



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Sistema de Variação da Capacidade num Motor de Atkinson: Estudo Comparativo

Tiago Renato de Matos Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em:

Engenharia Eletromecânica

(2º Ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

Covilhã, junho 2016

Dedicatória
Aos meus Pais e a minha irmã,
Pela perseverança que tiveram comigo ao longo da vida.

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo que lutaram para que eu pudesse aqui chegar. Pela dedicação, paciência e persistência, apoio e motivação que me deram até hoje. Obrigado pelo que me ensinaram.

À minha irmã Adriana, por todo o apoio que me deu, pelos momentos vividos e pela experiência de vida que me proporcionou.

Aos meus companheiros de casa Martim, Amado e Paredes pela convivência, amizade e espírito de ajuda que me proporcionaram durante estes longos 6 anos.

A ti Andreia, por me teres sempre apoiado em todas as decisões que tomei e por estares ao meu lado sempre que pudeste.

Aos meus amigos, Tavares, David, Marco, Tatiana, Simão, Duarte e todos aqueles que me acompanharam durante este trabalho.

A todos os amigos que fiz nesta Universidade, foram vocês que fizeram a Covilhã valer a pena.

Aos elementos do núcleo que me ensinaram que todos juntos somos capazes de “vencer o impossível”.

Por último, mas não menos importante, ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Fael pela orientação, motivação, empenho e ensino. Um muito obrigado, pois sem ele nada disto seria possível.

Resumo

Ao longo dos anos as pessoas vivem com um único objetivo, melhorar. E nos motores de combustão, melhor significa menos consumo e como consequência menos poluição. Assim, esta dissertação apresenta uma possível melhoria no rendimento do motor de Atkinson.

Esta melhoria passa por implementar um sistema de variação de capacidade de admissão no motor de Atkinson, uma vez que o motor para grandes cargas necessita de uma capacidade maior e para pequenas cargas não necessita de tanta capacidade, reduzindo os gastos com o combustível e as emissões.

Depois de se estudar a implementação de um sistema de variação de capacidade de admissão será feita uma comparação com um motor de ciclo de Otto, com capacidade superior, a fim de provar que o motor em estudo tenha o mesmo ou um melhor rendimento.

Palavras-Chave

Motor de Atkinson, Ciclo de Atkinson, Ciclo de Otto, Variação da cilindrada, Variação da Taxa de Compressão, Motor de Combustão, Capacidade de Admissão, Diagrama P-V.

Abstract

Over the years people live with one goal, to improve. In combustion engines, improved means less consumption and consequently less pollution. Thus, this work presents a possible improvement in the Atkinson engine performance.

This improvement is to implement an admission capacity variation system in Atkinson engine, since the engine for large loads require higher capacity and small loads do not require much capacity, reducing the costs of fuel and emissions.

After studying the implementation of an admission capacity variation system will be made a comparison with an Otto-cycle engine with a capacity in order to prove that the engine study was the same or better performance.

Keywords

Atkinson engine, Atkinson cycle, Otto cycle, Variation of the Cylinder Capacity, Variation of the Compression Ratio, Combustion Engine, Admission Capacity, Diagram P-V.

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos.....	xvii
Lista de símbolos.....	xix
1. Introdução	21
1.1. Objetivo	22
1.2. Divisão de Capítulos.....	22
2. Motores de combustão interna	25
2.1. Componentes do Motor	25
2.2. Ciclo de Otto	26
2.3. Ciclo de Atkinson	29
2.4. Sistemas de variação da capacidade	35
2.5. Variação da taxa de compressão.....	35
2.5.1. Peugeot MCE-5	35
2.5.2. SAAB SVC	36
2.5.3. Gomecsys VCR Technology	37
3. Dimensionamento.....	39
3.1. Desenho	39
3.2. Cálculo do movimento dos mecanismos	40
3.3. Otimização geométrica	41
3.4. Cálculo do Binário	46
3.5. Velocidade Angular	49
3.6. Aceleração Angular	51
4. Motor de Atkinson com variação de capacidade	53
5. Otto vs. Atkinson com variação de capacidade	57
6. Conclusão	71

6.1. Trabalhos Futuros	71
Bibliografia.....	73
Anexos	75

Lista de Figuras

Figura 1- Organograma Motores de Combustão	25
Figura 2-Modelo de um motor de combustão [3].....	26
Figura 3 - Ciclo de Otto ideal [5].....	27
Figura 4 - Os 4 tempos de um motor de combustão [6].....	27
Figura 5- Sistema de admissão de um motor [7]	28
Figura 6- Borboleta de regulação de entrada de ar no motor	28
Figura 7-Ciclo de Otto real [7]	29
Figura 8 - Rendimento de um motor real [8]	29
Figura 9-Motor de Atkinson [1]	30
Figura 10 - Ciclo de Atkinson [7]	30
Figura 11-Diagrama P-V, Ciclo de Atkinson [7]	31
Figura 12-Ciclo de Otto vs. Ciclo de Atkinson [11].....	32
Figura 13- Honda Exlink, mecanismo [13]	34
Figura 14- Eficiência térmica Motor Honda Exlink [13]	34
Figura 15- Funcionamento do motor de acordo com as condições de condução [13]	35
Figura 16- Evolução do MCE-5 [15].....	36
Figura 17-SAAB SVC [16]	36
Figura 18-Gomecsys VCR [17].....	37
Figura 19-Protótipo inicial	39
Figura 20- Desenho do motor de Atkinson.....	39
Figura 21-Desenho vetorial motor Atkinson com variação da capacidade	40
Figura 22-Razão entre os comprimentos de expansão e admissão	42
Figura 23-Angulo da rotação da cambota para os tempos de admissão-compressão e expansão-escape	42
Figura 24-Movimento do pistão para as várias iterações.....	43
Figura 25-Desenho final do motor Atkinson	44
Figura 26-Desenho final do motor de Atkinson	44
Figura 27-Comparção dos PMI e PMS quando se varia a capacidade	45
Figura 28-Variação do θ_3 , θ_5 e θ_6 em relação à posição da cambota (rad).	45
Figura 29- Movimento do pistão em relação a cambota	46
Figura 30- Diagrama de forças no motor de Atkinson	46
Figura 31 - Representação gráfica da força aplicado durante a rotação da cambota	48
Figura 32- Binário do motor segundo a posição da cambota	49
Figura 33- Velocidade angular de R_3	50
Figura 34-Velocidade angular de R_5	50
Figura 35-Velocidade angular de R_6	50
Figura 36- Velocidade linear de R_7	51
Figura 37- Aceleração angular de R_3 em função da posição da cambota.....	52

Figura 38- Aceleração angular de R5 em função da posição da cambota.....	52
Figura 39- Aceleração angular de R6 em função da posição da cambota.....	52
Figura 40- Aceleração de R7 em função da Posição da cambota.....	52
Figura 41- Movimento do pistão para cada variação da capacidade.....	53
Figura 42- Diagrama P-V, para $\Theta_4=4,71\text{rad}$ ($270,0^\circ$)	53
Figura 43-Diagrama P-v, para $\Theta_4=4,81\text{rad}$ ($275,8^\circ$)	54
Figura 44-Diagrama P-v, para $\Theta_4= 4,91\text{rad}$ ($281,5^\circ$)	54
Figura 45-Diagrama P-v, para $\Theta_4=5,06\text{rad}$ ($290,0^\circ$)	55
Figura 46-Diagrama P-v, para $\Theta_4=5,21$ ($298,6^\circ$)	55
Figura 47-Diagrama P-v, para $\Theta_4=5,31\text{rad}$ ($304,4^\circ$)	56
Figura 48- Variação do trabalho/Hadmissão consoante a variação do Θ_4	56
Figura 49-Desenho vetorial de um motor ciclo de Otto sem offset da cambota.	57
Figura 50- Desenho CAD motor ciclo de Otto.	57
Figura 51-Movimento pistão do motor Ciclo Otto	58
Figura 52-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 90%	58
Figura 53- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 80%.....	59
Figura 54- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 70%.....	59
Figura 55- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 60%.....	60
Figura 56- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 50% (canto superior direito-escala logarítmica).....	60
Figura 57-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 40%	61
Figura 58-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 30%	61
Figura 59-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 20%	62
Figura 60-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 10%	62
Figura 61-Diagrama P-V, sem perdas por bombagem	63
Figura 62- Trabalho produzido em função da pressão de admissão	63
Figura 63-Diagrama P-V para motor de Atkinson.....	64
Figura 64- Diagrama P-V para o motor de Atkinson	65
Figura 65-Diagrama P-V motor de Atkinson com rácio admissão-expansão de 1	66
Figura 66- Consumo específico do motor Otto consoante a pressão de admissão	66
Figura 67- Consumo específico do motor de Atkinson consoante a variação do Θ_4	67
Figura 68-Resistência ao rolamento	68

Lista de Tabelas

Tabela 1-Dimesão dos vetores do mecanismo (em mm)	43
Tabela 2- Força aplicada no pistão consoante a rotação da cambota.....	48
Tabela 3-Medidas motor ciclo de Otto.	57
Tabela 4- Dimensões Motor de Atkinson aumentado 1,9 vezes	64
Tabela 5-Dimensões motor Atkinson 2,5 vezes maior e variação do rácio admissão-expansão	65
Tabela 6- Dimensões motor de Atkinson, 40% maior e rácio admissão-expansão de 1	65
Tabela 7- Potência necessária para vencer a força de arrasto consoante a velocidade	68
Tabela 8-Potência fornecida em função das rotações por minuto	69
Tabela 9- Potência fornecida em função das rotações por minuto	69
Tabela 10- Potência fornecida em função das rotações por minuto.....	69
Tabela 11- Valores movimento dos mecanismos	79
Tabela 12- Esforços nas barras do mecanismo.....	82
Tabela 13-Velocidade angular das barras do mecanismo.....	85
Tabela 14-Aceleração angular das barras do mecanismo.....	87

Lista de Acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RPM	Rotações por minuto
VCR	Variable compression Ratio

Lista de símbolos

m_1	Massa de gás no cilindro
m_{ta}	Massa de ar presa no cilindro
ρ_{at}	Densidade do ar a pressão atmosférica
P_1	Pressão de admissão
V_1	Volume de admissão
V_{sv}	Volume varrido
R	Constante dos gases
T_1	Temperatura de admissão
P_{at}	Pressão atmosférica
DR	Taxa de admissão
m_{tf}	Massa de combustível presa
AFR	Rácio ar-combustível
Q_2^3	Calor transferido durante a explosão
P_2	Pressão de compressão
V_2	Volume de compressão
γ	Índice de compressão
T_2	Temperatura de compressão
W_2^3	Trabalho efetuado durante a compressão
C_v	Calor específico a volume constante
T_3	Temperatura no fim da explosão
P_3	Pressão na câmara de combustão depois da explosão
T_4	Temperatura na câmara de combustão durante a expansão
P_4	Pressão na câmara de combustão durante a expansão
P	Pressão
F	Força
A	Área
ω	Velocidade angular
α	Aceleração angular
C_{fl}	Poder calorífico

1. Introdução

Os motores de combustão interna são hoje utilizados no nosso cotidiano por inúmeras pessoas. Por esta razão, desde a invenção dos motores de combustão interna que se procura a evolução dos mesmos por diversos motivos, nomeadamente a redução do consumo e da emissão de gases poluentes.

O aumento do rendimento dos motores tem sido muito explorado. Nas últimas décadas tem-se assistido a uma evolução exponencial, devido à crise do petróleo e às normas relativas à emissão de CO₂ impostas pela União Europeia e Estados Unidos da América, que estão cada vez mais restritas.

Esta evolução dos motores de combustão interna é gerada onde a competição ocorre, onde as equipas pensam em formas de obter melhores rendimentos e performances para ganhar, para ser mais rápido, mais eficaz e mais rentável. Um exemplo é a Formula 1, onde tudo é levado ao limite e as margens de erro são incrivelmente pequenas. Tudo o que é incrementado num carro serve para melhorar a eficiência. Os motores têm diminuído a capacidade mantendo a potência, com o incremento de motores elétricos para ajudar nas recuperações, com o desenvolvimento de pneus para uma melhor aderência ao piso seco e molhado, com o estudo da aerodinâmica, com material usado. Isto tudo com o objetivo de reduzir o consumo e aumentar a potência e velocidade, isto é, aumentar o rendimento.

Quando se fala em motores de combustão pensa-se num sistema pistão-biela-cambota a funcionar a 4 tempos, pois é o mais comum hoje em dia. Mas a verdade é que outros motores já surgiram ao longo da história, alguns com rendimentos superiores ao motor comum, mas sempre com algumas desvantagens. O motor de Atkinson, que foi patenteado a 2 de agosto de 1887 por James Atkinson nos Estados Unidos da América, é um desses casos. Este motor tem uma geometria um pouco peculiar. Em vez de ter o pistão ligado à cambota através de uma biela, James Atkinson separou a ligação e juntou um *link* entre a biela e cambota. Este novo desenho do motor trouxe duas vantagens: permitiu que os 4 tempos fossem efetuados numa rotação da cambota (ao invés das 2 rotações no ciclo de Otto) e o curso do pistão passou a fazer um curso longo (curso de potência) e um curso curto (o de compressão). Este sistema funciona bem para cargas pequenas devido a uma capacidade de admissão menor, mas para grandes cargas seria necessário aumentar a capacidade. Quando a carga aumenta, a eficiência diminui, reduzindo a eficiência do motor. [1]

Para compensar esta redução de eficiência, nesta dissertação, é proposto a implementação de um sistema que faça variar a capacidade de admissão, de forma a ter um bom rendimento quando comparado com um motor de ciclo de Otto. A variação da capacidade é um sistema pouco desenvolvido nos motores comuns, e para este tipo de motor nada foi realizado. A implementação de um sistema de variação de capacidade num motor de Atkinson poderá

significar um incremento do rendimento do motor. Nesta dissertação é apresentado um estudo de um sistema de variação da capacidade e é feita uma comparação com o motor de ciclo de Otto.

Com isto pretende-se chegar ao motor ideal:

- Máxima Redução das perdas no escape usando o ciclo de Atkinson;
- Redução das perdas por bombagem, anulando a borboleta de admissão variando a capacidade do motor.

1.1. Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo principal o estudo de um sistema que faça variar a capacidade de admissão num motor de Atkinson, para que se possa reduzir o consumo quando não é necessária a produção de tanto trabalho. Isto é, quando o motor não necessita de produzir muito trabalho, funciona com a capacidade mínima; quando necessita de produzir mais trabalho, aumenta a capacidade, variando-a para otimizar o rendimento do motor.

No final, será comparado com um motor de Otto, para que se possa perceber se existem vantagens.

1.2. Divisão de Capítulos

O presente capítulo faz uma breve introdução ao que será abordado nesta dissertação, o objetivo geral e a sua estrutura.

No capítulo 2, primeiramente é explicado o funcionamento de um motor e as suas componentes. Em seguida há uma introdução ao ciclo de Otto e ao ciclo de Atkinson, explicando a geometria do primeiro motor de ciclo de Atkinson e uma alternativa criada pela Honda mais recentemente. É também feita uma comparação entre os dois ciclos usando os diagramas P-V e apresentando as fórmulas de cálculo para obtenção dos mesmos. Ainda neste capítulo são apresentados sistemas de variação da taxa de compressão cujo atuador serve de base para o sistema de variação de capacidade implementado no caso em estudo.

No capítulo 3 é apresentado todo o dimensionamento e análise do mecanismo implementado no caso em estudo. Primeiramente é apresentado um protótipo inicial para base de estudo, é desenvolvido vectorialmente o motor para otimizar a sua geometria e, com recurso ao *Matlab*, é calculado o seu binário, velocidade angular e aceleração dos mecanismos.

No capítulo 4, após a otimização da geometria, demonstram-se os Diagramas P-V do motor de Atkinson para diferentes cilindradas e o respetivo consumo específico que mais tarde servirá como método de comparação.

No capítulo 5, é feita a comparação do motor de Otto com o motor de Atkinson. No motor de Otto é variada a abertura da borboleta e no motor de Atkinson é variada a capacidade. É

também calculada velocidade de rotação necessária em motores de Otto e Atkinson para conseguir vencer a força de arrasto de um veículo.

No capítulo 6, são apresentadas conclusões relativas ao estudo apresentado e sugestões para trabalhos futuros. É apresentada a bibliografia consultada durante este estudo.

2. Motores de combustão interna

Os Motores térmicos ou de combustão podem ser classificados de acordo com o local onde ocorre a combustão. Pode ser interna (IC) ou externa (EC), estes ainda podem ser rotativos ou alternativos, como demonstra o organigrama seguinte:

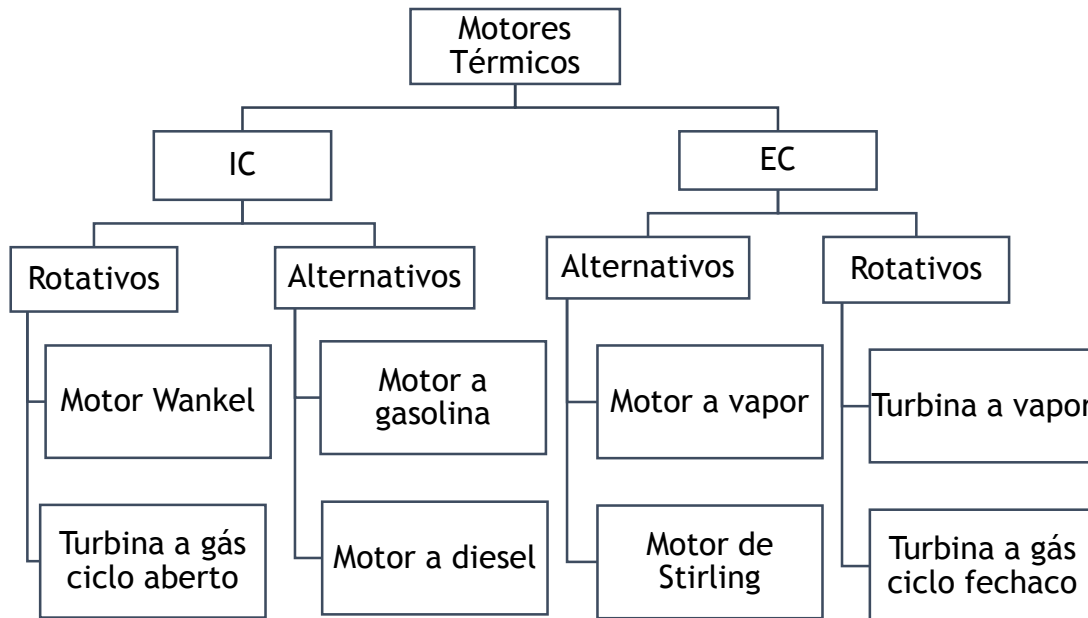


Figura 1- Organigrama Motores de Combustão

Nesta dissertação o motor em estudo será um motor de combustão interna alternativo a gasolina.

Comummente usados para propulsão de meios de transporte, um motor de combustão interna (MCI) é um motor térmico que transforma a energia química de um combustível em energia mecânica. Isto acontece por meio de pequenas explosões dentro de um cilindro, destas explosões obtém-se energia térmica, que faz aumentar a pressão e a temperatura dos gases que estão dentro do motor, o gás a alta pressão expande contra os mecanismos do motor. Esta expansão é convertida através das ligações mecânicas até a cambota em energia mecânica, a cambota em rotação transmite a energia mecânica para a componente final. [2]

2.1. Componentes do Motor

A Figura 2 representa um corte transversal de um motor de combustão, onde podemos observar as componentes do motor assinalado de A a H.

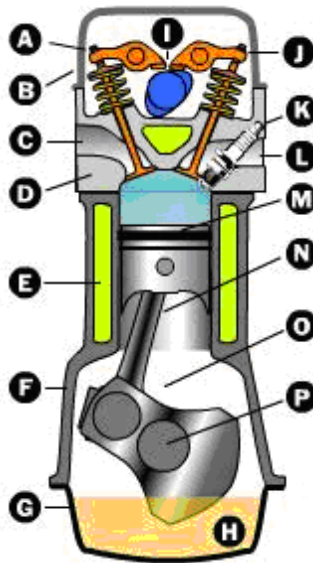


Figura 2-Modelo de um motor de combustão [3]

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| A-Válvula de admissão | I- Comando de válvulas |
| B-Tampa de válvulas | J-Válvulas de escape |
| C-Coletor de admissão | K-Vela de ignição |
| D-Cabeçote | L- Coletor de escape |
| E- Água de refrigeração | M-Pistão |
| F-Bloco do motor | N-Biela |
| G-Cárter | O-Mancal de biela |
| H- Óleo de lubrificação | P-Cambota |

2.2. Ciclo de Otto

O ciclo de Otto foi inventado em 1862 por Alphonse Beau de Rochas e implementado por Nikolaus Otto 14 anos mais tarde. Este ciclo termodinâmico, de 4 tempos, representa a evolução dos motores ao aumentar a eficiência e reduzir os gases poluentes em relação aos motores de 2 tempos, apesar da maior complexidade, peso e volume. [4]

O ciclo ideal de 4 tempos divide-se nos seguintes processos termodinâmicos, que se representam na Figura 3, diagrama P-V:

- Processo isobárico (Admissão, 1-2, escape, 2-1)
- Processo isentrópico (Compressão, 2-3)
- Processo isocórico (Combustão, 3-4)
- Processo adiabático (curso de potência, 4-5)
- Processo isocórico (rejeição de calor 5-6)



Ideal Otto Cycle p-V diagram

Glenn
Research
Center

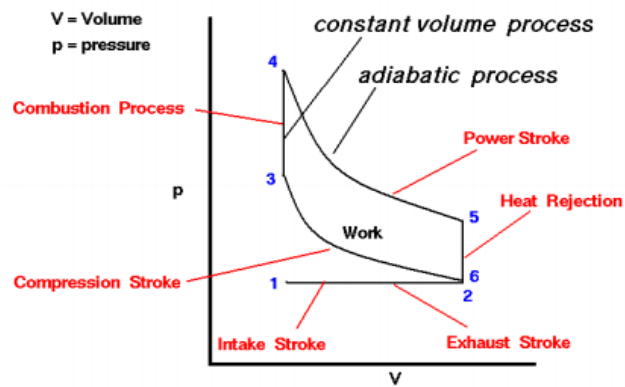


Figura 3 - Ciclo de Otto ideal [5]

Estes processos termodinâmicos aplicados a um motor mantêm-no em funcionamento, percorrendo os 4 tempos: admissão, compressão, combustão e escape.

Num primeiro tempo a válvula de admissão abre e a mistura de ar-combustível entra para dentro do cilindro devido à sucção provocada pelo movimento de descida do pistão (admissão) quando o pistão chega ao Ponto Morto Inferior (PMI) a válvula de admissão fecha e o pistão começa a subir comprimindo a mistura dentro do cilindro (compressão); o pistão chega ao seu Ponto Morto Superior (PMS) e a compressão está no seu máximo; a vela liberta uma faísca e a mistura explode empurrando o pistão até ao PMI (curso de potência). Abre-se a válvula de escape e os gases de escape ainda sobre pressão saem para o exterior. A limpeza do cilindro faz-se pelo pistão que com o seu movimento ascendente expulsa os gases para fora do cilindro. A válvula volta a fechar quando o pistão chega ao PMS e começa de novo o ciclo. Este processo está representado na imagem abaixo.

