



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Faculdade de Engenharia

# **Modelação e simulação de um motor/gerador de relutância variável para substituição do volante de inércia do motor de combustão interna**

**Daniel Filipe da Silva Cardoso**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

**Covilhã, outubro de 2017**



# Agradecimentos

Aos meus pais, pelo trabalho, esforço, educação e confiança, pois apenas graças a esta tive oportunidade de cair, levantar-me, crescer e talhar o meu caminho.

A minha irmã, por me ter mostrado tantas vezes a diferença entre o certo e o errado.

Ao meu irmão, por me apoiar para o bem ou para o mal.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael, pela orientação, ensino, por todas as oportunidades e acima de tudo pela amizade e confiança.

A todos os meus amigos e companheiros que formam a minha família aqui nesta pequena cidade que durante 5 anos foi a minha casa.

Ao projeto UBICAR, por me ter permitido aprender, viajar e fazer amizades para a vida.

Ao NEUBI, graças a este envolvi-me, discuti e contribui no que me foi possível para que este curso continue unido como nenhum outro.

Em especial a ti Cláudia, todos os agradecimentos que foram feitos atrás são também a ti dirigidos, pois ao longo deste percurso académico foste um pouco de tudo e de todos, foste a amiga, a família e a namorada.



# Resumo

Este trabalho apresenta a modelação e o desenvolvimento de uma simulação usando a ferramenta de programação com ambiente gráfico *SIMULINK®*. com este trabalho pretende-se mostrar a viabilidade do estudo e desenvolvimento de um motor/gerador capaz de anular a necessidade dos motores de combustão interna em utilizar um volante de inércia para acumular energia dos tempos motores onde é produzido binário para depois a fornecer nos tempos onde não é produzido binário. Com este sistema pretende-se reduzir vibrações e aumentar a eficiência dos motores de combustão interna.

## Palavras-chave

Motor de combustão interna, Motor de relutância variável, Volante de inércia, Binário



# Abstract

This work presents the modeling and development of a simulation using the programming tool with graphical environment *SIMULINK*®, this work intends to show the feasibility of the study and development of a motor/generator capable of overriding the need of internal combustion engines use an inertia flywheel to accumulate energy from the motor strokes where binary is produced and then supplied at strokes where no binary is produced, with this system it is intended to reduce vibrations and increase the efficiency of internal combustion engines.

## Keywords

Internal combustion engine, Flywheel, Switch reluctance motor, Torque



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Palavras-chave .....	v
Abstract.....	vii
Keywords .....	vii
Índice .....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
Lista de Símbolos .....	xxi
1. Introdução .....	1
1.1. Contextualização e objetivos.....	1
1.2. Divisão dos capítulos .....	2
2. Motor de combustão interna.....	3
2.1. Ciclos de 4 tempos .....	4
2.1.1. Motor de Ignição comandada, Ciclo de Otto.....	4
2.1.2. Motor de Ignição por compressão, Ciclo Diesel .....	8
2.2. Ciclos 2 tempos .....	11
2.3. Volante de Inércia .....	14
3. Máquinas elétricas.....	17
3.1. Máquina de corrente contínua .....	17

3.1.1.	Máquina de corrente contínua convencional .....	17
3.1.2.	Máquina de corrente contínua de ímanes permanentes .....	18
3.1.3.	Máquina de corrente contínua sem escovas .....	18
3.2.	Máquina assíncrona.....	19
3.3.	Máquina síncrona .....	20
3.4.	Máquina de relutância variável .....	20
3.4.1.	Constituição da máquina .....	21
3.4.2.	Funcionamento como motor .....	22
3.4.3.	Funcionamento como gerador .....	22
4.	Modelação da simulação .....	25
4.1.	Single Cylinder Four Stroke Engine .....	25
4.2.	Switched Reluctance Motor Generator .....	30
4.3.	Converter .....	33
4.4.	Position Sensor.....	34
4.5.	Voltage Regulator .....	35
4.6.	Comand Motor Generator .....	36
4.7.	Supercapacitor.....	36
4.8.	Statistics .....	36
5.	Processo de otimização .....	37
5.1.	Ângulos de alimentação das fases da máquina elétrica .....	37
5.2.	Curva de tensão.....	40
5.3.	Ângulo de funcionamento enquanto gerador .....	48

6. Resultados obtidos .....	51
6.1. Apresentação dos resultados .....	51
6.2. Discussão dos resultados .....	61
7. Conclusões e trabalhos futuros .....	63
7.1. Conclusões .....	63
7.2. Trabalhos futuros .....	64
Bibliografia.....	65
Anexos .....	67



# Lista de Figuras

Figura 1: Sistema biela-manivela responsável pela conversão das variações de pressão em movimento e representação do PMS e PMI (1).....	4
Figura 2: Tempos de funcionamento do Ciclo de Otto (1).....	5
Figura 3: Ciclo teórico de Otto, adaptado de (1). ....	6
Figura 4: Pressão em função do ângulo da cambota (1). ....	7
Figura 5: Binário em função do ângulo da cambota no ciclo de 4 tempos (7). ....	7
Figura 6: Órgãos internos motor de ignição comandada 4 tempos, adaptado de (1).....	8
Figura 7: Tempos de funcionamento do Ciclo Diesel (1).....	9
Figura 8: Ciclo teórico Diesel, adaptado de (1). ....	10
Figura 9: Tempos de funcionamento ciclo 2 tempos de ignição comandada (1). ....	12
Figura 10: Ciclo teórico do motor de ignição comandada a 2 tempos (1,6).....	13
Figura 11: Binário em função do ângulo da cambota no ciclo de 2 tempos, adaptado de (1,10,11).....	13
Figura 12: Órgãos internos do motor de ignição comandada a 2 tempos de janelas, adaptado de (1,11).....	14
Figura 13: Representação matemática do volante de inércia (12).....	15
Figura 14: Sentido positivo de atuação das forças de inércia (10).....	15
Figura 15: Resultante das forças de inércia sobre o bloco do motor (10). ....	16
Figura 16: Campo magnético de um condutor e de uma espira do rotor (9).....	18
Figura 17: Estrutura da máquina de corrente contínua de íman permanente (13). ....	18
Figura 18: Estrutura da máquina elétrica de corrente contínua sem escovas (13). ....	19
Figura 19: Esquema da máquina assíncrona monofásica (13). ....	20

Figura 20: Esquema máquina síncrona monofásica (13). .....	20
Figura 21: Esquema de fases de uma máquina elétrica de relutância variável 8/6 (14). ....	21
Figura 22: Variação da indutância em funcionamento como motor com o alinhar dos polos, adaptado de (19). .....	22
Figura 23: Variação da indutância em funcionamento como gerador com o alinhar dos polos, adaptado de (19). .....	23
Figura 24: Layout da simulação .....	26
Figura 25: Mecanismo biela manivela (10) .....	27
Figura 26: Curvas de magnetização da máquina de relutância variável utilizada. ....	31
Figura 27: Esquema da Máquina de relutância variável com uma configuração 10/8 (22). ..	32
Figura 28: Perfil de indutância máquina de relutância variável 10/8. ....	33
Figura 29: Conversor eletrônico. ....	34
Figura 30: Curva da tensão em função da rotação. ....	35
Figura 31: Regulador de tensão. ....	35
Figura 32: Binário máquina elétrica no inicio do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=45°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°. ....	38
Figura 33: Binário resultante no inicio do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=45°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°. ....	38
Figura 34: Binário máquina elétrica no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°. ....	39
Figura 35: Binário resultante no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°. ....	39
Figura 36: Binário máquina elétrica no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=19.2°. ....	40
Figura 37: Binário resultante no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=19.2°. ....	40

Figura 38: Binário da máquina elétrica às 600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 60V. ....	41
Figura 39: Binário resultante às 600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 60V. ....	41
Figura 40: Binário da máquina elétrica às 600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 87V. ....	42
Figura 41: Binário resultante às 600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 87V. ....	42
Figura 42: Binário da máquina elétrica às 1600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.....	43
Figura 43: Binário resultante às 1600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.....	43
Figura 44: Binário máquina elétrica às 1600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.....	43
Figura 45: Binário resultante às 1600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 160V. ....	43
Figura 46: Binário da máquina elétrica às 2600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 260V.....	44
Figura 47: Binário resultante às 2600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 260V.....	44
Figura 48: Binário da máquina elétrica às 2600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 296V.....	45
Figura 49: Binário resultante às 2600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 296V. ....	45
Figura 50: Binário da máquina elétrica às 3600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 360V.....	45
Figura 51: Binário resultante às 3600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 360V.....	46

Figura 52: Binário da máquina elétrica às 3600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 353V.....	46
Figura 53: Binário resultante às 3600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 353V.....	46
Figura 54: Binário da máquina elétrica às 4600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 390V.....	47
Figura 55: Binário resultante às 4600 RPM no inicio do processo de otimização, tensão aplicada de 390V.....	47
Figura 56: Binário máquina elétrica às 4600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 400V.....	47
Figura 57: Binário resultante às 4600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 400V.....	47
Figura 58: Curva da tensão em função da rotação, repetida da Figura 30. ....	48
Figura 59: Resultados obtidos para as 600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (ampere), binário máquina elétrica (amarelo) e motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m). ....	52
Figura 60: Resultados obtidos para as 1600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (ampere), binário máquina elétrica (amarelo) e motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m). ....	54
Figura 61: Resultados obtidos para as 2600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (ampere), binário máquina elétrica (amarelo) e motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).. ....	56
Figura 62: Resultados obtidos para as 3600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (ampere), binário máquina elétrica (amarelo) e motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m). ....	58
Figura 63: Resultados obtidos para as 4600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (ampere), binário máquina elétrica (amarelo) e motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m). ....	60
Figura 64: Evolução do desvio padrão ao longo das rotações. ....	61

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparação entre ciclo Otto e Diesel (2). .....	11
Tabela 2: Parâmetros geométricos iniciais da simulação.....	29
Tabela 3: Parâmetros termodinâmicos iniciais da simulação.....	30
Tabela 4. Ângulos de disparo permitidos para a máquina elétrica. ....	33
Tabela 5: Iterações realizadas na obtenção do ângulo de alimentação no funcionamento enquanto motor.....	38
Tabela 6: Iterações realizadas na obtenção do ângulo de alimentação no funcionamento enquanto gerador.....	39
Tabela 7: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 600 RPM. ....	41
Tabela 8: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 1600 RPM.....	42
Tabela 9: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 2600 RPM.....	44
Tabela 10: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 3600 RPM.....	45
Tabela 11: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 4600 RPM.....	46
Tabela 12: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 600 RPM. ....	48
Tabela 13: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 1600 RPM.....	49
Tabela 14: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 2600 RPM.....	49
Tabela 15: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 3600 RPM.....	49

Tabela 16: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 4600 RPM. ....	49
Tabela 17: Resultados obtidos para as 600 RPM, tempo de simulação 0.2 s. ....	51
Tabela 18: Resultados obtidos para as 1600 RPM, tempo de simulação 0.075 s. ....	53
Tabela 19: Resultados obtidos para as 2600 RPM, tempo de simulação 0.046154 s. ....	55
Tabela 20: Resultados obtidos para as 3600 RPM, tempo de simulação 0.03333 s. ....	57
Tabela 21: Resultados obtidos para as 4600 RPM, tempo de simulação 0.026087 s. ....	59

# Lista de Acrónimos

PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
RPM	Rotações por minuto



# Lista de Símbolos

$m_1$	Massa de gás no cilindro
$m_{ta}$	Massa de ar presa no cilindro
$\rho_{at}$	Densidade do ar a pressão atmosférica
$P_1$	Pressão de admissão
$V_1$	Volume de admissão
$V_{sv}$	Volume varrido
$R$	Constante dos gases
$T_1$	Temperatura de admissão
$P_{at}$	Pressão atmosférica
$DR$	Taxa de admissão
$m_{tf}$	Massa de combustível presa
$AFR$	Rácio ar-combustível
$Q_2^3$	Calor transferido durante a explosão
$P_2$	Pressão de compressão
$V_2$	Volume de compressão
$\gamma$	Índice de compressão
$T_2$	Temperatura de compressão
$W_2^3$	Trabalho efetuado durante a compressão
$C_v$	Calor específico a volume constante
$T_3$	Temperatura no fim da explosão
$P_3$	Pressão na câmara de combustão depois da explosão

$T_4$	Temperatura na câmara de combustão durante a expansão
$P_4$	Pressão na câmara de combustão durante a expansão
P	Pressão
F	Força
A	Área
$\omega t$	Velocidade angular
$\alpha$	Aceleração angular
$C_{fl}$	Poder calorífico

# 1. Introdução

Neste presente capítulo será dada uma explicação do que vai ser possível encontrar ao longo de todo o trabalho. Serão ainda explicados os objetivos deste mesmo trabalho.

## 1.1. Contextualização e objetivos

Nos últimos anos têm surgido uma grande quantidade de tecnologias para reduzir as emissões poluentes dos motores de combustão interna e aumentar a sua eficiência. Prova disso é a introdução de sistemas como a desativação de cilindros, variação do tempo de abertura de válvulas, sistemas de recirculação de gases de escape, sistemas de turbocompressor entre muitos outros (1).

Com este trabalho pretende-se apresentar a construção de uma simulação que tem como objetivo estudar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema que pretende anular o volante de inércia dos motores de combustão interna. Este volante existe na constituição dos motores de combustão interna de forma a acumular a energia durante o tempo em que o motor produz trabalho que mais tarde é necessária para prosseguir o ciclo do motor e fornecer energia nos tempos em que o motor não produz trabalho.

A simulação consiste na idealização de um sistema composto por uma máquina elétrica de relutância variável, solidária com a cambota do motor de combustão. A máquina elétrica irá atuar como gerador durante o tempo em que é produzido trabalho convertendo-o em energia elétrica que será consumida posteriormente aquando do funcionamento enquanto motor que irá auxiliar o motor de combustão nos tempos em que este não produz trabalho. A energia, entre a sua produção e o seu consumo, será armazenada num supercondensador.

O objetivo deste sistema passa pela sua adaptação progressiva com o aumentar da rotação, visto que no tradicional sistema de volante de inércia essa adaptação não é possível, pois com rotações mais elevadas o volante de inércia poderia ser reduzido significativamente. Um outro objetivo consiste na redução das vibrações graças à estabilização do motor de combustão. Neste último caso, o sistema motor/gerador iria atuar como um amortecedor: nos picos do trabalho positivo este vai consumir grande parte desse trabalho e, pelo contrário, vai fornecer trabalho nos picos de binário negativo.

A implementação de um sistema como o que foi atrás mencionado traria um importante avanço no desenvolvimento dos motores de combustão interna. Os motores têm sofrido um constante *downsize* que consiste em reduzir não só a cilindrada destes, mas também na redução do seu número de cilindros, para além de todas as vantagens em termos de consumos e emissões poluentes que este novo tipo de motores possuem. O *downsize* dos

motores implica um grande problema que se centra no aumento de vibrações e produção de um binário mais irregular que, com a implementação de um sistema como o descrito, seriam apaziguadas (2).

O sistema proposto entraria ainda como uma forte vantagem na hibridização de veículos pois graças ao seu desenvolvimento seria possível ter veículos híbridos com funcionamento misto, isto é, seria possível o mesmo veículo funcionar como híbrido em série ou em paralelo, aproveitando as vantagens de cada modo de funcionamento (3,4).

Este sistema seria ainda responsável por uma grande simplificação dos motores automóvel, uma vez que passaríamos a contar apenas com uma máquina elétrica para as tarefas realizadas pelo motor de arranque e pelo alternador algo que tem vindo a ser já desenvolvido (5).

Por fim também é importante de referir que um sistema como o proposto eliminaria a necessidade que alguns fabricantes têm em recorrer a volantes de motor bi-massa para reduzir as vibrações do acoplamento entre o motor de combustão e a caixa de velocidades. Este tipo de sistemas requerem uma elevada manutenção sendo esta muito dispendiosa.

Esta simulação foi realizada com recurso à ferramenta de programação com ambiente gráfico *SIMULINK*®. Neste ambiente gráfico foram criados blocos dentro dos quais está a formulação necessária para a caracterização dos diversos componentes constituintes deste sistema.

## **1.2. Divisão dos capítulos**

Este trabalho conta com 7 capítulos distintos. Será feita uma breve apreciação acerca de cada capítulo de modo a introduzir o tema abordado.

No capítulo 2 e 3 temos algumas considerações teóricas, de modo a que se possa perceber o modo funcionamento do motor de combustão consoante os seus diversos ciclos e os problemas associados a esse mesmo funcionamento. São também abordadas as diversas máquinas elétricas em termos construtivos, modo de funcionamento e seus problemas.

No capítulo 4 é explicitada a construção e modelação de todos os blocos presentes na simulação, bem como a necessidade de implementação de algumas funções *MATLAB*®.

No capítulo 5 é demonstrado o processo de otimização que toda a simulação foi sujeita.

No capítulo 6 e 7 são apresentados os resultados finais obtidos e elaboradas as devidas conclusões em relação ao presente trabalho.

## 2. Motor de combustão interna

O motor de combustão interna continua a ser ainda, nos dias de hoje, uma das máquinas mais utilizadas para o fornecimento de energia mecânica, sendo que a utilização mais visível e presente no nosso dia-a-dia é, sem dúvida, a sua utilização para a locomoção de veículos, que podem ir de simples motocicletas até aviões. Embora se perspetive um declínio na sua utilização em veículos, em prol dos motores elétricos, existe ainda um grande percurso a percorrer que terá pelo meio barreiras económicas, tecnológicas e ambientais (1).

O motor de combustão interna com uma configuração de pistão que data do século XIX, foi das invenções que mais alterações causou na sociedade e no nível de vida das populações. Atualmente existe um grande número de configurações e variantes da máquina introduzida inicialmente. Essa introdução de variações surgiu devido à constante evolução que o ser humano está sujeito e na procura de soluções que melhor se adaptem às suas necessidades. Na aviação, por exemplo, os primórdios recorriam a motores de pistão que com a evolução dos aviões se começaram a tornar obsoletos, com dificuldades em funcionar em altitude e com baixos rácios de potência/peso. Isso levou então à procura e desenvolvimento de outros tipos de motores da qual resultaram os motores rotativos dinâmicos vulgarmente conhecidos como turbina (1).

Ao longo deste trabalho apenas será tratado o caso das máquinas volumétricas alternativas, ou vulgarmente conhecidas como motores de pistão.

As máquinas volumétricas alternativas têm uma configuração bastante semelhante. A sua composição é composta por cilindros dentro dos quais deslizam pistões ligados à cambota por meio de bielas. Através deste sistema a variação de pressão dentro dos cilindros vai ser convertida em movimento rotacional na cambota do motor, que estará posteriormente ligada a um volante de inércia que tem por função regularizar o movimento da cambota através da energia acumulada sob a forma de energia cinética. As irregularidades que se opõem ao funcionamento desejado do motor são provenientes sobretudo da necessidade de comprimir o ar para que possa existir a combustão do mesmo e posteriormente a expansão que é responsável pelo trabalho positivo do motor. O movimento dos pistões dentro dos cilindros pode variar consoante o tipo da construção do motor, sendo que estes têm sempre dois pontos comuns, são eles o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). O PMS trata-se do ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro, pelo contrário o PMI trata-se de o ponto mais baixo. A distância entre o PMI e o PMS designa-se de curso do motor (1,6).

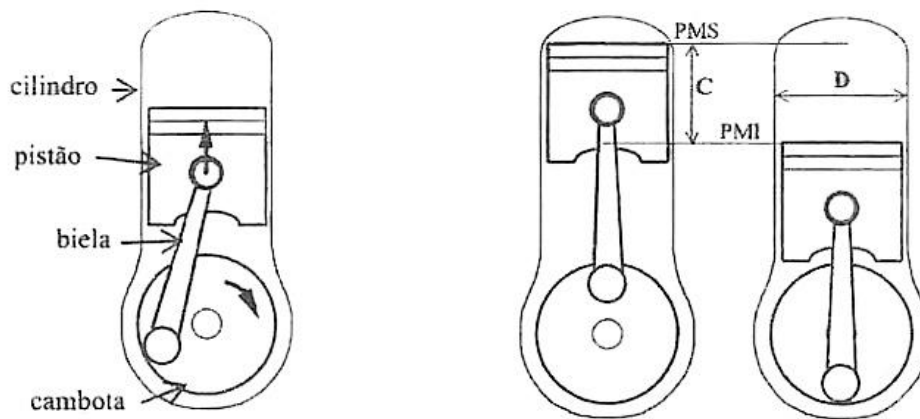


Figura 1: Sistema biela-manivela responsável pela conversão das variações de pressão em movimento e representação do PMS e PMI (1).

Os motores que recorrem ao tipo de mecanismo mencionado anteriormente, com a função de gerar binário mecânico através das variações de pressão, podem ainda ser divididos em dois grupos. Estes dois grupos diferenciam-se entre si pela quantidade de voltas que a cambota tem que realizar durante um ciclo completo. Temos então, os ciclos de 2 tempos em que a cambota tem que efetuar apenas uma volta completa para a realização de um ciclo completo e os ciclos de 4 tempos em que a cambota realiza 2 voltas para um ciclo completo. Entenda-se que tempo é o nome dado a uma determinada operação, isto é, durante um ciclo o motor realiza 4 ou 2 tempos consoante o tipo de ciclo de funcionamento (7).

## 2.1. Ciclos de 4 tempos

No seu funcionamento um motor de combustão interna tem que seguir um dado conjunto de operações. A esse conjunto de operações dá-se o nome de ciclo. Consoante o tipo de operações nele existentes assim é denominado o tipo de ciclo que o motor de combustão realiza. Neste subcapítulo serão abordados os ciclos que no seu correto funcionamento realizam 4 operações distintas, o ciclo de 4 tempos de ignição comandada a que se dá o nome de Otto e, de seguida, o ciclo de ignição por compressão denominado de *Diesel*.

### 2.1.1. Motor de Ignição comandada, Ciclo de *Otto*

O ciclo de Otto foi implementado em 1876 por *Nikolaus Otto*; para completar este ciclo a cambota tem que realizar duas voltas para assim permitir que o pistão realize os 4 tempos pretendidos, sendo que cada tempo corresponde geralmente a uma rotação de 180° graus da cambota. A grande revolução que este motor trouxe foi o facto de na sua configuração existir a presença de válvulas que permitem realizar uma admissão, compressão, expansão e escape de forma mais eficaz (6).

O motor de ignição comandada é assim denominado pelo facto de a sua combustão se indicar por meio de uma descarga elétrica de elevada tensão dentro da câmara de combustão (1).

As válvulas presentes no motor de combustão regido pelo ciclo de *Otto*, serão sempre no mínimo duas por cada cilindro. Uma será a válvula de admissão e outra a válvula de escape. A válvula de admissão quando aberta mantém o cilindro em comunicação com o sistema de alimentação, que permite assim a admissão da mistura ar/combustível, enquanto que a válvula de escape tem a função de permitir que os gases saiam do cilindro, após a expansão. Este sistema de válvulas é, geralmente, acionado e comandado por uma árvore de cames que se encontra ligada com a cambota por via de uma desmultiplicação que faz com que esta gire a metade da rotação da cambota. Essa desmultiplicação pode ser por via de um sistema de corrente, correia, engrenagens. Existem ainda vários estudos que, no sentido de aumentar o rendimento dos motores, pretendem implementar o controlo das válvulas por solenoides (1,4).

Na Figura 2 é possível observar os 4 tempos de funcionamento do ciclo de *Otto*, bem como a explicação para cada um dos tempos: (6-8)

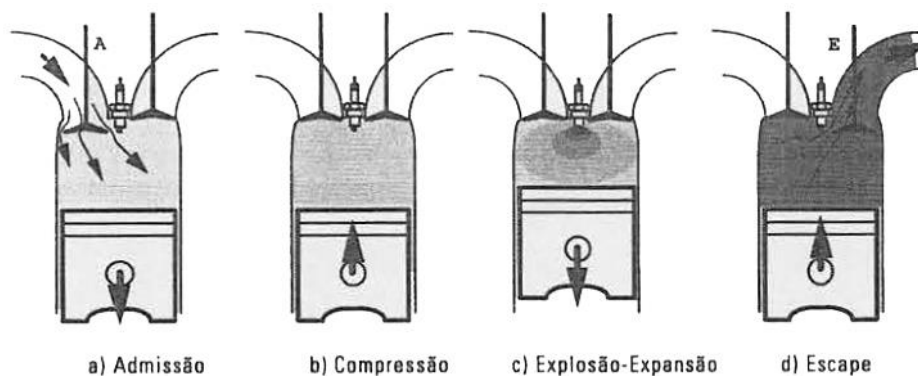


Figura 2: Tempos de funcionamento do Ciclo de *Otto* (1).

a) Admissão: Neste tempo o pistão efetua um curso descendente provocando uma depressão no interior do cilindro que induz a mistura vinda do sistema de alimentação para dentro do cilindro. Isto apenas é possível porque como é possível de observar na Figura 2 a válvula de admissão (A) encontra-se aberta. Isto faz com que seja permitido encher o cilindro da mistura que será comprimida a seguir. O processo de admissão dá-se num curso de pistão que vai desde o PMS até o PMI.

b) Compressão: Com ambas as válvulas fechadas, o pistão percorre a distância que vai desde o PMI até ao PMS, comprimindo a mistura ar/combustível que fora previamente admitida. Esta compressão vai elevar a temperatura e a turbulência da mistura, vaporizando alguma gasolina que ainda se apresente no estado líquido e homogeneizando a

mistura. Deste modo, a combustão será mais completa e a temperatura no final da compressão terá sempre que ficar abaixo da temperatura de autoignição da mistura (6-8).

c) Expansão: No final da compressão quando o pistão atinge o PMS, uma descarga elétrica de alta tensão percorre os elétrodos da vela de ignição originando uma faísca na câmara de combustão. A mistura comprimida explode, originando uma pressão extremamente elevada dentro do cilindro. Essa pressão vai obrigar o pistão a percorrer rapidamente a distância entre o PMS e o PMI, sendo o sistema biela/cambota o responsável por converter o movimento do pistão num movimento rotativo na cambota. Este movimento provocado pela explosão da mistura é o único momento em que o motor realiza um trabalho positivo.

d) Escape: A válvula de escape (E) abre-se no final da expansão quando o pistão atinge o PMI e os gases resultantes da explosão são expelidos para o exterior do cilindro. Para ajudar a essa expulsão o pistão volta a percorrer a distância do PMI até ao PMS. Ao chegar ao PMS a válvula de escape é fechada terminando assim um ciclo composto por 720° de rotação da cambota.

