim de promover energia para o motor elétrico e também para os sistemas auxiliares, como direção elétrica, ar-condicionado, sistema de entretenimento, entre outros, enquanto o motor à combustão permanece desligado.

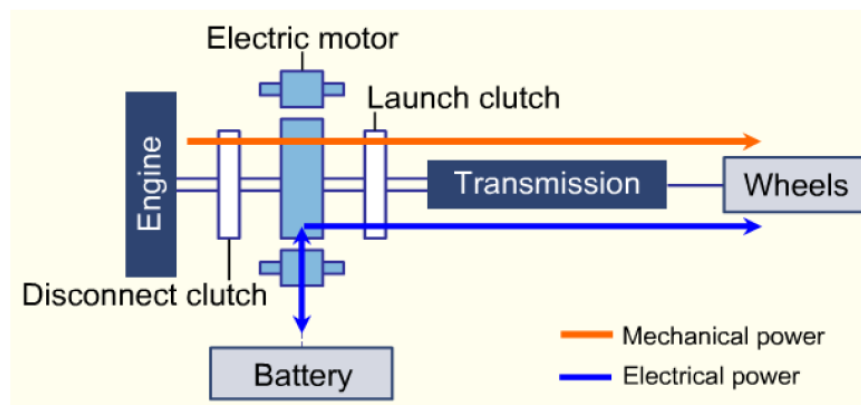


Figura 3 - Configuração híbrido paralelo

2.1.3 Configuração Série/Paralelo

O sistema Série/Paralelo, também conhecido como misto, combina as vantagens de ambos os sistemas, como ilustrado na Figura 4. Porém, assim como na arquitetura em série, mantém o uso de um gerador de energia permitindo assim que o motor à combustão seja utilizado como gerador.

O sistema utilizado pela Toyota é um exemplo de arquitetura série/paralela, na qual o motor à combustão e o motor elétrico são conectados por meio de uma transmissão planetária permitindo assim que ambos ou somente um deles produza tração para mover o veículo. Isso permite o uso de motores à combustão menores e de menor potência.

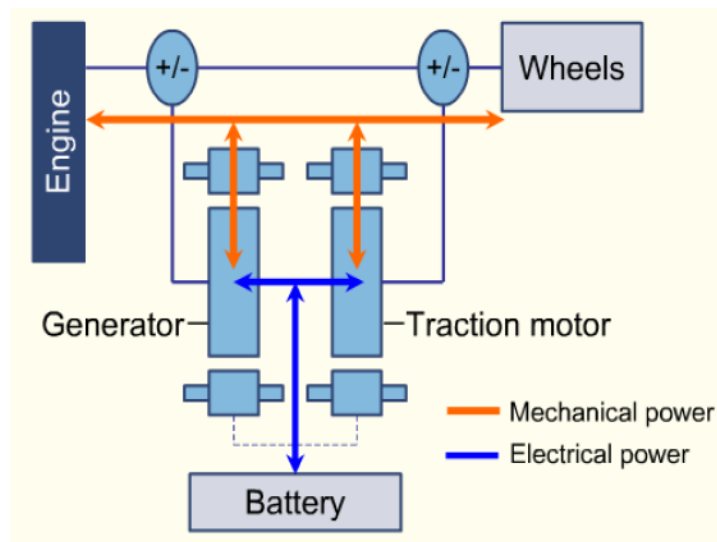


Figura 4 - Configuração híbrido série/paralelo

3 A história do motor de ciclo Atkinson

O ciclo Atkinson foi inventado e patenteado originalmente por James Atkinson, um engenheiro britânico nascido em Manchester em 1846.

Ao longo de sua carreira, James Atkinson esteve envolvido com motores a vapor, devido sua atuação na companhia de engenharia da marinha em *Jarrow*, uma cidade próxima a *South Shields* na Inglaterra. James Atkinson manteve seu interesse em motores a vapor até aproximadamente 1882, porém em 1879 ele patenteou um dispositivo de ignição de tubo quente, demonstrando seu interesse, também, por energia não proveniente de motores a vapor.

O motor popular da época era o de ciclo Otto de quatro tempos, desenvolvido e patenteado por Nicolaus Otto. A produção desse motor teve início em 1876, e a demanda dos clientes logo ultrapassou a capacidade produtiva da época. Entre 1876 e 1890 a empresa *Gasmotoren-Fabrik Duetz* foi licenciada como única fornecedora do motor Otto, defendendo essa licença com ameaças a quem infringisse essa patente. Isso se tornou um desafio para Atkinson e os demais engenheiros da época, pois eles deveriam desenvolver um motor que pudesse competir com o de ciclo Otto de quatro tempos sem infringir essa patente.

Para enfrentar esses desafios, James Atkinson apresentou seu ciclo em 1886. O que o tornou tão incomum era o fato dele não ter comando de válvulas independente ou engrenagens de sincronismo, no entanto era capaz de completar os quatro ciclos em uma volta do virabrequim. Sua construção original é mostrada na Figura 5. O motor tinha um único pistão e um ciclo de expansão maior e mais rápido. O resultado dessas peculiaridades foi que o motor Atkinson consumiu ainda menos combustível que o motor Otto.

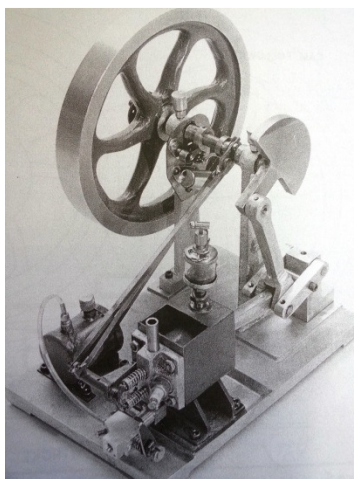


Figura 5 - Motor ciclo Atkinson original

4 Princípio de funcionamento

Originalmente o motor de ciclo Atkinson não continha engrenagens de distribuição e comando de válvulas independentes levando a crer que se tratava de um motor dois ciclos. Porém, este não é o caso. Devido a um único acoplamento duplo entre a biela e a árvore de manivelas, o pistão consegue completar os quatros ciclos do motor em apenas uma volta do virabrequim, o motor era refrigerado a água e tinha um único pistão que corria em um cilindro horizontal. Nessa configuração original, os comes se localizam no eixo do virabrequim e operam um par de varetas que fazem o acionamento das válvulas de admissão e exaustão.

Este motor é caracterizado pelo ciclo de expansão maior do que o de admissão, e originalmente isso se dava devido a uma articulação presente no virabrequim que garantia essa diferença. Podemos observar essa articulação representada pela haste azul na Figura 6.