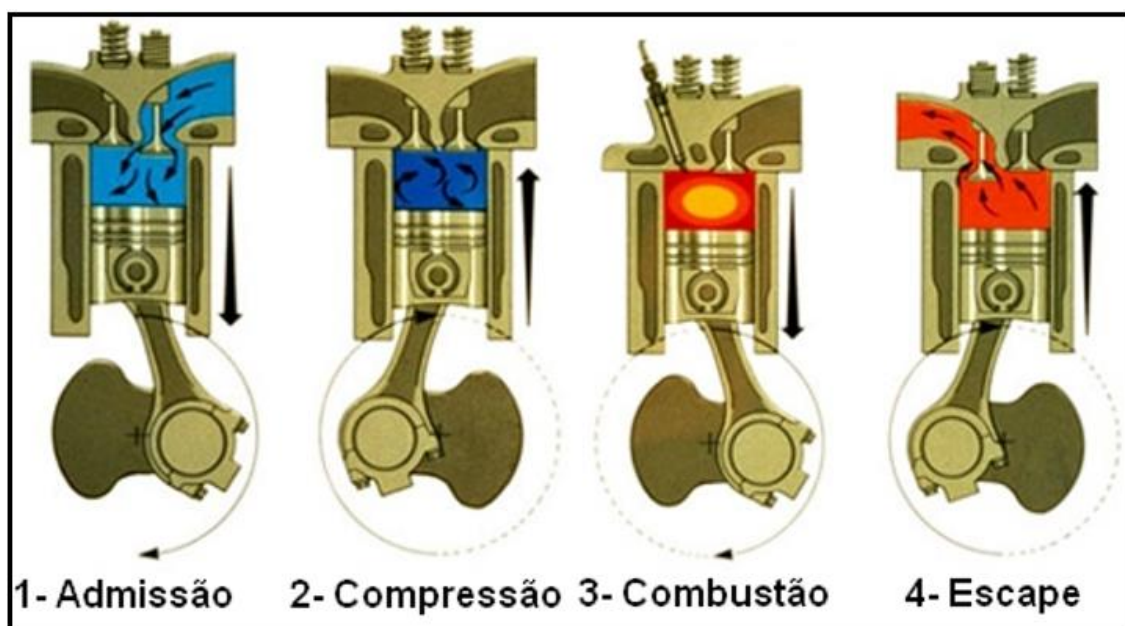


Figura 4 - Os 4 tempos de um motor de combustão [6]

É do conhecimento geral que os motores de combustão interna têm um rendimento muito baixo, pois existem muitas perdas. Uma delas é conhecida como perda por bombagem. As perdas por bombagem devem-se às perdas de carga na conduta de admissão, controladas pela borboleta de admissão.

De forma a entender as perdas de pressão na admissão é preciso saber como esta ocorre. Observável na Figura 5 a gasolina sai do depósito através da ajuda da bomba de gasolina (1), passando pelo filtro (2), até chegar ao injetor (4). A quantidade de gasolina a ser injetada em função da quantidade de ar que passa no coletor de admissão e que é controlada pela borboleta.

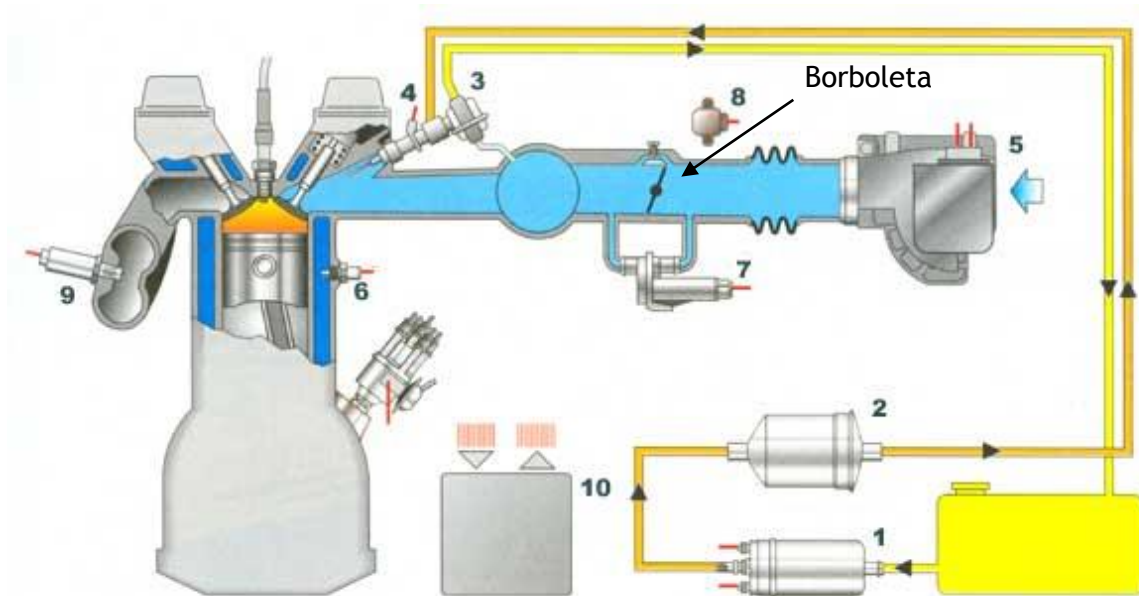


Figura 5- Sistema de admissão de um motor [7]



Figura 6- Borboleta de regulação de entrada de ar no motor

Quando a borboleta (Figura 6) de admissão de ar não se encontra totalmente aberta e o pistão desce ocorre um fenómeno de sucção que acaba por baixar a pressão dentro do cilindro. Na Figura 7 é representado o ciclo de Otto real, onde se pode observar as perdas por bombagem, ficando a pressão abaixo da pressão atmosférica.

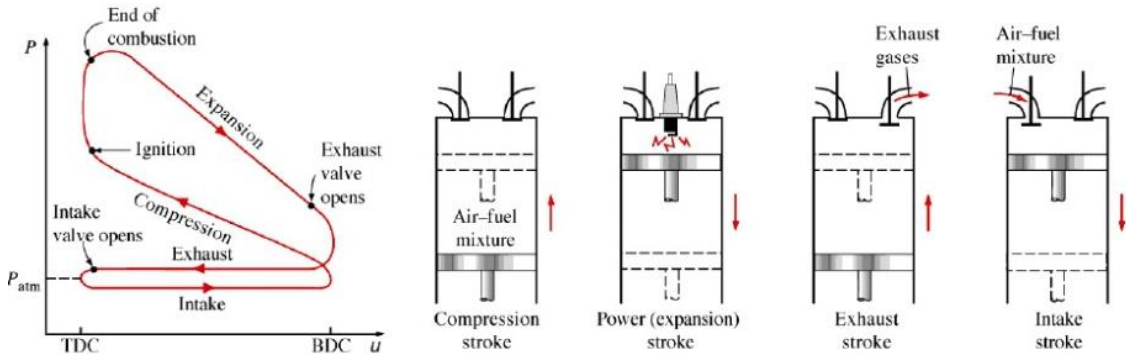


Figura 7-Ciclo de Otto real [7]

Ainda assim não é a única perda que existe num motor de combustão, a Figura 8 mostra o rendimento de um motor real.

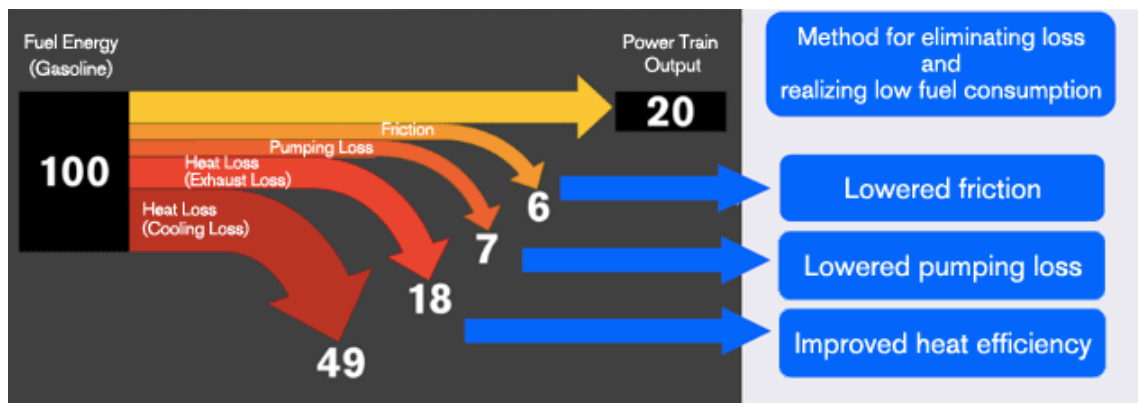


Figura 8 - Rendimento de um motor real [8]

Para minimizar este fraco rendimento vários estudos foram feitos ao longo dos anos: variação do tempo de abertura de válvulas, variação das taxas de compressão e até motores com geometrias diferentes das mais usadas (pistão-biela-cambota). Neste contexto insere-se o ciclo de Atkinson.

2.3. Ciclo de Atkinson

O motor de Atkinson foi patenteado nos EUA com o número 367496 a 2 de agosto de 1887 por James Atkinson, com o objetivo de aproveitar o ciclo de expansão, através do curso de expansão superior ao de admissão, de modo a que pressão dos gases de escape seja menor do que no ciclo de Otto.

Este motor de combustão construído de acordo com a Figura 9, provou que na prática é mais económico e fidedigno. [1]

Atkinson
James P. Root
George S. Riddle

Fig 5.

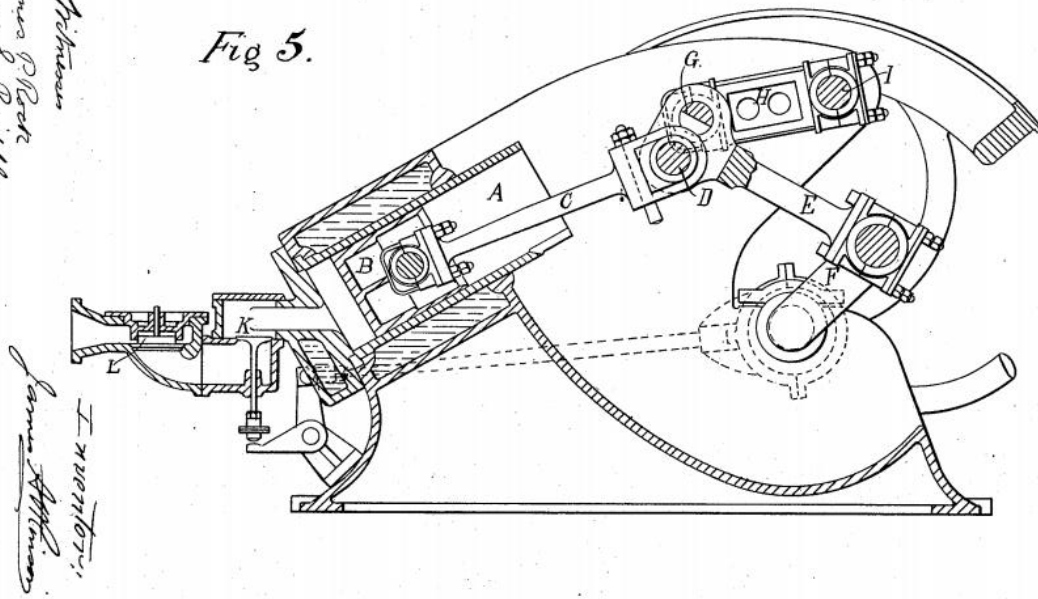


Figura 9-Motor de Atkinson [1]

O motor de ciclo de Atkinson tem uma potência mais baixa quando comparados com dispositivos similares a motores com ciclo de Otto, mas uma maior eficiência. Originalmente, os motores de Ciclo de Atkinson tinha um mecanismo que permitia que os quatro ciclos ocorressem numa rotação da cambota. [9]

Esta sequência de imagens mostra os quatro tempos de um motor ciclo de Atkinson, Admissão, Compressão, Combustão e Escape.

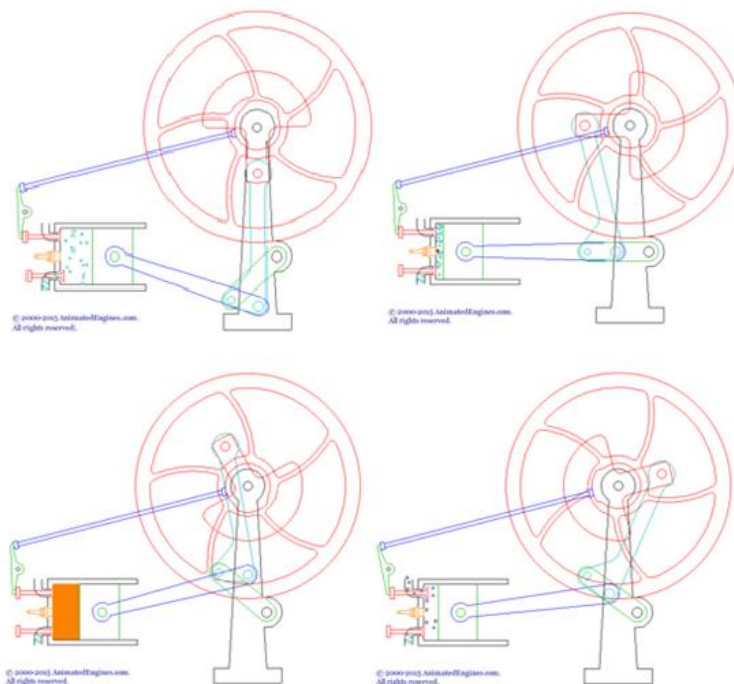


Figura 10 - Ciclo de Atkinson [7]

Num motor de Ciclo de Otto, isto é feito em duas rotações da cambota: admissão/compressão, seguido de potência/escape. No motor de Atkinson original, o inventor adicionou algumas ligações de modo a que todos os quatro tempos ocorressem ao fim de uma rotação da cambota, como se verifica na Figura 10. Isto por si só melhora a eficiência, mas chegou-se à conclusão que se o curso de admissão for reduzido e o curso de potência aumentado, o motor irá trabalhar de forma mais eficiente. Levaria menos combustível para manter o motor em funcionamento. No curso de admissão, o pistão não se move até ao fim do cilindro; assim a mistura que entra para dentro do cilindro é reduzida. No fim do curso ocorre a ignição e a força da explosão envia o pistão de volta para baixo fazendo um curso mais longo, aproveitando toda a sua extensão, pretendendo-se que no final da expansão a pressão dentro do cilindro seja mais próxima da pressão atmosférica. Em seguida, o pistão volta para cima empurrando os gases para o coletor escape. [10]

No motor de Atkinson acaba por ocorrer uma sobre-expansão, isto porque a sua geometria permite que o curso de expansão seja muito superior ao de admissão. Assim quando o pistão chega ao PMI a pressão dentro do cilindro é próxima da pressão atmosférica, minimizando as perdas e aumentando o rendimento, visto que com menos combustível poderá produzir o mesmo trabalho produzido por um motor de ciclo de Otto. Na Figura 11 pode-se observar o diagrama pressão-volume do ciclo de Atkinson, onde 1 representa o momento em que a válvula de admissão fecha. Isto é, a mistura neste ponto inicia o processo de compressão até ao ponto 2; no ponto 2 ocorre a explosão e a pressão aumenta significativamente até ao ponto 3 onde a explosão acaba e a pressão dos gases empurram o pistão para baixo, percorrendo agora um curso maior até ao ponto 5 onde a pressão se encontra relativamente perto da pressão atmosférica. Assim, neste momento em que a válvula de escape é aberta a pressão já está perto da pressão atmosférica, minimizando as perdas de escape (18% na Figura 8).

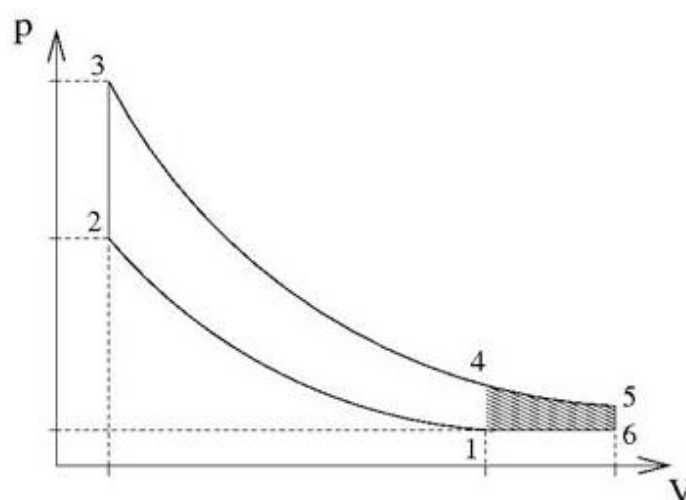


Figura 11-Diagrama P-V, Ciclo de Atkinson [7]

O ciclo de Atkinson produz mais trabalho quando comparado com um motor igual de ciclo de Otto, como podemos ver na Figura 12.

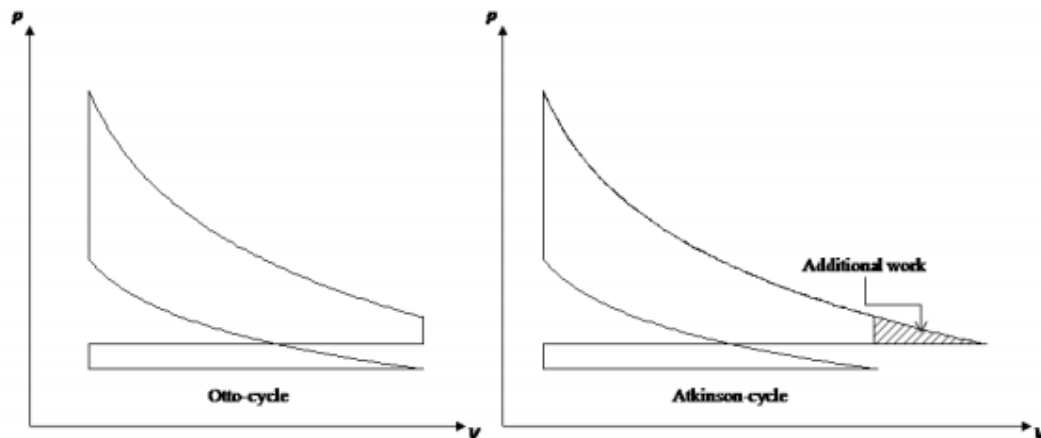


Figura 12-Ciclo de Otto vs. Ciclo de Atkinson [11]

Nesta dissertação todas as simulações são efetuados para casos ideais, os ciclos reais são bastante diferentes, mas o objetivo é apenas um estudo comparativo entre os dois ciclos. Consideramos que as conclusões são aplicáveis aos casos reais.

Para calcular as pressões dentro da câmara de combustão nos motores usa-se as seguintes fórmulas [12]:

Massa de gás no cilindro:

$$m_1 = \frac{P_1 * V_1}{R * T_1} \quad (1)$$

Massa de ar presa no cilindro:

$$m_{ta} = \frac{P_1 * V_{sv}}{R * T_1} \quad (2)$$

Densidade do ar a pressão atmosférica:

$$\rho_{at} = \frac{P_{at}}{R * T_1} \quad (3)$$

Taxa de admissão:

$$DR = \frac{m_{ta}}{\rho_{at} * V_{sv}} \quad (4)$$

Massa de combustível presa:

$$m_{tf} = \frac{m_{ta}}{AFR} \quad (5)$$

Calor transferido durante a explosão:

$$Q_2^3 = \eta * m_{tf} * C_{fl} \quad (6)$$

Pressão de compressão:

$$P_2 = P_1 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\gamma} \quad (7)$$

Temperatura na câmara de combustão durante a compressão:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} \quad (8)$$

Trabalho efetuado durante a compressão:

$$W_2^3 = -m_1 * C_v * (T_2 - T_1) \quad (9)$$

Temperatura no fim da explosão:

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_2^3}{m_1 * C_v} \quad (10)$$

Pressão na câmara de combustão depois da explosão:

$$P_3 = P_2 * \frac{T_3}{T_2} \quad (11)$$

Temperatura na câmara de combustão durante a expansão:

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{-\gamma} \quad (12)$$

Pressão na câmara de combustão durante a expansão:

$$P_4 = P_3 * \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{-\gamma} \quad (13)$$

Através das fórmulas acima, podemos retirar os Diagramas Pressão-Volume, onde [12]:

$$P_{atm} = 1,013 * 10^5 Pa$$

$$R = 287 \frac{J}{kg * K}$$

$$T_1 = 293,15 K$$

$$AFR = 15,06$$

$$C_{fl} = 43,5 MJ/kg$$

$$C_v = 718 \frac{J}{kg * K}$$

Este sistema de sobre-expansão foi reinventado mais recentemente pela *Honda*, em 2001, conhecido por *Honda Exlink*. Este motor funciona segundo o ciclo de Atkinson, mas ao contrário do motor anterior este precisa de duas rotações da cambota para completar o ciclo. [13]

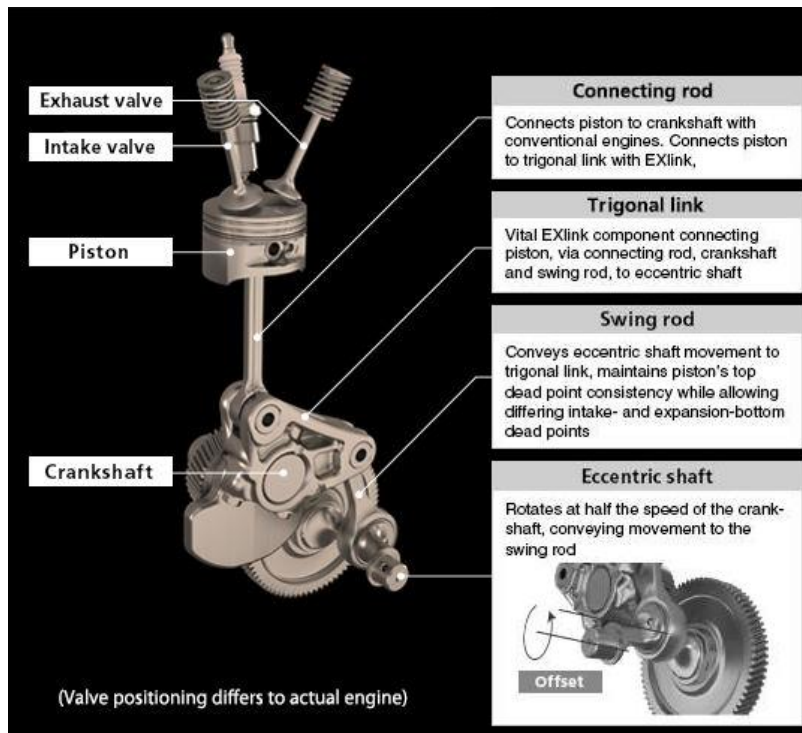


Figura 13- Honda Exlink, mecanismo [13]

Os estudos feitos pela *Honda* demonstram que a eficiência térmica do motor é bastante superior quando comparada com um motor convencional, como pode ser observado na Figura 14.

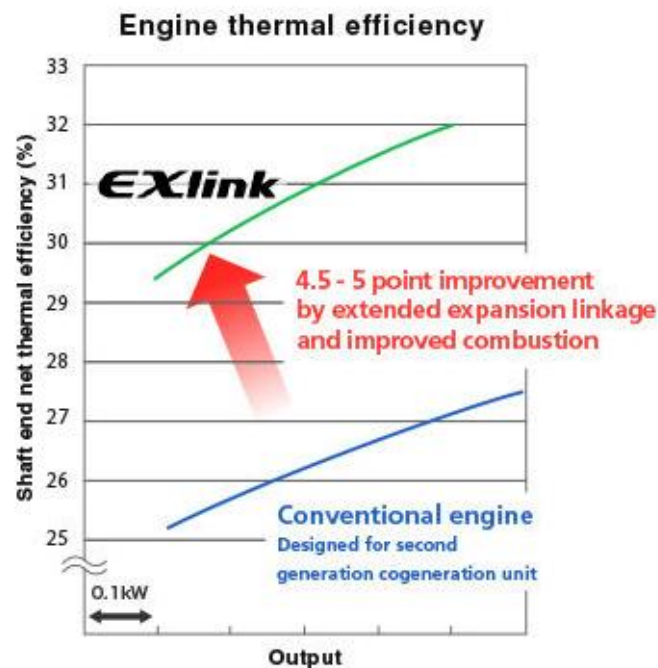


Figura 14- Eficiência térmica Motor Honda Exlink [13]

2.4. Sistemas de variação da capacidade

Com o intuito de reduzir os consumos as marcas de automóveis têm estudado sistemas para variar a capacidade dos motores. A desativação de cilindros foi a técnica usada por várias marcas como *Cadillac*, *Alfa Romeo*, *Mitsubishi*, *Mercedes-Benz*, *GM* e a *Honda*.

