

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUCAS YEGMAN DOS SANTOS**

**MODELAGEM PADRÃO A AR DE MOTORES A CINCO TEMPOS COM  
IGNIÇÃO POR CENTELHA COM TEMPO FINITO DE ADIÇÃO DE  
CALOR (FTHA)**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2019**

**LUCAS YEGMAN DOS SANTOS**

**MODELAGEM PADRÃO A AR DE MOTORES A CINCO TEMPOS COM  
IGNIÇÃO POR CENTELHA COM TEMPO FINITO DE ADIÇÃO DE  
CALOR (FTHA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Christian Naaktgeboren

**GUARAPUAVA**

**2019**

## TERMO DE APROVAÇÃO

MODELAGEM PADRÃO A AR DE MOTORES A CINCO TEMPOS COM IGNIÇÃO  
POR CENTELHA COM TEMPO FINITO DE ADIÇÃO DE CALOR (FTHA)

LUCAS YEGMAN DOS SANTOS

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 11 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Dr. Christian Naaktgeboren  
Prof.(a) Orientador(a)

---

Prof. Dr. Sergio Dalmás  
Membro Da Banca

---

Prof. Dr. Renan Manozzo Galante  
Membro Da Banca

---

Aldo Przybysz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Christian Naaktgeboren, pela sua orientação, seu tempo disponível para me ajudar a desenvolver esse modelo, pelo seu apoio e pelo conhecimento adquirido através desse TCC que com certeza será de grande valor e levarei para o resto da minha vida.

Aos meus pais, Amauri dos Santos e Maria de Lourdes Ribeiro dos Santos, que sempre me incentivaram com a escolha de graduação que fiz, me apoiaram com todo amor e carinho, e com suporte financeiro sempre que precisei.

A Universidade Tecnológico Federal do Paraná Campus Guarapuava com todo o corpo docente, onde consegui adquirir muito conhecimento e que me ajudou a concluir essa graduação.

## RESUMO

DOS SANTOS, Lucas Yegman. **Modelagem Padrão a Ar de Motores a Cinco Tempos com Ignição por Centelha com Tempo Finito de Adição de Calor (FTHA)**. 2019.99. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

Com a crescente demanda energética atual, existe a necessidade de desenvolver maneiras mais eficientes de se converter as relativamente abundantes fontes de calor em trabalho. Para os motores de combustão interna existem várias tecnologias promissoras nesse mercado dentre elas o motor a cinco tempos, cujo objetivo é obter eficiências energéticas maiores que as dos motores tradicionais de quatro tempos predominantes no mercado, através da expansão estendida dos gases de escape em um quinto tempo, no próprio motor. Modelos de ciclo motores a cinco tempos são ainda escassos em razão de sua invenção ser relativamente recente. A Modelagem de tempo-finito de adição de calor (FTHA) é uma técnica recente de modelagem de ciclos motores Otto que incorpora importantes parâmetros construtivos dos motores enquanto mantém a simplicidade de uma modelagem padrão a ar. Este trabalho propõe aliar a modelagem de tempo-finito de adição de calor aos casos de motores a cinco tempos.

**Palavras-Chave:** Motor a 5 tempos, simulação, padrão a ar, tempo finito.

## ABSTRACT

DOS SANTOS, Lucas Yegman. **Air-Standard Modeling of Spark-Ignited Five-Stroke Engines with Finite-Time Heat Addition (FTHA) Model.** 2019.99. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

With the current increasing demand for energy, there is a need for the development of more efficient forms of conversion between the relatively abundant heat sources into work. Several promising internal combustion engine technologies currently exist, among which the 5-stroke internal combustion engine, whose objective is to obtain greater thermal efficiencies with respect to the now ubiquitous four-stroke engines, through the extended expansion of the exhaust gases in a fifth stroke inside the engine block. 5-stroke heat engine models are relatively scarce in the literature due to the recent invention of such engine type. Finite-time heat addition (FTHA) modeling is a recent technique for Otto engines that allows for the engine's main parameters to be accounted for while retaining the simplicity of air-standard modeling. This work proposes to apply finite-time heat addition modeling onto five-stroke heat engines.

**Keywords:** 5-Stroke heat engine, simulation, air-standard, finite-time.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do funcionamento do ciclo Otto real com gráfico PV do ciclo .....	21
Figura 2 - Ilustração do funcionamento do ciclo Otto ideal com gráfico PV do ciclo .....	22
Figura 3 - Ilustração motor 5 tempos com 3 cilindros. 13 e 14:coletores de admissão,35: bicos injetores, 8 e 10: válvulas de admissão, 9 e 11: válvulas para a expansão estendida, 7: é a válvula de escape, 19: sistema de escapamento. ....	23
Figura 4 - Sequência de funcionamento motor 5 tempos, na imagem a esquerda o cilindro 2 realiza o tempo de admissão o cilindro 3 realiza o tempo de expansão e o cilindro 1 realiza descarga dos gases, na imagem a direita, cilindro 2 realiza o tempo de compressão, o cilindro 3 realiza o tempo de descarga para o cilindro de baixa pressão, e o cilindro 1 realiza a expansão estendida dos gases recebidos do cilindro 3. ....	24
Figura 5 - Sequência de funcionamento motor 5 tempos, na imagem a esquerda o cilindro 2 realiza o tempo de expansão o cilindro 3 realiza o tempo de admissão e o cilindro 1 realiza o tempo de descarga dos gases, na imagem a direita, o cilindro 2 realiza o processo de descarga dos gases para o cilindro de baixa pressão, o cilindro 3 realiza o processo de compressão e o cilindro 1 realiza a expansão estendida dos gases recebidos pelo cilindro 2. ....	24
Figura 6 - Diagrama da estrutura principal do funcionamento do motor 5 tempos, onde a seta preta indica o fluxo de massa .....	26
Figura 7 - Resultado das eficiências térmicas do motor 5 tempos a uma rotação de 1000 rpm e torque obtido de 58 Nm.....	27
Figura 8 - Resultado das eficiências térmicas do motor 5 tempos a uma rotação de 2600 rpm e torque obtido de 165 Nm.....	28
Figura 9 - Layout de um motor 5 tempos com um turbocompressor, onde (1) entrada de ar, (2) ar comprimido, (3) passagem dos gases queimados para a expansão estendida, (4) gases de queima escoando para a turbina, (5) passagem secundaria para excesso de gases controlada por uma válvula de alívio e (6) gases queimados após a passagem pela turbina. ....	29
Figura 10 - Algoritmo 4, onde ele demonstra a solução para o problema de adição de calor isocórica e também para a precisão do coeficiente politrópico e para o trabalho realizado sobre o sistema. ....	35
Figura 11 -Numeração dos Cilindros do Motor 5 tempos.....	36
Figura 12 - Comparação entre os Cilindros de 4 e 5 tempos. ....	47
Figura 13 - Diagrama P-V do cilindro 1 escala logarítmica. ....	49
Figura 14 - Diagrama P-V do cilindro 2. ....	50
Figura 15 - Diagrama P-V cilindro 3 escala logarítmica. ....	51
Figura 16 - Diagrama P-V do cilindro 1 durante todo o processo em escala logarítmica. ....	52
Figura 17 - Diagrama P-V cilindro 2 durante todo o processo.....	52
Figura 18 - Diagrama P-V do cilindro 3 durante todo o processo em escala logarítmica. ....	53

Figura 19 - Trabalho dos processos discretos produzido pelos cilindros em função do ângulo do virabrequim.....	54
Figura 20 - Trabalho Acumulado dos Cilindros. ....	55
Figura 21 - Trabalho total acumulado do motor 5 tempos.....	56
Figura 22 - Diagrama P-V do cilindro 1 para diferentes valores de $\phi$ .....	57
Figura 23 - Diagrama P-V do cilindro 2 para diferentes valores de $\phi$ .....	57
Figura 24 - Diagrama P-V do cilindro 3 para diferentes valores de $\phi$ .....	58
Figura 25 - Massa de ar no cilindro 1 durante o processo de admissão. ....	59
Figura 26 - Pressão no Cilindro 1 para diferentes valores de $\lambda$ .....	60
Figura 27 - Pressão no cilindro 2 para diferentes valores de $\lambda$ . ....	61
Figura 28 - Pressão no cilindro 3 para diferentes valores de $\lambda$ . ....	61
Figura 29 - Trabalho Produzido no cilindro 2 para diferentes valores de $\lambda$ . ....	63
Figura 30 - Trabalho acumulado no cilindro 2 para diferentes valores de $\lambda$ . ....	63
Figura 31 - Trabalho consumido acumulado do cilindro 1 para diferentes valores de $\lambda$ . .....	64
Figura 32 - Trabalho total acumulado para diferentes valores de $\lambda$ . ....	65



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físicas do motor 5 tempos utilizado para realização das simulações. ....	26
Tabela 2 - Características do motor a cinco tempos que será simulado .....	30
Tabela 3 - Informações geométrica do motor 5 tempos utilizada para os testes .....	31
Tabela 4 - Comparação da eficiência e consumo obtidos entre um motor cinco tempos de 750cc e um motor de quatro tempos de 1200 cc .....	31
Tabela 5 - Variáveis geométricas do motor 5 tempos .....	36
Tabela 6 - Parâmetros Termodinâmicos .....	39
Tabela 7 - Variáveis do processo .....	40
Tabela 8 - Subscritos dos Parâmetros do modelo .....	41

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FTHA	Finite Time Heat Addition (tradução: tempo finito de adição de calor)
PMS	Ponto Morto Superior.
PMI	Ponto Morto Inferior.

## LISTA DE SIMBOLOS

A	área seção transversal da válvula, m <sup>2</sup>
cp	calor específico a pressão constante, kJ/kg·K
cs	velocidade do som, m/s
cv	calor específico a volume constante, kJ/kg·K
D	diâmetro do cilindro
h	entalpia específica, kJ/kg
L	comprimento da biela, m
m	massa, kg
Ma	número de Mach
n	coeficiente politrópico
N	rotação do motor
NPA	Número de processos em 180 <sup>o</sup> graus do virabrequim.
P	pressão, kPa
q	calor específico adicionado ao sistema, kJ/kg
Q	calor adicionado ao sistema, kJ
r	razão entre duas variáveis
R	raio da manivela do virabrequim, m
rc	razão de compressão
S	curso do pistão, m
T	temperatura, K
$\Delta tc$	tempo ocorrência da ignição, s
$\Delta tp$	tempo de duração do processo, s
u	energia interna específica, kJ/kg
U	energia interna total, kJ
v	volume específico, m <sup>3</sup> /kg
V	volume, m <sup>3</sup>

VV	válvula do motor
w	trabalho específico, kJ/kg
W	trabalho total, kJ
x	posição do pistão, m
y	fração acumulativa de calor
Z	número de cilindros

### Símbolos gregos

$\alpha$	ângulo do virabrequim, rad
$\gamma$	razão de calores específicos
$\delta$	ângulo de duração da queima, rad
$\Delta$	variação de algum parâmetro
$\epsilon_P$	tolerância de Pressão
$\epsilon_w$	tolerância de trabalho
$\eta$	eficiência termodinâmica
$\theta$	ângulo de ignição, rad
$\lambda$	razão entre diâmetros do cilindro 2 e 1
$\phi$	diâmetro das válvulas, m
$\omega$	velocidade angular do virabrequim, rad

### Subscritos

1	parâmetro relacionado ao cilindro 1
12	parâmetro que sai do cilindro 1 para o cilindro 2
2	parâmetro relacionado ao cilindro 2
2a	parâmetro que sai do cilindro 2 para a atmosfera

3	parâmetro relacionado ao cilindro 3
32	parâmetro que sai do cilindro 3 para o cilindro 2
a	parâmetro relacionado a atmosfera
a1	parâmetro que sai da atmosfera para o cilindro 1
a3	parâmetro que sai da atmosfera para o cilindro 3
i	número de iterações para processos
k	número do cilindro
LR	variável relacionada ao mecanismo biela-manivela
DS	variável relacionada a diâmetro e curso do cilindro
d	deslocado
min	mínimo
max	máximo

### **Sobrescritos**

j	número de iterações para expoente politrópico
k	número de iterações para ajuste de variação de massa

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>18</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>20</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
4.1. DESCRIÇÃO DE MOTORES CICLO OTTO .....	21
4.1.1. Descrição de Motor Ciclo Otto Ideal .....	22
4.2. DESCRIÇÃO DE MOTOR 5 TEMPOS COM 3 CILINDROS .....	22
4.2.1. Estudos Prévios.....	25
4.2.1.1. Estudo realizado pelo LI; WANG; ZHENG (2016).....	25
4.2.1.2. Estudo realizado pelo KÉROMNÈS et al. (2014).....	28
4.2.1.3. Estudo realizado pelo MURUGADOSS; MODI; BANSAL (2016).....	30
4.3. DESCRIÇÃO DO FTHA .....	32
<b>5. DESCRIÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>36</b>
5.1. VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DO MODELO .....	36
5.2. PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO MODELO .....	39
5.2.1. Símbolos dos parâmetros termodinâmicos do modelo .....	39
5.2.2. Subscritos dos parâmetros termodinâmicos do modelo .....	41
5.3. BALANÇO DE ENERGIA NOS CILINDROS.....	41
5.4. DIVISÃO DOS PROCESSOS .....	46
5.5. VALIDAÇÃO DO MODELO.....	46
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
6.1. DIAGRAMAS P-V, TRABALHO PRODUZIDO E EFICIÊNCIA.....	48
6.2. INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO DAS VÁLVULAS NA EFICIÊNCIA DO MOTOR 5 TEMPOS .....	56
6.3. INFLUÊNCIA NA ESCOLHA DO VALOR DE $\lambda$ NA EFICIÊNCIA DO MOTOR 5 TEMPOS.....	60
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A – BIBLIOTECA DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DO MOTOR .....</b>	<b>69</b>

<b>APÊNDICE B – BIBLIOTECA DA MODELAGEM DO GÁS .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE C – CODIGO MOTOR 5 TEMPOS EM REGIME PERIÓDICO PERMANENTE .....</b>	<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, os avanços tecnológicos melhoraram a qualidade de vida do ser humano, onde cada vez mais as máquinas fazem os serviços pelas pessoas, mudando o perfil de habilidades exigidas dos profissionais. Segundo BARROS (2010), a energia é fundamental para o desenvolvimento da sociedade moderna e a sua demanda vem aumentando. O Brasil segue também essa tendência no qual a demanda energética vem aumentando cada vez mais (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007), com isso também aumenta a demanda por trabalho, ou seja, a conversão de calor em trabalho mecânico, sendo assim é necessário criar novas tecnologias que sejam mais eficientes em realizar essa conversão de calor em trabalho portanto sendo mais eficientes termicamente, para que se possa atender essa crescente demanda, entre elas as tecnologias em motores a combustão interna.

Dentre as mais variadas invenções realizadas para aumentar a eficiência dos motores, existe o modelo de motor de combustão interna de 5 tempos, concebido por (SCHMITZ, 2003) o qual visa maior eficiência térmica.

Como o motor 5 tempos é um conceito relativamente recente, ele possui um diferencial que é a expansão estendida, em que os gases queimados dos cilindros de 4 tempos expandem-se em um outro cilindro de diâmetro maior antes de serem escapados para a atmosfera produzindo, assim, trabalho adicional em relação aos motores de 4 tempos.

Para a modelagem computacional de motores, há um método recente, chamado FTHA — finite time heat addition — (NAAKTGEBOREN, 2017) no qual a adição de calor é realizada em um tempo finito evitando adição de calor isocórico como assumido no modelo de ciclo Otto ideal. O FTHA é um método de modelagem simples que utiliza a termodinâmica de substância pura, e que considera mais parâmetros em relação a um ciclo Otto ideal, aproximando-se do comportamento do motor real.



Em razão do FTTHA ser recente, imagina-se que estudos de modelagem de motor 5 tempos com FTTHA sejam inéditos, assim, este trabalho de conclusão de curso propõe uma simulação de um motor 5 tempos de três cilindros utilizando modelagem de FTTHA.

## 2. OBJETIVOS GERAIS

O intuito desse TCC é modelar motores a 5 tempos com a configuração de 3 cilindros utilizando conceitos de FTTHA.

### 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

#### 1. Revisão Bibliográfica.

Revisar conteúdos publicados a respeito de motores a 5 tempos e FTTHA.

#### 2. Planejamento da Pesquisa.

Para a construção deste trabalho será realizada adaptações dos conceitos de FTTHA para que se enquadre na modelagem de motores a 5 tempos, onde para a realização do balanço de energia devem ser levado em conta que o processo envolve dois volumes de controle de sistemas abertos com troca de massa, e até dois movimentos de pistão ou seja duas interações de trabalho e liberação de calor.

#### 3. Elaboração do Modelo.

Será realizada um estudo a respeito do FTTHA e modificações para que possa ser aplicada aos motores cinco tempos com configuração de três cilindros.

#### 4. Implementação Computacional do Modelo.

Para a aplicação das equações obtidas, será utilizado software de programação para realizar os testes do modelo, onde a linguagem de programação será o Julia.

#### 5. Validação do Modelo.

Para a validação do modelo, serão realizadas comparações com modelos mais simples de solução conhecida.

## 6. Teste de sensibilidade de parâmetros.

Após a implementação e validação do modelo, serão realizados testes de sensibilidade de parâmetros.

## 7. Documentação e Discussão dos Resultados.

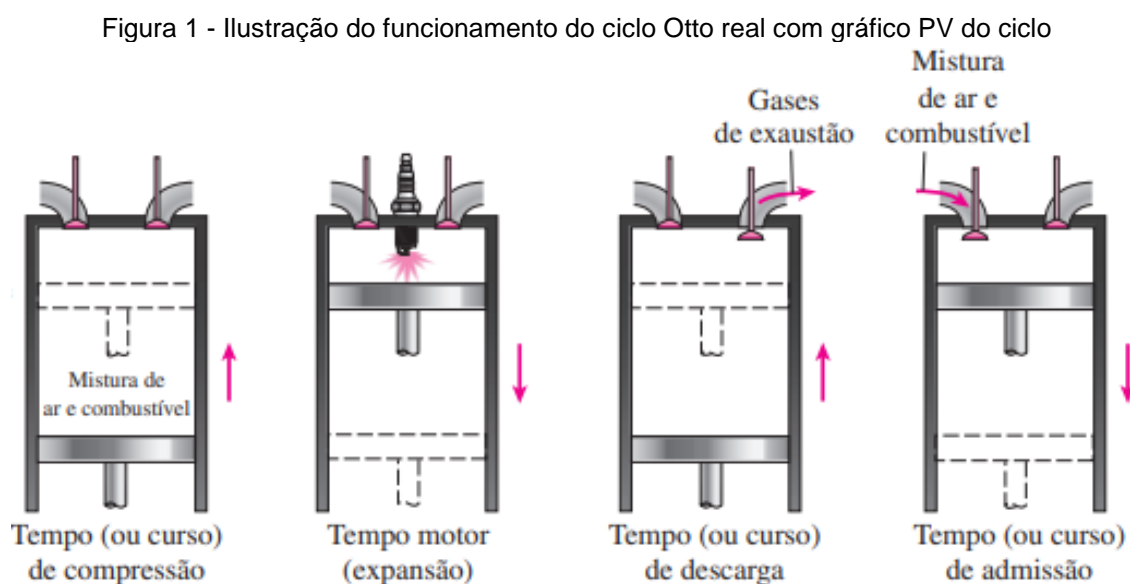
### **3. JUSTIFICATIVA**

Como mencionado na introdução a eficiência energética é uma necessidade devido a demanda atual de energia na forma de trabalho, bem como estudos dessa configuração de motor com FTHA são aparentemente inéditos.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. DESCRIÇÃO DE MOTORES CICLO OTTO

Atualmente a maioria dos motores a gasolina funcionam através do ciclo Otto.” Ele deve seu nome a Nikolaus A. Otto, que criou um bem sucedido motor de quatro tempos em 1876, na Alemanha, usado o ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862” (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 494). Este ciclo é recomendado em motores de ignição por centelha. Basicamente para esse ciclo funcionar o sistema biela manivela necessita fazer duas revoluções, ou seja, dois ciclos mecânicos para realizar um ciclo termodinâmico. O ciclo termodinâmico é composto por quatro etapas, admissão, compressão, expansão e descarga, ilustrado na Figura 1.



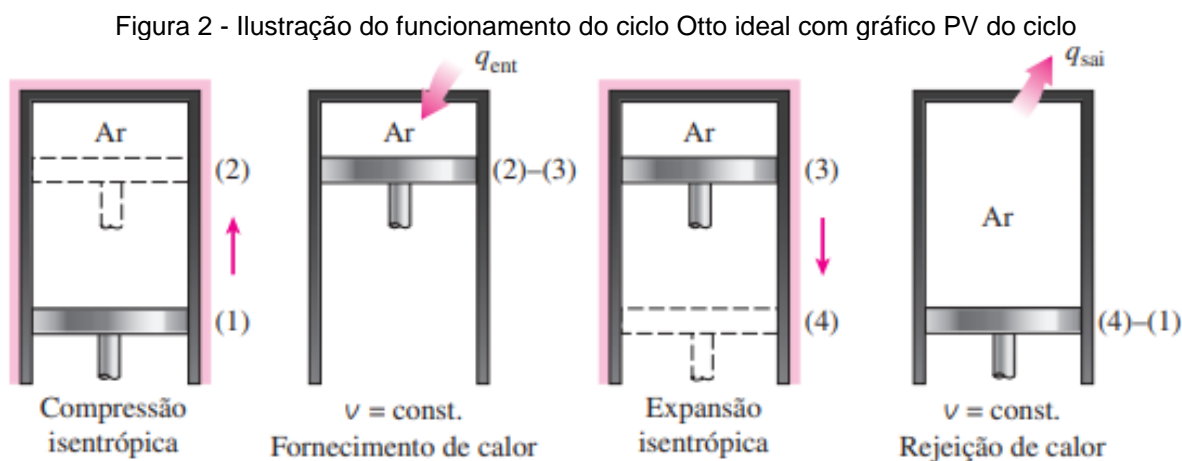
Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 494) modificado

No tempo da admissão a válvula de admissão se abre e a mistura ar combustível entra pela câmara de combustão; no tempo de compressão a válvula se fecha e a mistura ar combustível começa a ser comprimida; no tempo de expansão acontece a centelha através da vela de ignição fazendo com que a mistura ar combustível em alta temperatura exploda empurrando o pistão para baixo realizando a expansão; e no tempo da expulsão o gases geradas da queima são expelidos quando a válvula de escape se abre assim

finalizando os 4 tempos. Em um motor de ciclo Otto de combustão interna real existe questões mais complexas para que seu funcionamento seja realizado de forma efetiva como a qualidade do combustível, tipo de injeção de combustível, relação estequiométrica da mistura ar-combustível que entra na câmara de combustão, abertura do corpo de borboleta, rotação do motor, avanço de ignição (FERNANDES, 2015) (KASPER, 2003).

#### 4.1.1. Descrição de Motor Ciclo Otto Ideal

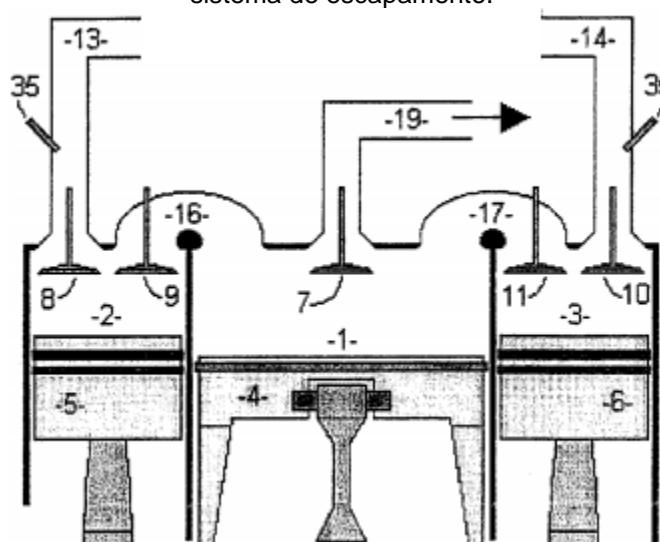
O ciclo Otto ideal é uma simplificação do funcionamento dos motores para que se possa utilizar apenas os princípios básicos da termodinâmica e a utilização de ciclo de potência a gás ou seja o fluido de trabalho sempre permanece no estado gasoso, onde o sistema de funcionamento desse ciclo é mostrado na Figura 2.



#### 4.2. DESCRIÇÃO DE MOTOR 5 TEMPOS COM 3 CILINDROS

Em termos gerais, um motor de 5 tempos com a configuração de 3 cilindros em linha funciona com duas configurações de cilindro, dois cilindros de alta pressão que possuem tamanhos iguais e operam em ciclo de motor de 4 tempos com ignição por centelha e um cilindro de baixa pressão com diâmetro e curso maiores que os cilindros de alta pressão, que realiza a expansão estendida. O arranjo é ilustrado na Figura 3.