Estes 4 tempos podem ser também analisados do ponto de vista termodinâmico. Na Figura 3 podemos observar o diagrama Pressão (p-V) e Temperatura-Entropia (T-S).

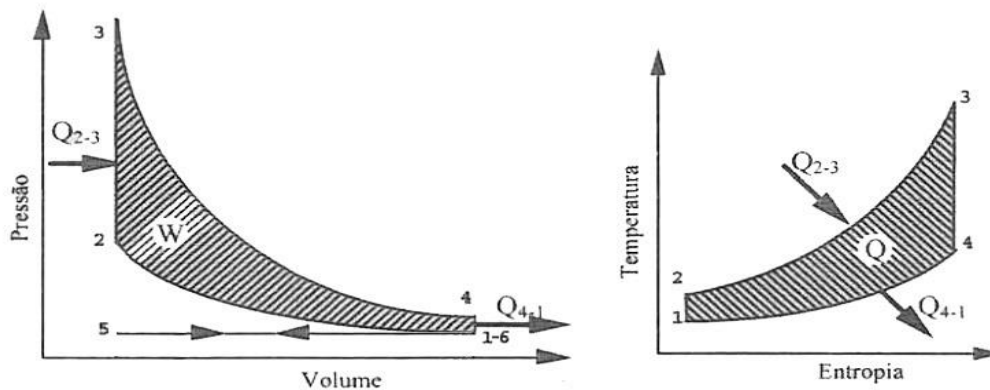


Figura 3: Ciclo teórico de Otto, adaptado de (1).

As transformações termodinâmicas das figuras acima representadas são:(6,9)

- 5-6 - Isobárica, a depressão no cilindro provoca a admissão de mistura.
- 1-2 - Isentrópica, corresponde ao tempo de compressão.
- 2-3 - Isocórica, momento em que ocorre a explosão.
- 3-4 - Isentrópica, dá-se a expansão com o pistão a ir do PMS até ao PMI.
- 4-6 - Isocórica, perda de calor no momento da abertura de escape.
- 6-5 - Isobárica, tempo em que se dá a total expulsão dos gases de escape.

Como foi possível observar, neste tipo de motores, apenas existe um tempo em que o trabalho realizado é positivo, o que leva a que um motor monocilíndrico necessite de um grande volante de inércia para que, em baixas rotações, armazene energia suficiente para movimentar a cambota durante 3 tempos, ou seja  $540^\circ$  dos  $720^\circ$  totais de um ciclo, sem que a velocidade angular da cambota baixe em demasia. Na Figura 5 observamos o gráfico do binário produzido pela cambota ao longo dos  $720^\circ$  de um ciclo onde é possível observar que o binário produzido é bastante irregular (10). O binário produzido pela cambota é essencialmente devido as variações de pressão dentro do cilindro, na Figura 4 é visível a variação das pressões ao longo dos  $720^\circ$  de rotação de cambota, o PMS intermédio onde se dá a pressão mais elevada diz respeito ao início do gráfico ( $0^\circ$ ) da Figura 5 onde o binário tem também o seu maior pico.

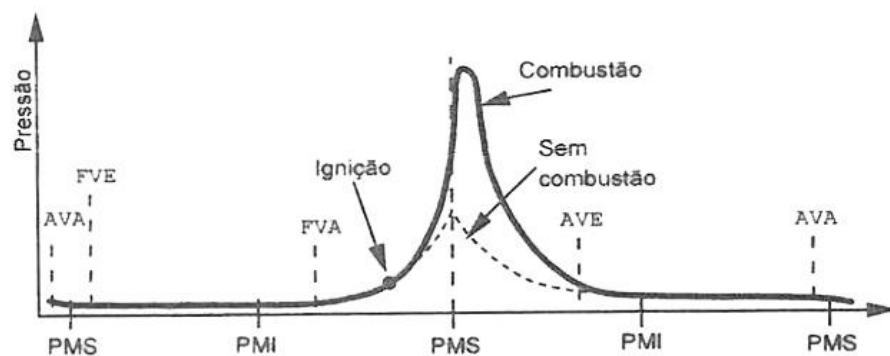


Figura 4: Pressão em função do ângulo da cambota (1).

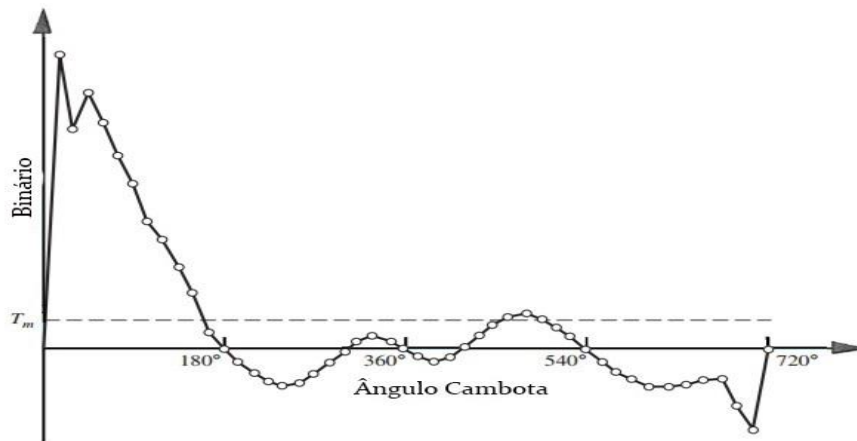


Figura 5: Binário em função do ângulo da cambota no ciclo de 4 tempos (7).

Os órgãos internos de um motor de ignição comandada são partilhados com os motores de ignição por compressão, diferenciando-se entre si no facto de um possuir vela de ignição e o outro possuir um injetor utilizado para pulverizar o combustível. Embora pouco usual, no caso de motores de ignição comandada e injeção direta encontramos a presença de vela de ignição e de injetor dentro no cilindro.

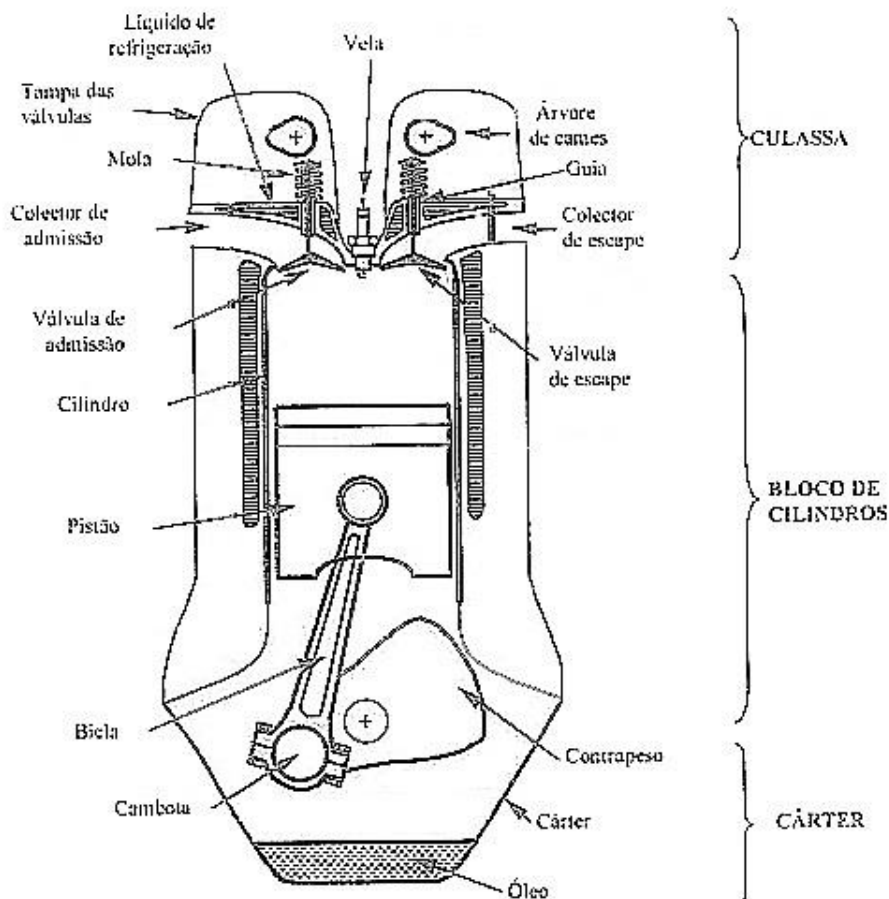


Figura 6: Órgãos internos motor de ignição comandada 4 tempos, adaptado de (1).

### 2.1.2. Motor de Ignição por compressão, Ciclo *Diesel*

O motor de ignição comandada, funcionando segundo o ciclo de *Otto* apresenta, alguns inconvenientes. Entre eles temos o facto de necessitar de um combustível capaz de se vaporizar apenas com o aumento da pressão, ter em especial atenção o facto de a taxa de compressão não ultrapassar um limite máximo que provoque a autoignição da mistura e, ainda, o facto de a relação ar-combustível ter de se encontrar dentro de limites apertados. Estas limitações resultam num baixo valor de rendimento térmico sendo esse o rendimento que *Rudolf Diesel*, em 1892, se propôs melhorar com a introdução do Ciclo *Diesel*. No entanto, este não estava também imune a problemas.

No motor de ignição comandada a mistura ar/combustível é, geralmente, realizada no exterior do cilindro seguindo para dentro deste, onde acaba por entrar em ignição na câmara de combustão após a compressão da mistura. Por sua vez o motor de ignição por compressão não tem sistema de pré mistura nem vela de ignição. Este motor admite e comprime ar puro que, devido às maiores taxas de compressão em comparação aos motores de ignição de

compressão elevam a temperatura e pressão do ar para valores que permitem a ignição do combustível ao entrar em contacto com o ar (1,6).

Sabendo que o ar se encontra a elevada pressão, é necessário que o combustível seja introduzido a uma pressão superior, sendo imprescindível que para isso os motores regidos por este ciclo tenham obrigatoriamente de possuir um sistema de injeção composto por uma bomba de alta pressão e um injetor com capacidade de pulverizar o combustível (1).

Os 4 tempos do ciclo são descritos na Figura 7:(6-8)

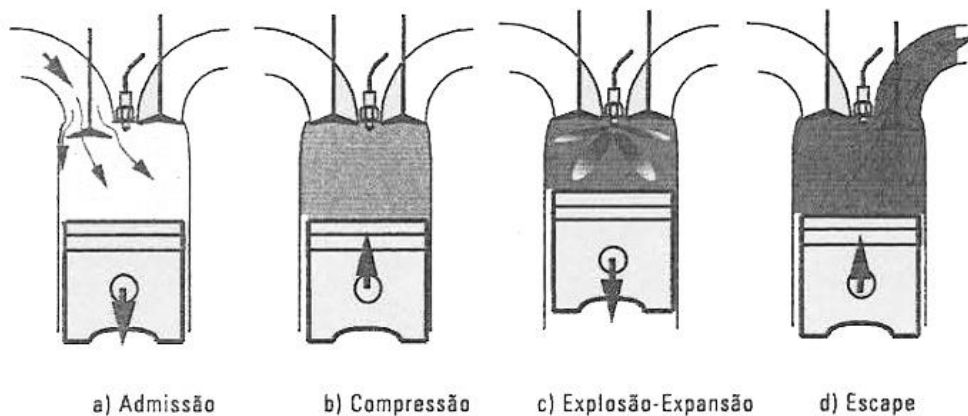


Figura 7: Tempos de funcionamento do Ciclo *Diesel* (1).

- a) Admissão: Neste tempo temos o pistão a percorrer o curso que vai desde o PMS até o PMI, causando uma depressão que vai ser colmatada com a entrada de ar puro devido à válvula de admissão estar aberta durante este período (6-8).
- b) Compressão: A compressão dá-se com ambas as válvulas fechadas; o pistão vai do PMI até ao PMS comprimindo o ar puro e, com isso, elevando-lhe significativamente a temperatura. Devido à necessidade de temperaturas e pressões maiores a taxa de compressão de um motor de ignição por compressão comparativamente a motores de ignição comandada pode ser até o dobro da mesma.
- c) Explosão-Expansão: Ao chegar ao PMS o combustível começa por ser injetado no seio do ar quente e, por consequência, inflama-se. A injeção de combustível e a sua combustão continua até parte do curso do PMS até PMI, permitindo manter a pressão constante durante parte do tempo motor.
- d) Escape: À semelhança do motor de ignição comandada quando o pistão atinge o PMI, dá-se a abertura da válvula de escape. O pistão inicia novamente o curso até PMS de modo a expulsar os gases de dentro do cilindro.

Do ponto de vista termodinâmico, existem algumas diferenças em relação ao ciclo de *Otto*. Ressalta-se o facto de a combustão não ser instantânea e ocorrer ao longo do tempo motor o que leva a que a pressão seja mantida constante durante grande parte do tempo motor. Esta observação é comprovada pelos diagramas p-V e T-S presentes na Figura 8.

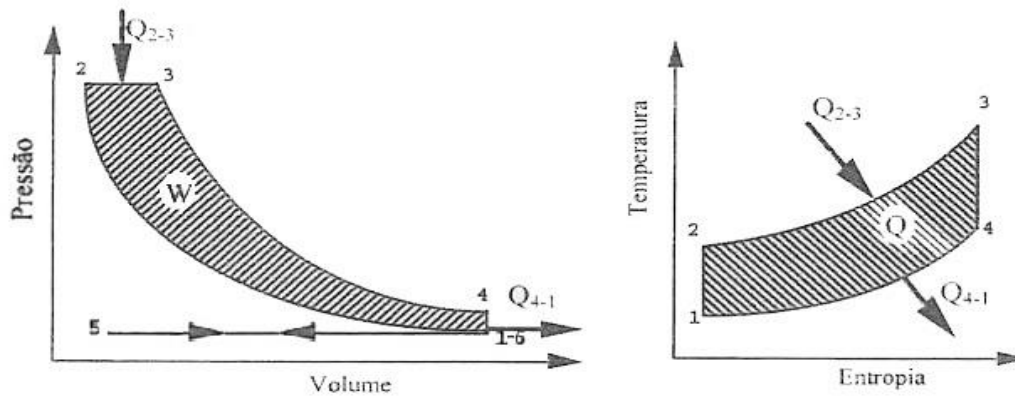


Figura 8: Ciclo teórico *Diesel*, adaptado de (1).

Neste ciclo é possível observar as seguintes transformações termodinâmicas:(6,9)

- 5-6 - Isobárica, a depressão no cilindro provoca a admissão de mistura.
- 1-2 - Isentrópica, corresponde ao tempo de compressão.
- 2-3 - Isobárica, o combustível é injetado e queimado durante o aumento do volume, fazendo com que a pressão se mantenha constante.
- 3-4 - Adiabática, dá se o resto da expansão, neste momento já não se fornece combustível pelo que a pressão já não se mantém constante.
- 4-6 - Isocórica, perda de calor no momento da abertura de escape.
- 6-5 - Isobárica, tempo em que se dá a total expulsão dos gases de escape.

Na Figura 5 observamos o gráfico do binário produzido pela cambota ao longo dos 720° de um ciclo de *Otto*, este é em tudo idêntico para o Ciclo *Diesel*, variando apenas em termos absolutos, uma vez que apenas o binário necessário para a compressão é necessariamente maior, mas os valores de pressão obtidos ao longo da expansão são também maiores (1,6,7,11).

Na Tabela1 possível verificar uma rápida comparação entre os motores que se regem pelos ciclos *Otto* e *Diesel*.

Tabela 1: Comparação entre ciclo *Otto* e *Diesel* (6).

Parâmetro	Ciclo <i>Otto</i>	Ciclo <i>Diesel</i>
Combustível	Altamente volátil, pouco compressível	Muito compressível, baixo índice de volatilidade
Alimentação	Mistura de Ar/Combustível previamente realizada no sistema de admissão, aspirada no tempo de admissão	Combustível é injetado no cilindro após a compressão do ar admitido.
Controlo da Carga	Controlada a quantidade de mistura Ar/Combustível admitida	Controlada apenas a quantidade de combustível injetado
Ignição	Necessidade de um sistema de ignição suplementar	Autoignição provocada pela injeção de combustível numa massa de ar que se encontra a alta temperatura
Compressão	Pode tomar valores de 6:1 até 10:1, este valor encontra-se limitado pela qualidade do combustível	Pode ir de 14:1 até 20:1, neste caso a limitação encontra-se na construção do motor

## 2.2. Ciclos 2 tempos

Em 1878, *Dugald Clark* propôs um ciclo em que o objetivo era que o motor realizasse menos tempos em trabalho negativo comparativamente aos ciclos de quatro tempos. Deste modo, este autor criou um ciclo que em apenas 2 tempos e uma rotação da cambota realiza as 4 operações, sendo elas a admissão, a compressão, a expansão e o escape (6).

A grande diferença entre os ciclos de 2 tempos e de 4 tempos encontra-se na forma como são expulsos do cilindro os gases resultantes da combustão e, na forma como é admitida a mistura caso se trate de um motor de ignição comandada ou o ar caso seja um motor diesel. Como foi referido, num ciclo de 4 tempos estas duas operações são realizadas pelo pistão durante o tempo de admissão e de escape. Num ciclo de 2 tempos a troca de gases é realizada pela pré compressão da mistura ou ar realizada no cárter que, aquando da abertura das válvulas (que podem ser do tipo janelas ou tulipa), permite a entrada dos gases por queimar e, conseqüentemente, a expulsão dos gases resultantes da combustão. Esta pré compressão pode não ser realizada no cárter, mas por sistemas auxiliares como por exemplo um compressor, sendo este o mais utilizado em motores diesel. A compressão no cárter é realizada durante a expansão em que o pistão comprime a mistura abaixo deste, através da redução do volume do cárter no seu curso desde PMS até PMI (1,6).

Na Figura 9 podemos observar o funcionamento de um ciclo de 2 tempos de ignição comandada sendo em tudo semelhante ao ciclo de ignição por compressão. À semelhança dos ciclos de 4 tempos difere apenas pela substituição da vela de ignição por um injetor de combustível.

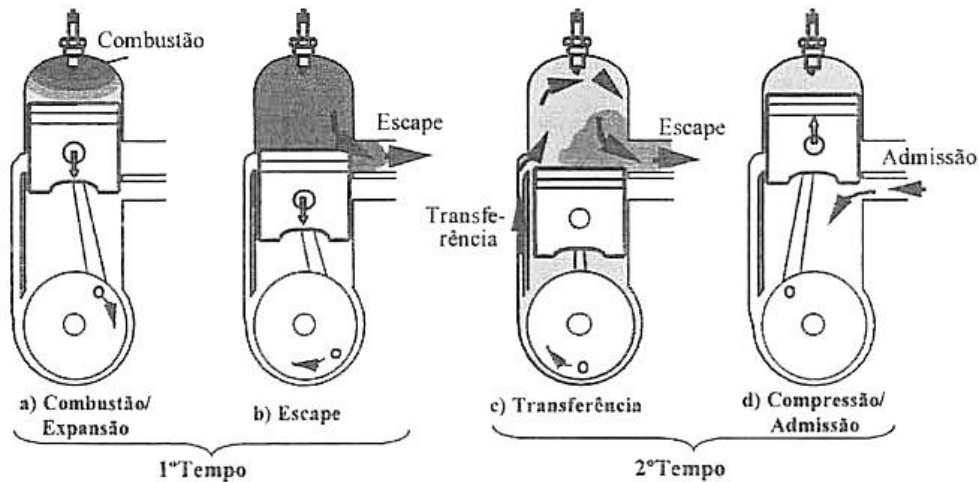


Figura 9: Tempos de funcionamento ciclo 2 tempos de ignição comandada (1).

Em a) e b) dá-se o 1º tempo. Neste tempo após a mistura ter sido comprimida, a vela fornece uma faísca que provoca a ignição da mistura. No caso dos motores de ignição por compressão é neste ponto que se dá a injeção do combustível no ar comprimido. O pistão é impulsionado do PMS para baixo, fornecendo a energia obtida da combustão à cambota. Antes do fim do curso, o pistão abre a janela de escape, por onde os gases queimados se escoam devido a estarem a uma pressão superior à atmosférica. Ao mesmo tempo da expansão do curso do PMS até PMI dá-se a pré compressão da mistura no cárter. Em seguida, o pistão destapa a janela de transferência, permitindo que a mistura pré-comprimida entre no cilindro. Ao entrarem estes realizam a lavagem do cilindro, consiste na expulsão total dos gases de escape (1,11).

Em c) e d) ocorre o segundo tempo. O pistão vindo de PMI sobe e fecha a janela de transferência e, posteriormente, a de escape. Após as duas janelas estarem fechadas inicia-se a compressão da mistura e a admissão de mistura para o cárter. Com a chegada ao PMS termina o segundo tempo (1,11).

Numa perspectiva termodinâmica as semelhanças entre o ciclo teórico de um motor de 2 tempos de ignição comandada comparativamente a um motor também ele de ignição comandada de 4 tempos não são muitas, existindo apenas algumas diferenças no momento em que se dá a lavagem do cilindro. Esta afirmação pode ser observada comparando a Figura 10 com a Figura 3.

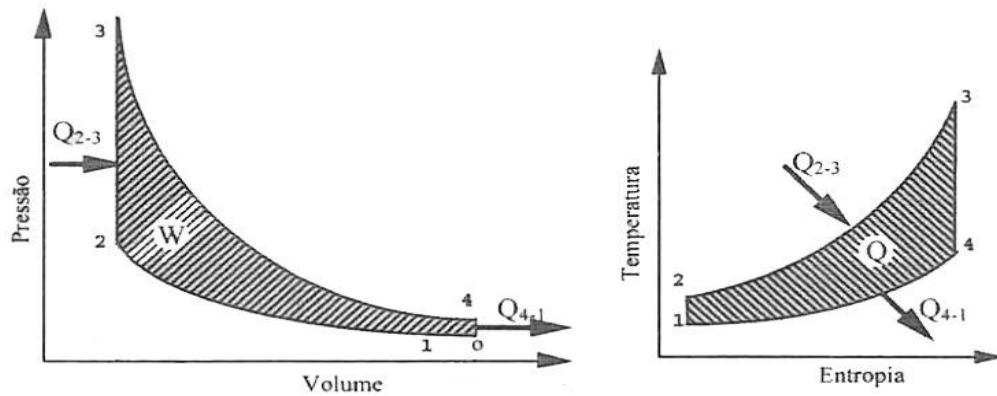


Figura 10: Ciclo teórico do motor de ignição comandada a 2 tempos (1,6).

Na Figura 10, encontram-se as seguintes operações termodinâmicas:

- 1-2 - Isentrópica, corresponde ao tempo de compressão.
- 2-3 - Isocórica, momento em que ocorre a explosão.
- 3-4 - Isentrópica, dá-se a expansão com o pistão a ir de PMS até PMI.
- 4-0 - Isocórica, perda de calor no momento da abertura da janela de escape.
- 0-1 - Isobárica, tempo em que se dá admissão da mistura pré comprimida e se completa a lavagem do cilindro.

Visto este ciclo se realizar em apenas uma revolução da cambota iremos ter dois tempos motores ao longo dos  $720^\circ$  de rotação que foram atrás utilizados para exemplificar o binário produzido por um ciclo de 4 tempos. Ver a Figura 11, onde é possível observar o binário produzido pelo ciclo de 2 tempos.

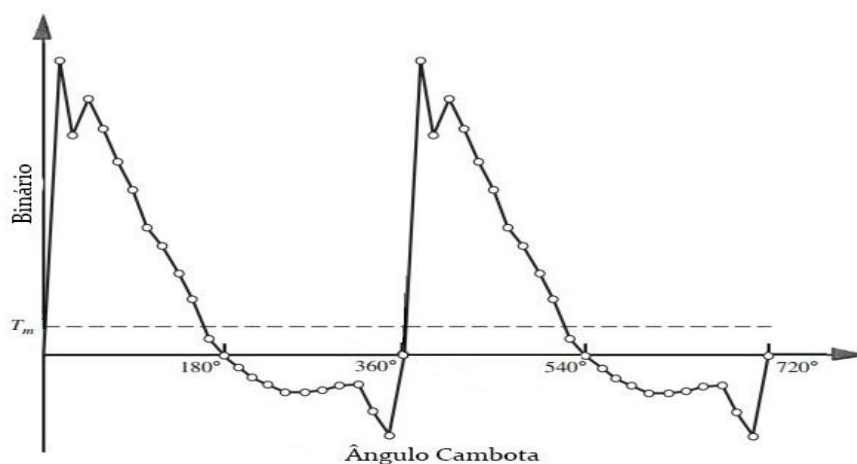


Figura 11: Binário em função do ângulo da cambota no ciclo de 2 tempos, adaptado de (1,10,11).