Este sistema simplesmente baseia-se em fechar a entrada de mistura de ar-combustível, não ocorrendo a explosão, isto implica que o pistão continua a mover-se sem produzir trabalho positivo, isto é, os cilindros que continuam ativos têm o seu trabalho dividido em trabalho útil e trabalho para fazer mover os pistões desativados. [13]

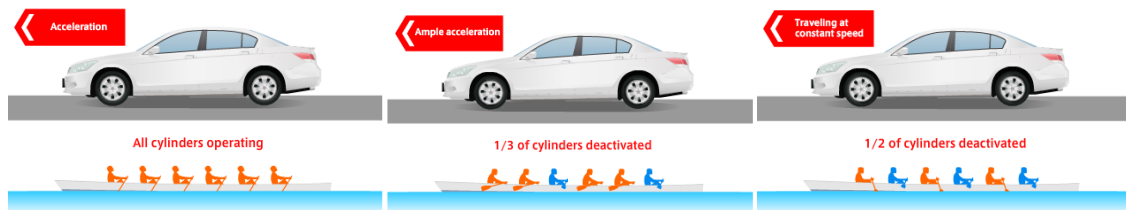


Figura 15- Funcionamento do motor de acordo com as condições de condução [13]

Mais recentemente a *Honda* patenteou um novo sistema de variação de capacidade. Neste caso num motor 2.0 litros de capacidade, em vez de ter 4 cilindros de 500cm^3 passa a ter 4 cilindros com 300, 400, 600, 700cm^3 respetivamente. Assim em vez de desativar cilindros de 500cm^3 , pode ser desativado apenas um de 300cm^3 , ou fazer outras combinações. Com esta solução em vez de 4 combinações possíveis, existirá 15 possíveis combinações. Este sistema apresenta como desvantagem uma geometria desequilibrada que poderá implicar vibrações no motor. [14]

2.5. Variação da taxa de compressão

A variação de taxa de compressão é uma tecnologia que existe para aumentar a eficiência de um motor para diferentes situações. Grandes cargas requerem menores taxas de compressão para manter constante a pressão máxima antes da explosão.

Existem vários sistemas de variação da taxa de compressão concebidos pelas marcas automóveis, como a *Peugeot*, *Saab* e a *Gomecsys*.

2.5.1. Peugeot MCE-5

Vianney Rabhi em 1997 ao olhar para uma porta de um elevador teve uma ideia que mais tarde se veio a tornar no MCE-5 VCRi. Ao perceber que a primeira metade da porta percorria o dobro do percurso segunda metade da porta em metade do tempo, através de um sistema de engrenagens e cremalheiras, inspirou-se para desenhar a primeira cremalheira ligada a um pistão, uma roda dentada ligada a uma haste e uma cremalheira de ancoragem que usou para variar a taxa de compressão.

2.5.3. *Gomecsys VCR Technology*

Gomecsys é uma empresa Holandesa de engenharia que desenvolveu um sistema de variação da taxa compressão. Nos últimos 5 anos a empresa tem vindo a implementar melhorias significativas. O sistema VCR completo é integrado na cambota e todos os motores de 4 tempos podem ser atualizados através da substituição da cambota normal pela cambota *Gomecsys VCR*. Este sistema é atuado por um pequeno motor elétrico, sistema idêntico para fazer variar a capacidade do motor proposto nesta dissertação. [17]



Figura 18-Gomecsys VCR [17]

3. Dimensionamento

3.1. Desenho

De forma a entender o sistema proposto foi desenhado um protótipo de um sistema de variação de capacidade.

Nas Figuras abaixo podemos observar o desenho inicial do motor, de onde foi baseado todo o sistema de variação de capacidade

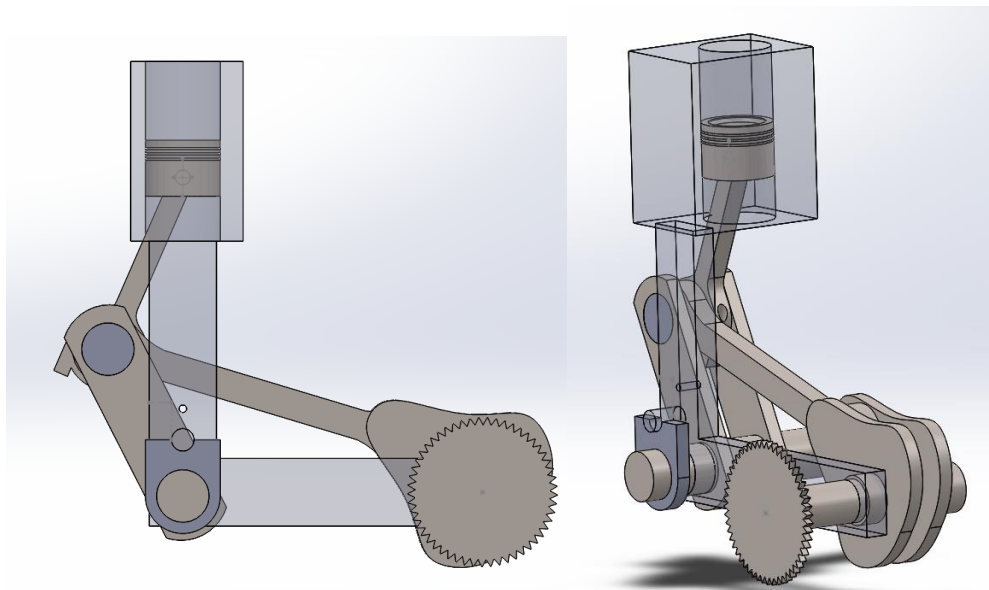


Figura 19-Protótipo inicial

Na Figura 20 está representado um desenho mais trabalhado, onde se pode ver uma ideia inicial do atuador para o sistema de variação.

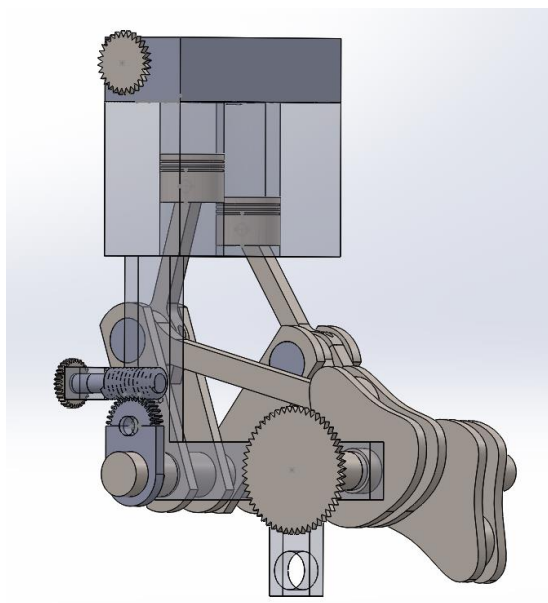


Figura 20- Desenho do motor de Atkinson

3.2. Cálculo do movimento dos mecanismos

As equações do movimento foram retiradas da resolução do polígono vetorial representativo do motor.

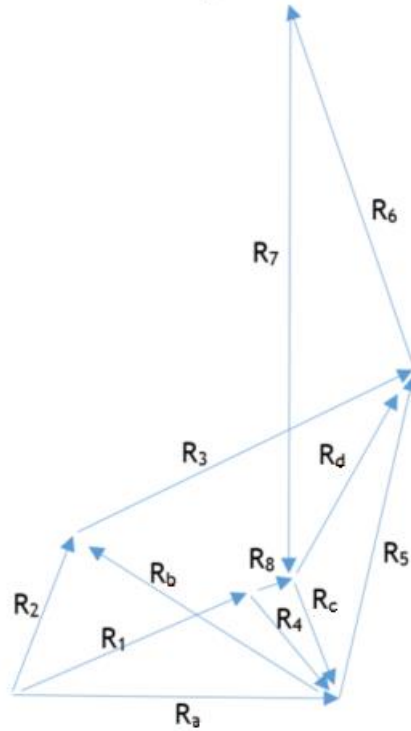


Figura 21-Desenho vetorial motor Atkinson com variação da capacidade

As equações vetoriais que definem o movimento do motor são:

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_4 = \vec{R}_a \quad (1)$$

$$\vec{R}_2 + \vec{R}_3 = \vec{R}_a + \vec{R}_5 \quad (2)$$

$$\vec{R}_2 - \vec{R}_a = \vec{R}_5 - \vec{R}_3 \quad (3)$$

$$\vec{R}_2 - \vec{R}_a = \vec{R}_b \quad (4)$$

$$\vec{R}_b = \vec{R}_5 - \vec{R}_3 \quad (5)$$

$$-\vec{R}_8 + \vec{R}_4 + \vec{R}_5 + \vec{R}_6 + \vec{R}_7 = 0 \quad (6)$$

$$-\vec{R}_8 + \vec{R}_4 = \vec{R}_c \quad (7)$$

$$\vec{R}_c + \vec{R}_5 = \vec{R}_d \quad (8)$$

$$\vec{R}_d + \vec{R}_6 + \vec{R}_7 = 0 \quad (9)$$

As equações foram simplificadas de forma a obter os valores de:

$$\theta_4 = \text{atan} \left(\frac{R_1 * \text{sen}(\theta_1) + R_4 * \text{sen}(\theta_4)}{R_1 * \text{cos}(\theta_1) + R_4 * \text{cos}(\theta_4)} \right) \quad (10)$$

$$R_a = \sqrt{R_1^2 + 2 * R_1 * R_4 * \text{cos}(\theta_4 - \theta_1) + R_4^2} \quad (11)$$

$$R_b = \sqrt{R_a^2 - 2 * R_a * R_2 * \text{cos}(\theta_2 - \theta_a) + R_2^2} \quad (12)$$

$$\theta_b = \text{acos} \left(\frac{R_2 * \text{cos}(\theta_2) - R_a * \text{cos}(\theta_a)}{R_b} \right) \quad (13)$$

$$\theta_3 = \theta_b - \text{acos} \left(\frac{R_5^2 - R_3^2 - R_b^2}{2 * R_b * R_3} \right) \quad (14)$$

$$\theta_5 = \text{acos} \left(\frac{R_b * \text{cos}(\theta_b) + R_3 * \text{cos}(\theta_3)}{R_5} \right) \quad (15)$$

$$R_c = \sqrt{R_4^2 + 2 * R_4 * R_a * \text{cos}(\theta_4 - \theta_a) + R_a^2} \quad (16)$$

$$\theta_c = \text{asen} \left(\frac{R_4 * \text{sen}(\theta_4) - R_a * \text{sen}(\theta_a)}{R_c} \right) \quad (17)$$

$$R_d = \sqrt{R_c^2 + 2 * R_c * R_5 * \text{cos}(\theta_c - \theta_5) + R_5^2} \quad (18)$$

$$\theta_d = \text{acos} \left(\frac{R_c * \text{cos}(\theta_c) + R_5 * \text{cos}(\theta_5)}{R_d} \right) \quad (19)$$

$$\theta_6 = - \left(\theta_7 + \text{asen} \left(\frac{-R_d * \text{sen}(\theta_d - \theta_7)}{R_6} \right) \right) \quad (20)$$

$$R_7 = \frac{-R_d * \text{sen}(\theta_d) - R_6 * \text{sen}(\theta_6)}{\text{sen}(\theta_7)} \quad (21)$$

As expressões anteriores servem para estudar o movimento de todos os mecanismos no interior do motor. Desta forma pode ser feito um estudo relativamente à influência do tamanho de cada peça, e para isso recorreu-se ao uso do *Matlab*.

3.3. Otimização geométrica

De forma a ser obtido um motor de pequenas dimensões e que funcione com o ciclo de Atkinson ideal, foi criado um programa no *Matlab* (em anexo) que calcula o movimento do pistão para cada variação de medida dos braços móveis do motor.

Os resultados que o programa apresenta são:

- Razão entre os comprimentos de expansão e admissão para as diferentes iterações.

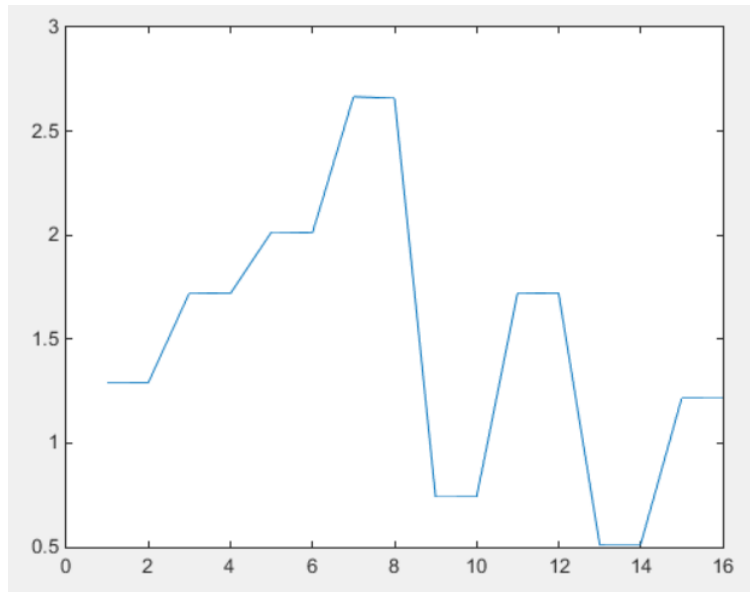


Figura 22-Razão entre os comprimentos de expansão e admissão

Na Figura 22 podemos observar a razão entre os comprimentos de expansão e admissão. Cada linha horizontal representa cada iteração.

- Ângulo da rotação da cambota para os tempos de admissão-compressão e expansão-escape

A Figura 23 representa o ângulo de rotação da cambota referente ao tempo de admissão-compressão (laranja) e expansão-escape (azul).

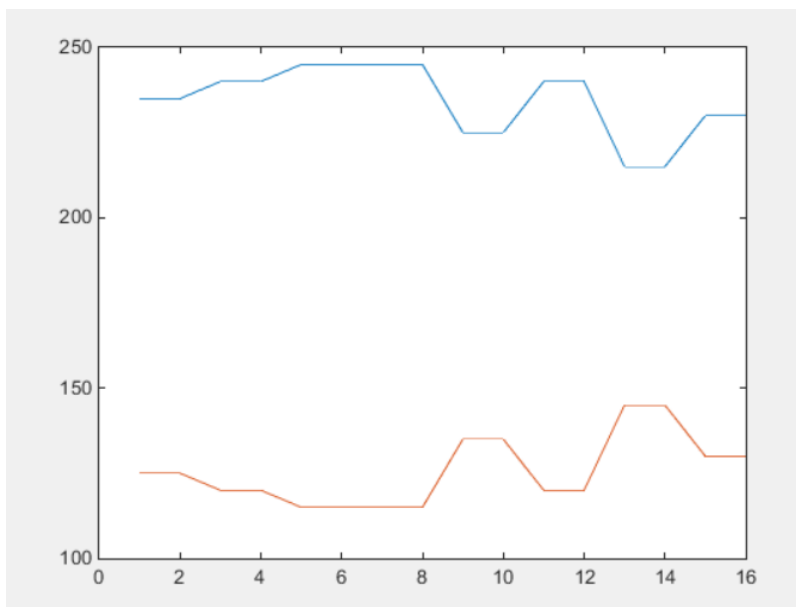


Figura 23-Angulo da rotação da cambota para os tempos de admissão-compressão e expansão-escape

- Movimento do pistão para as várias iterações

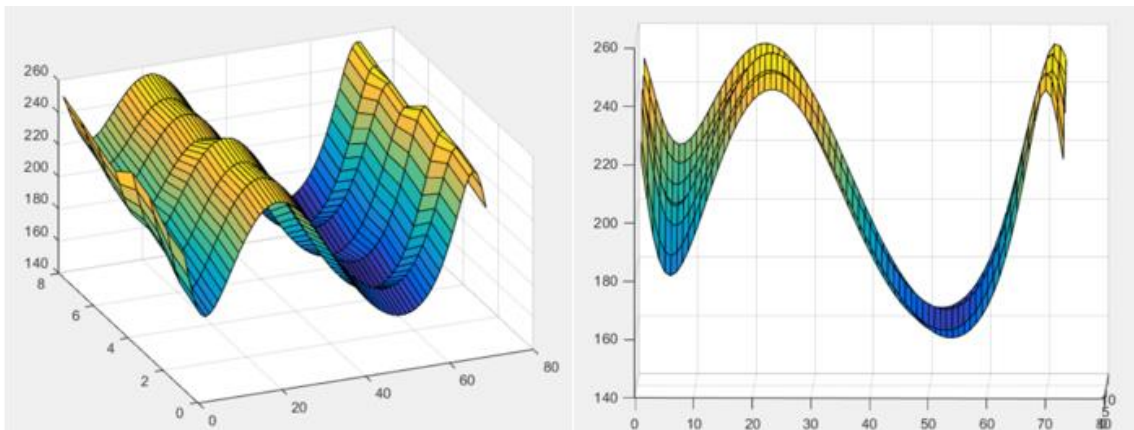


Figura 24-Movimento do pistão para as várias iterações

Na Figura 24 podemos observar o movimento do pistão para diferentes medidas do motor, onde é visível a diferença entre o curso de admissão e o de expansão.

Além dos gráficos, o programa de *Matlab* devolve os valores do percurso do pistão para que a análise possa ser mais precisa.

Deste programa é possível tirar as medidas necessárias de todas as componentes do motor.

Assim sendo temos:

Tabela 1-Dimensão dos vetores do mecanismo (em mm)

Vetor	Medida (mm)
R₁	121,7
R₂	70
R₃	155
R₄	40
R₅	135
R₆	160
R₈	0

Com estas medidas foi desenhado o motor com mais precisão. Podemos ver o desenho final do motor na Figura 25.

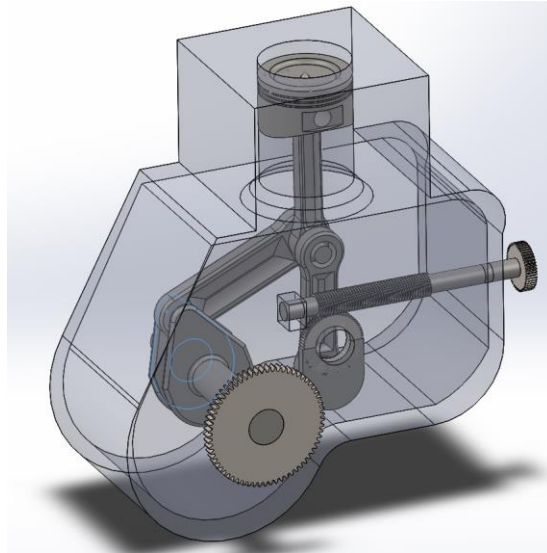


Figura 25-Desenho final do motor Atkinson

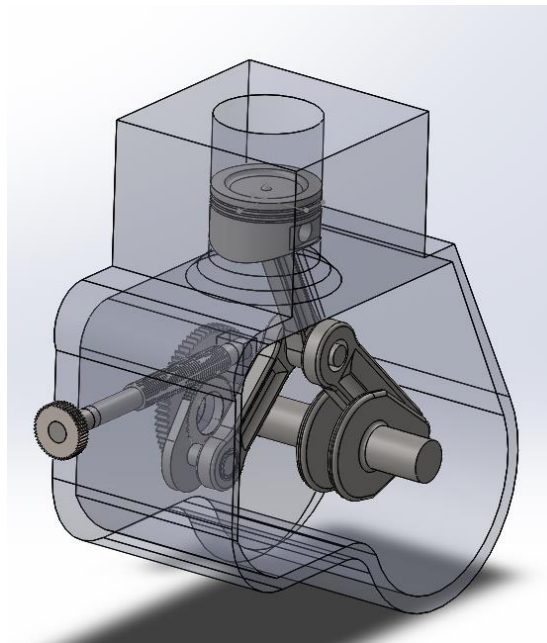


Figura 26-Desenho final do motor de Atkinson

Entre a Figura 25 e Figura 26 podemos ver o sistema de variação de capacidade a funcionar. A peça ligada ao parafuso sem fim roda fazendo com que o pistão suba o PMI da admissão, reduzindo assim a capacidade do motor.

Na Figura 27 vemos a diferença dos PMI e PMS da admissão, onde se pode ver que a variação do PMI é maior que o PMS da admissão quando existe variação de capacidade. O ideal seria o PMS adaptar-se de modo a que a taxa de compressão se mantenha.

Nota: No seguinte site pode ser visto um vídeo do funcionamento do motor <https://www.youtube.com/watch?v=WjDgC3G1Nf4&feature>

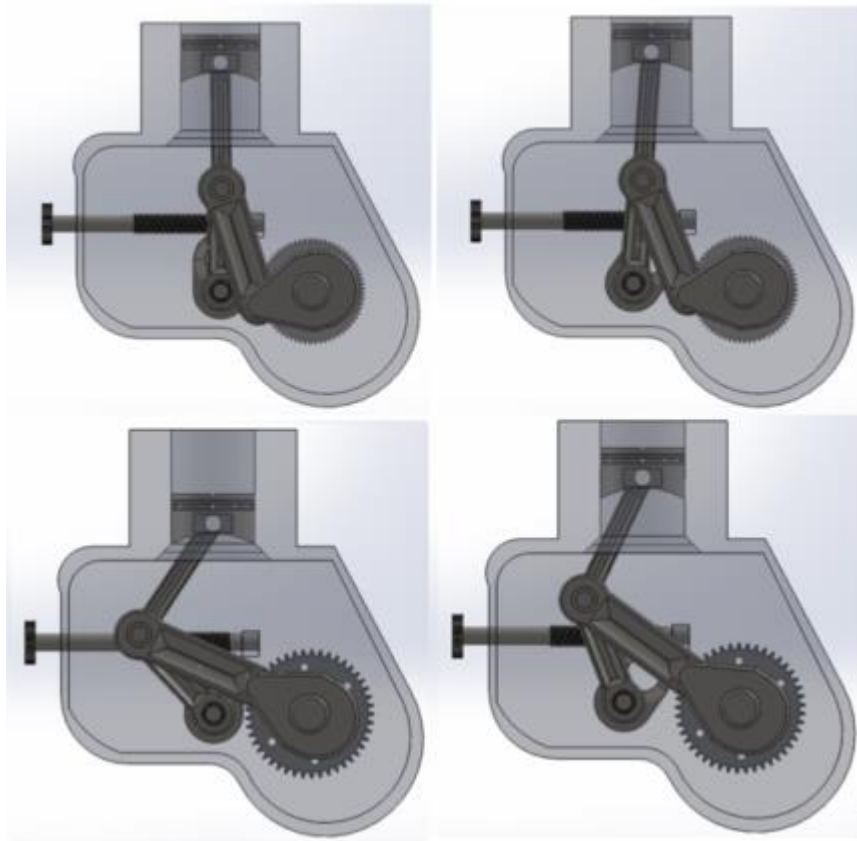


Figura 27-Comparação dos PMI e PMS quando se varia a capacidade

Com os valores dos mecanismos obtidos, foi executado numa folha Excel o cálculo do movimento de todos os mecanismos em função da posição da cambota (θ_2).

Os valores calculados encontram-se em anexo. Aqui são representados os valores da inclinação dos vetores num gráfico em relação à posição da cambota.

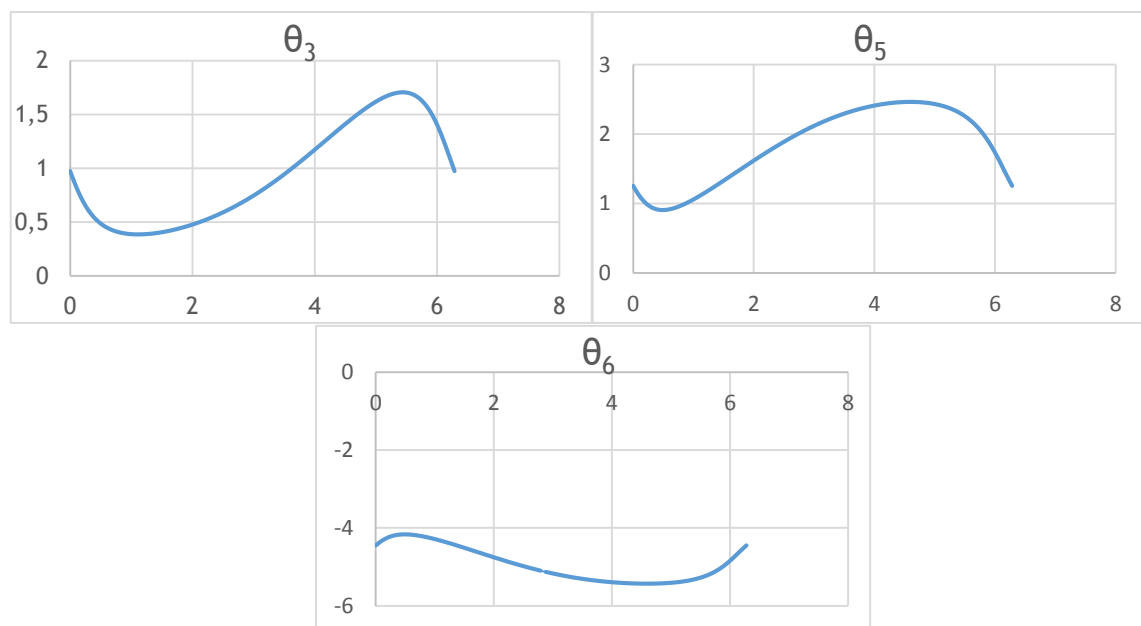


Figura 28-Variação do θ_3 , θ_5 e θ_6 em relação à posição da cambota (rad).