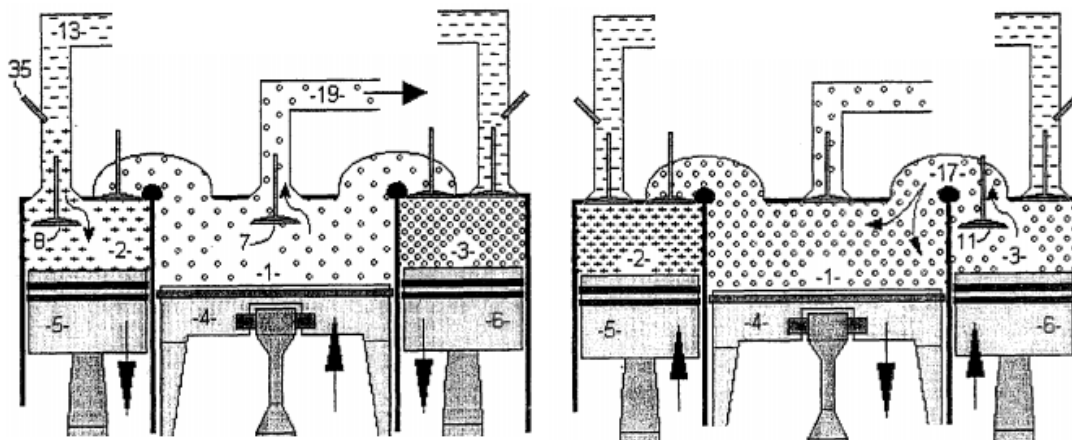
Figura 3 - Ilustração motor 5 tempos com 3 cilindros. 13 e 14:coletores de admissão,35: bicos injetores, 8 e 10: válvulas de admissão, 9 e 11: válvulas para a expansão estendida, 7: é a válvula de escape, 19: sistema de escapamento.



Fonte:(SCHMITZ, 2003, p. 2) modificado.

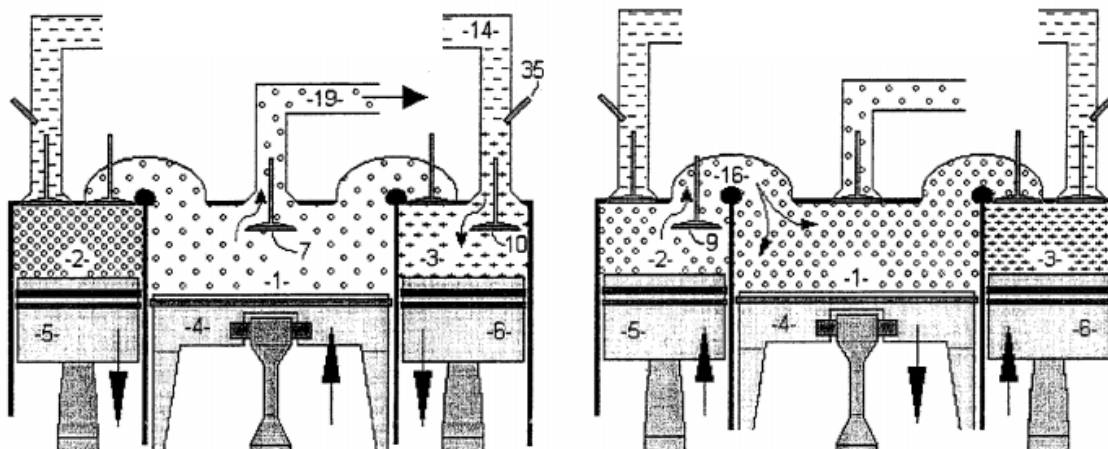
Conforme ilustrado na figura 1, o ar vem pelos coletores de admissão (13,14) onde é injetado o combustível através dos bicos injetores (35). Os cilindros (2,3) são de alta pressão em que apenas recebem a mistura ar combustível através das válvulas (8,10) respectivamente para a câmara de combustão e realizam o ciclo de 4 tempos por ignição por centelha. O cilindro (1) apenas realiza uma expansão estendida dos produtos de queima que estão em alta pressão nos cilindros (2,3) onde recebem os gases através da abertura das válvulas (9,11) e após a expansão estendida a válvula (7) se abre para que os gases sejam expelidos para o sistema de escapamento, ou seja mesmo possuindo 3 cilindros apenas um deles expelle os gases para o sistema de escape. Para que esse motor funcione de forma harmoniosa é necessária uma certa sequência de funcionamento ilustrada pelas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Sequência de funcionamento motor 5 tempos, na imagem a esquerda o cilindro 2 realiza o tempo de admissão o cilindro 3 realiza o tempo de expansão e o cilindro 1 realiza descarga dos gases, na imagem a direita, cilindro 2 realiza o tempo de compressão, o cilindro 3 realiza o tempo de descarga para o cilindro de baixa pressão, e o cilindro 1 realiza a expansão estendida dos gases recebidos do cilindro 3.



Fonte:(SCHMITZ, 2003, p. 3) modificado.

Figura 5 - Sequência de funcionamento motor 5 tempos, na imagem a esquerda o cilindro 2 realiza o tempo de expansão o cilindro 3 realiza o tempo de admissão e o cilindro 1 realiza o tempo de descarga dos gases, na imagem a direita, o cilindro 2 realiza o processo de descarga dos gases para o cilindro de baixa pressão, o cilindro 3 realiza o processo de compressão e o cilindro 1 realiza a expansão estendida dos gases recebidos pelo cilindro 2.



Fonte: (SCHMITZ, 2003, p. 4) modificado.



Os cilindros (2,3) funcionam com o ciclo de 4 tempos de ignição por centelha, com uma defasagem de  $360^\circ$  entre si assim, quando o cilindro (2) estiver no tempo de admissão o cilindro (3) estará no tempo de expansão conforme ilustrado na Figura 4, e quando o cilindro (2) estiver no tempo de compressão o cilindro (3) estará no tempo de descarga, conforme ilustrado na Figura 4, quando o cilindro (2) estiver no tempo de expansão o cilindro (3) estará no tempo de admissão conforme ilustrado na Figura 5 e quando o cilindro (2) estiver no tempo de descarga o cilindro (3) estará no tempo de compressão, conforme ilustrado na Figura 5. Através dessa defasagem entre os cilindros de alta pressão, o cilindro de baixa pressão funciona de tal maneira onde ele realiza a expansão estendida e a descarga dos gases provenientes de um cilindro, logo em seguida já efetua a expansão estendida de outro cilindro, assim evitando que haja momentos em que o cilindro de baixa pressão não realize trabalho ou a exaustão dos gases.

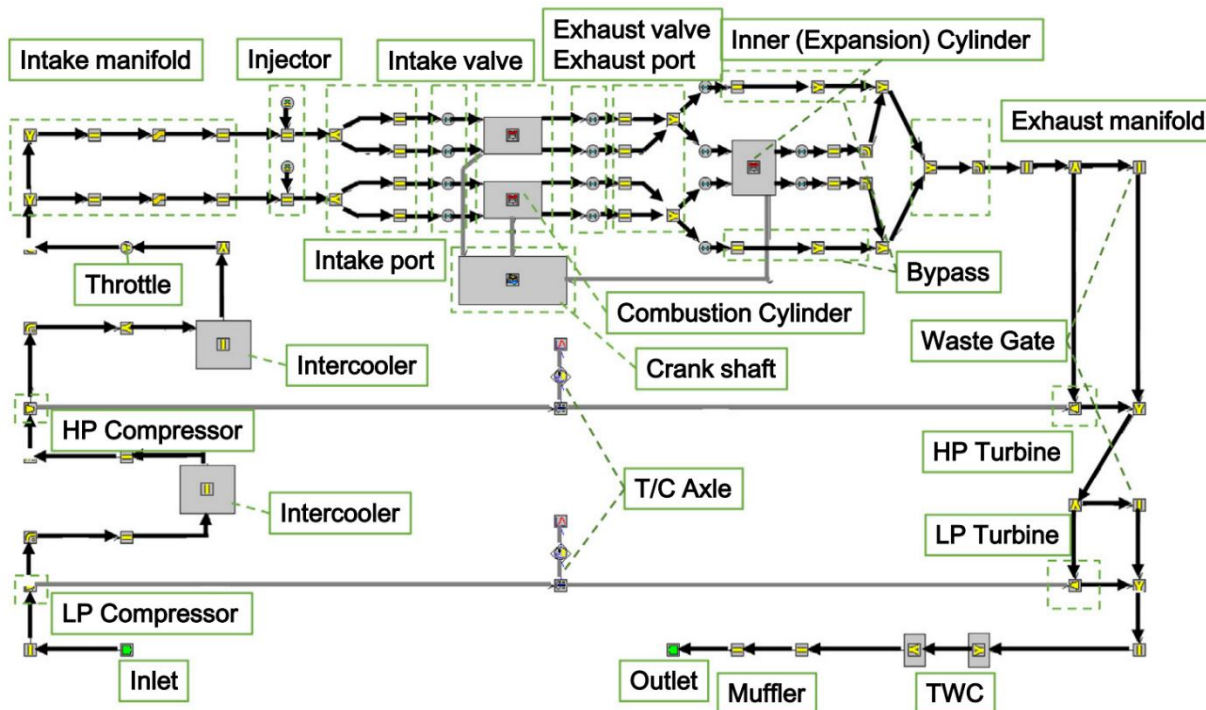
#### 4.2.1. Estudos Prévios

Alguns estudos encontrados na literatura que fazem um abordagem a respeito dos motores de 5 tempos são os de LI; WANG; ZHENG (2016), de KÉROMNÈS et al. (2014) e de MURUGADOSS; MODI; BANSAL (2016).

##### 4.2.1.1. Estudo realizado pelo LI; WANG; ZHENG (2016)

Neste estudo são comparados os ciclos Miller com o motor a cinco tempos em aplicações de downsized, ou seja, motores pequenos com turbocompressores. Para a sua modelagem do motor ele utilizou uma configuração de motor com duas turbinas operando em sequencial uma turbina de baixa pressão e outra turbina de alta pressão conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Diagrama da estrutura principal do funcionamento do motor 5 tempos, onde a seta preta indica o fluxo de massa



Fonte:(LI; WANG; ZHENG, 2016, p. 6)

onde as características físicas do motor são dadas pela Tabela 1.

Tabela 1- Características físicas do motor 5 tempos utilizado para realização das simulações.

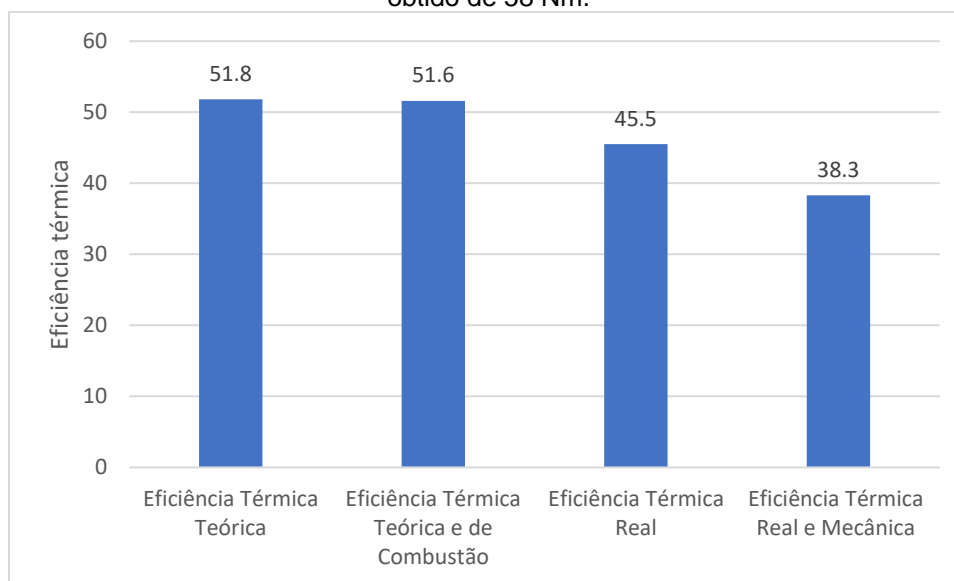
Engine Type	In-line 3 cylinders
Overall Expansion Ratio	13.8
Intake Boosting System	Two-stage turbochargers
Outer Cylinder	
Bore X Stroke	75.5 X 82 mm
Displacement	0.734L
Compressio Ratio	7
Inner Cylinder	
Bore X Stroke	110 X 86 mm
Displacement	0.817L
Expansion Ratio	30

Fonte: (LI; WANG; ZHENG, 2016, p. 6) modificado

Para realizar a sua simulação foi utilizado o software GT power, onde ele possui recursos específicos para simulação de motores e para construção da modelagem termodinâmica do motor. Para a modelagem da combustão foram utilizadas as fórmulas realizadas por BLIZARD; KECK, (1974), no qual descrevem o fenômeno Knock que acontece dentro do motor. Para cálculo da eficiência ele utiliza fórmulas para a eficiência da mistura química de combustão, eficiência térmica quando o calor é liberado em relação ao ângulo do virabrequim, eficiência térmica teórica, eficiência mecânica e eficiência térmica real onde seria a combinação de todas as eficiências anteriores.

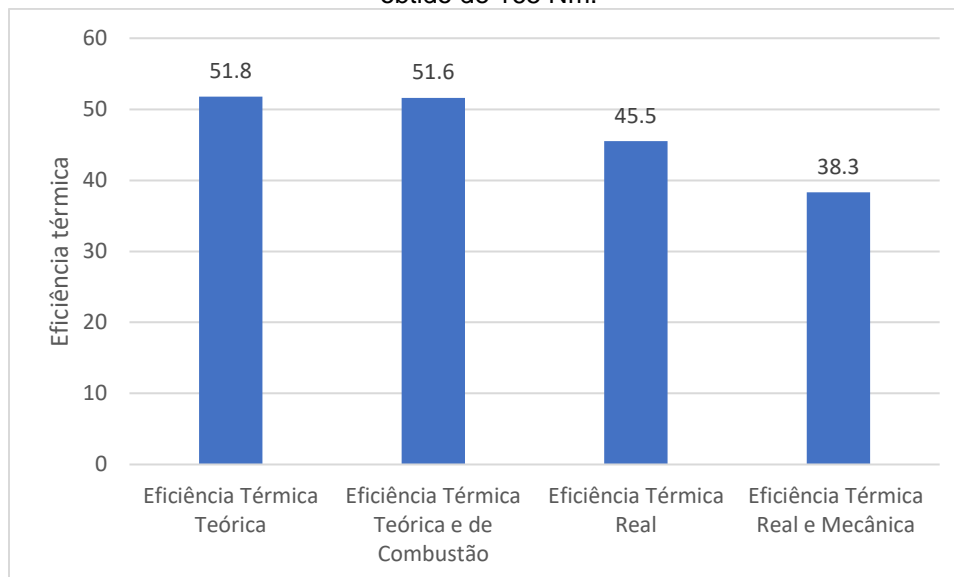
Após toda a formulação necessária para o motor os resultados obtidos estão descritos nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Resultado das eficiências térmicas do motor 5 tempos a uma rotação de 1000 rpm e torque obtido de 58 Nm.



Fonte: (LI; WANG; ZHENG, 2016) modificado.

Figura 8 - Resultado das eficiências térmicas do motor 5 tempos a uma rotação de 2600 rpm e torque obtido de 165 Nm.

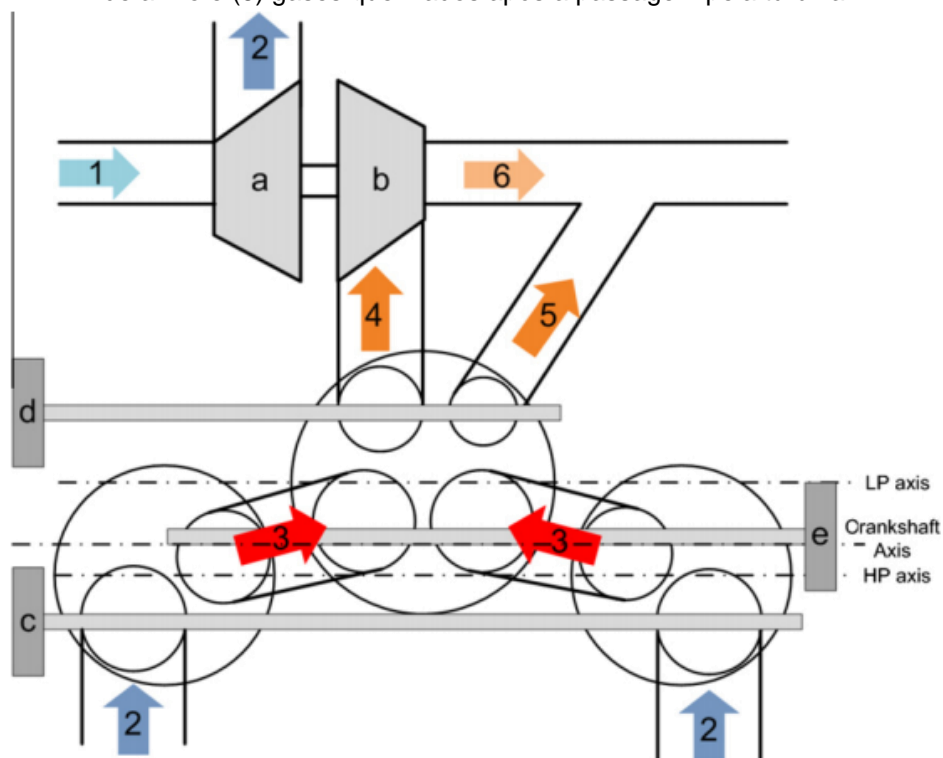


Fonte : (LI; WANG; ZHENG, 2016) modificado.

#### 4.2.1.2. Estudo realizado pelo KÉROMNÈS et al. (2014)

Neste estudo é analisado o motor a cinco tempos em uma aplicação de “range extenders” ou em uma tradução livre extensores de alcance, onde utiliza motores pequenos com a finalidade de carregar baterias que alimentam um motor elétrico. Para a realização dos testes ele utilizou um motor 5 tempos com um turbocompressor com o layout mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Layout de um motor 5 tempos com um turbocompressor, onde (1) entrada de ar, (2) ar comprimido, (3) passagem dos gases queimados para a expansão estendida, (4) gases de queima escoando para a turbina, (5) passagem secundária para excesso de gases controlada por uma válvula de alívio e (6) gases queimados após a passagem pela turbina.



Fonte: (KÉROMNÈS et al., 2014, p. 4)

onde as características físicas desse motor são determinadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do motor a cinco tempos que será simulado

High pressure cylyinders	
Displacement(cm <sup>3</sup> )	253
Volumetric compressio ratio	8:1
Stroke	64
Bore	71
Low pressure cylinder	
Displacement(cm <sup>3</sup> )	464
Volumetric compressio ratio	30:1
Stroke	80
Bore	85

Fonte: (KÉROMNÈS et al., 2014, p. 5) modificado

E para a simulação do motor, foi utilizado também o software GT Power.

#### 4.2.1.3. Estudo realizado pelo MURUGADOSS; MODI; BANSAL (2016)

Nesse estudo é modelado um motor a cinco tempos de 750cc, onde obteve um resultado de potência máxima de 40kw a 4000 rpm e o compara sua eficiência com um motor de quatro tempos de 1200cc, onde possui desempenho equivalente. Os dados da configuração do motor de cinco tempos utilizado e ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Informações geométrica do motor 5 tempos utilizada para os testes

Parameter	High Pressure Cylinder(HP)	Low Pressure Cylinder(HP)
Number of Cylinders	2	1
Displacement(cc)	300(150+150)	450
Bore(mm)	60	83
Stroke(mm)	53	83
Compressio ratio	7:1	17.7:1
Number of intake/exhaust valves	1/1	1/1
Diameter of intake/exhaust valves	21	45

Fonte:(MURUGADOSS; MODI; BANSAL, 2016, p. 6) modificado.

Como resultados do teste realizado, os autores obtiveram os seguintes resultados em relação ao motor 4 tempos como mostra na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação da eficiência e consumo obtidos entre um motor cinco tempos de 750cc e um motor de quatro tempos de 1200 cc

Load	Effective Torque(N-m)		Global Efficiency(%)		BSFC(gm/KWh)		Economy(%)
	4-Stroke	5-Stroke	4-Stroke	5-Stroke	4-Stroke	5-Stroke	5 stroke Vs 4 stroke
5	5.5	5.5	11.1	17.8	757.9	471.3	37.8
10	11.1	10.9	17.6	26.4	478.3	318.6	33.4
20	22.1	22.0	24.8	35.2	338.6	239.2	29.4
30	32.9	33.0	28.7	38.2	292.8	220.2	24.8
40	44.0	43.8	31.2	39.0	269.4	215.8	19.9
50	55.0	54.7	32.9	39.7	255.7	211.7	17.2
60	66.0	65.7	34.1	40.5	246.7	207.5	15.9
70	77.1	76.7	35.0	41.4	240.3	203.0	15.5
80	88.1	87.9	35.7	42.3	235.7	198.9	15.6
90	99.1	98.8	36.2	43.1	232.3	195.2	16.0
100	110.0	109.9	36.6	43.6	229.6	192.9	16.0

Fonte: (MURUGADOSS; MODI; BANSAL, 2016, p. 7) modificado

Mesmo mostrando os resultados obtidos, os autores constam que realizaram os testes em um ambiente virtual e não deixaram mais detalhes em relação a sua modelagem.

### 4.3. DESCRIÇÃO DO FTHA

Para a utilizar o método de FTHA de acordo com (NAAKTGEBOREN, 2017) primeiro é necessário dimensionar determinados componentes do mecanismo que envolve um motor de combustão interna. Primeiramente consideramos  $V_m$  o volume morto do cilindro, ou seja, o volume que representa no momento em que o pistão se encontra no ponto morto superior ou PMS, e  $V_t$  o volume máximo do cilindro, ou seja, quando o pistão se encontra no ponto morto inferior ou PMI, essas unidades em  $m^3$ . O curso que o pistão realiza desde o PMS até o PMI é dado pela variável  $S$  na unidade de  $m$ , o diâmetro do pistão é dado pela variável  $D$  em  $m$ , e o raio da manivela pela variável  $R$  em  $m$  e  $L$  seria o comprimento da biela na unidade de  $m$ . Com isso temos a relação  $r_{LR} = L/R$  onde ela sempre deve respeitar que  $r_{LR} > 1$  ou seja  $L > R$ .