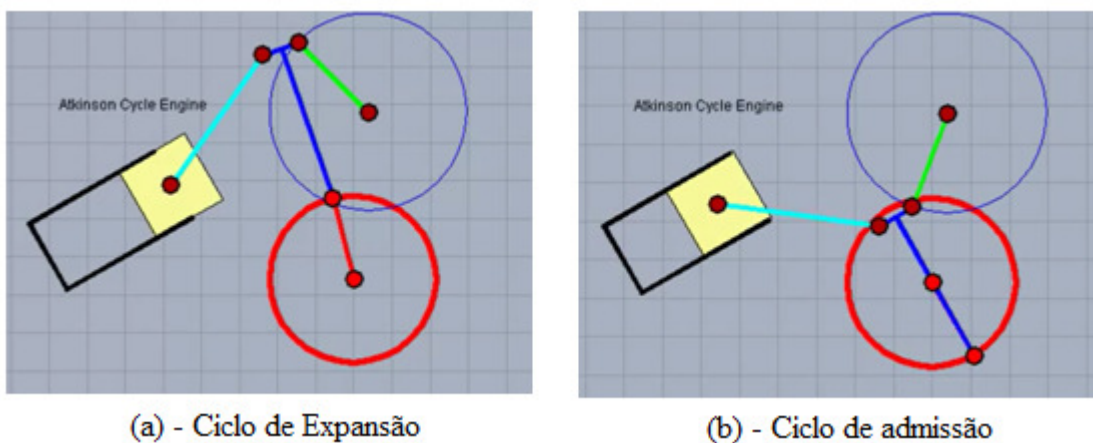


Figura 6 - Conceito original do motor de ciclo Atkinson

Atualmente essa característica se mantém, porém ocorre de outra forma. Nos motores atuais o tempo de fechamento da válvula de admissão é diferente, onde a mesma permanece aberta durante parte do processo de compressão, devolvendo parte da mistura admitida para o coletor de admissão. Com isso a quantidade de mistura efetivamente admitida e comprimida é menor, garantindo que o ciclo de expansão seja maior. O comportamento da válvula de admissão é representado na Figura 7.

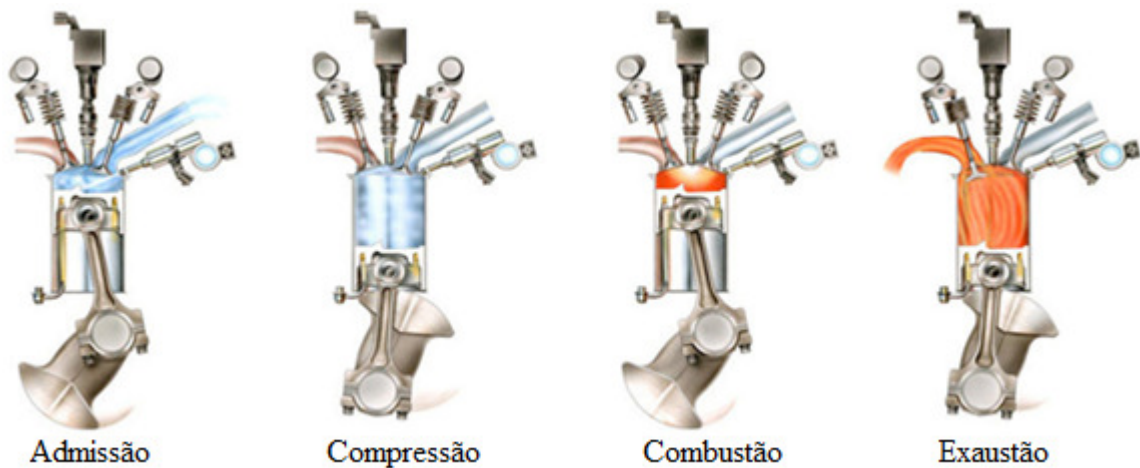


Figura 7 - Funcionamento da válvula de admissão na configuração atual do ciclo Atkinson

4.1 Comparação “ $P \times V$ ” entre ciclos Atkinson e Otto

O Gráfico 1, a seguir, apresenta uma análise de pressão e volume dos quatros tempos do motor nos dois ciclos.