Na Figura 28 podemos observar o comportamento das barras 3, 5 e 6 do mecanismo. É também visível que R3, R5 e R6 têm uma oscilação de 90° aproximadamente.

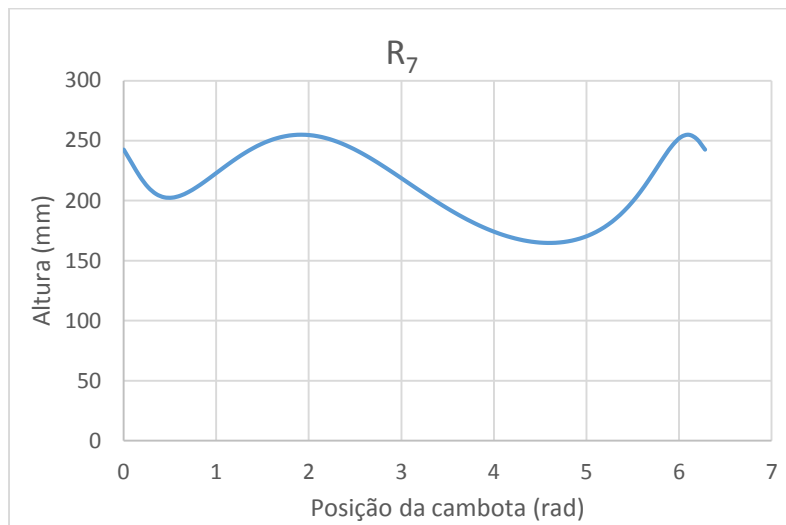


Figura 29- Movimento do pistão em relação a cambota

Na Figura 29 observa-se o movimento do pistão. É visível que em pouco mais de 100° da rotação da cambota, o pistão faz o curso de admissão-compressão e no resto é feito o curso de expansão-escape. É também visível que o curso de expansão é maior do que o curso de admissão o que corresponde ao ciclo de Atkinson.

3.4. Cálculo do Binário

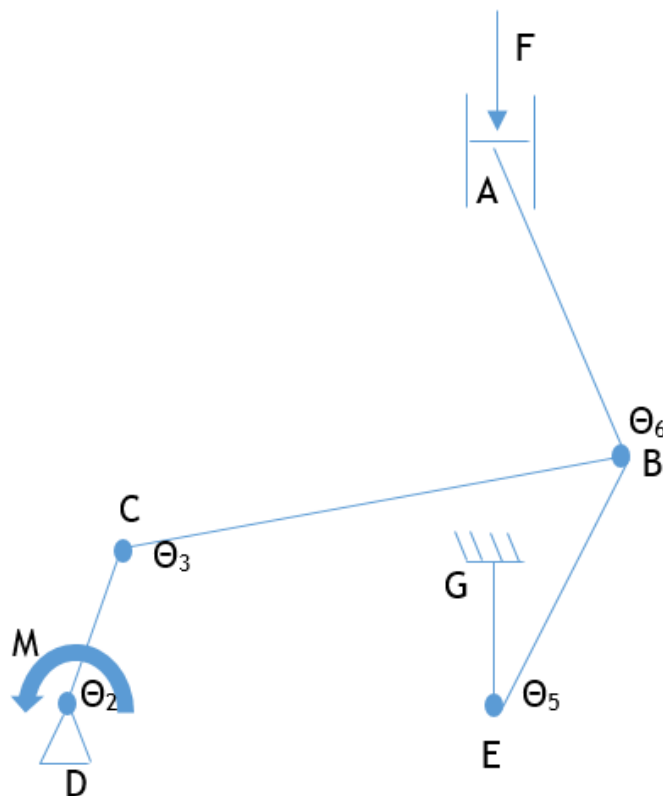


Figura 30- Diagrama de forças no motor de Atkinson

São calculadas as forças aplicadas em cada barra, e o binário aplicado na cambota. Assim os esforços nas barras são dados pelas seguintes expressões:

$$F_{BC} = -\frac{F_{BE} * \cos(\theta_5)}{\cos(\theta_3)} - \frac{F}{\tan(\theta_6) * \cos(\theta_3)} \quad (22)$$

$$F_{BE} = \frac{F * \left(1 + \frac{\tan(\theta_3)}{\tan(\theta_6)}\right)}{\text{sen}(\theta_5) - \cos(\theta_5) * \tan(\theta_3)} \quad (23)$$

$$D_x = F_{BC} * \cos(\theta_3) \quad (24)$$

$$D_y = F_{BC} * \text{sen}(\theta_3) \quad (25)$$

$$M = D_y * \overline{DC} * \text{sen}(\theta_2) - D_x * \overline{DC} * \cos(\theta_2) \quad (26)$$

$$F_{DC} = -\frac{F_{BE} * \cos(\theta_5) - F_{AB} * \text{sen}(\theta_6)}{\cos(\theta_2)} \quad (27)$$

$$F_{AB} = \frac{F_{BE} * (\cos(\theta_5) * \tan(\theta_2) - \text{sen}(\theta_5))}{\cos(\theta_6) + \text{sen}(\theta_6) * \tan(\theta_2)} \quad (28)$$

$$F_{EG} = \frac{F_{BC} * \text{sen}(\theta_3) + F_{AB} * \text{sen}(\theta_6)}{\cos(\theta_4)} \quad (29)$$

Através do diagrama P-V conseguimos obter a Força aplicada no pistão consoante a posição da cambota.

$$P = \frac{F}{A} \quad (30)$$

Onde:

P-Pressão;

F-Força;

A-Área;

Através da equação 30 calculamos a força aplicada, no curso de admissão e escape. A força exercida durante a admissão e escape foi considerada irrelevante; a força aplicada durante o curso de compressão e expansão vem representada na Tabela 2.

Tabela 2- Força aplicada no pistão consoante a rotação da cambota

Posição (°)	Força (N)
0	0
5	0
10	0
15	0
20	0
25	0
30	0
35	866,8
40	949,4
45	1046,5
50	1161,9
55	1301,0
60	1471,4
65	1683,9
70	1955,0
75	2310,6
80	2793,7
85	3480,0
90	4516,3
95	6223,1
100	9438,0
105	17120,2
110	104687,2
115	68659,6
120	45598,9
125	33234,3
130	25680,7
135	20657,5
140	17111,5
145	14494,6
150	12496,0
155	10927,4
160	9668,5
165	8639,2
170	7784,5
175	7065,2
180	6452,7
185	5926,0
190	5468,9
195	5069,0
200	4716,8
205	4404,6
210	4126,2
215	3876,6
220	3651,9
225	3448,6
230	3263,9
235	3095,6
240	2941,7
245	2800,4
250	2670,3
255	2550,3
260	2439,2
265	2336,2
270	2240,4
275	0
280	0
285	0
290	0
295	0
300	0
305	0
310	0
315	0
320	0
325	0
330	0
335	0
340	0
345	0
350	0
355	0
360	0

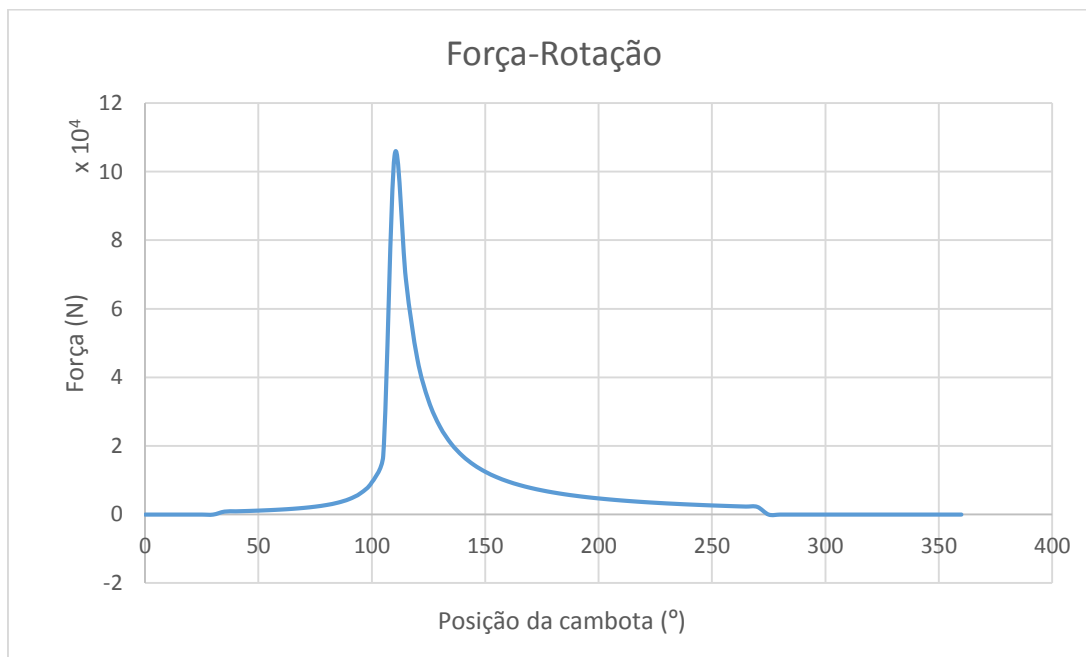


Figura 31 - Representação gráfica da força aplicado durante a rotação da cambota

Com a força exercida em função da posição da cambota é calculado o respectivo binário usando a equação 26 representado na Figura 32.

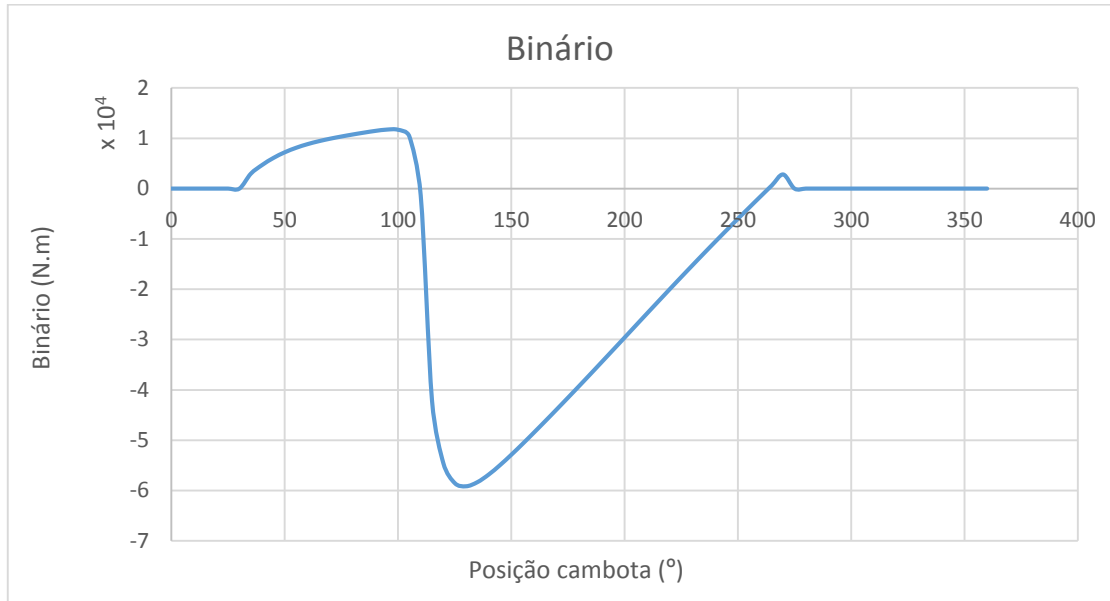


Figura 32- Binário do motor segundo a posição da cambota

3.5. Velocidade Angular

Executou-se uma análise da velocidade angular do mecanismo, para uma rotação da cambota de 1500 rpm (157,1 rad/s). As expressões seguintes representam as velocidades de cada barra do mecanismo.

$$\dot{R}_b = -\omega_2 * R_2 * \text{sen}(\theta_2 - \theta_b) \quad (31)$$

$$\omega_b = \frac{\omega_2 * R_2 * \text{cos}(\theta_2 - \theta_b)}{R_b} \quad (32)$$

$$\omega_3 = -\frac{\omega_2 * R_2 * \text{sen}(\theta_2 - \theta_5)}{R_3 * \text{sen}(\theta_3 - \theta_5)} \quad (33)$$

$$\omega_5 = \frac{\omega_2 * R_2 * \text{sen}(\theta_2 - \theta_3)}{R_5 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_3)} \quad (34)$$

$$\omega_6 = -\frac{\omega_5 * R_5 * \text{cos}(\theta_5 - \theta_7)}{R_6 * \text{cos}(\theta_6 - \theta_7)} \quad (35)$$

$$\dot{R}_7 = \omega_5 * R_5 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_7) + \omega_6 * R_6 * \text{sen}(\theta_6 - \theta_7) \quad (36)$$

As Figuras 33, 34 e 35 representam a velocidade angular das barras R₃, R₅ e R₆ respetivamente.

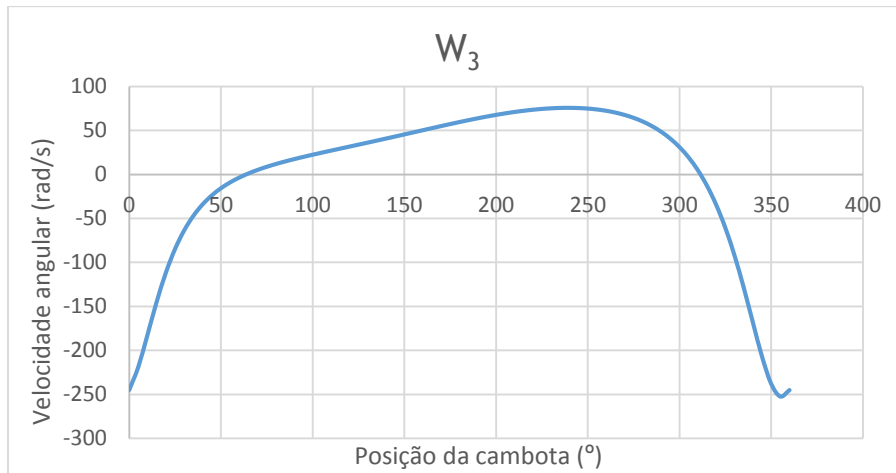


Figura 33- Velocidade angular de R_3

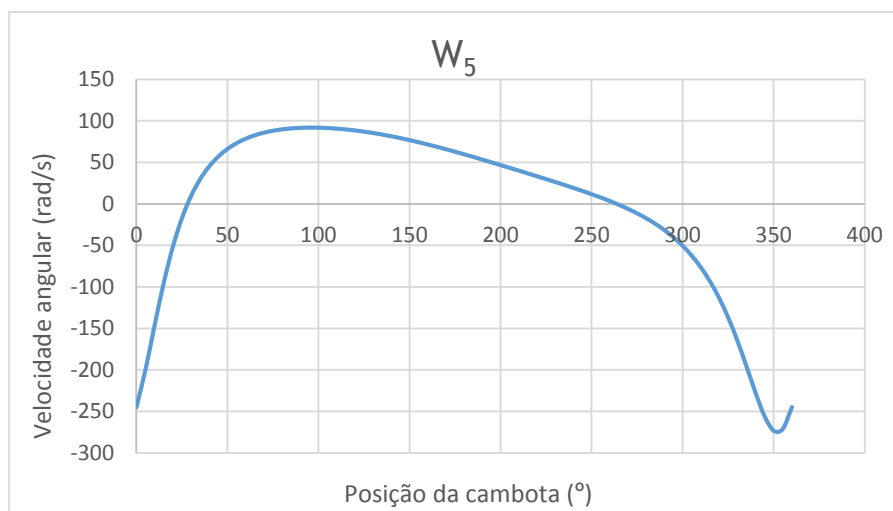


Figura 34-Velocidade angular de R_5

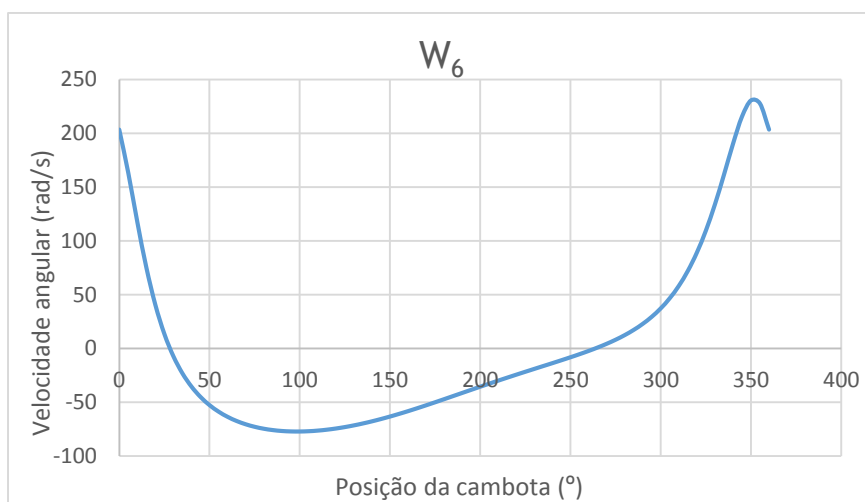


Figura 35-Velocidade angular de R_6

A Figura 36 representa a velocidade linear de R_7 .

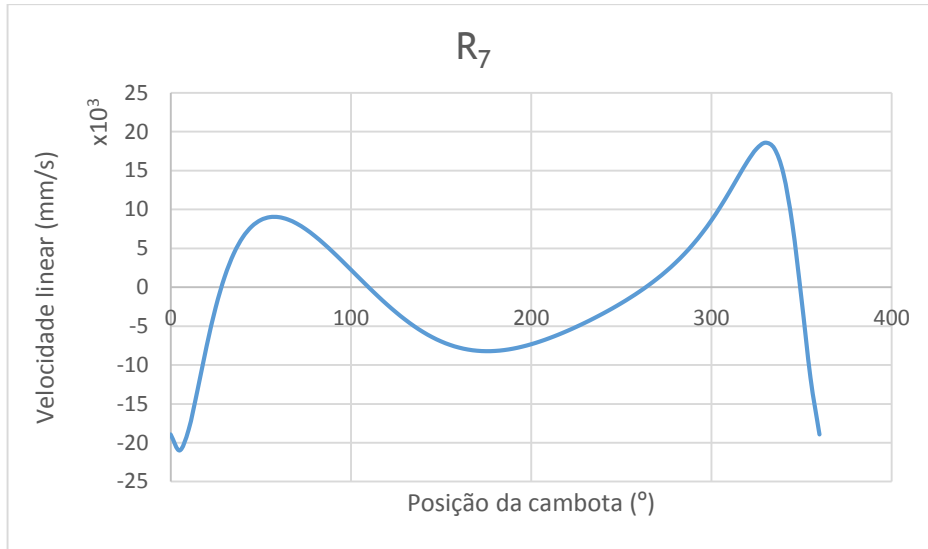


Figura 36- Velocidade linear de R₇

3.6. Aceleração Angular

As fórmulas seguintes representam a aceleração angular, para uma aceleração da cambota de 0 rad/s²:

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_2 * R_2 * \cos(\theta_2 - \theta_5) + \omega_2^2 * R_2 * \text{sen}(\theta_2 - \theta_5) - \omega_5^2 * R_3 * \text{sen}(\theta_3 - \theta_5)}{R_3 * \cos(\theta_3 - \theta_5)} \quad (37)$$

$$\alpha_5 = \frac{(\alpha_2 * R_2 * \cos(\theta_2 - \theta_3) + \omega_2^2 * R_2 * \text{sen}(\theta_2 - \theta_3) - \omega_5^2 * R_5 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_3))}{R_5 * \cos(\theta_5 - \theta_3)} \quad (38)$$

$$\alpha_6 = \frac{-\alpha_5 * R_5 * \cos(\theta_5 - \theta_7) - \omega_5^2 * R_5 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_7) - \omega_6^2 * R_6 * \text{sen}(\theta_6 - \theta_7)}{R_6 * \cos(\theta_6 - \theta_7)} \quad (39)$$

$$\ddot{R}_7 = -\alpha_5 * R_5 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_7) + \omega_5^2 * R_5 * \cos(\theta_5 - \theta_7) - \alpha_6 * R_6 * \text{sen}(\theta_5 - \theta_7) + \omega_6^2 * R_6 * \cos(\theta_5 - \theta_7) \quad (40)$$

As Figuras 37, 38 e 39 representam a aceleração angular dos mecanismos R₃, R₅ e R₆ respetivamente.

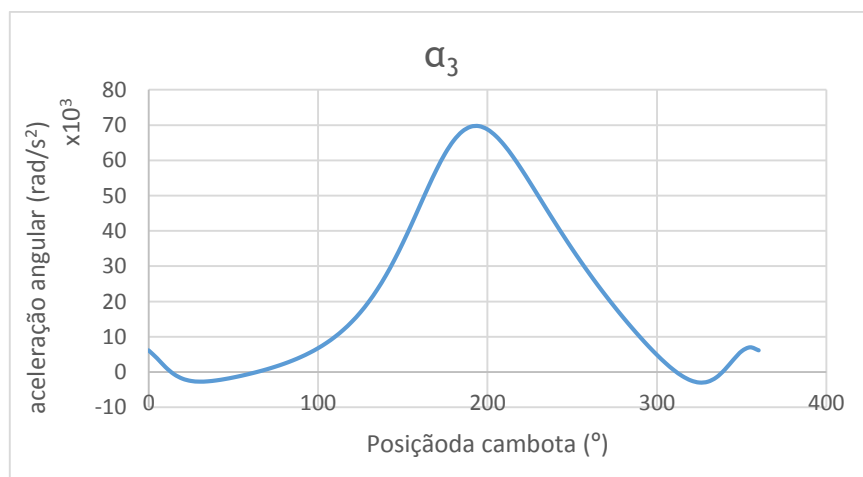


Figura 37- Aceleração angular de R3 em função da posição da cambota

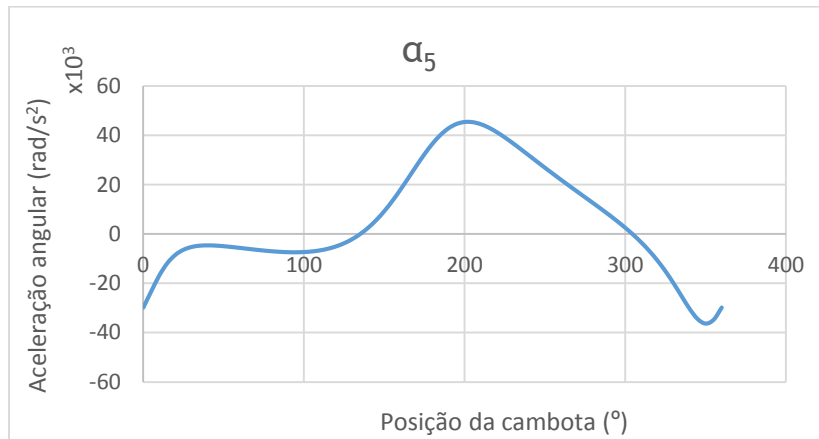


Figura 38- Aceleração angular de R5 em função da posição da cambota

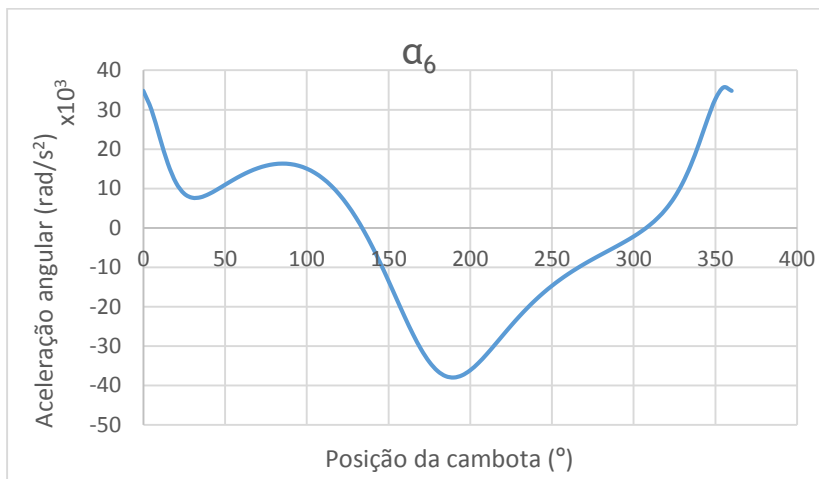


Figura 39- Aceleração angular de R6 em função da posição da cambota

A Figura 40 representa a aceleração linear de R7.