Uma das principais vantagens deste tipo de motores é a sua simplicidade de construção. Como foi previamente falado, estes motores podem funcionar com diferentes

tipos de sistemas de válvulas, sendo que o mais usual, devido à sua simplicidade, prende-se no uso de aberturas laterais no cilindro que usam o curso do pistão como forma de abrir e fechar estas. Às aberturas é dado o nome de janelas, sendo que podemos ainda encontrar motores que possuem um sistema misto, isto é, utiliza uma janela para admissão e uma válvula que pode ser do tipo tulipa para a expulsão dos gases de escape. Mais uma vez entre o motor ser de ignição comandada ou de ignição por compressão o tipo de construção do motor bastante semelhante sendo que as diferenças são as mesmas referidas na construção dos motores com ciclos de 4 tempos (1,6,11).

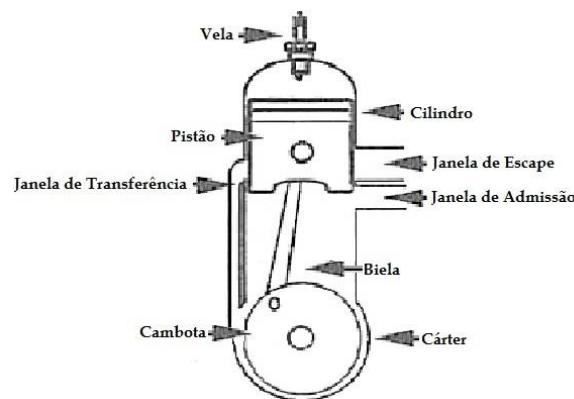


Figura 12: Órgãos internos do motor de ignição comandada a 2 tempos de janelas, adaptado de (1,11).

### 2.3. Volante de Inércia

O volante de inércia ou, vulgarmente denominado de volante de motor, é um dispositivo de armazenamento de energia. Tem como função armazenar energia mecânica ao aumentar a sua velocidade angular e devolver essa energia baixando esta mesma velocidade. É possível observar a sua aplicação em vários casos de transmissão de energia mecânica, em que é utilizado para suavizar essa transmissão. Também é utilizado para estabilizar a produção de energia elétrica através dos vários tipos de conversores mecânicos/elétricos (10).

No caso dos motores de combustão este volante é necessário para o funcionamento do mesmo a baixa rotação, armazenando a energia do tempo motor do ciclo e devolvendo-a posteriormente nos tempos em que o ciclo não produz trabalho positivo (1,10).

Na Figura 13 podemos observar a representação matemática de um volante de inércia onde o movimento rotacional é dado por  $\theta$  e o momento de inércia por  $I$ . A velocidade do volante de inércia irá aumentar consoante o binário a este fornecido pela fonte de energia mecânica, estando representado no esquema por  $T_i$  segundo um dado  $\theta_i$ . Por fim, teremos uma carga que absorverá a energia armazenada no volante representada por  $T_o$  medida em

função de  $\theta_o$ . Se considerarmos  $T_i$  positivo e  $T_o$  negativo a equação do movimento do volante de inércia é a seguinte:

$$I\alpha = T_i(\theta_i, \omega_i) - T_o(\theta_o, \omega_o) \quad (1)$$

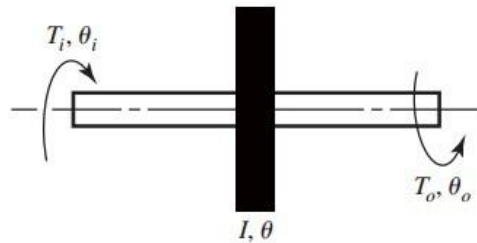


Figura 13: Representação matemática do volante de inércia (12).

Uma das funções do volante de inércia passa por reduzir as vibrações resultantes dos movimentos do motor, sendo essas vibrações em grande parte devido às massas e acelerações dos componentes internos de um motor. Na Figura 14 está representado um esquema do sistema biela manivela de um motor alternativo no qual é possível de observar o sentido positivo de atuação das forças de inércia (10).

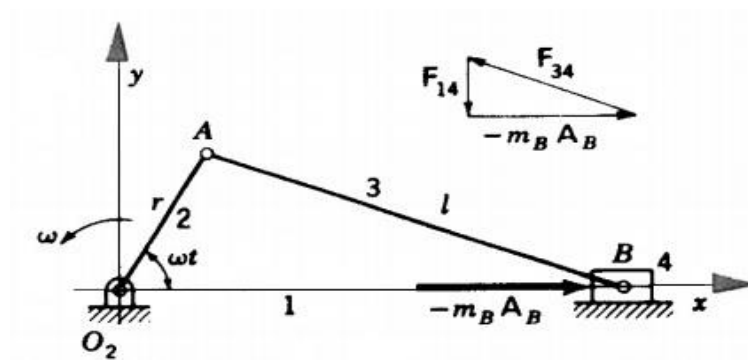


Figura 14: Sentido positivo de atuação das forças de inércia (10).

Nota-se então que, ao longo do sentido positivo do eixo do  $x$ , ou seja, o eixo onde o pistão efetua o seu curso, as forças de inércia são positivas. A soma destas é representada por  $F_{21}$  na Figura 15 e trata-se da força que a cambota exerce nos mancais de apoio. A cambota possui ainda um momento de forças positivo formado por  $F_{41}$  e por  $F_{21}^y$ . A força  $F_{21}^x = -m_B A_B$  é, frequentemente, denominada de *shaking force* e o momento  $T = x F_{41}$  de *shaking couple*. A magnitude e direção destas forças varia com a velocidade angular  $\omega t$ . A *shaking force* induz uma vibração linear do bloco do motor segundo  $x$  e o *shaking couple* uma vibração de torção no bloco segundo o centro da cambota (10).

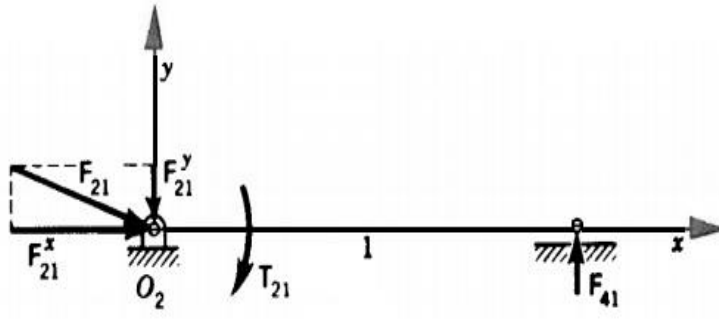


Figura 15: Resultante das forças de inércia sobre o bloco do motor (10).

## 3. Máquinas elétricas

Se por um lado o motor de combustão interna é ainda uma das máquinas mais utilizadas nos meios de transporte, o motor elétrico é uma máquina imprescindível ao seu progresso. A máquina elétrica é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica sem perdas significativas e sem que deste resultem elementos poluentes. Tem ainda a particularidade de inverter o processo, isto é, converter energia mecânica em energia elétrica (13).

Uma máquina elétrica rotativa é constituída, fundamentalmente, por duas partes distintas: o indutor e o induzido. No indutor, também designado por campo, é gerado um campo magnético enquanto que no induzido, também denominado por armadura, processam-se fenómenos eletromagnéticos. Uma das partes é fixa e a outra é móvel. À parte fixa dá-se o nome de estator e à parte móvel de rotor.

À semelhança dos motores de combustão, as máquinas elétricas rotativas podem ter diferentes constituições e funcionarem com base em diferentes princípios. Existem inúmeros tipos de máquinas, sendo que as mais usuais são a máquina de corrente contínua, máquina de indução, máquina síncrona e as máquinas de relutância.

### 3.1. Máquina de corrente contínua

#### 3.1.1. Máquina de corrente contínua convencional

A máquina elétrica de corrente contínua convencional foi a primeira máquina elétrica a ser utilizada em grande escala. Tem como principal característica o controlo preciso entre amplos limites de velocidade. As desvantagens são: o custo mais elevado em comparação aos motores de corrente alternada e uma maior manutenção.

O motor de corrente contínua gira em consequência da interação do campo magnético do estator com campo magnético do rotor. O campo principal, o do estator, é criado pelos enrolamentos do estator quando são percorridos por corrente e o segundo campo, o do rotor, é originado pela circulação da corrente nos condutores dos enrolamentos do rotor (13-15).

Cada condutor do rotor contribui com um campo magnético que roda à sua volta e cujo sentido é demonstrado na Figura 16.

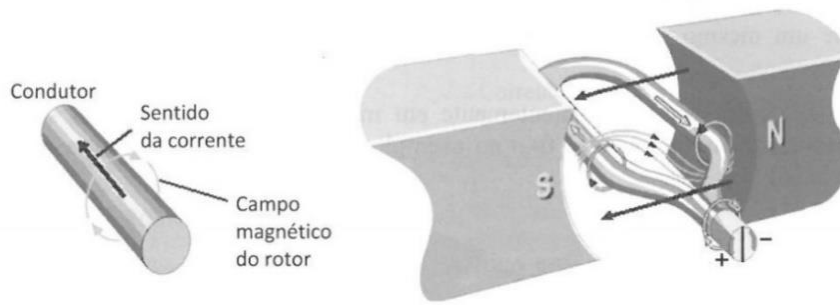


Figura 16: Campo magnético de um condutor e de uma espira do rotor (9).

Os vários campos magnéticos dos condutores do rotor, alimentados por escovas, têm como resultante um polo N e um polo S em lados opostos do núcleo do rotor (13).

### 3.1.2. Máquina de corrente contínua de ímanes permanentes

A máquina de ímanes permanentes é na sua constituição idêntica à máquina de corrente contínua convencional sendo que o seu estator é significativamente diferente. Isto é, em vez dos tradicionais enrolamentos, este possui ímanes permanentes responsáveis por criar o campo magnético indutor. O funcionamento desta máquina é partilhado com o da máquina de corrente contínua convencional, variando apenas na forma como é gerado o campo magnético, como foi atrás mencionado (13-15).

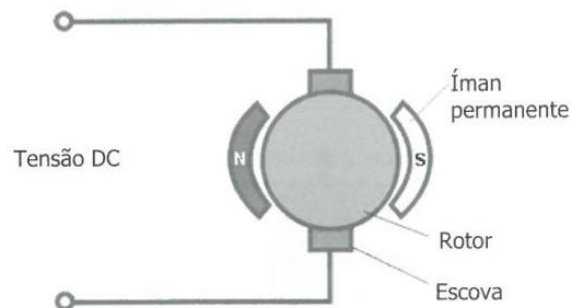


Figura 17: Estrutura da máquina de corrente contínua de íman permanente (13).

### 3.1.3. Máquina de corrente contínua sem escovas

A máquina de corrente contínua sem escovas é uma máquina elétrica em que a operação de comutação, realizada mecanicamente pelo coletor no motor de corrente contínua, é efetuada por um comutador eletrónico. Este facto leva a que esta máquina não necessite de coletor nem escovas.

Para que o motor rode, os enrolamentos do estator têm de ser alimentados com corrente contínua numa determinada sequência. Deste modo são, criados sequencialmente pares de polos N-S no estator que atraem os polos do rotor, e este entra em rotação. A

posição do rotor é detetada tipicamente por sensores de *Hall*, de modo a que o controlador possa saber a posição do rotor e aplicar corretamente a sequência de alimentação (13-15).

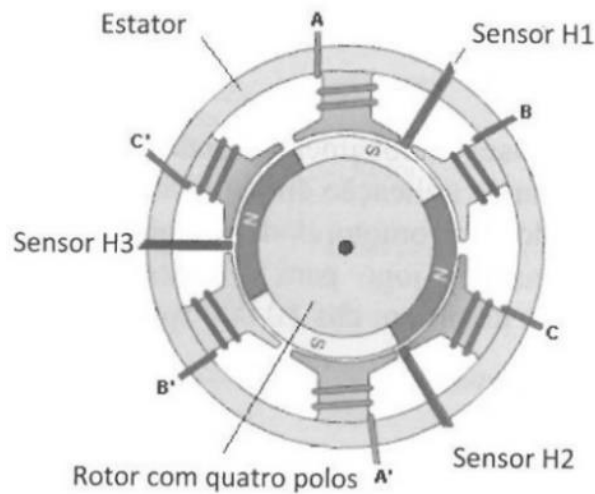


Figura 18: Estrutura da máquina elétrica de corrente contínua sem escovas (13).

### 3.2. Máquina assíncrona

Ao contrário das máquinas convencionais de corrente contínua em que o estator e o rotor necessitam de ser alimentados, nas máquinas assíncronas apenas o estator é alimentado, sendo que o rotor recebe a energia por indução. Estas máquinas podem ser trifásicas ou monofásicas, contudo o processo de funcionamento destas varia ligeiramente (13-15).

No caso das máquinas trifásicas temos uma alimentação como o próprio nome indica trifásica, uma vez que nestas o estator é formado por um conjunto de três enrolamentos colocados de forma a que entre eles existam ângulos de  $120^\circ$ . Alimentando estes enrolamentos são criados três campos magnéticos alternados, sinusoidais. Deste conjunto de campos é criado um campo magnético girante que ao atravessar o rotor provoca uma variação de fluxo que induz uma força eletromotriz responsável pelo movimento do rotor (13-15).

Nas máquinas monofásicas o modo de funcionamento é semelhante, mas, ao invés de um campo magnético girante como é observável nos motores trifásicos existe um campo magnético pulsante que apesar de a sua intensidade variar e mudar de sentido, a direção do campo possui sempre inalterada. As suas maiores vantagens encontram-se no seu baixo custo e simplicidade, tendo como desvantagem a sua dificuldade de variação da velocidade e baixo binário de arranque (13-15).

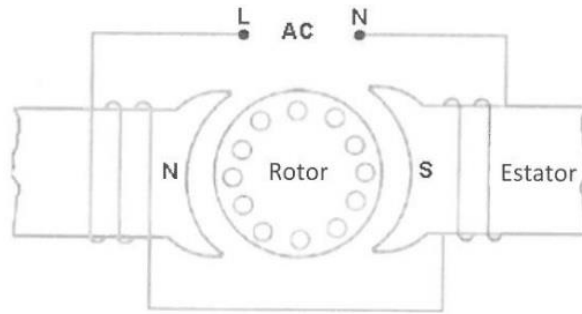


Figura 19: Esquema da máquina assíncrona monofásica (13).

### 3.3. Máquina síncrona

A máquina síncrona como qualquer outra máquina elétrica rotativa, possui um estator e um rotor. O estator é formado por um enrolamento que cria polos magnéticos quando é alimentado, porém o rotor é constituído por ímãs permanentes ou eletroímãs que necessitam de uma alimentação externa de corrente contínua. A máquina síncrona em semelhança à máquina assíncrona pode ter uma configuração monofásica ou trifásica. Esta possui vantagens sobretudo em aplicações que exigem potências altas e velocidades constantes; no entanto, esta máquina possui um binário de arranque nulo tendo que recorrer a sistemas externos para o seu arranque (13-15).

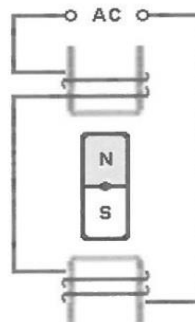


Figura 20: Esquema máquina síncrona monofásica (13).

### 3.4. Máquina de relutância variável

Depois de analisados os vários tipos de máquinas elétricas atrás apresentadas, a escolha para a integração deste sistema recaiu sobre a máquina de relutância variável. Esta escolha foi feita devido ao facto de esta máquina possuir características que se adaptam à aplicação pretendida. De salientar a grande capacidade de controlo, grande robustez e fiabilidade e valores de binário nas diferentes faixas de rotação. Esta máquina será explorada



### 3.4.2. Funcionamento como motor

Os motores de relutância baseiam-se no princípio da relutância mínima, daí na sua constituição, possuem polos salientes em número diferente no estator e no rotor. Esta configuração permite o rodar do rotor e obter o binário uma vez que o rotor irá sempre procurar a posição em que a relutância seja mínima, isto é, quando um enrolamento de um par de polos do estator é alimentado cria um campo magnético N-S que atrai os polos salientes do rotor mais próximos de modo a que estes se alinhem e se obtenha uma posição em que a relutância do circuito magnético seja mínima. A diferença do número de polos destas máquinas é de um par de polos a menos no rotor que no estator. Tomando por base a Figura 21, é possível explicar o funcionamento contínuo do motor de relutância. Se a fase A for alimentada, os polos do rotor marcados com a e a' vão procurar alinhar-se com os polos do estator marcados com A e A' e, deste modo encontrar a posição de relutância mínima. Quando ocorre o alinhamento dos polos a alimentação é cortada, de modo a que, esta não crie resistência para que os polos se separem e possam passar para a fase seguinte. Seguindo a sequência anterior, ao alimentar a fase B vamos observar a procura dos polos b e b' alinharem-se com os polos B e B'. Ao completar a ordem de alimentação das fases A, B, C e D, vamos ter um movimento no sentido de rotação dos ponteiros do relógio, que poderá ser facilmente invertida trocando a ordem de alimentação das fases do motor. Todo o funcionamento deste motor assenta no facto de as fases serem alimentadas pela ordem correta e no *timing* certo; para isso são utilizados sensores de posição(13-15,18).

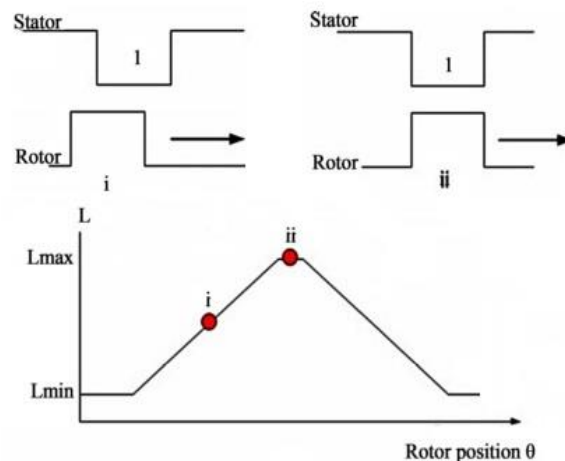


Figura 22: Variação da indutância em funcionamento como motor com o alinhar dos polos, adaptado de (19).

### 3.4.3. Funcionamento como gerador

No funcionamento como gerador, a máquina de relutância variável continua a necessitar que as fases sejam alimentadas. Neste caso a alimentação das fases vai ser

realizada a partir do momento em que a posição de relutância mínima é alcançada, ou seja, após os polos do rotor alinharem com o estator. Ao contrário do que acontece no funcionamento como motor não existe força eletromagnética nenhuma que procure o alinhamento dos polos, pois esse alinhamento dá-se por meio do binário mecânico responsável por mover o rotor. Quando se dá esse alinhamento é então alimentada a fase passando a haver um binário eletromagnético e contra motriz ao movimento, que o binário mecânico vinha a impor ao rotor. A quebra desse binário eletromagnético devido ao movimento rotacional imposto pelo binário mecânico vai provocar uma variação do fluxo nos enrolamentos do estator, dá lugar à energia elétrica (17,19-21).

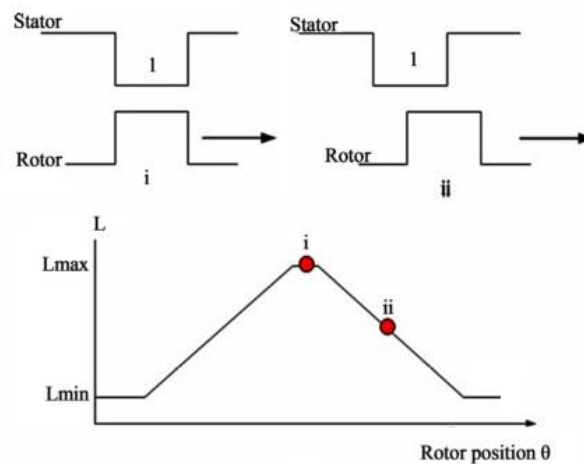


Figura 23: Variação da indutância em funcionamento como gerador com o alinhar dos polos, adaptado de (19).



## 4. Modelação da simulação

A simulação foi construída com recurso à ferramenta de programação *Simulink*® que faz recurso ao software *Matlab*® como motor de cálculo. Para a construção desta simulação recorreu-se a blocos pré-existentes na biblioteca da ferramenta, mas foi necessário a criação e programação de vários blocos pois os existentes não satisfaziam as necessidades da simulação que se pretendia construir.

A simulação tem como grande objetivo demonstrar a viabilidade de investigação e desenvolvimento do sistema que foi previamente introduzido. Neste capítulo serão explicitados todos os blocos presentes na simulação bem como a formulação matemática por detrás dos blocos que representam os vários componentes da simulação, sendo eles o motor de combustão interna, a máquina elétrica, o conversor e todos os outros componentes do sistema.

A Figura 24 ilustra o *layout* da simulação onde estão representados todos os blocos e ligações entre estes.

### 4.1. *Single Cylinder Four Stroke Engine*

Este bloco tem como finalidade representar o motor de combustão interna da simulação. Neste caso, caracteriza-se por ser um motor monocilíndrico regido segundo o ciclo de *Otto*. Neste bloco todas as características geométricas como, por exemplo, comprimento da biela, massa do pistão podem ser alteradas. É também possível alterar parâmetros termodinâmicos, como o rendimento da combustão ou poder calorífico do combustível. O *input* que este recebe é comum aos demais blocos e é definido no início da simulação, sendo  $\omega$  a velocidade de rotação do sistema. Este devolve posteriormente o binário produzido em função do ângulo da cambota  $T21$  e o ângulo de posição da cambota  $\omega t$ .

O binário produzido pelo motor de combustão tem como base o sistema representado na Figura 25 que diz respeito a um mecanismo de biela manivela comum. É através deste sistema que os motores de combustão, atrás mencionados, se regem para converter as forças resultantes das variações de pressão dentro do cilindro em binário mecânico na cambota do motor.

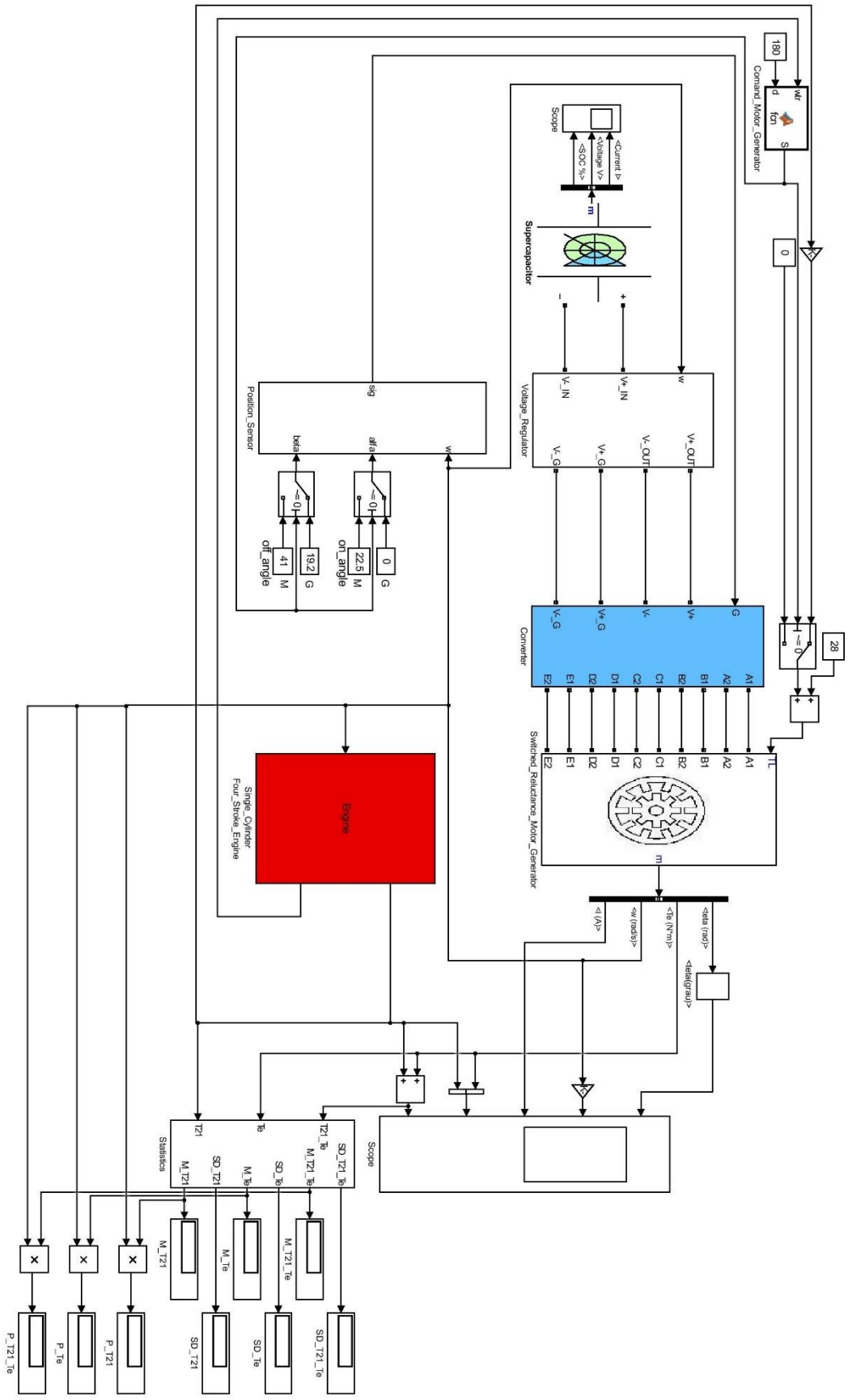


Figura 24: Layout da simulação.