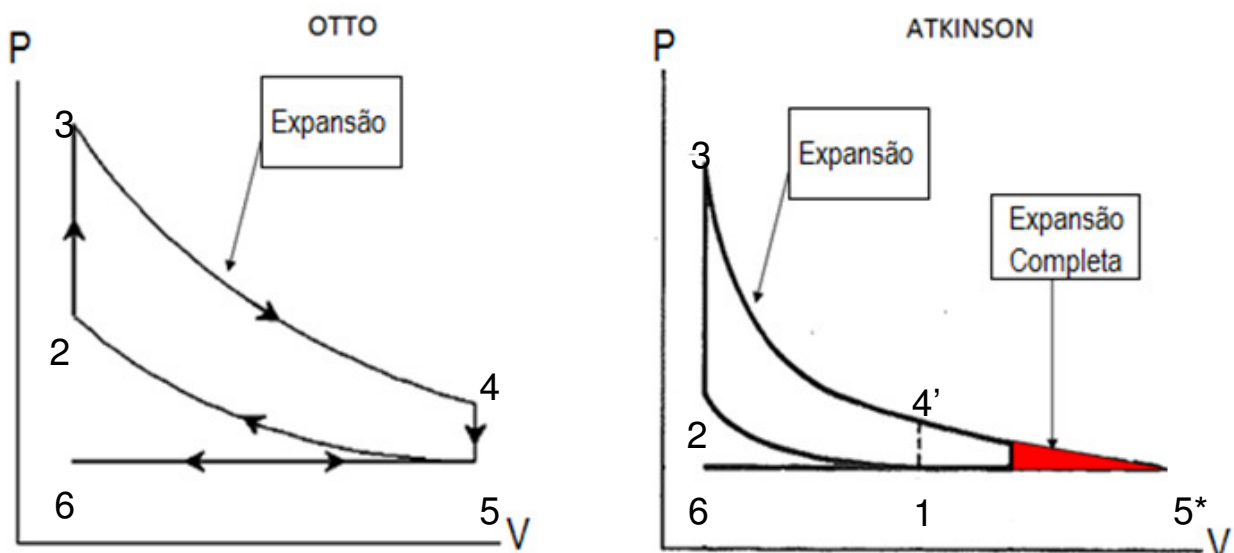


Gráfico 1 - Análise $P \times V$ nos ciclos Otto e Atkinson

O gráfico apresenta a relação entre Pressão (P) e Volume (V) dentro do cilindro durante os quatro tempos em ambos os ciclos. O processo tem início no ciclo de admissão, onde o pistão tem movimento descendente aumentando o volume da câmara de combustão, admitindo a mistura de ar-combustível para o interior do cilindro, representado pelos pontos $6 \rightarrow 5$ no motor de ciclo Otto e $6 \rightarrow 5^*$ no motor de ciclo Atkinson. Após o pistão chegar ao seu ponto morto inferior (PMI) é dado início ao processo de compressão, caracterizado pelo movimento ascendente do pistão, aumento da pressão e diminuição do volume. Diferentemente do ciclo Otto, que caracteriza esse processo dos pontos $5 \rightarrow 2$, a válvula de admissão permanece aberta por um determinado tempo no ciclo Atkinson, devolvendo parte da mistura admitida para o coletor de admissão, representado pelos pontos $5^* \rightarrow 1$. O ponto 1 representa o fechamento da válvula de admissão, e entre os pontos $1 \rightarrow 2$ o processo de compressão efetivo é caracterizado. O ponto $2 \rightarrow 3$ caracteriza o processo de ignição, gerando um aumento brusco na pressão em um mesmo volume, esse processo é comum para os dois ciclos. Como consequência, é gerada a expansão dos gases, movimentando o pistão do ponto morto superior (PMS) para o PMI, aumentando o volume e reduzindo a pressão, representado pelos pontos $3 \rightarrow 4$ no motor Otto e no motor Atkinson é possível observar, nos pontos $3 \rightarrow 4'$ o ciclo de expansão considerando a quantidade de mistura efetivamente admitida, e desse ponto até 5^* obtém-se a expansão completa devido a essa menor quantidade de mistura, reduzindo assim os níveis de emissão e consumo de combustível. O ciclo de exaustão é comum para os dois motores, representa redução no volume com mesma pressão e se caracteriza de $5 \rightarrow 6$ no motor Otto e de $5^* \rightarrow 6$ no Atkinson.

4.2 Rendimento térmico dos motores

Como mencionado, o ciclo Atkinson tem uma relação de expansão maior do que a de compressão de modo que o processo de rejeição de calor pode ocorrer à pressão constante. Esta alta relação de expansão, quando comparado ao Otto, faz com que esse ciclo tenha uma eficiência maior devido a um maior trabalho realizado.

A relação de compressão, ou taxa de compressão, do ciclo Otto é determinada a partir da relação entre o volume do cilindro acrescentado do volume da câmara de combustão pelo próprio volume da câmara de combustão, conforme Equação 1.

$$rv = \frac{V + v}{v}$$

Equação 1: Taxa de compressão ciclo Otto

No qual:

rv = Relação de compressão

V = Volume do cilindro

v = Volume da câmara de combustão

O volume do cilindro é definido conforme as dimensões do motor, sendo elas o diâmetro do pistão para obter a área de superfície do mesmo e o curso do êmbolo que é dado pela distância entre o PMS e PMI.

No motor de ciclo Atkinson existem duas relações de compressão, pois este motor apresenta um curso de expansão diferenciado. Define-se RC_1 como a menor relação de compressão, que é dada pela relação entre o volume do cilindro a partir do momento do fechamento da válvula de admissão e o PMS, no processo de compressão, somado do volume da câmara de combustão pela própria câmara de combustão. Em outras palavras, usa-se a mesma Equação 1 do ciclo Otto, porém o volume do cilindro é diferenciado, sendo o total admitido subtraído do devolvido para o coletor de admissão. Obtêm-se a relação RC igualmente à rv .

Os valores de compressão são importantes para definir o rendimento térmico de ambos os motores, conforme Equação 2 (ciclo Otto) e Equação 3 (ciclo Atkinson) abaixo:

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{1}{(rv)^{k-1}}$$

Equação 2: Rendimento térmico ciclo Otto

$$\eta_{térmico} = 1 - k \frac{RC - RC_1}{RC^k - RC_1^k}$$

Equação 3: Rendimento térmico ciclo Atkinson

O valor de Kappa (k) dado pela razão entre calor específico à pressão constante c_p pelo calor específico a volume constante c_v , conforme Equação 4.

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$k = 1,4$$

Equação 4: Valor de Kappa

A partir dos dados dos motores de ciclo Atkinson e Otto apresentados na Tabela 1, é obtido o rendimento térmico de ambos os motores.

Modelo	2ZR-FXE (Atkinson)	2ZR-FE (Otto)
Cilindrada (cc)	1,797	1,797
Cilindros	4 em linha	4 em linha
Diametro x Curso (mm)	80,5 x 88,3	80,5 x 88,3
Comando de válvulas	Admissão VVT-i	Admissão e escape VVT-i
Fechamento da válvula de Admissão	61~102 DPMI	30~65 DPMI
Taxa de compressão	13:1	10:1
Potência máxima	72kW/5200rpm	100kW/6000rpm
Torque máximo	142Nm/4000rpm	175Nm/4400rpm

Tabela 1 - Características motor Atkinson Toyota

O volume de um cilindro é obtido através da multiplicação da área da superfície do pistão pelo seu curso, conforme Equação 5.

$$V_t = \pi \times r^2 \times \text{Curso do pistão}$$

Equação 5: Volume do cilindro

Na qual:

V_t = Volume do cilindro (mm^3)

r = Raio da superfície do pistão (mm)

Curso do pistão (mm)

Nestes motores, ambos têm um volume do cilindro de $449,4\text{mm}^3$.

Leva-se em consideração que o motor de ciclo Atkinson devolve parte da massa admitida para o coletor, portanto deve-se conhecer o ângulo de fechamento da válvula de admissão, que neste caso é 61° DPMI, para saber qual curso percorrido pelo pistão no processo de compressão, e assim reconhecer o valor da mistura devolvida.

Cada ciclo do motor de 4 tempos representa 180° de movimento angular do virabrequim, portanto considerando $449,4\text{mm}^3$ o volume presente entre o PMI e o PMS, obtêm-se a Equação 6 para descobrir a quantidade de volume devolvido a cada grau de movimento do virabrequim.

$$Vd = Vt \div 180$$

Equação 6: Volume devolvido

Na qual:

Vd = Volume devolvido ($\text{mm}^3/^\circ$)

Vt = Volume do cilindro (mm^3)

Com base nas características destes motores, o valor de Vd é de $2,49\text{mm}^3/^\circ$. Sendo 61° DPMI o fechamento da válvula no ciclo Atkinson, o volume total devolvido é de $151,89\text{mm}^3$ e por consequência $297,51\text{mm}^3$ o volume efetivo admitido.