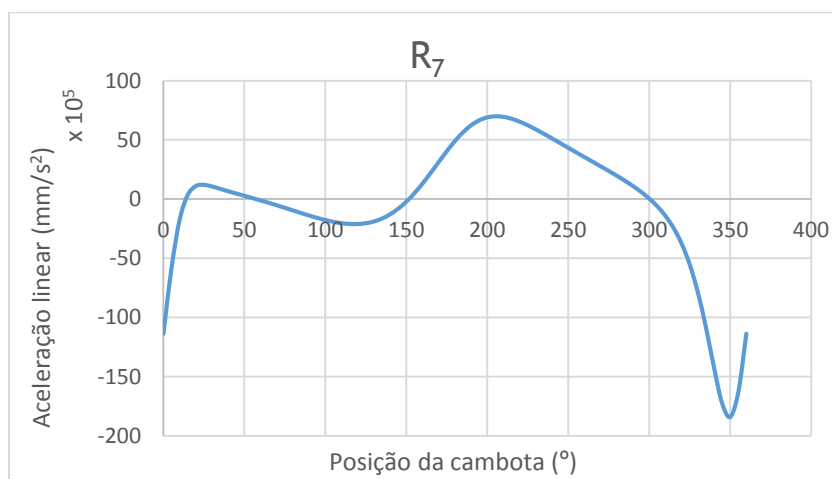


Figura 40- Aceleração de R7 em função da Posição da cambota

4. Motor de Atkinson com variação de capacidade

Foi feito um estudo teórico do ciclo do motor de Atkinson com variação de capacidade, para calcular o trabalho e o seu rendimento em função da variação da capacidade.

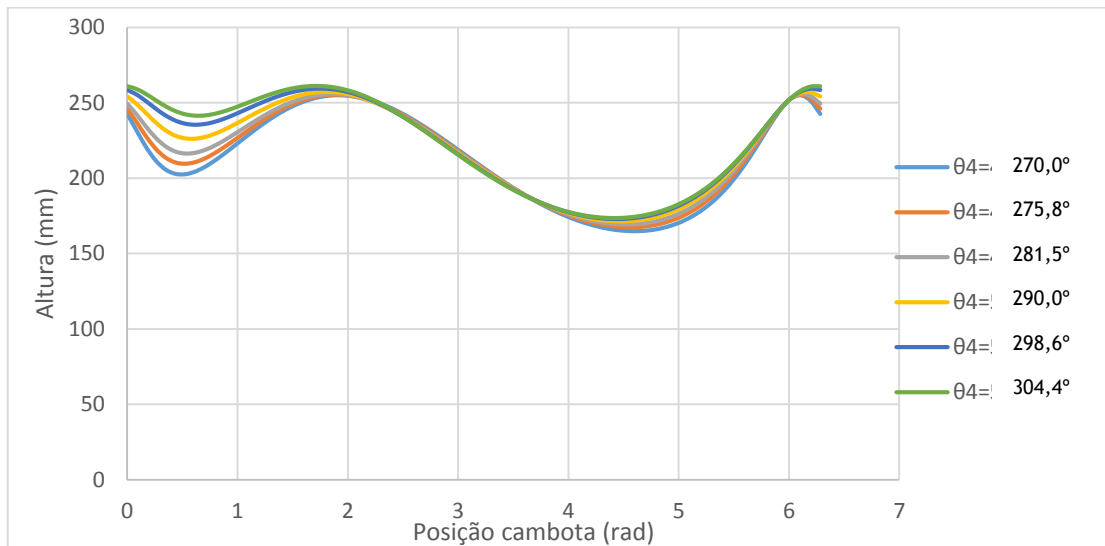


Figura 41- Movimento do pistão para cada variação da capacidade

Na Figura 41 está representado o movimento do pistão para 6 capacidades diferentes, onde se pode verificar uma vez mais que o PMI da expansão não tem uma variação significativa, já o PMI da admissão tem uma variação de quase 50mm, ao passar o θ_4 de 304,4° para 270° a capacidade aumenta cerca de 3 vezes.

Em seguida está representado o diagrama P-V para cada variação da capacidade.

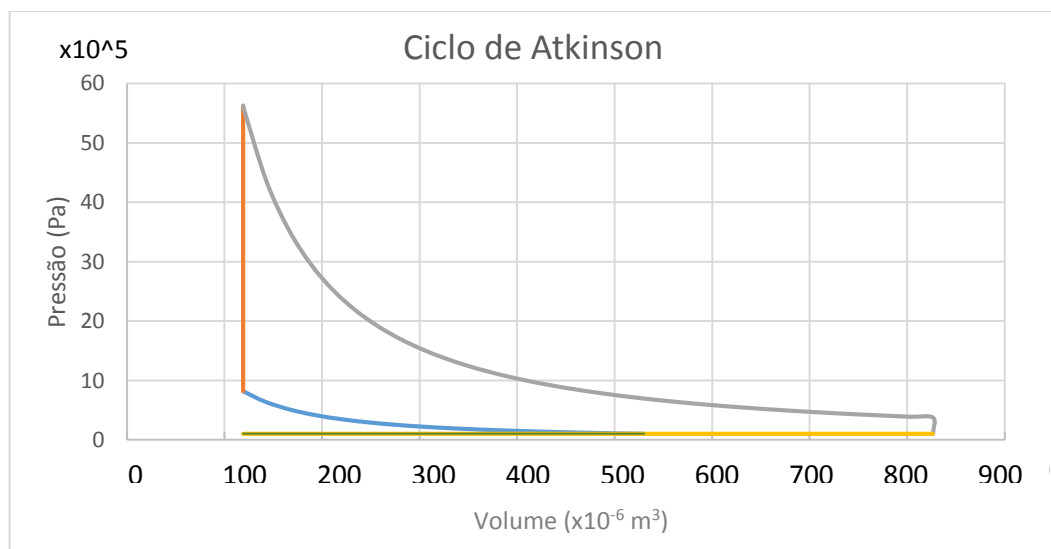


Figura 42- Diagrama P-V, para $\theta_4=4,71\text{rad}$ (270,0°)

Na Figura 42 podemos ver que o digrama P-V para o caso onde a capacidade é maior, a pressão de compressão atinge os $8,2 \times 10^5$ Pa, neste caso esta pressão é a mais alta, quando ocorre a explosão a pressão aumenta perto de 7 vezes. Depois da expansão a pressão que se encontra na câmara é de $3,7 \times 10^5$ Pa, quase 4 vezes mais que a pressão atmosférica, o que representa ainda algumas perdas por escape. Para este caso o consumo específico é de 146,2 g/kWh.

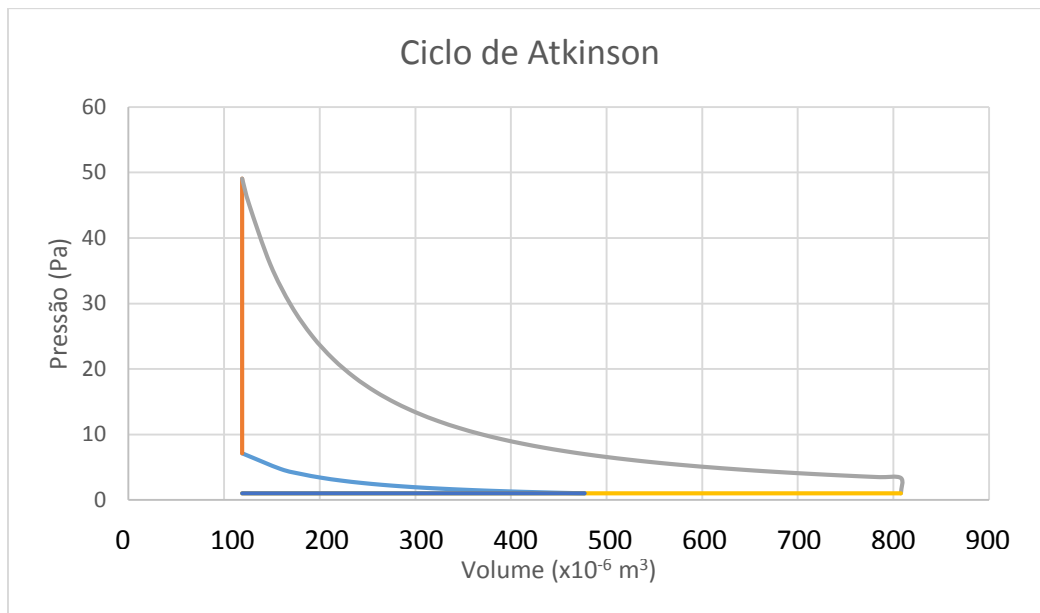


Figura 43-Diagrama P-v, para $\Theta_4=4,81\text{rad}$ ($275,8^\circ$)

Na Figura 43 observa-se que as pressões começam a baixar, a pressão de compressão atinge os $7,1 \times 10^5$ Pa, cerca de uma atmosfera mais baixa relativamente ao caso anterior, já a pressão no final da expansão é de $3,3 \times 10^5$ Pa, um pouco mais baixa, mas ainda com algumas perdas. Para este caso o consumo específico é de 146,5 g/kWh.

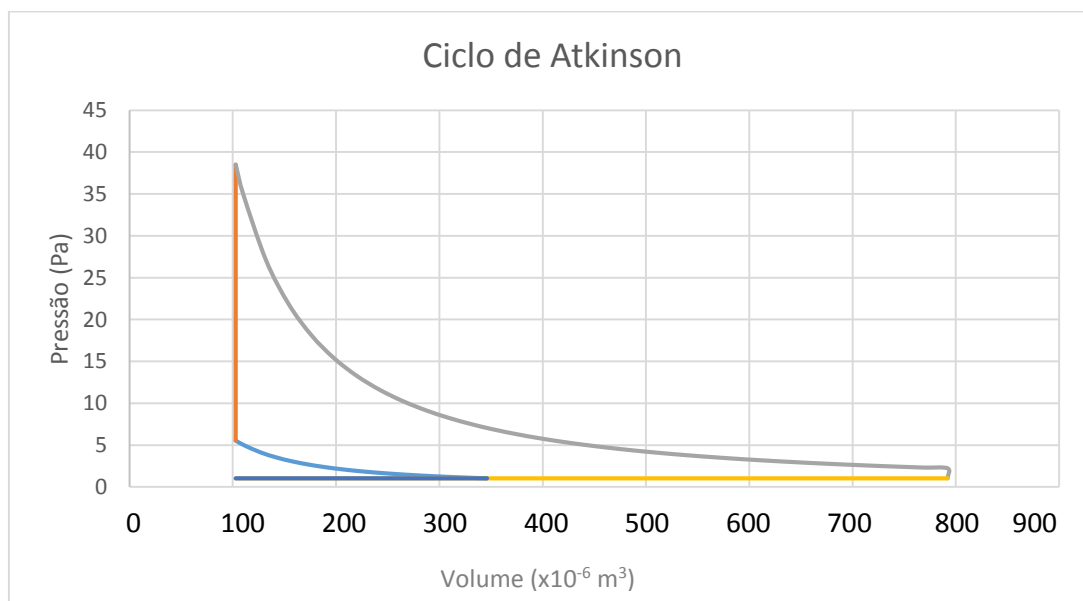


Figura 44-Diagrama P-v, para $\Theta_4= 4,91\text{rad}$ ($281,5^\circ$)

Na Figura 44 observa-se que a pressão continua a baixar, neste caso a pressão de compressão é de $6,5 \times 10^5$ Pa, neste ponto a pressão continua a baixar cerca de 1 atmosfera, a pressão de escape é de $2,9 \times 10^5$ Pa, mais baixa do que no caso anterior. Para este caso o consumo específico é de 144,6 g/kWh.

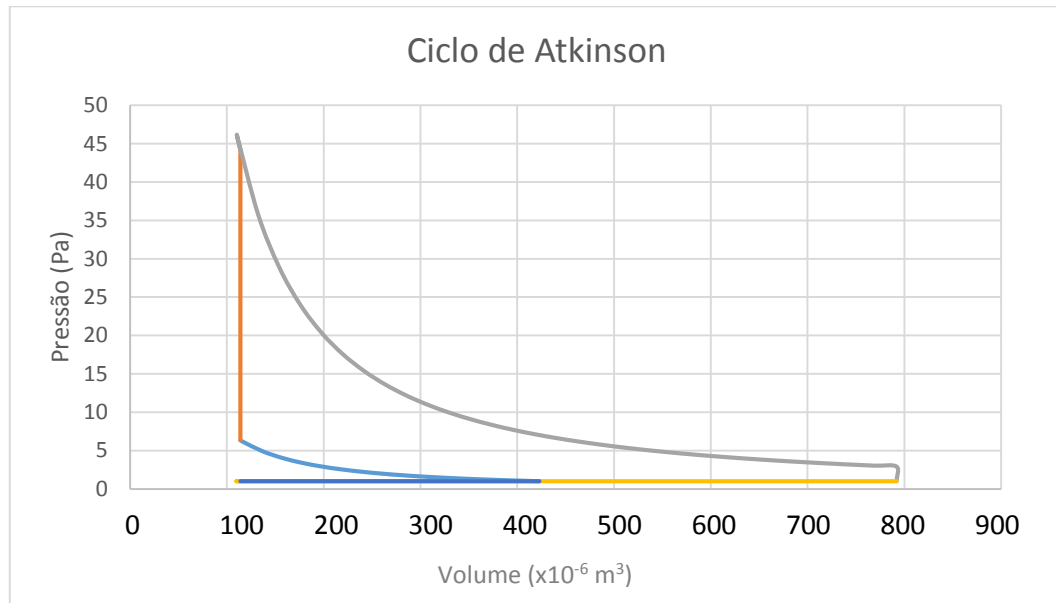


Figura 45-Diagrama P-v, para $\theta_4 = 5,06 \text{ rad}$ ($290,0^\circ$)

A Figura 45 demonstra que a pressão continua a baixar, sendo a pressão de compressão de $5,6 \times 10^5$ Pa, cerca de 5 vezes a pressão atmosférica, quando ocorre a explosão a pressão aumenta cerca de 7 vezes, a pressão de escape é de $2,2 \times 10^5$ Pa, cerca de atmosferas. Para este caso o consumo específico é de 138,0 g/kWh.

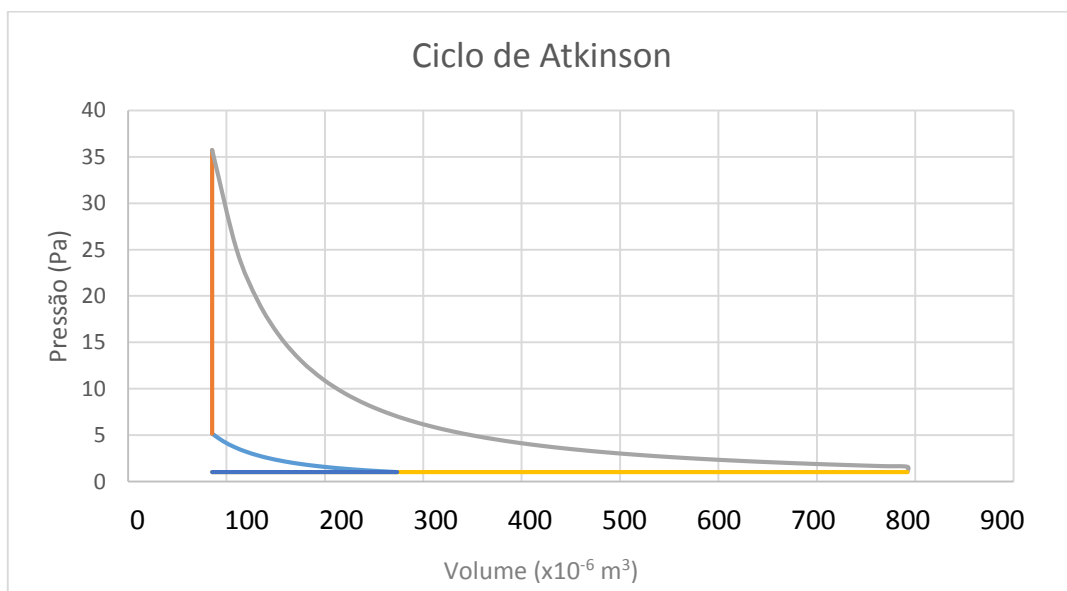


Figura 46-Diagrama P-v, para $\theta_4 = 5,21$ ($298,6^\circ$)

Na Figura 46 observa-se que as perdas por escape já são reduzidas, tendo uma pressão de $1,6 \times 10^5$ Pa, pouco mais do que 1 atmosfera. Para este caso o consumo específico é de 129,1 g/kWh.

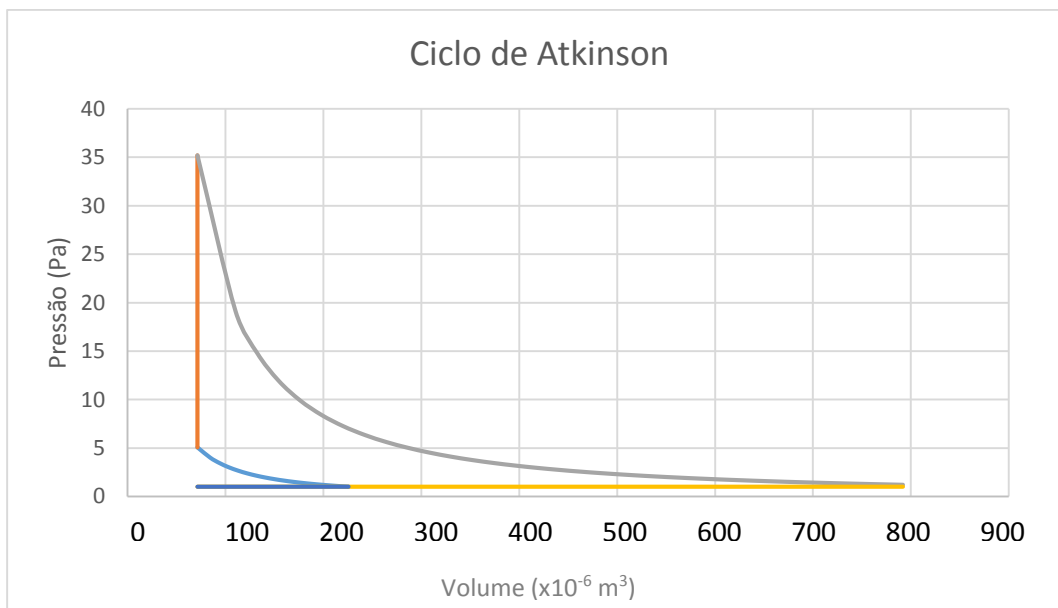


Figura 47-Diagrama P-v, para $\Theta_4=5,31\text{rad}$ ($304,4^\circ$)

A Figura 47 apresenta o caso da capacidade mínima, apesar de a pressão de compressão e a de explosão não serem elevadas, $5,1 \times 10^5$ Pa e $3,5 \times 10^5$ Pa respetivamente, o consumo específico é de 121,0 g/kWh, e as perdas por escape são irrelevantes visto que a pressão de escape é quase a pressão atmosférica, $1,2 \times 10^5$ Pa.

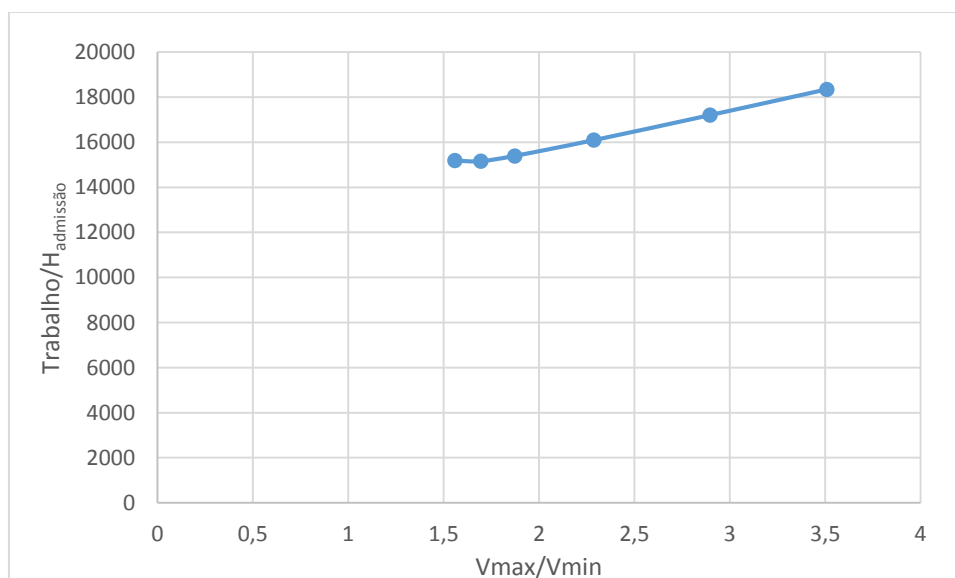


Figura 48- Variação do $\frac{\text{Trabalho}}{H_{admissão}}$ consoante a variação do Θ_4

5. Otto vs. Atkinson com variação de capacidade

De modo a obter uma comparação foi estudado um motor comum com as medidas da cambota e da biela iguais ao motor desenhado inicialmente.

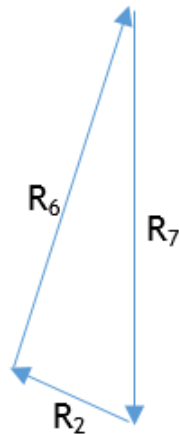


Figura 49-Desenho vetorial de um motor ciclo de Otto sem offset da cambota.

Assim sendo as medidas das componentes são:

Tabela 3-Medidas motor ciclo de Otto.

Mecanismo	Medida (mm)
R ₂	70
R ₆	160

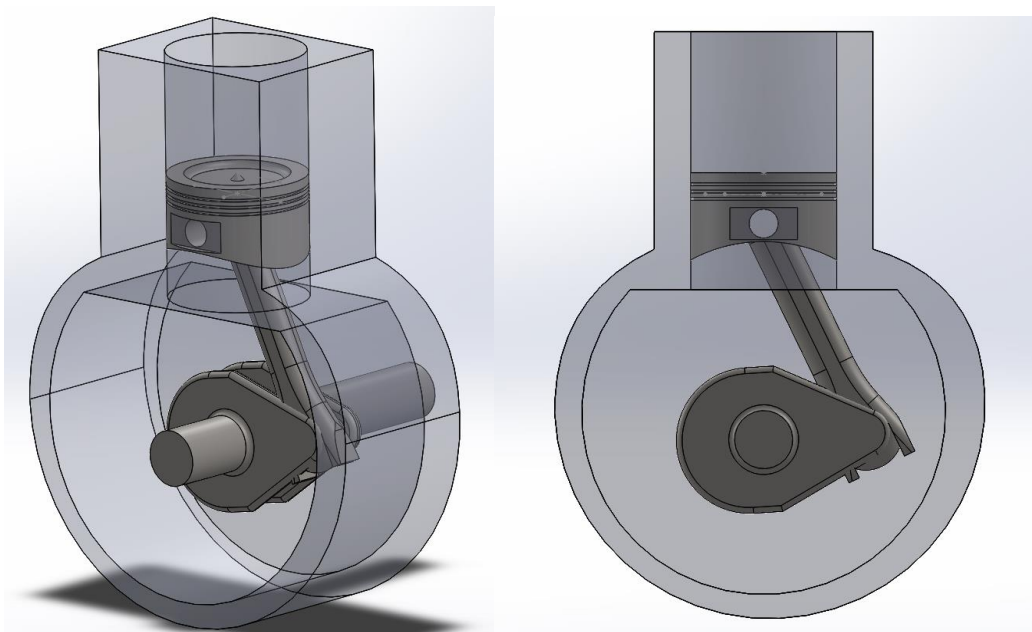


Figura 50- Desenho CAD motor ciclo de Otto.