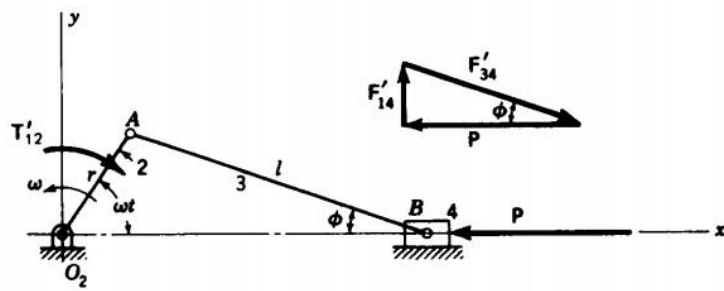


Figura 25: Mecanismo biela manivela (10).

As equações que descrevem o sistema da Figura 25 estão representadas a seguir (10).

Relação entre o ângulo de cambota  $\omega t$  e o ângulo da biela  $\phi$ :

$$r * \sin \omega t = l * \sin \phi \quad (2)$$

Binário entregue à cambota pelas variações de pressão no cilindro:

$$T'_{12} = P * r * \sin \omega t * \left(1 + \frac{r}{l} * \cos \omega t\right) \quad (3)$$

Posição do pistão em relação a  $O_2$  segundo x:

$$x = l - \frac{r^2}{4 * l} + r * \left(\cos \omega t + \frac{r}{4 * l} * \cos 2 * \omega t\right) \quad (4)$$

Ao derivarmos a equação anterior obtemos a velocidade em relação a x:

$$\dot{x} = -r * \omega * \left(\sin \omega t + \frac{r}{2 * l} * \sin 2 * \omega t\right) \quad (5)$$

Ao aplicarmos a segunda derivada a equação obtemos a aceleração em relação a x:

$$\ddot{x} = -r * \alpha * \left(\sin \omega t + \frac{r}{2 * l} * \sin 2 * \omega t\right) - r * \omega^2 * \left(\cos \omega t + \frac{r}{l} * \cos 2 * \omega t\right) \quad (6)$$

Da figura é ainda possível observar a existência da força  $F'_{14}$  e da força  $F'_{34}$ , sendo estas forças de atrito que se opõem ao funcionamento do motor, serão subtraídas. A força  $F'_{14}$  caracteriza-se por ser a força que as paredes do cilindro exercem no pistão. A força  $F'_{34}$  é a força de compressão na biela se opõe a variação do ângulo  $\phi$ , ambas as forças são em função da pressão  $P$  aplicada ao pistão e do ângulo  $\phi$ , resultando então:

$$F'_{14} = P * \tan \phi \quad (7)$$

$$F'_{34} = \frac{P}{\cos \phi} \quad (8)$$

Para o cálculo das pressões dentro do cilindro ao longo do ciclo recorreram-se às equações termodinâmicas. Estas equações são possíveis de observar a seguir e dizem respeito ao diagrama do ciclo teórico representado na Figura 3 (9).

Massa de gás no cilindro:

$$m_1 = \frac{P_1 * V_1}{R * T_1} \quad (9)$$

Massa de ar presa no cilindro:

$$m_{ta} = \frac{P_1 * V_{sv}}{R * T_1} \quad (10)$$

Densidade do ar à pressão atmosférica:

$$\rho_{at} = \frac{P_{atm}}{R * T_1} \quad (11)$$

Taxa de admissão:

$$DR = \frac{m_{ta}}{\rho_{at} * V_{sv}} \quad (12)$$

Massa de combustível presa:

$$m_{tf} = \frac{m_{ta}}{AFR} \quad (13)$$

Calor transferido durante a explosão:

$$Q_2^3 = \eta * m_{tf} * C_{fl} \quad (14)$$

Pressão de compressão:

$$P_2 = P_1 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\gamma} \quad (15)$$

Temperatura na câmara de combustão durante a compressão:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} \quad (16)$$

Trabalho efetuado durante a compressão:

$$W_2^3 = -m_1 * C_v * (T_2 - T_1) \quad (17)$$

Temperatura no fim da explosão:

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_2^3}{m_1 * C_v} \quad (18)$$

Pressão na câmara de combustão depois da explosão:

$$P_3 = P_2 * \frac{T_3}{T_2} \quad (19)$$

Temperatura na câmara de combustão durante a expansão:

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{1-\gamma} \quad (20)$$

Pressão na câmara de combustão durante a expansão:

$$P_4 = P_3 * \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{-\gamma} \quad (21)$$

Após esta formulação foram tomados como base os parâmetros geométricos de um motor comercial e os parâmetros termodinâmicos fornecidos em (9). O motor foi caracterizado como sendo um motor *Honda® GX 160*, esses parâmetros são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2: Parâmetros geométricos iniciais da simulação.

Parâmetros Geométricos <i>Honda® GX 160</i>	
Diâmetro cilindro	0.068 m
Distância varrida	0.045 m
Taxa de compressão	9:1
Comprimento biela	0.084 m
Massa pistão	0.201 kg
Massa biela	0.0483 kg

Tabela 3: Parâmetros termodinâmicos iniciais da simulação.

Parâmetros termodinâmicos (9)	
Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ )	$1.013 * 10^5$ Pa
Constante dos gases (R)	287 J/(Kg*K)
Temperatura ambiente ( $T_1$ )	293.15 K
Rácio ar-combustível (AFR)	15.06
Poder calorífico ( $C_{fl}$ )	43.5 MJ/Kg
Calor específico a volume constante ( $C_v$ )	718 J/(Kg*K)

## 4.2. Switched Reluctance Motor Generator

Trata-se de um bloco pré-existente na biblioteca *Simscape*® e documentado em (22). Este bloco simula uma máquina de relutância variável, que permite através de uma janela de interface gráfica alterar a configuração do motor, velocidade inicial, posição inicial e, ainda, seleccionar o tipo de curvas de magnetização da máquina. Estas curvas são extremamente importantes pois caracterizam o modo como o fluxo magnético varia em função da corrente nas fases. Podem ser obtidas utilizando os valores mínimos e máximos de indutância definidos pelo utilizador e por métodos analíticos são então traçadas as curvas de magnetização ou pode funcionar através de curvas de magnetização obtidas previamente através de métodos experimentais ou de elementos finitos (22-24). Para a aplicação pretendida recorreu-se a curvas de magnetização pré-carregadas no bloco da máquina elétrica, que dizem respeito a uma máquina com uma configuração 10/8 com 10 KW de potência. A escolha da máquina com estas características deveu-se ao facto de ter um valor de binário médio enquanto funcionamento motor idêntico ao do motor de combustão, uma vez que o pretendido era corrigir e não fazer com que aumentasse. Estas curvas são possíveis de observar na Figura 26, cada curva representa um dado desfaseamento entre um polo do estator com o respetivo polo do rotor. A curva correspondente a  $\theta=0^\circ$  corresponde a posição em que os polos se encontram totalmente alinhados.

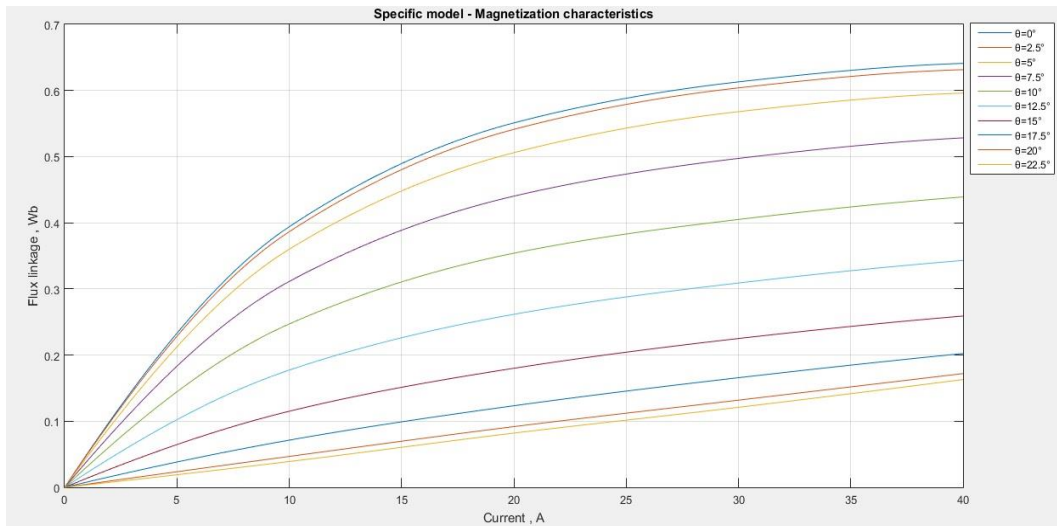


Figura 26: Curvas de magnetização da máquina de relutância variável utilizada.

A máquina irá acompanhar o ciclo do motor de combustão interna ao longo dos seus 720° de rotação por ciclo e, funcionar num máximo de 180° no modo gerador e 520° em modo motor. O ângulo de funcionamento enquanto gerador pode ser ajustado para um valor inferior aos 180°. Este valor encontra-se limitado pelo tempo em que o motor de combustão executa a expansão, ou seja, o tempo motor. Os valores tomados como ponto de partida para os ângulos em que a máquina alimenta e desliga essa alimentação (estes são também conhecidos como ângulos de disparo), foram os valores máximos e mínimos permitidos em cada operação, sendo este um dos pontos fulcrais do funcionamento nesta máquina elétrica. Deste modo, os ângulos vão ser um ponto de grande incidência aquando da otimização de todo o sistema. Os cálculos para determinar os ângulos em que é possível iniciar a alimentação da máquina e, os intervalos de valores para os ângulos de disparo para cada modo de funcionamento são demonstrados a seguir (25,26).

Ângulo em que se dá um pulso de binário:

$$\varepsilon = \frac{2 * \pi}{m * N_r} \quad (22)$$

$m$  - Numero de fases

$N_r$  - Numero de polos no rotor

$m * N_r$  - Numero de pulsos por rotação

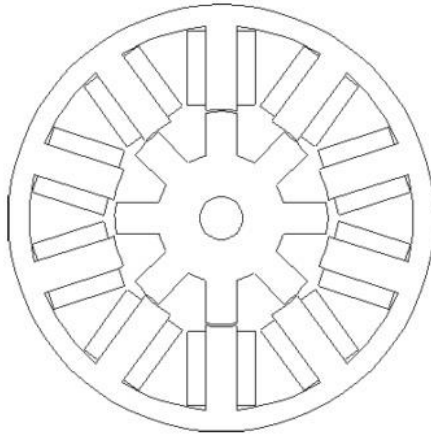


Figura 27: Esquema da Máquina de relutância variável com uma configuração 10/8 (22).

Com o modelo utilizado na simulação, tratando-se de uma configuração 10/8 ficamos com:

$$\varepsilon = \frac{2 * \pi}{5 * 8} = 9^\circ$$

De modo a poder descrever o perfil de indutâncias, temos que considerar como condição inicial que os polos do rotor e do estator estão alinhados. As condições iniciais para cada fase vão ser o ângulo entre o polo do estator e o correspondente polo do rotor.

O arco entre os polos do estator é calculado através de:

$$a_s = \frac{2 * \pi}{N_s} \quad (23)$$

O arco entre os polos do rotor é calculado através de:

$$a_r = \frac{2 * \pi}{N_r} \quad (24)$$

Neste tipo de configuração ficamos então com:

$$a_s = \frac{2 * \pi}{10} = 36^\circ$$

$$a_r = \frac{2 * \pi}{8} = 45^\circ$$

Deste modo, os ângulos em que é possível iniciar a alimentação das fases são:  $0^\circ$ ;  $-9^\circ$ ;  $-18^\circ$ ;  $-27^\circ$ ;  $-36^\circ$ .

O valor dos ângulos é negativo dado que, se considerarmos sentido normal de rotação da máquina no sentido dos ponteiros dos relógios, estes terão de ser colocados na ordem inversa das fases.

Para determinar o perfil de indutância e, por sua vez, os ângulos de disparo da máquina recorreremos ao arco dos polos do rotor. Se o valor do arco é de  $45^\circ$  significa que temos uma distância entre a indutância mínima e máxima de  $45^\circ / 2 = 22.5^\circ$ , pelo que ficamos então com o perfil de indutâncias representado na Figura 28.

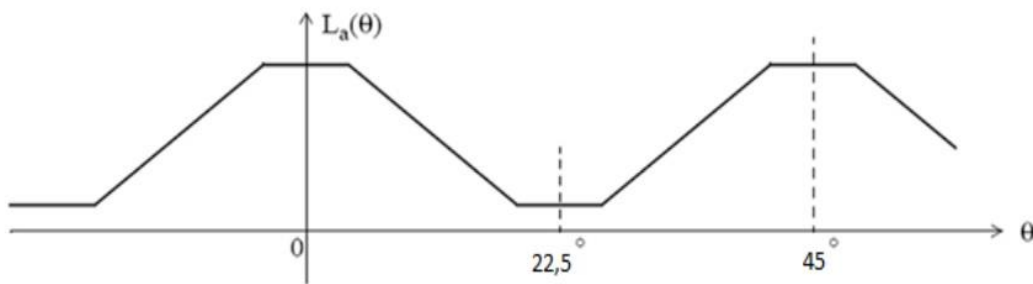


Figura 28: Perfil de indutância máquina de relutância variável 10/8.

Na Tabela 4 encontram-se os ângulos de disparo mínimos e máximos em que a máquina pode operar no funcionamento no modo gerador ou modo motor.

Tabela 4. Ângulos de disparo permitidos para a máquina elétrica.

Ângulos de disparo máquina de relutância 10/8		
Ângulos disparo motor	On	Off
	$22.5^\circ$	$45^\circ$
Ângulos disparo gerador	On	Off
	$0^\circ$	$22.5^\circ$

### 4.3. Converter

Este bloco representa o conversor, que é o responsável pelo controlo e funcionamento da máquina. Este bloco opera quando existe funcionamento em modo motor convertendo e distribuindo a tensão de entrada pelo número de saídas que correspondem ao número de fases da máquina elétrica. Por sua vez, em funcionamento gerador este inverte o sentido de funcionamento entregando ao regulador de tensão a energia produzida pelo gerador. Este bloco é um subsistema que alberga dentro dele conversores eletrónicos constituídos por dois IGBT's e dois díodos. O número de conversores será igual ao número de fases do estator da

máquina elétrica. Este conversor é comandado através do sensor de posição, que emite um sinal que coloca os IGBT's em condução de modo a alimentar as fases da máquina elétrica. A estratégia de alimentação passa por alimentar as fases sequencialmente na ordem A, B, C, D, E.

A Figura 29, ilustra a configuração de um dos conversores eletrônicos, sendo nela possível observar, os dois IGBT's comutados pela entrada G. Os componentes V+ e V- representam as entradas da tensão e V+\_G e V-\_G as saídas da tensão gerada enquanto funcionamento no modo gerador.

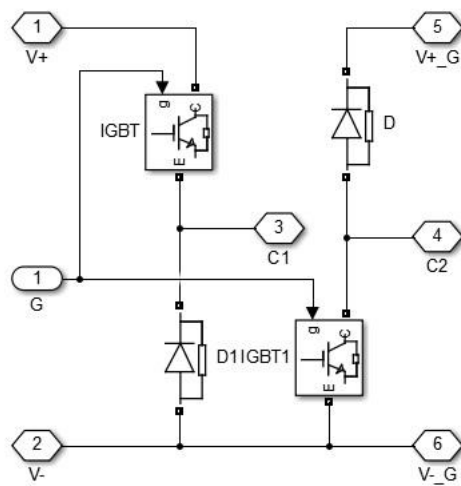


Figura 29: Conversor eletrônico.

#### 4.4. Position Sensor

Este sensor de posição é essencial ao funcionamento da máquina elétrica, tomando ainda mais importância neste caso visto a máquina elétrica alternar entre motor e gerador. Este sensor toma conta da posição em que o rotor da máquina elétrica se encontra e dá o sinal ao conversor de quando este deve iniciar a condução de energia nas fases (comutar os IGBT's para entrar em condução), que se dá o nome de *on angle*, e quando deve proceder ao corte desta de *off angle*. Os ângulos de disparo das fases são diferentes quando estamos perante o funcionamento como gerador ou enquanto motor, pelo que existem dois *switch's* que, ao sinal do comando gerador/motor, alteram os valores dos ângulos de disparo. Na Figura 28 podemos observar a variação da indutância, e os ângulos máximos e mínimos possíveis para os dois modos de funcionamento. Neste bloco é ainda necessário introduzir os ângulos atrás calculados em que a máquina pode ser iniciada.

## 4.5. Voltage Regulator

Este bloco tem por finalidade regular a tensão fornecida ao conversor mediante a velocidade de rotação do motor de combustão. O valor da tensão ideal para cada rotação foi obtido através de um método iterativo e de otimização apresentado no subcapítulo 5.2, deste processo de otimização resultou uma curva de tendência presente na Figura 30. A tensão de saída vai ser obtida através da comparação entre a tensão que está disponível nos terminais de saída e a curva de tendência abaixo apresentada, sendo depois aplicado um controle *on/off* de modo a colocar a tensão dentro dos valores pretendidos.

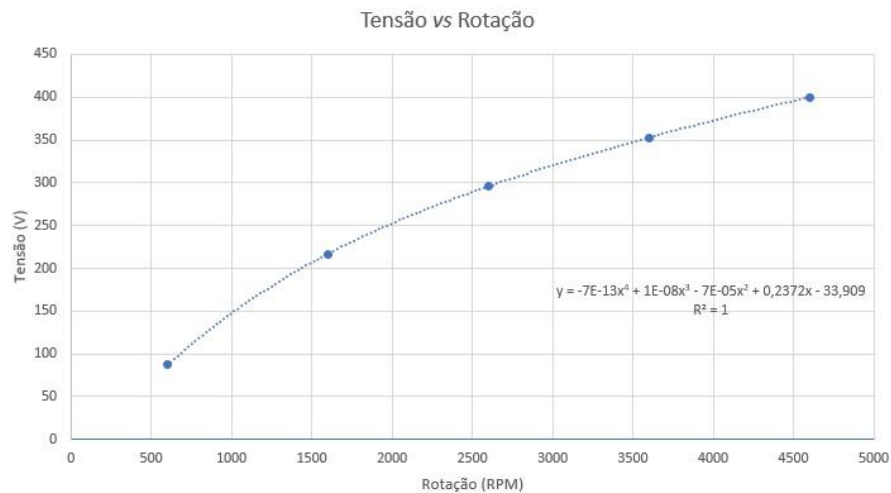


Figura 30: Curva da tensão em função da rotação.

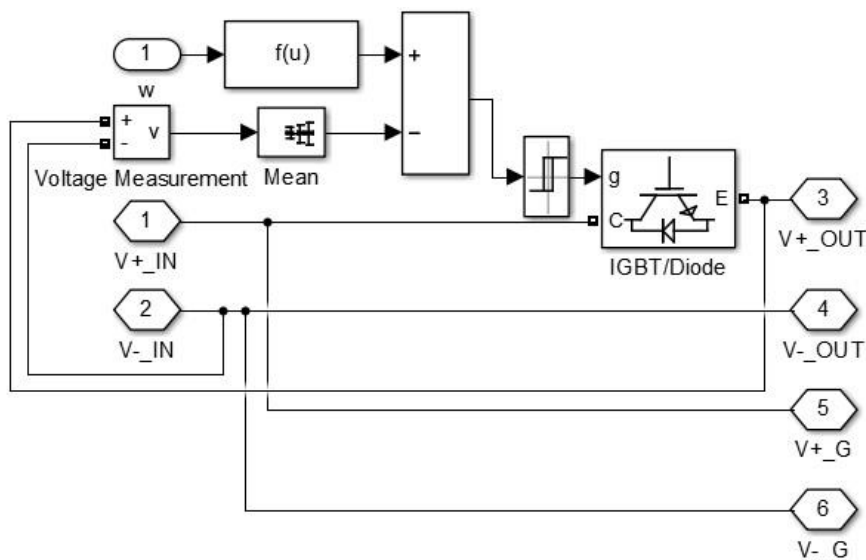


Figura 31: Regulador de tensão.

## 4.6. Comand Motor Generator

Trata-se de uma função de *Matlab*® que é responsável pelo comando da máquina elétrica. Através do ângulo de posição da cambota do motor de combustão (sendo que 0° representa o início do tempo de admissão) e do ângulo de funcionamento enquanto gerador que é definido pelo utilizador, esta função gera um sinal que vai alterar o estado dos diversos *switch*'s, comutando assim o funcionamento de motor para gerador e vice-versa através da alteração dos ângulos de alimentação das fases do estator. Altera ainda o estado do *switch* responsável por alterar o valor de binário que entra na máquina elétrica. Este valor de binário será positivo e terá um valor na ordem do binário médio do motor de combustão enquanto a máquina elétrica funcionar como motor. Este binário é a carga que o motor de combustão representa para o motor elétrico. Por sua vez aquando o funcionamento como gerador este binário terá um valor negativo, pois representa a entrada de binário mecânico necessário à produção de energia elétrica e terá uma ordem de grandeza igual aquela que o motor de combustão produzir a cada instante. A programação desta função e de todos os blocos é apresentada em Anexo no final deste trabalho.

## 4.7. Supercapacitor

Trata-se de um bloco pré-existente na biblioteca *Simscape*, e é o responsável pelo armazenamento da energia elétrica desde a sua geração até que é consumida. Este bloco permite ainda através de uma interface gráfica, selecionar as suas características, tais como a sua capacidade, tensão de funcionamento, nível de carga inicial e tempo de auto descarga. Para a simulação em estudo este não era um ponto relevante pelo que foi considerada uma capacidade suficientemente grande para que não existissem interferências com a simulação. Visto o pretendido nesta fase inicial ser que toda a energia gerada ao longo de um tempo de expansão no motor de combustão seja fornecida ao motor de combustão nos outros três tempos, espera-se que o nível de carga do supercondensador seja o mesmo no início e no final de cada ciclo de 720° de rotação da cambota.

## 4.8. Statistics

Trata-se de um subsistema que alberga funções de *Matlab*®, que são responsáveis por, ao longo do tempo de simulação, calcularem a média e o desvio padrão. Este bloco é o responsável por fornecer os dados que serão tidos em consideração para a análise e conclusões deste trabalho.

## 5. Processo de otimização

Após a modelação da simulação esta foi alvo de um processo de otimização. Neste processo foram considerados dados como ponto de partida. Através de um método iterativo onde os objetivos passavam, inicialmente, por reduzir o valor do desvio padrão do binário resultante da soma da máquina elétrica com o motor de combustão, e posteriormente obter valores para o binário médio da máquina elétrica o mais próximo possível de zero uma vez que se pretende manter o equilíbrio entre o funcionamento enquanto motor e gerador. O processo de otimização foi aplicado para obter os ângulos de alimentação das fases da máquina elétrica, a tensão de alimentação ideal para cada faixa de rotações e, por fim, o ângulo de funcionamento como gerador.

### 5.1. Ângulos de alimentação das fases da máquina elétrica

O início do processo de otimização incidiu nos ângulos de alimentação das fases da máquina elétrica, pois estes ângulos interferem com todo o funcionamento da máquina. Este processo de otimização foi realizado mantendo uma tensão de alimentação de 190V e uma rotação de 1600 RPM. No processo iterativo, partindo dos intervalos possíveis calculados anteriormente, foram sendo alterados os valores dos ângulos de grau em grau até se atingir um valor plausível. A partir desse ponto realizaram-se variações na ordem das décimas de grau na procura do valor mais baixo de desvio padrão do binário resultante (binário resultante da soma da máquina elétrica com o motor de combustão). Neste ponto foi tido em consideração o valor do desvio padrão e não do binário médio da máquina elétrica uma vez que ainda não era conhecida a sua curva de tensão de alimentação e esta influência diretamente o valor do seu binário.

Na Tabela 5 é possível ver as iterações realizadas para determinar os ângulos de alimentação no funcionamento como motor.

Tabela 5: Iterações realizadas na obtenção do ângulo de alimentação no funcionamento enquanto motor.

Ângulo de início de alimentação	Ângulo de fim de alimentação	Desvio padrão do binário resultante
ON	OFF	
22.5°	45°	65.54 N.m
22.5°	44°	63.25 N.m
22.5°	43°	61.66 N.m
22.5°	42°	60.80 N.m
<b>22.5°</b>	<b>41°</b>	<b>60.53 N.m</b>
22.5°	40°	60.67 N.m
22.5°	40.9°	60.59 N.m
22.5°	41.1°	60.59 N.m
23.5°	41°	61.29 N.m

Após a realização de 9 iterações foi possível observar que os ângulos que resultam num valor de desvio padrão menor são os ângulos de 22.5° para o início de alimentação das fases e de 41° para o fim dessa alimentação. Na Figura 32 é possível observar a amarelo o binário da máquina elétrica no inicio do processo de otimização e na Figura 33 o binário resultante. Por sua vez na, Figura 34 e na Figura 35 é observável o resultado do processo de otimização.