Para conhecer o valor da câmara de combustão do motor Atkinson, usa-se o mesmo conceito apresentado na Equação 1, chegando no valor de $v = 34,57\text{mm}^3$.

$$RC = \frac{Vt}{v} = \frac{449,4}{34,57} = 13:1$$

$$RC_1 = \frac{Vt - Vd}{v} = \frac{449,4 - 151,89}{34,57} = 8,6:1$$

Substituindo estes valores na Equação 3, o rendimento térmico do ciclo Atkinson é de $62,2\%$.

Conforme especificado na tabela, a taxa de compressão (r_v) do ciclo Otto é de 10:1. Substituindo este valor na Equação 2, o rendimento térmico do ciclo Otto é de 60,2%.

4.3 Comando de válvulas e cames de admissão

O comando de válvulas tem como função acionar as válvulas de admissão e exaustão, funcionando em sincronia com o eixo do virabrequim, este comando possui ressaltos que são denominados como cames.

Os cames são responsáveis pelo acionamento das válvulas através de um movimento rotativo onde seu perfil está sempre em contato com as válvulas. Analisando seu perfil, a válvula começa a ser acionada na Rampa de Abertura. Esse processo continua no Flanco de Abertura e na Junção ou Nariz é caracterizada sua abertura máxima. Podemos observar essas características na Figura 8.

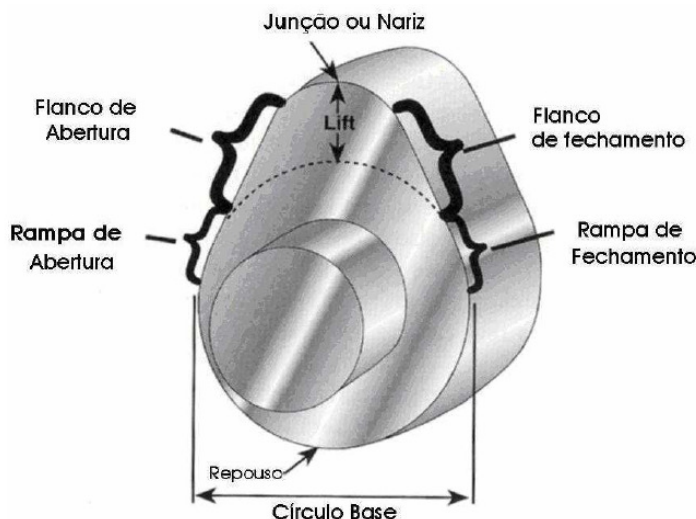


Figura 8 - Características do came de acionamento de válvulas

De acordo com a variação nas dimensões do came é possível alterar o comportamento da abertura das válvulas e devido a isso a admissão de ar e combustível para o interior do cilindro. Como o ciclo Atkinson é caracterizado pelo tempo de abertura maior que o convencional Otto, a Rampa de Abertura se localiza adiantada aproximadamente 20° do virabrequim e a Rampa de Fechamento apresenta atraso neste mesmo valor angular. Sua Junção ou Nariz é menor e os Flancos de Abertura e Fechamento mais largos, como podemos observar no Gráfico 2.

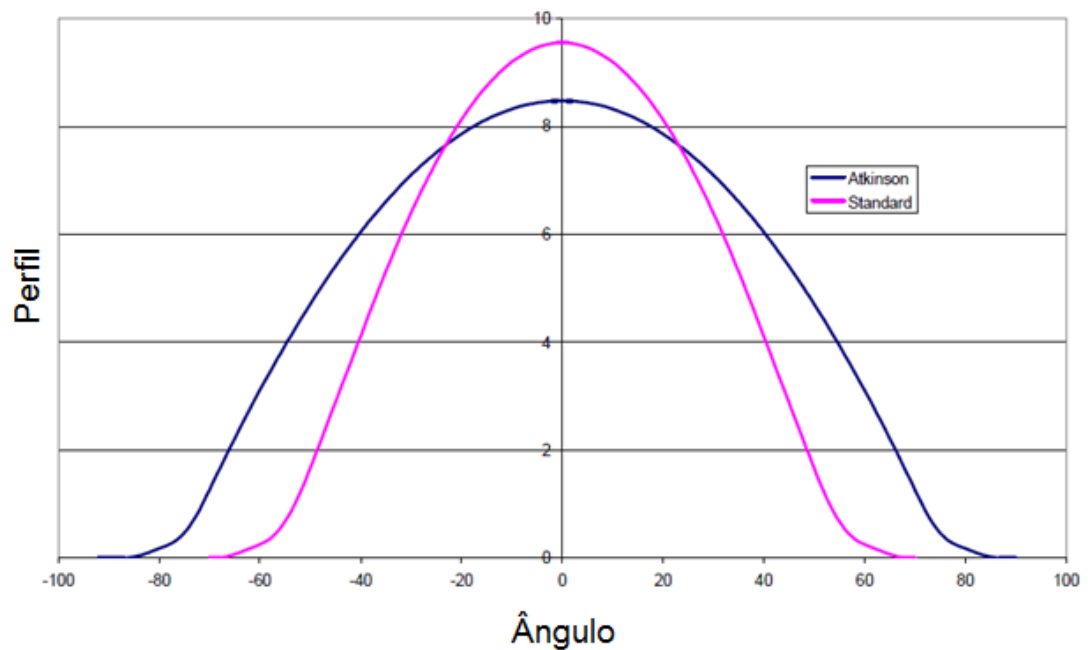


Gráfico 2 - Perfil do came de admissão nos ciclos Otto e Atkinson

Uma característica importante nos comes é o Levante, ele é visto como o quanto, teoricamente, o came desloca a válvula do seu assento. O seu cálculo é obtido através da diferença entre a altura máxima de deslocamento e o círculo base do came, conforme a Figura 9.

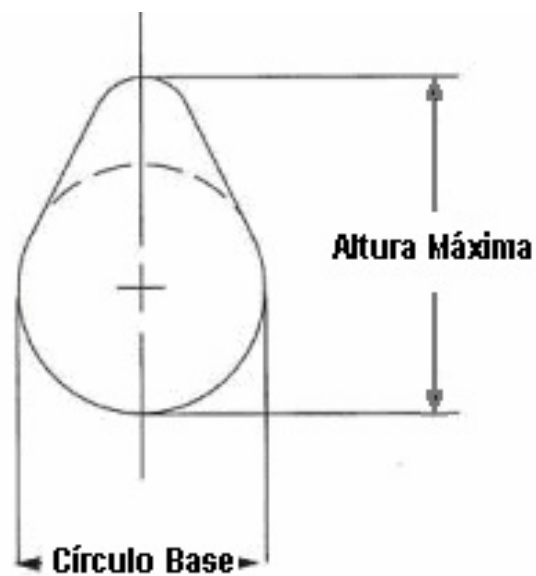


Figura 9 - Levante do Came de Admissão

$$LEVANTE = CIRCULO\ BASE - ALTURA\ MAXIMA$$

De acordo com estudos, define-se que quanto maior o levante, melhor é o rendimento do motor em médias e altas rotações devido ao aumento no rendimento volumétrico.