Denotamos por  $V_{DU}$  o volume obtido do deslocamento do pistão do PMI para o PMS e  $r = V_t/V_m$  a razão de compressão do motor ou também conhecido por taxa de compressão do motor. Utilizamos  $Z$  como o número de cilindros do motor e  $V_d$  como volume total de deslocamento do motor. Com essas variáveis possuímos as seguintes equações.

$$S = 2R = \frac{4V_{du}}{\pi D^2}, V_{du} = V_t - V_m = \frac{\pi S}{4} D^2, r = \frac{V_t}{V_m} = 1 + \frac{V_{du}}{V_m}, V_d = ZV_{du} \quad (1)$$

Utilizando  $x$  como a posição do pistão que estará entre  $0 \leq x \leq S$  e utilizando  $\alpha$  como o ângulo do virabrequim obtêm-se a função posição  $x(\alpha)$ .

$$x(\alpha) = L \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2(\alpha)} \right) + R(1 - \cos(\alpha)) \quad (2)$$



Temos que  $V$  é o volume instantâneo para o sistema dado em  $m^3$  onde pode ser calculado pelas seguintes equações.

$$V = \frac{\pi x}{4} D^2 + V_m \quad (3)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \left[ L \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2(\alpha)} \right) + R(1 - \cos(\alpha)) \right] + V_m \quad (4)$$

Em relação a velocidade angular do virabrequim temos a variável  $\omega$  em rad/s,  $N$  a rotação do virabrequim em rpm,  $\theta$  como ângulo de ignição e  $\Delta t_c$  o tempo que ocorre a ignição em segundos e  $\delta$  como a duração angular da queima de combustível, sendo assim o ângulo em que a queima terminará é  $\alpha = \theta + \delta$ . Com isso temos as seguintes relações:

$$\alpha = \omega t, \quad \delta = \omega \Delta t_c \quad (5)$$

No momento de adição de calor, para que seja realizada através de um tempo finito é utilizada a seguinte fórmula:

$$q(\alpha) = q_{ent} y(\alpha) \quad (6)$$

onde  $q_{ent}$  é o calor total adicionado no sistema e  $y(\alpha)$  a fração acumulativa de calor em que é adicionado no sistema, onde é aproximada por uma função cossenoidal em que depende do ângulo virabrequim, dado por.

$$y(\alpha) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{para } \alpha < \theta \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\delta}(\alpha - \theta)\right) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta \\ 1 & \text{para } \alpha \geq \theta + \delta \end{array} \right\} \quad (7)$$

Como todo processo térmico este deve respeitar a primeira lei da termodinâmica, onde a variação de energia do sistema é dada pela adição de calor mais o trabalho que é realizado sobre o sistema. Para que saiba o estado durante todo o processo é preciso desfragmenta-lo em partes, afinal haverá momentos em que temos apenas compressão, outro momento terá compressão e adição de calor, outro momento haverá expansão e adição de calor e momentos onde haverá só expansão e para isso usamos as variáveis

$N_q$  e  $N_s$  onde são o número de processos de adição de calor e de processos politrópicos respectivamente, e com isso podemos discretizar a posição do pistão através do ângulo  $\alpha$  da seguinte maneira.

$$\alpha_i = \left\{ \begin{array}{ll} -\pi + i \frac{\theta + \pi}{N_s} & \text{para } 0 \leq i \leq N_s \\ \theta + (i - N_s) \frac{\delta}{N_q} & \text{para } N_s \leq i \leq N_s + N_q \\ \theta - \delta + (i - N_s - N_q) \frac{\pi - \theta - \delta}{N_s} & \text{para } N_s + N_q \leq i \leq 2 * N_s + N_q \end{array} \right\} \quad (8)$$

Através da discretização do alpha obtemos também o volume específico  $v_i = V(\alpha_i)/m$  durante o processo. E para os processos politrópicos quando o valor de  $n_i \neq 1$  o trabalho é dado pela seguinte fórmula:

$$w_i = \int_{v_i}^{v_{i+1}} C_i v^{-n_i} dv = \frac{P_i}{1 - n_i} \left( v_i - \frac{v_i^{n_i}}{v_{i+1}^{n_i-1}} \right) \quad (9)$$

Para a situação onde o  $n_i=1$  a fórmula do trabalho é dada por:

$$w_i = \int_{v_i}^{v_{i+1}} C_i v^{-1} dv = P_i v_i \ln \left( \frac{v_{i+1}}{v_i} \right) \quad (10)$$

Para que o ciclo funcione de maneira correta é necessário um processo iterativo para que se tenha uma boa precisão para os valores de  $n_i$  e consequentemente o valor de  $w_i$ , para calcular o  $n_i$  é utilizado:

$$n_i^j = \frac{\log \left( \frac{P_{i+1}^j}{P_i} \right)}{\log \left( \frac{v_i}{v_{i+1}^j} \right)} \quad (11)$$

onde  $j$  é o número de iterações necessárias para que consiga a tolerância necessária  $\epsilon_w$ . Outra questão é a de que pode ocorrer um sub-processo isocórico dependendo os valores de  $N_q$  e  $\theta$  e  $\delta$  onde o resultado entre os volumes específico se tornem e iguais e com isso  $\log(v_i/v_{i+1}) = 0$ . Nesse caso é considerado em que há uma adição de calor

isocórica em que não há trabalho. Para a solução de ambos os problemas é implementado o Algoritmo 4 mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Algoritmo 4, onde ele demonstra a solução para o problema de adição de calor isocórica e também para a precisão do coeficiente politrópico e para o trabalho realizado sobre o sistema.

---

Algoritmo 4. Resolução para  $w_i$ ,  $u_{i+1}$ , e  $n_i$

---

```

1:   se  $|v_i - v_{i+1}| \leq \varepsilon_v$  então
2:      $u_{i+1} \leftarrow u_i + q_i$ 
3:     determina  $T_{i+1}$  através do algoritmo 5 ou equação de estado
4:     determina  $P_{i+1}$  através da equação de estado
5:   senão {Processo politrópico}
6:      $j \leftarrow 0$ 
7:     Inicia  $n_i$ ,  $w_i$ ,  $u_{i+1}$ ,  $T_{i+1}$  e  $P_{i+1}$  como listas vazias
8:      $n_i^j \leftarrow 1 + R_{\text{gas}}/C_v(T_i)$ 
9:      $w_i^j \leftarrow$  equação (13) com  $n_i = n_i^j$ 
10:    enquanto  $j=0$  ou  $|w_i^{j+1} - w_i^j| \geq \varepsilon_w$  faça
11:       $u_{i+1}^j \leftarrow u_i + q_i + w_i^j$ , equação (9) com  $w_i = w_i^j$ 
12:      determina  $T_{i+1}$  através do algoritmo 5 ou equação de estado
13:      determina  $P_{i+1}$  através da equação de estado
14:      corrige  $n_i^{j+1}$  através da equação (14)
15:       $j \leftarrow j+1$ 
16:       $w_i^j \leftarrow$  equação (13) com  $n_i = n_i^j$ 
17:    fim
18:    {reverter das listas (consulte a linha 7) para valores convergentes}
19:    finalizar  $n_i$ ,  $w_i$ ,  $u_{i+1}$ ,  $T_{i+1}$  e  $P_{i+1}$  com último elemento de  $j$ 
20:  fim

```

---

Fonte: (NAAKTGEBOREN, 2017, p. 111) adaptado

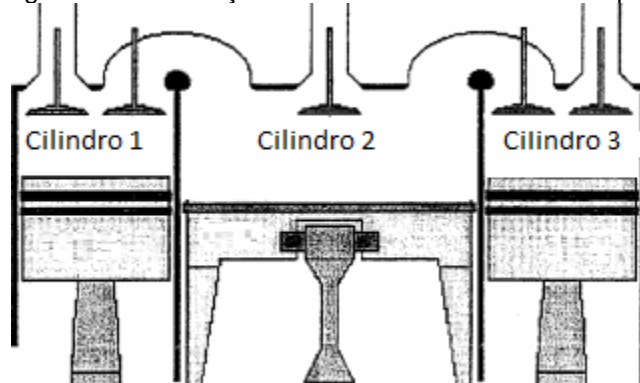
No algoritmo 4 é encontrado também um algoritmo 5 para determinar o valor da temperatura, basicamente o algoritmo 5 é a aplicação do método de Newton Raphson para estimar uma aproximação da temperatura  $T_{i+1}$  utilizando a definição de calor específico a volume constante que diz que  $c_v = du/dT$ .

## 5. DESCRIÇÃO DO MODELO

### 5.1. VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DO MODELO

O motor 5 tempos possui a configuração de 3 cilindros dos quais 2 são de alta pressão e o terceiro é de baixa pressão, numerados de 1 a 3 conforme a Figura 11.

Figura 11 -Numeração dos Cilindros do Motor 5 tempos.



Fonte:(SCHMITZ, 2003, p. 2) modificado.

Segue as seguintes variáveis do modelo, onde  $k \in \{1,2,3\}$ .

Variável	Descrição	Fórmula	Unidade
$S_k$	Curso do cilindro k	–	m
$D_k$	Diâmetro do cilindro k	–	m
$r_{DSk}$	Relação de diâmetro e curso do cilindro k	$D_k/S_k$	–
$V_{k \min}$	Volume Morto do Cilindro k	–	$m^3$
$V_{k d}$	Volume deslocado do Cilindro k	$\frac{\pi D_k^2}{4} S_k$	$m^3$

$V_{k \max}$	Volume total do Cilindro i	$V_{k d} + V_{k \min}$	$m^3$
$L_k$	Comprimento da biela do cilindro i	–	m
$R_k$	Raio do virabrequim do Cilindro i	–	m
$r_{LRk}$	Relação Biela Manivela do Cilindro i	$\frac{L_k}{R_k}$	-
$r_{Ck}$	Razão de Compressão no Cilindro i	$\frac{V_{k \max}}{V_{k \min}}$	-
$\alpha$	Ângulo do virabrequim em relação ao PMS do cilindro 1	–	rad
$N$	Rotação do Motor	–	rpm
$\omega$	Velocidade Angular do Motor	$\frac{2\pi N}{60}$	rad/s
$\Delta t_c$	Tempo de duração da adição de calor	–	s
$\theta$	Avanço de ignição do motor	–	rad
$\delta$	Duração da adição de calor	$\omega \Delta t_c$	rad
$\lambda$	Razão entre os diâmetros do cilindro 2 e 1	$\frac{D_2}{D_1}$	–
$\phi_1$	Diâmetro da válvula que liga a atmosfera aos cilindros 1 e 3	–	m
$\phi_2$	Diâmetro da válvula que liga os cilindros 1 e 3 ao cilindro 2	–	m
$\phi_3$	Diâmetro da válvula que liga o cilindro 2 a atmosfera	–	m
$A_1$	Área da válvula que liga a atmosfera aos cilindros 1 e 3	$\frac{\pi \phi_1^2}{4}$	$m^2$
$A_2$	Área da válvula que liga os cilindros 1 e 3 ao cilindro 2	$\frac{\pi \phi_2^2}{4}$	$m^2$

<b>A<sub>3</sub></b>	Área da válvula que liga os cilindros 1 e 3 ao cilindro 2	$\frac{\pi\phi_3^2}{4}$	m <sup>2</sup>
<b>VV</b>	Válvula do motor	–	–

Fonte: Autoria Própria

Como  $\lambda$  relaciona os diâmetros entre cilindro 1 e 2, logo com a razão entre seus volumes deslocados é obtido a seguinte equação:

$$\frac{V_{2d}}{V_{1d}} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = \lambda^2 \quad (12)$$

Se for considerado uma usinagem proporcional do cabeçote do cilindro 2 em relação ao cilindro 1 e 3, é assumido a equação:

$$\frac{V_{2min}}{V_{1min}} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = \lambda^2 \quad (13)$$

E uma vez que levando em conta a consideração que resultou na equação 13 e mais a equação 12 é obtida a mesma relação para os volumes máximos:

$$\frac{V_{2max}}{V_{1max}} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = \lambda^2 \quad (14)$$

Como os cilindros 1 e 3 são iguais, portanto, suas variáveis também são iguais. Devido as restrições geométricas do cabeçote do motor assumimos que os cursos dos pistões e a razão biela manivelas são os mesmos, logo:

$$S_1 = S_2 = S_3; R_1 = R_2 = R_3; L_1 = L_2 = L_3 \quad (15)$$

Os valores de  $\alpha$  para cada cilindro são dadas por:

$$\alpha_k = \alpha + (k - 1)\pi \quad p/k \in \{1,2,3\} \quad (16)$$

A posição do pistão durante o processo de funcionamento do motor é dada por  $x_i(\alpha)$  onde  $x$  varia entre  $0 \leq x_i \leq S_i$  ou seja do PMS até o PMI, dado através da função:

$$x_k(\alpha_k) = L_k \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R_k^2}{L_k^2} \sin^2(\alpha_k)} \right) + R_k(1 - \cos(\alpha_k)) \quad p/ k \in \{1,2,3\} \quad (17)$$

Acompanhando a posição do pistão no processo temos também o volume do cilindro dado por  $V_i(\alpha)$  onde varia entre  $V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$  onde  $i$  mostra qual cilindro se trata. Sua função é descrita por:

$$V_k(\alpha_k) = \frac{\pi D_k^2}{4} \left[ L_k \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R_k^2}{L_k^2} \sin^2(\alpha_k)} \right) + R_k(1 - \cos(\alpha_k)) \right] + V_{i \min} \quad p/ k \in \{1,2,3\} \quad (18)$$

## 5.2. PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO MODELO

### 5.2.1. Símbolos dos parâmetros termodinâmicos do modelo

Para calcular o balanço de energia no volume de controle dos 3 cilindros temos as seguintes variáveis.

Tabela 6 - Parâmetros Termodinâmicos		
Variável	Descrição	Unidade
<b>P</b>	Pressão	kpa
<b>T</b>	Temperatura	K
<b>v</b>	Volume específico	m <sup>3</sup> /kg
<b>u</b>	Energia interna específica	kJ/kg
<b>ΔU</b>	Varição da energia interna total do sistema	kJ/kg

<b>h</b>	Entalpia específica	kJ/kg
<b>cp</b>	Calor específico a pressão constante	kJ/kg·K
<b>cv</b>	Calor específico a volume constante	kJ/kg·K
<b><math>\gamma</math></b>	Razão dos calores específicos cp/cv	–
<b>m</b>	Massa de ar de um cilindro	kg
<b><math>\Delta m</math></b>	Varição de massa de um cilindro	kg
<b><math>\dot{m}</math></b>	Vazão mássica de um cilindro	kg/s
<b>cs</b>	Velocidade do som	m/s
<b>Ma</b>	Número de Mach	–
<b>W</b>	Trabalho realizado pelo sistema	kJ
<b>Q</b>	Calor adicionado no sistema	kJ

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Variáveis do processo

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
<b>NPA</b>	Número de processos realizado em uma variação de 180° do virabrequim	–
<b><math>\Delta t_p</math></b>	Tempo de duração de um processo	s

Fonte: Autoria Própria



## 5.2.2. Subscritos dos parâmetros termodinâmicos do modelo

Tabela 8 - Subscritos dos Parâmetros do modelo

<b>Subscrito</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	Parâmetros relacionados ao cilindro 1
<b>2</b>	Parâmetros relacionados ao cilindro 2
<b>3</b>	Parâmetros relacionados ao cilindro 3
<b>a</b>	Parâmetros relacionados a atmosfera
<b>a1</b>	Parâmetros que se sai da atmosfera para o cilindro 1
<b>12</b>	Parâmetros que sai do cilindro 1 para o cilindro 2
<b>a3</b>	Parâmetros que sai da atmosfera para o cilindro 3
<b>32</b>	Parâmetros que sai do cilindro 3 para o cilindro 2
<b>2a</b>	Parâmetros que sai do cilindro 2 para a atmosfera

Fonte: Autoria Própria

## 5.3. BALANÇO DE ENERGIA NOS CILINDROS

Utilizando a primeira lei da termodinâmica na forma geral para o volume de controle do cilindro 1 durante um processo  $i$  obtemos a seguinte equação:

$$\Delta U = Q - W + m_{ent}h_{ent} - m_{sai}h_{sai} \quad (19)$$

$$\Delta U_1 = Q_1 - W_1 + \Delta m_{a1}h_{a1} - \Delta m_{12}h_{12} \quad (20)$$

$$m_{1\ i+1}u_{1\ i+1} - m_{1\ i}u_{1\ i} = Q_1 - W_1 + \Delta m_{a1}h_{a1} - \Delta m_{12}h_{12} \quad (21)$$

Fazendo um balanço de massa obtemos que:

$$m_{1\ i+1} = m_{1\ i} + \Delta m_{a1} - \Delta m_{12} \quad (22)$$

$$\Delta m_{a1} = \dot{m}_{a1} \Delta t_p \quad (23)$$

$$\Delta m_{12} = \dot{m}_{12} \Delta t_p \quad (24)$$

onde a velocidade do som, número de Mach e vazão mássica é dado por:

$$cs = \sqrt{\gamma RT} \quad (25)$$

$$Ma = \frac{V}{cs} \quad (26)$$

$$\dot{m} = \frac{VA}{v} \quad (27)$$

Analogamente o balanço de energia dos cilindros 2 e 3 passam a ser:

$$m_{2\ i+1} u_{2\ i+1} - m_{2\ i} u_{2\ i} = -W_2 + \Delta m_{12} h_{12} + \Delta m_{32} h_{32} - \Delta m_{2a} h_{2a} \quad (28)$$

$$m_{3\ i+1} u_{3\ i+1} - m_{3\ i} u_{3\ i} = Q_3 - W_3 + \Delta m_{a3} h_{a3} - \Delta m_{32} h_{32} \quad (29)$$

Realizando um balanço de massa nos cilindros 2 e 3 obtemos.

$$m_{2\ i+1} = m_{2\ i} + \Delta m_{12} + \Delta m_{32} - \Delta m_{2a} \quad (30)$$

$$m_{3\ i+1} = m_{3\ i} + \Delta m_{a3} - \Delta m_{32} \quad (31)$$

$$\Delta m_{a3} = \dot{m}_{a3} \Delta t_p \quad (32)$$

$$\Delta m_{32} = \dot{m}_{32} \Delta t_p \quad (33)$$

$$\Delta m_{2a} = \dot{m}_{2a} \Delta t_p \quad (34)$$

A adição de calor é dada pela seguinte equação.

$$Q_1 = m q_{ent} y(\alpha) \quad (35)$$

Como o calor possui um tempo para ser adicionado, sua fração de adição de calor durante o processo obedece a função:

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\delta}(\alpha - \theta)\right) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta \\ 1 & \text{para } \alpha \geq \theta + \delta \end{cases} \quad (36)$$

Para calcular o trabalho  $W$  num processo  $i$  utiliza-se o processo politrópico de maneira que:

$$W_{ki} = P_{ki} V_{ki} \ln\left(\frac{V_{ki+1}}{V_{ki}}\right) \quad p/ k \in \{1,2,3\} \text{ e } n_{ki} = 1 \quad (37)$$

$$W_{ki} = \frac{P_{ki}}{1 - n_{ki}} \left( V_{ki} - \frac{V_{ki}^{n_{ki}}}{V_{ki+1}^{n_{ki}-1}} \right) \quad p/ k \in \{1,2,3\} \quad (38)$$

onde  $n_k$  é o coeficiente politrópico do processo. Porém existe um problema em utilizar esta equação pois o coeficiente politrópico ele varia durante o processo pois ocorre adição de calor e também entrada e saída de massa.

Para a solucionar esse processo de acordo com NAAKTGEBOREN (2017) é necessário um processo iterativo para obter uma melhor precisão do coeficiente politrópico e conseqüentemente do trabalho onde num processo de iterações  $j$ , o coeficiente politrópico  $n_{ki}^j$  para  $j=0$  então  $n_{ki}^0 = c_p(T_{ki}) / c_v(T_{ki})$ , em seguida seria calculado o valor de  $W^j$  e voltando ao balanço de energia obteria o valor de  $u_{ki+1}^j$  e através da equação de estado encontrava os valores de  $P_{ki+1}^j$  e  $T_{ki+1}^j$  e para a próxima iteração o valor do coeficiente politrópico seria:

$$n_{ki}^{j+1} = \frac{\log\left(\frac{P_{ki+1}^j}{P_{ki}}\right)}{\log\left(\frac{V_{ki}}{V_{ki+1}}\right)} \quad (39)$$

Repetindo as iterações até que a diferença entre os passos seja menor que uma tolerância  $\epsilon_w$ . Com isso obtem-se o valor do trabalho  $e$ , portanto, do balanço de energia o valor de  $u_{ki+1}$  e  $\Delta U_k$ .

Para calcular os valores de fluxo de massa que percorre entre os cilindros é necessário verificar quais são as situações das válvulas do motor nos quais são  $VV_{a1}$ ,  $VV_{12}$ ,  $VV_{a3}$ ,  $VV_{32}$ ,  $VV_{2a}$ .

Na situação onde  $VV_{a1}$  está aberta então é o momento da admissão do cilindro 1 ou seja  $VV_{12}$  está fechada. Primeiro analisa se  $P_a \geq P_{1i}$  então a velocidade do fluxo de massa será na ordem de  $Ma \leq 1$  para a equalização das pressões. Caso  $P_a \leq P_{1i}$  então o sentido do fluxo de massa deve ser invertido para conseguir a equalização das pressões. Na primeira tentativa utiliza-se  $Ma=1$  com isso o fluxo de massa é dado por.

$$\Delta m_{a1} = \dot{m}_{a1} \Delta t_p = \frac{cs \frac{\pi}{4} \phi_1^2}{v_a} \Delta t_p = \frac{\sqrt{\gamma_a R T_a} \frac{\pi}{4} \phi_1^2}{v_a} \Delta t_p \quad (40)$$

Com esse resultado é feito o balanço de energia e verifica se  $P_a \geq P_{1i+1}$  se sim o processo está correto e  $Ma=1$ , se não se inicia um processo iterativo para o ajuste do fluxo de massa onde  $Ma < 1$ .

- Estimativa inicial de  $\Delta m_{a1}^k < \Delta m_{a1}$
- Realiza o balanço de energia e encontra  $P_{1i+1}$
- Ajusta o valor de  $\Delta m_{a1}^k$  por método numérico e repete o loop

O processo iterativo só irá parar quando  $0 \leq P_a - P_{1i+1} < \epsilon P$ , e ocorre de forma análoga com  $VV_{a3}$ .

Para o caso onde  $VV_{12}$  está aberta então é o momento da expansão extendida entre os cilindros 1 e 2 ou seja  $VV_{a1}$  está fechada. Primeiro analisa se  $P_{1i} \geq P_{2i}$  então a

velocidade do fluxo de massa será na ordem de  $Ma \leq 1$  para a equalização das pressões. Caso  $P_{1i} \leq P_{2i}$  então o sentido do fluxo de massa deve ser invertido para conseguir a equalização das pressões. Na primeira tentativa utiliza-se  $Ma=1$  com isso o fluxo de massa é dado por.

$$\Delta m_{12} = \dot{m}_{12} \Delta t_p = \frac{cs \frac{\pi}{4} \phi_2^2}{v_1} \Delta t_p = \frac{\sqrt{\gamma_1 RT_1} \frac{\pi}{4} \phi_2^2}{v_1} \Delta t_p \quad (41)$$

É feito o balanço de energia e verifica se  $P_{1i+1} \geq P_{2i+1}$  se sim o processo está correto e  $Ma=1$ , se não se inicia um processo iterativo para o ajuste do fluxo de massa onde  $Ma < 1$ .

- Chute inicial de  $\Delta m_{12}^k < \Delta m_{12}$
- Realiza o balanço de energia e encontra  $P_{1i+1}$
- Realiza o balanço de energia e encontra  $P_{2i+1}$
- Ajusta o valor de  $\Delta m_{12}^k$  por método numérico e repete o loop

Pórem como os cilindros estão conectados o e considerando que durante o processo de ajuste do coeficiente politrópico  $P_{1i+1} = P_{2i+1}$  então o valor de  $n_{2i}^{j+1}$  é dado por.

$$n_{2i}^{j+1} = \frac{n_{1i} \log\left(\frac{V_{1i}}{V_{1i+1}}\right) + \log\left(\frac{P_{1i}}{P_{2i}}\right)}{\log\left(\frac{V_{2i}}{V_{2i+1}}\right)} \quad (42)$$

O processo iterativo só irá parar quando  $0 \leq P_{1i+1} - P_{2i+1} < \epsilon P$ , ocorre de maneira análoga com  $VV_{32}$ .

Na situação onde  $VV_{2a}$  está aberta então é o momento da exaustão do cilindro 2 ou seja  $VV_{12}$  e  $VV_{32}$  está fechada. Primeiro analisa se  $P_{2i} \geq P_a$  então a velocidade do fluxo de massa será na ordem de  $Ma \leq 1$  para a equalização das pressões. Caso  $P_{2i} \leq P_a$  então o sentido do fluxo de massa deve ser invertido para conseguir a equalização das pressões. Na primeira tentativa utiliza-se  $Ma=1$  com isso o fluxo de massa é dado por.

$$\Delta m_{2a} = \dot{m}_{2a} \Delta t_p = \frac{c_s \frac{\pi}{4} \phi_3^2}{v_2} \Delta t_p = \frac{\sqrt{\gamma_2 R T_2} \frac{\pi}{4} \phi_3^2}{v_2} \Delta t_p \quad (43)$$

Realiza o balanço de energia e verifica se  $P_{2\ i+1} \geq P_a$  se sim o processo está correto e  $Ma=1$ , se não se inicia um processo iterativo para o ajuste do fluxo de massa onde  $Ma < 1$ .

- Chute inicial de  $\Delta m_{2a}^k < \Delta m_{2a}$
- Realiza o balanço de energia e encontra  $P_{2\ i+1}$
- Ajusta o valor de  $\Delta m_{a1}^k$  por método numérico e repete o loop

O processo iterativo só irá parar quando  $0 \leq P_{2\ i+1} - P_a < \epsilon P$ .

E a eficiência térmica do ciclo é dada pela seguinte equação

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_T} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{Q_1 + Q_3} \quad (44)$$

#### 5.4. DIVISÃO DOS PROCESSOS

Basicamente a quantidade de processos que irá ocorrer em uma variação de 180° do virabrequim é dado por NPA. E o tempo de duração do processo seria através da seguinte fórmula.

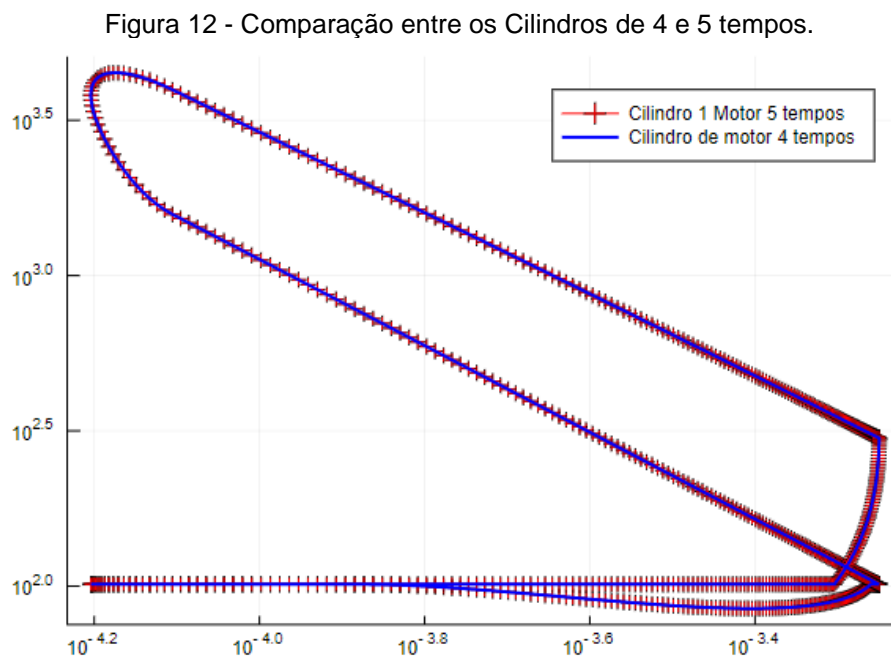
$$\Delta t_p = \frac{\pi}{\omega \text{ NPA}} \quad (45)$$

#### 5.5. VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo elaborado foi implementado através da linguagem Julia e para a validação será feito por dois métodos.