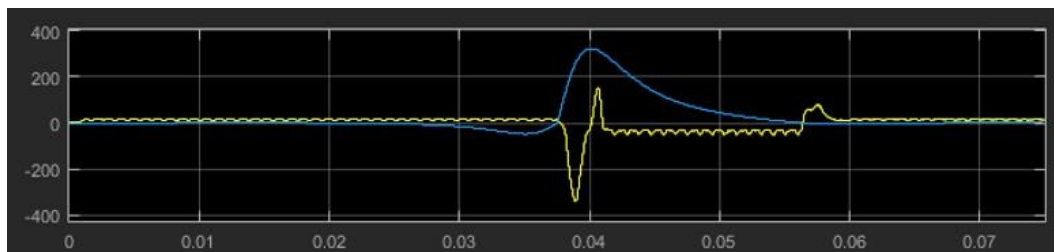


Figura 32: Binário máquina elétrica no inicio do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=45°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°.

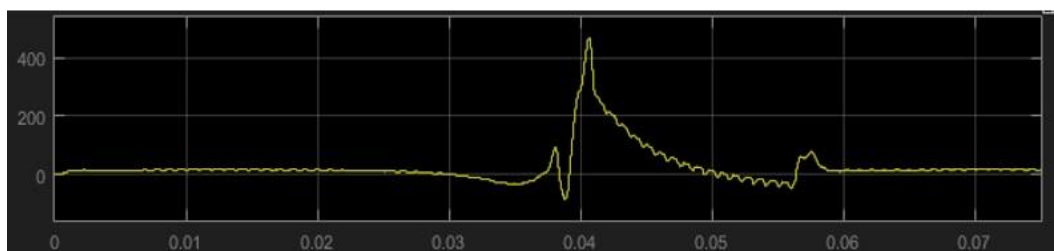


Figura 33: Binário resultante no inicio do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=45°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°.

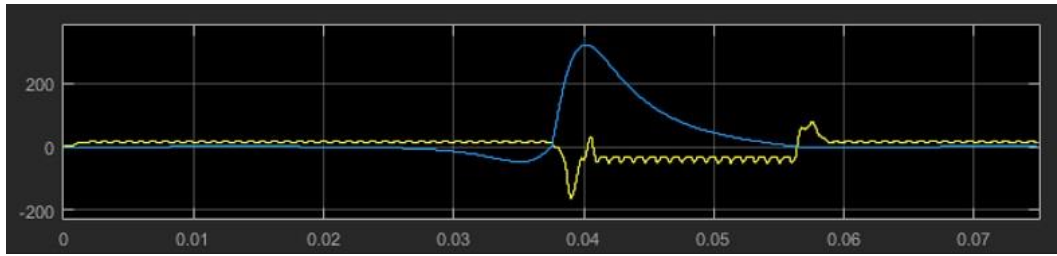


Figura 34: Binário máquina elétrica no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°.

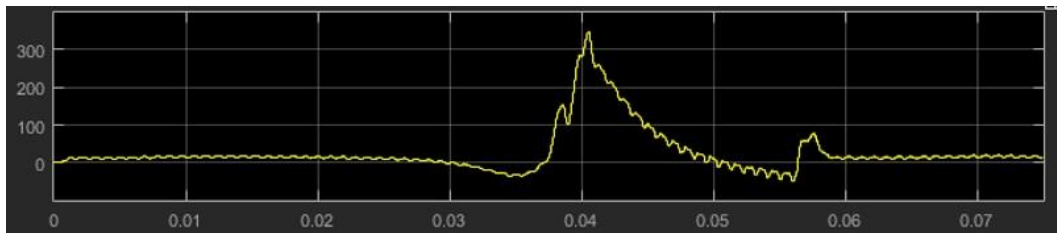


Figura 35: Binário resultante no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON=22.5° e OFF=41°, ângulos disparo gerador ON=0° e OFF=22.5°.

Após o processo de otimização dos ângulos enquanto motor foi realizado um processo igual ao anterior com o objetivo otimizar os ângulos de funcionamento enquanto gerador. Na Tabela 6 é possível ver as iterações realizadas para determinar os ângulos de alimentação no funcionamento como gerador.

Tabela 6: Iterações realizadas na obtenção do ângulo de alimentação no funcionamento enquanto gerador.

Ângulo de início de alimentação ON	Ângulo de início de alimentação OFF	Desvio padrão do binário resultante
0°	22.5°	60.53 N.m
0°	21.5°	58.95 N.m
0°	20.5°	58.06 N.m
0°	19.5°	57.70 N.m
0°	18.5°	57.76 N.m
0°	19.4°	57.70 N.m
0°	19.3°	57.69 N.m
0°	<u>19.2°</u>	<u>57.66</u> N.m
0°	19.1°	57.68 N.m
0°	19.6°	57.72 N.m
1°	19.2°	59.24 N.m

Este processo de otimização necessitou de 11 iterações. Foi possível observar que os ângulos com um valor de desvio padrão menor são os ângulos de  $0^\circ$  para o início de alimentação das fases e de  $19.2^\circ$  para o fim dessa alimentação. Na Figura 34 e na Figura 35 é possível observar o binário da máquina elétrica no início deste processo de otimização. Por sua vez, na Figura 36 e na Figura 37 é observável o resultado do processo de otimização.

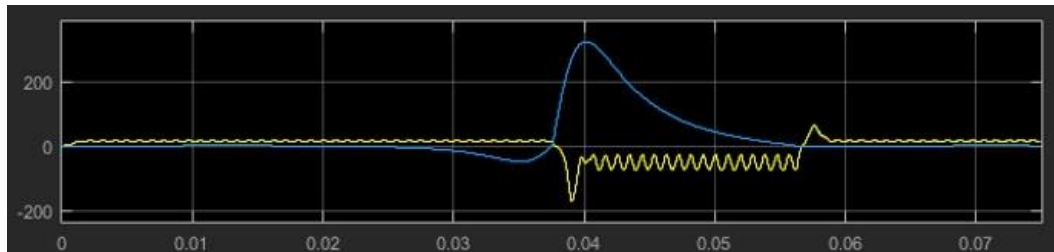


Figura 36: Binário máquina elétrica no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON= $22.5^\circ$  e OFF= $41^\circ$ , ângulos disparo gerador ON= $0^\circ$  e OFF= $19.2^\circ$ .

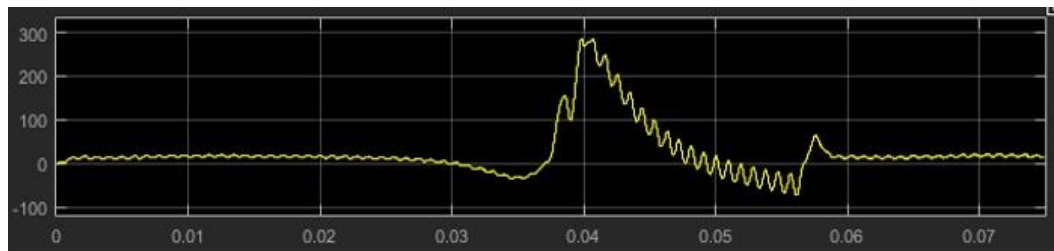


Figura 37: Binário resultante no fim do processo de otimização, ângulos disparo motor ON= $22.5^\circ$  e OFF= $41^\circ$ , ângulos disparo gerador ON= $0^\circ$  e OFF= $19.2^\circ$ .

## 5.2. Curva de tensão

Após obtidos os ângulos de alimentação das fases, procedeu-se ao estudo da tensão a aplicar às fases em cada faixa de rotação. Deste estudo resultou a curva de tensão utilizada pelo regulador de tensão. Para traçar esta curva foram realizadas simulações em 5 faixas de rotação distintas: 600, 1600, 2600, 3600 e por ultimo 4600 RPM. O processo iterativo aplicado foi a realização de várias simulações, começando numa tensão que se sabia ser baixa, e colocando incrementos de 10V até se atingir um valor de binário médio satisfatório. Aquando atingido esse valor, o incremento passava a ser de apenas de 1V na tentativa de colocar o binário médio da máquina elétrica o mais próximo possível de zero. De modo a que o balanço energético da energia gerada e consumida fosse zero.

Nas tabelas a seguir estão apresentadas as iterações realizadas para determinar a tensão de alimentação que melhor se adapta a cada faixa de rotação. Nos gráficos presentes no final de cada tabela é possível observar o início e o resultado final de cada processo de otimização.

Tabela 7: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 600 RPM.

Tensão	Binário médio máquina elétrica
60V	-1.798 N.m
70V	-1.703 N.m
80V	-0.989 N.m
90V	0.484 N.m
79V	-1.186 N.m
81V	-1.021 N.m
82V	-0.812 N.m
83V	-0.879 N.m
84V	-0.576 N.m
85V	-0.438 N.m
86V	-0.134 N.m
<b>87V</b>	<b>-0.056 N.m</b>
88V	0.100 N.m

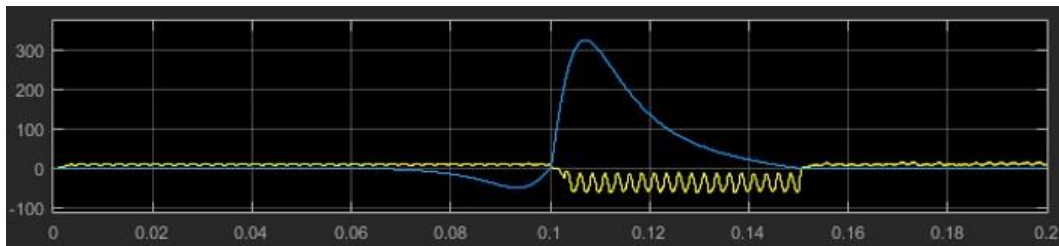


Figura 38: Binário da máquina elétrica às 600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 60V.

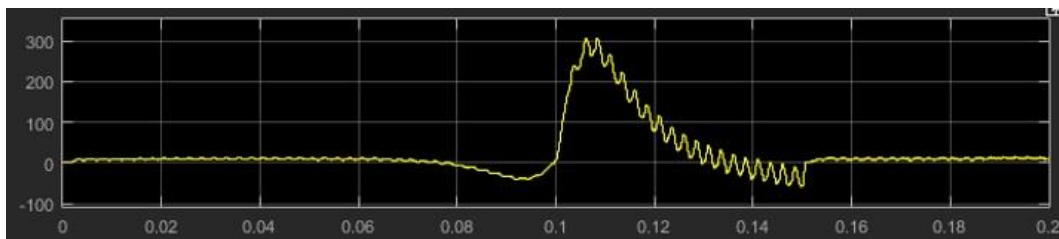


Figura 39: Binário resultante às 600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 60V.

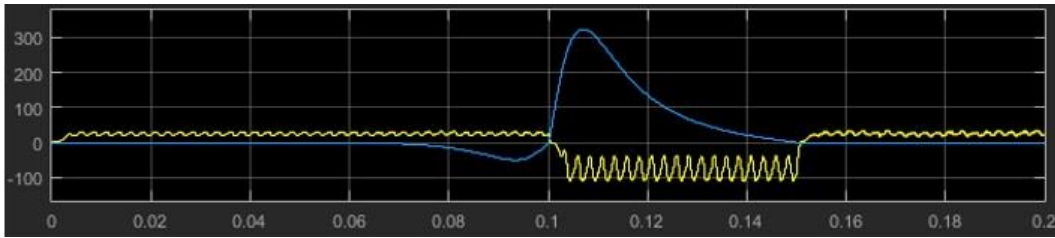


Figura 40: Binário da máquina elétrica às 600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 87V.

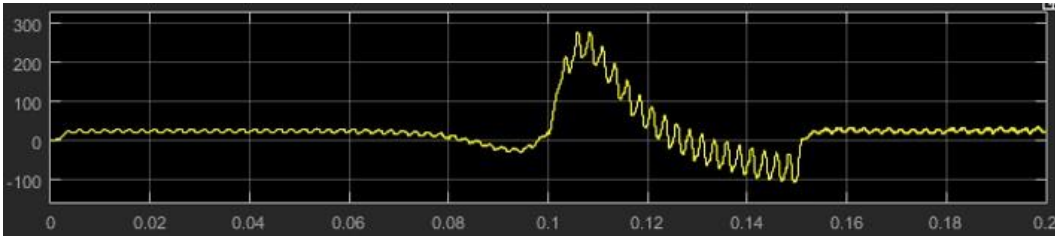


Figura 41: Binário resultante às 600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 87V.

Tabela 8: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 1600 RPM.

Tensão	Binário médio máquina elétrica
160V	-2.284 N.m
170V	-2.224 N.m
180V	-2.051 N.m
190V	-1.814 N.m
200V	-1.280 N.m
210V	-0.650 N.m
220V	0.216 N.m
209V	-0.729 N.m
211V	-0.548 N.m
212V	-0.464 N.m
213V	-0.381 N.m
214V	-0.351 N.m
215V	-0.247 N.m
216V	-0.167 N.m
217V	-0.012 N.m
218V	0.029 N.m

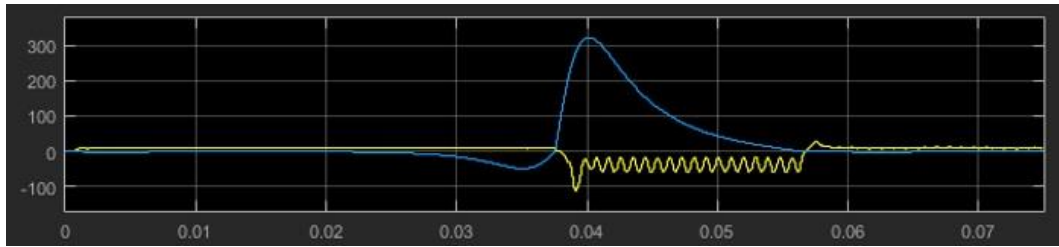


Figura 42: Binário da máquina elétrica às 1600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.

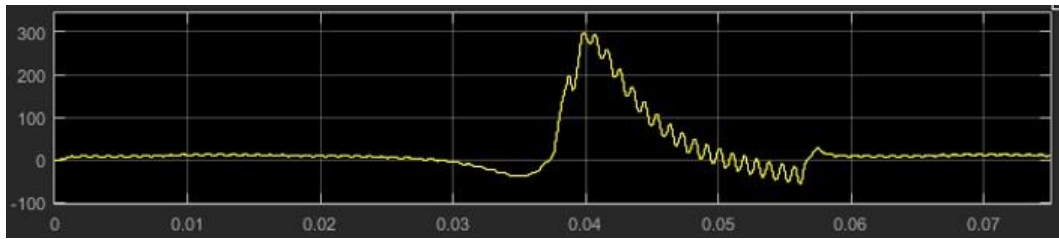


Figura 43: Binário resultante às 1600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.

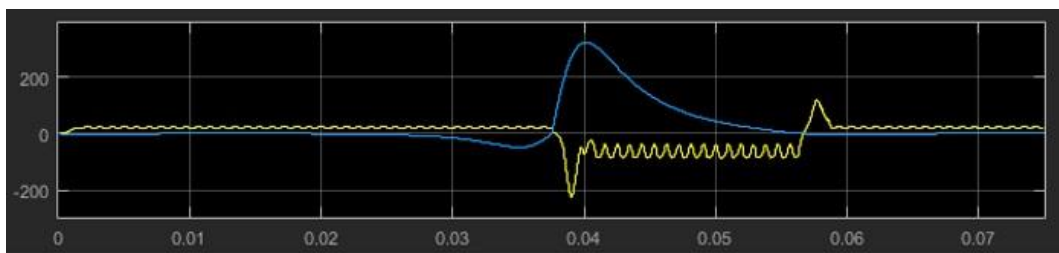


Figura 44: Binário máquina elétrica às 1600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.

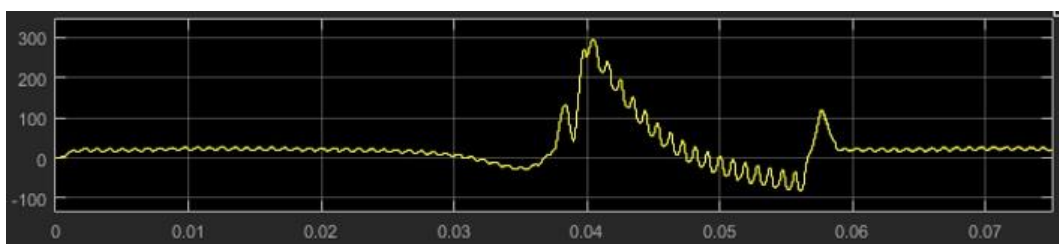


Figura 45: Binário resultante às 1600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 160V.

Tabela 9: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 2600 RPM.

Tensão	Binário médio máquina elétrica
260V	-1.113 N.m
270V	-0.906 N.m
280V	-0.597 N.m
290V	-0.265 N.m
300V	0.122 N.m
289V	-0.320 N.m
291V	-0.218 N.m
292V	-0.162 N.m
293V	-0.157 N.m
294V	-0.107 N.m
295V	-0.077 N.m
<b>296V</b>	<b>-0.024 N.m</b>
297V	0.012 N.m

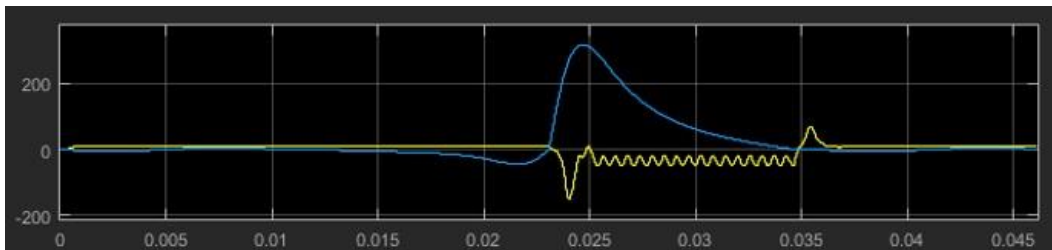


Figura 46: Binário da máquina elétrica às 2600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 260V.

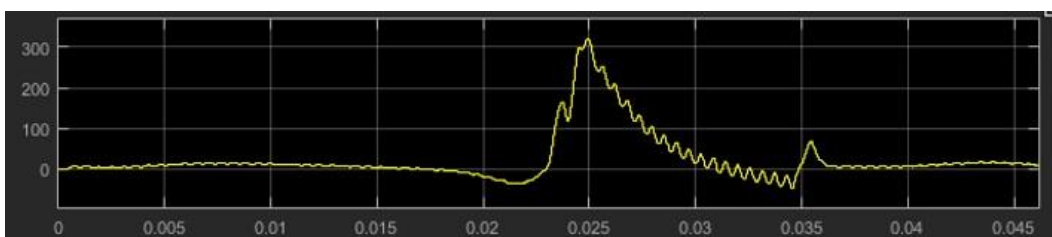


Figura 47: Binário resultante às 2600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 260V.

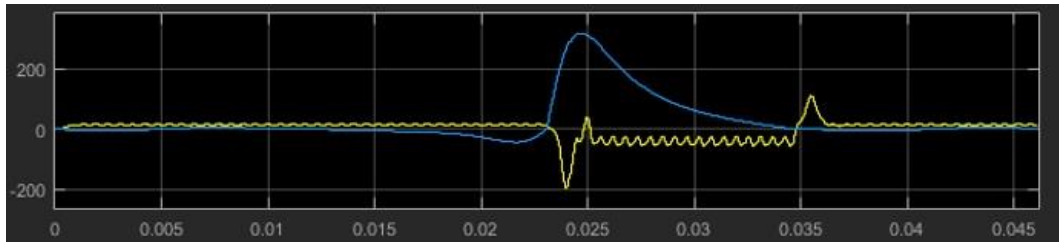


Figura 48: Binário da máquina elétrica à 2600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 296V.

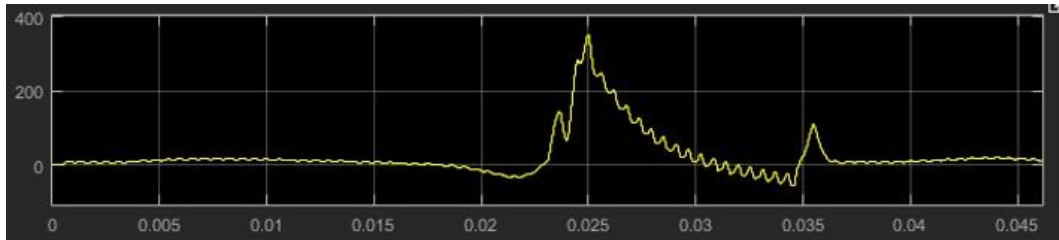


Figura 49: Binário resultante à 2600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 296V.

Tabela 10: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 3600 RPM.

Tensão	Binário médio máquina elétrica
360V	0.144 N.m
350V	-0.055 N.m
349V	-0.068 N.m
351V	-0.023 N.m
352V	-0.041 N.m
<b>353V</b>	<b>-0.020 N.m</b>
354V	0.030 N.m

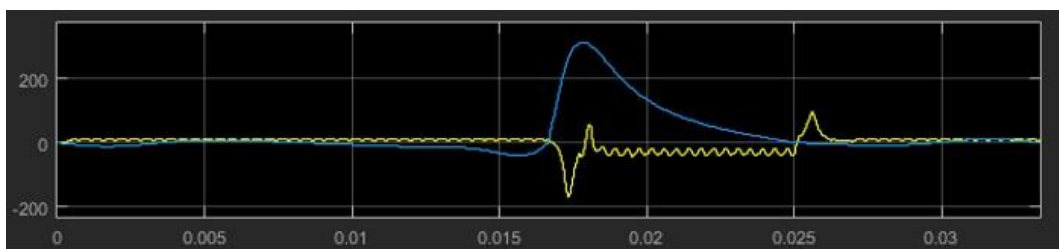


Figura 50: Binário da máquina elétrica à 3600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 360V.

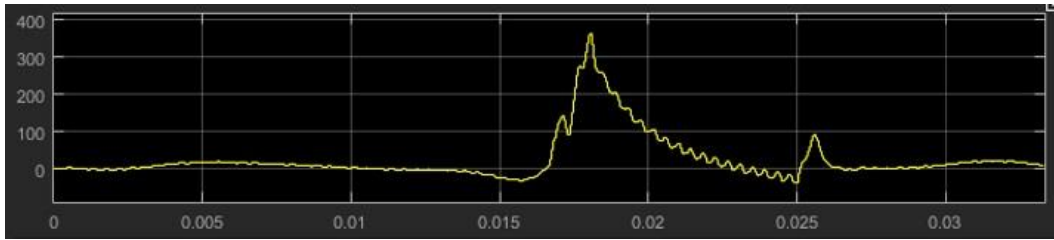


Figura 51: Binário resultante às 3600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 360V.

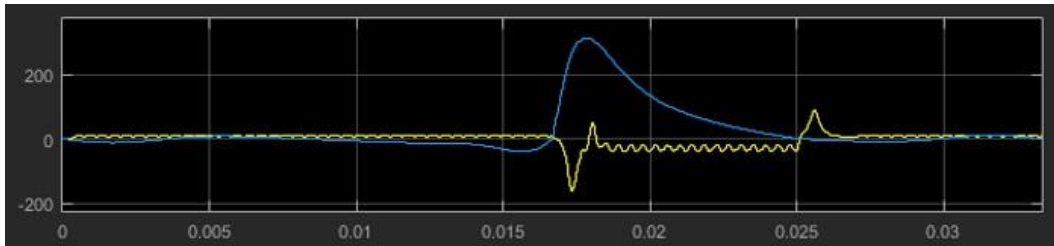


Figura 52: Binário da máquina elétrica às 3600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 353V.

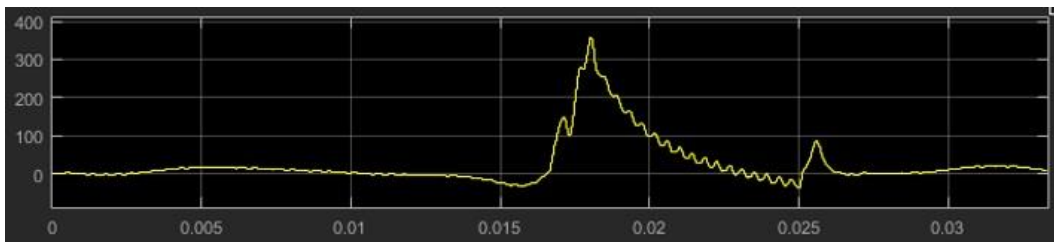


Figura 53: Binário resultante às 3600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 353V.

Tabela 11: Iterações realizadas para achar a curva de tensão de alimentação da máquina elétrica, para as 4600 RPM.

Tensão	Binário médio máquina elétrica
390V	-0.142 N.m
<b>400V</b>	<b>-0.009 N.m</b>
399V	-0.051 N.m
498V	-0.055 N.m
401V	-0.055 N.m

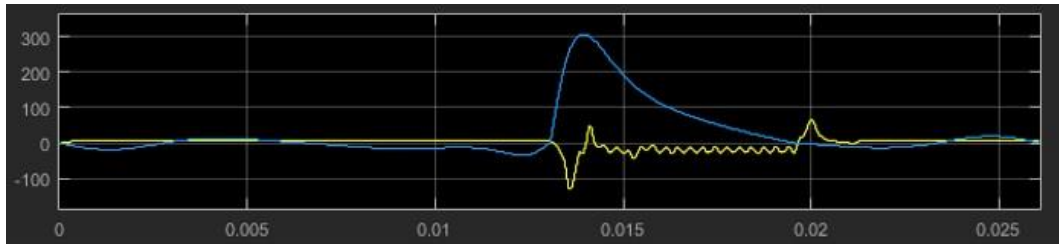


Figura 54: Binário da máquina elétrica à 4600RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 390V.

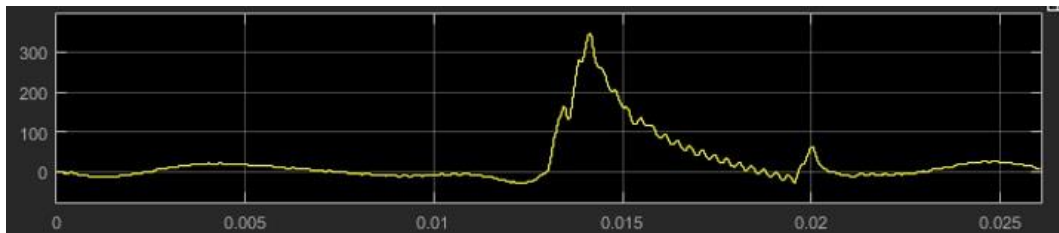


Figura 55: Binário resultante à 4600 RPM no início do processo de otimização, tensão aplicada de 390V.

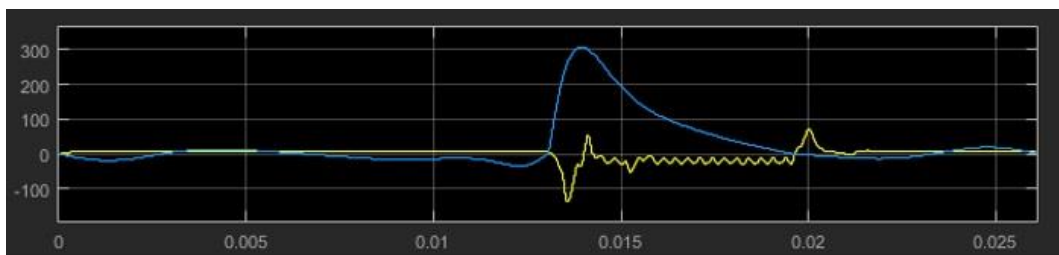


Figura 56: Binário máquina elétrica à 4600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 400V.

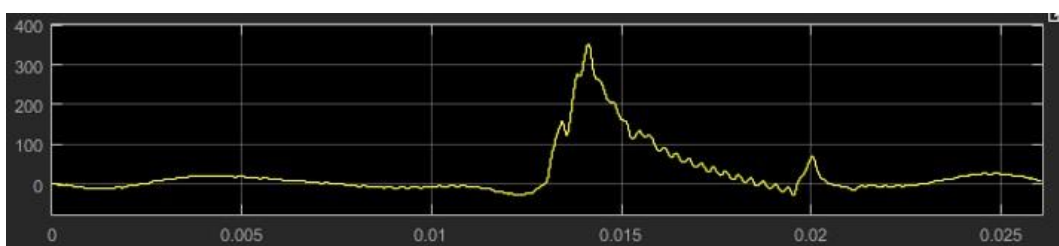


Figura 57: Binário resultante à 4600 RPM no fim do processo de otimização, tensão aplicada de 400V.

Deste processo aplicado às diferentes faixas de rotação foi então escolhido o melhor valor de tensão para cada faixa; daí resultou a curva de tendência da Figura 58.

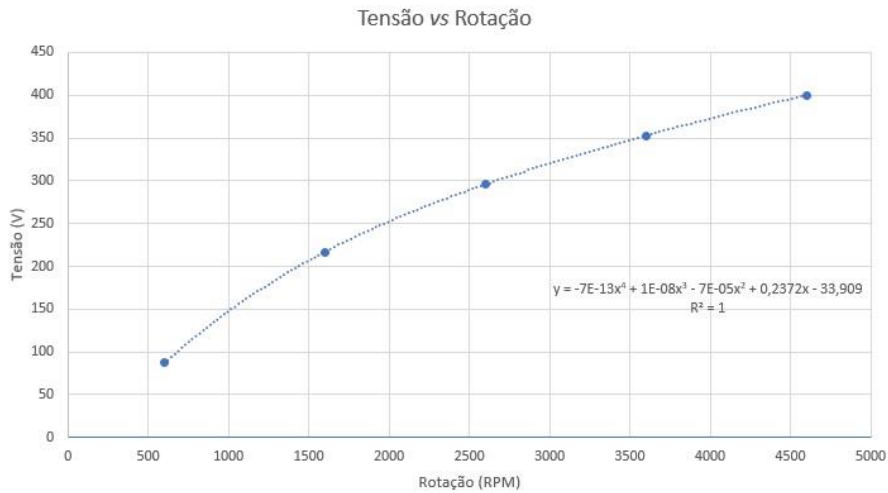


Figura 58: Curva da tensão em função da rotação, repetida da Figura 30.

### 5.3. Ângulo de funcionamento enquanto gerador

Este processo de otimização foi realizado com o intuito de avaliar se a variação do ângulo de funcionamento enquanto gerador iria trazer melhores resultados em termos de binário médio da máquina elétrica e em termos do desvio padrão do binário resultante.

À semelhança dos procedimentos anteriores, foram realizadas varias iterações variando o ângulo de funcionamento enquanto gerador, partindo dos  $180^\circ$  que corresponde ao ângulo máximo que a máquina elétrica pode operar enquanto gerador, e diminuindo esse valor uma unidade em cada iteração até que os valores obtidos ficassem fora do pretendido. Este processo de otimização foi já realizado tendo em conta a curva de tensão obtida no processo anterior.

Tabela 12: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 600 RPM.

Ângulo	Binário médio da máquina elétrica
$180^\circ$	-0.129 N.m
$179^\circ$	-0.113 N.m
$178^\circ$	0.103 N.m

Tabela 13: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 1600 RPM.

Ângulo	Binário médio da máquina elétrica
180°	-0.090 N.m
179°	-0.536 N.m
178°	-0.553 N.m
177°	0.024 N.m

Tabela 14: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 2600 RPM.

Ângulo	Binário médio da máquina elétrica
180°	-0.006 N.m
179°	-0.208 N.m
178°	-0.191 N.m
177°	0.090 N.m

Tabela 15: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 3600 RPM.

Ângulo	Binário médio da máquina elétrica
180°	-0.006 N.m
179°	-0.076 N.m
178°	-0.048 N.m
177°	0.084 N.m

Tabela 16: Iterações realizadas para determinar o ângulo de funcionamento enquanto gerador, para as 4600 RPM.

Ângulo	Binário médio da máquina elétrica
180°	-0.043 N.m
179°	-0.061 N.m
178°	-0.030 N.m
177°	0.026 N.m

Após a realização deste processo foi observável que na maioria das faixas de rotação, o ângulo que nos dá um valor de binário da máquina elétrica mais próximo de 0 é o ângulo de 180°. Nas exceções em que o ângulo que o binário da máquina elétrica é mais próximo de 0 não é de 180°, os ganhos são muito poucos, que não justifica a implementação de um sistema

de variação do ângulo em função da rotação, uma vez que isso iria implicar erros e perdas que por certo superariam os baixos ganhos obtidos.

## 6. Resultados obtidos

### 6.1. Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos após todos os processos de otimização realizados anteriormente serão apresentados por faixa de rotação. Posteriormente será apresentado o gráfico com a evolução da correção do desvio padrão do binário do motor de combustão em função das faixas de rotação analisadas.

O desvio padrão mede a dispersão dos valores individuais em torno da média, ou seja, um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média por outro lado, um alto desvio padrão indica que os dados estão mais distantes da média de valores. Ao analisarmos os valores do binário se tivermos em consideração o desvio padrão dos valores obtidos podemos perceber a dispersão e por consequência as irregularidades presentes no binário do motor.

Vão ser apresentados os valores obtidos para o desvio padrão do binário resultante da soma do binário da máquina elétrica com o do motor de combustão, do binário da máquina elétrica e do binário do motor de combustão. As principais conclusões vão ser tiradas da comparação deste último com o binário resultante da soma da soma do binário da máquina elétrica com o motor de combustão. Vão ainda ser apresentados valores para o binário médio da máquina elétrica e motor de combustão.

O tempo de simulação foi sempre ajustado em função da velocidade do rotação do sistema, isto para que cada simulação realiza-se os 720° de rotação necessários para completar um ciclo do motor de combustão completo.

Tabela 17: Resultados obtidos para as 600 RPM, tempo de simulação 0.2 s.

Desvio padrão resultante SD_T21_Te	57 N.m
Desvio padrão máquina elétrica SD_Te	45 N.m
Desvio padrão motor de combustão SD_T21	76 N.m
Binário médio resultante M_T21_Te	26 N.m
Binário médio máquina elétrica M_Te	0 N.m
Binário médio motor de combustão M_T21	26 N.m
Potência motor de combustão P_T21	1626 W

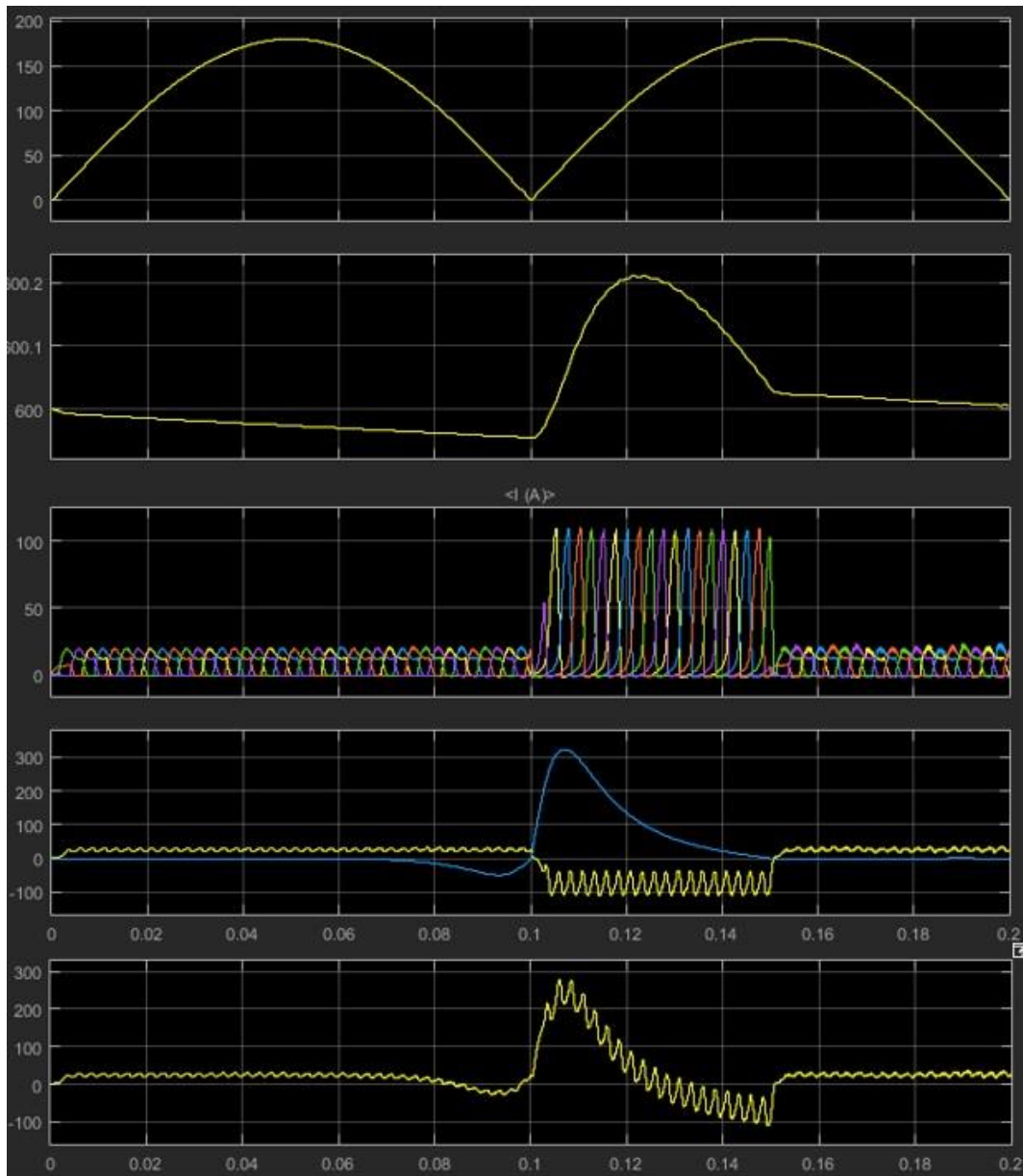


Figura 59: Resultados obtidos para as 600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (A), binário da máquina elétrica (amarelo) e do motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).

Tabela 18: Resultados obtidos para as 1600 RPM, tempo de simulação 0.075 s.

Desvio padrão resultante SD_T21_Te	55 N.m
Desvio padrão máquina elétrica SD_Te	44 N.m
Desvio padrão motor de combustão SD_T21	75 N.m
Binário médio resultante M_T21_Te	26 N.m
Binário médio máquina elétrica M_Te	0 N.m
Binário médio motor de combustão M_T21	26 N.m
Potência motor de combustão P_T21	4338 W

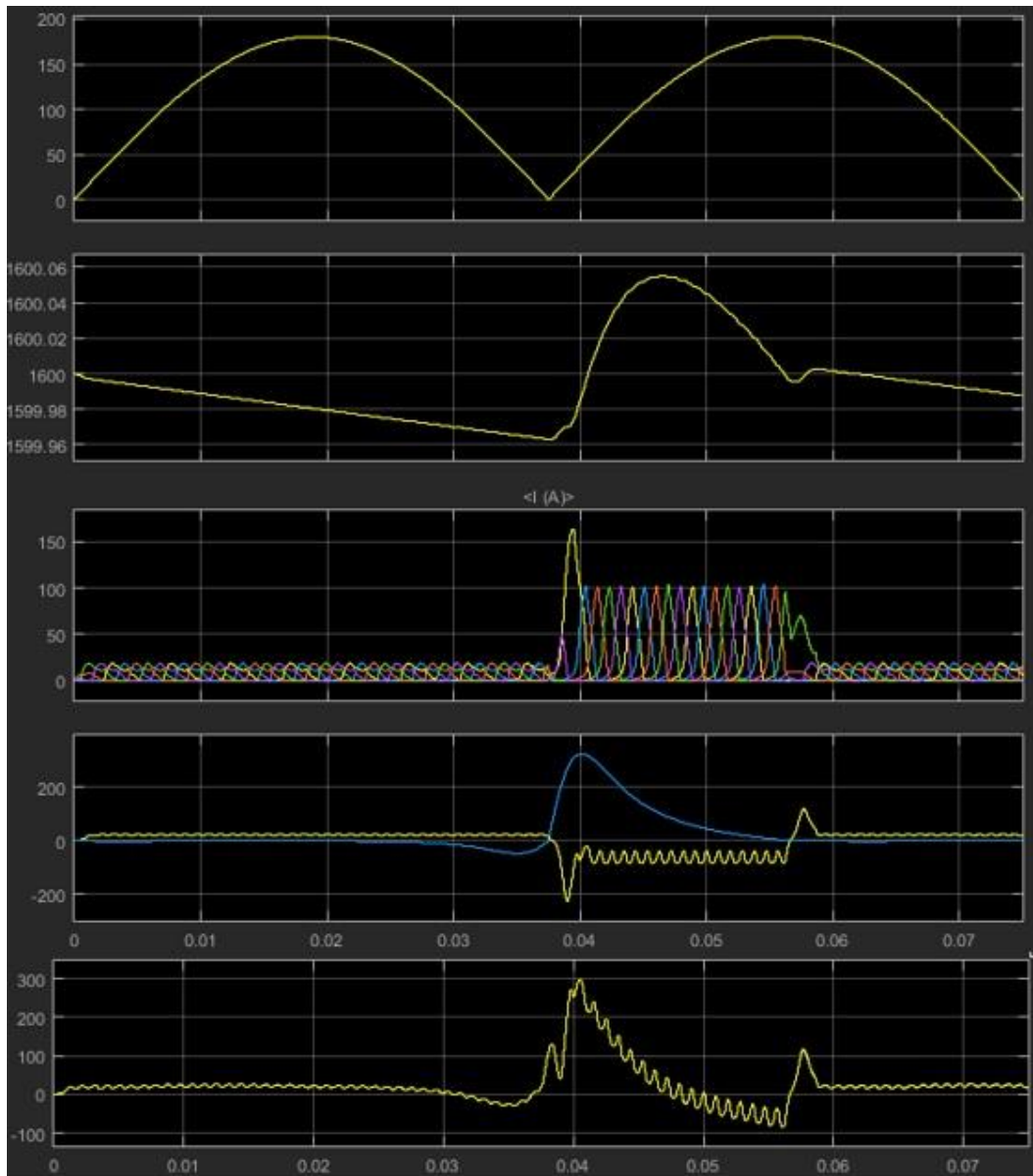


Figura 60: Resultados obtidos para as 1600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (A), binário da máquina elétrica (amarelo) e do motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).

Tabela 19: Resultados obtidos para as 2600 RPM, tempo de simulação 0.046154 s.

Desvio padrão resultante SD_T21_Te	60 N.m
Desvio padrão máquina elétrica SD_Te	31 N.m
Desvio padrão motor de combustão SD_T21	75 N.m
Binário médio resultante M_T21_Te	26 N.m
Binário médio máquina elétrica M_Te	0 N.m
Binário médio motor de combustão M_T21	26 N.m
Potência motor de combustão P_T21	7049 W

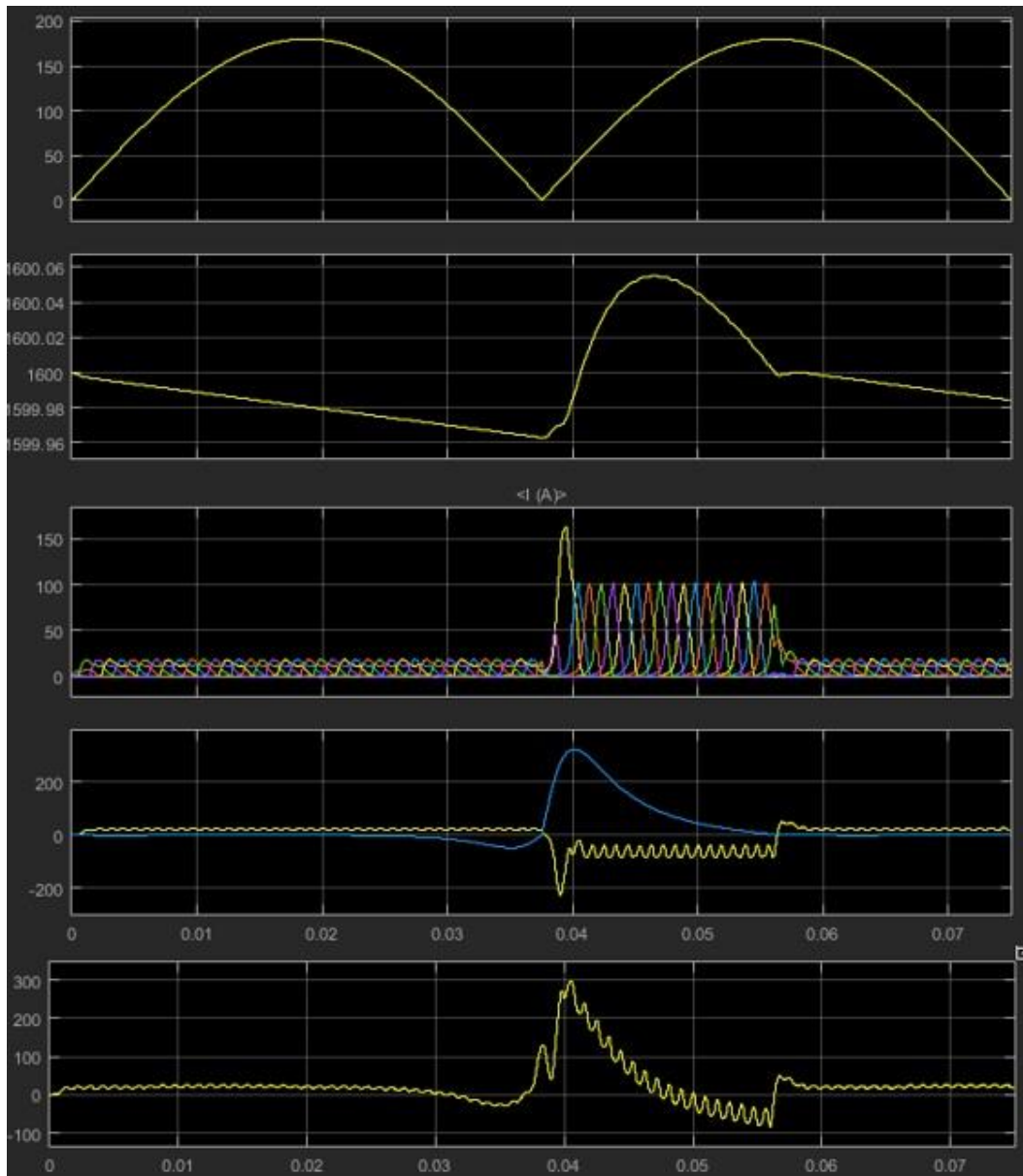


Figura 61: Resultados obtidos para as 2600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (A), binário da máquina elétrica (amarelo) e do motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).

Tabela 20: Resultados obtidos para as 3600 RPM, tempo de simulação 0.03333 s.

Desvio padrão resultante SD_T21_Te	62 N.m
Desvio padrão máquina elétrica SD_Te	24 N.m
Desvio padrão motor de combustão SD_T21	74 N.m
Binário médio resultante M_T21_Te	26 N.m
Binário médio máquina elétrica M_Te	0 N.m
Binário médio motor de combustão M_T21	26 N.m
Potência motor de combustão P_T21	9761 W

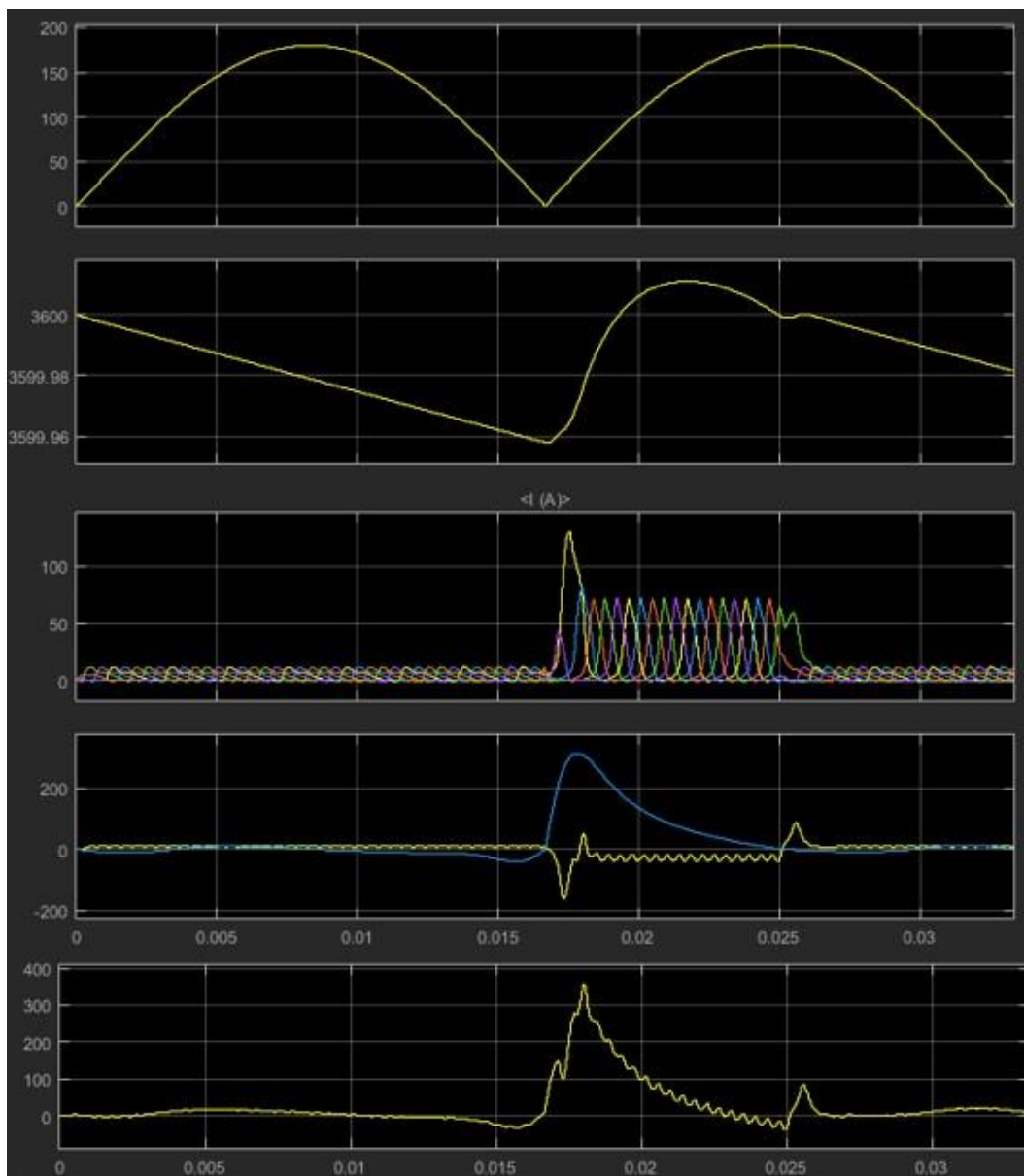


Figura 62: Resultados obtidos para as 3600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (A), binário da máquina elétrica (amarelo) e do motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).

Tabela 21: Resultados obtidos para as 4600 RPM, tempo de simulação 0.026087 s.

Desvio padrão resultante SD_T21_Te	64 N.m
Desvio padrão máquina elétrica SD_Te	19 N.m
Desvio padrão motor de combustão SD_T21	73 N.m
Binário médio resultante M_T21_Te	26 N.m
Binário médio máquina elétrica M_Te	0 N.m
Binário médio motor de combustão M_T21	26 N.m
Potência motor de combustão P_T21	12470 W

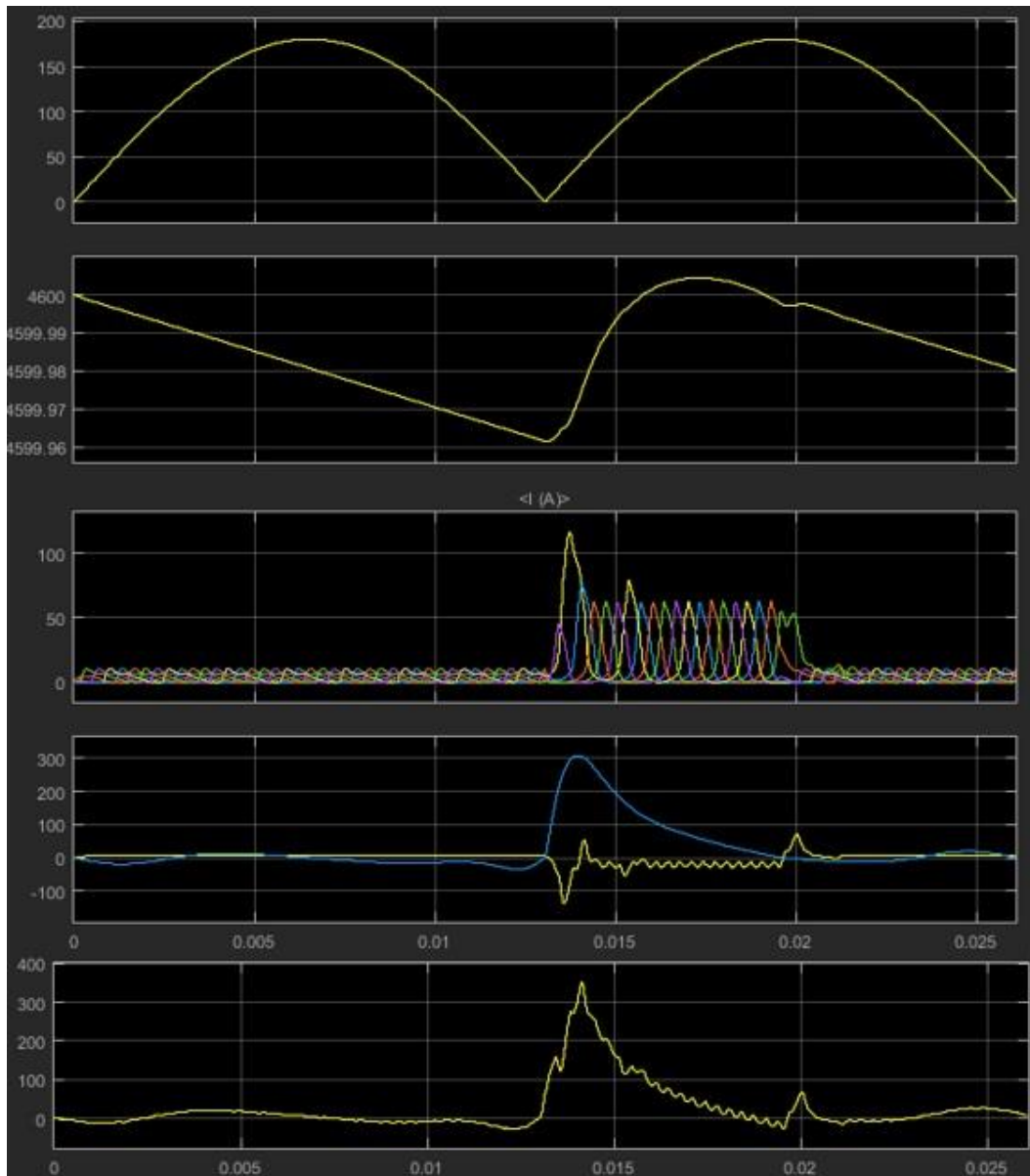


Figura 63: Resultados obtidos para as 4600 RPM, por esta ordem: Posição da cambota (graus), Velocidade rotação (RPM), Corrente nas fases (A), binário da máquina elétrica (amarelo) e do motor de combustão (azul) (N.m), Binário resultante (N.m).

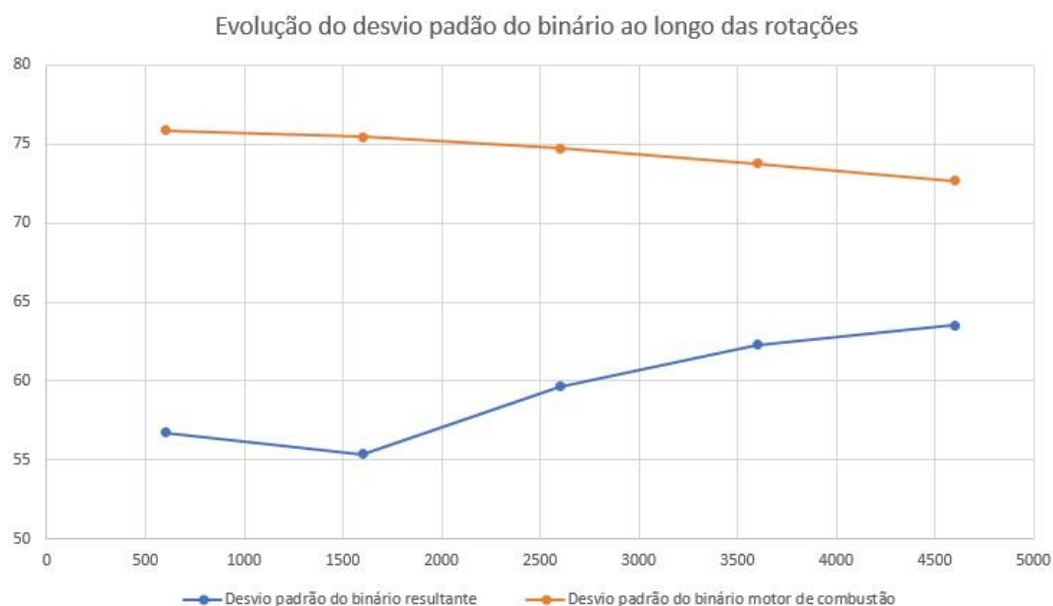


Figura 64: Evolução do desvio padrão ao longo das rotações.

## 6.2. Discussão dos resultados

O desvio-padrão do binário resultante em relação ao binário do motor de combustão revela melhorias em todas as faixas de rotação e que são mais significativas nas rotações mais baixas, sendo que em alguns casos como é possível de verificar na Figura 64, existem melhorias na ordem dos 20 N.m. Esta progressividade da máquina em relação ao motor de combustão, foi realizada tendo em atenção o facto de, com ao aumento da rotação o motor de combustão, ir perdendo a necessidade de ajuda para colmatar os tempos em que não produz binário.

Outro ponto importante reside no facto de ter sido conseguido manter o binário médio ligeiramente inferior a 0 N.m, pois isto implica um balanço energético nulo entre a energia produzida enquanto gerador e a consumida enquanto motor, o que também era de todo desejável uma vez que o objetivo passava por anular o volante de inércia e não gerar energia a mais do que a necessária pois isso implicaria um redução do binário disponível à saída do motor de combustão e um binário com um valor de desvio padrão maior, logo, mais irregular.

O binário médio do motor de combustão também ele foi mantido sem alterações de relevo, isto vem cumprir o objetivo inicial uma vez que o pretendido era corrigir este e não realizar alterações ao seu valor médio os resultados vem mais uma vez de encontro com o pretendido.



# 7. Conclusões e trabalhos futuros

## 7.1. Conclusões

Após a realização de uma extensa pesquisa e análise bibliográfica foi possível reunir informações que permitem afirmar que não existe nenhum trabalho documentado que pretenda implementar algum sistema com semelhanças funcionais as do sistema implementado.

Da pesquisa realizada foi ainda observável que um sistema como o proposto viria colmatar algumas falhas em tecnologias em desenvolvimento e desencadear uma serie de avanços necessários para que novas tecnologias possam surgir. Este tipo de sistema insere-se nas linhas de desenvolvimento que os maiores fabricantes de motores de combustão tendem a seguir por via a tornar os meios de transporte cada vez mais eficientes e ecológicos.

A opção pela construção da simulação demonstrou ser uma mais valia para o futuro desenvolvimento do projeto, uma vez que permitiu poupar imensos recursos que poderiam a vir ser desperdiçados caso a viabilidade da ideia deste sistema não se verificasse.

Toda a simulação correu como o esperado, o facto de esta ser realizada com recurso a curvas de magnetização obtidas por meio de elementos finitos, veio trazer mais sustentação a toda a simulação uma vez que uma das principais dúvidas seria o comportamento da máquina elétrica na sua comutação de motor para gerador. Por outro lado, o facto de o motor de combustão estar modelado com recurso a ciclos teóricos deixa antever que possam existir melhorias em termos de resultados, existem ainda um numero infindável de variações e conjugações de fatores que poderiam ser realizadas de modo a procurar melhores resultados, mas que nos desviariam do principal objetivo deste trabalho que era verificar a viabilidade deste sistema.

Com este trabalho foi possível cumprir os objetivos propostos, pois os resultados apontam para que o sistema inicialmente proposto seja viável, o que dá boas indicações na continuação do estudo e desenvolvimento deste mesmo sistema.

## 7.2. Trabalhos futuros

Verificada a viabilidade do sistema os trabalhos futuros prendem-se com a continuação do seu desenvolvimento. Estes trabalhos passam pela modelação de uma máquina elétrica especialmente desenvolvida para a aplicação pretendida, modelação e simulação de um motor de combustão com base em ciclos reais, análise e simulação dos tempos de resposta dos controladores e análise dos fatores de fadiga que possam afetar o sistema.

# Bibliografia

1. Martins J. Motores de Combustão Interna. 4ª Edição. Porto: Publindústria; 2013.
2. Mastrangelo G, Micelli D, Sacco D. Extreme Downsizing by the two-cylinder gasoline engine from fiat. ATZautotechnology. 2011;11(1):18-25.
3. Benson KW, Fraser DA, Hatridge SL, Monaco CA, Ring RJ, Sullivan CR, et al. The hybridization of a formula race car. 2005 IEEE Veh Power Propuls Conf VPPC. 2005;2005:1-5.
4. Chan CC. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. 2002;90(2).
5. Walker A, Anpalahan P, Colest P, Lampkrth M, Rodger D. AutQmQtive Integrated Starter Generator. 2004;3-5.
6. Ganesan V. Internal Combustion Engines. Third Edit. New Delhi: Tata McGraw Hill; 2002.
7. Heywood JB. Internal Combustion Engines Fundamentals. First Edit. New York: McGraw Hill Education; 1988.
8. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. Third Edit. London: Macmillan Press; 1999.
9. Blair GP. Design and Simulation of Four-Stroke Engines. First Edit. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.; 1999.
10. Shigley JE, Uicker JJ. Theory of Machines and Mechanisms. Internatio. Singapore: McGraw Hill Education; 1981.
11. Blair GP. Design and Simulation of Two-Stroke Engines. First Edit. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.; 1996.
12. Budynas RG, Nisbett JK. Shigley's Mechanical Engineering Design. Tenth Edit. New Delhi: McGraw Hill Education; 2016.
13. Francisco A. Motores Eléctricos. 5ª Edição. Lisboa: LIDEL; 2013.
14. Sen PC. Principles of Eletric Machines and Power Eletronics. Second Edi. Singapore: Wiley; 2005.

15. Chapman S. Electric Machinery Fundamentals. 5th Editio. New York: McGraw Hill Education; 2012.
16. Lawrenson PJ, Sc D, Fel IEEE, Eng C, Stephenson JM. Variable-speed switched reluctance motors. 1980;127(4):253-65.
17. Radun A. Generating with the switched reluctance motor. Proc 1994 IEEE Appl Power Electron Conf Expo - ASPEC'94. 1994;41-7.
18. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. First Edit. New York: CRC Press; 2000.
19. Arifin A. State of the Art of Switched Reluctance Generator. Energy Power Eng. 2012;4(6):447-58.
20. Husain I, Radun A, Member S, Nairus J. Switched Reluctance Generators. 2002;17(1):67-72.
21. Nassereddine M, Rizk J, Nagrial M. Switched Reluctance Generator for Wind Power Applications. World Acad Sci Eng Technol. 2008;2(5):103-7.
22. Le-Huy H, Brunelle P. A versatile nonlinear switched reluctance motor model in simulink using realistic and analytical magnetization characteristics. IECON Proc (Industrial Electron Conf. 2005;2005(c):1556-61.
23. Torrey DA. Analytical modelling of variable-reluctance machine magnetisation characteristics. IEE Proc - Electr Power Appl. 1995;142(1):14.
24. Le-Huy H. Modeling and simulation of a switched reluctance generator for aircraft power systems. Electr Syst Aircraft, Railw Sh Propulsion, ESARS. 2015;2015-May:5-10.
25. Kioskeridis I, Mademlis C. Optimal efficiency control of switched reluctance generators. IEEE Trans Power Electron. 2006;21(4):1062-72.
26. Ehsan H, Sharma VK, Chandra A, Al K. Determination of optimum switching angles for speed control of switched reluctance motor drive system. 2004;11(June):151-68.

# Anexos

Anexo 1: *Layout* da simulação.

Anexo 2: Função *Comand\_Motor\_Generator*.

Anexo 3: Subsistema *Converter*.

Anexo 4: Subsistema *BR\_CONV1*.

Anexo 5: Subsistema *Voltage\_Regulator*.

Anexo 6: Subsistema *Position\_Sensor*.

Anexo 7: Subsistema *Switched\_Reluctance\_Motor\_Generator*.

Anexo 8: Subsistema *Model*.

Anexo 9: Subsistemas *Statistics*.

Anexo 10: Subsistema *Single\_Cylinder\_Four\_Stroke\_Engine*.

Anexo 11: Subsistema *Input\_1<sup>a</sup> & 2<sup>a</sup>*.

Anexo 12: Função *Positon\_Angle*.

Anexo 13: Subsistema *Forces*.

Anexo 14: Função *Friction\_Forces*.

Anexo 15: Função *Piston\_Mass\_Strength*.

Anexo 16: Função *Cylinder\_Pressure*.

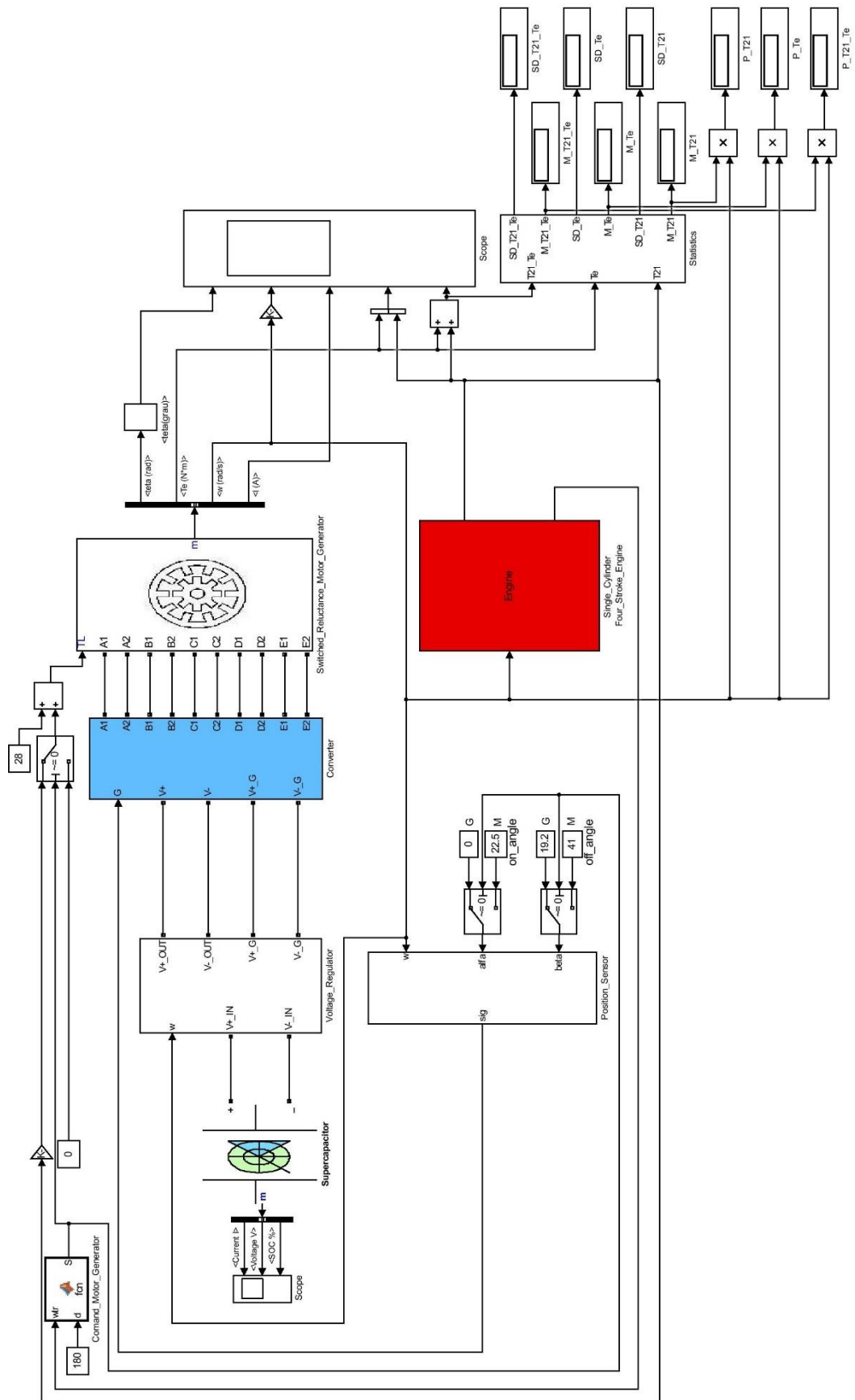
Anexo 17: Função *Torque*.

Anexo 18: Subsistema *Piston\_Position*.

Anexo 19: Subsistema *Cylinder\_Volume*.

Anexo 20: Função  $X(\textit{Piston\_Position})$ .

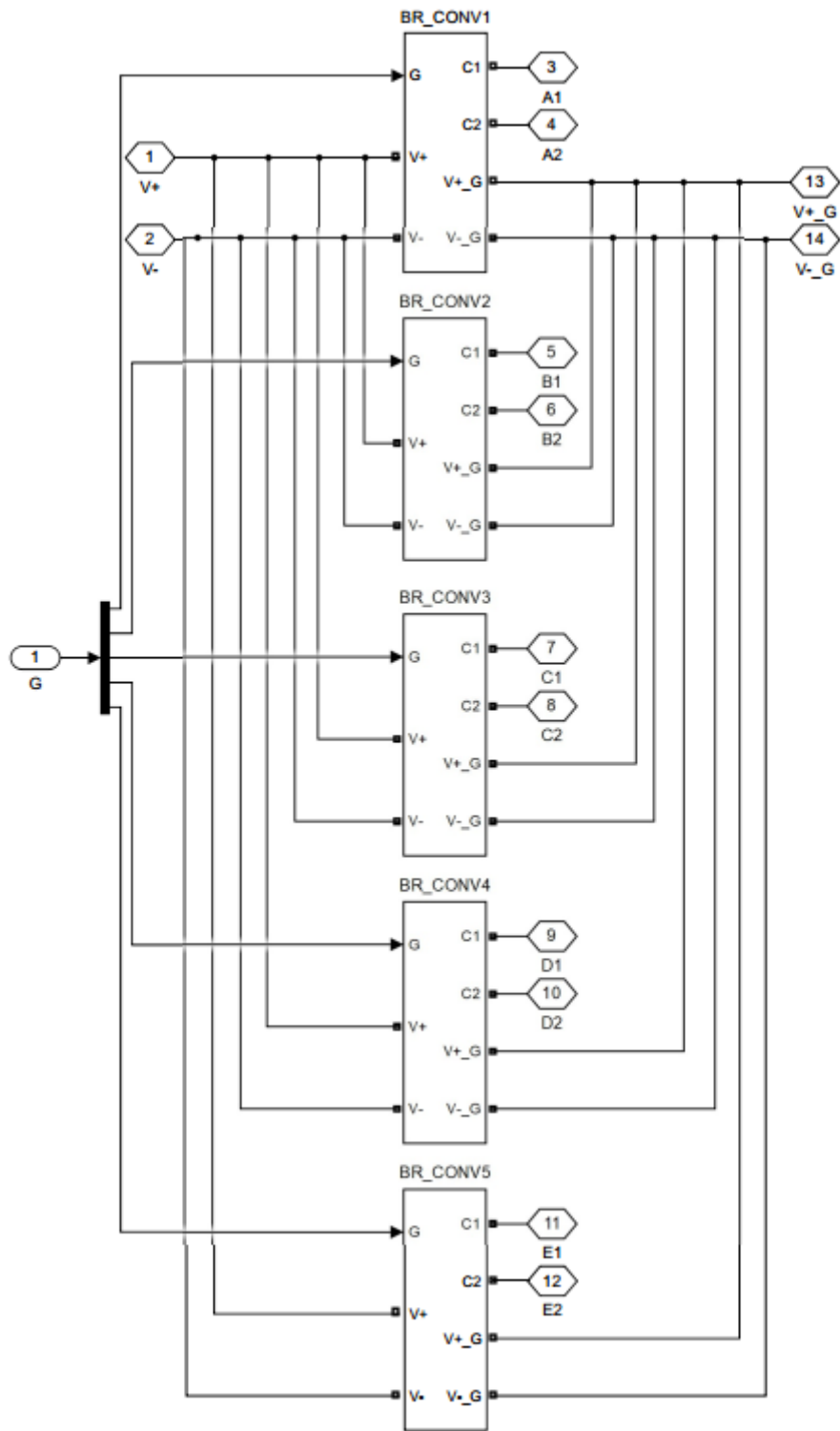




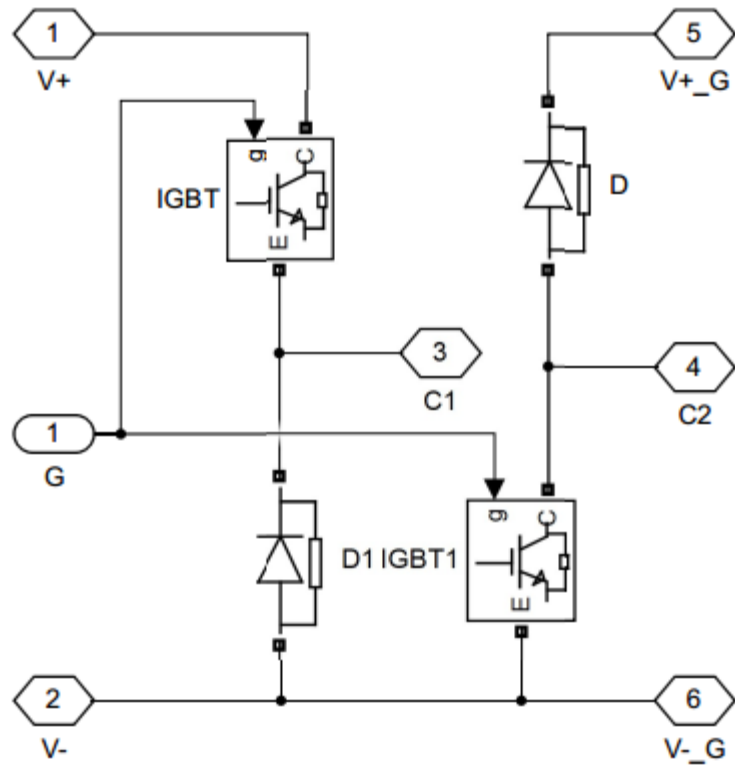
Anexo 1: *Layout* da simulação.

```
function S = fcn(wtr,d)
z = 2*asin(sin(wtr/2));
if cos(wtr/2) <= 0
    k = pi - z ;
else
    k = z ;
end
if k >= pi && k <= pi + d*(pi/180)
    S = 1 ;
else
    S = 0 ;
end
```

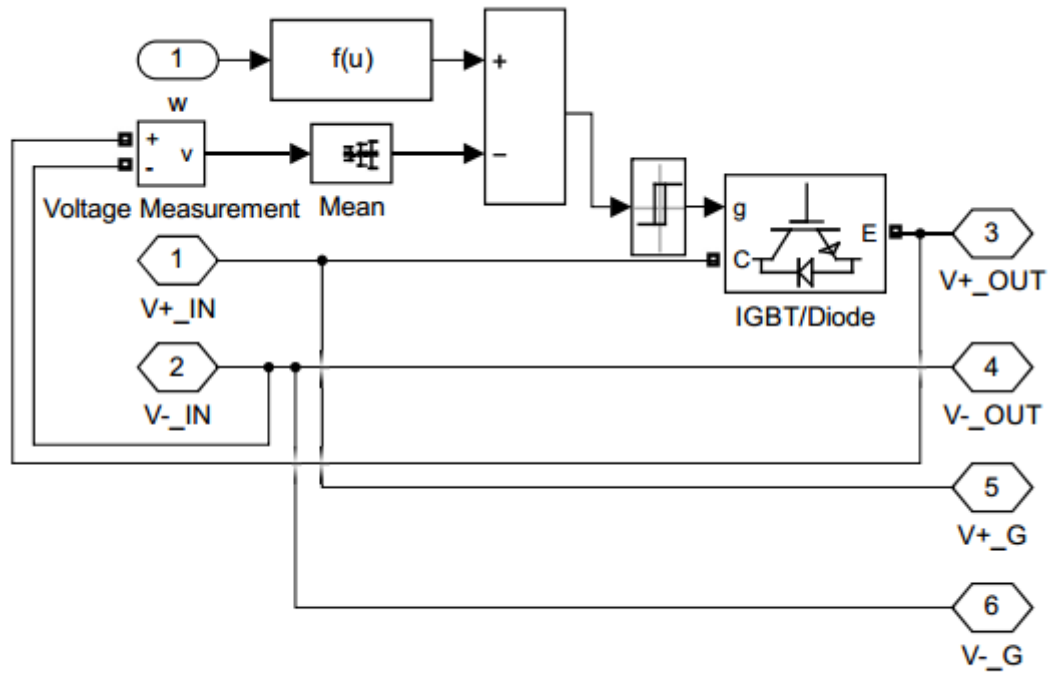
Anexo 2: Função *Comand\_Motor\_Generator*.



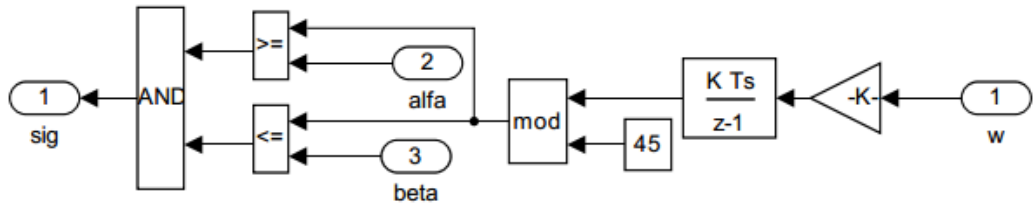
Anexo 3: Subsistema Converter.



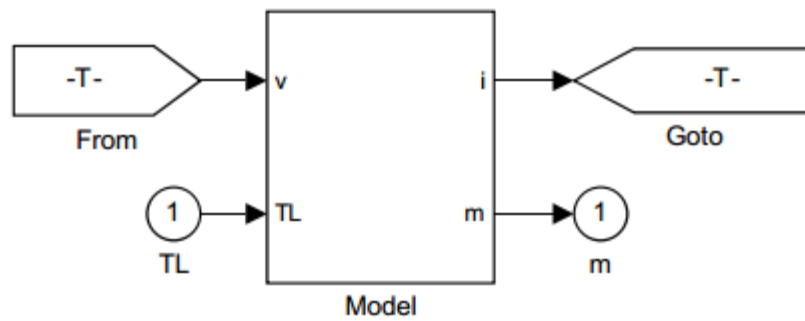
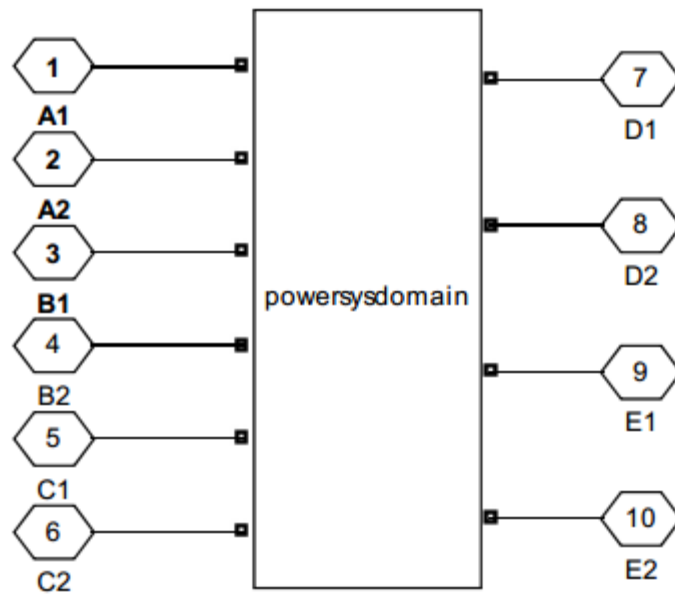
Anexo 4: Subsistema BR\_CONV1.



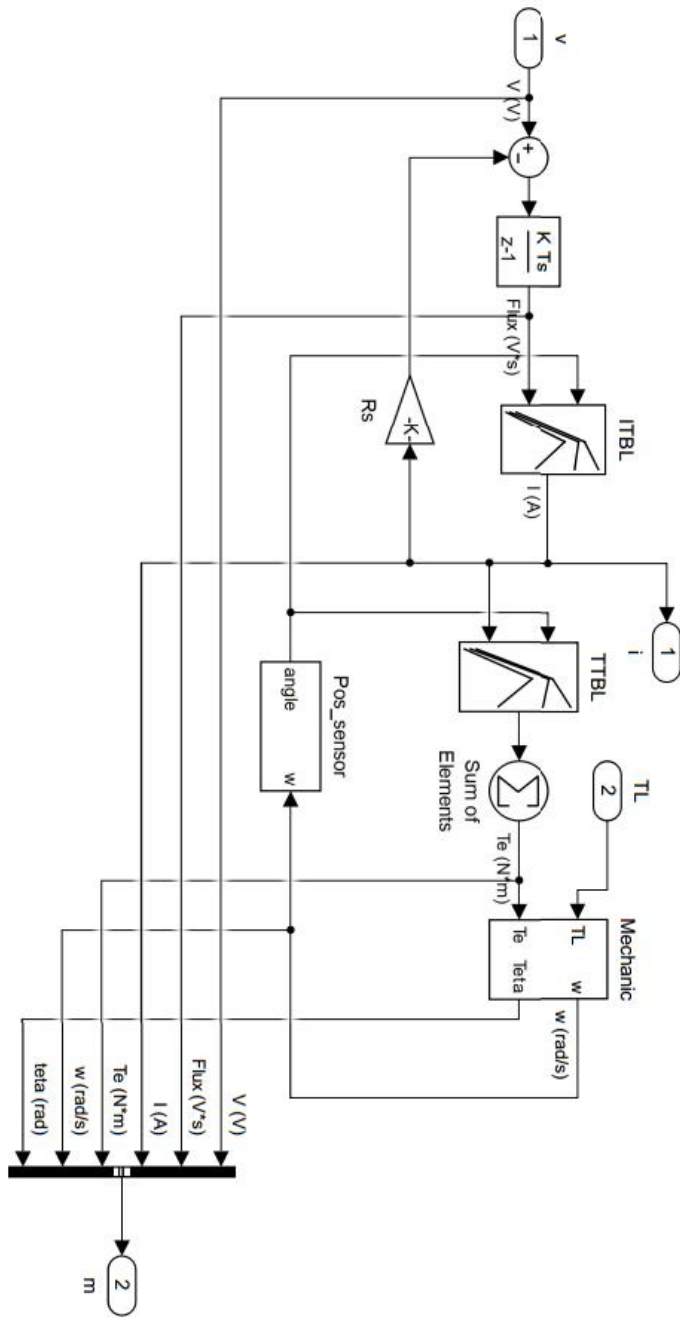
Anexo 5: Subsistema *Voltage\_Regulator*.



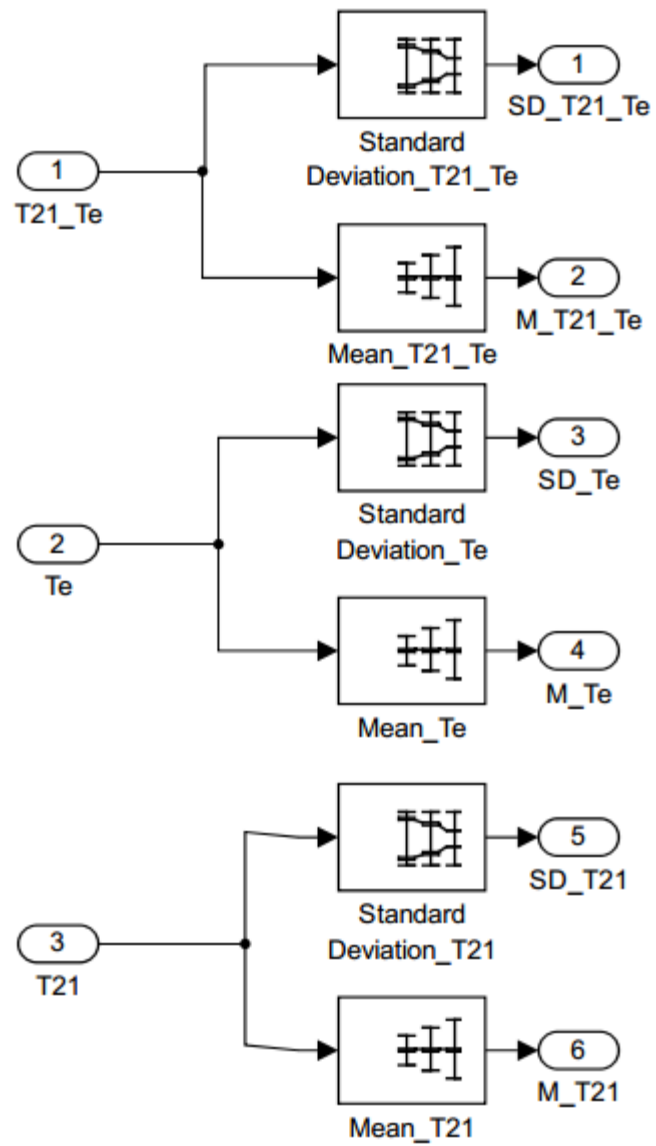
Anexo 6: Subsistema *Position\_Sensor*.



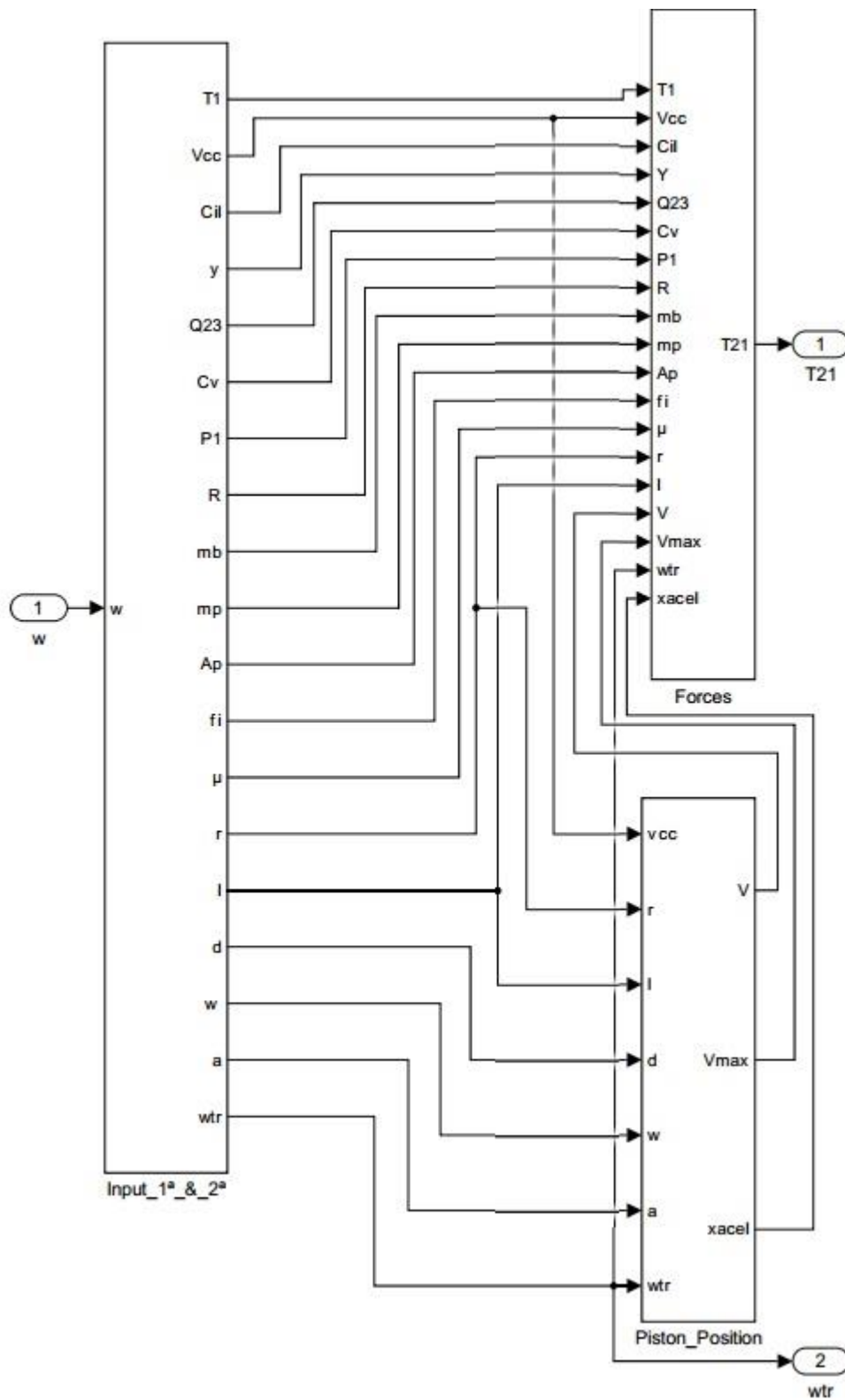
Anexo 7: Subistema *Switched\_Reluctance\_Motor\_Generator*.



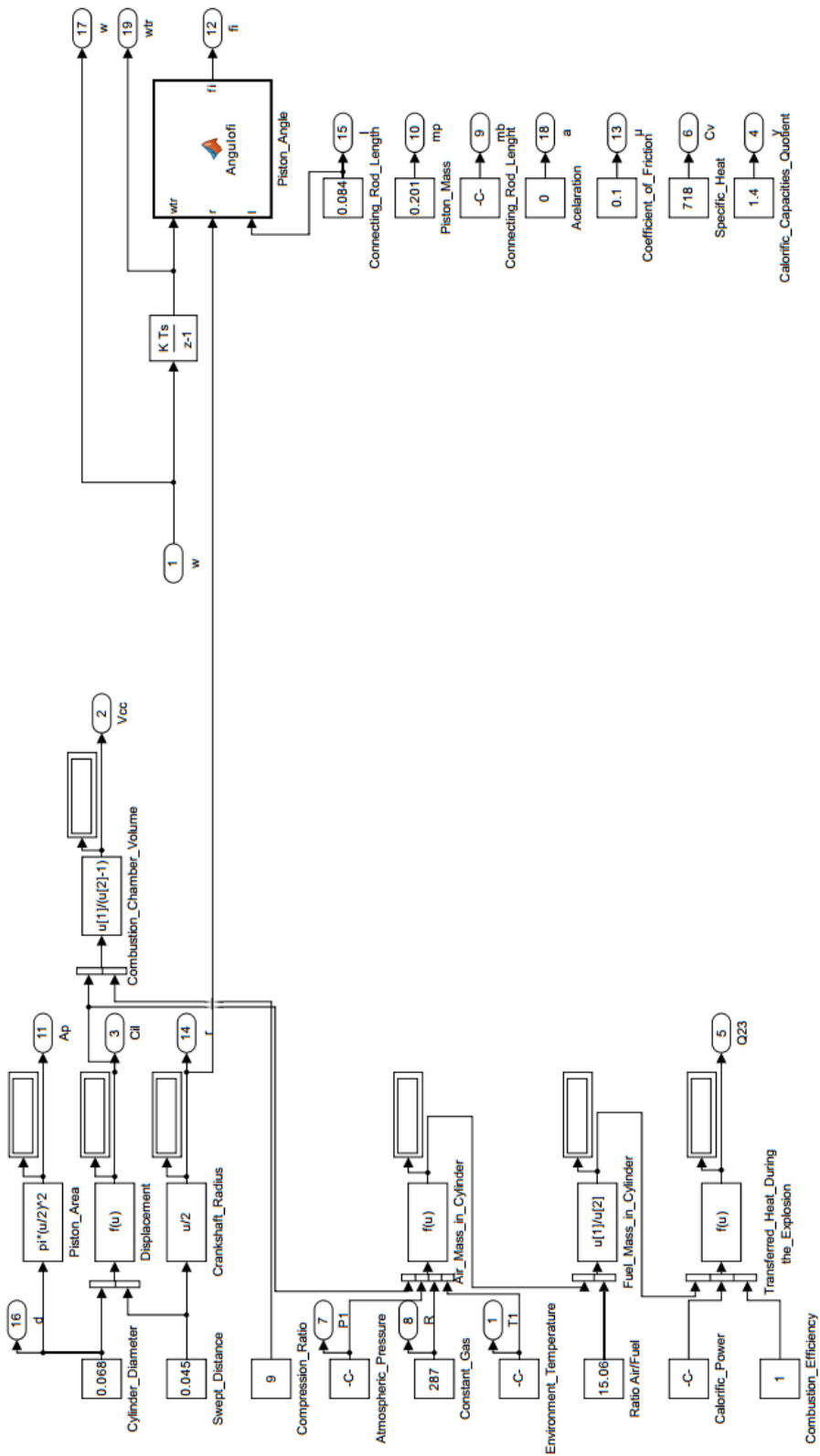
Anexo 8: Subsistema *Model*.



Anexo 9: Subsistemas *Statistics*.



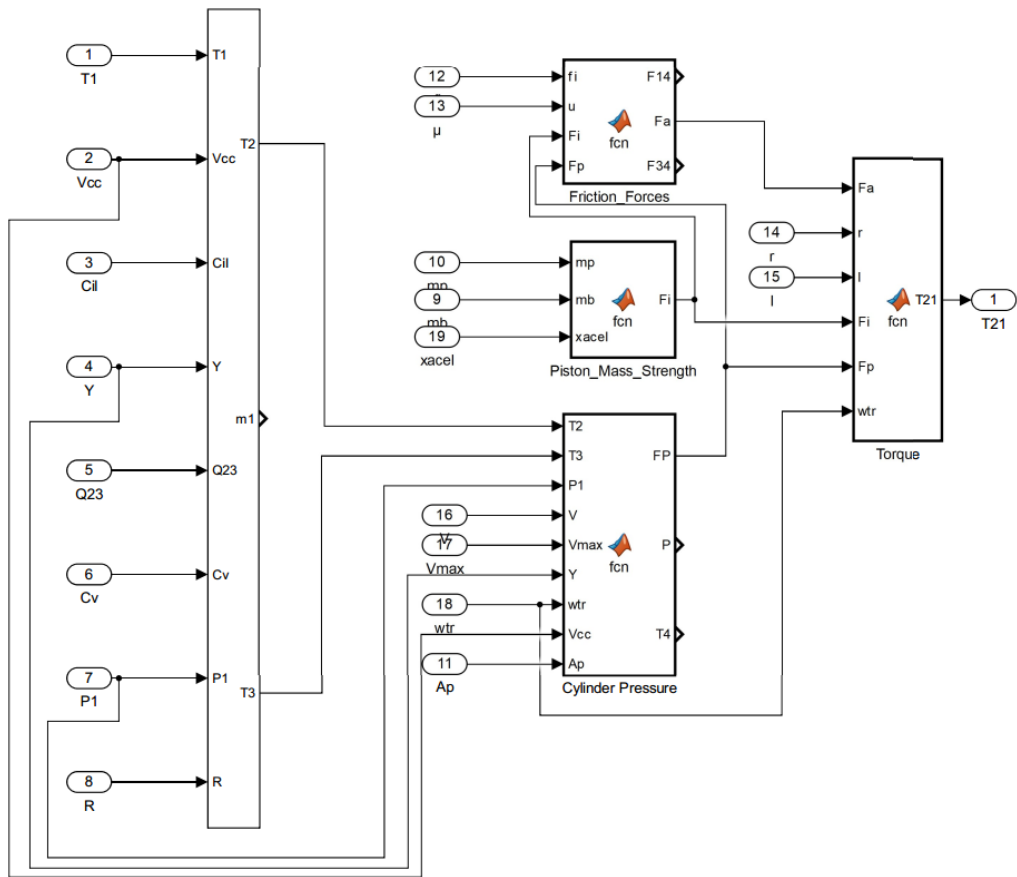
Anexo 10: Subsistema *Single\_Cylinder\_Four\_Stroke\_Engine*.



Anexo 11: Subistema *Input\_1<sup>a</sup> & 2<sup>a</sup>*.

```
function fi = Angulofi (wtr, r, l)
fi = asin((r*sin(wtr))/l);
```

Anexo 12: Função *Positon\_Angle*.



Anexo 13: Subsistema Forces.

```
function [F14,Fa,F34]= fcn(fi,u,Fi,Fp)
F14 = (Fi+Fp)*tan(fi)
Fa = -(abs(F14*u))
F34 = (Fi+Fp)/cos(fi)
```

Anexo 14: Função *Friction\_Forces*.

```
function Fi = fcn(mp,mb,xacel)
Fi = (mp+mb)*xacel
```

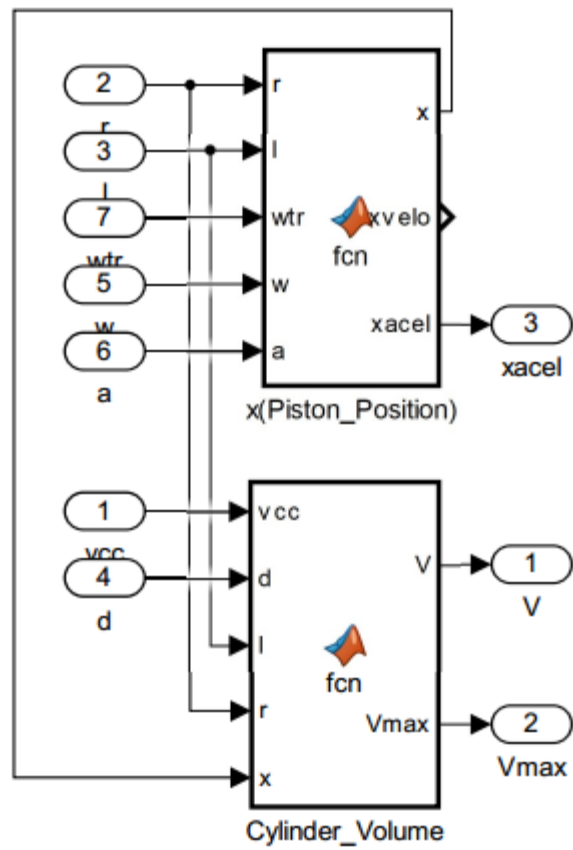
Anexo 15: Função *Piston\_Mass\_Strength*.

```
function [FP,P,T4] = fcn(T2,T3,P1,V,Vmax,Y,wtr,Vcc,Ap)
    Pcmx = P1*(Vcc/Vmax)^(-Y);
    P3 = Pcmx*(T3/T2);
    if sin(wtr)<=0 && sin(wtr/2)>=0
        P = P1*(V/Vmax)^(-Y);
        T4 = 0;
    elseif sin(wtr)>=0 && sin(wtr/2)<=0
        P = P3*(V/Vcc)^(-Y);
        T4 = T3*(V/Vcc)^(1-Y);
    else
        P = 101000;
        T4 = 0;
    end
    FP = (P-P1)*Ap;
end
```

Anexo 16: Função *Cylinder\_Pressure*.

```
function T21 = fcn(Fa,r,l,Fi,Fp,wtr)
T21 = (Fi+Fp+Fa)*r*sin(wtr)*(1+(r/l)*cos(wtr))
```

Anexo 17: Função *Torque*.



Anexo 18: Subistema *Piston\_Position*.

```
function [V,Vmax] = fcn(vcc,d,l,r,x)
V = vcc+(pi*d^2)/4*(1+r-x);
a = 1-((r^2)/(4*l))+r*(cos(pi)+((r)/(4*l))*cos(2*pi));
Vmax = vcc+(pi*d^2)/4*(1+r-a);
end
```

Anexo 19: Subsistema *Cylinder\_Volume*.

```
function [x,xvelo,xacel] = fcn(r,l,wtr,w,a)
x = 1-((r^2)/(4*l))+r*(cos(wtr)+((r)/(4*l))*cos(2*wtr));
xvelo = -r*w*(sin(wtr)+(r/(2*l))*sin(2*wtr));
xacel = -r*a*(sin(wtr)+(r/(2*l))*sin(2*wtr))-r*w^2*(cos(wtr)+(r/l)*cos(2*wtr));
end
```

Anexo 20: Função X(*Piston\_Position*).