Para este motor o comportamento do pistão representa-se da seguinte forma:

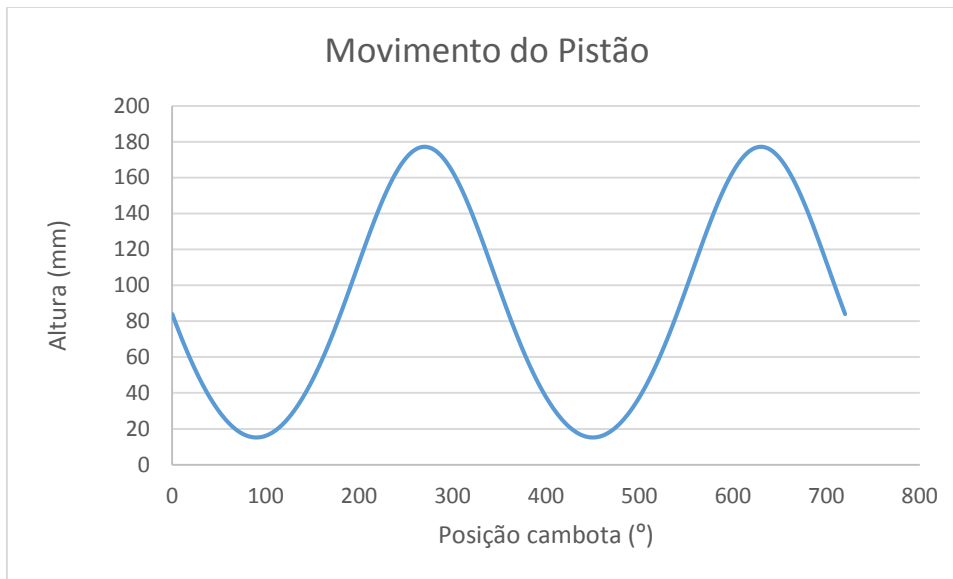


Figura 51-Movimento pistão do motor Ciclo Otto

Foi analisado o diagrama P-V para perdas de pressão na admissão de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da pressão atmosférica.

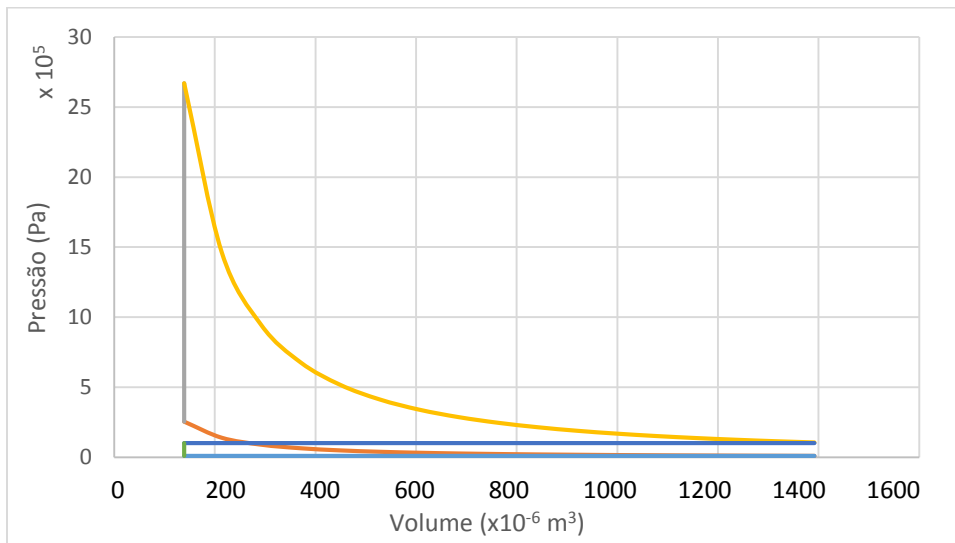


Figura 52-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 90%

Na Figura 52 mostra o ciclo de Otto quando as perdas por bombagem representam 90%, isto é, a pressão de admissão é 10% da pressão atmosférica, esta perda de pressão implica que o volume de admissão seja $130 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ (valor do volume de mistura admitida a pressão atmosférica) e a pressão de compressão seja $2,5 \times 10^5 \text{ Pa}$, cerca de 2 vezes a pressão atmosférica. A pressão de escape é $1,1 \times 10^5 \text{ Pa}$, aproximadamente a pressão atmosférica. Como as pressões são baixas o trabalho produzido também é baixo, 472J, mas como o volume de admissão também é baixo o consumo específico é de 77,65g/kWh.

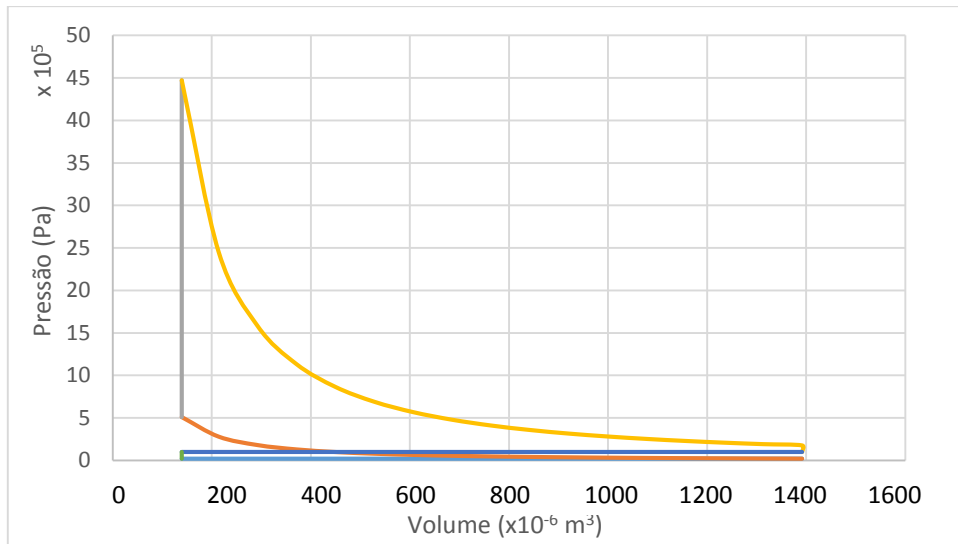


Figura 53- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 80%

A Figura 53 representa o diagrama P-V para uma pressão de admissão de 20% da pressão atmosférica, neste caso a pressão de compressão e escape já são maiores, $5,1 \times 10^5$ Pa e $1,8 \times 10^5$ Pa respectivamente, o trabalho produzido pelo motor é 798J para um volume de admissão de $302 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, representando um consumo específico de 106g/kWh.

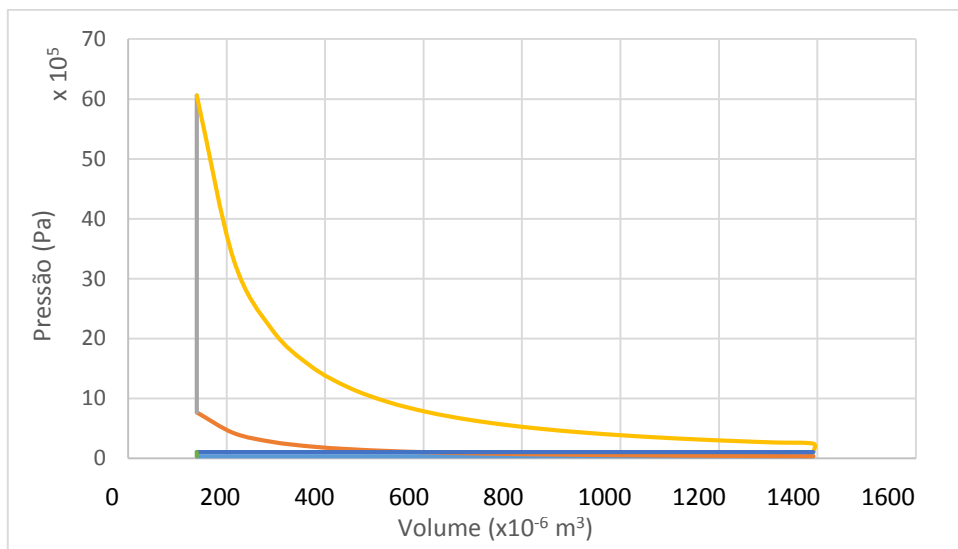


Figura 54- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 70%

A Figura 54 representa o diagrama P-V para uma pressão de admissão de 30% da pressão atmosférica. Neste caso a pressão de compressão é de $7,6 \times 10^5$ Pa e pressão de escape é $2,4 \times 10^5$ Pa, o volume de admissão é de $450 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ com um trabalho produzido de 1082J. O consumo específico é de 117,6 g/kWh.

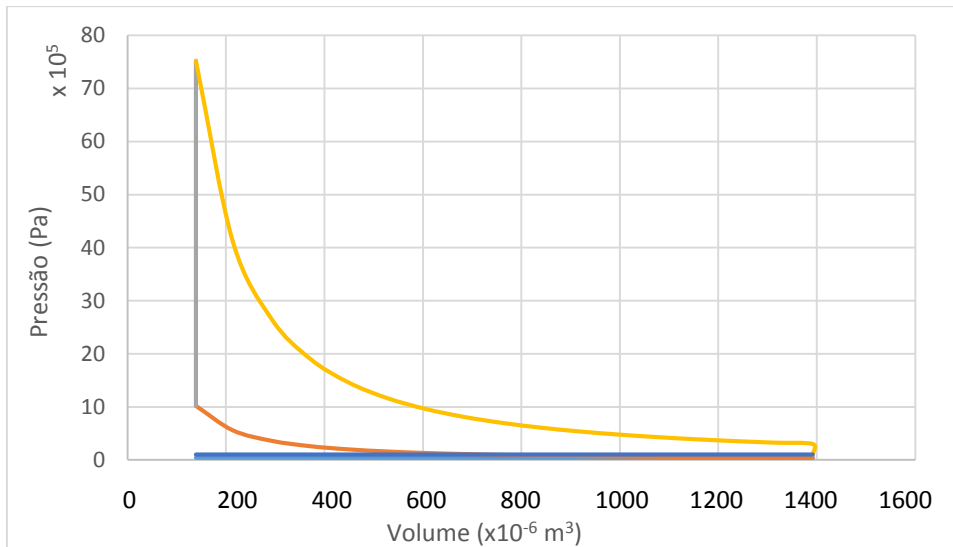


Figura 55- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 60%

O motor produz 1342J quando à pressão de admissão é 40% da pressão atmosférica, onde o volume de admissão é $584 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ que gera uma pressão de compressão de $10,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, onde a pressão de escape é $2,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, fazendo um consumo específico de 123,1 g/kWh.

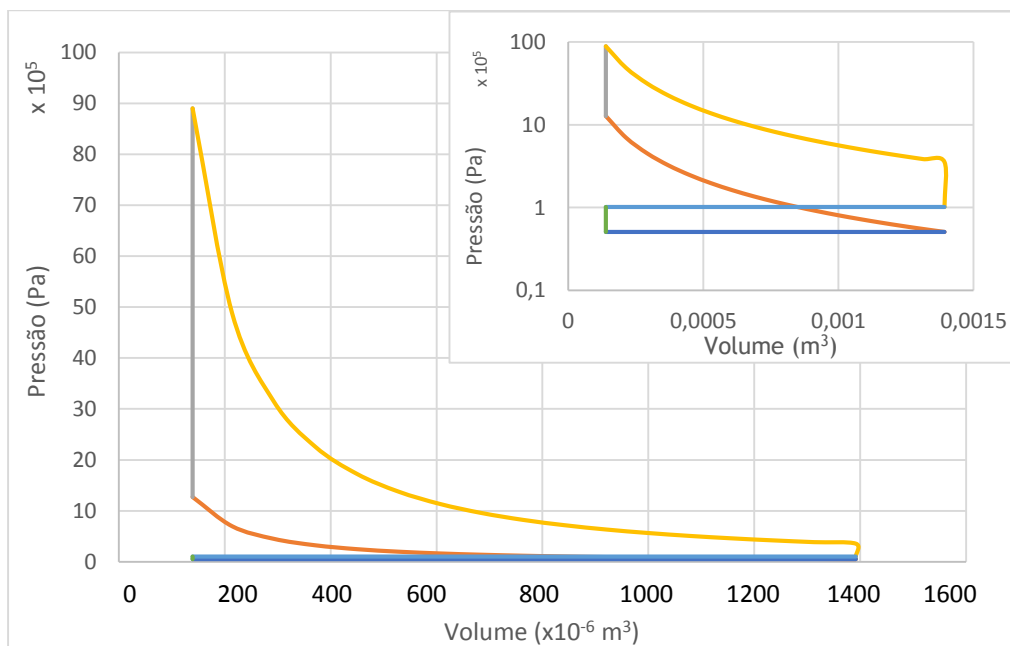


Figura 56- Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 50% (canto superior direito-escala logarítmica)

A Figura 56 representa o diagrama P-V para uma pressão de admissão de 50% da pressão atmosférica. Neste caso a pressão de compressão é de $12,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ e a pressão de escape é $3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, o volume de admissão é $709 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ com um trabalho produzido de 1586J. O consumo específico é de 126,4 g/kWh.

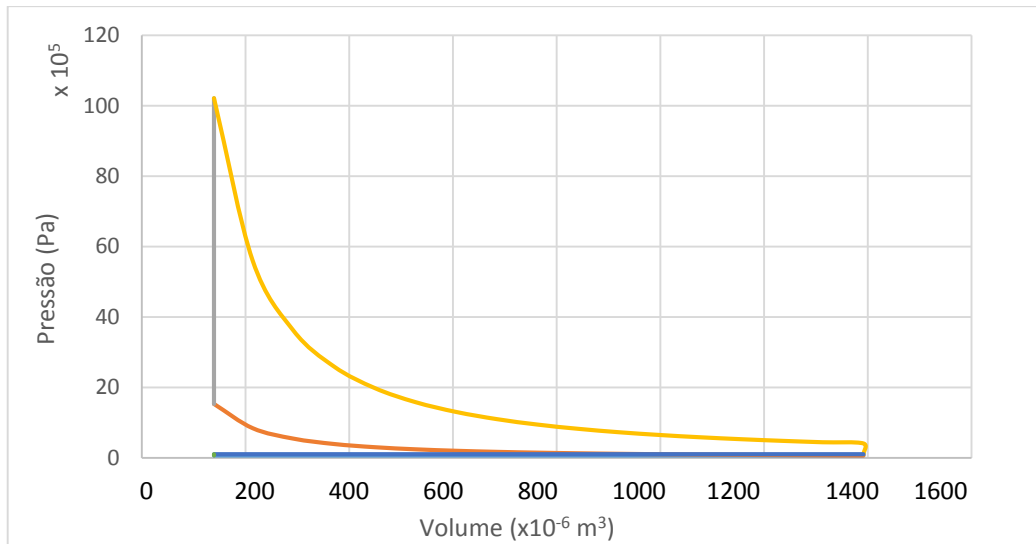


Figura 57-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 40%

A Figura 57 representa o diagrama P-V com perdas de 40%, neste caso a pressão de compressão é de $15,2 \times 10^5$ Pa e a pressão de escape é $4,1 \times 10^5$ Pa, o trabalho produzido é de 1819J admitindo $827 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ o que dá um consumo específico de 128,5 g/kWh.

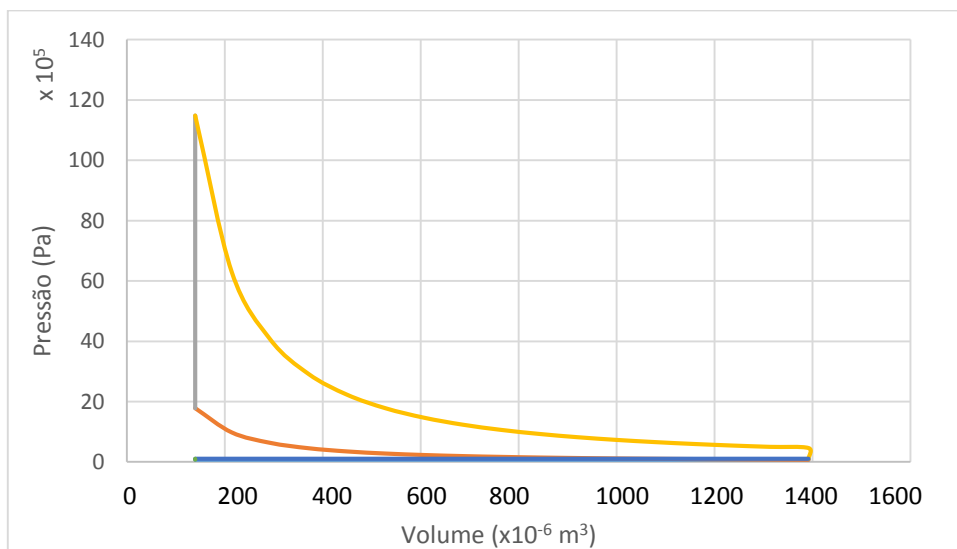


Figura 58-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 30%

A Figura 58 representa o diagrama P-V com perdas de 30%, neste caso a pressão de compressão é de $17,8 \times 10^5$ Pa e a pressão de escape é $4,6 \times 10^5$ Pa, fazem o motor produzir 2044J, com uma admissão de $940 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ e consumo específico de 130,0 g/kWh.

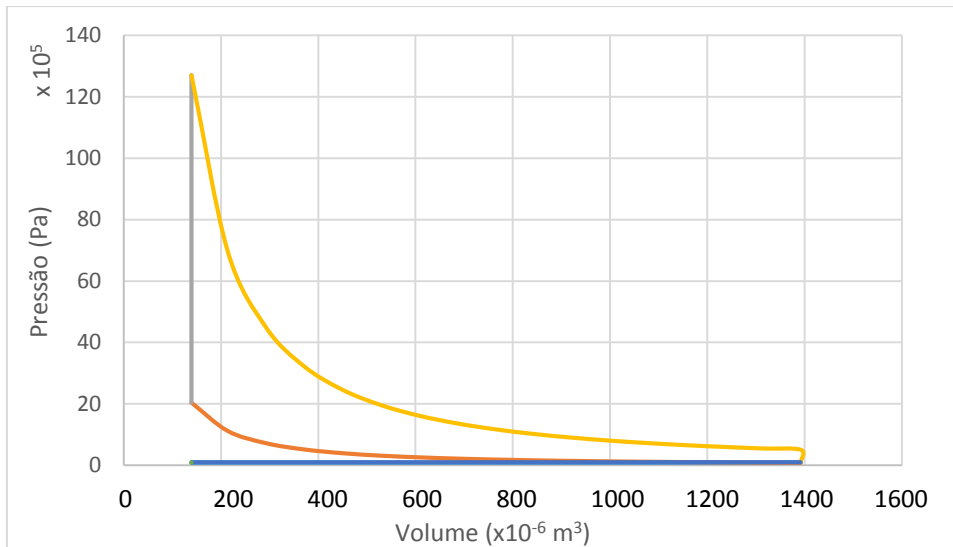


Figura 59-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 20%

A Figura 59 representa o diagrama P-V quando as perdas são de 20%, neste caso a pressão de admissão é de $20,3 \times 10^5$ Pa e a de escape é $5,1 \times 10^5$ Pa, o trabalho produzido é 2262J, com uma admissão de $1050 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ e um consumo específico de 130,9 g/kWh.

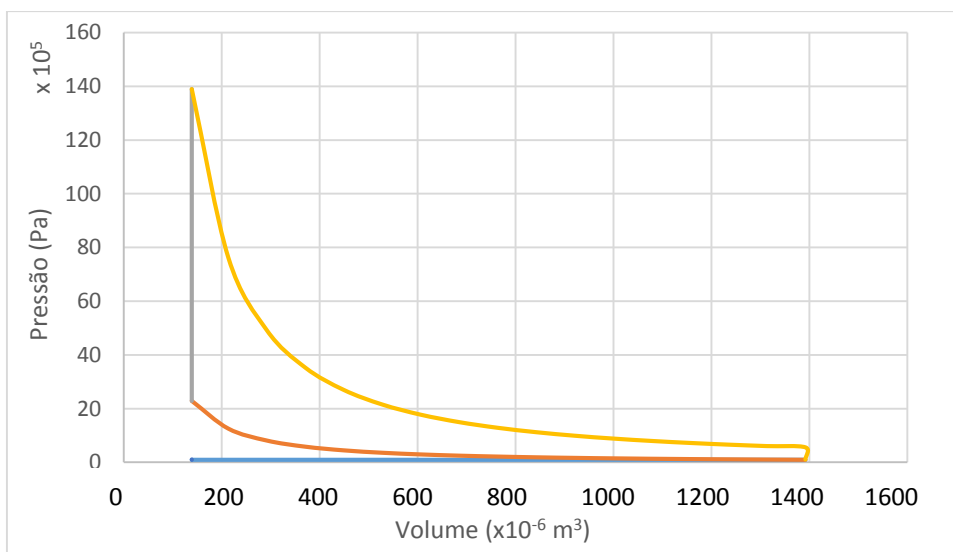


Figura 60-Diagrama P-V, para perdas por bombagem de 10%

A Figura 60 representa o diagrama P-V para uma pressão na câmara de combustão de 90% da pressão atmosférica, neste caso a pressão de admissão é de $22,9 \times 10^5$ Pa e o de escape é $5,5 \times 10^5$ Pa, o trabalho produzido é de 2976J e a admissão de $1152 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, o que significa um consumo específico de 131,6 g/kWh.

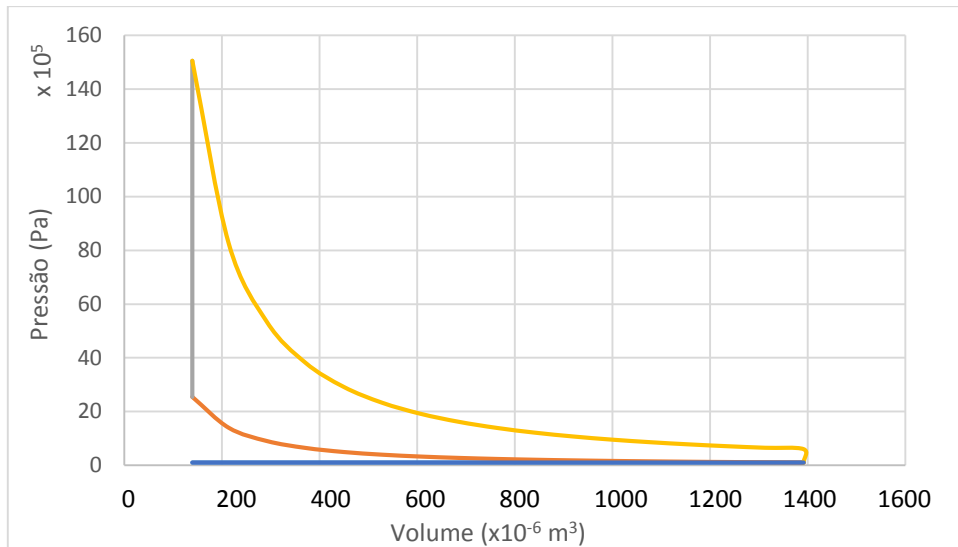


Figura 61-Diagrama P-V, sem perdas por bombagem

A Figura 61 representa o diagrama P-V quando não existem perdas por bombagem. Neste caso, a pressão de admissão é de $25,5 \times 10^5$ e a de escape é $6,0 \times 10^5$ Pa, o motor produz 2682J sendo o volume de admissão de $1250 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, o que representa um consumo específico de 132,0 g/kWh.

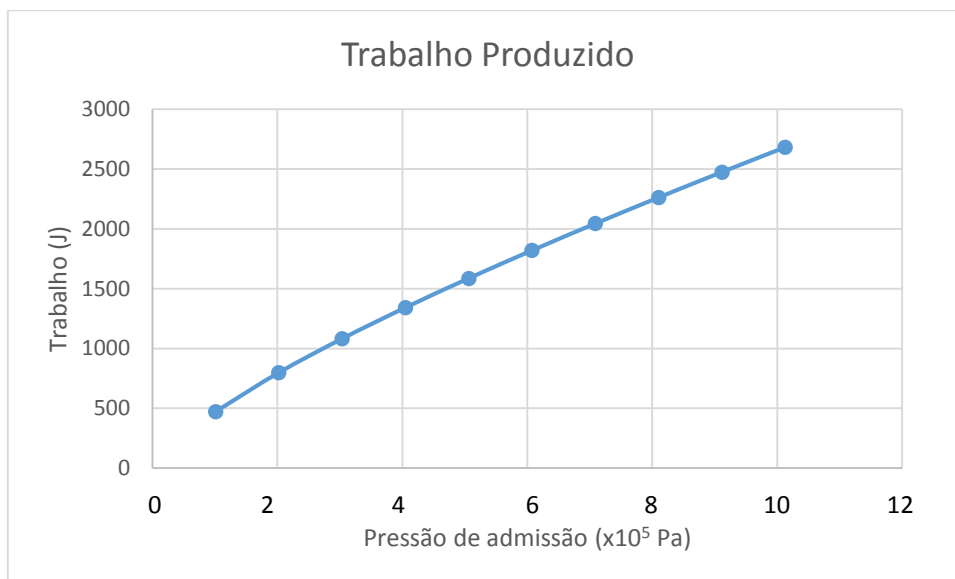


Figura 62- Trabalho produzido em função da pressão de admissão

A Figura 62 representa o trabalho produzido em função da pressão de admissão, mostrando que o trabalho produzido vai aumento quando se diminui as perdas por bombagem, mas como se pode ver anteriormente referido o volume de admissão também aumenta, aumentando o consumo específico.