O método consiste em transforma-lo em um ciclo de 4 tempos de tempo finito de adição de calor já conhecido considerando admissão e exaustão. Para isso será utilizado um valor de  $\lambda$  e  $\phi_3$  bem elevados assim como será fixado o volume do cilindro 2 no PMI,

assim realizando uma aproximação do cilindro 2 para atmosfera e comparando com um motor 4 tempos que possui as mesmas variáveis geométricas que o cilindro 1 do motor 5 tempos. E os resultados estão descritos nas Figura 12.



Fonte: Autoria Própria

Como pode observar o resultado apresentado na Figura 12 ambos os motores possuem valores praticamente iguais onde o resultado da eficiência energética possui uma variação de apenas 0.01% onde o motor 4 tempos possui a eficiência de 49.16% e o motor 5 tempos de 49.15% isso ocorre devido ao estado inicial do cilindro 3 do motor 5 tempos onde ele necessita de mais ciclos para entrar em regime periódico permanente.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

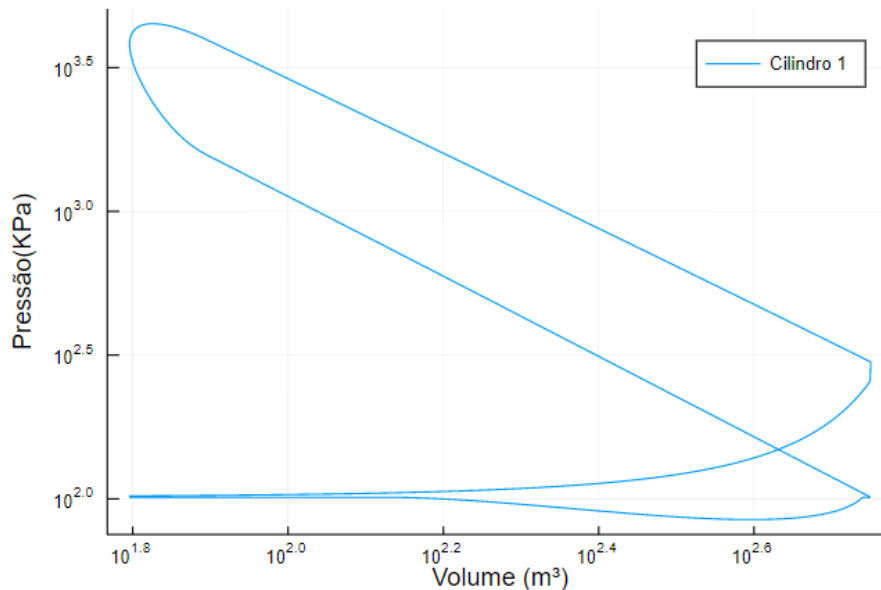
### 6.1. DIAGRAMAS P-V, TRABALHO PRODUZIDO E EFICIÊNCIA

Após validado o modelo padrão a ar de motores a cinco tempos com ignição por centelha com tempo finito de adição de calor, foram realizados alguns testes do modelo e seus diagramas P-V serão mostrados a seguir.

O modelo utilizado para os testes foi um motor onde os cilindros de alta pressão possuem as mesmas variáveis geométricas do motor utilizado para a validação, ou seja, com  $V_{du}=500\text{cm}^3$ , razão de compressão  $r_v=9:1$  valores de diâmetro e curso iguais a  $D=86.025\text{ mm}$   $S=86.025\text{ mm}$ , valor da razão biela-manivela  $r_{LR}=3.2$  duração angular da adição de calor  $\delta=36^\circ$  avanço de ignição de  $\theta = -\frac{\delta}{2}$  para centralizar a adição de calor no PMS, rotação do motor de  $N=3000\text{rpm}$ . Para obter os valores do cilindro de baixa pressão foi utilizado valor de  $\lambda=1.55$ . E o estado inicial dos cilindros são  $P_{10}=90.0\text{ KPa}$ ,  $T_{10}=296.15\text{ K}$   $P_{20}=90.0\text{ KPa}$ ,  $T_{20}=296.15\text{ K}$ ,  $P_{30}=3958.55\text{ KPa}$  e  $T_{30}=1321.29\text{ K}$ , onde os valores de  $P_3$  e  $T_3$  são valores encontrados a partir de uma simulação rápida do cilindro 1 até que ele chegasse na mesma posição que o cilindro 3 ou seja  $P_{30}=P_{12 \cdot NPA}$  e  $T_{30}=T_{12 \cdot NPA}$  onde o número de divisão dos processos era  $NPA=180$ , valores dos diâmetros das válvulas  $\phi_1=15\text{mm}$ ,  $\phi_2=20\text{mm}$  e  $\phi_3=30\text{mm}$ , a quantidade de calor específica adicionada nos pistões era de  $q=1000\text{ KJ/kg}$ . E o resultado dos diagramas P-V do motor a 5 tempos não mostradas nas Figuras 15,16 e 17.



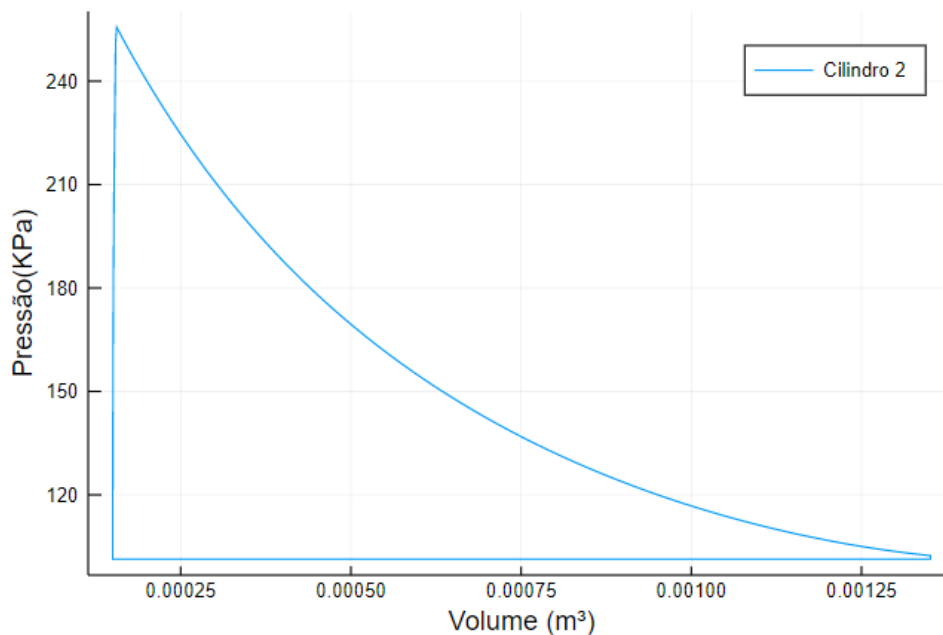
Figura 13 - Diagrama P-V do cilindro 1 escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado no diagrama P-V da Figura 13 temos que o ciclo realmente considera mais parâmetros que um ciclo Otto ideal, onde o aumento da pressão devido a adição de calor não é isocórica, possui as linhas de admissão e exaustão do cilindro, onde no início da exaustão desse cilindro é onde ocorre a expansão estendida, no qual possui uma queda rápida de pressão onde simboliza a equalização de pressões entre os cilindros. Durante o ciclo da expansão estendida a pressão do cilindro não cai de maneira abrupta até a pressão atmosfera, como ocorre em um cilindro de 4 tempos.

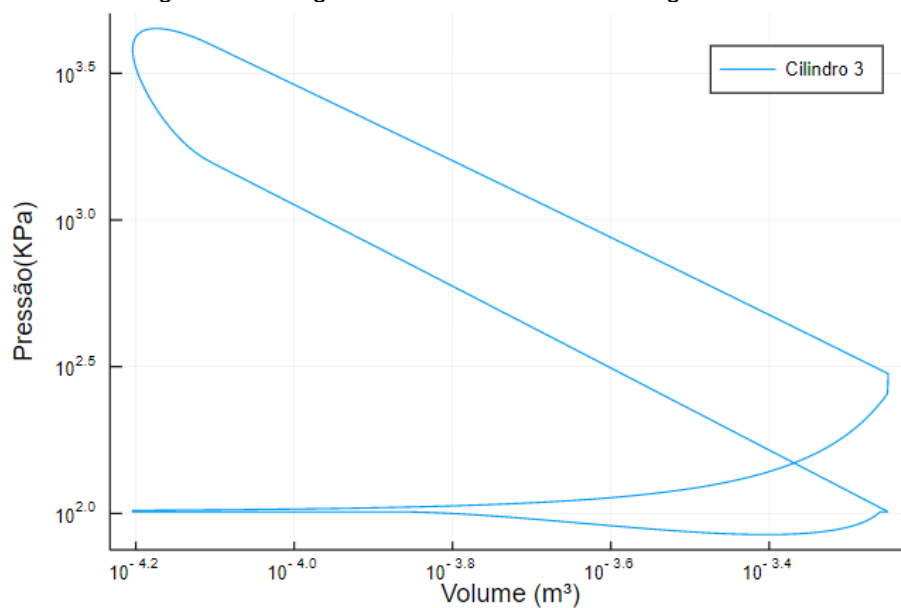
Figura 14 - Diagrama P-V do cilindro 2.



Fonte: Autoria Própria

Analisando o diagrama P-V da Figura 14 obtemos que para o cilindro 2 apenas dois processos ocorrem que são a expansão estendida e a exaustão, onde a exaustão é representada pela linha reta horizontal do gráfico. A expansão estendida começa com um acréscimo rápido de pressão que simboliza a equalização das pressões entre os cilindros, e em seguida o gás vai se expandindo até chegar a muito próxima a pressão atmosférica.

Figura 15 - Diagrama P-V cilindro 3 escala logarítmica.

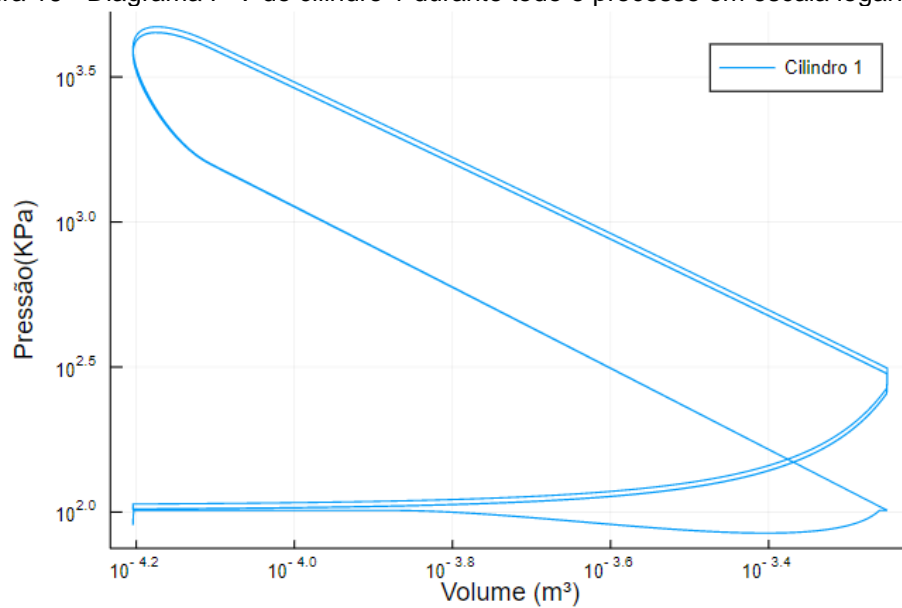


Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser observado na Figura 15 é que o cilindro 3 tem um comportamento idêntico ao cilindro 1 o que é condizente com o modelo que diz que ambos os cilindros são idênticos e operam no mesmo ciclo.

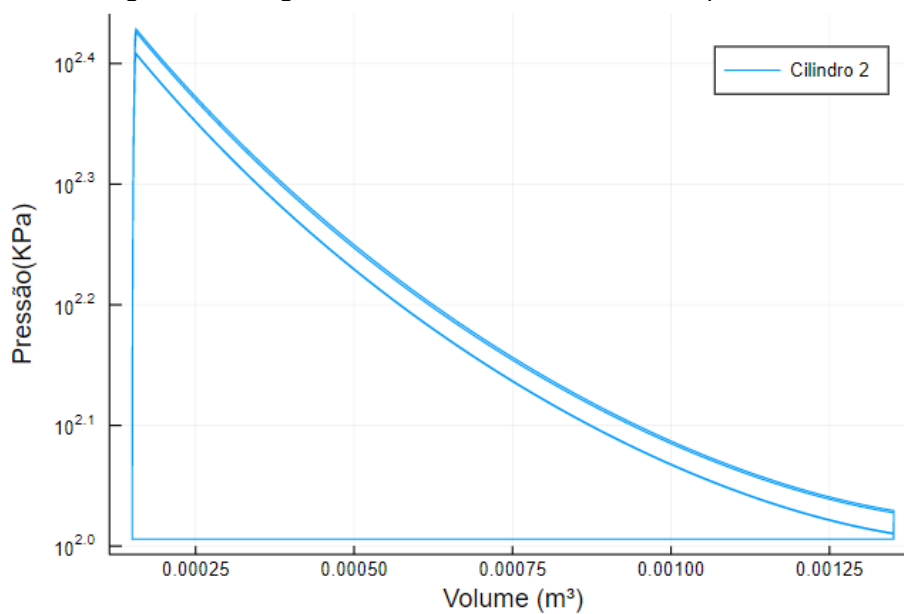
Para o motor entrasse em regime periódico permanente foram necessárias 8 rotações do motor, ou seja, 4 ciclos termodinâmicos completos, no qual que houve uma ligeira diferença entre os ciclos até chegarem ao regime periódico permanente mostrado nas Figuras 16,17 e 18.

Figura 16 - Diagrama P-V do cilindro 1 durante todo o processo em escala logarítmica.



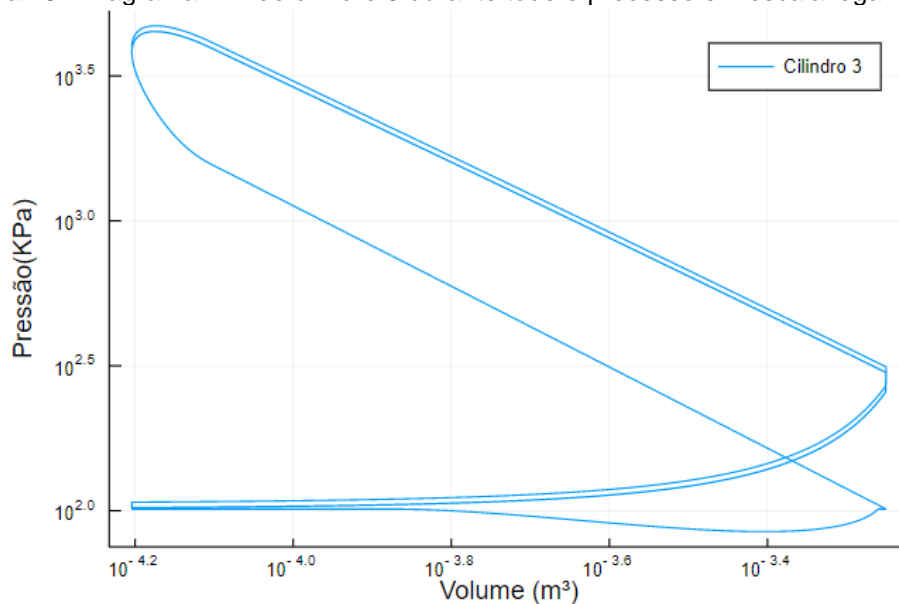
Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 - Diagrama P-V cilindro 2 durante todo o processo.



Fonte: Autoria Própria

Figura 18 - Diagrama P-V do cilindro 3 durante todo o processo em escala logarítmica.

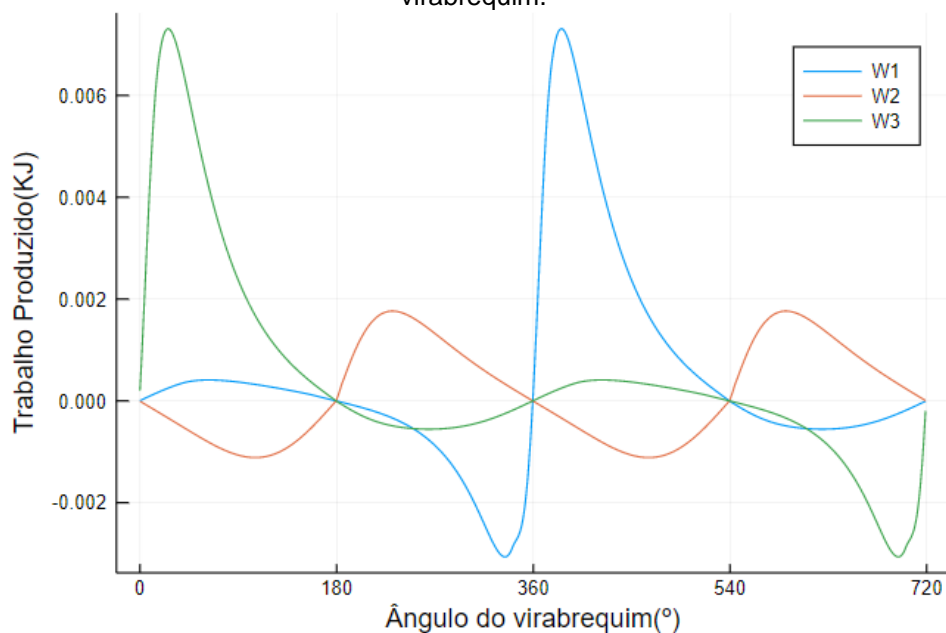


Fonte: Autoria Própria.

Analisando as Figuras 16,17 e 18 podemos observar que nos primeiros ciclos a pressão no final da compressão e na expansão dos cilindros 1 e 3 são maiores e o mesmo vale para as pressões dos três cilindros durante o processo de expansão estendida.

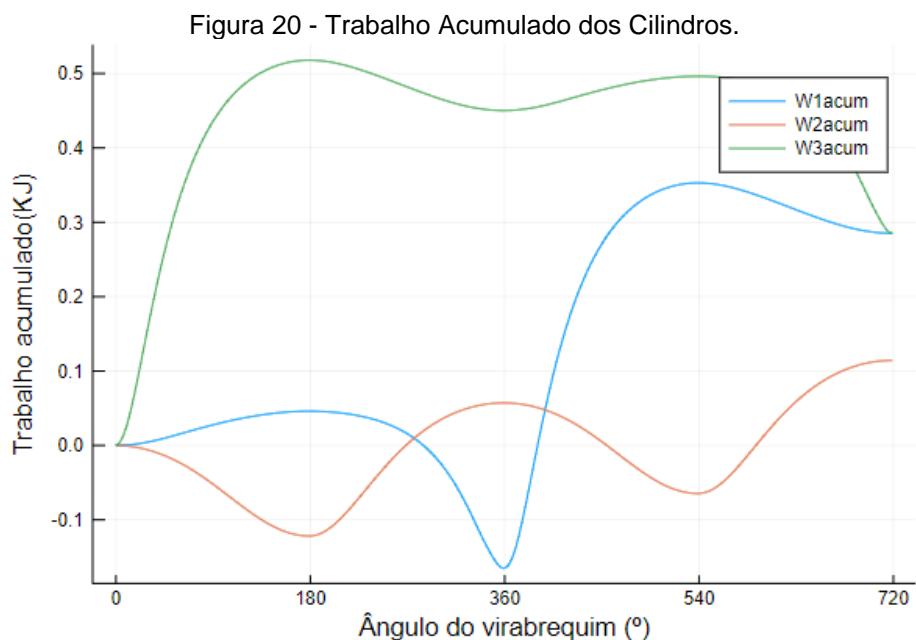
A eficiência total do modelo foi melhor se comparado com o modelo monocilíndrico de 4 tempos utilizado para a validação onde obteve-se a eficiência de  $\eta = 49.15\%$  foi para  $\eta = 56.19\%$ . Os trabalhos produzidos pelos cilindros e mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Trabalho dos processos discretos produzido pelos cilindros em função do ângulo do virabrequim.



Fonte: Autoria Própria.

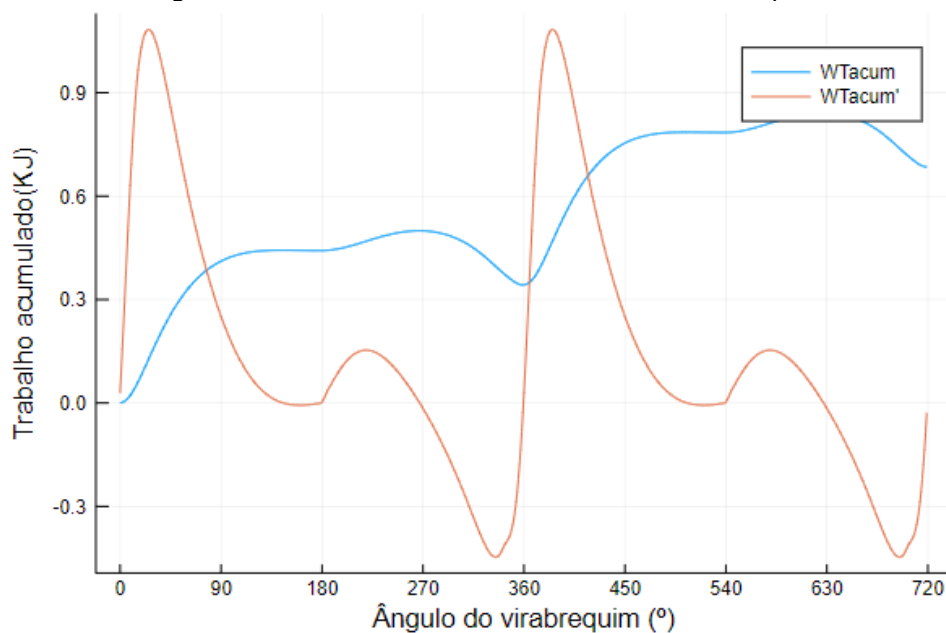
Observando a Figura 19 nota-se que o ângulo do virabrequim entre  $180^\circ$  à  $360^\circ$  e  $540^\circ$  à  $720^\circ$  onde ocorre respectivamente a expansão estendida entre cilindros 3 e 2, 1 e 2, que os cilindros 1 e 3 precisam gastar uma quantidade de trabalho para levar os gases para o cilindro 2, porém em compensação o trabalho produzido pelo cilindro 2 é muito maior se comparado com que foi gasto provando que o sistema sim possui um ganho de eficiência energética. O trabalho acumulado de cada cilindro é mostrado na Figura 20.



Fonte: Autoria Própria.

Observando a Figura 20 obtemos que, apesar do comportamento diferente, o trabalho acumulado entre os cilindros 1 e 3 são iguais no final o que faz sentido considerando que são cilindros iguais. Esse comportamento diferente se dá pela defasagem entre eles onde o cilindro 1 começa na admissão e o cilindro 3 começa na expansão. Olhando o cilindro 2 mostra que seu trabalho acumulado é positivo demonstrando que a expansão estendida traz resultados benéficos. O trabalho acumulado total do motor é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Trabalho total acumulado do motor 5 tempos.



Fonte: Autoria Própria.