Analisando o perfil do came do motor de ciclo Atkinson, observa-se que sua altura máxima é menor e o círculo base maior, quando comparado ao ciclo Otto, fazendo com que seu levante seja menor. Com isso o motor terá um melhor rendimento em baixas rotações, atendendo às necessidades de um veículo híbrido, onde maior a parte de seu funcionamento está associada à geração de energia para o banco de baterias, na qual o motor funciona com baixas rotações.

4.4 Análise do tempo de fechamento da válvula de admissão

Como mencionado, a estratégia adotada neste motor para ter seu curso de expansão maior do que o de admissão é manter a válvula de admissão aberta um período de tempo maior do que no motor de ciclo Otto, obtendo com isso um curso de admissão efetivo menor. Considerando motores com as mesmas dimensões de diâmetro e curso do pistão, apresentados na Tabela 1, podemos analisar, através da Figura 10 que o tempo de abertura da válvula de admissão do ciclo Otto se dá a 233° do virabrequim, enquanto no ciclo Atkinson isso ocorre a 270° , representando um aumento de aproximadamente 15,88% no tempo de abertura da válvula, como se pode observar na Equação 8.

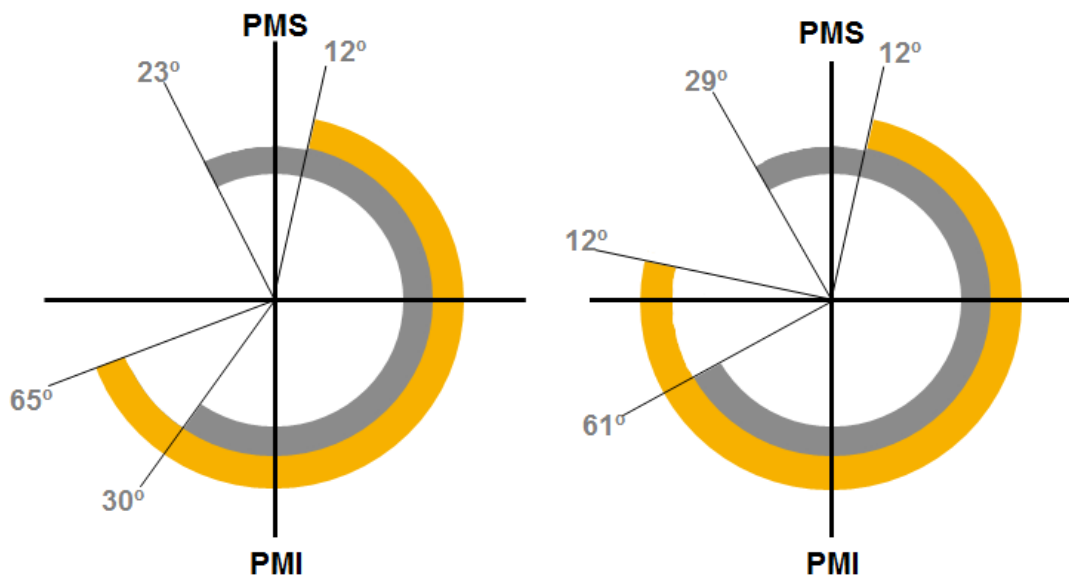


Figura 10 - Ângulo de fechamento da válvula de admissão

$$AO \times \gamma = (AA \times 100) - 100$$

Equação 8 – Ganho de tempo de abertura da válvula de admissão

Na qual:

γ = Ganho no tempo de abertura da válvula (%)

AO = Abertura Otto (rad)

AA = Abertura Atkinson (rad)

É possível observar duas faixas nos gráficos (cinza e amarela) que representam a atuação do comando de válvulas variável (VVT-i). A adoção deste dispositivo é imprescindível para a utilização do motor de ciclo Atkinson em veículos Híbridos, que hora trabalha como gerador de energia para o banco de baterias, em um regime de economia de combustível e hora agrega potência ao motor elétrico, em um regime de desempenho.

4.5 Estratégia de redução no Pumping Loss

Um dos grandes benefícios do fechamento da válvula de admissão ocorrer após o PMI é a redução de um fenômeno conhecido por Pumping Loss, ou perda por bombeamento. Esta perda é resultado de um trabalho perdido no processo de admissão, onde há uma diferença de pressão entre o coletor de admissão e o interior do cilindro. Este fenômeno ocorre principalmente em baixas e médias rotações onde a abertura da válvula borboleta não é grande, fazendo então com que a pressão gerada no coletor de admissão seja menor do que a ideal (atmosférica). Este fenômeno pode ser associado ao que ocorre em uma seringa, onde, ao fecharmos o bico e puxarmos a haste a mesma volta a posição inicial quando é solta, representando um trabalho resultante zero.

O fato de manter a válvula de admissão aberta em parte do processo de compressão faz com que parte da mistura admitida seja devolvida para o coletor, armazenando-a já pressurizada nessa região. Com isso essa mistura é admitida com mais facilidade no próximo ciclo de admissão, pois essa pressão se aproxima da atmosférica, reduzindo o Pumping Loss.

O Gráfico 3 mostra a ocorrência desse fenômeno, relacionando a pressão e o volume real no motor. Do lado esquerdo é representada a pressão abaixo da atmosférica no processo de admissão, resultando no Pumping Loss que é caracterizado pela área cinza. Do lado direito é apresentado um detalhamento da imagem da esquerda com a adoção dessa estratégia apresentada. Nota-se que há uma redução deste fenômeno de forma significativa, porém ele recebe um adicional no resultado final pelo maior tempo na abertura da válvula de admissão