Um motor no geral encontra-se com a borboleta meia aberta, assim sendo para métodos de comparação será usado o motor de Otto com perdas por bombagem de 50%.

Para que se conseguisse que o motor de Atkinson produzisse o mesmo trabalho foi necessário multiplicar todas as medidas por 1,9. O diagrama P-V para este motor encontra-se representado na Figura 63.

Tabela 4- Dimensões Motor de Atkinson aumentado 1,9 vezes

Mecanismos	Medida (mm)	Mecanismo	Ângulo (rad)	Ângulo (°)
R ₁	231,1	Θ ₁	0,34	19,5
R ₂	133	Θ ₄	4,71	270
R ₃	294,5	Θ ₇	4,71	270
R ₄	76	Θ ₈	0	0
R ₅	256,5			
R ₆	304			
R ₈	0			

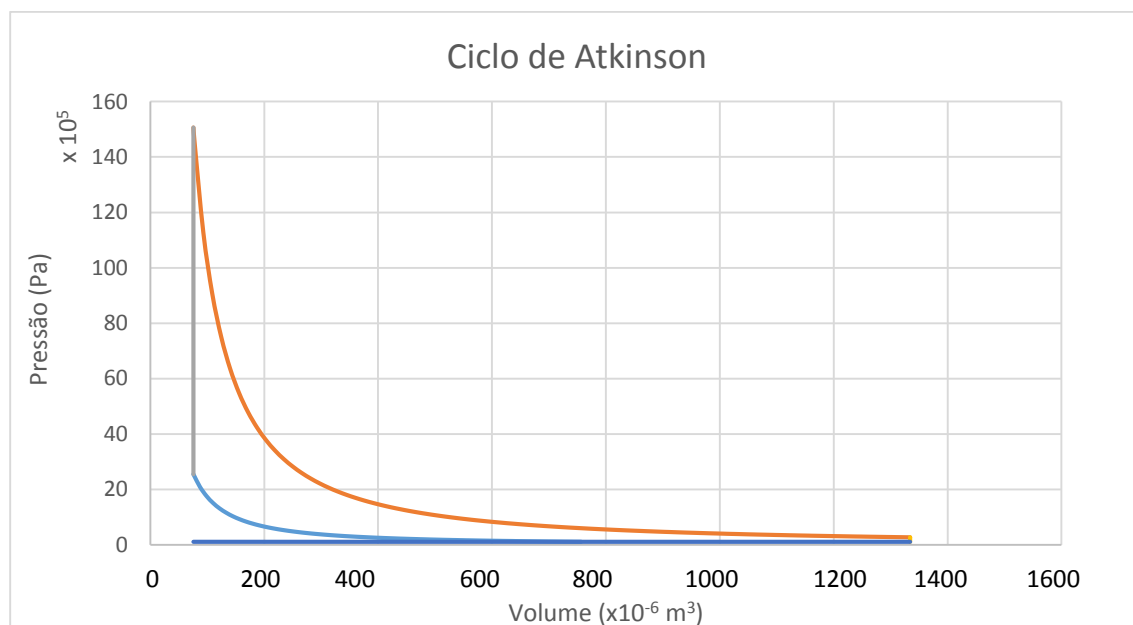


Figura 63-Diagrama P-V para motor de Atkinson

Este motor produz um trabalho de 1660J com um volume de admissão de $757 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Enquanto o motor de Otto produz 1586J e necessita de um volume de admissão de $848 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, isto é o motor de Atkinson com menos combustível produz mais trabalho.

Aumentando o tamanho do motor em 2,5 vezes e diminuindo o rácio de admissão-expansão, passa a produzir mais trabalho com menos combustível. A Figura 64 representa o diagrama P-V para o motor de Atkinson com 2,5 vezes o tamanho que foi dimensionado, este motor produz um trabalho de 1608J com um volume de admissão de $669 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

Tabela 5-Dimensões motor Atkinson 2,5 vezes maior e variação do rácio admissão-expansão

Mecanismos	Medida (mm)	Mecanismos	Ângulo (rad)	Ângulo (°)
R ₁	304,1	Θ ₁	0,34	19,5
R ₂	175	Θ ₄	5,00	286,5
R ₃	387,5	Θ ₇	4,71	270
R ₄	100	Θ ₈	0	0
R ₅	337,5			
R ₆	400			
R ₈	0			

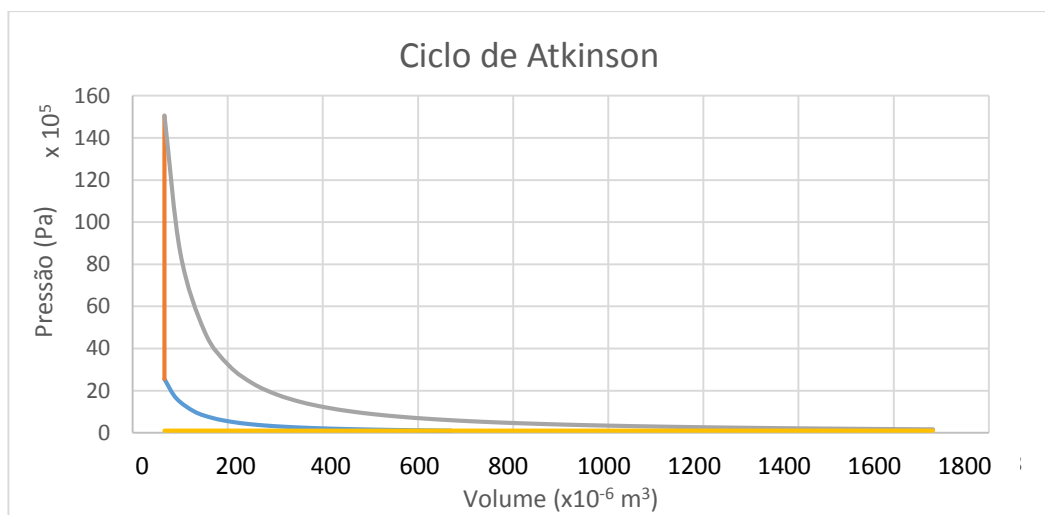


Figura 64- Diagrama P-V para o motor de Atkinson

Quando se aumenta o rácio de admissão-expansão para que os cursos sejam iguais não foi possível encontrar um tamanho em que o motor seja melhor. A Figura 65 mostra o digrama P-V para o motor de Atkinson 40% maior, alcançando o trabalho de 1562J, mas o volume de admissão é de $822 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

Tabela 6- Dimensões motor de Atkinson, 40% maior e rácio admissão-expansão de 1

Mecanismo	Medida (mm)	Mecanismo	Ângulo (rad)	Ângulo (°)
R ₁	170,3	Θ ₁	0,34	19,5
R ₂	98	Θ ₄	4,62	264,7
R ₃	217	Θ ₇	4,71	270
R ₄	56	Θ ₈	0	0
R ₅	189			
R ₆	224			
R ₈	0			

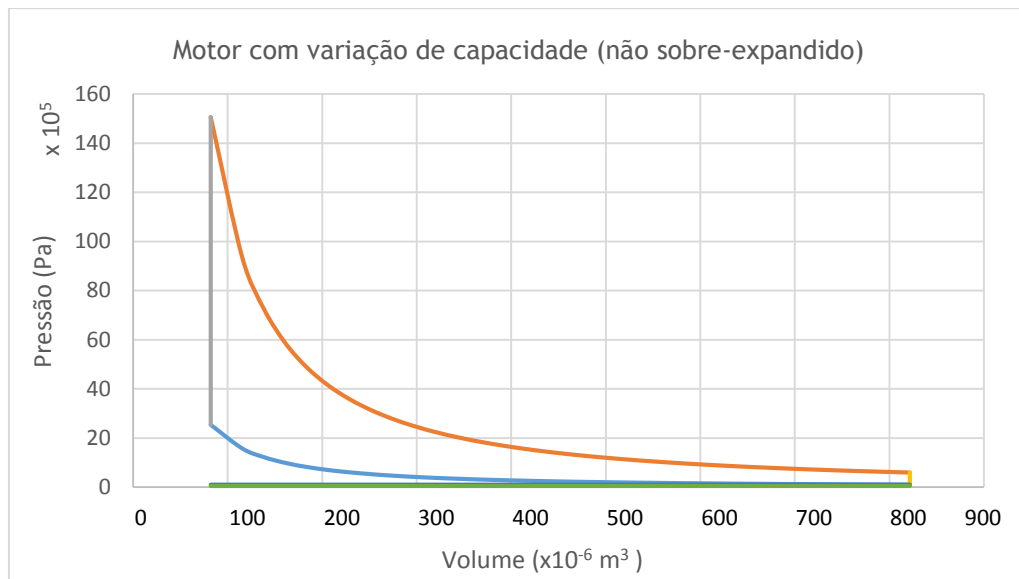


Figura 65-Diagrama P-V motor de Atkinson com rácio admissão-expansão de 1

Em suma, o motor com variação de capacidade tem um rendimento melhor quando funciona com sobre-expansão, quando o curso de admissão e o de expansão são iguais o motor de Otto apresenta um rendimento melhor.

Na Figura 66 é apresentado um gráfico do consumo específico do motor de Otto. Quando é variada a pressão de admissão, com o aproximar da pressão atmosférica, o consumo aumenta, isto é, o rendimento diminui.

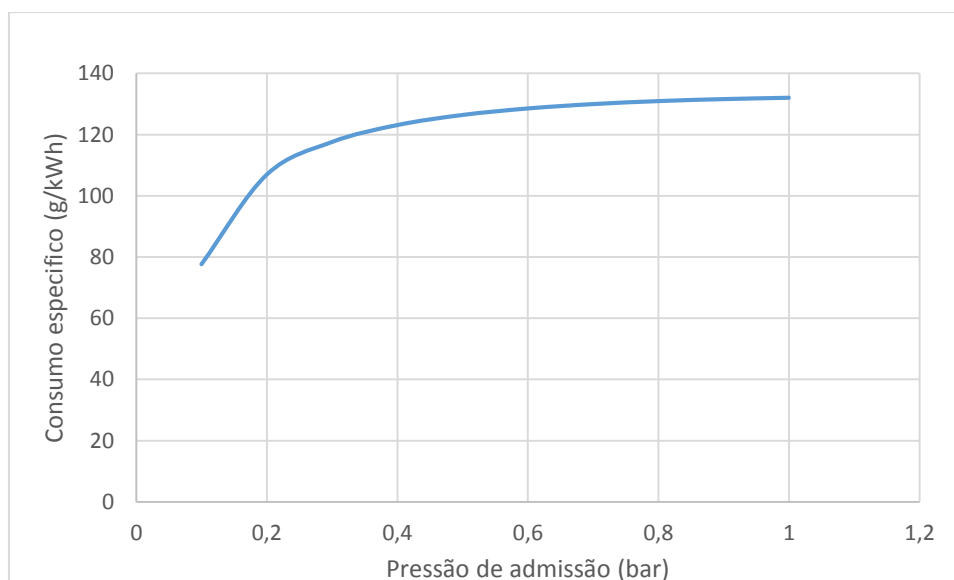


Figura 66- Consumo específico do motor Otto consoante a pressão de admissão

No motor de Atkinson com variação de capacidade encontramos o pretendido. Quando se baixa a capacidade, o motor tem um consumo específico mais baixo, como pode ser observado na Figura 67.

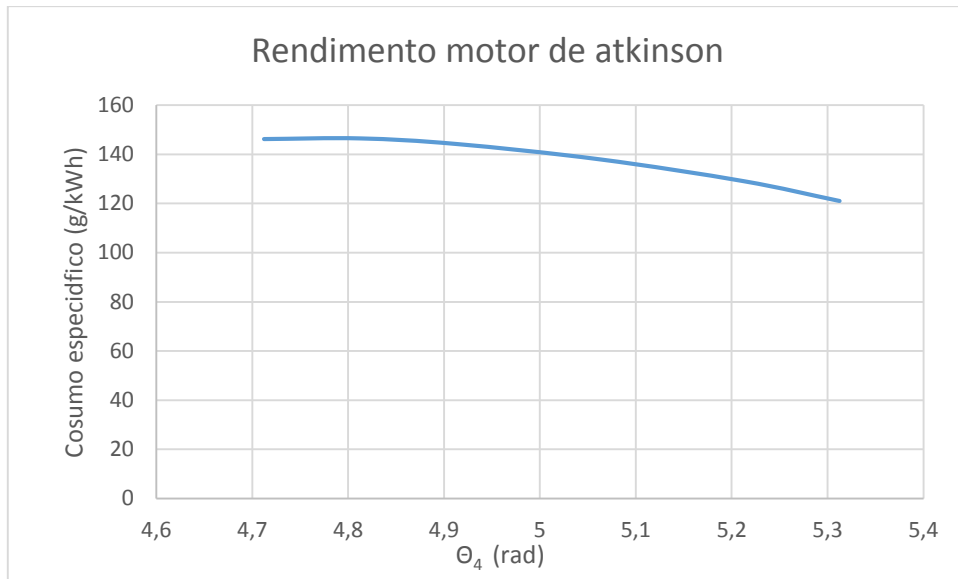


Figura 67- Consumo específico do motor de Atkinson consoante a variação do Θ_4

Para efeito comparativo foi calculado qual era a potência necessária para vencer a força de arrasto (atrito aerodinâmico e de rolamento) num veículo utilitário.

A força de arrasto é dada pela seguinte fórmula [18]:

$$TRR = R_x + D_A$$

Onde:

D_A - Força de arrasto;

R_x - Resistência ao rolamento.

A força de arrasto e a resistência ao rolamento são dadas pelas seguintes fórmulas:

$$D_A = 0,5 * \rho * V^2 * A * C_D$$

C_D -Coeficiente de arrasto;

A -Área frontal do veículo;

V - Velocidade do veículo;

ρ - Densidade do ar.

Onde:

$$C_D=0,32$$

$$\rho = 1,20 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = 2.61\text{m}^2$$

A resistência ao rolamento é dada por:

$$R_x = f_r * W$$

f_r - Coeficiente de resistência ao rolamento;

W - Peso do veículo.

Onde:

$$f_r = 0,03$$

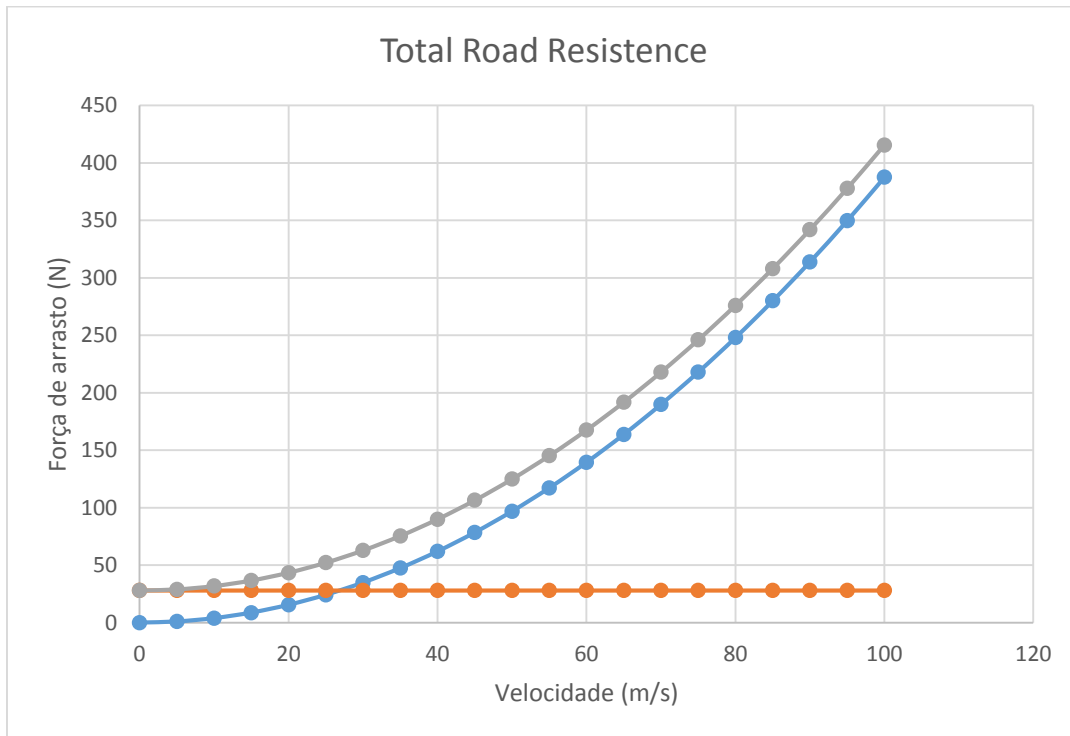


Figura 68-Resistência ao rolamento

A Figura 68 representa a força de arrasto total (a cinzento) que é dada pela força de arrasto (a laranja) mais a resistência ao rolamento (a azul).

Tabela 7- Potência necessária para vencer a força de arrasto consoante a velocidade

VELOCIDADE	KW	CV
80	6,14	8,34
85	7,27	9,89
90	8,55	11,62

Assim para o motor de Otto, com perdas de bombagem de 50% ($W=1586J$), vencer a força de arrasto tem de atingir as seguintes rpm:

Nota: O valor da rotação indicada não pretende ser uma velocidade real, mas sim uma velocidade teórica para que num ciclo ideal sem outras perdas consiga produzir a potência necessária ao exemplo.

Tabela 8-Potência fornecida em função das rotações por minuto

RPM	KW	CV
500	6,61	8,99
560	7,40	10,06
650	8,59	11,68

Já o motor de capacidade variável de ciclo não sobre-expandido ($W=1562J$) precisa de metade das rotações para vencer a força de arrasto.

Tabela 9- Potência fornecida em função das rotações por minuto

RPM	KW	CV
250	6,51	8,85
280	7,29	9,91
340	8,85	12,04

Quando o motor passa a ter um ciclo sobre-expandido, produzindo menos trabalho ($W=796J$) continua a necessitar de menos rotações por minuto para vencer a força de arrasto.

Tabela 10- Potência fornecida em função das rotações por minuto

RPM	KW	CV
475	6,3	8,56
550	7,30	9,92
650	8,62	11,71

Isto demonstra que o motor de Atkinson precisa de menos rotações para vencer a força de arrasto, mesmo produzindo menos trabalho, já que os 4 tempos são produzidos numa só rotação.

6. Conclusão

Nesta dissertação todas as simulações são efetuados para casos ideais, os ciclos reais são bastante diferentes, mas o objetivo é apenas um estudo comparativo entre os dois ciclos. Consideramos que as conclusões são aplicáveis aos casos reais.

Depois de analisados os diagramas P-V, rendimentos e ciclos podemos afirmar que o motor de Atkinson com capacidade variável proposto nesta dissertação apresenta condições para ser mais rentável que o motor de Otto nomeadamente à meia carga que é o regime onde o motor funciona maior parte do tempo. Pelo facto de o motor proposto não necessitar de borboleta, as perdas por bombagem não existem, pois o controlo de carga do motor se faz pela variação da capacidade.

O controlo de volume de admissão é a característica que mais influencia este sistema, mas a sobre-expansão também ajuda a que o motor consiga produzir o mesmo trabalho com um volume de admissão muito menor do que o motor de ciclo de Otto e por sua vez reduzir os consumos.

Também é observável que as perdas por bombagem no ciclo de Otto não são muito significativas, até porque como é visível na Figura 66, o consumo específico aumenta quando se reduzem as perdas por bombagem.

Apesar do consumo específico do motor de Atkinson apresentar valores mais elevados nos extremos da sua capacidade quando comparado com os mesmos casos no ciclo de Otto. No geral, o motor de Atkinson é melhor, visto que o motor de Otto se encontra quase sempre em média carga.

Esta geometria revela também um grande ponto forte do motor de Atkinson: a capacidade de fazer um ciclo de 4 tempos numa rotação da cambota. Isto permite que o motor consiga vencer a força de arrasto com menos rotações. Para motores que produzissem o mesmo trabalho o motor de Atkinson precisaria de metade das rotações para produzir a mesma potência.

6.1. Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Análise das perdas geradas pelo número elevado de peças móveis;
- Análise do desgaste das componentes móveis;
- Construção e estudo pratico do motor de Atkinson com variação de capacidade;
- Construção de um sistema autónomo para a variação da capacidade;
- Simulação do funcionamento dos motores incluindo todas as perdas.

Bibliografia

- [1] J. Atkinson, "GAS-ENGINE". EUA Patente 367496, 2 agosto 1887.
- [2] V. Ganesan, Internal Combustion Engines, India: McGraw Hill Education, 2012.
- [3] R. W. R. d. Souza, "Simulador didático de injeção eletrônica em um motor monocilíndrico," 2009.
- [4] M. J. H. N. S. Moran, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Chichester: Wiley: Hoboken, N.J., 2008.
- [5] J. C. K. W. B. Y. Josh Chen, "Internal Combustion Engine: Atkinson Cycle, Efficiency and Power Comparison to Otto Cycle," 2013.
- [6] "www.mecanica.ufrgs.br," [Online]. Available: www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/otto.htm. [Acedido em 3 12 2015].
- [7] "NewsB2B168," 09 04 2011. [Online]. Available: <http://nws.en.b2b168.com/detail/c4-i11686022.html>. [Acedido em 2 05 2016].
- [8] Nissan global, "<http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/hr12ddr.html>," [Online]. Available: <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/FILES/2013/01/f5101e399172ed.gif>. [Acedido em 03 2016].
- [9] C. Hadfield, Today's Technician: Automotive Engine Repair & Rebuilding, Cengage Learning, 2013.
- [10] K. Hall-Geisler, "How an Atkinson Cycle Engine Works," *How Stuff Works*, 28 october 2015.
- [11] F. Holst, "Numerical and Experimental Investigation of the Atkinson Cycle on a 2.0 liter 4-cylinder Turbocharged SI-engine," Göteborg, Sweden , 2014.
- [12] G. P. Blair, Design and simulation of four-stroke engines, Warrendale, PA 15096-0001 U.S.A. : Society of Automotive Engineers, Inc. , 1999.
- [13] Honda Worldwide, "Honda Worldwide," Honda Motor Co., Ltd., [Online]. Available: <http://world.honda.com/>. [Acedido em 3 05 2016].
- [14] autoevolutions, "Honda Patents Variable-Displacement Engine, Different than What You've Ever Seen," 2016. [Online]. Available: <http://www.autoevolution.com/news/honda-patents-variable-displacement-engine-different-than-what-you-ve-ever-seen-107292.html>. [Acedido em 5 2015].
- [15] Green Car Congress, "Green Car Congress," BioAge Group, [Online]. Available: <http://www.greencarcongress.com/2009/02/mce-5-developme.html>. [Acedido em 28 10 2015].

- [16] Saab, "The Saab Network," [Online]. Available: <http://www.saabnet.com/tsn/press/000318.html>. [Acedido em 28 10 2015].
- [17] Gomecsys, "Gomecsys," [Online]. Available: <http://www.gomecsys.com/#home>. [Acedido em 28 10 2015].
- [18] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale PA 15096-0001: Society of Automotive Engineer, Inc..
- [19] "New engine design adjusts.," *OAAT ACCOMPLISHMENTS*, abril 2001.
- [20] J. Trindade, Motores de Combustão Interna, ENIDH, 2014.
- [21] J. J. U. J. Joseph Edward Shigley, Theory Of Machines and Mechanisms, Mcgraw-Hill Book Company, 1980.

Anexos

Programa de Matlab

```
r1=[121.65 130];
r2=[70];
r3=[155];
r4=[40];
r5=[130 135];
r6=[155 160];
R8=0;
t2=[0:(2*pi/72):2*pi];
t4=(3*pi/2);
t7=3*pi/2;
t8=0;
n=length (r1)*length (r2)*length (r3)*length (r4)*length (r5)*length
(r6);
M=ones(n,73);
flag=0;
for i=1:length (r1)
    R1=r1(i);
    for q=1:length (r2)
        R2=r2(q);
        for w=1:length (r3)
            R3=r3(w);
            for r=1:length (r4)
                R4=r4(r);
                for t=1:length (r5)
                    R5=r5(t);
                    for u=1:length (r6)
                        R6=r6(u);
                        flag=flag+1;
                        for j=1:73
                            T2=t2(j);

                            t1=asin(R4/R1);
                            ta=atan(((R1*sin(t1))+(R4*sin(t4)))/((R1*cos(t1))+
(R4*cos(t4))));
                            Ra=(R1^2+2*R1*R4*cos(t4-t1)+R4^2)^(1/2);
                            Rb=sqrt(Ra^2-2*R2*Ra*cos(T2-ta)+R2^2);
                            if T2<pi
                                tb=real(acos((R2*cos(T2)-Ra*cos(ta))/Rb));
                            else
                                tb=pi-asin((R2*sin(T2)-Ra*sin(ta))/Rb);
                            end
                            t3=tb-acos((R5^2-R3^2-Rb^2)/(2*Rb*R3));
                            t5=(acos((Rb*cos(tb)+R3*cos(t3))/R5));
                            Rc=sqrt(R4^2+2*R4*R8*cos(t4-t8)+R8^2);
                            tc=asin((R4*sin(t4)-R8*sin(t8))/Rc);
                            Rd=sqrt(Rc^2+2*Rc*R5*cos(tc-t5)+R5^2);
                            td=acos((Rc*cos(tc)+R5*cos(t5))/Rd);
                            t6=-(t7+asin(-(Rd*sin(td-t7))/R6));
                            R7=(-Rd*sin(td)-R6*sin(t6))/sin(t7);
                            M(flag,j)=R7;
                            Q(j)=R7;

                        end

                    end
                end
            end
        end
    end
end

P(flag)=min(Q(20:60));

L(flag)=min(Q(1:20));
H(flag)=max(Q);
```

```

    G(flag)=(H(flag)-P(flag))/(H(flag)-L(flag));
    jIndex(flag) = find(Q == max(Q(1:30)));
    j2Index(flag) = find(Q == max(Q(30:73)));
    E(flag)=5*(j2Index(flag)-jIndex(flag));
    A(flag)=5*(72-(j2Index(flag))+jIndex(flag));
        end
    end
end
end
end

L
G
plot(E)
hold on
plot(A)
figure
surf(M)
figure
plot(G)

```

Tabela 11- Valores movimento dos mecanismos

θ_2	$\theta_2 rad$	θ_b	R_b	θ_3	θ_5	θ_c	R_c	θ_d	R_d	θ_6	R_7	$R_7 real$
0	0	0	44,9	0,974	1,253	-1,57	40	1,125	97,8	-4,45	242,6	27,6
5	0,087	0,134	45,6	0,845	1,129	-1,57	40	0,958	100,3	-4,34	231,3	38,9
10	0,175	0,259	47,5	0,733	1,033	-1,57	40	0,832	102,7	-4,27	220,1	50,0
15	0,262	0,366	50,6	0,643	0,966	-1,57	40	0,746	104,6	-4,21	211,4	58,8
20	0,349	0,454	54,6	0,572	0,925	-1,57	40	0,696	105,8	-4,18	205,7	64,5
25	0,436	0,522	59,3	0,518	0,906	-1,57	40	0,673	106,4	-4,17	202,9	67,3
30	0,524	0,573	64,6	0,477	0,904	-1,57	40	0,670	106,5	-4,16	202,6	67,5
35	0,611	0,609	70,2	0,446	0,915	-1,57	40	0,683	106,1	-4,17	204,2	65,9
40	0,698	0,633	76,0	0,424	0,936	-1,57	40	0,709	105,5	-4,19	207,3	62,9
45	0,785	0,648	82,0	0,408	0,965	-1,57	40	0,745	104,6	-4,21	211,3	58,9
50	0,873	0,654	88,1	0,397	0,999	-1,57	40	0,788	103,7	-4,24	215,9	54,3
55	0,960	0,654	94,2	0,390	1,037	-1,57	40	0,838	102,6	-4,27	220,8	49,4
60	1,047	0,649	100,3	0,386	1,080	-1,57	40	0,8923	101,5	-4,30	225,8	44,3
65	1,134	0,639	106,3	0,385	1,124	-1,57	40	0,951	100,4	-4,34	230,8	39,4
70	1,221	0,626	112,2	0,387	1,171	-1,57	40	1,013	99,4	-4,38	235,5	34,7
75	1,309	0,610	118,1	0,391	1,219	-1,57	40	1,079	98,4	-4,41	239,8	30,3
80	1,396	0,591	123,7	0,397	1,268	-1,57	40	1,146	97,5	-4,46	243,7	26,4
85	1,484	0,570	129,2	0,404	1,318	-1,57	40	1,215	96,8	-4,50	247,1	23,0
90	1,571	0,547	134,5	0,413	1,369	-1,57	40	1,285	96,1	-4,54	250,0	20,2
95	1,658	0,523	139,6	0,424	1,420	-1,57	40	1,357	95,6	-4,59	252,1	18,0
100	1,745	0,497	144,5	0,435	1,471	-1,57	40	1,429	95,3	-4,63	253,8	16,4
105	1,833	0,470	149,2	0,449	1,521	-1,57	40	1,501	95,1	-4,67	254,7	15,5
110	1,920	0,442	153,6	0,463	1,572	-1,57	40	1,572	95,0	-4,71	255,0	15,2
115	2,007	0,414	157,8	0,479	1,622	-1,57	40	1,643	95,1	-4,76	254,7	15,5
120	2,094	0,384	161,7	0,496	1,671	-1,57	40	1,713	95,3	-4,80	253,7	16,4
125	2,182	0,354	165,3	0,514	1,720	-1,57	40	1,782	95,6	-4,84	252,2	17,9
130	2,269	0,324	168,6	0,533	1,768	-1,57	40	1,849	96,1	-4,88	250,2	20,0

135	2,356	0,292	171,7	0,554	1,814	-1,57	40	1,914	96,7	-4,92	247,7	22,5
140	2,443	0,261	174,4	0,576	1,860	-1,57	40	1,977	97,3	-4,96	244,7	25,5
145	2,531	0,229	176,8	0,599	1,905	-1,57	40	2,038	98,1	-4,99	241,3	28,8
150	2,618	0,197	179,0	0,624	1,948	-1,57	40	2,097	98,9	-5,03	237,6	32,5
155	2,705	0,164	180,8	0,650	1,990	-1,57	40	2,153	99,8	-5,06	233,6	36,5
160	2,793	0,132	182,2	0,677	2,030	-1,57	40	2,207	100,7	-5,10	229,4	40,7
165	2,880	0,099	183,4	0,705	2,069	-1,57	40	2,258	101,7	-5,13	225,0	45,1
170	2,967	0,066	184,2	0,735	2,106	-1,57	40	2,306	102,6	-5,16	220,5	49,6
175	3,054	0,033	184,7	0,766	2,142	-1,5	40	2,352	103,6	-5,19	216,0	54,2
180	3,141	4,64E-17	184,9	0,799	2,176	-1,57	40	2,395	104,6	-5,21	211,4	58,7
185	3,229	-0,033	184,7	0,832	2,208	-1,57	40	2,435	105,6	-5,24	206,9	63,2
190	3,316	-0,066	184,2	0,867	2,238	-1,57	40	2,473	106,5	-5,26	202,5	67,7
195	3,403	-0,099	183,4	0,903	2,267	-1,57	40	2,508	107,4	-5,28	198,2	72,0
200	3,491	-0,131	182,2	0,940	2,293	-1,57	40	2,540	108,3	-5,30	194,0	76,1
205	3,578	-0,164	180,8	0,978	2,318	-1,57	40	2,570	109,1	-5,32	190,1	80,1
210	3,665	-0,197	179,0	1,017	2,341	-1,57	40	2,598	109,9	-5,34	186,3	83,8
215	3,752	-0,229	176,8	1,057	2,363	-1,57	40	2,623	110,6	-5,36	182,8	87,4
220	3,840	-0,261	174,4	1,098	2,382	-1,57	40	2,645	111,3	-5,37	179,5	90,6
225	3,927	-0,292	171,7	1,139	2,399	-1,57	40	2,666	111,9	-5,38	176,6	93,6
230	4,014	-0,324	168,6	1,180	2,415	-1,57	40	2,684	112,5	-5,39	173,9	96,3
235	4,102	-0,354	165,3	1,222	2,428	-1,57	40	2,699	113,0	-5,40	171,5	98,6
240	4,189	-0,384	161,7	1,264	2,440	-1,57	40	2,713	113,4	-5,41	169,5	100,7
245	4,276	-0,414	157,8	1,306	2,449	-1,57	40	2,724	113,7	-5,42	167,8	102,3
250	4,363	-0,442	153,6	1,348	2,457	-1,57	40	2,732	114,0	-5,42	166,5	103,7
255	4,451	-0,470	149,2	1,389	2,462	-1,57	40	2,738	114,2	-5,43	165,6	104,6
260	4,538	-0,497	144,5	1,430	2,465	-1,57	40	2,741	114,3	-5,43	165,0	105,1
265	4,625	-0,523	139,6	1,469	2,466	-1,57	40	2,742	114,3	-5,43	164,9	105,2
270	4,712	-0,547	134,5	1,508	2,463	-1,57	40	2,740	114,2	-5,43	165,3	104,9
275	4,800	-0,570	129,2	1,544	2,458	-1,57	40	2,734	114,1	-5,43	166,2	104,0

280	4,887	-0,591	123,7	1,579	2,450	-1,57	40	2,725	113,8	-5,42	167,6	102,5
285	4,974	-0,610	118,1	1,611	2,439	-1,57	40	2,711	113,3	-5,41	169,7	100,5
290	5,061	-0,626	112,2	1,640	2,423	-1,57	40	2,694	112,8	-5,40	172,4	97,7
295	5,149	-0,639	106,3	1,664	2,403	-1,57	40	2,670	112,0	-5,39	175,9	94,3
300	5,236	-0,649	100,3	1,685	2,378	-1,57	40	2,641	111,2	-5,37	180,2	89,9
305	5,323	-0,654	94,2	1,699	2,346	-1,57	40	2,604	110,1	-5,34	185,5	84,7
310	5,411	-0,654	88,1	1,706	2,308	-1,57	40	2,558	108,8	-5,32	191,8	78,4
315	5,498	-0,648	82,0	1,704	2,261	-1,57	40	2,500	107,2	-5,28	199,1	71,0
320	5,585	-0,633	76,0	1,691	2,203	-1,57	40	2,429	105,4	-5,23	207,6	62,6
325	5,672	-0,609	70,2	1,664	2,134	-1,57	40	2,342	103,4	-5,18	217,0	53,1
330	5,760	-0,573	64,6	1,622	2,050	-1,57	40	2,233	101,2	-5,11	227,2	43,0
335	5,847	-0,522	59,3	1,561	1,950	-1,57	40	2,100	99,0	-5,03	237,4	32,8
340	5,934	-0,454	54,6	1,479	1,832	-1,57	40	1,939	96,9	-4,93	246,6	23,6
345	6,021	-0,366	50,6	1,375	1,698	-1,57	40	1,751	95,5	-4,82	253	17,2
350	6,109	-0,259	47,5	1,251	1,550	-1,57	40	1,541	95,0	-4,69	254,9	15,2
355	6,196	-0,134	45,6	1,114	1,398	-1,57	40	1,326	95,8	-4,57	251,3	18,9
360	6,283	-3,82E-16	44,9	0,974	1,253	-1,57	40	1,125	97,8	-4,45	242,6	27,6

Tabela 12- Esforços nas barras do mecanismo

θ_2	F	F_BE	F_BC	DX	DY	M	F_AB	F_DC
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35	866,8	1233,3	-257,1	-232,0	-110,9	2952,4	-5235,4	4563,5
40	949,4	1305,1	-247,1	-225,2	-101,6	4687,5	-1774,9	996,3
45	1046,5	1387,1	-235,9	-216,6	-93,5	6091,3	-882,8	-22,8
50	1161,9	1485,2	-224,9	-207,4	-86,9	7211,6	-481,8	-583,7
55	1301,0	1605,5	-214,5	-198,4	-81,5	8104,4	-251,8	-1026,5
60	1471,4	1756,5	-205,4	-190,2	-77,4	8822,5	-95,3	-1482,4
65	1683,9	1949,4	-197,5	-183,0	-74,3	9411,7	29,1	-2056,3
70	1955,0	2200,9	-191,1	-176,9	-72,2	9910,1	144,4	-2904,3
75	2310,6	2537,0	-186,1	-172,1	-71,0	10347,6	268,5	-4369,8
80	2793,7	3000,5	-182,5	-168,3	-70,6	10746,6	420,9	-7492,9
85	3480,0	3667,1	-180,2	-165,7	-70,9	11119,7	630,9	-17582,6
90	4516,3	4683,2	-178,8	-163,7	-71,8	11461,4	952,5	-3,06E+19
95	6223,1	6368,5	-177,4	-161,7	-72,9	11719,6	1504,2	28109,5
100	9438,0	9558,8	-172,7	-156,6	-72,9	11681,1	2602,9	20437,4
105	17120,2	17206,5	-150,5	-135,7	-65,3	10354,8	5398,4	24120,6
110	104687,2	104678,6	19,3	17,3	8,6	-1342,3	38001,6	110786,0
115	68659,6	68471,3	602,4	534,7	277,4	-42132,7	29004,2	60304,0
120	45598,9	45457,0	779,6	685,9	370,7	-54553,3	22749,4	36225,9
125	33234,3	33189,5	839,5	731,1	412,5	-58486,3	19963,4	25941,7
130	25680,7	25742,1	856,4	737,6	435,2	-59133,8	19048,6	21400,0

135	20657,5	20821,7	856,0	728,1	450,2	-58322,7	19579,7	20010,6
140	17111,5	17370,8	848,7	711,8	462,1	-56807,7	21771,0	21117,9
145	14494,6	14840,3	838,8	692,7	473,0	-54933,7	26774,8	25478,8
150	12496,0	12919,1	828,5	672,5	483,8	-52868,6	38895,0	37200,9
155	10927,4	11418,9	818,6	651,9	495,1	-50696,6	87103,1	85150,8
160	9668,5	10219,9	809,5	631,1	507,0	-48460,6	-206586,0	-208716,0
165	8639,2	9242,3	801,4	610,2	519,5	-46182,4	-43957,0	-46218,4
170	7784,5	8431,2	794,0	588,9	532,6	-43872,8	-23944,0	-26313,3
175	7065,2	7747,7	787,4	567,3	546,0	-41537,4	-16274,8	-18742,7
180	6452,7	7163,6	781,2	545,0	559,7	-39179,6	-12284,0	-14851,2
185	5926,0	6658,1	775,4	521,9	573,4	-36802,3	-9868,7	-12543,7
190	5468,9	6215,2	769,7	497,9	586,9	-34408,7	-8267,2	-11065,1
195	5069,0	5823,0	764,1	473,0	600,0	-32002,3	-7137,5	-10079,6
200	4716,8	5472,0	758,3	447,1	612,5	-29587,7	-6303,7	-9417,9
205	4404,6	5155,0	752,4	420,1	624,2	-27169,8	-5666,3	-8988,1
210	4126,2	4866,1	746,1	392,2	634,8	-24753,8	-5165,2	-8739,4
215	3876,6	4600,9	739,6	363,4	644,1	-22344,8	-4761,4	-8645,1
220	3651,9	4355,6	732,6	333,8	652,1	-19947,8	-4429,2	-8696,2
225	3448,6	4127,2	725,2	303,7	658,6	-17567,1	-4150,6	-8898,4
230	3263,9	3913,5	717,4	273,1	663,4	-15206,3	-3912,4	-9273,9
235	3095,6	3712,5	709,1	242,2	666,4	-12868,1	-3705,2	-9868,5
240	2941,7	3522,5	700,3	211,4	667,7	-10554,3	-3521,6	-10766,4
245	2800,4	3342,5	691,1	180,8	667,1	-8265,8	-3355,8	-12125,9
250	2670,3	3171,2	681,4	150,6	664,5	-6002,7	-3203,1	-14270,2
255	2550,3	3007,9	671,1	121,2	660,1	-3764,6	-3059,4	-17958,3
260	2439,2	2851,8	660,2	92,8	653,7	-1551,0	-2920,7	-25472,5
265	2336,2	2702,3	648,7	65,6	645,3	638,6	-2783,5	-48230,9
270	2240,4	2559,1	636,3	40,0	635,0	2803,4	-2643,6	-2,17E+19
275	0	0	0	0	0	0	0	0

280	0	0	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0	0
290	0	0	0	0	0	0	0	0
295	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0
305	0	0	0	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0	0	0
325	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0	0
335	0	0	0	0	0	0	0	0
340	0	0	0	0	0	0	0	0
345	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 13-Velocidade angular das barras do mecanismo

θ_2	ω_3	ω_5	ω_6	$R.7$
0	-245,0	-245,0	203,5	-18912,0
5	-218,6	-199,8	163,4	-20967,2
10	-182,1	-146,5	117,7	-18286,9
15	-144,7	-95,4	75,5	-13127,5
20	-111,7	-52,0	40,7	-7529,9
25	-84,8	-17,4	13,6	-2581,0
30	-63,5	9,2	-7,2	1368,4
35	-47,0	29,5	-23,0	4327,5
40	-34,1	45,0	-35,3	6429,4
45	-23,9	56,8	-44,9	7826,3
50	-15,8	65,9	-52,5	8653,7
55	-9,1	72,9	-58,6	9023,0
60	-3,6	78,2	-63,4	9023,5
65	1,1	82,4	-67,3	8727,2
70	5,1	85,5	-70,4	8192,6
75	8,7	87,8	-72,7	7468,4
80	11,8	89,5	-74,5	6596,0
85	14,7	90,7	-75,8	5610,9
90	17,4	91,3	-76,6	4544,3
95	19,9	91,6	-77,0	3424,0
100	22,4	91,5	-77,1	2274,7
105	24,7	91,1	-76,8	1118,8
110	27,0	90,4	-76,3	-23,8
115	29,3	89,4	-75,4	-1134,9
120	31,6	88,2	-74,3	-2198,7
125	33,8	86,8	-73,0	-3201,2
130	36,1	85,1	-71,4	-4130,4
135	38,4	83,2	-69,6	-4976,3
140	40,7	81,2	-67,7	-5731,0
145	43,1	79,0	-65,5	-6388,4
150	45,4	76,6	-63,2	-6944,8
155	47,8	74,0	-60,7	-7398,2
160	50,2	71,3	-58,2	-7748,6
165	52,6	68,5	-55,5	-7997,6
170	54,9	65,6	-52,7	-8148,5
175	57,2	62,6	-49,9	-8206,2
180	59,5	59,5	-47,0	-8176,1
185	61,7	56,3	-44,2	-8065,1
190	63,8	53,1	-41,2	-7880,1
195	65,8	49,8	-38,3	-7628,4
200	67,6	46,5	-35,5	-7317,4
205	69,4	43,2	-32,6	-6953,9
210	70,9	39,8	-29,8	-6544,3
215	72,3	36,4	-27,0	-6094,0
220	73,5	33,0	-24,3	-5607,8
225	74,4	29,6	-21,6	-5089,0

230	75,1	26,1	-18,9	-4540,0
235	75,5	22,6	-16,2	-3961,8
240	75,6	19,0	-13,5	-3354,1
245	75,4	15,3	-10,8	-2715,0
250	74,8	11,5	-8,1	-2041,5
255	73,8	7,4	-5,2	-1328,4
260	72,3	3,2	-2,2	-569,3
265	70,3	-1,4	1,0	244,5
270	67,6	-6,3	4,4	1123,4
275	64,3	-11,7	8,2	2080,0
280	60,1	-17,6	12,5	3129,1
285	54,9	-24,3	17,3	4287,6
290	48,5	-31,9	22,9	5573,4
295	40,7	-40,6	29,5	7004,4
300	31,0	-50,8	37,4	8595,0
305	19,3	-62,7	46,8	10349,6
310	4,9	-76,8	58,2	12251,0
315	-12,8	-93,6	72,2	14239,3
320	-34,4	-113,6	89,2	16175,8
325	-60,7	-137,2	109,7	17787,3
330	-92,0	-164,8	133,9	18592,6
335	-128,3	-195,6	161,4	17843,4
340	-168,0	-227,7	190,1	14586,3
345	-206,9	-256,1	215,6	8058,9
350	-237,9	-273,4	230,7	-1424,5
355	-252,3	-271,1	227,7	-11606,7
360	-245,0	-245,0	203,5	-18912,0

Tabela 14-Aceleração angular das barras do mecanismo

θ_2	a_3	a_5	a_6	$R..7$
0	6160,5	-29812,6	34798,3	-11366289,7
5	3923,6	-23156,1	29991,0	-5787913,1
10	1405,4	-16752,9	23046,2	-1735084,5
15	-600,0	-11779,5	16366,9	349981,5
20	-1869,5	-8425,6	11476,9	1096898,8
25	-2510,3	-6384,7	8697,5	1198222,4
30	-2709,4	-5263,1	7646,6	1061428,8
35	-2624,0	-4742,7	7760,6	862567,6
40	-2360,6	-4602,5	8554,0	659807,6
45	-1984,1	-4698,3	9684,1	464576,2
50	-1530,9	-4937,2	10932,8	273897,4
55	-1019,7	-5258,6	12168,1	82463,4
60	-457,4	-5621,6	13311,2	-113734,8
65	156,0	-5997,1	14312,9	-316742,4
70	825,9	-6362,8	15139,5	-526794,0
75	1561,2	-6699,7	15764,1	-742573,6
80	2374,4	-6990,3	16162,8	-961402,2
85	3280,9	-7217,1	16312,4	-1179346,9
90	4299,5	-7360,9	16189,8	-1391281,1
95	5452,1	-7400,2	15771,5	-1590922,3
100	6764,7	-7310,5	15034,1	-1770861,0
105	8267,3	-7062,7	13954,1	-1922588,9
110	9994,2	-6623,3	12508,9	-2036532,3
115	11983,9	-5953,2	10677,0	-2102101,8
120	14278,5	-5007,6	8439,9	-2107784,5
125	16922,3	-3736,6	5783,4	-2041323,1
130	19958,7	-2086,8	2701,5	-1890055,5
135	23425,9	-3,8	-799,7	-1641522,6
140	27349,3	2561,7	-4695,7	-1284475,3
145	31731,2	5646,0	-8935,5	-810414,1
150	36538,4	9260,7	-13434,0	-215731,7
155	41688,0	13378,3	-18064,7	495645,5
160	47035,6	17918,3	-22656,8	1309528,8
165	52371,6	22736,8	-27001,5	2199468,4
170	57430,9	27627,3	-30869,3	3126605,4
175	61919,7	32336,0	-34039,6	4042394,2
180	65557,5	36593,9	-36336,6	4894432,7
185	68124,5	40158,8	-37661,4	5634318,8
190	69498,5	42854,2	-38009,6	6225273,6
195	69670,0	44594,1	-37466,4	6647092,0
200	68730,9	45385,1	-36184,1	6897062,0
205	66845,3	45309,7	-34348,4	6987172,4
210	64212,2	44498,4	-32147,6	6939177,8
215	61033,6	43102,1	-29748,8	6779344,2
220	57491,6	41268,9	-27286,5	6534169,0
225	53737,1	39130,4	-24859,1	6227586,1

230	49886,7	36794,9	-22532,2	5879569,3
235	46025,2	34346,2	-20344,6	5505765,9
240	42210,5	31845,7	-18314,5	5117747,9
245	38479,6	29335,6	-16445,9	4723552,3
250	34853,8	26842,8	-14732,8	4328292,3
255	31343,3	24382,0	-13162,8	3934715,2
260	27951,0	21958,4	-11720,0	3543644,1
265	24675,2	19569,9	-10385,7	3154279,5
270	21511,9	17208,5	-9140,2	2764344,7
275	18456,9	14861,1	-7962,3	2370061,0
280	15507,0	12509,6	-6829,3	1965920,5
285	12662,4	10131,0	-5716,9	1544197,2
290	9927,9	7696,5	-4597,2	1094092,5
295	7316,3	5170,6	-3437,8	600341,9
300	4851,3	2509,1	-2198,6	41023,5
305	2572,3	-342,4	-827,8	-615796,4
310	541,0	-3449,9	742,7	-1416972,7
315	-1151,2	-6891,1	2605,4	-2430840,7
320	-2375,9	-10749,1	4884,7	-3754118,6
325	-2965,4	-15094,6	7740,9	-5513446,3
330	-2729,1	-19940,9	11359,3	-7844692,6
335	-1511,5	-25150,7	15898,0	-10811582,3
340	675,1	-30283,6	21351,4	-14205958,0
345	3447,9	-34435,3	27302,8	-17234648,7
350	5925,6	-36289,3	32651,6	-18408135,3
355	7008,9	-34720,8	35665,4	-16339721,2
360	6160,5	-29812,6	34798,3	-11366289,7