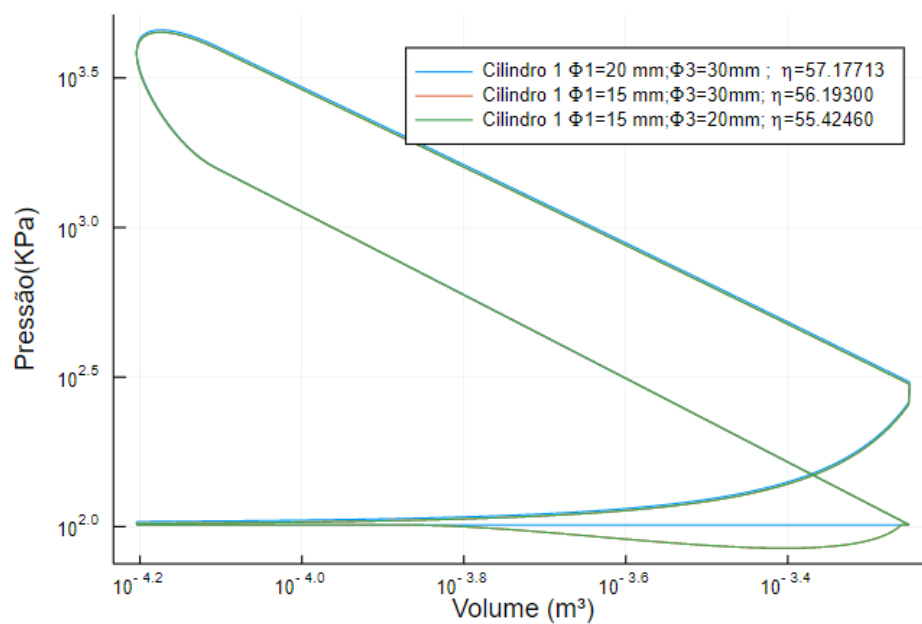
Observando a Figura 21, temos o trabalho acumulado total do motor e sua derivada ampliada para melhor visualização, nota-se que boa parte durante o funcionamento do motor ele está produzindo trabalho, ou seja, quando a derivada é positiva, e possui pequenos momentos onde ele consome trabalho, ou seja, quando a derivada é negativa. De forma mais precisa a derivada é negativa entre 270° à 360° e 630° à 720°. Como isso podemos dizer que entre os 720° de um ciclo completo do motor 540° ele está produzindo trabalho e 180° ele está consumindo trabalho o que mostra que um projeto de motor 5 tempos na configuração de 3 cilindros demonstra grande eficiência.

## 6.2. INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO DAS VÁLVULAS NA EFICIÊNCIA DO MOTOR 5 TEMPOS

Para se tenha um bom projeto de motor, o dimensionamento das válvulas tem suma importância para que o motor possa admitir ar e expelir os gases de escape da melhor maneira possível, sendo assim foi realizado testes com o modelo anterior de  $\lambda=1,55$  apenas mudando os valores de  $\phi_1$  e  $\phi_3$  e os resultados estão nas Figuras 22,23 e 24.

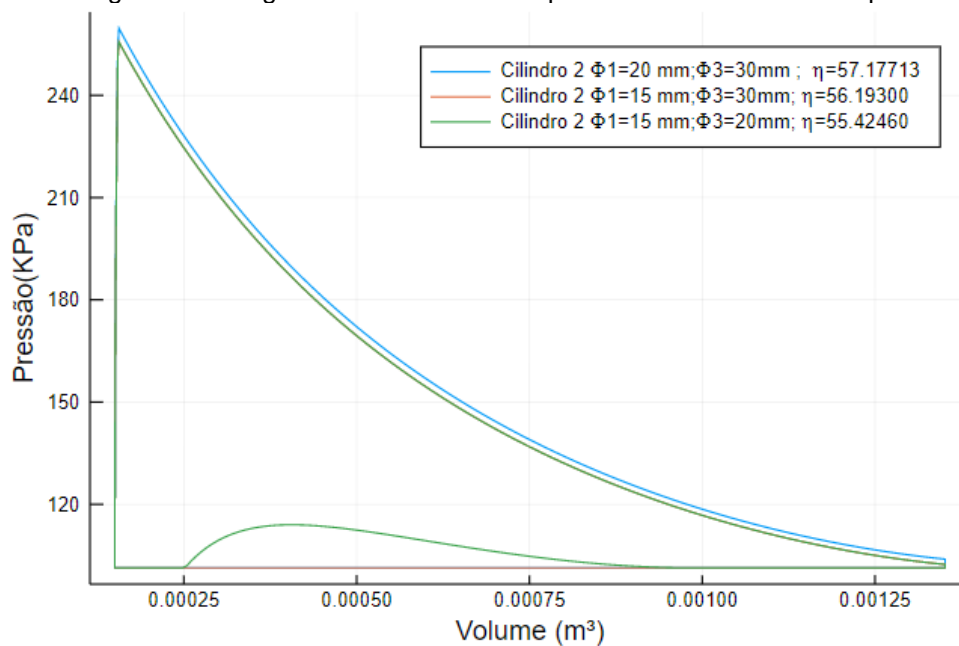


Figura 22 - Diagrama P-V do cilindro 1 para diferentes valores de  $\phi$ .



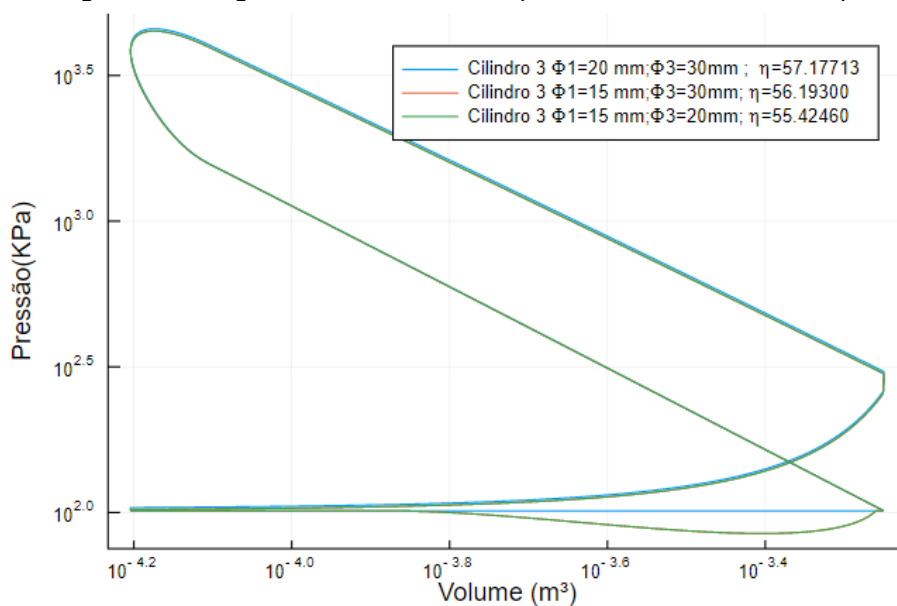
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 - Diagrama P-V do cilindro 2 para diferentes valores de  $\phi$ .



Fonte: Autoria Própria.

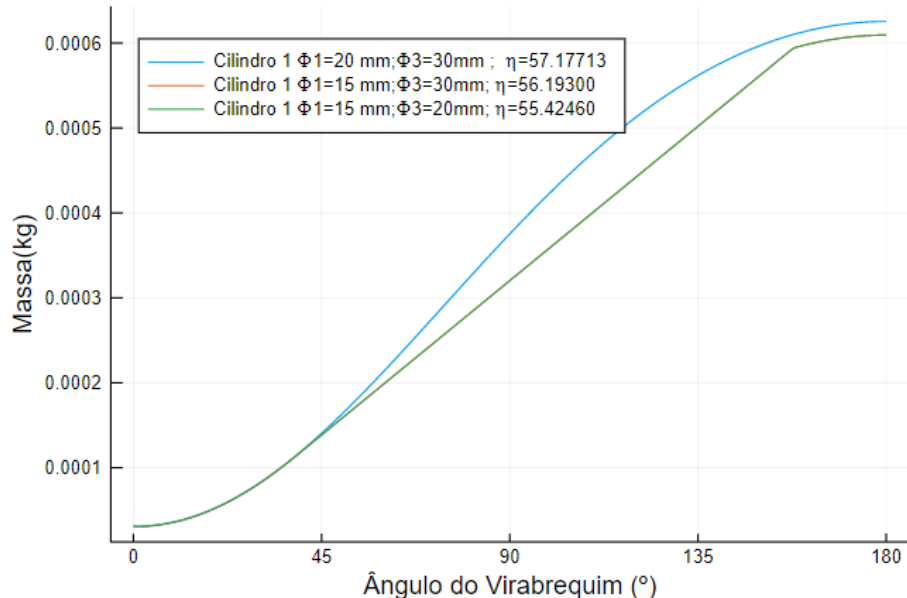
Figura 24 - Diagrama P-V do cilindro 3 para diferentes valores de  $\phi$ .



Fonte: Autoria Própria.

Através dos resultados obtidos podemos analisar que no primeiro caso para  $\phi_1=20$ mm  $\phi_3=30$ mm nas Figuras 22 e 23 temos que a os tamanhos das válvulas eram suficientes e que não interferiram para o valor da eficiência, uma vez que durante a admissão a pressão do cilindro se manteve praticamente constante ao valor de pressão atmosférico e durante a exaustão do cilindro 2 na Figura 23 o mesmo ocorre. Para o caso 2 com  $\phi_1=15$ mm  $\phi_3=30$ mm podemos observar que houve uma queda de pressão durante o processo de admissão e com isso a massa de ar admitida foi menor de acordo com o Figura 25.

Figura 25 - Massa de ar no cilindro 1 durante o processo de admissão.

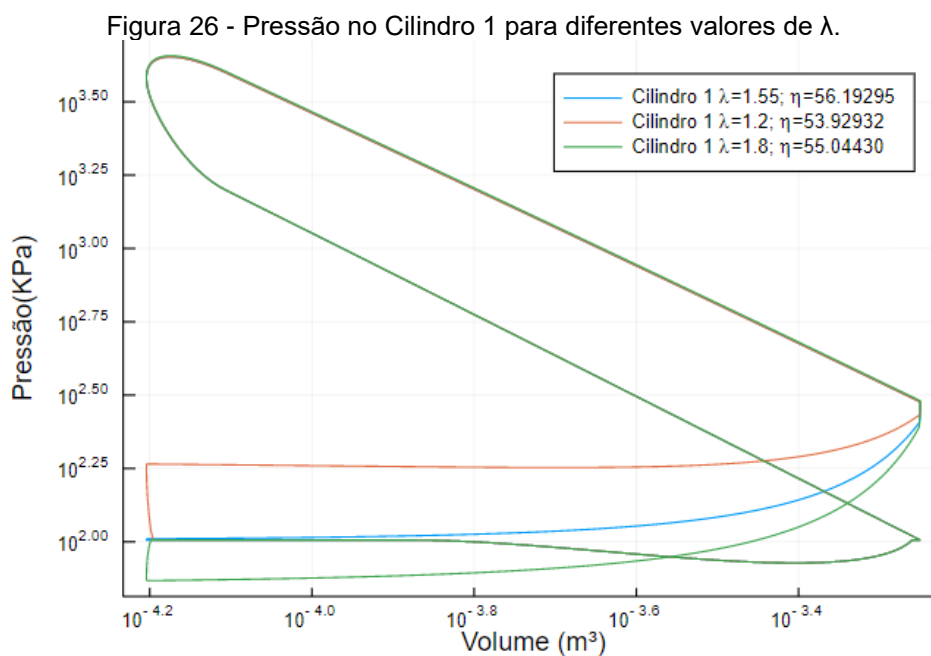


Fonte: Autoria Própria.

Isso se deve ao fato de que a variação volumétrica do cilindro durante o processo foi maior que a vazão volumétrica máxima da válvula que é limitado a  $Ma=1$  ocasionando a perda de pressão e isso reflexe em uma pressão máxima menor entre os cilindros durante a compressão, expansão e expansão estendida como mostra nas Figuras 22, 23 e 24 resultando em uma queda na eficiência. Para o caso 3 onde  $\phi_1=15$ mm  $\phi_3=20$ mm houve um aumento de pressão na exaustão do cilindro 2 em relação aos demais casos de acordo com a Figura 23 e o motivo disso é simular ao caso anterior onde a variação volumétrica no cilindro 2 durante o processo foi maior que a vazão volumétrica de saída dos gases na válvula ocasionando uma compressão os gases e aumentando sua pressão criando uma resistência maior e conseqüentemente diminuindo a sua eficiência.

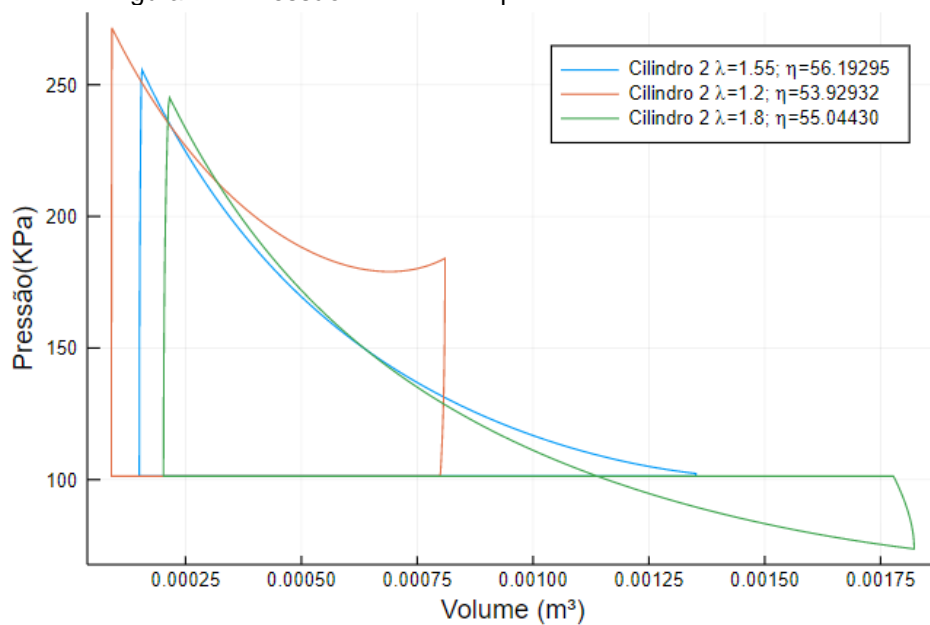
### 6.3. INFLUÊNCIA NA ESCOLHA DO VALOR DE $\lambda$ NA EFICIÊNCIA DO MOTOR 5 TEMPOS

Através dos resultados obtidos, mostra que para se obter um ganho na eficiência energética o cilindro 2 deve ser maior que os demais cilindros para que os gases possam expandir e assim realizar trabalho e uma maneira de relacionar o tamanho do cilindro 2 com o cilindro 1 e 3 é o valor de  $\lambda$ . O comportamento do motor para diferentes valores de  $\lambda$  é mostrado nas Figuras 26, 27 e 28.



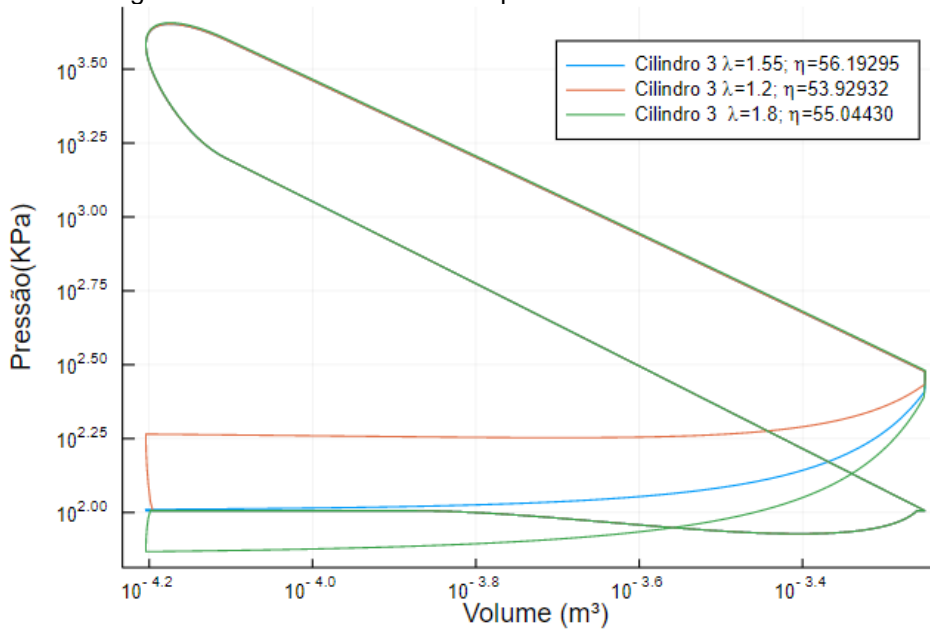
Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 - Pressão no cilindro 2 para diferentes valores de  $\lambda$ .



Fonte: Autoria Própria.

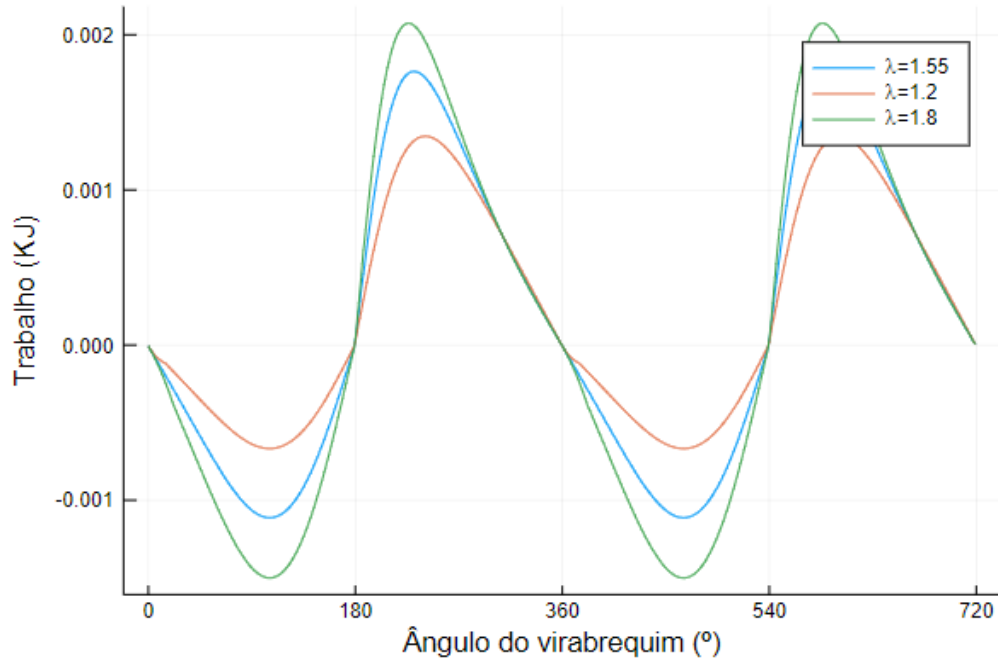
Figura 28 - Pressão no cilindro 3 para diferentes valores de  $\lambda$ .



Fonte: Autoria Própria.

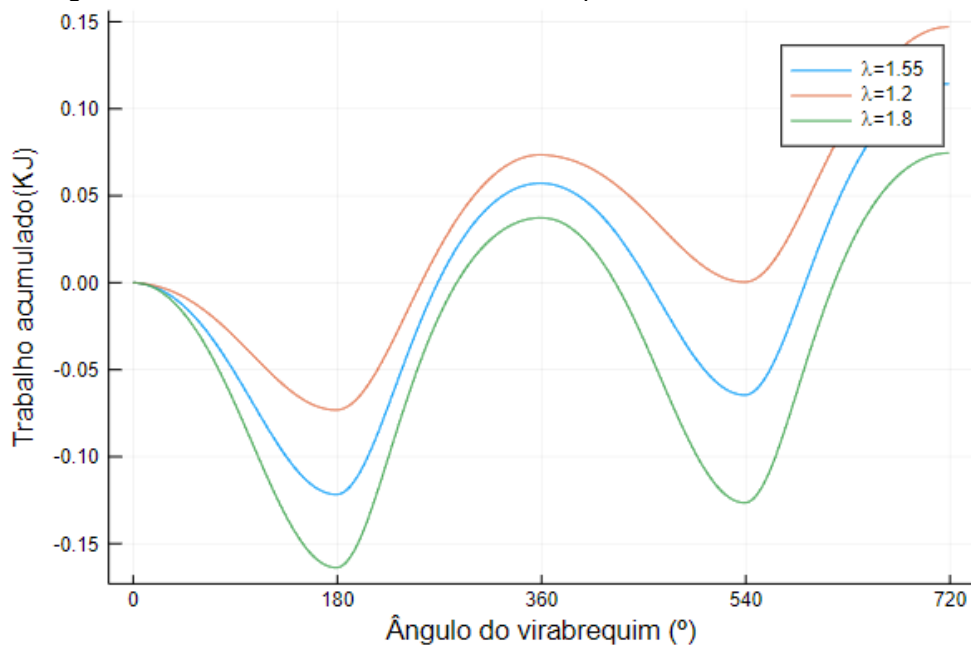
Analisando as Figuras 26, 27 e 28 obtemos a seguinte conclusão que existe um  $\lambda$  ótimo para cada projeto de motor. Para o caso de  $\lambda=1,2$  a expansão estendida não é bem utilizada pois no mesmo a pós da realização do mesmo, ainda existe uma alta quantidade de pressão nos cilindros fazendo com que o trabalho consumido dos cilindros 1 e 3 para transferir a massa de ar para o cilindro 2 seja muito alto e que depois é expelida pela exaustão do cilindro 2 e retorna para atmosfera na admissão dos cilindros 1 e 3, o que num motor real isso seria algo prejudicial onde seria necessário um cruzamento de válvulas entre os cilindros 1-2 e 3-2 em prol que o fluxo de massa dos gases queimados percorresse corretamente para o sistema de exaustão do motor, outro fenômeno que ocorre é um pequeno aumento de pressão nos cilindros no final da expansão estendida, isso se deve ao comportamento variação do volume do motor, onde para uma variação fixa de  $\alpha$  durante um processo, as variações de volume próximos ao PMS são maiores que as variações próximas ao PMI e combinado a isso um valor de  $\lambda$  pequeno isso resulta em que as variações dos volumes dos cilindros 1 e 3 se tornaram maiores que as variações do volume do cilindro 2 no final da expansão estendida provocando um aumento de pressão . Para o caso de  $\lambda=1,55$  obteve um resultado muito próximo do ideal onde durante a expansão estendida a pressão entre os cilindros chegou a um valor próximo a atmosfera, assim obtendo um alto valor na eficiência. Para o caso de  $\lambda=1,8$  o processo de expansão estendida fez com que as pressões caíssem de maneira abrupta chegando a valores abaixo da pressão atmosférica, com isso no processo de exaustão do cilindro 2 uma certa quantidade de massa de ar atmosférico entraria e causaria uma certa resistência ao movimento do cilindro prejudicando a eficiência. A seguir nas Figuras 29 e 30 o trabalho realizado e acumulado do cilindro 2 para os diferentes valores de  $\lambda$ .

Figura 29 - Trabalho Produzido no cilindro 2 para diferentes valores de  $\lambda$ .



Fonte: Autoria Própria.

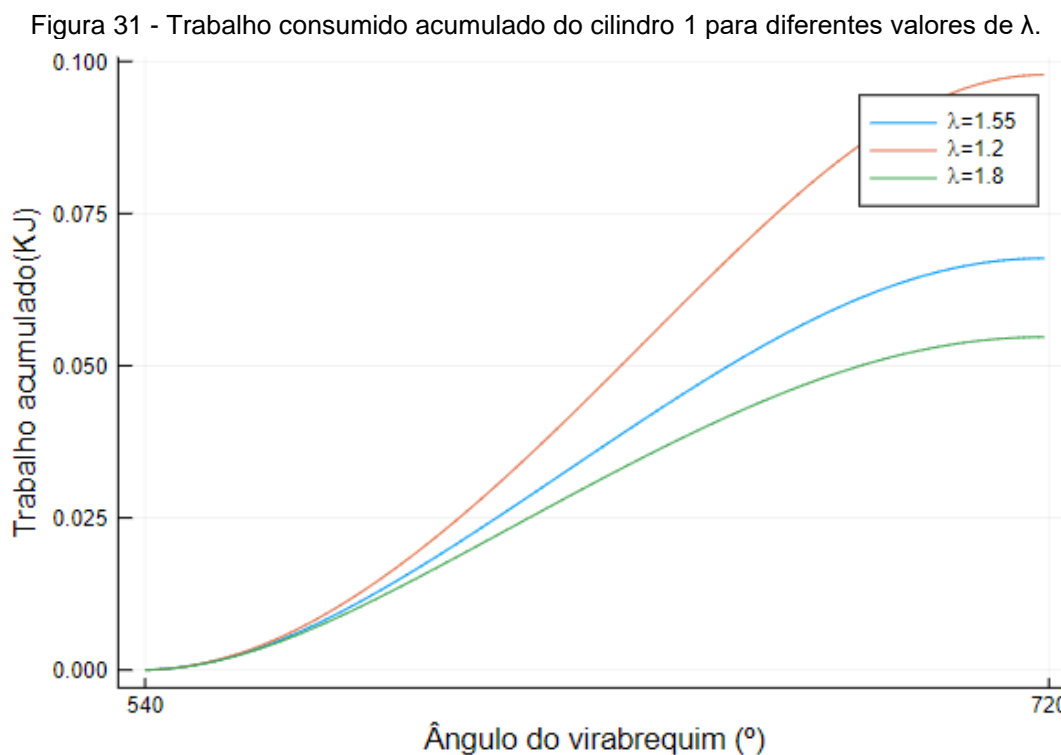
Figura 30 - Trabalho acumulado no cilindro 2 para diferentes valores de  $\lambda$ .



Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser observado quanto maior o valor de  $\lambda$ , maior será o trabalho produzido pelo cilindro 2 durante a expansão estendida, mas em contra partida maior será o trabalho consumido durante o processo de exaustão. E analisando as áreas, a

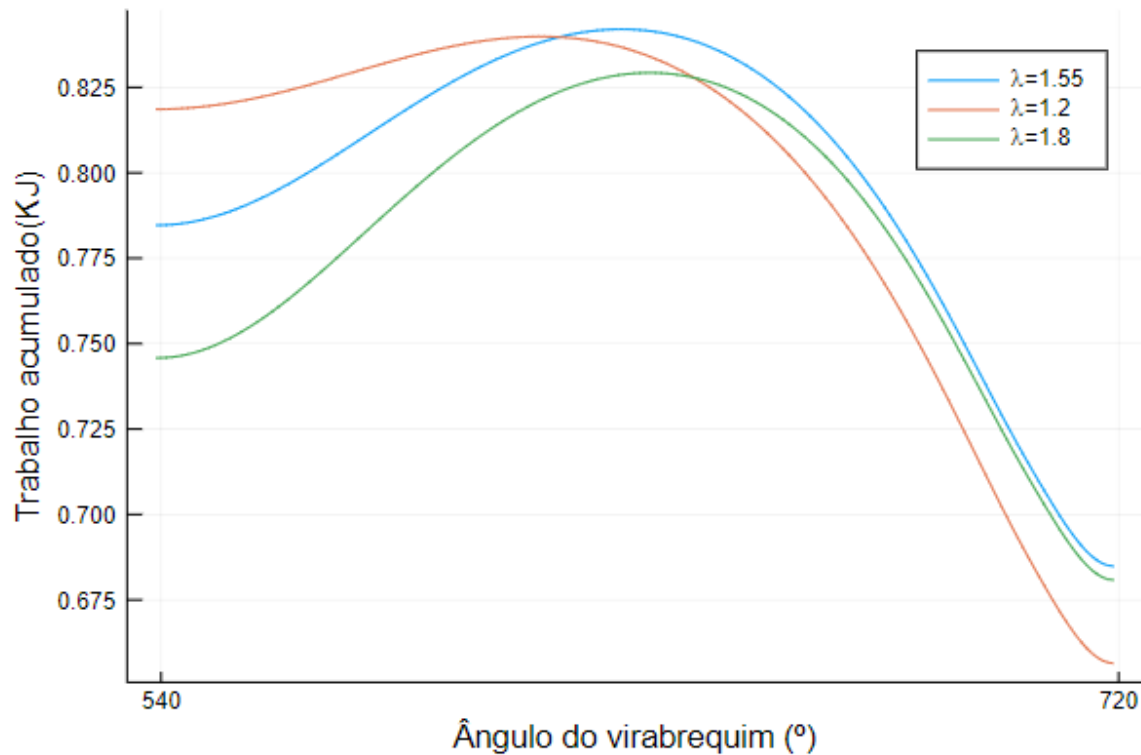
diferença das áreas de ganho são menores que as áreas das perdas tendo assim um resultado inverso no trabalho acumulado que quanto menor o  $\lambda$  maior será o trabalho acumulado no cilindro 2 como mostra a Figura 30. Vale salientar que mesmo no caso de  $\lambda=1,2$  tendo um trabalho acumulado maior ele obteve uma eficiência menor isso se dá devido o consumo maior de trabalho dos cilindros 1 e 3 para transferir a massa para o cilindro 2 dado na Figura 31.



Fonte: Autoria Própria.

Como resultado, o trabalho acumulado total realizado pelo motor para diferentes valores de  $\lambda$  está representado na Figura 32.



Figura 32 - Trabalho total acumulado para diferentes valores de  $\lambda$ .

Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado na Figura 32 no final de um ciclo completo o trabalho acumulado total para  $\lambda=1,55$  é maior que os demais provando assim sua maior eficiência e para  $\lambda=1,2$  possui menor trabalho acumulado total mesmo tendo o maior trabalho acumulado no cilindro 2.

## 7. CONCLUSÃO

O modelo de padrão a ar de motores a cinco tempos com ignição por centelha com tempo finito de adição de calor, se mostrou ser mais complexo em relação ao FTTHA aplicado em motores 4 tempos, pois, devido a diferença em que os motores a cinco tempos terem volumes de controle de sistema aberto para efetuar a expansão estendida, tornou-se necessário a inclusão da atmosfera como volume de controle, inclusão das válvulas dos cilindros, análise dos fluxos de massa entre os cilindros e também os processos de admissão e exaustão, diferente do FTTHA onde ele apenas analisa os processos de compressão e expansão. Através dessas inclusões o modelo se tornou mais próximo a um possível motor a cinco tempos real, podendo operar em regime periódico permanente.

O modelo obteve ótimos resultados referente a sua validação, onde conseguiu reproduzir fielmente um motor de 4 tempos com tempo finito de adição de calor considerando processos de admissão e exaustão.

Baseando-se nos resultados obtidos através do modelo podemos concluir que, um motor a 5 tempos tem-se resultados de eficiência térmica melhores que se comparado ao motor 4 tempos. Outro aspecto que o modelo demonstra é a influência das variáveis geométricas no funcionamento do motor e no resultado da eficiência tais como o tamanho das válvulas e o tamanho do cilindro de baixa pressão em relação ao cilindro de alta pressão, representado pelo valor de  $\lambda$ , onde quaisquer modificações podem gerar diversos fenômenos entre eles a queda de pressão e variação quantidade de massa de ar admitida pelo cilindro, valores de pressão atingido pela compressão, expansão e expansão estendida, aumento de consumo de trabalho durante a exaustão e na expansão estendida no cilindro de alta pressão, diferenças no trabalho líquido no cilindro de baixa pressão. E através desse modelo é possível utilizar como auxílio para otimização um projeto de motor dimensionando corretamente as variáveis geométricas para que se consiga maximizar sua eficiência térmica.

O modelo criado pode servir de base para o desenvolvimento de modelos futuros de motores a 5 tempos onde pode ser adicionado outros fatores de complexidades

maiores, tornando esses modelos mais próximo do que seria um protótipo de motor real a 5 tempos.

## 8. REFERÊNCIAS

BARROS, E. V. DE. A MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E A COMPETITIVIDADE DAS NAÇÕES: BASES DE UMA NOVA GEOPOLÍTICA. **Engevista**, v. 9, n. 1, 2 fev. 2010.

BLIZARD, N. C.; KECK, J. C. **Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for Internal Combustion Engines**. Warrendale, PA: SAE International, 1 fev. 1974. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/740191/>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7th. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FERNANDES, L. M. T. Otimização do Sistema de Injeção Eletrônica de um Motor de Combustão Interna. 7 jul. 2015.

KASPER, F. R. S. Modelagem e simulação de motores a combustão interna por técnicas da fluidinamica computacional (CFD). 2003.

KÉROMNÈS, A. et al. Development and validation of a 5 stroke engine for range extenders application. **Energy Conversion and Management**, v. 82, p. 259–267, 1 jun. 2014.

LI, T.; WANG, B.; ZHENG, B. A comparison between Miller and five-stroke cycles for enabling deeply downsized, highly boosted, spark-ignition engines with ultra expansion. **Energy Conversion and Management**, v. 123, p. 140–152, 1 set. 2016.

MURUGADOSS, P.; MODI, H.; BANSAL, G. Five Stroke Internal Combustion Engine. **International Journal of Control Theory and Applications**, v. 9, p. 5855, 27 set. 2016.

NAAKTGEBOREN, C. An air-standard finite-time heat addition Otto engine model. **International Journal of Mechanical Engineering Education**, v. 45, n. 2, p. 103–119, 1 abr. 2017.

SCHMITZ, G. **Five-stroke internal combustion engine**, 29 abr. 2003. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6553977B2/en>>. Acesso em: 8 maio. 2018

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos Estudos - CEBRAP**, n. 79, p. 47–69, nov. 2007.

## APÊNDICE A – BIBLIOTECA DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DO MOTOR

```
In [1]: using SymPy
struct Cilindro
    rDS:: AbstractFloat # Relação de diametro e curso do Motor
    rv:: AbstractFloat #Razão de Compressão do Motor
    Vd:: AbstractFloat #Deslocamento total do Motor em m^3
    rLR:: AbstractFloat #Relação Biela-Manivela do Motor
    z:: Integer #Numero de Cilindros
    θ :: AbstractFloat #Angulo de ignição
    Δtc:: AbstractFloat #Tempo de duração da queima em s
    N:: AbstractFloat #Rotação do Motor
    λ:: AbstractFloat #Razão entre o Diametro do Cilindro 2 e o Cilindro 1
end
```

```
In [2]: Vdu(m::Cilindro)= m.Vd/m.z #Volume Deslocado do Cilindro em m^3
ω(m::Cilindro)= 2π*m.N/60 #Rotação do Motor em rad/s
δ(m::Cilindro)= ω(m)*m.Δtc #Duração da queima em rad
D(m::Cilindro)= (4*Vdu(m)*m.rDS/π)^(1/3)
Vmin(m::Cilindro)= Vdu(m)/(m.rv-1)
S(m::Cilindro)= D(m)/m.rDS
R(m::Cilindro)= S(m)/2
L(m::Cilindro)= R(m)*m.rLR
Vmax(m::Cilindro)= Vmin(m)* m.rv
```

Out[2]: Vmax (generic function with 1 method)

```
In [3]: rDS(m::Cilindro) = m.rDS
rv(m::Cilindro) = m.rv
Vd(m::Cilindro) = m.Vd
rLR(m::Cilindro) = m.rLR
z(m::Cilindro) = m.z
θ(m::Cilindro) = m.θ
Δtc(m::Cilindro) = m.Δtc
N(m::Cilindro) = m.N
λ(m::Cilindro)=m.λ
```

Out[3]: λ (generic function with 1 method)

```
In [4]: Vmax2(m::Cilindro)=Vmax(m)*λ(m)^2
Vmin2(m::Cilindro)=Vmin(m)*λ(m)^2
Vdu2(m::Cilindro)=Vdu(m)*λ(m)^2
L2(m::Cilindro)=L(m)
R2(m::Cilindro)=R(m)
rv2(m::Cilindro)=Vmax2(m)/Vmin2(m)
D2(m::Cilindro)=D(m)*λ(m)
S2(m::Cilindro)=S(m)
rLR2(m::Cilindro)=L2(m)/R2(m)
```

Out[4]: rLR2 (generic function with 1 method)

```
In [5]: x(m::Cilindro, α::Real) = L(m) * (1 - √(1 - (sin(α) / rLR(m))^2)) + R(m) * (1 - cos(α))
```

Out[5]: x (generic function with 1 method)

```
In [6]: V(m::Cilindro, α::Real) = Vmin(m) + (π * x(m, α) * D(m) ^ 2) / 4
```

Out[6]: V (generic function with 1 method)

```
In [7]: x2(m::Cilindro, α::Real) = L2(m) * (1 - √(1 - (sin(α) / rLR2(m))^2)) + R2(m) * (1 - cos(α))
```

Out[7]: x2 (generic function with 1 method)

```
In [8]: V2(m::Cilindro, α::Real) = Vmin2(m) + (π * x2(m, α) * D2(m) ^ 2) / 4
```

Out[8]: V2 (generic function with 1 method)

## APÊNDICE B – BIBLIOTECA DA MODELAGEM DO GÁS

```
In [1]: using SymPy
        _t= Sym("T")
        struct idealgas
            nome:: String
            M:: AbstractFloat
            cpCoef:: NTuple{4,AbstractFloat}
        end
```

```
In [2]: ar=idealgas("AR",28.97,(28.11,0.1967e-02,0.4802e-5,-1.966e-9))
```

```
Out[2]: idealgas("AR", 28.97, (28.11, 0.001967, 4.802e-6, -1.966e-9))
```

```
In [3]: nome(gas::idealgas) =gas.nome
        M(gas::idealgas) = gas.M
        cpCoef(gas::idealgas) = gas.cpCoef
```

```
Out[3]: cpCoef (generic function with 1 method)
```

```
In [4]: RU()= 8.31447
        R(gas::idealgas) = RU()/ M(gas)
```

```
Out[4]: R (generic function with 1 method)
```

```
In [5]: cvCoef(gas::idealgas) = (gas.cpCoef[1]- RU(), gas.cpCoef[2:end]...)
```

```
Out[5]: cvCoef (generic function with 1 method)
```

```
In [6]: P(gas::idealgas, Molr::Bool=false; T::Real, v::Real)= Molr ? RU()*T/v : R(gas)
        *T/v
        T(gas::idealgas, Molr::Bool=false; P::Real, v::Real)= Molr ? P * v / RU() : P*
        v / R(gas)
        v(gas::idealgas, Molr::Bool=false; P::Real, T::Real)= Molr ? RU()*T/P : R(gas)
        *T/P
```

```
Out[6]: v (generic function with 2 methods)
```

```
In [7]: Fcp(gas::idealgas, Molr= false)= begin
        val = sum(cpCoef(gas).*(_t.^(0:3.0)))
        Molr ? val : val/M(gas)
    end
```

```
Out[7]: Fcp (generic function with 2 methods)
```

```
In [8]: cp(gas::idealgas, Molr= false; T::Real)= begin
        val = Fcp(gas).subs(_t,T)
      end
```

Out[8]: cp (generic function with 2 methods)

```
In [9]: Fcv(gas::idealgas, Molr=false;)= begin
        val = sum(cvCoef(gas).*(_t.^(0:3.0)))
        Molr ? val : val / M(gas)
      end
```

Out[9]: Fcv (generic function with 2 methods)

```
In [10]: cv(gas::idealgas, Molr= false; T::Real)= begin
        val = Fcv(gas).subs(_t,T)
      end
```

Out[10]: cv (generic function with 2 methods)

```
In [11]: Fy(gas::idealgas)= Fcp(gas)/Fcv(gas)
```

Out[11]: Fy (generic function with 1 method)

```
In [12]: y(gas::idealgas;T::Real)= Fy(gas).subs(_t,T)
```

Out[12]: y (generic function with 1 method)

```
In [13]: Fu(gas::idealgas)= begin
        val= integrate(Fcv(gas),_t)
      end
```

Out[13]: Fu (generic function with 1 method)

```
In [14]: u(gas::idealgas;T::Real)= begin
        val=Fu(gas).subs(_t,T)
      end
```

Out[14]: u (generic function with 1 method)

```
In [15]: Fh(gas::idealgas)= begin
        val= integrate(Fcp(gas),_t)
      end
```

Out[15]: Fh (generic function with 1 method)



```
In [16]: h(gas::idealgas;T::Real)= begin
        val= Fh(gas).subs(_t,T)
        end
```

Out[16]: h (generic function with 1 method)

```
In [17]: Tu(gas::idealgas; ui::Real, maxIt::Integer=5)=begin
        theT= [ui*M(gas)/cvCoef(gas)[1]]
        for i in 1:maxIt
            theuf = u(gas,T=theT[end])
            thecv = cv(gas,T=theT[end])
            append!(theT, theT[end] + (ui - theuf)/thecv)
        end
        theT[end]
    end
```

Out[17]: Tu (generic function with 1 method)

```
In [18]: Th(gas::idealgas; hi::Real, maxIt::Integer=20)=begin
        theT= [hi*M(gas)/cpCoef(gas)[1]]
        for i in 1:maxIt
            thehf = h(gas,T=theT[end])
            thecp = cv(gas,T=theT[end])
            append!(theT, theT[end] + (hi - thehf)/thecp)
        end
        theT[end]
    end
```

Out[18]: Th (generic function with 1 method)

## APÊNDICE C – CODIGO MOTOR 5 TEMPOS EM REGIME PERIÓDICO PERMANENTE

```
In [1]: using SymPy
        using Plots
        import MotorProp
        using GasProp
        using Printf

In [2]: ar=GasProp.idealgas("AR",28.97,(28.11,0.1967e-02,0.4802e-5,-1.966e-9))
Out[2]: GasProp.idealgas("AR", 28.97, (28.11, 0.001967, 4.802e-6, -1.966e-9))

In [3]: CAP=MotorProp.Cilindro(1,9,1000e-6,3.2,2,-0.6283185307179586/2,2e-3,3000,1.55)
Out[3]: MotorProp.Cilindro(1.0, 9.0, 0.001, 3.2, 2, -0.3141592653589793, 0.002, 3000.0, 1.55)
```

### Propriedades do Cilindro de Alta pressão

```
In [4]: V1du=MotorProp.Vdu(CAP)
        print("Valor do deslocamento e de ", V1du*1e6, " cm³\n")
        D1=MotorProp.D(CAP)
        print("O diametro do pistao e de ",D1*1e3," mm\n")
        V1min=MotorProp.Vmin(CAP)
        print("O volume minimo e de ",V1min*1e6, " cm³\n")
        S1=MotorProp.S(CAP)
        print("O curso do pistão e de", S1*1e3, "mm \n")
        L1=MotorProp.L(CAP)
        print("O comprimento da biela e de ",L1*1e3," mm \n")
        V1max=MotorProp.Vmax(CAP)
        print("O volume total do cilindro e de ",V1max*1e6, " cm³\n")
        λ1= MotorProp.λ(CAP)

Valor do deslocamento e de 500.0cm³
O diametro do pistao e de 86.02540138280997 mm
O volume minimo e de 62.5cm³
O curso do pistão e de86.02540138280997mm
O comprimento da biela e de 137.64064221249598 mm
O volume total do cilindro e de 562.5000000000001 cm³

Out[4]: 1.55
```

## Propriedades do Cilindro de Baixa Pressão

```
In [5]: V2du=MotorProp.Vdu2(CAP)
print("Valor do deslocamento e de ", V2du*1e6, " cm³\n")
D2=MotorProp.D2(CAP)
print("O diametro do pistao e de ",D2*1e3," mm\n")
V2min=MotorProp.Vmin2(CAP)
print("O volume minimo e de ",V2min*1e6, " cm³\n")
S2=MotorProp.S2(CAP)
print("O curso do pistão e de", S2*1e3, " mm \n")
L2=MotorProp.L2(CAP)
print("O comprimento da biela e de ",L2*1e3," mm \n")
R2=MotorProp.R2(CAP)
print("O comprimento da manivela e de ",R2*1e3," mm \n")
V2max=MotorProp.Vmax2(CAP)
print("O volume total do cilindro e de ",V2max*1e6, " cm³\n")
rv2=MotorProp.rv2(CAP)
print("A taxa de compressão é de ",rv2," \n")
```

```
Valor do deslocamento e de 1201.2500000000002cm³
O diametro do pistao e de 133.3393721433555 mm
O volume minimo e de 150.15625000000003cm³
O curso do pistão e de86.02540138280997mm
O comprimento da biela e de 137.64064221249598 mm
O comprimento da manivela e de 43.01270069140499 mm
O volume total do cilindro e de 1351.4062500000005 cm³
A taxa de compressão é de 9.0
```

## Abertura e diametro de Valvulas

```
In [6]: ø1=15e-3
ø2=20e-3
ø3=30e-3
Vv1=0.0
Vv12=0.0
Vv3=0.0
Vv32=0.0
Vv2a=0.0
```

```
Out[6]: 0.0
```

## Função Trabalho

```
In [7]: Wpoli(Pi::Real,Vi::Real,Vf::Real,n::Real)= begin
        if abs(Vf-Vi)<εV
            return 0.0
        elseif n==1
            return Pi*Vi*log(Vf/Vi)
        else
            return Pi*((Vi/Vf)^n *Vf - Vi) / (1 - n)
        end
    end
```

Out[7]: Wpoli (generic function with 1 method)

## Função de Fração de Adição de calor

```
In [8]: y(α::AbstractFloat,ciclos::AbstractFloat)=begin
        if deg2rad(α) < 4π*ciclos+2π+MotorProp.θ(CAP)
            return 0
        elseif deg2rad(α)>= 4π*ciclos+2π+MotorProp.θ(CAP) && deg2rad(α)<= 4π*ciclos+2π+MotorProp.θ(CAP)+MotorProp.δ(CAP)
            return 0.5-0.5*cos(π/MotorProp.δ(CAP)*(deg2rad(α)-MotorProp.θ(CAP)))
        elseif deg2rad(α) > 4π*ciclos+2π+MotorProp.θ(CAP)+MotorProp.δ(CAP)
            return 1
        end
    end
```

Out[8]: y (generic function with 1 method)

## Função Balanço de Energia

```
In [9]: uf(mi::AbstractFloat,ui::AbstractFloat,he::AbstractFloat,Δme::AbstractFloat,hs
        ::AbstractFloat,Δms::AbstractFloat,W::AbstractFloat,Q::AbstractFloat,VVe::Abst
        ractFloat,VVs::AbstractFloat)=begin
            val=(mi*ui+VVe*he*Δme-VVs*hs*Δms-W+Q)/(mi+(VVe*Δme)-(VVs*Δms))
        end
    uf2(mi::AbstractFloat,ui::AbstractFloat,he1::AbstractFloat,Δme1::AbstractFloat
        ,VVe1::AbstractFloat,he2::AbstractFloat,Δme2::AbstractFloat,VVe2::AbstractFloa
        t,hs::AbstractFloat,Δms::AbstractFloat,VVs::AbstractFloat,W::AbstractFloat)=be
        gin
            val=(mi*ui+VVe1*he1*Δme1+VVe2*he2*Δme2-VVs*hs*Δms-W)/(mi+(VVe1*Δme1)+(VVe2
            *Δme2)-(VVs*Δms))
        end
```

Out[9]: uf2 (generic function with 1 method)

## Função do Ajuste de Massa

```
In [10]: a=[]
fa=[]
b=[]
fb=[]
Δmk(Po::AbstractFloat,Pd::AbstractFloat,Δm::AbstractFloat)=begin
  if Po-Pd>0
    append!(fa,Po-Pd)
    append!(a,Δm)
    return ((a[end]*fb[end])-(b[end]*fa[end]))/(fb[end]-fa[end])
  elseif Po-Pd<0
    append!(fb,Po-Pd)
    append!(b,Δm)
    return ((a[end]*fb[end])-(b[end]*fa[end]))/(fb[end]-fa[end])
  elseif Po==Pd
    return 0.0
  end
end
```

Out[10]: Δmk (generic function with 1 method)

## Função ajuste do coeficiente Politropico e do trabalho

```
In [11]: Wk(Vi::AbstractFloat,Vf::AbstractFloat,Pi::AbstractFloat,Pf::AbstractFloat,ΔV
::AbstractFloat)=begin
  if abs(Vf-Vi)>ΔV
    n=log(Pf/Pi)/log(Vi/Vf)
    return Wpoli(Pf,Vi,Vf,n)
  else
    return 0
  end
end
```

Out[11]: Wk (generic function with 1 method)

## Função Ajuste do coeficiente politropico e do trabalho no caso do cilindro 2 na Expansão extendida

```
In [12]: Wk2(V1i::AbstractFloat,V1f::AbstractFloat,V2i::AbstractFloat,V2f::AbstractFloat,P1i::AbstractFloat,P1f::AbstractFloat,P2i::AbstractFloat,P2f::AbstractFloat,ΔV::AbstractFloat)=begin
    if abs(V2f-V2i)>ΔV
        n1=log(P1f/P1i)/log(V1i/V1f)
        n2=(log(P1i/P2i)+n1*log(V1i/V1f))/log(V2i/V2f)
        return Wpoli(P2f,V2i,V2f,n2)
    else
        return 0
    end
end
```

```
Out[12]: Wk2 (generic function with 1 method)
```

## Parametros iniciais dos cilindros

```
In [13]: Pa= 101.325
Ta= 296.15
P1= [90.0]
T1= [296.15]
m1= []
append!(m1,(P1[1]*V1min)/(GasProp.R(ar)*T1[1]))
W1=[]
u1=[]
append!(u1,convert(AbstractFloat,GasProp.u(ar, T=T1[1])))
VC1=[]
append!(VC1,MotorProp.V(CAP,deg2rad((0))))
Δma1=[]
Δm12=[]
P2= [101.325]
T2= [296.15]
m2= []
append!(m2,(P2[1]*V2max)/(GasProp.R(ar)*T2[1]))
Δm2a=[]
W2=[]
u2=[]
append!(u2,convert(AbstractFloat,GasProp.u(ar, T=T2[1])))
VC2=[]
append!(VC2,MotorProp.V(CAP,deg2rad((180))))
P3= [3958.552876703645]
T3= [1321.2975937591416]
m3= []
append!(m3,(P3[1]*V1min)/(GasProp.R(ar)*T3[1]))
Δma3=[]
Δm32=[]
W3=[]
u3=[]
append!(u3,convert(AbstractFloat,GasProp.u(ar, T=T3[1])))
VC3=[]
append!(VC3,MotorProp.V(CAP,deg2rad((0))))
εW= √(eps(Float64))
εP= 1e-2
εV=√(eps(V1min))
q=1000
Q1=[0.0]
Q3=[0.0]
NPA=180
tp= deg2rad(180/NPA)/MotorProp.ω(CAP)
```