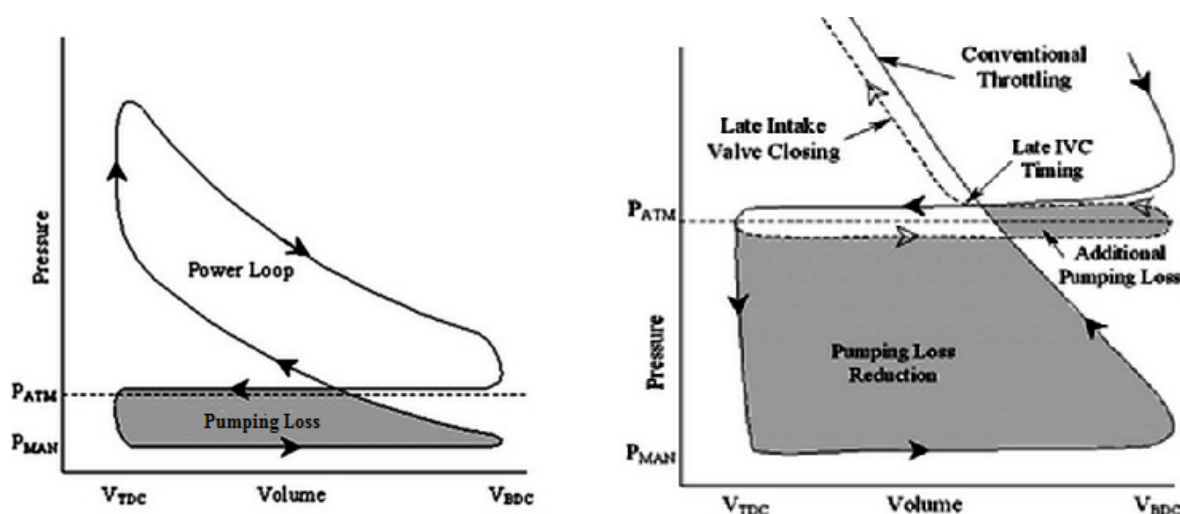


Gráfico 3 - Redução do Pumping Loss

4.6 Comparação entre Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) x Potência nos motores de Ciclo Atkinson e Otto

Antes de analisarmos o conteúdo a seguir se é necessário o entendimento conceitual sobre BSFC.

O BSFC é denominado pela relação entre a quantidade de combustível consumido e a energia produzida. Sua unidade de medida é g/kWh.

Quanto menor o consumo específico maior será a eficiência energética do motor, pois isso mostra que foi necessário uma menor quantidade de combustível para se gerar a mesma potência. Quando há uma baixa eficiência significa que parte da energia fornecida pelo combustível foi desperdiçada.

A relação ar-combustível tem influência direta sobre o consumo específico, pois é ela quem determina o fator λ , ou seja, mistura pobre $\lambda < 1$, ideal $\lambda = 1$ ou mistura rica $\lambda > 1$.

O Gráfico 4 apresenta uma comparação entre o consumo específico e a potência gerada nos motores de Ciclo Atkinson e Otto, representados pelas linhas azul e vermelha, respectivamente. É possível observar uma potência final maior gerada pelo ciclo Otto, porém com um maior consumo específico em todos os regimes de potência, caracterizando a vantagem de maior economia de combustível apresentada pelo ciclo Atkinson.

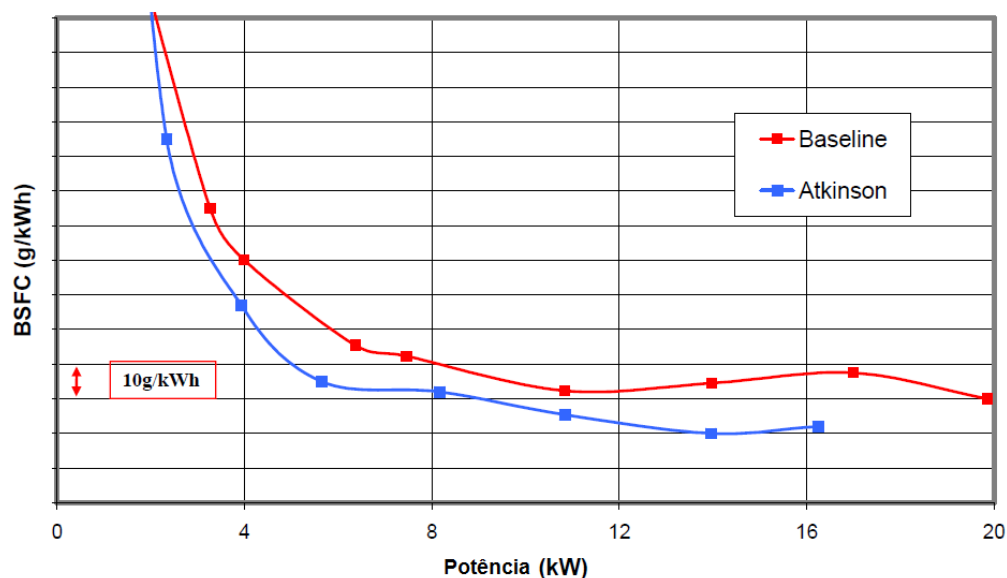


Gráfico 4 - Relação BSFC x Potência nos ciclos Otto e Atkinson

Em veículos híbridos quando o motor funciona como gerador de energia para o banco de baterias, a estratégia adotada é que este motor funcione, em regime estacionário, na sua faixa de menor consumo específico, que se localiza próxima à potência máxima gerada. Quando o motor de ciclo Atkinson se acopla ao motor elétrico, gerando potência para o veículo, ele passa a atuar em todas as faixas, devido a variação na rotação do motor, porém ainda com menor valor de consumo específico do que o ciclo Otto.

4.7 Relação entre Intake Valve Closing (IVC) x Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) x Brake Mean Effective Pressure (BMEP) no motor de ciclo Atkinson

Para darmos continuidade aos estudos apresentados é necessário um breve entendimento sobre o conceito de BMEP.

A pressão média efetiva é a média da pressão dentro do cilindro do motor, baseada na potência calculada ou medida. Então se têm a pressão média efetiva indicada e a pressão média efetiva no eixo, derivadas da potência indicada e da potência no eixo, respectivamente. A pressão média efetiva no eixo é um parâmetro importante de medição da performance do motor, pois é obtida pela razão do trabalho por ciclo pelo volume deslocado no cilindro, ou seja, é a potência produzida pelo motor em função do seu tamanho.

A pressão média efetiva é dada por:

$$BMEP = \frac{2 \times 60 \times Pe}{V \times Nr}$$

Na qual:

BMEP: Pressão média efetiva (Pa)

Pe: Potência no eixo

V: Volume do cilindro

Nr: Rotação do motor

Equação 9 – Cálculo do valor de BMEP

Testes foram realizados para saber qual o melhor momento de fechamento da válvula de admissão, eles se basearam na seguinte metodologia:

- Regime de funcionamento: 3500rpm constantes;
- Foram realizadas medições de consumo específico (BSFC) e pressão média efetiva na câmara de combustão (BMEP), fechando a válvula de admissão (IVC) em diferentes pontos, sendo eles entre 50 e 150° DPML. A cada fechamento obteve-se um valor para cada parâmetro medido, gerando o Gráfico 5 e o Gráfico 6 localizados abaixo.
- Características do motor testado:

Cilindrada	624cc
Cilindros	2 em linha
Diâmetro x Curso pistão (mm)	73,5 x 73,5
Potencia máxima	26kW/5500rpm
Torque máximo	48Nm/2500rpm

Tabela 2 - Características motor Atkinson TATA

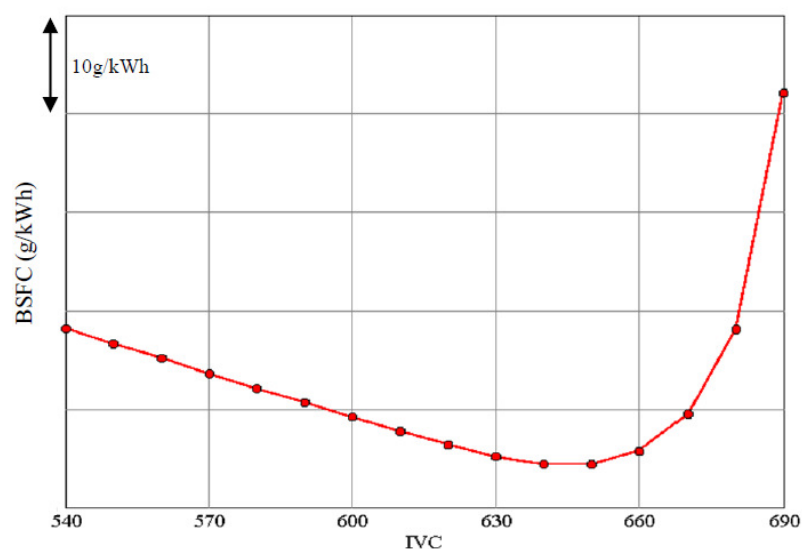


Gráfico 5 - Relação BSFC x IVC

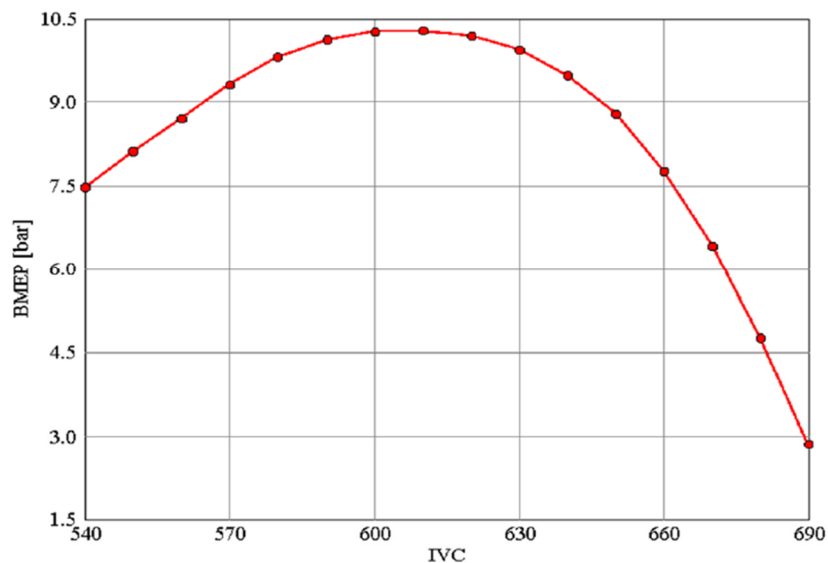


Gráfico 6 - Relação BMEP x IVC

Observa-se no Gráfico 7 que o melhor consumo específico foi obtido aproximadamente com o IVC em 640° equivalente à 100°DPMI (Depois do ponto morto inferior) e a melhor pressão efetiva a 610°. Relacionando as duas análises conclui-se que há duas faixas de melhor operação deste motor. A faixa verde representa a atuação quando este funciona como gerador de energia em rotação estacionária, onde buscamos o menor consumo. Haverá uma leve perda de desempenho devido a pressão efetiva na câmara de combustão ser menor, porém quando for necessário agregar potência ao motor elétrico, no caso de aplicação em veículo híbrido do tipo misto, será necessário atuar na faixa de desempenho máximo do motor, representado pela faixa laranja. Nesta área o BMEP é máximo, e o consumo específico acaba sendo ligeiramente maior, mas ainda assim é baixo, apresentando valores aproximados de 9g/kWh. Portanto o ideal é que um motor do tipo Atkinson tenha o gerenciamento do comando de válvulas eletrônico (VVT-i) atuando especialmente nas válvulas de admissão para que atue hora visando economia de combustível e hora desempenho.

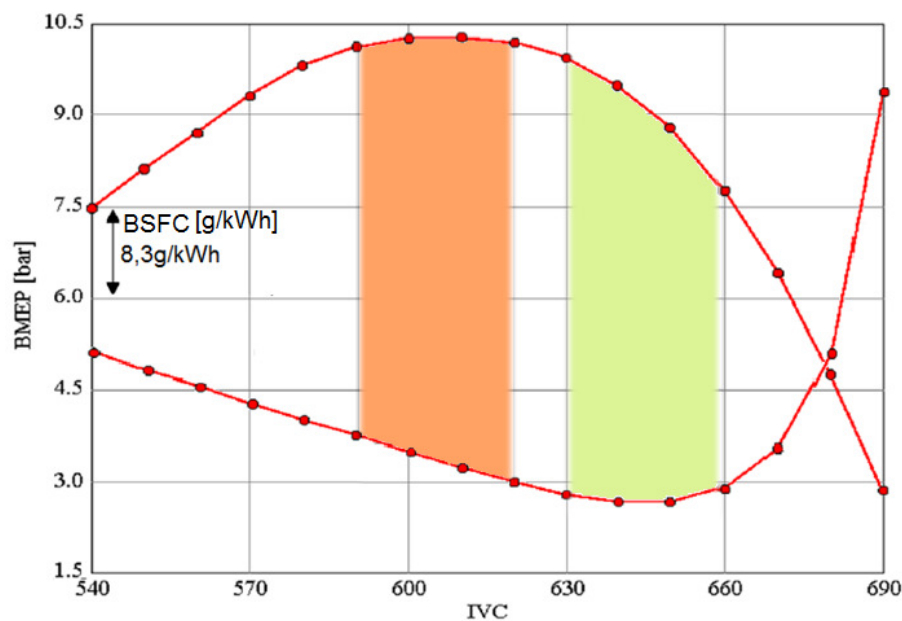


Gráfico 7 - Faixas de funcionamento do motor de ciclo Atkinson

5 Viabilidade técnica e econômica

5.1 O Inovar – Auto

O Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar – Auto), é uma medida adotada pelo Governo Federal com o objetivo de estimular o investimento na indústria automobilística nacional. Estima-se que até 2015 o Programa levantará mais de R\$50 bilhões em investimentos no setor.

As medidas introduzidas pelo Programa Inovar – Auto fazem parte da política industrial, tecnológica e de comércio exterior chamado “Plano Brasil Maior”, e concede benefícios em relação ao Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para as empresas que estimularem e investirem na inovação e em pesquisa e desenvolvimento dentro do Brasil.

O programa prevê um desconto de até 30 pontos percentuais no IPI para automóveis produzidos e vendidos no país; para ter direito ao incentivo, no entanto, os interessados devem cumprir uma série de contrapartidas, que vão aumentar gradualmente a partir do início do programa. Para ter direito aos benefícios fiscais do Inovar – Auto, os interessados devem cumprir uma série de metas.

5.2 Etiquetagem

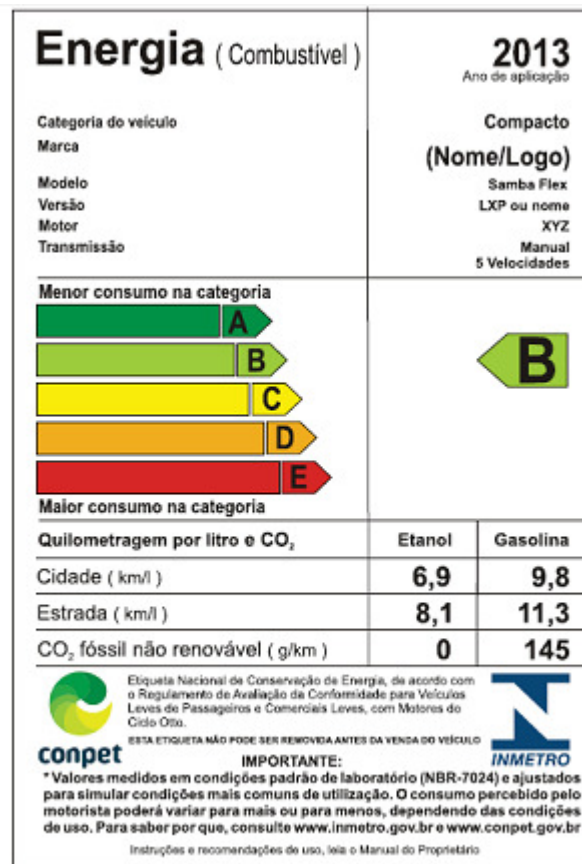


Figura 11 - Etiqueta Inmetro

Todos os veículos nacionais recebem uma etiqueta chamada de “Etiqueta Nacional de Conservação de Energia” criada pelo Inmetro e que define o valor de redução de IPI por níveis de qualificação, como pode ser visto na Figura 11. Esses níveis vão de A até E, sendo A o menor consumo na categoria e E o maior consumo. Para atribuição desses níveis dois fatores são levados em consideração, eles são a Quilometragem por Litro (km/l) e a Emissão de CO₂ fóssil não renovável (g/km).

Com a utilização do motor de ciclo Atkinson, que proporciona redução no índice de emissões e no consumo de combustível é possível melhorar a classificação dos veículos, buscando atingir o nível de qualificação A, reduzindo ao máximo o valor do IPI.

6 Discussões finais e Conclusão

O motor de ciclo Atkinson sofreu algumas modificações mecânicas desde sua construção original. Hoje podemos considerar que há uma mistura entre o motor de ciclo Otto e ciclo Atkinson, gerando um terceiro motor que une a principal característica do Atkinson, que é o curso de expansão maior do que o de admissão, com a construção mecânica de um Otto. Também há alteração no came de admissão e um contrapeso no virabrequim para completar seu ciclo de expansão. Atualmente, este terceiro motor atende os requisitos da sua aplicação em veículo híbrido, pois tem uma melhor eficiência energética e menor índice de emissões.

6.1 Áreas de Aplicação das Contribuições desta Tese

A aplicação deste motor está fundamentalmente voltada em veículos do tipo híbrido, independente de sua configuração. Também é possível expandi-lo para toda a gama de veículos de passeio desde que haja alterações no sistema de gerenciamento eletrônico.

6.2 Propostas Futuras de Pesquisa

- Construir um motor de ciclo Atkinson a partir de seu projeto original a fim de realizar estudos de seu desempenho, entendendo suas reais vantagens e desvantagens.
- Desenvolvimento prático de um motor combinando as características do ciclo Otto e Atkinson baseados nos estudos realizados neste trabalho.
- Desenvolvimento de uma estratégia de calibração do motor para otimizar seu funcionamento e verificar viabilidade de aplicá-lo em toda linha de veículos de passeio.

7 Referências bibliográficas

BORGNAKKE/SONNTAG, FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA, tradução da 7ª Edição Americana, Editora BLUCHER

Vincent Gingery, BUILDING THE ATKINSON CYCLE ENGINE, 1ª Edição, publicado por David J. Gingery Publishing U.S.A

Nobuki Kawamoto, Kiyoshi Naiki, Toshihiro Kawai, Takasuke Shikida and Mamoru Tomatsuri, Development of New 1.8-Liter Engine for Hybrid Vehicles, 2009-01-1061, SAE International

MECHADYNE INTERNATIONAL, Intake Valve Closing Strategies

Andy Mason, APPLICATION OF ATKINSON CYCLE TO IMPROVE IC ENGINE EFFICIENCY, Tata Motors European Technical Centre

Henry Joseph Junior, TECNOLOGIA DOS VEÍCULOS PARA ATENDIMENTO AO PROCONVE, ANFAVEA, 26º Salão Internacional do Automóvel

Cleber Willian Gomes, Curso de calibração de motores, SAE Brasil

EBROCHURE TOYOTA PRIUS, Julho de 2012

José RICARDO SODRÉ; Rodrigo CAETANO COSTA; Rodrigo HERMAN DA SILVA, : EFEITOS DO COMPRIMENTO DO CONDUTO DE ADMISSÃO NA PERFORMANCE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA, CEFET Bambuí; PUC Minas

Henrique Imbasciati, ESTUDO DESCRITIVO DOS SISTEMAS, SUBSISTEMAS E COMPONENTES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS, São Caetano do Sul, 2012

INMETRO.GOV.BR

ANFAVEA.COM.BR

UOL.COM.BR