Out[13]: 5.555555555555555e-5

```

In [14]: ciclo1=0.0
ciclo2=0.0
ciclo3=0.0
i=1
RP=0
a1=0.0
while RP<1
    a2=a1+180.0
    a3=a1+360.0
    VC1i=MotorProp.V(CAP,deg2rad(a1))
    VC1f=MotorProp.V(CAP,deg2rad(a1+180/NPA))
    VC2i=MotorProp.V2(CAP,deg2rad(a2))
    VC2f=MotorProp.V2(CAP,deg2rad(a2+180/NPA))
    VC3i=MotorProp.V(CAP,deg2rad(a3))
    VC3f=MotorProp.V(CAP,deg2rad(a3+180/NPA))
    if (720*ciclo1)+0<=a1<(720*ciclo1)+180 && Pa<P1[ end]
        Ww1=-1.0
        ha1=convert(AbstractFloat, GasProp.h(ar, T=T1[ end]))
        va1=GasProp.v(ar, P=P1[ end], T=T1[ end])
        cs=convert( AbstractFloat, sqrt(1000*GasProp.g(ar, T=T1[ end])*GasProp.R(ar)*
T1[ end]))
        m1max= cs*pi/4*ø1^2*tp/va1
        append!(Δm1, m1max)
    elseif (720*ciclo1)+0<=a1<(720*ciclo1)+180
        Ww1=1.0
        ha1=convert( AbstractFloat, GasProp.h(ar, T=Ta))
        va1=GasProp.v(ar, P=Pa, T=Ta)
        cs=convert( AbstractFloat, sqrt(1000*GasProp.g(ar, T=Ta)*GasProp.R(ar)*Ta))
        m1max= cs*pi/4*ø1^2*tp/va1
        append!(Δm1, m1max)
    else
        Ww1=0.0
        ha1=0.0
        append!(Δm1, 0.0)
    end
    if (720*ciclo1)+540<=a1<(720*ciclo1)+720 && P1[ end]<P2[ end]
        Ww12=-1.0
        h12=convert( AbstractFloat, GasProp.h(ar, T=T2[ end]))
        v12=GasProp.v(ar, P=P2[ end], T=T2[ end])
        cs=convert( AbstractFloat, sqrt(1000*GasProp.g(ar, T=T2[ end])*GasProp.R(ar)*
T2[ end]))
        m12max= cs*pi/4*ø2^2*tp/v12
        append!(Δm12, m12max)
    elseif (720*ciclo1)+540<=a1<(720*ciclo1)+720
        Ww12=1.0
        h12=convert( AbstractFloat, GasProp.h(ar, T=T1[ end]))
        v12=GasProp.v(ar, P=P1[ end], T=T1[ end])
        cs=convert( AbstractFloat, sqrt(1000*GasProp.g(ar, T=T1[ end])*GasProp.R(ar)*
T1[ end]))
        m12max= cs*pi/4*ø2^2*tp/v12
        append!(Δm12, m12max)
    else
        Ww12=0.0
        h12=0.0
        append!(Δm12, 0.0)
    end
end

```



```

if (720*ciclo1)+720<=a3<(720*ciclo1)+900 && Pa<P3[end]
  VVa3=-1.0
  ha3=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=T3[end]))
  va3=GasProp.v(ar,P=P3[end],T=T3[end])
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=T3[end])*GasProp.R(ar)*
T3[end]))
  ma3max= cs*π/4*ø1^2*tp/va3
  append!(Δma3,ma3max)
elseif (720*ciclo1)+720<=a3<(720*ciclo1)+900
  VVa3=1.0
  ha3=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=Ta))
  va3=GasProp.v(ar,P=Pa,T=Ta)
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=Ta)*GasProp.R(ar)*Ta))
  ma3max= cs*π/4*ø1^2*tp/va3
  append!(Δma3,ma3max)
else
  VVa3=0.0
  ha3=0.0
  append!(Δma3,0.0)
end
if (720*ciclo1)+540<=a3<(720*ciclo1)+720 && P3[end]<P2[end]
  VV32=-1.0
  h32=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=T2[end]))
  v32=GasProp.v(ar,P=P2[end],T=T2[end])
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=T2[end])*GasProp.R(ar)*
T2[end]))
  m32max= cs*π/4*ø2^2*tp/v32
  append!(Δm32,m32max)
elseif (720*ciclo1)+540<=a3<(720*ciclo1)+720
  VV32=1.0
  h32=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=T3[end]))
  v32=GasProp.v(ar,P=P3[end],T=T3[end])
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=T3[end])*GasProp.R(ar)*
T3[end]))
  m32max= cs*π/4*ø2^2*tp/v32
  append!(Δm32,m32max)
else
  VV32=0.0
  h32=0.0
  append!(Δm32,0.0)
end
if (360*ciclo2)+180<=a2<(360*ciclo2)+360 && P2[end]<Pa
  VV2a=-1.0
  h2a=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=Ta))
  v2a=GasProp.v(ar,P=Pa,T=Ta)
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=Ta)*GasProp.R(ar)*Ta))
  m2amax= cs*π/4*ø3^2*tp/v2a
  append!(Δm2a,m2amax)
elseif (360*ciclo2)+180<=a2<(360*ciclo2)+360
  VV2a=1.0
  h2a=convert(AbstractFloat,GasProp.h(ar,T=T2[end]))
  v2a=GasProp.v(ar,P=P2[end],T=T2[end])
  cs=convert(AbstractFloat,√(1000*GasProp.γ(ar,T=T2[end])*GasProp.R(ar)*
T2[end]))
  m2amax= cs*π/4*ø3^2*tp/v2a
  append!(Δm2a,m2amax)
else

```

```

V2a=0.0
h2a=0.0
append!(Δm2a,0.0)
end
P1temp=[]
P2temp=[]
P3temp=[]
t1temp=[]
t2temp=[]
t3temp=[]
u1temp=[]
u2temp=[]
u3temp=[]
n1temp=[]
n2temp=[]
n3temp=[]
W1temp=[]
W2temp=[]
W3temp=[]
if VVa1==0 && VV12==0
    append!(Q1,m1[end]*q*(y(α1+180/NPA,ciclo1)-y(α1,ciclo1)))
    append!(n1temp,convert(AbstractFloat,GasProp.γ(ar,T=T1[end])))
    append!(W1temp, Wpoli(P1[end],VC1i,VC1f,convert(AbstractFloat,n1temp[en
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W1temp[end]-W1temp[end-1])/W1temp[end]) >= εW
        u1f=uf(m1[end],u1[end],ha1,Δma1[end],h12,Δm12[end],W1temp[end],Q1[
end],Vva1,VV12)
        append!(u1temp,convert(AbstractFloat,u1f))
        append!(t1temp, GasProp.Tu(ar,ui=u1f))
        append!(P1temp,GasProp.P(ar, T= t1temp[end], v= convert(AbstractFl
oat,VC1f/(m1[end]+(Vva1*Δma1[end])-(VV12*Δm12[end])))))
        append!(W1temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC1i,VC1f,P1[end],P1temp[e
nd],εV)))
        j+=1
    end
end
if VVa3==0 && VV32==0
    append!(Q3,m3[end]*q*(y(α3+180.0/NPA,ciclo3)-y(α3,ciclo3)))
    append!(n3temp,convert(AbstractFloat,GasProp.γ(ar,T=T3[end])))
    append!(W3temp, Wpoli(P3[end],VC3i,VC3f,convert(AbstractFloat,n3temp[e
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W3temp[end]-W3temp[end-1])/W3temp[end]) >= εW
        u3f=uf(m3[end],u3[end],ha3,Δma3[end],h32,Δm32[end],W3temp[end],Q3[
end],Vva3,VV32)
        append!(u3temp,convert(AbstractFloat,u3f))
        append!(t3temp, GasProp.Tu(ar,ui=u3f))
        append!(P3temp,GasProp.P(ar, T= t3temp[end], v= convert(AbstractFl
oat,VC3f/(m3[end]+(Vva3*Δma3[end])-(VV32*Δm32[end])))))
        append!(W3temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC3i,VC3f,P3[end],P3temp[e
nd],εV)))
        j+=1
    end
end
if VVa1!=0
    append!(n1temp,convert(AbstractFloat,GasProp.γ(ar,T=T1[end])))

```

```

    append!(W1temp, Wpoli(P1[end],VC1i,VC1f,convert(AbstractFloat,n1temp[en
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W1temp[end]-W1temp[end-1])/W1temp[end]) >= εW
        u1f=uf(m1[end],u1[end],ha1,Δma1[end],h12,Δm12[end],W1temp[end],0.0
,Wa1,VV12)
        if u1f>0
            append!(u1temp,convert(AbstractFloat,u1f))
            append!(t1temp, GasProp.Tu(ar,ui=u1f))
            append!(P1temp,GasProp.P(ar, T= t1temp[end], v= convert(Abstra
ctFloat,VC1f/(m1[end]+(VWa1*Δma1[end])-(VV12*Δm12[end]))))
            append!(W1temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC1i,VC1f,P1[end],P1te
mp[end],εV)))
        else
            append!(W1temp,W1temp[end])
            append!(P1temp,Pa+1)
        end
        j+=1
    end
    if VVa1>0
        Po=Pa
        Pd=P1temp[end]
    elseif VVa1<0
        Po=P1temp[end]
        Pd=Pa
    end
    if Po<Pd
        k=0
        append!(b,Δma1[end])
        append!(fb,Po-Pd)
        maltemp=[]
        append!(n1temp,convert(AbstractFloat,GasProp.γ(ar,T=T1[end])))
        append!(W1temp, Wpoli(P1[end],VC1i,VC1f,convert(AbstractFloat,n1te
mp[end])))
        append!(maltemp,0.0)
        while 0>Pa-P1temp[end] || εP<Pa-P1temp[end]
            j=0
            while j==0 || abs((W1temp[end]-W1temp[end-1])/W1temp[end]) >=
εW
                u1f=uf(m1[end],u1[end],ha1,maltemp[end],h12,Δm12[end],W1te
mp[end],0.0,VVa1,VV12)
                append!(u1temp,convert(AbstractFloat,u1f))
                append!(t1temp, GasProp.Tu(ar,ui=u1f))
                append!(P1temp,GasProp.P(ar, T= t1temp[end], v= convert(Ab
stractFloat,VC1f/(m1[end]+(VWa1*maltemp[end])-(VV12*Δm12[end]))))
                append!(W1temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC1i,VC1f,P1[end],
P1temp[end],εV)))
            j+=1
        end
        if VVa1<0 && P1temp[end]<Pa
            Po=Pa
            Pd=P1temp[end]
            append!(maltemp,-Δmk(Po,Pd,maltemp[end]))
        elseif VVa1>0
            Po=Pa
            Pd=P1temp[end]
            append!(maltemp,Δmk(Po,Pd,maltemp[end]))
        end
    end
end

```

```

        elseif VVa1<0
            Po=P1temp[end]
            Pd=Pa
            append!(ma1temp,Δmk(Po,Pd,ma1temp[end]))
        end
        k+=1
    end
    append!(Δma1,ma1temp[end-1])
end
end
if VVa3!=0
    append!(n3temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T3[end])))
    append!(W3temp, Wpoli(P3[end], VC3i, VC3f, convert(AbstractFloat, n3temp[en
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W3temp[end]-W3temp[end-1])/W3temp[end]) >= εW
        u3f=uf(m3[end], u3[end], ha3, Δma3[end], h32, Δm32[end], W3temp[end], 0.0
, VVa3, VV32)
        if u3f>0
            append!(u3temp, convert(AbstractFloat, u3f))
            append!(t3temp, GasProp.Tu(ar, ui=u3f))
            append!(P3temp, GasProp.P(ar, T= t3temp[end], v= convert(Abstra
ctFloat, VC3f/(m3[end]+(VVa3*Δma3[end])-(VV32*Δm32[end]))))
            #print("P3temp= $(P3temp[end])\n")
            append!(W3temp, convert(AbstractFloat, Wk(VC3i, VC3f, P3[end], P3te
mp[end], εV)))
        else
            append!(W3temp, W3temp[end])
            append!(P3temp, Pa+1)
        end
        j+=1
    end
    if VVa3>0
        Po=Pa
        Pd=P3temp[end]
    elseif VVa3<0
        Po=P3temp[end]
        Pd=Pa
    end
    if Po<Pd
        append!(b, Δma3[end])
        append!(fb, Po-Pd)
        k=0
        ma3temp=[]
        append!(n3temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T3[end])))
        append!(W3temp, Wpoli(P3[end], VC3i, VC3f, convert(AbstractFloat, n3te
mp[end])))
        append!(ma3temp, 0.0)
        while 0>Pa-P3temp[end] || εP<Pa-P3temp[end]
            j=0
            while j==0 || abs((W3temp[end]-W3temp[end-1])/W3temp[end]) >=
εW
                u3f=uf(m3[end], u3[end], ha3, ma3temp[end], h32, Δm32[end], W3te
mp[end], 0.0, VVa3, VV32)
                append!(u3temp, convert(AbstractFloat, u3f))
                append!(t3temp, GasProp.Tu(ar, ui=u3f))
                append!(P3temp, GasProp.P(ar, T= t3temp[end], v= convert(Ab

```

```

structFloat,VC3f/(m3[end]+(WVa3*ma3temp[end])-(VV32*Δm32[end])))
    #print("P3temp= $($@sprintf("%.5f", P3temp[end]))\n")
    append!(W3temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC3i,VC3f,P3[end],
P3temp[end],εV))
        j+=1
    end
    if WVa3<0 && P3temp[end]<Pa
        Po=Pa
        Pd=P3temp[end]
        append!(ma3temp,-Δmk(Po,Pd,ma3temp[end]))
    elseif WVa3>0
        Po=Pa
        Pd=P3temp[end]
        append!(ma3temp,Δmk(Po,Pd,ma3temp[end]))
    elseif WVa3<0
        Po=P3temp[end]
        Pd=Pa
        append!(ma3temp,Δmk(Po,Pd,ma3temp[end]))
    end
    k+=1
end
append!(Δma3,ma3temp[end-1])
end
if WV2a!=0
    append!(n2temp,convert(AbstractFloat,GasProp.γ(ar,T=T2[end])))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end],VC2i,VC2f,convert(AbstractFloat,n2temp[e
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >= εW
        u2f=uf2(m2[end],u2[end],h12,Δm12[end],VV12,h32,Δm32[end],VV32,h2a,
Δm2a[end],WV2a,W2temp[end])
        if u2f>0
            append!(u2temp,convert(AbstractFloat,u2f))
            append!(t2temp, GasProp.Tu(ar,ui=u2f))
            append!(P2temp,GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(Abstra
ctFloat,VC2f/(m2[end]+(VV12*Δm12[end])+(VV32*Δm32[end])-(WV2a*Δm2a[end])))
            append!(W2temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC2i,VC2f,P2[end],P2te
mp[end],εV))
        else
            append!(W2temp,W2temp[end])
            append!(P2temp,Pa-1)
        end
        j+=1
    end
    if WV2a>0
        Po=P2temp[end]
        Pd=Pa
    elseif WV2a<0
        Po=Pa
        Pd=P2temp[end]
    end
    if Po<Pd
        append!(b,Δm2a[end])
        append!(fb,Po-Pd)
        k=0
        m2atemp=[]

```

```

    append!(n2temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T2[end])))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end], VC2i, VC2f, convert(AbstractFloat, n2temp[
mp[end]])))
    append!(m2atemp, 0.0)
    while 0 > P2temp[end] - Pa || εP < P2temp[end] - Pa
        j=0
        while j==0 || abs((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >=
εW
            u2f=uf2(m2[end], u2[end], h12, Δm12[end], WV12, h32, Δm32[end], V
V32, h2a, m2atemp[end], WV2a, W2temp[end])
            append!(u2temp, convert(AbstractFloat, u2f))
            append!(t2temp, GasProp.Tu(ar, ui=u2f))
            append!(P2temp, GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(Ab
stractFloat, VC2f/(m2[end]+(WV12*Δm12[end])+(WV32*Δm32[end])-(WV2a*m2atemp[en
d]]))))
            append!(W2temp, convert(AbstractFloat, Wk(VC2i, VC2f, P2[end],
P2temp[end], εV)))
            j+=1
        end
        if WV2a < 0 && Pa < P2temp[end]
            Po=P2temp[end]
            Pd=Pa
            append!(m2atemp, -Δmk(Po, Pd, m2atemp[end]))
        elseif WV2a > 0
            Po=P2temp[end]
            Pd=Pa
            append!(m2atemp, Δmk(Po, Pd, m2atemp[end]))
        elseif WV2a < 0
            Po=Pa
            Pd=P2temp[end]
            append!(m2atemp, Δmk(Po, Pd, m2atemp[end]))
        end
        k+=1
    end
    append!(Δm2a, m2atemp[end-1])
end
if WV12 != 0
    append!(n1temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T1[end])))
    append!(W1temp, Wpoli(P1[end], VC1i, VC1f, convert(AbstractFloat, n1temp[en
d]])))
    append!(n2temp, (n1temp[end]*log(VC1i/VC1f)+log(P1[end]/P2[end]))/log(V
C2i/VC2f))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end], VC2i, VC2f, convert(AbstractFloat, n2temp[en
d]])))
    j=0
    while j==0 || abs((W1temp[end]-W1temp[end-1])/W1temp[end]) >= εW || ab
s((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >= εW
        u1f=uf(m1[end], u1[end], ha1, Δma1[end], h12, Δm12[end], W1temp[end], 0.0
, WVa1, WV12)
        u2f=uf2(m2[end], u2[end], h12, Δm12[end], WV12, h32, Δm32[end], WV32, h2a,
Δm2a[end], WV2a, W2temp[end])
        if u1f > 0 && u2f > 0
            append!(u1temp, convert(AbstractFloat, u1f))
            append!(u2temp, convert(AbstractFloat, u2f))
            append!(t1temp, GasProp.Tu(ar, ui=u1f))
            append!(t2temp, GasProp.Tu(ar, ui=u2f))

```

```

        append!(P1temp, GasProp.P(ar, T= t1temp[end], v= convert(AbstractFloat, VC1f/(m1[end]+(Vv1*Δm1[end])-(Vv12*Δm12[end])))))
        append!(P2temp, GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(AbstractFloat, VC2f/(m2[end]+(Vv12*Δm12[end])+(Vv32*Δm32[end])-(Vv2a*Δm2a[end])))))
        append!(W1temp, convert(AbstractFloat, Wk(VC1i, VC1f, P1[end], P1temp[end], εV)))
        append!(W2temp, convert(AbstractFloat, Wk2(VC1i, VC1f, VC2i, VC2f, P1[end], P1temp[end], P2[end], P2temp[end], εV)))
    else
        append!(W1temp, W1temp[end])
        append!(W2temp, W2temp[end])
        append!(P2temp, P2[end])
        append!(P1temp, P2temp[end]-1)
    end
    j+=1
end
if P1temp[end]<P2temp[end]
    append!(b, Δm12[end])
    append!(fb, P1temp[end]-P2temp[end])
    k=1
    n=0
    m12temp=[]
    append!(n1temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T1[end])))
    append!(W1temp, Wpoli(P1[end], VC1i, VC1f, convert(AbstractFloat, n1temp[end])))
    append!(n2temp, (n1temp[end]*log(VC1i/VC1f)+log(P1[end]/P2[end]))/log(VC2i/VC2f))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end], VC2i, VC2f, convert(AbstractFloat, n2temp[end])))
    append!(m12temp, 0.0)
    while 0>P1temp[end]-P2temp[end] || εP< P1temp[end]-P2temp[end]
        j=0
        while j==0 || abs((W1temp[end]-W1temp[end-1])/W1temp[end]) >= εW || abs((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >= εW
            u1f=uf(m1[end], u1[end], ha1, Δm1[end], h12, m12temp[end], W1temp[end], 0.0, Vv1, Vv12)
            append!(u1temp, convert(AbstractFloat, u1f))
            u2f=uf2(m2[end], u2[end], h12, m12temp[end], Vv12, h32, Δm32[end], Vv32, h2a, Δm2a[end], Vv2a, W2temp[end])
            append!(u2temp, convert(AbstractFloat, u2f))
            append!(t1temp, GasProp.Tu(ar, ui=u1f))
            append!(t2temp, GasProp.Tu(ar, ui=u2f))
            append!(P1temp, GasProp.P(ar, T= t1temp[end], v= convert(AbstractFloat, VC1f/(m1[end]+(Vv1*Δm1[end])-(Vv12*m12temp[end])))))
            append!(P2temp, GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(AbstractFloat, VC2f/(m2[end]+(Vv12*m12temp[end])+(Vv32*Δm32[end])-(Vv2a*Δm2a[end])))))
            append!(W1temp, convert(AbstractFloat, Wk(VC1i, VC1f, P1[end], P1temp[end], εV)))
            append!(W2temp, convert(AbstractFloat, Wk2(VC1i, VC1f, VC2i, VC2f, P1[end], P1temp[end], P2[end], P2temp[end], εV)))
            j+=1
        end
        append!(m12temp, Δmk(P1temp[end], P2temp[end], m12temp[end]))
        k+=1
    end
    append!(Δm12, m12temp[end-1])

```

```

    end
  end
  if W32!=0
    append!(n3temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T3[end])))
    append!(W3temp, Wpoli(P3[end], VC3i, VC3f, convert(AbstractFloat, n3temp[
nd])))
    append!(n2temp, (n3temp[end]*log(VC3i/VC3f)+log(P3[end]/P2[end]))/log(V
C2i/VC2f))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end], VC2i, VC2f, convert(AbstractFloat, n2temp[
nd])))
    j=0
    while j==0 || abs((W3temp[end]-W3temp[end-1])/W3temp[end]) >= εW || ab
s((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >= εW
      u3f=uf(m3[end], u3[end], ha3, Δma3[end], h32, Δm32[end], W3temp[end], 0.0
, VVa3, VV32)
      u2f=uf2(m2[end], u2[end], h12, Δm12[end], VV12, h32, Δm32[end], VV32, h2a,
Δm2a[end], VV2a, W2temp[end])
      if u3f>0 && u2f>0
        append!(u3temp, convert(AbstractFloat, u3f))
        append!(u2temp, convert(AbstractFloat, u2f))
        append!(t3temp, GasProp.Tu(ar, ui=u3f))
        append!(t2temp, GasProp.Tu(ar, ui=u2f))
        append!(P3temp, GasProp.P(ar, T= t3temp[end], v= convert(Abstra
ctFloat, VC3f/(m3[end]+(VVa3*Δma3[end])-(VV32*Δm32[end])))))
        append!(P2temp, GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(Abstra
ctFloat, VC2f/(m2[end]+(VW12*Δm12[end])+(VV32*Δm32[end])-(VW2a*Δm2a[end])))))
        append!(W3temp, convert(AbstractFloat, Wk(VC3i, VC3f, P3[end], P3te
mp[end], εV)))
        append!(W2temp, convert(AbstractFloat, Wk2(VC3i, VC3f, VC2i, VC2f, P
3[end], P3temp[end], P2[end], P2temp[end], εV)))
      else
        append!(W3temp, W3temp[end])
        append!(W2temp, W2temp[end])
        append!(P2temp, P2[end])
        append!(P3temp, P2temp[end]-1)
      end
      j+=1
    end
  end
  if P3temp[end]<P2temp[end]
    #print("Em VV32 Ma<1\n")
    append!(b, Δm32[end])
    append!(fb, P3temp[end]-P2temp[end])
    k=1
    n=0
    m32temp=[]
    append!(n3temp, convert(AbstractFloat, GasProp.γ(ar, T=T3[end])))
    append!(W3temp, Wpoli(P3[end], VC3i, VC3f, convert(AbstractFloat, n3te
mp[end])))
    append!(n2temp, (n3temp[end]*log(VC3i/VC3f)+log(P3[end]/P2[end]))/1
og(VC2i/VC2f))
    append!(W2temp, Wpoli(P2[end], VC2i, VC2f, convert(AbstractFloat, n2te
mp[end])))
    append!(m32temp, 0.0)
    while 0>P3temp[end]-P2temp[end] || εP< P3temp[end]-P2temp[end]
      j=0
      while j==0 || abs((W3temp[end]-W3temp[end-1])/W3temp[end]) >=
εW || abs((W2temp[end]-W2temp[end-1])/W2temp[end]) >= εW

```



```

        u3f=uf(m3[end],u3[end],ha3,Δma3[end],h32,m32temp[end],W3temp[end],0.0,VVa3,VV32)
        append!(u3temp,convert(AbstractFloat,u3f))
        u2f=uf2(m2[end],u2[end],h12,Δm12[end],VV12,h32,m32temp[end],VV32,h2a,Δm2a[end],VV2a,W2temp[end])
        append!(u2temp,convert(AbstractFloat,u2f))
        append!(t3temp, GasProp.Tu(ar,ui=u3f))
        append!(t2temp, GasProp.Tu(ar,ui=u2f))
        append!(P3temp,GasProp.P(ar, T= t3temp[end], v= convert(AbstractFloat,VC3f/(m3[end]+(VVa3*Δma3[end])-(VV32*m32temp[end])))))
        append!(P2temp,GasProp.P(ar, T= t2temp[end], v= convert(AbstractFloat,VC2f/(m2[end]+(VV12*Δm12[end])+(VV32*m32temp[end])-(VV2a*Δm2a[end])))))
        append!(W3temp,convert(AbstractFloat,Wk(VC3i,VC3f,P3[end],P3temp[end],εV)))
        append!(W2temp,convert(AbstractFloat,Wk2(VC3i,VC3f,VC2i,VC2f,P3[end],P3temp[end],P2[end],P2temp[end],εV)))
        j+=1
    end
    append!(m32temp,Δmk(P3temp[end],P2temp[end],m32temp[end]))
    k+=1
end
append!(Δm32,m32temp[end-1])
end
end
append!(W1,convert(AbstractFloat,W1temp[end]))
append!(u1,convert(AbstractFloat,u1temp[end]))
append!(P1,convert(AbstractFloat,P1temp[end]))
append!(T1,convert(AbstractFloat,t1temp[end]))
append!(m1,convert(AbstractFloat,m1[end]+Δma1[end]*VVa1-Δm12[end]*VV12))
append!(VC1,convert(AbstractFloat,VC1f))

append!(W2,convert(AbstractFloat,W2temp[end]))
append!(u2,convert(AbstractFloat,u2temp[end]))
append!(P2,convert(AbstractFloat,P2temp[end]))
append!(T2,convert(AbstractFloat,t2temp[end]))
append!(m2,convert(AbstractFloat,m2[end]-Δm2a[end]*VV2a+Δm12[end]*VV12+Δm32[end]*VV32))
append!(VC2,convert(AbstractFloat,VC2f))

append!(W3,convert(AbstractFloat,W3temp[end]))
append!(u3,convert(AbstractFloat,u3temp[end]))
append!(P3,convert(AbstractFloat,P3temp[end]))
append!(T3,convert(AbstractFloat,t3temp[end]))
append!(m3,convert(AbstractFloat,m3[end]+Δma3[end]*VVa3-Δm32[end]*VV32))
append!(VC3,convert(AbstractFloat,VC3f))
i+=1
if α1 +180/NPA >= 720*(ciclo1+1)
    ciclo1+=1
    if abs(P1[i]-P1[i-4*NPA])<εP && abs(P2[i]-P2[i-4*NPA])<εP && abs(P3[i]-P3[i-4*NPA])<εP
        RP+=1
    end
end
if α3 +180/NPA >= 720*(ciclo3+1)
    ciclo3+=1
end
end

```

```
    if a2 + 180/NPA >= 180+360*(ciclo2+1)
      ciclo2+=1
    end
    a1+=180/NPA
  end
```

```
In [15]: VC1RP=[]
          P1RP=[]
          W1RP=[]
          m1RP=[]
          Q1RP=[]
          VC2RP=[]
          P2RP=[]
          W2RP=[]
          VC3RP=[]
          P3RP=[]
          W3RP=[]
          m3RP=[]
          Q3RP=[]
```

```
Out[15]: 0-element Array{Any,1}
```

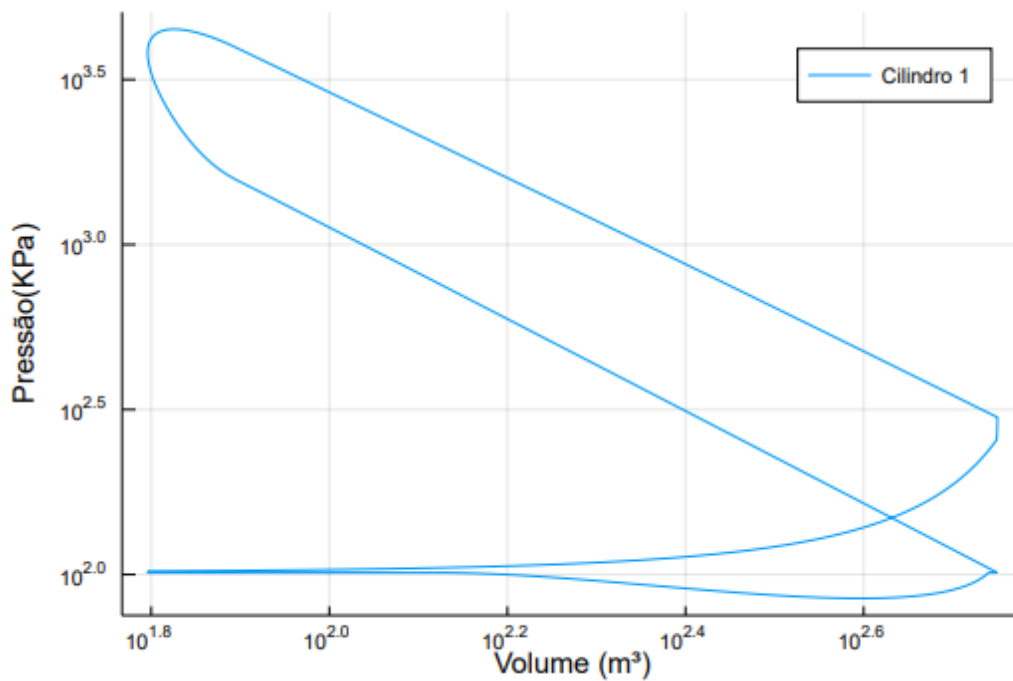
```
In [16]: for i=0:4*NPA
          append!(P1RP,P1[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(VC1RP,VC1[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(m1RP,m1[end-4*NPA+i])
        end
        for i=1:4*NPA
          append!(W1RP,W1[end-4*NPA+i])
        end
        for i=1:2*NPA
          append!(Q1RP,Q1[end-2*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(P2RP,P2[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(VC2RP,VC2[end-4*NPA+i])
        end

        for i=1:4*NPA
          append!(W2RP,W2[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(P3RP,P3[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(VC3RP,VC3[end-4*NPA+i])
        end

        for i=1:4*NPA
          append!(W3RP,W3[end-4*NPA+i])
        end
        for i=0:4*NPA
          append!(m3RP,m3[end-4*NPA+i])
        end
        for i=1:2*NPA
          append!(Q3RP,Q3[end-2*NPA+i])
        end
      end
```

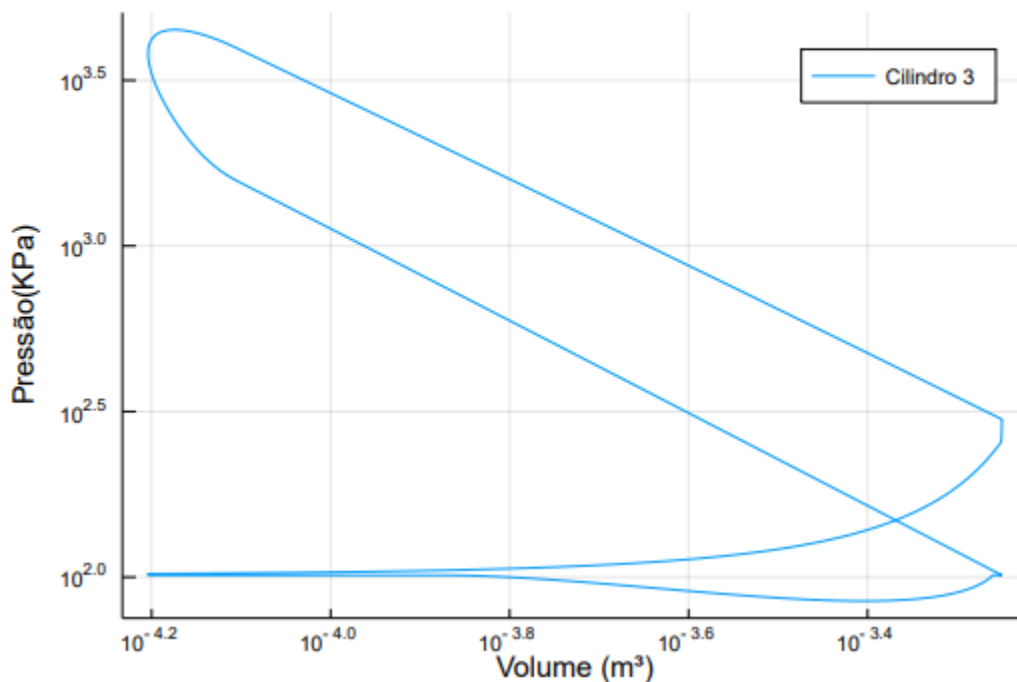
```
In [17]: plot(VC1RP*1e6,P1RP, xaxis=:log, yaxis=:log, label=["Cilindro 1"])
ylabel!("Pressão(KPa)")
xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[17]:



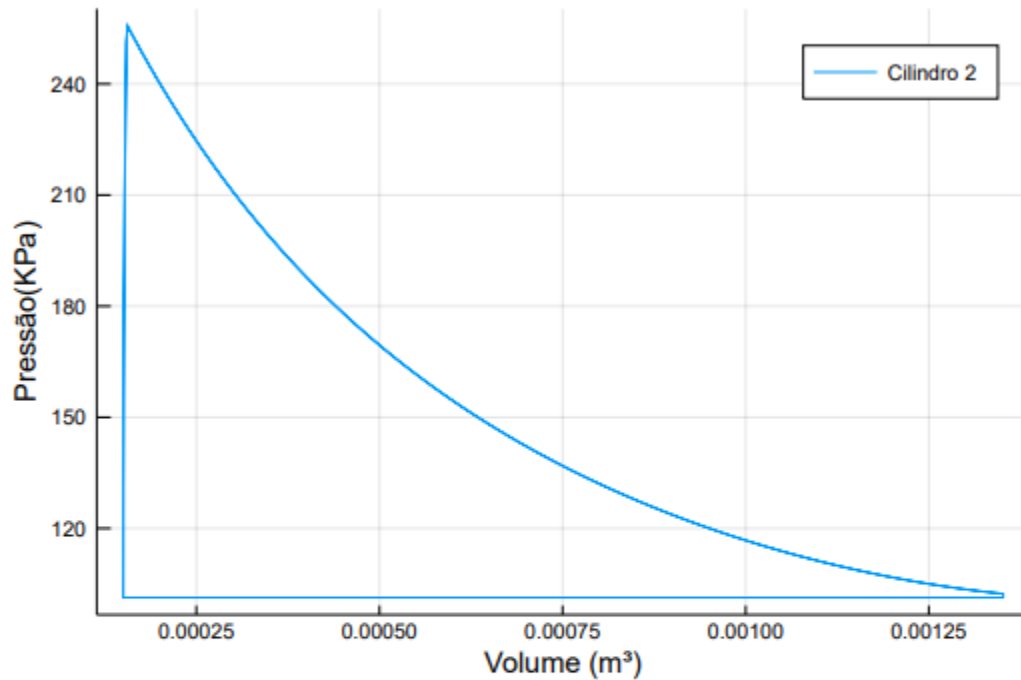
```
In [18]: plot(VC3RP,P3RP, xaxis=:log, yaxis=:log, label=["Cilindro 3"])
ylabel!("Pressão(KPa)")
xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[18]:



```
In [19]: plot(VC2RP,P2RP, label=["Cilindro 2"])
ylabel!("Pressão(KPa)")
xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[19]:



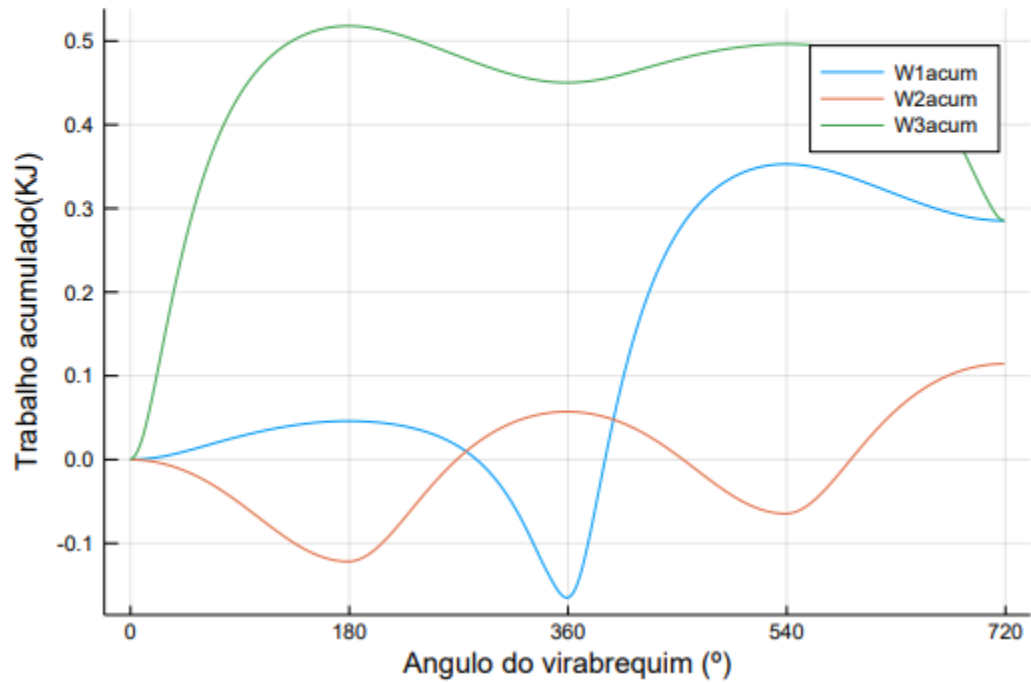
```
In [20]: alpha=[]
val=0
for i=1:4*NPA
    append!(alpha,val)
    val+=180/NPA
end
```

```
In [21]: alpha1=[]
val=0
for i=0:4*NPA
    append!(alpha1,val)
    val+=180/NPA
end
```

```
In [22]: W1acum=[]
W2acum=[]
W3acum=[]
Q1acum=[]
Q3acum=[]
val=0
for i=1:length(W1RP)
    val+=W1RP[i]
    append!(W1acum,val)
end
val2=0
for i=1:length(W2RP)
    val2+=W2RP[i]
    append!(W2acum,val2)
end
val3=0
for i=1:length(W3RP)
    val3+=W3RP[i]
    append!(W3acum,val3)
end
val4=0
for i=1:length(Q1RP)
    val4+=Q1RP[i]
    append!(Q1acum,val4)
end
val5=0
for i=1:length(Q3RP)
    val5+=Q3RP[i]
    append!(Q3acum,val5)
end
```

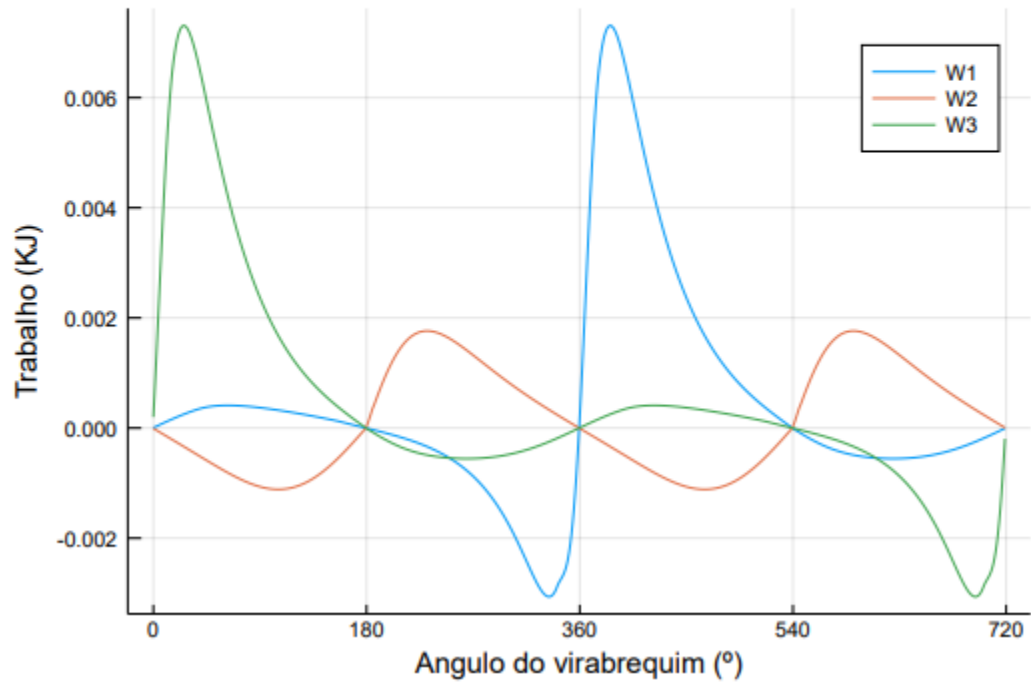
```
In [23]: x1=plot(alpha,W1acum, label=["W1acum"])
x2=plot!(x1,alpha,W2acum,label=["W1acum","W2acum"])
plot!(x2,alpha,W3acum,label=["W1acum","W2acum","W3acum"])
axis!(0:180:720)
ylabel!("Trabalho acumulado(KJ)")
xlabel!("Angulo do virabrequim (°)")
```

Out[23]:



```
In [24]: x1=plot(alpha,W1RP, label=["W1"])
x2=plot!(x1,alpha,W2RP,label=["W1","W2"])
plot!(x2,alpha,W3RP,label=["W1","W2","W3"])
xaxis!(0:180:720)
ylabel!("Trabalho (KJ)")
xlabel!("Angulo do virabrequim (°)")
```

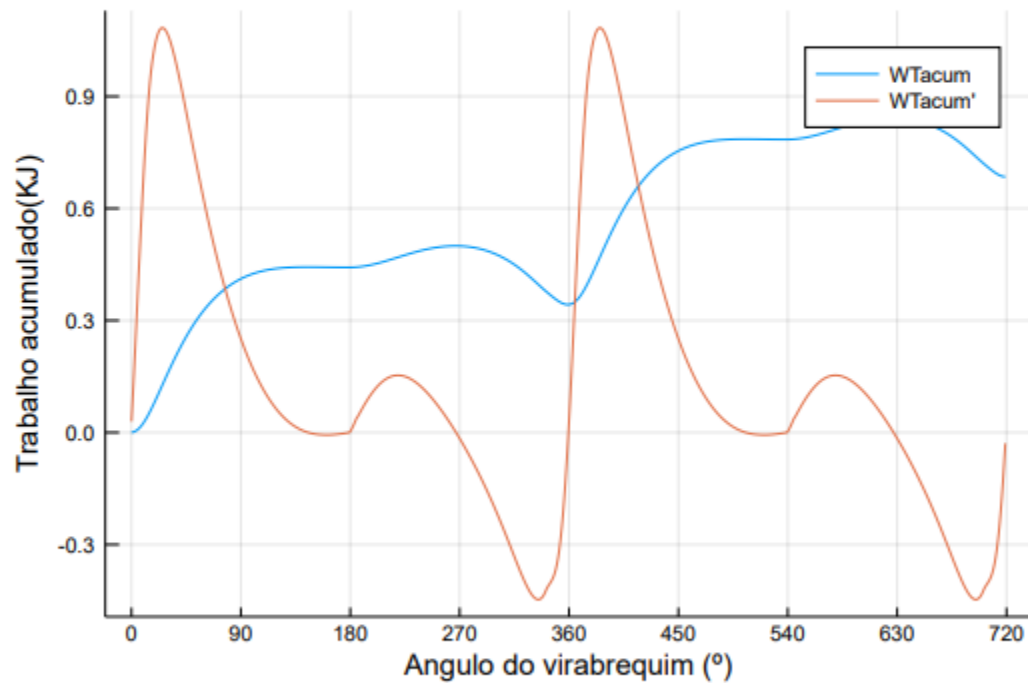
Out[24]:





```
In [25]: Wacum = W1acum+W2acum+W3acum
x1=plot(alpha, Wacum, label=["WTacum"])
Wprime = (W1RP+W2RP+W3RP)*150.0
x2=plot!(x1,alpha, Wprime, label=["WTacum","WTacum'"])
xaxis!(0:90:720)
ylabel!("Trabalho acumulado(KJ)")
xlabel!("Angulo do virabrequim (°)")
```

Out[25]:

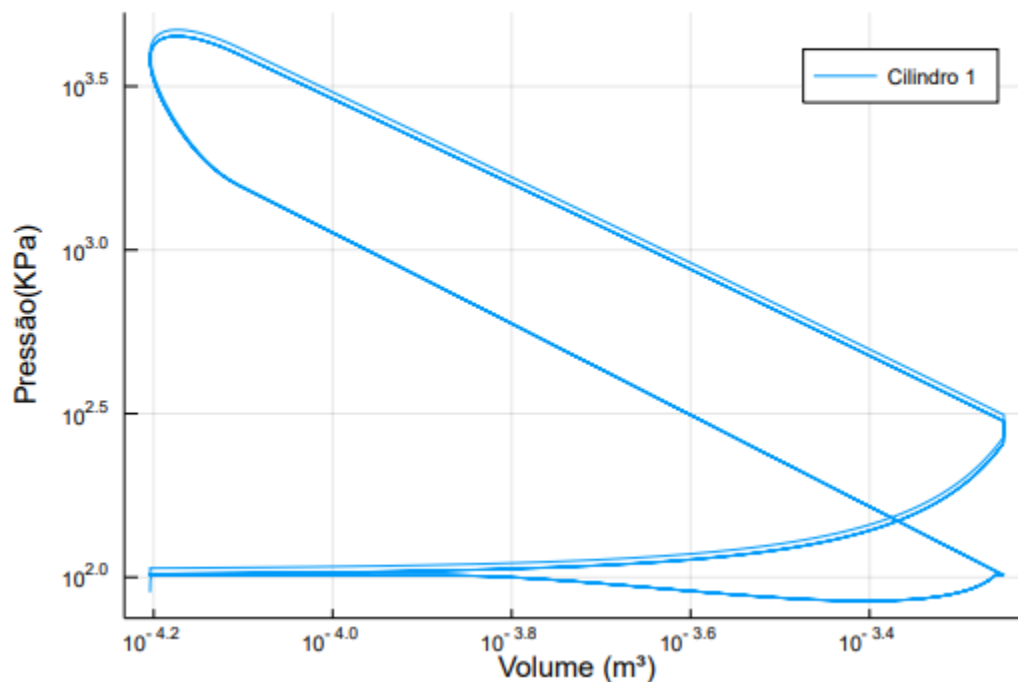


```
In [26]: efi=(W1acum[end]+W2acum[end]+W3acum[end])/(Q1acum[end]+Q3acum[end])
```

Out[26]: 0.5619294700843472

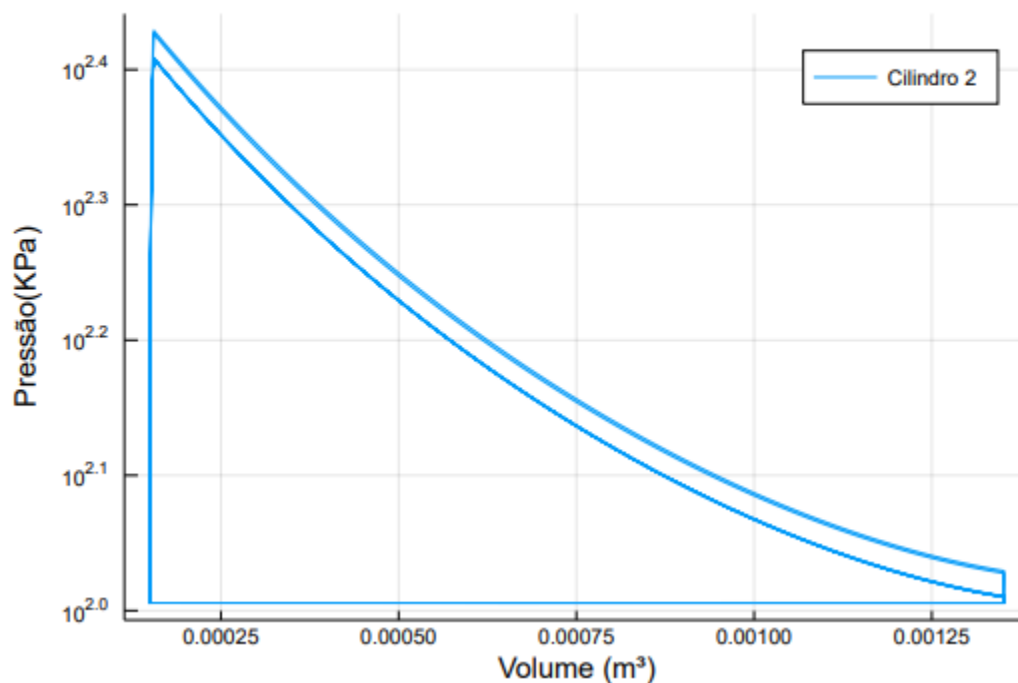
```
In [27]: plot(VC1,P1,xaxis=:log, yaxis=:log,label=["Cilindro 1"])
ylabel!("Pressão(KPa)")
xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[27]:



```
In [28]: plot(VC2,P2,yaxis=:log,label=["Cilindro 2"])
ylabel!("Pressão(KPa)")
xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[28]:



```
In [29]: plot(VC3,P3,axis=:log, yaxis=:log,label=["Cilindro 3"])  
         ylabel!("Pressão(KPa)")  
         xlabel!("Volume (m³)")
```

Out[29]:

