



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Simulação de desempenho de um motor de quatro tempos de ignição por faísca

Filipe Carvalho Andrade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Covilhã, outubro de 2015

Dedicatória

Aos meus pais, ao meu irmão e a todos os meus familiares,
que sempre acreditaram em mim,
e sempre me apoiaram em qualquer situação.

Faço também uma referência ao meu avô, Fernando Carvalho,
que certamente iria desfrutar deste trabalho,
dado que esta é uma área pela qual nutria um gosto especial.

Agradecimentos

Aos meus pais que desde tenra idade me proporcionaram todos os *ingredientes* necessários para que me formasse, enquanto pessoa e profissional. Pela possibilidade de ter conseguido seguir o ensino superior, pela dedicação diária, pelo valor da persistência, paciência, dedicação e paixão por aquilo que nos move. Pela formação pessoal, mas também académica. “O que é fácil, não é para ti” – sempre disseram os meus pais.

Ao meu irmão, pela paciência e companheirismo ao longo desta caminhada, que também é a dele.

A toda a minha família, desde aos meus avós até aos meus primos, por tudo aquilo que fizeram por mim.

Ao meu orientador, Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, pela sua disponibilidade, supervisão e paciência, dada a minha natureza perfeccionista para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos pela paciência, sugestões, mas também vivências que tornaram este percurso único.

À Universidade da Beira Interior, corpo docente, companheiros e funcionários, pela simpatia e disponibilidade, mas também formação pessoal e profissional.

Aos meus antigos companheiros, treinadores, departamentos médicos, roupeiros, seccionistas e responsáveis do *staff*, com quem pude viver e conviver ao longo da minha formação desportiva na modalidade de futebol 11. Por me terem transmitido ensinamentos, além dos desportivos, também os humanos e relacionais, sem os quais jamais seria a pessoa que sou hoje. “O jogo pode não te estar a correr de feição, podes estar a falhar um *passe* ou outro, mas a tua garra tem que lá estar sempre.” Ouvi eu dizer.

Aos meus antigos companheiros de turma, professores e funcionários, quer desde a escola preparatória e primária na Suíça, quer depois e já em Portugal desde o meu 2º ano até ao meu 12º que contribuíram para a minha formação académica mas também pessoal. Jamais serão esquecidos.

A todos aqueles que estiveram comigo e que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

O meu muito obrigado a todos.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência da variação de três parâmetros no desempenho de um motor de combustão interna de quatro tempos de ignição por faísca de pequena cilindrada, de forma a verificar, se seria viável, a utilização do mesmo num UAV.

Na realização do presente estudo, foram realizadas medições e cálculos que foram utilizadas nos programas de simulação Cam Analyzer, Engine Analyzer, ambos pertencentes à Performance Trends® e posteriormente para análise de dados o Microsoft Excel pertencente à Microsoft Corporation® que permitiu estimar as curvas características do motor original e do motor com modificações feitas às árvores de cames, diâmetro do cilindro e o curso do pistão.

Com os resultados das simulações obtidas, foi possível constatar que é possível, realmente, melhorar o desempenho do motor, alterando as árvores de cames, diâmetro do cilindro e o curso do pistão. Convém no entanto referir que é de extrema importância saber o regime de operação para o qual a aeronave será concebida a fim de saber qual a gama de regimes de funcionamento que terá que ser otimizada.

Não podemos no entanto esquecer, que nos resultados obtidos não constam de um eventual incremento de material que pode tornar o motor mais pesado, bem como parte das perdas térmicas, visto que nos programas utilizados para a simulação, estas são demasiado simplificadas. Considera-se por isso importante que mais estudos do género sejam desenvolvidos para averiguar de uma forma mais completa o real desempenho do motor, dadas as alterações dos parâmetros modificados, por forma a poder comprovar a relação peso / potência do motor.

Palavras-chave

Motor de combustão interna; pequena cilindrada; binário; potência; consumo específico; árvore de cames; curso; diâmetro; UAV, ignição por faísca.

Abstract

This study's main objective was to test the influence of three parameters in the performance of small four stroke spark-ignition engine, as to verify the viability of its use in an UAV.

For this accomplishment, the data for the taken measurements and performed calculations were used as input to Cam Analyzer, Engine Analyzer both from Performance Trends® and finally Microsoft Excel from Microsoft Corporation®, to allow estimations for the graphic curves of both the original engine and the modified ones, which had alterations made to its camshaft, cylinder diameter and piston stroke.

The results of the simulation conceded the conclusion that it is indeed possible to improve the studied engine through alterations in the parameters mentioned above. It is of note, however, the extreme importance of knowing beforehand the operations regime for which the aircraft will be designed, as to know the range in which it should or needs to be optimized.

It is also essential to mention that these results do not take into account an eventual increased need for work material that could make the engine heavier, nor does it contemplates real thermal losses, since the programs used for this simulation execute these estimates in a much too simplified manner. As such, it is deemed of great importance that more similar studies are conducted, so as to allow a more complete evaluation of this engine's true performance given the parameter alterations here stated, and as to certify its weight / motor power ratio.

Keywords

Internal combustion engine, smaller displacement engine, torque; power; specific fuel consumption; camshaft; piston course; diameter; UAV, spark ignition.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos.....	xvii
Lista de Símbolos	xix
1. Introdução e Objetivos	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Específico.....	2
2. Estado da Arte.....	3
2.1. Combustão multi-zona	3
2.2. Combustíveis alternativos e biocombustíveis	4
2.3. DISI / DI	4
2.4. EGR	5
2.5. EHR	5
2.6. HCCI / HCSI	6
2.7. Injetores / <i>Spray</i>	6
2.8. PM.....	7
2.9. Sobrealimentador	7
2.10. Turbo.....	8
2.11. VVT / VVL / VVTL	8
3. Conceitos de UAV's.....	9
3.1. Definição de UAV.....	9
3.1.1. Classificação de UAV's.....	9
3.1.2. Missão de um UAV	9
3.1.2. História dos UAV's	10
3.1.2.1. Os Primórdios.....	10
3.1.2.2. Após o surgimento dos Motores de Combustão Interna	12
3.2. Motor de combustão interna	15
3.2.1. Classificação.....	15
3.2.2. Componentes.....	17
3.2.3. Princípio de funcionamento	19
3.2.3.1. Motor de quatro tempos	19

3.2.4.	Nomenclatura / Parâmetros do motor.....	20
3.2.4.1.	Binário	21
3.2.4.2.	Consumo específico	21
3.2.4.3.	PME.....	21
3.2.4.4.	Potência efetiva	21
3.2.4.5.	Razão de compressão	22
3.2.4.6.	Relação ar / combustível.....	22
3.2.5.	Curvas características do motor	23
3.2.5.1.	Curva de binário	23
3.2.5.2.	Curva de potência	24
3.2.5.3.	Curva de consumo específico.....	24
3.2.6.	Ciclos Termodinâmicos	25
3.2.6.1.	Ciclo de Otto	25
3.2.6.2.	Ciclo de Miller	25
4.	Trabalho prático	27
4.1.	Programas	27
4.1.1.	Cam Analyzer.....	27
4.1.2.	Engine Analyzer.....	27
4.2.	Motor original.....	28
4.3.	Casos em Estudo	29
4.3.1.	Conjunto de Árvores de Cames	29
4.3.2.	Valores de diâmetro de cilindro	29
4.3.2.	Valores de curso do pistão	29
4.4.	Testes realizados.....	30
4.5.	Influência dos diferentes parâmetros modificados no desempenho do motor	31
4.6.	Discussão dos resultados.....	40
5.	Conclusão	43
6.	Referências bibliográficas.....	45
	Anexos	49
	Anexo	49
	Anexo I - Dados do motor Original do fabricante	51
	Anexo II - Dados do Cam Analyzer do Motor Original	53
	Anexo III - Dados do Engine Analyzer do Motor Original	59

Lista de Figuras

Figura 1 - Kettering Aerial Torpedo "Bug" no Museu da Força Aérea dos Estados Unidos da América [2].	1
Figura 2 - Esquema de um cilindro com quatro zonas de combustão [8].	3
Figura 3 - Classificação de injeção direta consoante o mecanismo de formação da mistura [17].	4
Figura 4 - Ciclo de ar com aproveitamento térmico teórico [30].	5
Figura 5 - Ciclo de ar com aproveitamento térmico e regeneração teórico [30].	5
Figura 6 - Do lado esquerdo temos um esquema de um injetor de abertura para o interior, de fluido único e de tipo remoinho, enquanto que, do lado direito temos um exemplo de um cone de combustível [21].	6
Figura 7 - Pulverização de um bocal piezoelétrico de três vistas diferentes a 20MPa [22].	7
Figura 8 - Exemplo de um mecanismo de controlo de comando de válvulas [32].	8
Figura 9 - Descrição artística do voo do "Pombo", o primeiro UAV documentado na história [2].	10
Figura 10 - Parafuso Aéreo ou Giroscópio de Ar de Leonardo da Vinci, o antepassado do helicóptero [2].	11
Figura 11 - Relato de Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz do primeiro voo tripulado através de um balão de ar quente em França no ano de 1783 [2].	11
Figura 12 Duas versões do The de Havilland Tiger Moth modificado e controlado via rádio para abater alvos aéreos [2], [3].	12
Figura 13 - Curtiss F-5L fez o seu primeiro voo controlado via rádio a 15 de Setembro de 1924 [3].	12
Figura 14 - MQM-57 Falconer ou SD-1 como também é conhecido operou da década de 50 até à década de 70 pelos Estados Unidos da América [2].	13
Figura 15 - Teledyne-Ryan AQM-34 nas asas do C-120 Hercules à esquerda e AQM-34Q numa das versões alteradas para reconhecimento. Ambos fazem parte da família dos 147 UAV's Ryan Model "Firebees" [2], [3].	13
Figura 16 - QH-50C DASH [3].	14
Figura 17 - À esquerda temos MQ-1 Predator usado para reconhecimento e vigia, e à direita temos o seu "irmão mais velho" que permitem altitudes de voo superiores bem como maiores alcances. De notar que ambas as aeronaves podem ser usadas para ataques [2].	14
Figura 18 - Exemplar de um MAV com um pequeno compartimento para payload e uma autonomia de uma hora [2].	14
Figura 19 - Classificação de motores térmicos [36].	15
Figura 20 - Classificação detalhada de um motor alternativo [36].	16
Figura 21 - Vista lateral de um motor monocilíndrico de ignição por faísca. [36].	18

Figura 22 - Esquema elucidativo dos 4 tempos de um motor de combustão interna ou alternativo: admissão, compressão, combustão ou explosão e escape [40].	19
Figura 23 - Geometria básica de um motor alternativo [1].	20
Figura 24 - Exemplo de um gráfico de curvas características de um motor [1].	23
Figura 25 - Ciclo de Otto ideal [36].	25
Figura 26 - Curvas caraterísticas do motor original em estudo.	28
Figura 27 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão maximizados.	31
Figura 28 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão minimizados.	32
Figura 29 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com diâmetro do cilindro minimizado e curso do pistão maximizado.	33
Figura 30 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso minimizado.	34
Figura 31 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.	35
Figura 32 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.	36
Figura 33 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames reduzidas em 25% em relação às árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso maximizado.	37
Figura 34- Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames incrementadas em 25% em relação às árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso maximizado.	38
Figura 35 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com um incremento de diâmetro e curso próximo do limitado pela biela original do motor.	39
Figura 36 - Disposição gráfica das árvores de cames e da respetiva Degree Wheel. O gráfico a cinzento corresponde ao escape e o gráfico a azul corresponde à admissão.	53
Figura 37 - Elevação das árvores de cames dados os ângulos da mesma sem Degree Wheel. Novamente O gráfico a cinzento corresponde ao escape e o gráfico a azul corresponde à admissão.	53
Figura 38 - Preferências utilizadas.	54
Figura 39 - Leitura da Degree Wheel utilizada.	54
Figura 40 - Opções de teste.	58
Figura 41 - Short Block Specs.	59
Figura 42 - Cylinder Head Specs.	60
Figura 43 - Intake System Specs.	60
Figura 44 - Exhaust System Specs.	61
Figura 45 - Cam/Valve Train Specs.	61
Figura 46 - Turbo/Supercharger Specs.	62
Figura 47 - Calculate Performance Conditions.	62

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos ou classes dos UAV segundo a UE [35].	9
Tabela 2 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor original.	28
Tabela 3 - Conjunto de árvores de cames analisadas.	29
Tabela 4 - Dimensões consideradas para o diâmetro do cilindro.	29
Tabela 5 - Dimensões consideradas para o curso do pistão.	29
Tabela 6 - Testes realizados com árvores de cames, diâmetros de cilindro e cursos do pistão.	30
Tabela 7 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor com as árvores de cames originais, diâmetro do cilindro e curso do pistão maximizados.	31
Tabela 8 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor com as árvores de cames originais, com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão minimizados.	32
Tabela 9 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro minimizado e curso do pistão maximizado.	33
Tabela 10 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado.	34
Tabela 11 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm dos conjuntos das árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.	35
Tabela 12 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm dos conjuntos das árvores de cames reduzidas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.	36
Tabela 13 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado com uma redução de 25% às árvores de cames originais.	37
Tabela 14 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado com incrementos de 25% às árvores de cames originais.	38
Tabela 15 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado.	39
Tabela 16 - Quadro Resumo das combinações possíveis entre diâmetro do cilindro e curso do pistão do motor em comparação com o motor original.	40
Tabela 17 - Quadro Resumo das combinações possíveis feitas às árvores de cames originais do motor.	41
Tabela 18 - Dados do motor [39].	51

Lista de Acrónimos

Acrónimo	Descrição
A.C.	Antes de Cristo
BC	<i>Bottom Centre</i>
EC	<i>External Combustion</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
EHR	<i>Exhaust Heat Recovery</i>
est	Estequiométrico
HALE	<i>High Altitude Long Endurance</i>
HCCI	<i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i>
HCSI	<i>Homogeneous Charge Spark Ignition</i>
IC	Ignição por Compressão
IC	<i>Internal Combustion</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IF	Ignição por Faísca
MALE	<i>Medium Altitude Long Endurance</i>
MAV	<i>Micro UAV</i>
OHC	<i>Over Head Camshaft</i>
OHV	<i>Over Head Valve</i>
PM	<i>Porous Medium</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
SI	<i>Spark Ignition</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
TC	<i>Top Centre</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VVL	<i>Variable Valve Lift</i>
VVT	<i>Variable Valve Timing</i>
VVTL	<i>Variable Valve Timing and Lift</i>

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
\dot{W}_e	Potência útil	kW
\dot{m}_a	Caudal de ar	kg/s
\dot{m}_f	Caudal de combustível	kg/s
A_p	Área de superfície do pistão	m ²
C_s	Consumo específico	kg/kWh
N_c	Número de cilindros	Adimensional
V_{PMI}	Volume acima do pistão quando se encontra no PMI	m ³
V_{PMS}	Volume acima do pistão quando se encontra no PMS (volume da câmara de combustão)	m ³
V_c	Volume da câmara de combustão	m ³
V_d	Volume deslocado ou cilindrada	m ³
V_p	Velocidade média do pistão	m/s
V_t	Volume total (volume superior ao volume da câmara de combustão)	m ³
e_{vol}	Eficiência volumétrica	Porcentagem
m_a	Massa de ar	kg
m_f	Massa de combustível	kg
p_{im}	Pressão média efetiva	Pa
r_c	Razão de compressão	Adimensional
A	Quantidade de ar	kg
B	Diâmetro do cilindro	m
F	Quantidade de combustível	kg

Simulação de desempenho de um motor de quatro tempos de ignição por faísca

L	Comprimento do curso	m
N	Número de revoluções por segundo	Adimensional
PME	Pressão média efetiva	Pa
S	Curso do pistão	m
ip	Potência útil	kW
λ	Excesso de ar	Adimensional
ρ	Densidade	kg/m ³
τ	Binário Útil	N.m
ϕ	Riqueza da mistura	Adimensional

Importa referir que as medidas utilizadas nos programas Cam Analyzer e Engine Analyzer foram medidas imperiais, por isso no decorrer do presente trabalho poderão ser referenciadas medidas imperiais e os seus correspondentes para unidades métricas ou do SI.

Capítulo 1

1. Introdução e Objetivos

1.1. Introdução

Os motores de combustão interna surgiram no ano de 1860, quando Etienne Lenoir, um belga nascido em 1822, desenvolveu o primeiro motor de explosão a dois tempos. Dois anos mais tarde, em 1862 surgiu um primeiro motor de combustão interna a quatro tempos pela mão do francês Alphonse Beau de Rochas. No entanto, somente no ano de 1976 começou a produção de motores de combustão interna a quatro tempos e registada a patente pela mão de dois engenheiros alemães nascidos no ano de 1832 e 1833: Nikolaus Otto e Eugen Langen, respetivamente [1].

Apenas em 1918, foi aplicado o primeiro motor de combustão interna de 4 cilindros num UAV bombardeiro denominado de *Kettering Aerial Torpedo "Bug"*, que nunca chegou a ser aplicado em situação de combate na Segunda Guerra Mundial por apenas atingir uma taxa de sucesso de 22%. De salientar que este UAV surgiu apenas 15 anos após o primeiro voo motorizado numa aeronave mais pesada que o ar (aeródino) e controlado por um piloto, realizado pelos irmãos Wright. Tal apenas foi possível graças aos avanços realizados por Sperry em giroscópios que eram utilizados para a estabilização do voo do UAV [2], [3].



Figura 1 - Kettering Aerial Torpedo "Bug" no Museu da Força Aérea dos Estados Unidos da América [2].

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo de desempenho um motor de quatro tempos de ignição por faísca de pequena cilindrada. O objetivo passa por perceber qual a melhor forma de aumentar o desempenho do motor alterando 3 variáveis: o conjunto das árvores de cames, o diâmetro do cilindro e o curso do pistão, visando a viabilidade para a sua implementação num UAV.

1.2.1. Objetivo Específico

Pretende-se com a alteração de três parâmetros físicos do motor: conjunto das árvores de cames, diâmetro do cilindro e curso do pistão melhorar o desempenho de um motor de quatro tempos de pequena cilindrada a baixos regimes.

Optou-se pela realização de simulações com a ajuda dos programas *Cam Analyzer*, o que permitiu a elaboração de diferentes conjuntos de árvores de cames a partir do conjunto original e do programa *Engine Analyzer*, que permitiu com os dados dos motor prever o desempenho do conjunto. Isto porque as simulações fornecem uma ajuda valiosa no que toca a investimento monetário para a realização dos ensaios, bem como permitem obter uma melhor ideia dos fenómenos associados a essas alterações e interações entre as modificações efetuadas. Também se pode referir que se podem obter estimativas de dados de funcionamento que seriam mais difíceis de obter a partir de medições experimentais.

Com as alterações, pretende-se reduzir a velocidade angular de binário máximo do motor, visto que o mesmo foi construído de base para outras aplicações. Será assim possível utilizar um motor de custo baixo para a direta implementação num UAV.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

Com protocolos internacionais assinados com o intuito de reduzir emissões que provocam a destruição da camada de ozono, as incertezas relacionadas com os preços dos combustíveis fósseis associadas à sua possível extinção levaram à necessidade de melhorar o desempenho de motores [4]-[7]. Foram criadas diversas formas de aumentar o desempenho de motores de combustão interna tão comuns nos dias que correm, aumentando assim binário, potência e minimizando consumos, e, por consequência, emissões de forma a aumentar a autonomia de dispositivos que usam estes motores para se deslocarem [5], [6].

2.1. Combustão multi-zona

Este modelo, como o próprio nome indica recorre à divisão de gás queimado em duas ou mais zonas (ver Fig. 2) por forma a reduzir a temperatura máxima localizada dentro do cilindro, visto esta estar fortemente relacionada com criação dos óxidos de azoto (NO_x). O seu principal objetivo é então reduzir a quantidade de NO_x formados. O modelo é sempre aplicado quando as válvulas de admissão e escape se encontram fechadas, ou seja, quando o ciclo se encontra fechado. Por outras palavras ainda, durante a combustão e parte da expansão. Para o correto funcionamento deste modelo, é necessária a monitorização de dados como: as características geométricas do motor, a velocidade do motor, a razão ar / combustível, a temperatura de combustão, a temperatura das paredes do cilindro, o início da combustão, a duração da combustão, e a temperatura e pressão de carga, aquando do fecho da válvula de admissão. Desde o início da combustão, são queimadas sequencialmente zonas múltiplas [8], [9].

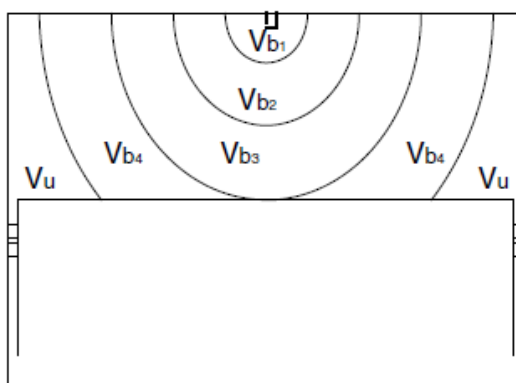


Figura 2 - Esquema de um cilindro com quatro zonas de combustão [8].

Esta abordagem é mantida até ao final da fase de expansão, ou seja, ocorre até à abertura da válvula de escape. De notar que todas as zonas consideradas são espaçadas uniformemente. A cada instante de tempo, o cilindro possui uma pressão uniforme [8].

2.2. Combustíveis alternativos e biocombustíveis

Os combustíveis alternativos têm sido fortemente investigados muito por causa da procura da melhoria das eficiências energéticas, proteção ambiental, escassez de combustíveis fósseis e poluição que estes produzem [4]. Têm sido pesquisadas misturas de gasolina com hidrogénio, álcool (metanol, etanol, butanol) e até água. Estas substâncias apresentam a capacidade de reduzir as emissões de CO₂ e NO_x, mas podem no entanto apresentar problemas quando as misturas com os combustíveis de base não se encontram nas proporções ideais, causando problemas de rendimento e até de manutenção, visto poderem danificar componentes do motor devido ao poder corrosivo que apresentam. No entanto, apresentam várias vantagens, para além da redução de emissões, sendo elas: baixa probabilidade de autoignição, devido ao elevado número de octanas que apresentam, poder calorífico elevado que facilita a evaporação do combustível (não necessitando por isso de temperaturas tão elevadas para a combustão), reduzindo assim também as perdas térmicas e melhorando a percentagem de energia convertida para movimento mecânico [4], [7], [10]-[15]. Muitas vezes estes combustíveis alternativos necessitam de algumas tecnologias associadas para poderem ser utilizados de forma viável [15].

2.3. DISI / DI

A injeção direta veio substituir o reinado duradouro que o carburador possuiu. Ainda na década de 50, a Benz desenvolveu a primeira versão de injeção direta de modo a corrigir deficiências associadas ao uso do carburador. Como o próprio nome indica, o combustível é injetado diretamente dentro do cilindro. O objetivo principal é minimizar o consumo, mas pretende-se também aumentar a potência do motor, o que é possível graças ao incremento da razão de compressão. De referir ainda que a quantidade de combustível libertada pelo injetor é controlado por uma unidade de controlo eletrónica que doseia e envia mensagens eletrónicas correspondentes ao *input* recebido pelo acelerador [16]. Existem três tipos de mecanismos de injeção que se podem referir (ver Fig. 3).

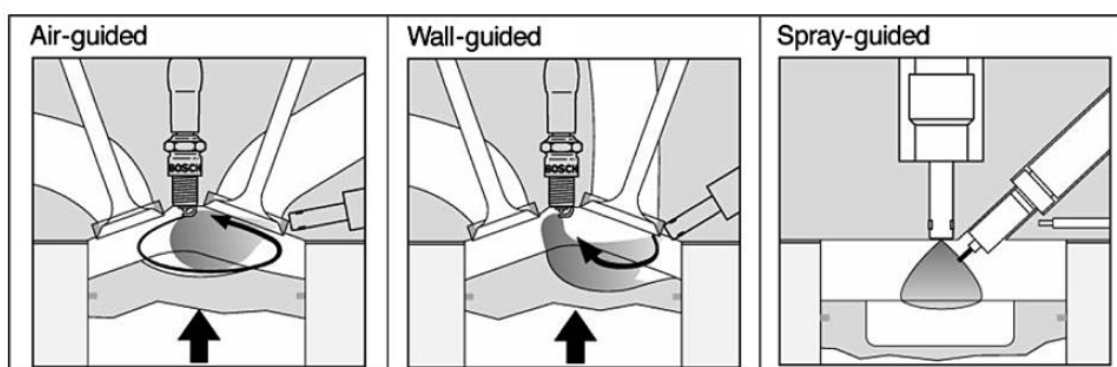


Figura 3 - Classificação de injeção direta consoante o mecanismo de formação da mistura [17].

De referir que a injeção guiada por parede foi mais usada no passado tendo sido cada vez mais substituída pela injeção por *spray* que confere melhores resultados a nível de consumo [17].

2.4. EGR

Este dispositivo foi criado com o propósito de reduzir a quantidade de NO_x formados durante a queima do combustível, aquando da verificação de temperaturas extremamente elevadas. Por isso, a válvula EGR reduz as temperaturas verificadas durante a combustão através de recirculação de gases, já queimados, misturados com ar fresco na entrada de ar/combustível da explosão seguinte. Estes gases já queimados passam a denominar-se gases inertes, pois já não se irão alterar na explosão seguinte. Estes gases permitem a “diluição” da mistura que dá entrada pela válvula de admissão, tornando-a forçosamente mais pobre e reduzindo assim a temperatura de queima [18], [19].

2.5. EHR

Encontram-se a ser estudadas formas de aproveitar a energia térmica dos gases de escape de forma direta ou indireta. No entanto, estes estudos ainda se encontram pouco desenvolvidos e não apresentam as taxas de aproveitamento desejadas. Encontram-se a ser estudados ciclos com e sem regeneração [20].

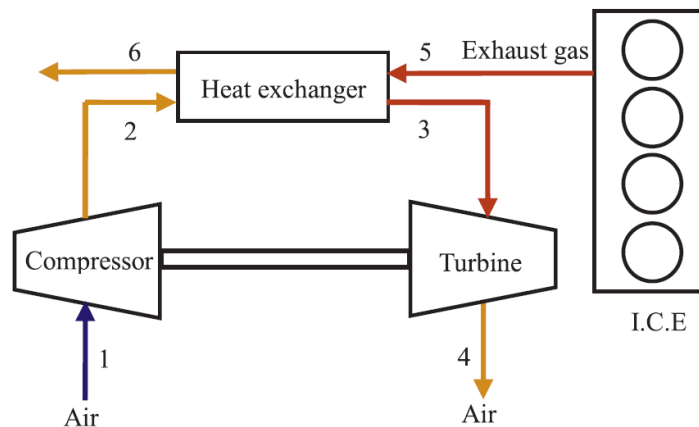


Figura 4 - Ciclo de ar com aproveitamento térmico teórico [30].

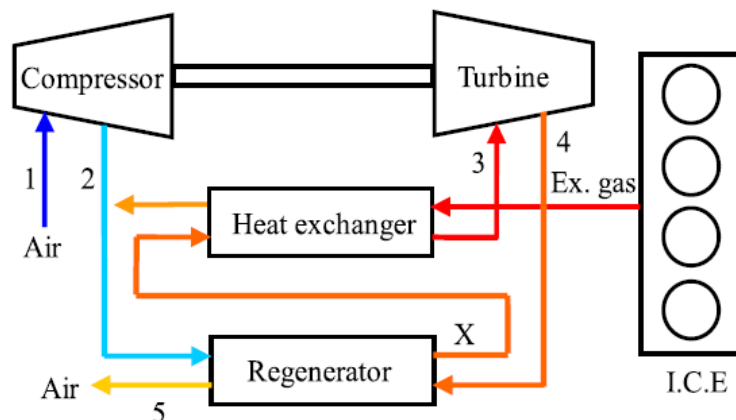


Figura 5 - Ciclo de ar com aproveitamento térmico e regeneração teórico [30].

2.6. HCCI / HCSI

A ideia por detrás desta tecnologia é criar a combustão do combustível sem ser necessária a faísca para o desencadear. A combustão é então espontaneamente desencadeada (autoignição) pelas altas pressões e temperaturas verificadas aquando da compressão, dado que o combustível se encontra misturado com o ar de forma homogénea dentro do cilindro. Tudo isto é conseguido por meio da conceção de árvores de cames redesenhadas cuja elevação e duração foram reduzidos [15]. O objetivo é simples: combinar o melhor dos motores *diesel* com o melhor dos motores a gasolina, ou seja, combinar a combustão eficiente dos motores diesel com as emissões mais baixas registada pelos motores a gasolina. Os motores diesel apresentam-se como sendo mais eficientes a nível termodinâmico uma vez que operam a razões de compressões superiores aos motores a gasolina. Em contrapartida, os motores *diesel* apresentam níveis de emissões superiores aos motores a gasolina, que por sua vez, apresentam uma combustão mais fácil de controlar [15], [17].

2.7. Injetores / Spray

Depois da injeção direta, vamos agora concentrar-nos nos *spray* e mais precisamente no formato do jato de combustível que é libertado antes do processo de compressão para de seguida ocorrer a combustão e dos fatores que condicionam a disposição do combustível no cilindro [21]-[23]. Quando se fala em *spray* fala-se forçosamente do cone de combustível e por isso são ilustrados exemplos na Figura 6.

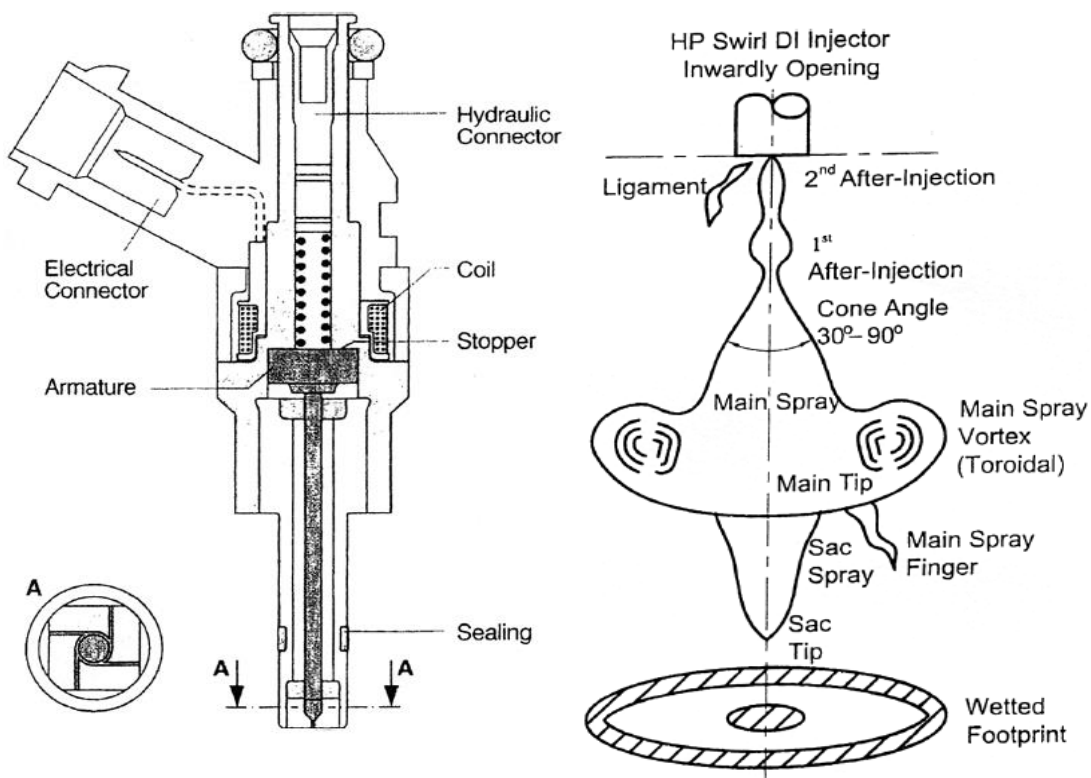


Figura 6 – Do lado esquerdo temos um esquema de um injetor de abertura para o interior, de fluido único e de tipo remoinho, enquanto que, do lado direito temos um exemplo de um cone de combustível [21].

O cone (ver Fig. 7) é gerado pelo injetor de alta pressão de remoinho que força o fluido a sair na forma correspondente à sua ponteira. O injetor tem que ser capaz de operar de forma distinta, consoante as cargas e operar a diferentes gamas de pressões, as quais podem chegar até aos 13MPa e a tendência é aumentar-se esse valor [21]. As características do fluido como a viscosidade, a temperatura e a pressão a que se encontram, bem como a posição e a turbulência gerada pelo *spray* influenciam grandemente o seu cone [21]-[23].

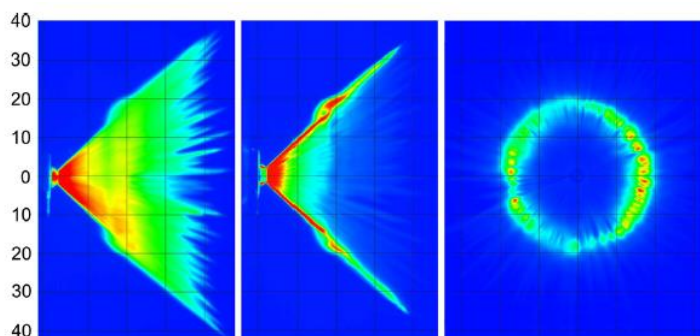


Figura 7 - Pulverização de um bocal piezoelétrico de três vistas diferentes a 20MPa [22].

De referir que a interação entre o ar em movimento e o *spray* de combustível são fundamentais para uma combustão uniforme e eficiente [21].

2.8. PM

A combustão em meio poroso tem sido estudada recentemente por conferir propriedades aos combustíveis que lhes permitem uma elevada eficiência térmica, bem como uma redução de gases poluentes. Este tipo de combustão é estável e homogénea. Foi ainda descoberto que esta propriedade conferida ao combustível lhe permite agir como recuperador de calor, o que por sua vez, confere uma maior capacidade de evaporação e por isso pré aquecer o mesmo facilita a sua flamabilidade. Permite ainda reduzir emissões e ruído da combustão devido às pressões mais baixas requeridas para a queima do combustível [24].

2.9. Sobrealimentador

Sobrealimentador é um dispositivo que aumenta a densidade do ar na admissão do motor. Este dispositivo é ligado diretamente à cambota através de uma correia, e, por conseguinte, consegue fornecer potência imediata assim que requisitado. Relativamente ao turbocompressor, o sobrealimentador consegue fornecer energia a regimes mais baixos. Este tipo de tecnologia permite incrementar a potência do motor, sem alterar a zona de combustão propriamente dita, visando-se assim o *downsizing*. Permite aumentar as razões de compressão disponíveis, aumentando assim a potência, eficiência e desempenho do motor, equipado com este equipamento. Permite uma melhoria do desempenho do motor a rotações mais elevadas, no entanto encontra-se limitado à capacidade de pressão e temperatura permissíveis dentro do cilindro [25].

2.10. Turbo

O turbocompressor utiliza os gases de escape para aumentar a densidade do ar na admissão. Para isso, utiliza uma turbina ligada a um compressor centrífugo. É de realçar que este mecanismo é utilizado para aumentar a pressão antes do início da compressão, mas tem que estar de acordo com as pressões e temperaturas admissíveis de operação dentro do cilindro. Esta tecnologia funciona por vezes em conjunto com um *intercooler* que é utilizado para reduzir a temperatura do ar comprimido para a admissão e que permite reduzir emissões de CO₂, aumentando assim a eficiência do motor e visando também o *downsizing*. O qual, por outras palavras, requer menos cilindrada para desenvolver a mesma potência e binário, permitindo ainda reduzir emissões. No entanto, o problema da autoignição é aumentado [26]-[29].

2.11. VVT / VVL / VVTL

Esta tecnologia relaciona o tempo de abertura das válvulas com o período em que as mesmas estão abertas, bem como a elevação das válvulas durante a sua abertura (ver Fig. 8). Isto permite eliminar as restrições associadas às árvores de cames tradicionais, que são condicionadas pela abertura e fecho fixos das válvulas de admissão e de escape [30], [31].

É possível assim um controlo mais flexível e a diferentes regimes, ajustado às necessidades de cada caso. Tudo isto é conseguido através de uma unidade de controlo eletrónico que permite o controlo e monitorização da temperatura máxima registada no interior dos cilindros, bem como da quantidade de resíduos no início do curso de compressão controlados pela válvula EGR [30]-[33].

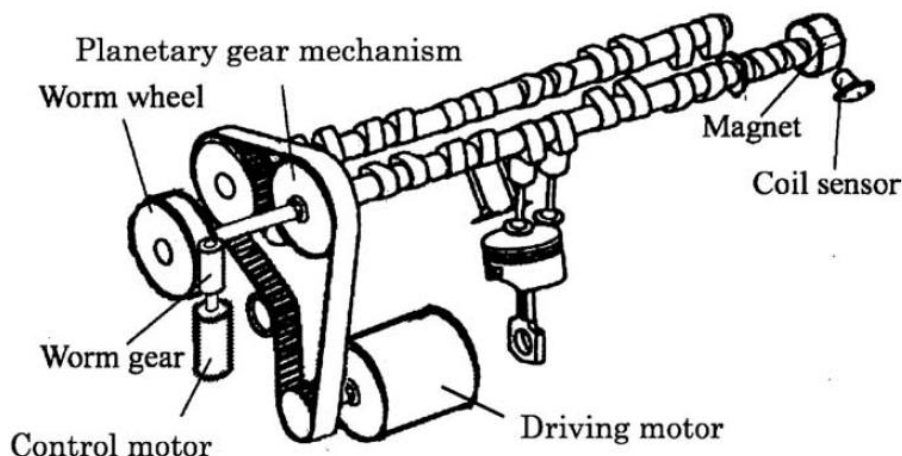


Figura 8 - Exemplo de um mecanismo de controlo de comando de válvulas [32].

Capítulo 3

3. Conceitos de UAV's

Neste capítulo, abordaremos conceitos importantes no que diz respeito aos UAV's bem como no que diz respeito aos Motores de Combustão Interna de Ignição por Faísca.

3.1. Definição de UAV

Os UAV's são veículos concebidos para operarem sem um operador humano a bordo ou veículos que anteriormente seriam operados por humanos a bordo, mas que sofreram alterações por forma a que não sejam necessários humanos no interior dos mesmos. Estes podem ser controlados remotamente ou não [34].

3.1.1. Classificação de UAV's

Os UAV's podem ser classificados quanto às suas características de desempenho:

Tabela 1 - Tipos ou classes dos UAV segundo a UE [35].

Nome da Categoria	Alcance [km]	Payload [kg]	Tecto de Voo [m]
MAV	≈ 2	< 1	600
Small UAV	10	ND	2000
Short Range	50 - 150	≤ 100	4500
Medium Range	200	≤ 150	6000
MALE	200	≤ 300	10000
HALE	> 1000	≥ 300	> 10000

Daqui concluímos então que o motor deste estudo poderá tanto servir para a categoria de *Small UAV* como de *Short Range UAV*.

3.1.2. Missão de um UAV

Os UAV's são utilizados para diferentes propósitos, entre eles:

- Apoio a busca e salvamento;
- Armadilha;
- Combate/Defesa;
- Controlo de incêndios;
- Mapeamento;
- Patrulha;
- Radar, sensores (recolha de informação);
- Recolha de informação;

- Reconhecimento;
- Vigia; (Controlo de fogos)[35].

3.1.2. História dos UAV's

3.1.2.1. Os Primórdios

Foi há mais de 2500 anos atrás, ainda na Grécia antiga e na China, que os UAV's surgiram, mas desta feita sob a forma de aeróstatos, ou seja, dispositivos mais leves do que o ar.

Em 425 A.C., um grego de nome Archyras construiu um dispositivo mecânico ao qual deu o nome de “Pombo” (ver Fig. 9). Segundo registos concebidos por Atticae, este UAV era constituído por madeira, perfeitamente equilibrado e utilizava, segundo consta, o princípio da máquina a vapor enclausurado na “barriga” do UAV. Alega-se que este UAV voou 200 metros antes de entrar em contacto com o solo [2].



Figura 9 - Descrição artística do voo do “Pombo”, o primeiro UAV documentado na história [2].

Em 400 A.C. mas desta feita na China, foi registado pela primeira vez na história a ideia de voo vertical. A versão mais primária do voo vertical dos chineses consistia em causar a rotação de uma vara com penas na sua extremidade superior até produzir sustentação suficiente para ganhar altura e realizar um voo livre. Outros tipos de dispositivos foram concedidos pelos chineses, tais como: balões de ar quente, foguetes ou ainda papagaios de papel. A maior parte deles era usada para recreio, mas existiam também alguns com aplicações militares, tais como reconhecimento, tais como o “wooden hawk” de uso corrente durante a Dinastia Ming para bombardeamento utilizada por volta de 450 A.C..

Em 1483, Leonardo da Vinci desenhou uma aeronave capaz de pairar denominada de Parafuso Aéreo ou Giroscópio de Ar (ver Fig. 10). Com 5 metros de diâmetro, seria suposto o veio possuir rotação suficiente para fazer o aparelho rodar e voar. Foi considerada por muitos peritos como que a base para aquilo que um dia viria a ser o helicóptero que conhecemos nos dias de hoje.

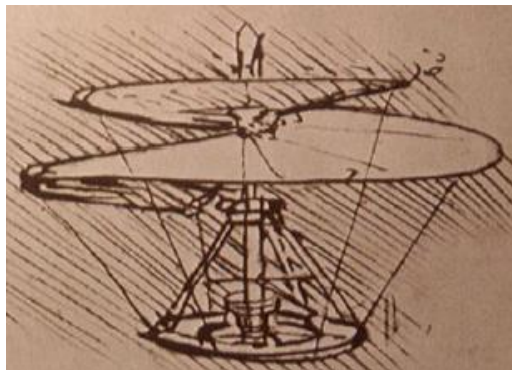


Figura 10 - Parafuso Aéreo ou Giroscópio de Ar de Leonardo da Vinci, o antepassado do helicóptero [2].

Em 1508 Da Vinci idealizou um pássaro mecânico cujas asas batiam através de um mecanismo de manivela dupla, enquanto descia ao longo de um cabo.

Apenas em 1783 os irmãos *Montgolfier* tornaram real a experiência de um voo vertical, tripulado através de um balão de ar quente, sendo que a predominância de voo tripulados apenas se alterou na década de 1860 pelos helicópteros e só posteriormente as aeronaves de asa fixa se impuseram (ver Fig. 11).



Figura 11 - Relato de Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz do primeiro voo tripulado através de um balão de ar quente em França no ano de 1783 [2].

Os UAV's desde cedo foram determinantes para fins militares, dados os benefícios do voo não tripulado, embora o objetivo principal sempre tenha sido o desenvolvimento de aeronaves tripuladas, visando sempre o transporte mais rápido e seguro, tanto de pessoas como de cargas. Esses primeiros UAV's eram sistemas de entrega comandada, hoje conhecidos como mísseis ou bombas inteligentes. Atualmente esses UAV's evoluíram e foram projetados para ser, totalmente ou, pelo menos, parcialmente, recuperados após a sua missão. Sendo que no caso desses sistemas ou dispositivos carregarem consigo armas, elas não sejam um componente integral da estrutura do UAV. Nos primeiros voos não tripulados, essa distinção não era relevante, uma vez que os obstáculos tecnológicos assim não o permitiram [2].

3.1.2.2. Após o surgimento dos Motores de Combustão Interna

Depois da taxa de sucesso baixíssima que foi a do *Kettering Aerial Torpedo "Bug"* e com o fim da Segunda Guerra Mundial, o acentuado crescimento da aviação comercial também proporcionou aos UAV's a sua evolução aliada com o interesse em missões de reconhecimento. Um exemplo disso foram as conversões de aeronaves tripuladas em não tripuladas como foram os casos do: The de Havilland Tiger Moth (ver Fig. 12) e do Curtiss F-5L (ver Fig. 13) controlados via rádio [2], [3].



Figura 12 - Duas versões do The de Havilland Tiger Moth modificado e controlado via rádio para abater alvos aéreos [2], [3].



Figura 13 - Curtiss F-5L fez o seu primeiro voo controlado via rádio a 15 de Setembro de 1924 [3] .

Os motores de combustão interna permaneceram a dominar as aeronaves nas missões de reconhecimento, como retrata o exemplo seguinte, utilizado até a década de 70 pelas Forças Armadas Americanas (ver Fig 14) [2].



Figura 14 - MQM-57 Falconer ou SD-1 como também é conhecido operou da década de 50 até à década de 70 pelos Estados Unidos da América [2].

Durante a mesma época, mas com uma missão diferente, era um modelo a jato subsónico que imperava, da empresa Ryan Aeronautical Company (ver Fig. 15). Esta empresa produziu uma família de UAV's que diferiam pouco uns dos outros, mas que lhe permitiam adequar ao tipo de missão pretendido pelo cliente. Essa família foi denominada *Ryan "Firebees"* e eram inicialmente usados como UAV's de abate a alvos aéreos [3].

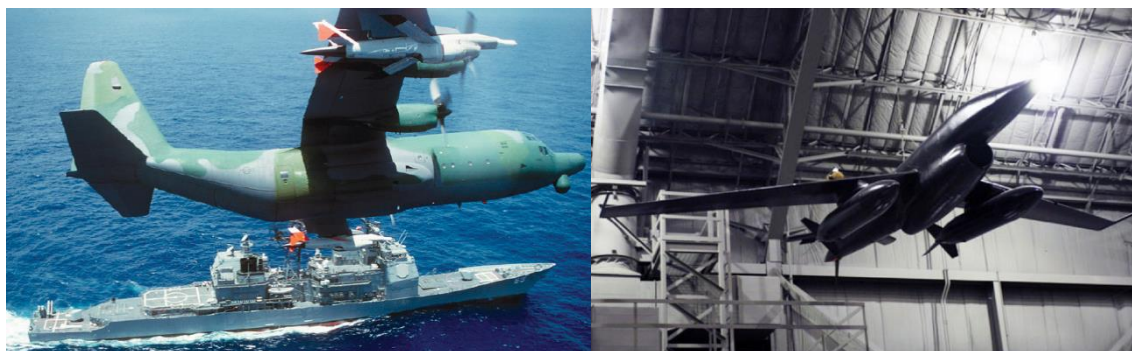


Figura 15 - Teledyne-Ryan AQM-34 nas asas do C-120 Hercules à esquerda e AQM-34Q numa das versões alteradas para reconhecimento. Ambos fazem parte da família dos 147 UAV's Ryan Model "Firebees" [2], [3].

Mais recentemente com os avanços nos sistemas propulsivos surgiram UAV's que conseguem alcances, velocidades superiores de cruzeiro, bem como tetos de voo superiores (ver Fig. 16 e 17) [2].

Ainda durante a mesma época e graças aos avanços nos sistemas propulsivos, bem como nos sistemas de controlo permitiram o aparecimento de uma nova era de UAV's que prometem ser extremamente promissores no futuro: os UAV's de asas rotativas (ver Fig. 16) [2], [3].



Figura 16 - QH-50C DASH [3].



Figura 17 – À esquerda temos *MQ-1 Predator* usado para reconhecimento e vigia, e à direita temos o seu “irmão mais velho” que permitem altitudes de voo superiores bem como maiores alcances. De notar que ambas as aeronaves podem ser usadas para ataques [2].

Não podemos no entanto negar a reconhecer a importância dos MAV's. Estes UAV's de dimensões reduzias prometem revolucionar e facilitar as missões de vigilância / espionagem (ver Fig. 18).



Figura 18 - Exemplar de um MAV com um pequeno compartimento para *payload* e uma autonomia de uma hora [2].

Importa salientar que a maior parte dos UAV's aqui expostos se enquadram num contexto de defesa, mas cada vez mais são utilizados no dia-a-dia, quer para vigilância de incêndios, quer para gravação de imagens ou puro entretenimento pelo cidadão comum.

3.2. Motor de combustão interna

O motor é um dispositivo capaz de converter uma forma de energia noutra com o intuito de produzir trabalho, embora existam sempre perdas de eficiência ligadas a esta conversão. Os motores que irão ser aqui abordados denominam-se motores térmicos por converterem exatamente energia química ou térmica em energia mecânica.

3.2.1. Classificação

Os motores de térmicos ou de combustão podem ser classificados de acordo com o local da combustão, como sendo: Motores de Combustão Interna (*IC Engines*) ou Motores de Combustão Externa (*EC Engines*), dada a localização da explosão do combustível (ver Fig. 19) [1]. Cada um destes grupos pode ainda ser subdividido em: Rotativos ou Alternativos. O motor estudado ao longo deste trabalho é um motor a gasolina, de combustão interna, alternativo [1], [36].

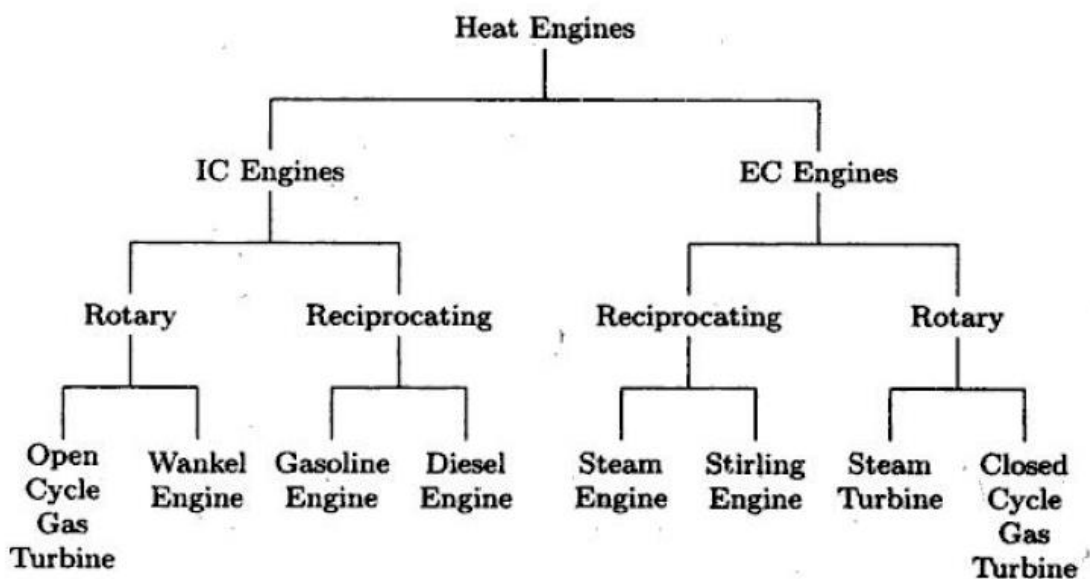


Figura 19 - Classificação de motores térmicos [36].

Ou ainda de uma forma mais explícita e dado ser um motor de ignição por faísca com carburador, temos na Figura 20 outra classificação.

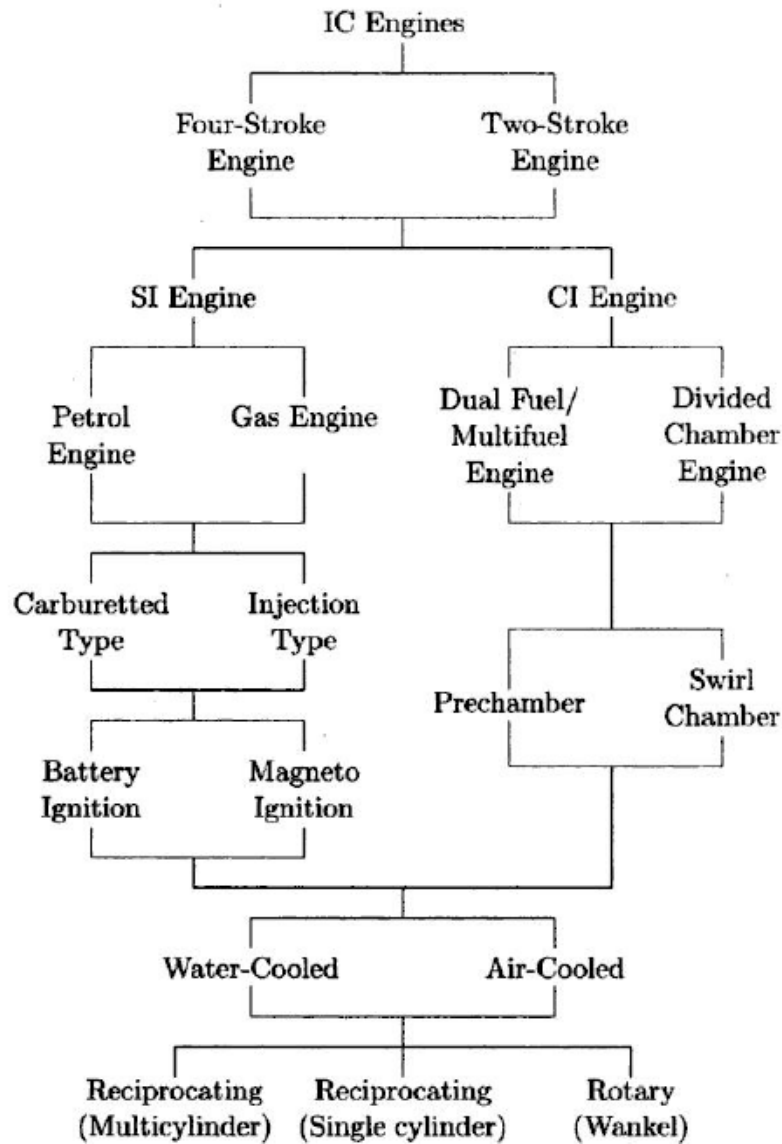


Figura 20 - Classificação detalhada de um motor alternativo [36].

O fator que confere maior vantagem aos motores alternativos face aos motores rotativos prende-se com o facto de este tipo de motor não necessitar de presenciar trocas térmicas na passagem do fluido de trabalho, resultando assim em simplicidade mecânica. Outra vantagem reside no facto deste tipo de motor operar a condições de temperatura muito inferiores. Em contrapartida, apresentam uma eficiência térmica inferior, bem como uma razão peso / potência inferior e uma limitação no uso de combustíveis apenas líquidos ou gasosos [36]. O motor alterado no presente trabalho classifica-se como sendo um motor alternativo de combustão interna a gasolina.

Os motores IF utilizam gasolina ocorrendo a combustão da mesma por intermédio de uma vela que utiliza uma descarga elétrica para o efeito, enquanto que os motores IC utilizam o gasóleo ou diesel que entra num processo de combustão, após a sua injeção dentro da câmara de combustão, aquando atingidas pressões e temperaturas elevadas [1], [36].

3.2.2. Componentes

Vamos agora abordar os componentes principais para o normal funcionamento dos motores alternativos:

Bloco do motor: componentes que possibilitam o suporte estrutural de todos os seus componentes interiores, é capaz de albergar mais do que um cilindro. É ele o responsável por providenciar o arrefecimento do motor, seja ele feito a água ou ar.

Cilindro: tal como o nome indica, este possui um formato cilíndrico e é no seu interior que o pistão se irá movimentar. De referir ainda que é no interior do cilindro que será colocado o fluido de trabalho que irá proporcionar o funcionamento do ciclo termodinâmico em questão.

Pistão: componente cilíndrico que se move dentro do cilindro. Tem a função de absorver a força gerada na câmara de combustão e de a transmitir para a cambota, gerando assim força mecânica.

Câmara de Combustão: espaço no interior do cilindro no qual o se move o pistão desde o PMS ao PMI.

Coletor de Admissão: tubo que proporciona a ligação do sistema de admissão à válvula de admissão que pode transportar ar somente ou já uma mistura de ar / combustível.

Coletor de Escape: tubo que proporciona a ligação da válvula de escape ao tubo de escape.

Válvulas de admissão e escape: válvulas que se encontram na parte superior ou lateral do cilindro que são responsáveis pela admissão de ar ou ar / combustíveis (válvula de admissão) ou saída dos gases pós combustão (válvula de escape). De notar que alguns motores podem possuir mais do que uma válvula de admissão ou uma válvula de admissão de dimensões superiores à válvula de escape.

Vela: componente responsável pelo início da combustão dos motores IF ou a gasolina.

Biela: fornece a conexão entre o pistão e a cambota, transmitindo assim as forças exercidas pelos gases de combustão à cambota.

Cambota: converte o movimento do pistão em trabalho útil através da rotação da mesma. Dependo da disposição dos cilindros. Podem existir contrapesos que proporcionam o equilíbrio estático e dinâmico, que são fundamentais ao normal funcionamento do motor.

Árvore de Cames: este componente está associado ao controlo dos tempos de abertura e fecho das válvulas de admissão e de escape.

Volante do motor: o binário produzido a cada ciclo de operação pode causar diferenciação da velocidade angular da cambota. Para que esse problema não se coloque, existe este componente [1], [36].

No caso do motor em causa, não é necessário o volante do motor, devido à existência de uma hélice que fornece o mesmo efeito, para além de produzir a tração necessária à locomoção do UAV.

Na Figura 21 pode ver-se a presença dos componentes descritos anteriormente numa vista em corte de um motor monocilíndrico.

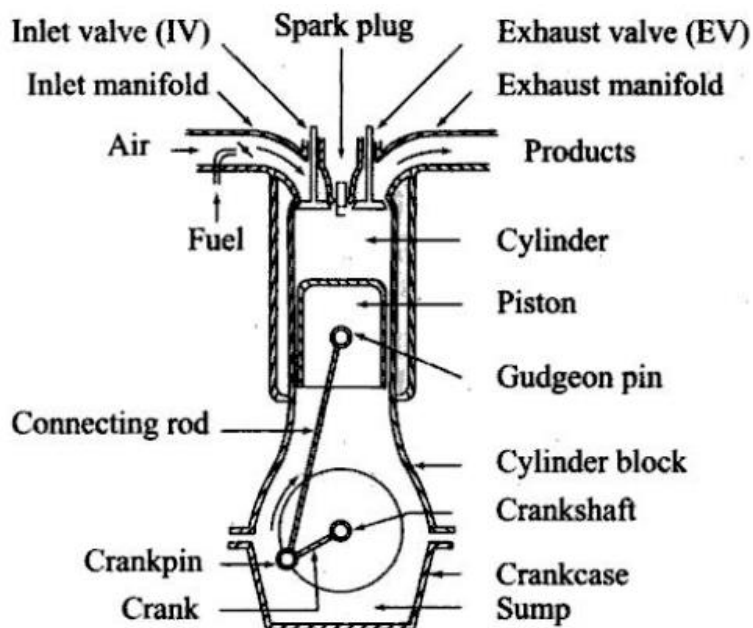


Figura 21 - Vista lateral de um motor monocilíndrico de ignição por faísca. [36].

3.2.3. Princípio de funcionamento

Um motor realiza ciclos de operações fixos para retirar a energia do combustível e produzir energia mecânica. A sequência dos mesmos é rígida e não pode ser alterada (salvos exceções referidas no capítulo do Estado da Arte) [36].

3.2.3.1. Motor de quatro tempos

Num motor de quatro tempos, cada ciclo tem quatro cursos do pistão que, por sua vez, correspondem a duas rotações da cambota por cada curso de potência (ver fig. 22). Vamos analisar o que acontece em cada um dos tempos mais detalhadamente:

Admissão: inicia-se quando o pistão se encontra no PMS e finaliza quando o mesmo chega ao PMI, introduzindo durante esse curso uma mistura fresca de ar / combustível dentro do cilindro. Por forma a aumentar a quantidade de mistura introduzida dentro do cilindro, a válvula de admissão abre ligeiramente antes do início do curso e fecha logo após chegar ao PMS.

Compressão: esta etapa inicia-se quando ambas as válvulas de admissão e escape se encontram fechadas e a mistura de ar / combustível, recém colocada na fase anterior na câmara de combustão, é comprimida. Inicia-se no PMI e, no caso de injeção direta, antes de chegar ao PMS o combustível é introduzido dentro do cilindro e aí, com o início da combustão, a pressão dentro do mesmo sofre um incremento ainda maior.

Combustão ou Explosão: a combustão do combustível utilizado inicia-se quando o pistão se encontra perto do PMS e finaliza após o PMI. Isto acontece graças às altas temperaturas e pressões verificadas dentro do cilindro, que forçam o pistão a descer, que por sua vez forçam a cambota a rodar.

Escape: nesta última fase os produtos da combustão são expulsos do cilindro por força do movimento do pistão, bem como devido à pressão dentro do cilindro ser superior à pressão no coletor de escape. Esta fase termina quando depois do pistão chegar ao PMS, fechando a válvula de escape e repete-se o ciclo novamente [1], [36].

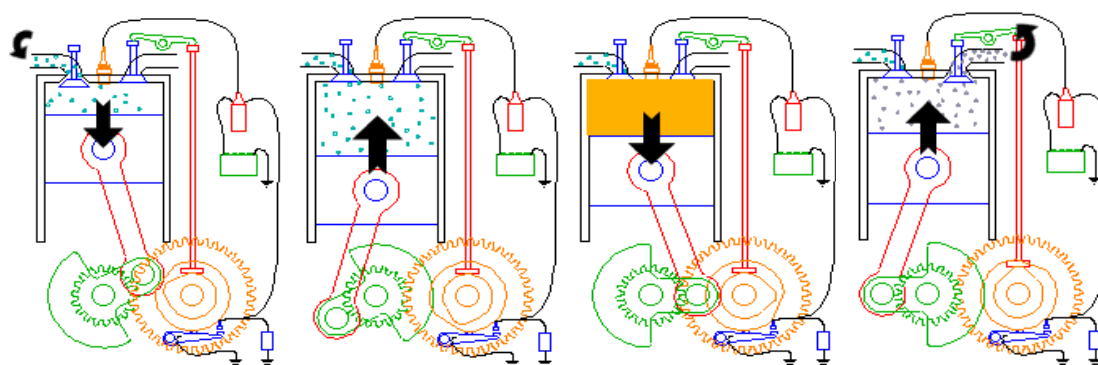


Figura 22 - Esquema elucidativo dos 4 tempos de um motor de combustão interna ou alternativo: admissão, compressão, combustão ou explosão e escape [40].

3.2.4. Nomenclatura / Parâmetros do motor

Após descrito o funcionamento de um motor de quatro tempos é importante referir a nomenclatura referente ao mesmo. Por isso seguem noções que foram necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

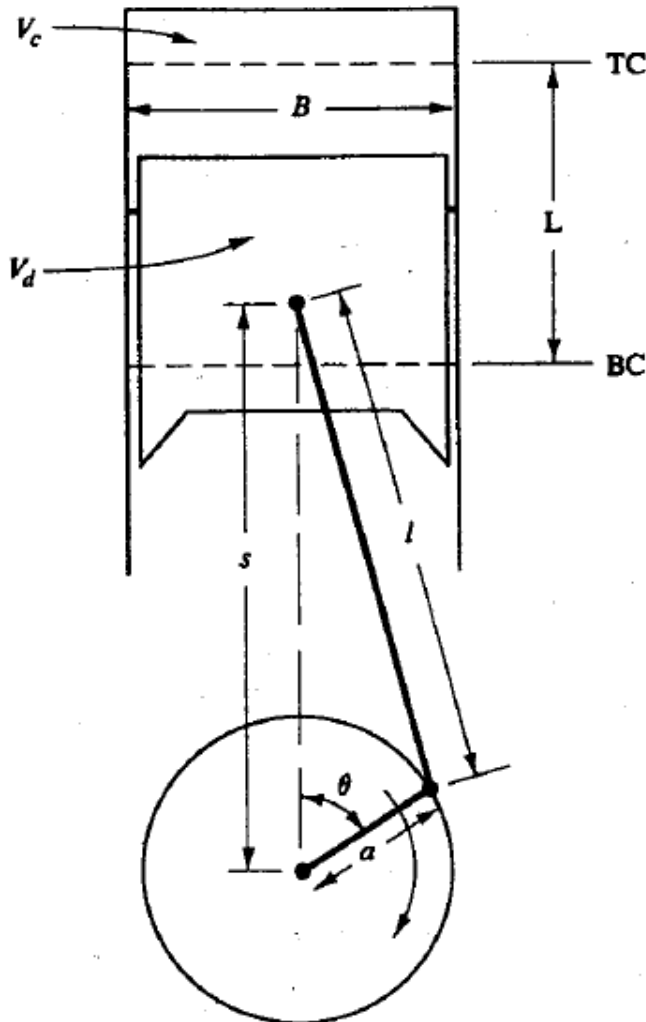


Figura 23 - Geometria básica de um motor alternativo [1].

Na Figura 23 são visíveis elementos como o cilindro, o pistão e a biela e uma representação da cambota cujos ângulos se encontram descritos e onde é possível verificar a relação da posição do pistão com a posição da cambota para o TC e o BC, ou seja, PMS e PMI, respetivamente.

Bore ou Diâmetro (B): ver no capítulo dos componentes.

Stroke ou Curso (L): ver no capítulo dos componentes.

V_d: Displaced Volume ou **Volume deslocado** corresponde ao volume deslocado pelo pistão dentro do cilindro, ou seja, ao volume varrido compreendido entre o TC e o BC.

$$V_d = V_{PMI} - V_{PMS} = N_c \frac{\pi B^2}{4} L \quad (1)$$

Onde: N_c representa o número de cilindros.

De referenciar que o volume deslocado é também vulgarmente conhecido por cilindrada e é dado em centímetros cúbicos (cm³) ou em litros (l).

V_c: Clearance Volume ou **Volume da câmara de combustão** corresponde ao espaço não movido pelo curso do pistão.

V_t: Volume total do cilindro. Logo:

$$V_t = V_d + V_c \quad (2)$$

3.2.4.1. Binário

O binário representa o momento criado no eixo da cambota pelo motor e é representado pelo produto da força tangencial, resultante da explosão do combustível pela distância entre o ponto de aplicação considerado e o eixo de rotação da cambota.

$$\tau = \frac{PME \cdot V_d}{4\pi} = \frac{\dot{W}_e}{2\pi N} \quad (3)$$

3.2.4.2. Consumo específico

O consumo específico relaciona o caudal mássico de combustível com o trabalho produzido. Ou seja, ele mede a eficiência do motor, permitindo assim relacionar motores distintos. É obtido pela seguinte razão:

$$C_s = \frac{m_f}{\dot{W}_e} \quad (4)$$

3.2.4.3. PME

A pressão média efetiva serve, tal como o consumo específico para relacionar motores distintos, relacionando assim o trabalho produzido por unidade de volume varrido pelo motor. Pode ser calculado através do binário (τ) ou da potência efetiva (\dot{W}_e).

$$p_{im} = \frac{6000 \cdot ip}{LA_p N N_c} \quad (5)$$

3.2.4.4. Potência efetiva

A potência útil ou potência efetiva representa o produto vetorial do binário do motor pela velocidade de rotação da cambota. Quanto maior será a cilindrada do motor, maior será o binário do motor. O outro fator que influencia a potência é a eficiência volumétrica.

$$\dot{W}_e = 2\pi\tau N = \frac{PME \cdot A_p \cdot V_p}{4} \quad (6)$$

Onde: A_p representa a área do pistão e V_p representa a velocidade do pistão sendo dada por:

$$V_p = 2SN \quad (7)$$

3.2.4.5. Razão de compressão

A razão de compressão representa a razão entre o volume total do cilindro e o volume da câmara de combustão do mesmo, ou seja, matematicamente:

$$r_c = \frac{V_t}{V_c} \quad (8)$$

3.2.4.6. Relação ar / combustível

Para que a reação de combustão se dê é necessário que exista ar, mas mais precisamente oxigénio misturado com o combustível e que a proporção entre os dois esteja dentro de determinados limites. É então a relação ar / combustível que determina a proporção da mistura, ou seja, se é rica, pobre ou estequiométrica.

$$\frac{A}{F} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (9)$$

Onde:

m_a representa a massa de ar;

m_f representa a massa de combustível

\dot{m}_a representa o caudal mássico de ar

\dot{m}_f representa o caudal mássico de combustível

E em que o caudal mássico de ar é dado por:

$$\dot{m}_a = e_{vol} \rho V_d \quad (10)$$

Onde: e_{vol} representa a eficiência volumétrica.

Vamos agora definir a riqueza da mistura e o excesso de ar, respetivamente:

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{est}}{\frac{A}{F}} = \frac{\frac{F}{A}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{est}} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{\frac{A}{F}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{est}} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{est}}{\frac{F}{A}} \quad (12)$$

Se A/F foi quimicamente correta, diz-se que a mistura é estequiométrica e neste caso o combustível é todo gasto, assim como o oxigénio todo consumido. Neste caso $\phi = 1$ e $\lambda = 1$

Se a mistura for rica, a quantidade de combustível é superior à quantidade de ar e, por conseguinte, o combustível não é todo consumido. Isto cria um desperdício de combustível, não transformado em trabalho útil. Nas misturas ricas todo o ar é consumido, aumentando o binário. Neste caso $\phi > 1$ e $\lambda < 1$. Se, por outro lado, a mistura for pobre, a quantidade de combustível é inferior à quantidade de ar existente. Ou seja, todo o combustível será consumido e por isso o rendimento é melhor. Neste caso $\phi < 1$ e $\lambda > 1$.

3.2.5. Curvas características do motor

As curvas características dos motores permitem relacionar o binário, potência e consumo específico com a variação do regime de trabalho de um determinado motor (ver Fig. 24).

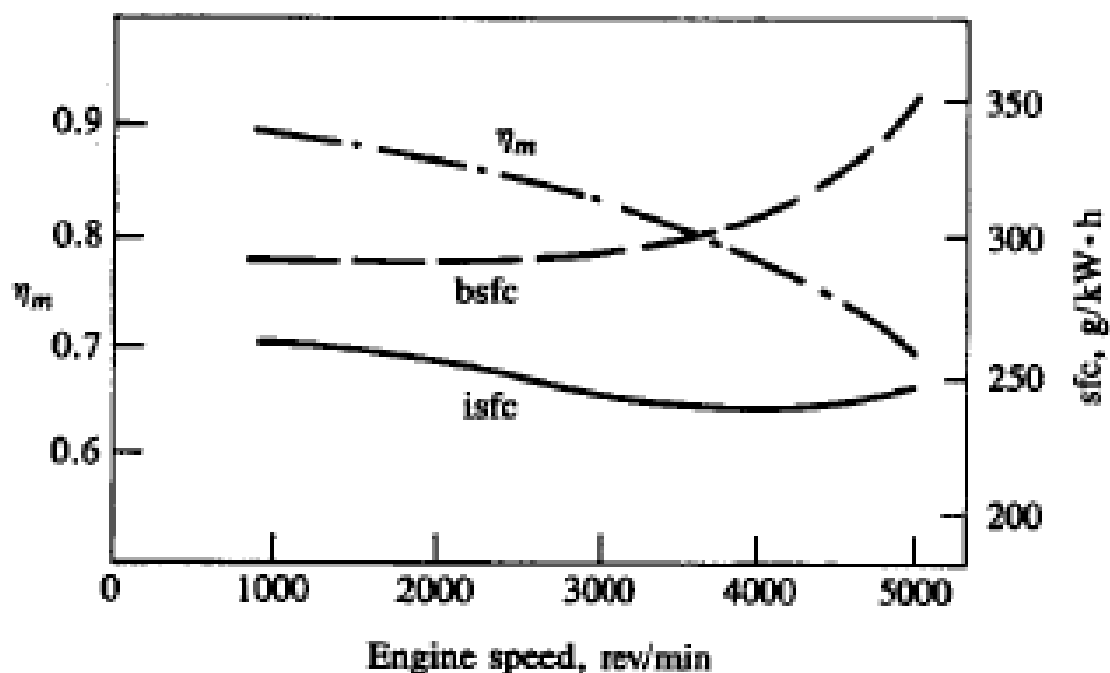


Figura 24 - Exemplo de um gráfico de curvas características de um motor [1].

3.2.5.1. Curva de binário

A curva ou gráfico do binário em relação ao regime de rotação do motor normalmente apresenta um comportamento parabólico com concavidade voltada para baixo, ou seja, coeficiente negativo, pois é diretamente proporcional à quantidade de ar aspirado pelo motor a cada ciclo.

A um regime de rotação baixo e, devido aos atrasos na abertura e fecho das válvulas de admissão e escape, os valores de binário são mais baixos. Isto tem como consequência a perda ou regresso da mistura para a válvula de admissão (caso mais agravado nos motores sem turbo ou não sobre alimentados), bem com do retorno dos gases de escape para a câmara de combustão.

Por outro lado e para um regime de operação a rotações superiores, a velocidade induz um efeito dinâmico direcional dos gases, tanto de admissão como de escape. Proporcionando assim

uma renovação melhor e mais eficiente de gases na câmara de combustão. Este efeito é sentido até ao ponto ótimo de binário que, de seguida, decai devido às perdas de carga nos coletores e válvulas tanto de admissão como de escape por culpa da perdas mecânicas associadas.

3.2.5.2. Curva de potência

A curva de potência apresenta um comportamento semelhante à curva de binário, uma vez que é função desta última. Somente o seu ponto máximo ocorre para um regime do motor superior. De notar que a potência não cresce infinitamente, pois esta tem um decréscimo de potência, perto do regime máximo de rotação do motor.

3.2.5.3. Curva de consumo específico

Ao contrário das curvas de binário e de potência, a curva de consumo específico não apresenta nenhuma relação entre estas, pois está relacionada com o rendimento térmico do motor. O seu ponto mínimo ocorre a um regime intermédio de operação. A curva do consumo específico é geralmente apresentada como uma parábola com concavidade voltada para cima, ou seja, de coeficiente positivo, isto é, decai até ao ponto mínimo e volta a subir posteriormente com o aumento do regime de rotação do motor. O valor de consumo específico mínimo costuma corresponder a um regime após o binário máximo.

Entre os fatores que influenciam a variação do consumo específico podemos referir: a razão de compressão e as perdas térmicas. A um regime de rotação superior, o consumo cresce devido ao rendimento térmico ser inferior.

3.2.6. Ciclos Termodinâmicos

Os ciclos termodinâmicos de um motor de combustão interna podem ser analisados segundo processos sequenciais como a admissão, compressão, combustão, expansão e escape. É importante referir que estes motores não operam em condições de ciclo fechado ou isolado, mas sim como um sistema aberto em que o fluido de trabalho (combustível) entra em condições diferentes das quais sai da câmara de combustão. É, no entanto, possível analisar este sistema aberto como um sistema fechado, i.e. como um ciclo termodinâmico, admitindo-se assim que as condições de entrada do fluido de trabalho são as mesmas que apresenta à saída.

3.2.6.1. Ciclo de Otto

O Ciclo de Otto ideal, proposto por Nicolaus Otto, em 1876, é praticamente inexequível devido às elevadas pressões e razões de compressão que requer. Sendo por isso difícil de executar, na prática, dadas as características que os materiais têm que possuir. O ciclo de Otto ideal é apresentado na Figura 25.

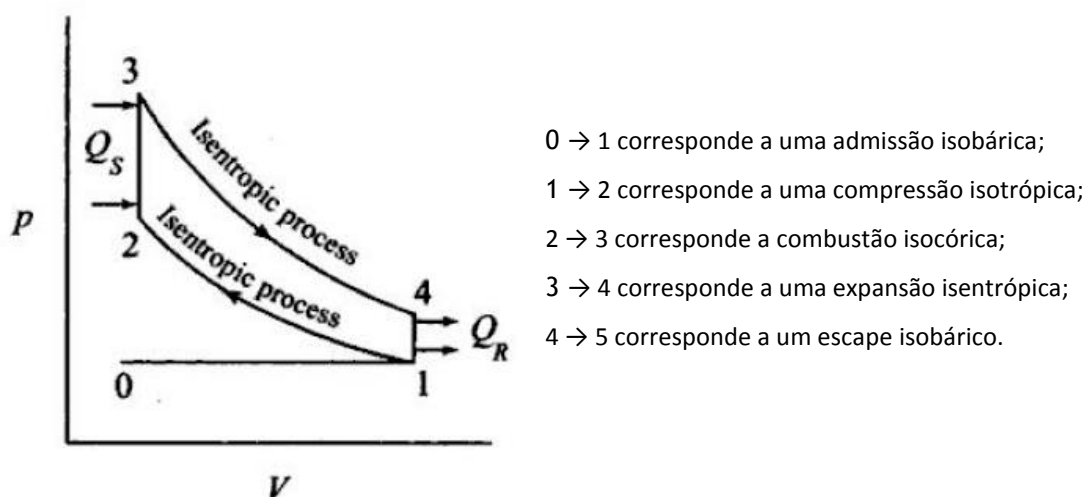


Figura 25 - Ciclo de Otto ideal [36].

3.2.6.2. Ciclo de Miller

O Ciclo de Miller, desenvolvido por Ralph Miller na década de 40 é baseado no Ciclo de Otto apresentando somente diferenças a nível da duração da expansão ser superior à de compressão. Fazendo assim uma sobre expansão aos gases de escape que seriam desperdiçados no Ciclo de Otto. Para isso recorre às seguintes estratégias:

1. Biela-manivela ajustável para conferir tempos de admissão e compressão inferiores aos tempos de expansão e escape;
2. Ou cursos ajustáveis com o mesmo fim.

Capítulo 4

4. Trabalho prático

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos e a forma como foram realizadas as simulações nos dois programas que neste capítulo são apresentadas.

4.1. Programas

4.1.1. Cam Analyzer

O Cam Analyzer é um programa desenvolvido pela empresa Performance Trends® que auxilia os construtores de motores a conceberem as suas árvores de cames de forma precisa. O programa disponibiliza inúmeras opções no que diz respeito à análise e manuseamento de dados das árvores de cames, como por exemplo: elevação, ângulos, *degree wheel data*. Por fim, este ainda permite a criação de ficheiros legíveis no programa Engine Analyzer cujos testes e simulações permitem averiguar o desempenho do motor, já com o conjunto das árvores de cames, e cria o ficheiro de fabrico para máquinas de comando numérico [37].

4.1.2. Engine Analyzer

O Engine Analyzer é um programa desenvolvido pela empresa Performance Trends® que ajuda os profissionais dos setores de construtores de motores, pilotos e engenheiros na compreensão e prevenção de diversos aspetos do desempenho de um motor de 4 tempos. Este *software* possui ainda diversas opções que permitem ao usuário realizar simulações de novos designs dos motores [38].

4.2. Motor original

De seguida serão apresentados os resultados das simulações realizadas com os dados originais do motor presente nos anexos I, II e III do presente trabalho (Tabela 2 e Figura 26).

Tabela 2 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor original.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	2.888	0.149	730.541
1000	5.301	0.552	416.062
1500	6.779	1.066	332.728
2000	7.294	1.529	311.438
2500	7.199	1.887	313.263
3000	6.982	2.192	319.954
3500	6.711	2.461	330.295
4000	6.413	2.685	342.460
4500	6.020	2.834	358.884
5000	5.518	2.886	379.565

Podemos constatar que o melhor desempenho do motor de origem ocorre às 2000 rpm onde este atinge o binário máximo de 7.294N.m, com um consumo específico de 311.438g/kW.h. No que toca à potência, podemos dizer que tem um crescimento mais acentuado para regimes mais baixos do que para os mais elevados (ver Fig. 26). Cilindrada: 118cc

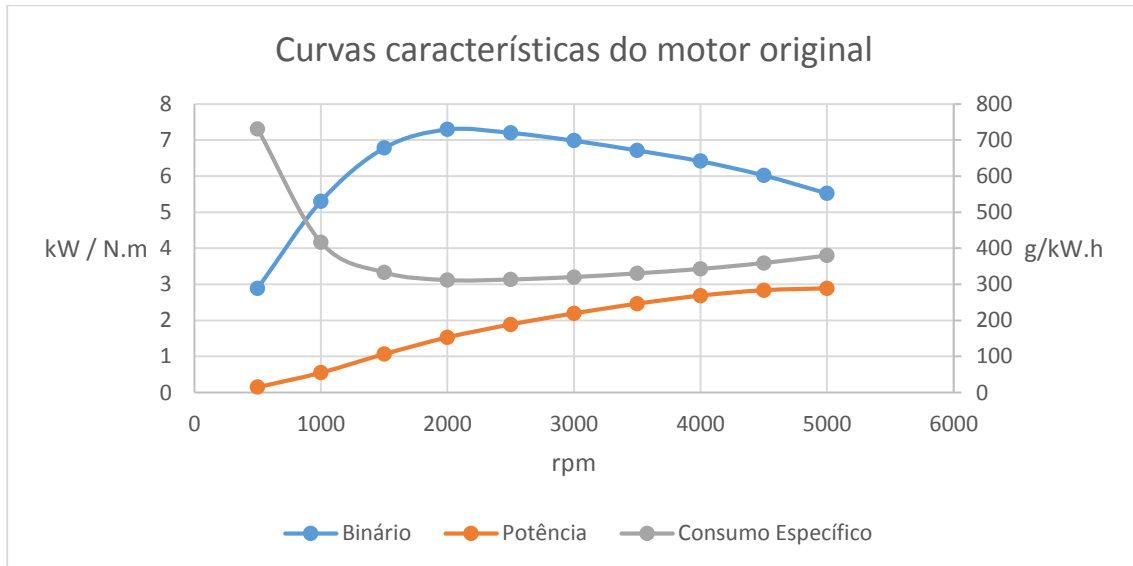


Figura 26 - Curvas características do motor original em estudo.

4.3. Casos em Estudo

4.3.1. Conjunto de Árvores de Cames

De seguida, apresentam-se as variações dos parâmetros considerados para a realização do presente trabalho: os conjuntos de árvores de cames considerados, os valores de diâmetros de cilindro e cursos do pistão considerados nas Tabelas 3, 4 e 5, respetivamente

Tabela 3 - Conjunto de árvores de cames analisadas.

Original
0.75 x Original
0.90 x Original
1.10 x Original
1.25 x Original
Alargado o período em 8°
Encurtado o período em 8°
Abrupto (pico máximo)

4.3.2. Valores de diâmetro de cilindro

Variações dos valores de diâmetros de cilindro considerados do presente trabalho

Tabela 4 - Dimensões consideradas para o diâmetro do cilindro.

Valores em in	Valores em cm
2.412	6.126
2.390	6.071
2.362*	5.999*
2.334	5.928
2.312	5.872

*valores originais

4.3.2. Valores de curso do pistão

Variações dos valores de cursos do pistão considerados do presente trabalho

Tabela 5 - Dimensões consideradas para o curso do pistão.

Valores em in	Valores em cm
1.703	4.326
1.681	4.270
1.653*	4.199*
1.625	4.128
1.603	4.072

*valores originais

4.4. Testes realizados

Na Tabela 6, encontram-se alguns dos testes realizados e dos quais foram considerados uma ordem lógica, de modo a facilitar o desenvolvimento do presente trabalho. Foram enumerados esses testes com o intuito de facilitar a leitura dos resultados mais relevantes presentes neste capítulo.

Tabela 6 - Testes realizados com árvores de cames, diâmetros de cilindro e cursos do pistão.

Total de Hipóteses			
Árvores de Cames	Diâmetro	Curso	Nº do Teste
Original	+	+	1
	-	-	2
	-	+	3
	+	-	4
0.75 x Original	+	+	5
	-	-	6
	-	+	7
	+	-	8
0.90 x Original	+	+	9
	-	-	10
	-	+	11
	+	-	12
1.10 x Original	+	+	13
	-	-	14
	-	+	15
	+	-	16
1.25 x Original	+	+	17
	-	-	18
	-	+	19
	+	-	20
Período Alargado	+	+	21
	-	-	22
	-	+	23
	+	-	24
Período Encurtado	+	+	25
	-	-	26
	-	+	27
	+	-	28
Abrupto	+	+	29
	-	-	30
	-	+	31
	+	-	32

Legenda: + → Incremento do parâmetro associado.
 - → Decremento do parâmetro associado.

4.5. Influência dos diferentes parâmetros modificados no desempenho do motor

Teste 1

A Tabela 7 e a Figura 27 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames original, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão considerados máximos para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 7 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor com as árvores de cames originais, diâmetro do cilindro e curso do pistão maximizados.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	3.430	0.179	660.589
1000	6.183	0.649	385.040
1500	7.511	1.178	322.995
2000	7.918	1.655	307.180
2500	7.742	2.028	311.438
3000	7.430	2.334	320.562
3500	7.104	2.602	331.511
4000	6.711	2.811	345.502
4500	6.196	2.923	364.966
5000	5.545	2.901	390.514

Podemos constatar que, o melhor desempenho do motor maximizado em diâmetro do cilindro e curso do pistão, ocorre às 2000 rpm onde este atinge o seu binário máximo de 7.918N.m, com um consumo específico de 307.180g/kW.h. No que toca à potência e, ao contrário do motor de origem, o seu pico máximo ocorre às 4500rpm e não às 5000rpm do motor de origem. É então possível melhorar estes três parâmetros em relação ao motor original (ver fig. 27). Cilindrada: 127.5cc

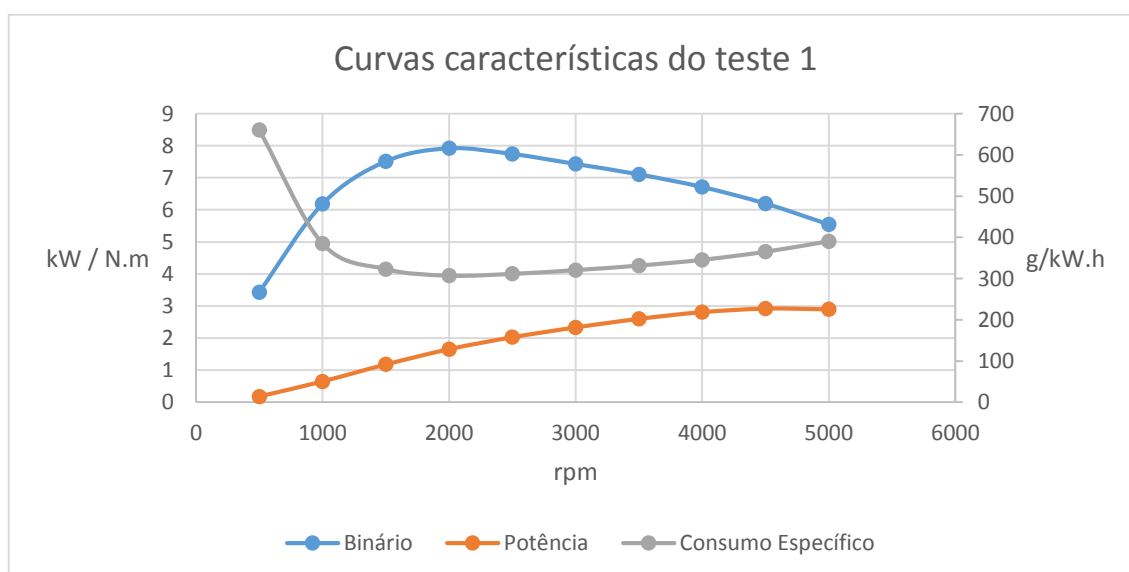


Figura 27 - Curvas características do motor com as árvores de cames originais com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão maximizados.

Teste 2

A Tabela 8 e a Figura 28 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames original, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão mínimos considerados para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 8 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm do motor com as árvores de cames originais, com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão minimizados.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	2.400	0.127	816.917
1000	4.501	0.470	453.775
1500	5.979	0.940	350.368
2000	6.603	1.380	319.954
2500	6.644	1.737	317.521
3000	6.508	2.043	321.170
3500	6.291	2.304	329.686
4000	6.047	2.535	340.635
4500	5.762	2.714	354.017
5000	5.396	2.826	371.049

Podemos constatar que neste caso o binário máximo ocorre às 2500rpm (ao contrário dos casos anteriores que se verificava às 2000rpm) e toma o valor de 6.644N.m com um consumo específico de 317.521 g/kW.h (ver fig. 28). Todos os parâmetros demonstram piores valores do que nos casos anteriores. Cilindrada: 110.3cc

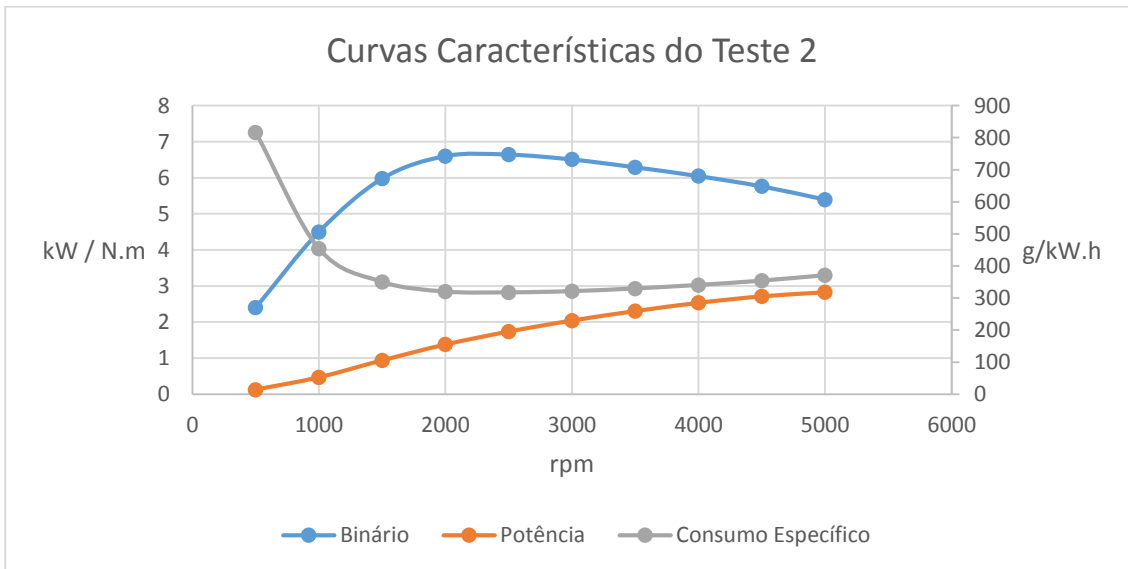


Figura 28 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com ambos diâmetro do cilindro e curso do pistão minimizados.

Teste 3

A Tabela 9 e a Figura 29 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames original, com o diâmetro do cilindro mínimo e o curso do pistão máximo para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 9 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro minimizado e curso do pistão maximizado.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	2.807	0.149	741.490
1000	5.152	0.537	422.753
1500	6.644	1.044	335.161
2000	7.159	1.499	313.263
2500	7.077	1.849	315.088
3000	6.860	2.155	321.779
3500	6.576	2.409	332.119
4000	6.277	2.632	344.285
4500	5.925	2.789	360.100
5000	5.450	2.849	380.782

Podemos constatar que o melhor desempenho do motor volta a ocorrer às 2000 rpm, onde este atinge o seu binário máximo de 7.159N.m, com um consumo específico de 313.263g/kW.h (ver Fig. 29). No que toca à potência tem um crescimento semelhante ao caso do motor de origem mas valores ligeiramente abaixo desse mesmo caso. Cilindrada: 117.2cc

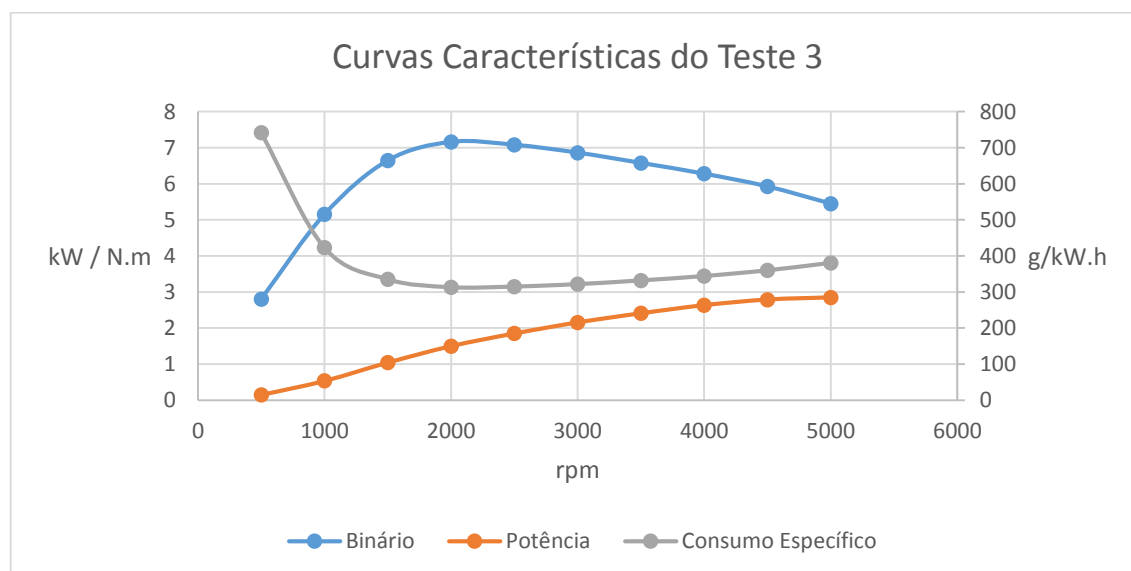


Figura 29 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com diâmetro do cilindro minimizado e curso do pistão maximizado.

Teste 4

A Tabela 10 e a Figura 30 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames original, com o diâmetro do cilindro máximo e o curso do pistão mínimo para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 10 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	2.942	0.157	722.025
1000	5.423	0.567	411.196
1500	6.901	1.081	330.903
2000	7.403	1.551	310.221
2500	7.335	1.916	312.046
3000	7.091	2.230	318.737
3500	6.820	2.498	328.470
4000	6.508	2.722	341.244
4500	6.101	2.878	357.059
5000	5.586	2.923	377.740

Podemos constatar que o melhor desempenho do motor volta a ocorrer às 2000 rpm onde este atinge o seu binário máximo de 7.403N.m com um consumo específico de 310.221g/kW.h (ver Fig. 30). No que toca à potência, esta apresenta melhores resultados do que qualquer um dos casos anteriores. O que pode levar a dizer que a potência está mais ligada ao incremento de diâmetro, em detrimento do incremento de curso. Cilindrada: 120.0cc

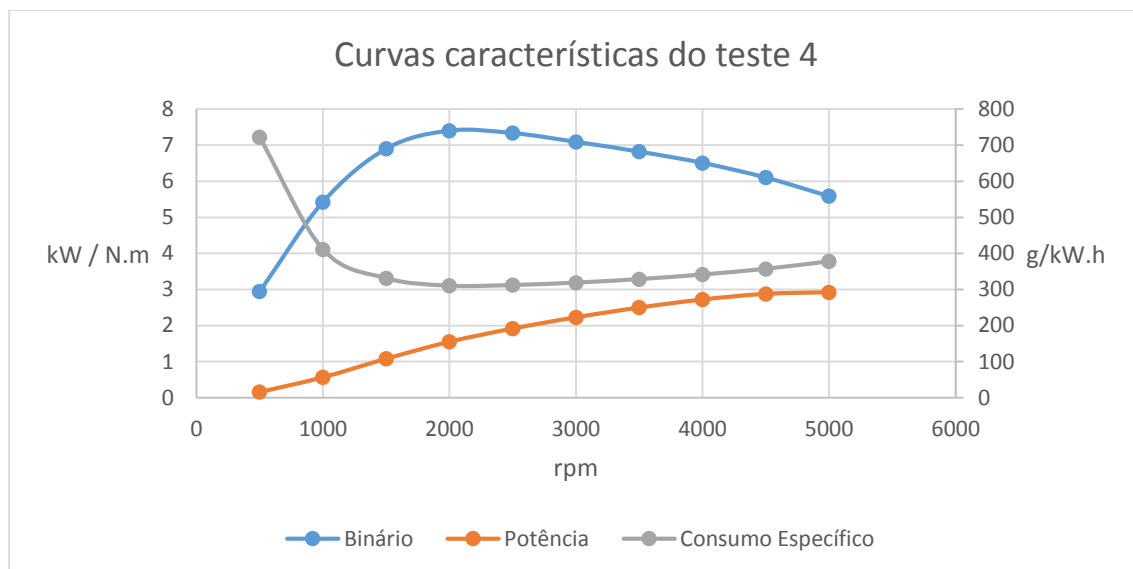


Figura 30 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso minimizado.

Teste com aumento dos tempos de admissão e escape em 8°, mas com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais

A Tabela 11 e a Figura 31 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames alargado em 8°, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão originais para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 11 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm dos conjuntos das árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	3.173	0.164	716.551
1000	5.871	0.611	406.329
1500	7.457	1.171	325.428
2000	8.026	1.685	303.530
2500	8.121	2.125	299.272
3000	7.796	2.453	307.180
3500	7.416	2.714	318.737
4000	7.010	2.938	332.119
4500	6.440	3.035	352.801
5000	5.681	2.975	381.998

Podemos constatar que o melhor desempenho do motor ocorre às 2500rpm onde este atinge o seu binário máximo de 8.121N.m, com um consumo específico de 299.272g/kW.h (ver Fig. 31). No que toca à potência, esta apresenta melhores resultados do que o motor original. Melhora em relação ao motor original em toda a gama de rpm. Cilindrada: 118.7cc

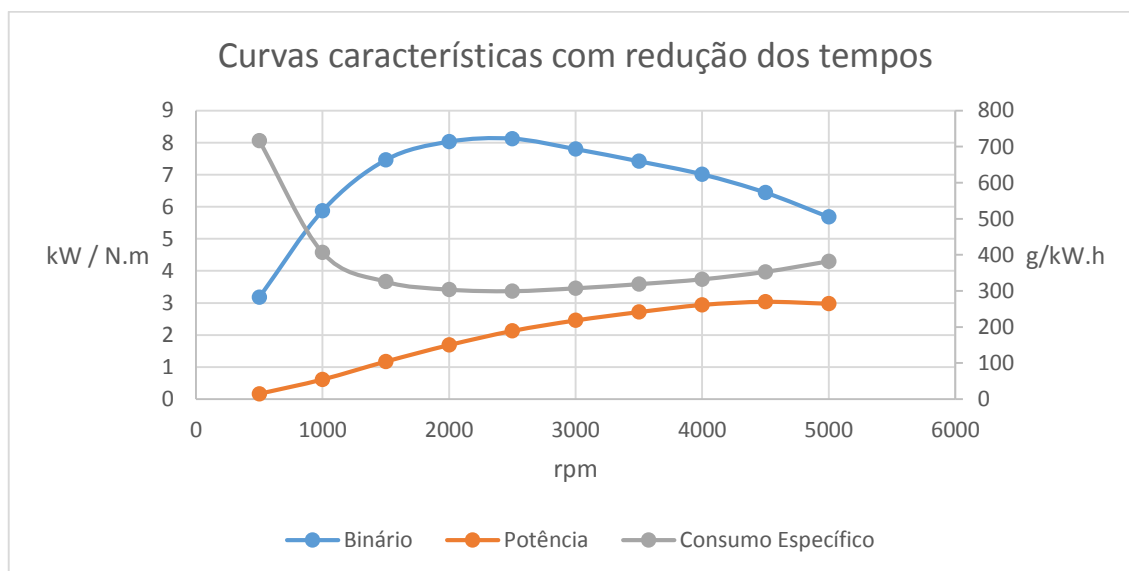


Figura 31 - Curvas características do motor com as árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.

Teste com redução dos tempos de admissão e escape em 8°, mas com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais

A Tabela 12 e a Figura 32 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames reduzido em 8°, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão originais para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 12 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm dos conjuntos das árvores de cames reduzidas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	3.173	0.164	717.767
1000	5.871	0.619	406.329
1500	7.484	1.178	325.428
2000	8.054	1.685	303.530
2500	8.162	2.140	299.272
3000	7.837	2.461	307.180
3500	7.471	2.737	317.521
4000	7.050	2.953	332.119
4500	6.481	3.057	352.801
5000	5.722	2.998	381.998

Podemos constatar que o melhor desempenho do motor volta a ocorrer às 2500 rpm onde este atinge o seu binário máximo de 8.161N.m, com um consumo específico de 299.272g/kW.h (ver Fig. 32). Apresenta melhores resultados a nível de binário, potência e consumo, em relação ao motor original, bem como melhorias em todos os mesmos parâmetros como é o caso do aumento dos tempos de admissão e escape, por pequenas diferenças. Cilindrada: 118.7cc

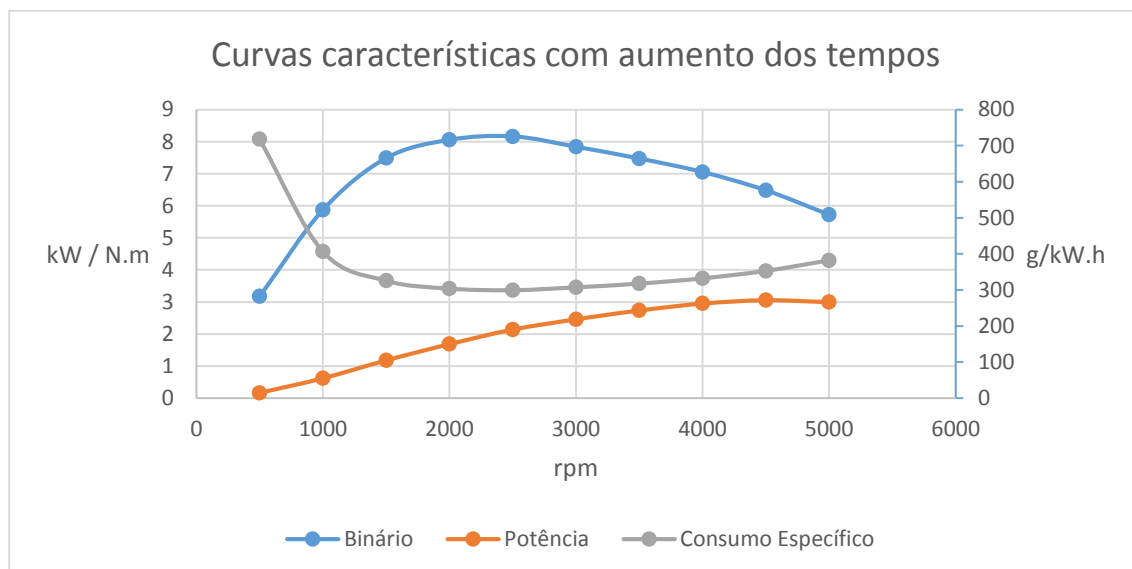


Figura 32 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames aumentadas em 8° com diâmetro do cilindro e curso do pistão originais.

Melhor solução encontrada para baixas rpm

Motor com árvores de cames reduzidas em 25%, em relação às árvores de cames originais
Teste 5

A Tabela 13 e a Figura 33 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames reduzidas em 25%, em relação às árvores de cames originais, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão máximos para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 13 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado com uma redução de 25% às árvores de cames originais.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	3.634	0.194	606.453
1000	6.305	0.656	366.791
1500	7.498	1.178	312.655
2000	7.796	1.633	298.664
2500	7.525	1.969	304.747
3000	7.104	2.230	315.088
3500	6.630	2.431	328.470
4000	6.074	2.550	346.110
4500	5.355	2.528	372.266
5000	4.501	2.364	410.587

Este caso melhora de forma notória o desempenho do motor a baixas rotações, perdendo no entanto desempenho a rotações mais elevadas, quando comparado ao motor de origem, tanto como ao motor com as cames de origem, mas incrementadas em diâmetro do cilindro e curso do pistão (ver Fig. 33). Cilindrada: 127.5cc

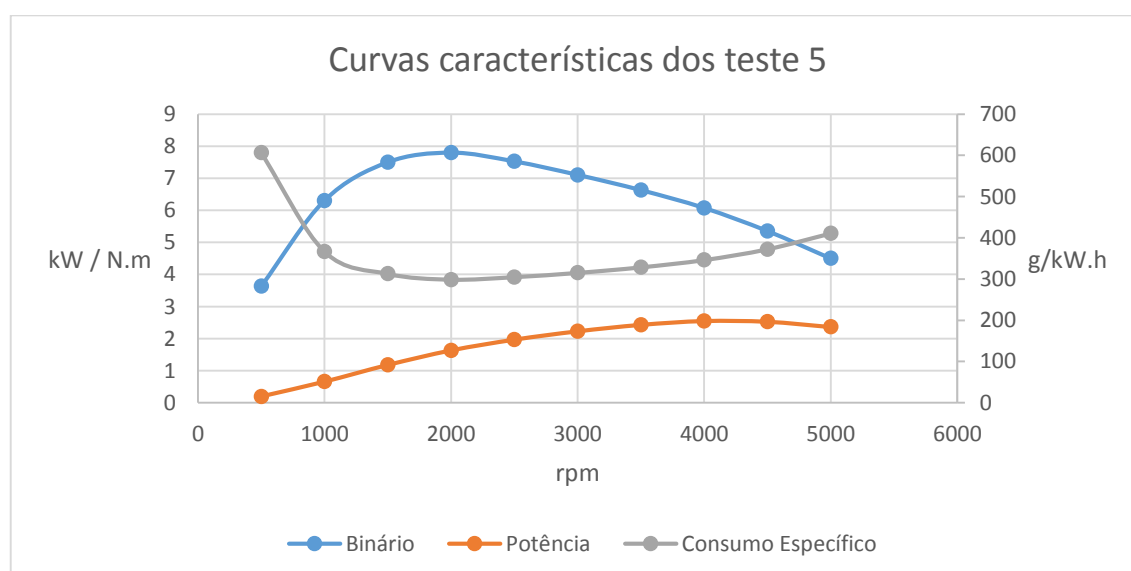


Figura 33 - Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames reduzidas em 25% em relação às árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso maximizado.

Melhor solução encontrada para altas rpm

Motor com árvores de cames aumentadas em 25%, em relação às árvores de cames originais

Teste 17

A Tabela 14 e a Figura 34 dizem respeito ao teste realizado com o conjunto de árvores de cames aumentadas em 25%, em relação às árvores de cames originais, com o diâmetro do cilindro e o curso do pistão máximos para a realização do presente trabalho (consultar 4.3 e 4.4).

Tabela 14 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado com incrementos de 25% às árvores de cames originais.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	3.145	0.164	729.933
1000	5.938	0.619	405.721
1500	7.362	1.156	335.161
2000	7.837	1.641	317.521
2500	7.728	2.021	320.562
3000	7.484	2.356	329.078
3500	7.240	2.655	338.811
4000	6.955	2.916	350.976
4500	6.576	3.095	366.791
5000	6.020	3.154	389.298

Este caso melhora de forma notória o desempenho do motor a rotações mais elevadas, perdendo no entanto desempenho a rotações mais baixas, quando comparado ao motor de origem, assim como ao motor com as cames de origem, mas incrementadas em diâmetro do cilindro e curso do pistão. Tanto o binário, como a potência e o consumo sofrem melhorias em relação ao motor original para baixas rpm, mas é nas rpm mais elevadas que essa vantagem é mais notória (ver Fig. 34). Cilindrada: 127.5cc

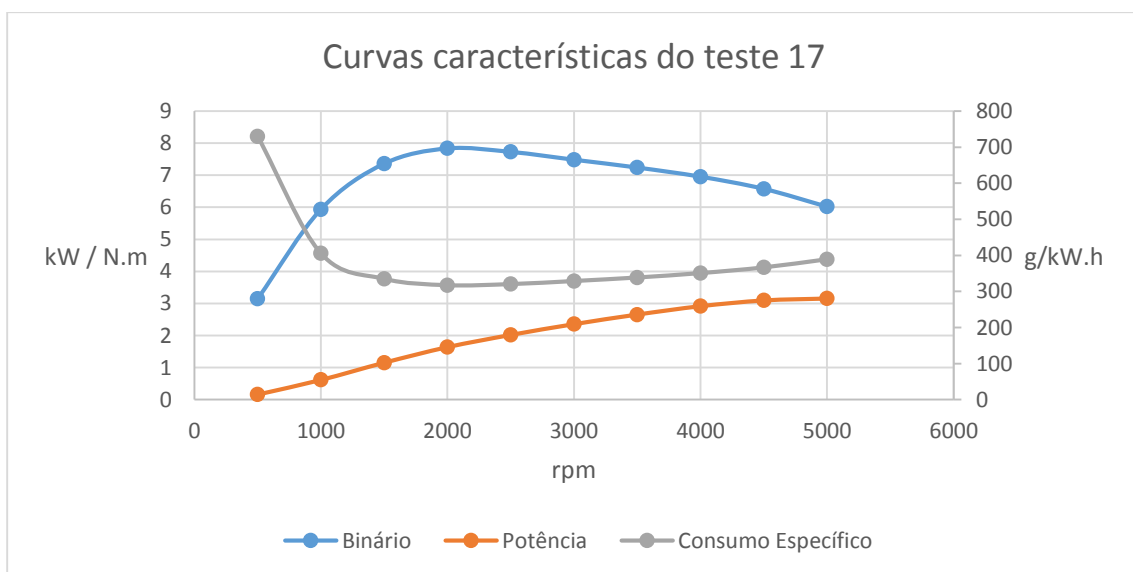


Figura 34- Curvas caraterísticas do motor com as árvores de cames incrementadas em 25% em relação às árvores de cames originais com diâmetro maximizado e curso maximizado.

Melhor solução encontrada para toda a gama de rpm dada a restrição do comprimento da biela

Para as árvores de cames de origem e um diâmetro de cilindro de 3in (7.62cm) para um curso do pistão de 2in (5.08cm) os resultados são apresentados na Tabela 15 e na Figura 35.

Tabela 15 - Binário, potência e consumo específico em função dos rpm com diâmetro do cilindro maximizado e curso do pistão minimizado.

Engine_rpm	Binário_N.m	Potência_kW	ISFC_g/kW.h
500	11.389	0.597	364.966
1000	14.914	1.559	289.540
1500	14.561	2.289	292.581
2000	13.585	2.849	303.530
2500	12.270	3.214	320.562
3000	10.264	3.229	350.976
3500	7.850	2.878	402.071
4000	5.450	2.282	496.354
4500	3.268	1.544	696.478
5000	1.288	0.679	1469.598

Podemos verificar que de modo completamente diferente das simulações realizadas até agora, este caso remete o seu melhor desempenho para as 1000rpm cuja binário é 14.914N.m, com um consumo específico de 289.540g/kW.h (ver Fig. 35). A potência cresce até atingir a sua máxima cota de 3.229kW. Ao contrário da generalidade das simulações realizadas até agora, onde a potência crescia em todo o domínio de rpm. Cilindrada: 231.7cc

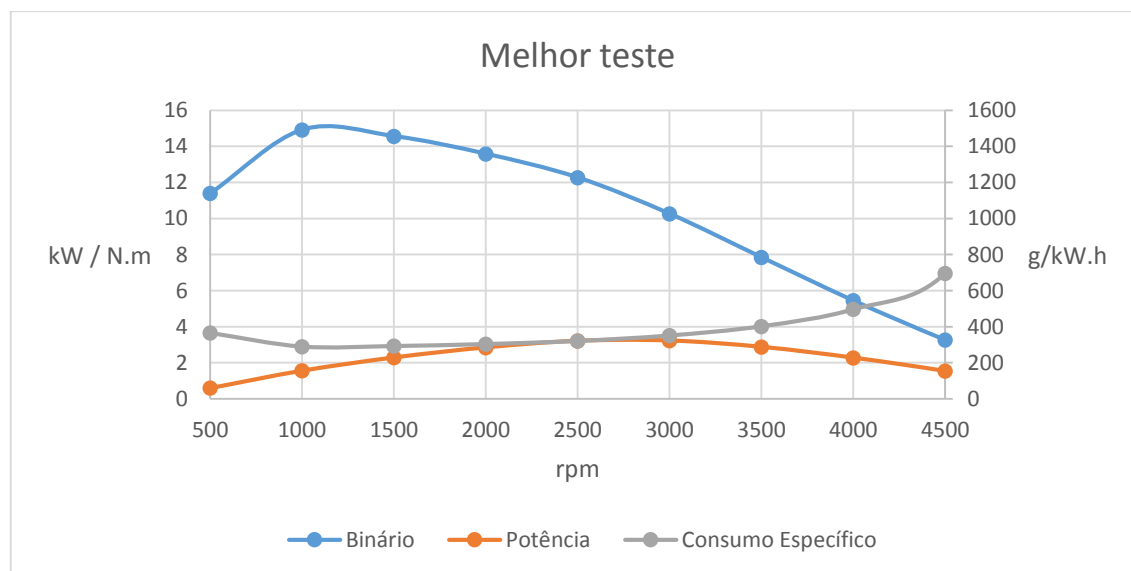


Figura 35 - Curvas características do motor com as árvores de cames originais com um incremento de diâmetro e curso próximo do limitado pela biela original do motor.

4.6. Discussão dos resultados

Quadros de Resumo

As Tabelas 16 e 17 apresentam as conclusões retiradas da análise dos resultados das simulações efetuadas.

Tabela 16 - Quadro Resumo das combinações possíveis entre diâmetro do cilindro e curso do pistão do motor em comparação com o motor original.

Caso	Alteração no Diâmetro	Alteração no Curso	Observações / Comentários
1	+	+	Melhora o desempenho do motor a toda a gama de rpm, sendo essa diferença mais notória a baixas rpm.
2	-	-	Piora o desempenho do motor a toda a gama de rpm.
3	-	+	Piora o desempenho do motor em quase toda a gama de rpm, exceto a rotações mais altas onde apresenta melhores resultados.
4	+	-	Melhora o desempenho do motor a toda a gama de rpm, sendo essa diferença mais notória a baixas rpm.

Legenda: + → Incremento do parâmetro associado.
- → Decremento do parâmetro associado.

Para os mesmos conjuntos de árvores de cames, fazendo a variação de diâmetros do cilindro e curso de pistão e tendo em conta os desempenhos por simulação podemos tirar a seguinte conclusão: Por ordem decrescente de desempenho: Caso 1 > Caso 4 > Caso 3 > Caso 2.

Tabela 17 - Quadro Resumo das combinações possíveis feitas às árvores de cames originais do motor.

Alteração nas Árvores de Cames	Observações / Comentários
+	Melhora o desempenho do motor a altas rpm e perde desempenho em baixas rpm quando comparado com o motor original.
-	Melhora o desempenho do motor a baixas rpm e perde desempenho em altas rpm quando comparado com o motor original.
Redução dos tempos de admissão e escape em 8°	Melhora o desempenho do motor em toda a gama de rpm tanto do motor original como do caso do aumento dos tempos de admissão e escape, embora não muito em relação a esta última.
Aumento dos tempos de admissão e escape em 8°	Melhora o desempenho do motor em toda a gama de rpm do motor original.
Vértice mais repentino junto à elevação máxima de ambas as árvores de cames	Diferenças pouco significativas no desempenho mas por uma questão de manutenção, conceção e durabilidade considero esta hipótese pouco viável.

Legenda: + → Incremento do parâmetro associado.
 - → Decremento do parâmetro associado.

Capítulo 5

5. Conclusão

Após as simulações realizadas com a ajuda do Cam Analyzer e Engine Analyzer podemos afirmar que é possível aumentar o desempenho do motor original.

É importante referir que as alterações do regime do motor têm que ter sempre feitas tendo em conta em que tipo de condições e em que regimes o motor irá operar. Uma vez que as simulações permitiram aumentar, sim, o desempenho do motor original, mas para regimes diferentes.

Assim sendo, se o objetivo for melhorar o desempenho de um motor a baixas rotações, pelos resultados obtidos deverá optar-se por um incremento de dimensões do cilindro e do curso do pistão, acompanhado por uma redução das árvores de cames originais.

Se, por sua vez, o objetivo for melhorar o desempenho do motor a altas rotações, terá que se optar por um incremento de dimensões do diâmetro cilindro e do curso do pistão, mas desta feita acompanhado de um incremento das árvores de cames.

De notar que, para o melhor caso testado, a alteração do conjunto das árvores de cames proporcionava resultados pouco coerentes e por isso não viáveis.

Para os mesmos conjuntos de árvores de cames, fazendo a variação de diâmetros do cilindro e curso de pistão e tendo em conta os desempenhos por simulação podemos tirar a seguinte conclusão: Por ordem decrescente de desempenho: Caso 1 > Caso 4 > Caso 3 > Caso2 (consultar Tabela 16).

No caso da redução dos tempos de admissão e escape em 8°, este apresenta melhores resultados do que o caso do motor original bem como no caso do aumento dos tempos de admissão e escape em 8°, embora com uma diferença quase insignificante.

É ainda importante salientar que os programas utilizados para as simulações utilizam métodos simplistas de dissipação de energia térmica e não têm em consideração o peso final do motor, pelo que não foi possível comprovar a melhoria da relação peso / potência do motor. Mais estudos terão que ser realizados nesse sentido para comprovar de forma mais completa a viabilidade de implantação deste tipo de motor para missões de UAV.

6. Referências bibliográficas

- [1] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engines Fundamentals*. 1988.
- [2] K. Dalamagkidis, K. Valavanis, and L. Piegl, *Aviation History and Unmanned Flight*. 2012.
- [3] J. F. Keane and S. S. Carr, "A Brief History of Early Unmanned Aircraft," *John Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 32, no. 3, pp. 558-571, 2013.
- [4] R. Feng, J. Yang, D. Zhang, B. Deng, J. Fu, J. Liu, and X. Liu, "Experimental study on SI engine fuelled with butanol-gasoline blend and H₂O addition," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 192-200, 2013.
- [5] G. Fontana and E. Galloni, "Variable valve timing for fuel economy improvement in a small spark-ignition engine," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 96-105, 2009.
- [6] O. A. Kutlar, H. Arslan, and A. T. Calik, "Skip cycle system for spark ignition engines: An experimental investigation of a new type working strategy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 2, pp. 370-379, 2007.
- [7] M. Pan, G. Shu, J. Pan, H. Wei, D. Feng, Y. Guo, and Y. Liang, "Performance comparison of 2-methylfuran and gasoline on a spark-ignition engine with cooled exhaust gas recirculation," *Fuel*, vol. 132, pp. 36-43, 2014.
- [8] C. D. Rakopoulos and C. N. Michos, "Development and validation of a multi-zone combustion model for performance and nitric oxide formation in syngas fueled spark ignition engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2924-2938, 2008.
- [9] R. R. Raine, C. R. Stone, and J. Gould, "Modeling of nitric oxide formation in spark ignition engines with a multizone burned gas," *Combust. Flame*, vol. 102, no. 3, pp. 241-255, 1995.
- [10] K. Kumar, Y. Zhang, C.-J. Sung, and W. J. Pitz, "Autoignition response of n-butanol and its blends with primary reference fuel constituents of gasoline," *Combust. Flame*, 2015.
- [11] F. N. Alasfour, "NO_x Emission from a spark ignition engine using 30% Iso-butanol-gasoline blend: Part 1—Preheating inlet air," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 18, no. 5, pp. 245-256, 1998.
- [12] C. Park, Y. Choi, C. Kim, S. Oh, G. Lim, and Y. Moriyoshi, "Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas," *Fuel*, vol. 89, no. 8, pp. 2118-2125, 2010.

- [13] F. X. Xie, X. P. Li, X. C. Wang, Y. Su, and W. Hong, "Research on using EGR and ignition timing to control load of a spark-ignition engine fueled with methanol," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, no. 1, pp. 1084-1091, 2013.
- [14] M. a R. Sadiq Al-Baghdadi and H. a K. Shahad Al-Janabi, "Improvement of performance and reduction of pollutant emission of a four stroke spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline fuel mixture," *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 1, pp. 77-91, 2000.
- [15] a-F. M. Mahrous, a. Potrzebowski, M. L. Wyszynski, H. M. Xu, a. Tsolakis, and P. Luszcz, "A modelling study into the effects of variable valve timing on the gas exchange process and performance of a 4-valve DI homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 2, pp. 393-398, 2009.
- [16] F. Zhao, M. C. Lai, and D. L. Harrington, "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 25, no. 5, pp. 437-562, 1999.
- [17] A. C. Alkidas, "Combustion advancements in gasoline engines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 11, pp. 2751-2761, 2007.
- [18] X. Gu, Z. Huang, J. Cai, J. Gong, X. Wu, and C. F. Lee, "Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR," *Fuel*, vol. 93, no. x, pp. 611-617, 2012.
- [19] L. Wei, W. Ying, Z. Longbao, and Su Ling, "Study on improvement of fuel economy and reduction in emissions for stoichiometric gasoline engines," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 17-18, pp. 2919-2923, 2007.
- [20] J. P. Liu, J. Q. Fu, C. Q. Ren, L. J. Wang, Z. X. Xu, and B. L. Deng, "Comparison and analysis of engine exhaust gas energy recovery potential through various bottom cycles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, no. 1, pp. 1219-1234, 2013.
- [21] R. Rotondi and G. Bella, "Gasoline direct injection spray simulation," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 168-179, 2006.
- [22] L. Zigan, I. Schmitz, a. Flügel, M. Wensing, and a. Leipertz, "Structure of evaporating single- and multicomponent fuel sprays for 2nd generation gasoline direct injection," *Fuel*, vol. 90, no. 1, pp. 348-363, 2011.
- [23] S. N. Soid and Z. a. Zainal, "Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques - A review," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 724-741, 2011.

- [24] H. Liu, M. Xie, and D. Wu, "Simulation of a porous medium (PM) engine using a two-zone combustion model," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 14-15, pp. 3189-3197, 2009.
- [25] P. Patel and P. P. Rathod, "Performance Analysis Of Four Stroke Internal Combustion Engine With Supercharger - Review Study," vol. 3, no. 2, 2013.
- [26] W. Li, Z. Liu, Z. Wang, Y. Xu, and J. Wang, "Experimental and theoretical analysis of effects of N₂, O₂ and Ar in excess air on combustion and NO_x emissions of a turbocharged NG engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 97, pp. 253-264, 2015.
- [27] E. Galloni, G. Fontana, and R. Palmaccio, "Numerical analyses of EGR techniques in a turbocharged spark-ignition engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 39, pp. 95-104, 2012.
- [28] F. Millo, S. Luisi, F. Borean, and A. Stroppiana, "Numerical and experimental investigation on combustion characteristics of a spark ignition engine with an early intake valve closing load control," *Fuel*, vol. 121, pp. 298-310, 2014.
- [29] M. Cucchi and S. Samuel, "Influence of the exhaust gas turbocharger on nano-scale particulate matter emissions from a GDI spark ignition engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 76, pp. 167-174, 2015.
- [30] S. M. Begg, M. P. Hindle, T. Cowell, and M. R. Heikal, "Low intake valve lift in a port fuel-injected engine," *Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2042-2050, 2009.
- [31] E. Sher and T. Bar-Kohany, "Optimization of variable valve timing for maximizing performance of an unthrottled SI engine-a theoretical study," *Energy*, vol. 27, no. 8, pp. 757-775, 2002.
- [32] K. Nagaya, H. Kobayashi, and K. Koike, "Valve timing and valve lift control mechanism for engines," *Mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 121-129, 2006.
- [33] T. Leroy, J. Chauvin, and N. Petit, "Motion planning for experimental air path control of a variable-valve-timing spark ignition engine," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 12, pp. 1432-1439, 2009.
- [34] N. A. Press, *Uninhabited Air Vehicles*. 2000.
- [35] S. Wezeman, "Policy Department External Policies DEVELOPMENTS IN THE EUROPEAN UNION UAV S AND UCAV S : SECURITY AND DEFENCE," *October*, no. October, 2007.
- [36] V Ganesan, *Internal Combustion Engines*. .
- [37] P. Trends, *Cam Analyzer User ' s Manual*. 2012.

- [38] P. Trends and B. Livonia, *Engine Analyzer Pro User 's Manual*. 1997.
- [39] L. Honda Motor Co., "Honda GX 120 Owner's Manual," 2005.
- [40] M. Keveney, "Animated Engines," *Animated Engines*, 2015. [Online]. Available: www.animatedengines.com/. [Accessed: 27-Jun-2015].

Anexos

Anexo I - Dados do motor Original do fabricante

Tabela 18 - Dados do motor [39].

GX 120	
Tipo de motor	Motor de 4 tempos arrefecido a ar, alimentado a gasolina, OHV, cilindro inclinado 25°, eixo horizontal e manga em ferro fundido.
Cilindro x curso	60 x 42
Cilindrada	118 cc
Razão de compressão	8.5 : 1
Combustível	Gasolina
Sistema de distribuição de combustível	Carburador
Capacidade do tanque de combustível	2 l
Capacidade do tanque de óleo	0.6 l
Dimensões	305 x 346 x 329
Peso vazio	13 kg

Anexo II - Dados do Cam Analyzer do Motor Original

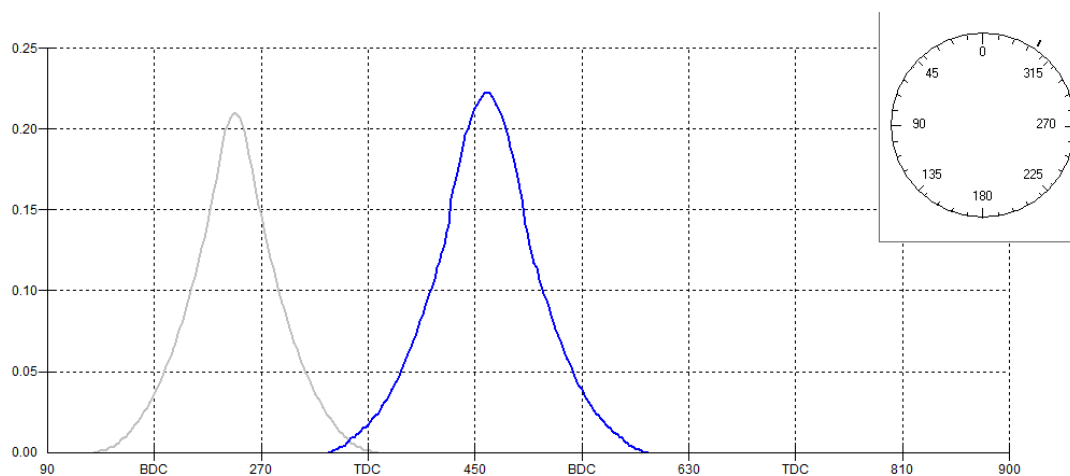


Figura 36 - Disposição gráfica das árvores de cames e da respectiva *Degree Wheel*. O gráfico a cinzento corresponde ao escape e o gráfico a azul corresponde à admissão.

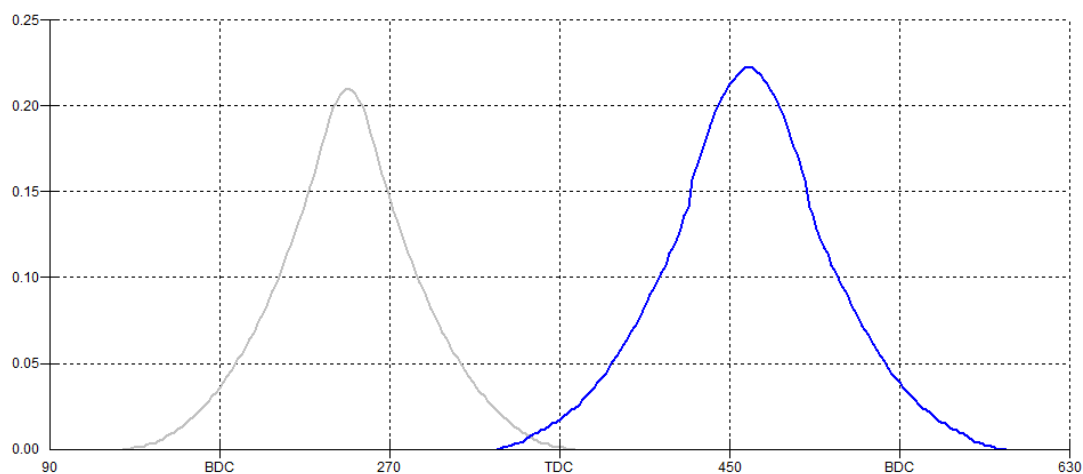


Figura 37 - Elevação das árvores de cames dados os ângulos da mesma sem *Degree Wheel*. Novamente O gráfico a cinzento corresponde ao escape e o gráfico a azul corresponde à admissão.

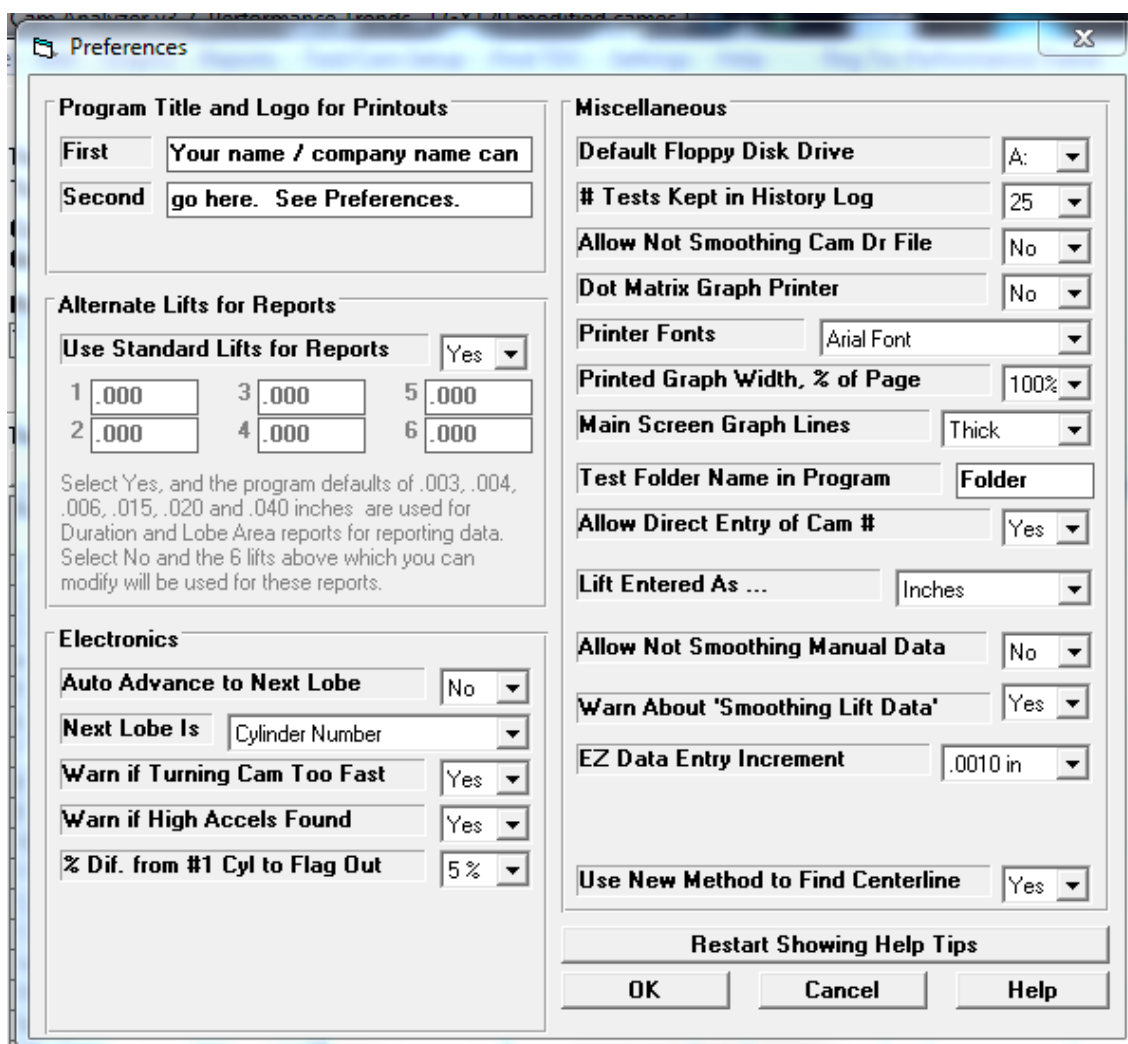


Figura 38 - Preferências utilizadas.

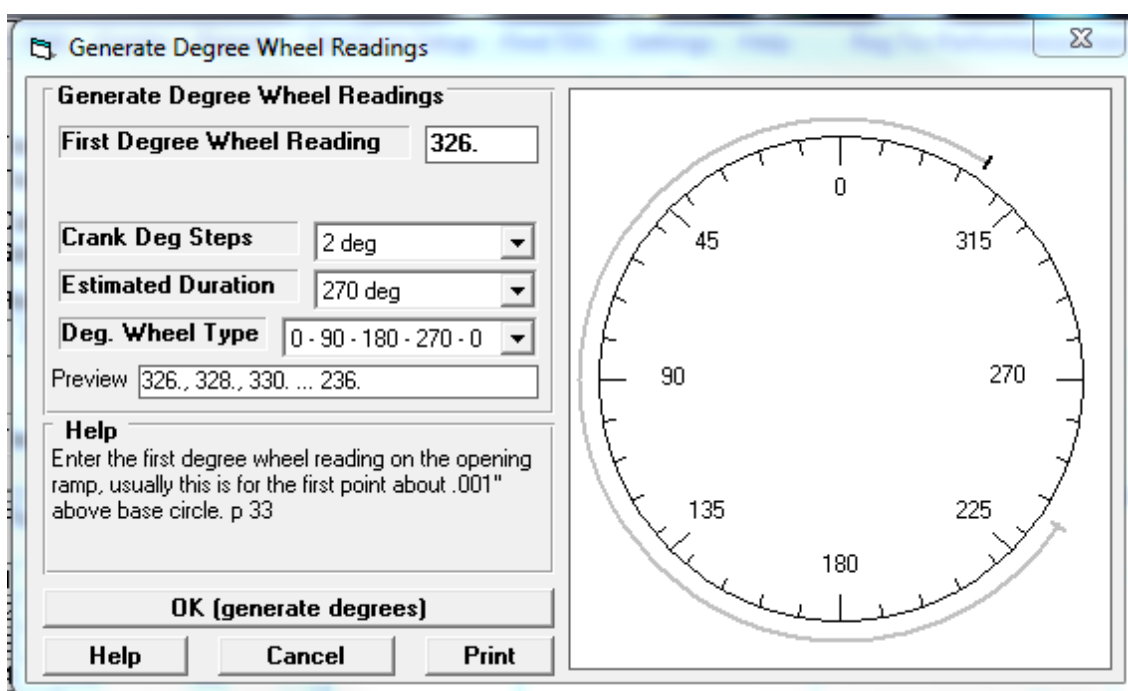


Figura 39 - Leitura da Degree Wheel utilizada.

Tabela 19 - Valores referentes às arvores de cames de admissão e da de escape inseridas no programa.

Admissão			Escape		
Ângulo	Elevação		Ângulo	Elevação	
[°]	[mm]	[in]	[°]	[mm]	[in]
326	0	0.000	128	0	0.000
328	0.01	0.000	130	0.001	0.000
330	0.03	0.001	132	0.006	0.000
332	0.05	0.002	134	0.013	0.001
334	0.06	0.002	136	0.022	0.001
336	0.08	0.003	138	0.034	0.001
338	0.1	0.004	140	0.049	0.002
340	0.11	0.004	142	0.066	0.003
342	0.14	0.006	144	0.086	0.003
344	0.17	0.007	146	0.109	0.004
346	0.22	0.009	148	0.134	0.005
348	0.24	0.009	150	0.162	0.006
350	0.27	0.011	152	0.192	0.008
352	0.3	0.012	154	0.225	0.009
354	0.34	0.013	156	0.261	0.010
356	0.37	0.015	158	0.3	0.012
358	0.4	0.016	160	0.342	0.013
0	0.44	0.017	162	0.386	0.015
2	0.48	0.019	164	0.433	0.017
4	0.53	0.021	166	0.484	0.019
6	0.58	0.023	168	0.537	0.021
8	0.62	0.024	170	0.593	0.023
10	0.67	0.026	172	0.652	0.026
12	0.73	0.029	174	0.715	0.028
14	0.79	0.031	176	0.78	0.031
16	0.85	0.033	178	0.849	0.033
18	0.91	0.036	180	0.922	0.036
20	0.98	0.039	182	0.997	0.039
22	1.05	0.041	184	1.076	0.042
24	1.13	0.044	186	1.159	0.046
26	1.2	0.047	188	1.245	0.049
28	1.29	0.051	190	1.335	0.053
30	1.36	0.054	192	1.429	0.056
32	1.47	0.058	194	1.526	0.060
34	1.55	0.061	196	1.628	0.064
36	1.64	0.065	198	1.733	0.068
38	1.74	0.069	200	1.843	0.073
40	1.84	0.072	202	1.957	0.077
42	1.94	0.076	204	2.075	0.082
44	2.05	0.081	206	2.198	0.087
46	2.17	0.085	208	2.326	0.092

Simulação de desempenho de um motor de quatro tempos de ignição por faísca

48	2.29	0.090
50	2.39	0.094
52	2.5	0.098
54	2.61	0.103
56	2.73	0.107
58	2.9	0.114
60	2.98	0.117
62	3.13	0.123
64	3.24	0.128
66	3.46	0.136
68	3.58	0.141
70	3.99	0.157
72	4.13	0.163
74	4.31	0.170
76	4.46	0.176
78	4.62	0.182
80	4.81	0.189
82	4.97	0.196
84	5.08	0.200
86	5.2	0.205
88	5.31	0.209
90	5.4	0.213
92	5.47	0.215
94	5.54	0.218
96	5.6	0.220
98	5.63	0.222
100	5.66	0.223
102	5.63	0.222
104	5.6	0.220
106	5.54	0.218
108	5.47	0.215
110	5.4	0.213
112	5.31	0.209
114	5.2	0.205
116	5.08	0.200
118	4.97	0.196
120	4.81	0.189
122	4.62	0.182
124	4.46	0.176
126	4.31	0.170
128	4.13	0.163
130	3.99	0.157
132	3.58	0.141
134	3.46	0.136
136	3.24	0.128

210	2.458	0.097
212	2.595	0.102
214	2.737	0.108
216	2.884	0.114
218	3.037	0.120
220	3.195	0.126
222	3.358	0.132
224	3.528	0.139
226	3.703	0.146
228	3.884	0.153
230	4.072	0.160
232	4.266	0.168
234	4.466	0.176
236	4.674	0.184
238	4.889	0.192
240	5.045	0.199
242	5.164	0.203
244	5.249	0.207
246	5.303	0.209
248	5.327	0.210
250	5.303	0.209
252	5.249	0.207
254	5.164	0.203
256	5.045	0.199
258	4.889	0.192
260	4.674	0.184
262	4.466	0.176
264	4.266	0.168
266	4.072	0.160
268	3.884	0.153
270	3.703	0.146
272	3.528	0.139
274	3.358	0.132
276	3.195	0.126
278	3.037	0.120
280	2.884	0.114
282	2.737	0.108
284	2.595	0.102
286	2.458	0.097
288	2.326	0.092
290	2.198	0.087
292	2.075	0.082
294	1.957	0.077
296	1.843	0.073
298	1.733	0.068

Simulação de desempenho de um motor de quatro tempos de ignição por faísca

138	3.13	0.123
140	2.98	0.117
142	2.9	0.114
144	2.73	0.107
146	2.61	0.103
148	2.5	0.098
150	2.39	0.094
152	2.29	0.090
154	2.17	0.085
156	2.05	0.081
158	1.94	0.076
160	1.84	0.072
162	1.74	0.069
164	1.64	0.065
166	1.55	0.061
168	1.47	0.058
170	1.36	0.054
172	1.29	0.051
174	1.2	0.047
176	1.13	0.044
178	1.05	0.041
180	0.98	0.039
182	0.91	0.036
184	0.85	0.033
186	0.79	0.031
188	0.73	0.029
190	0.67	0.026
192	0.62	0.024
194	0.58	0.023
196	0.53	0.021
198	0.48	0.019
200	0.44	0.017
202	0.4	0.016
204	0.37	0.015
206	0.34	0.013
208	0.3	0.012
210	0.27	0.011
212	0.24	0.009
214	0.22	0.009
216	0.17	0.007
218	0.14	0.006
220	0.11	0.004
222	0.1	0.004
224	0.08	0.003
226	0.06	0.002

300	1.628	0.064
302	1.526	0.060
304	1.429	0.056
306	1.335	0.053
308	1.245	0.049
310	1.159	0.046
312	1.076	0.042
314	0.997	0.039
316	0.922	0.036
318	0.849	0.033
320	0.78	0.031
322	0.715	0.028
324	0.652	0.026
326	0.593	0.023
328	0.537	0.021
330	0.484	0.019
332	0.433	0.017
334	0.386	0.015
336	0.342	0.013
338	0.3	0.012
340	0.261	0.010
342	0.225	0.009
344	0.192	0.008
346	0.162	0.006
348	0.134	0.005
350	0.109	0.004
352	0.086	0.003
354	0.066	0.003
356	0.049	0.002
358	0.034	0.001
360	0.022	0.001
362	0.013	0.001
364	0.006	0.000
366	0.001	0.000
368	0	0.000

228	0.05	0.002
230	0.03	0.001
232	0.01	0.000
234	0	0.000
236	0	0.000

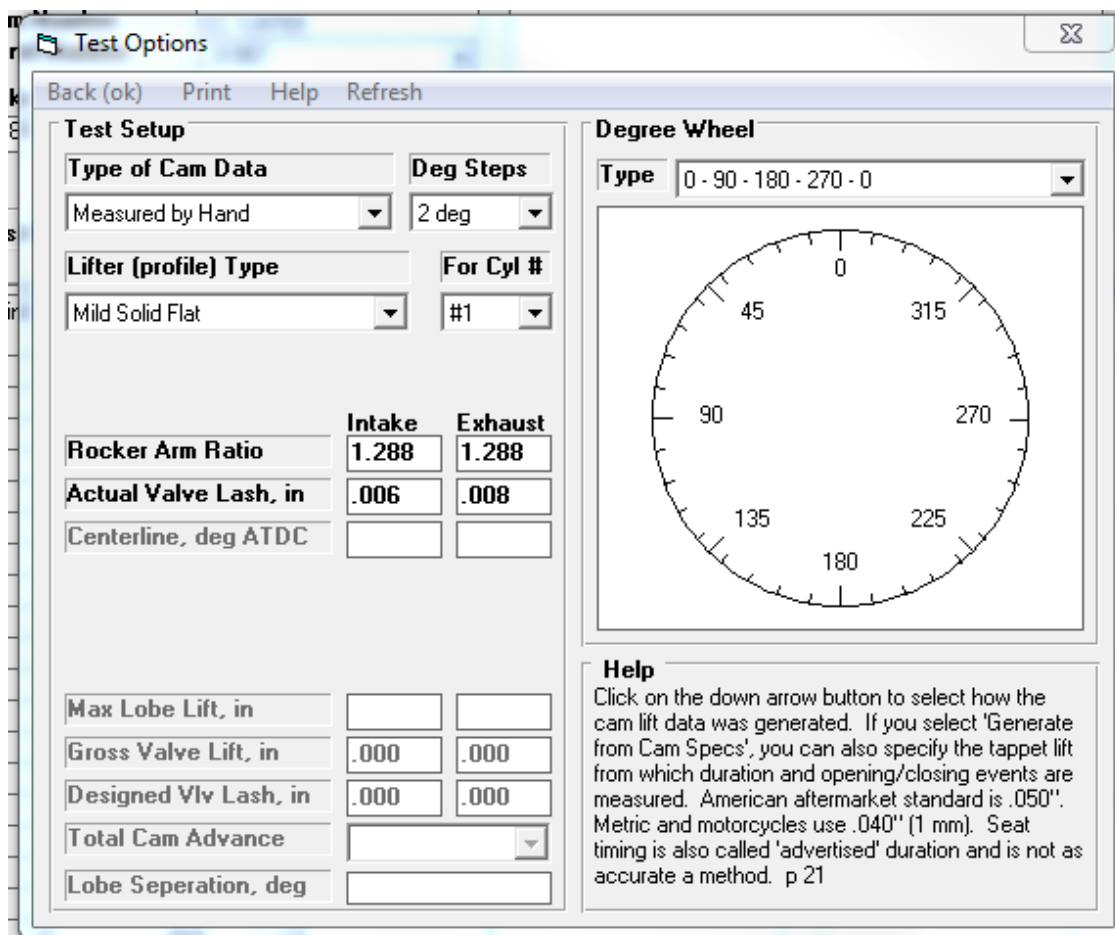


Figura 40 - Opções de teste.

Anexo III - Dados do Engine Analyzer do Motor Original

Short Block Specs for: GX 120 modified by Navio

Block/Pistons/Rods			
Bore, in	2.362	Clc	
Stroke, in	1.653	Clc	
# of Cylinders	1		
Piston Rings	3 Standard Tension		
Rod Length, in	2.111		
Piston Skirt	Typical Skirt		
Bearing Size	1	Clc	
Piston Top	No Coating		
Cyl Leakage	Typical Leakage		

Help
Cylinder bore measured in inches. p 13

Accessories			
Cooling Fan Type	Disabled because selected Air Cooled in Calc. Perf. conditions screen		
Water Pump & Drive			

Engine+Dyno Inertia / Crank Design			
Lb x Ft^2	.25	Clc	
Design	Typical Windage		

Calculated Specs			
	Cu In	CCs	Liters
Cylinder Volume	7.24	118.7	0.119
Engine Volume	7.24	118.7	0.119
Current C.R.	8.50	8.50	8.50
Chamber Volume	0.97	15.8	0.016
Bore/Stroke: 1.429	Rod/Stroke: 1.277		

Comments
GX 120 modified by Navio

OK Help Retrieve from Library Save to Library Print

Figura 41 - Short Block Specs.

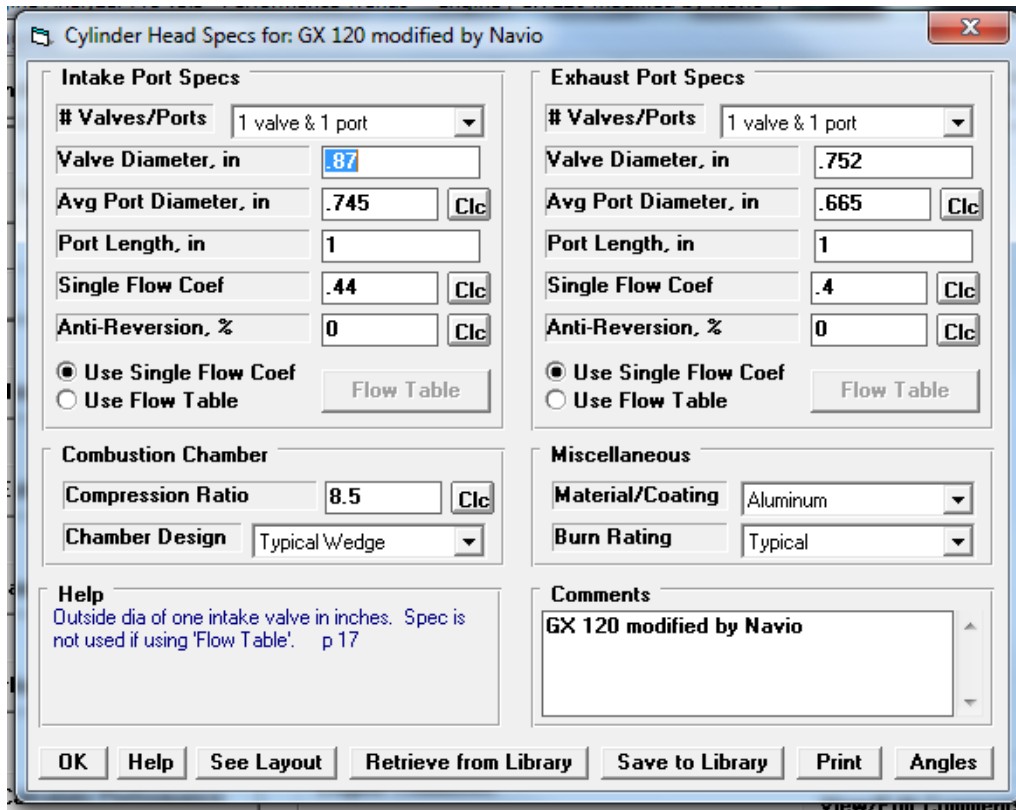


Figura 42 - Cylinder Head Specs.

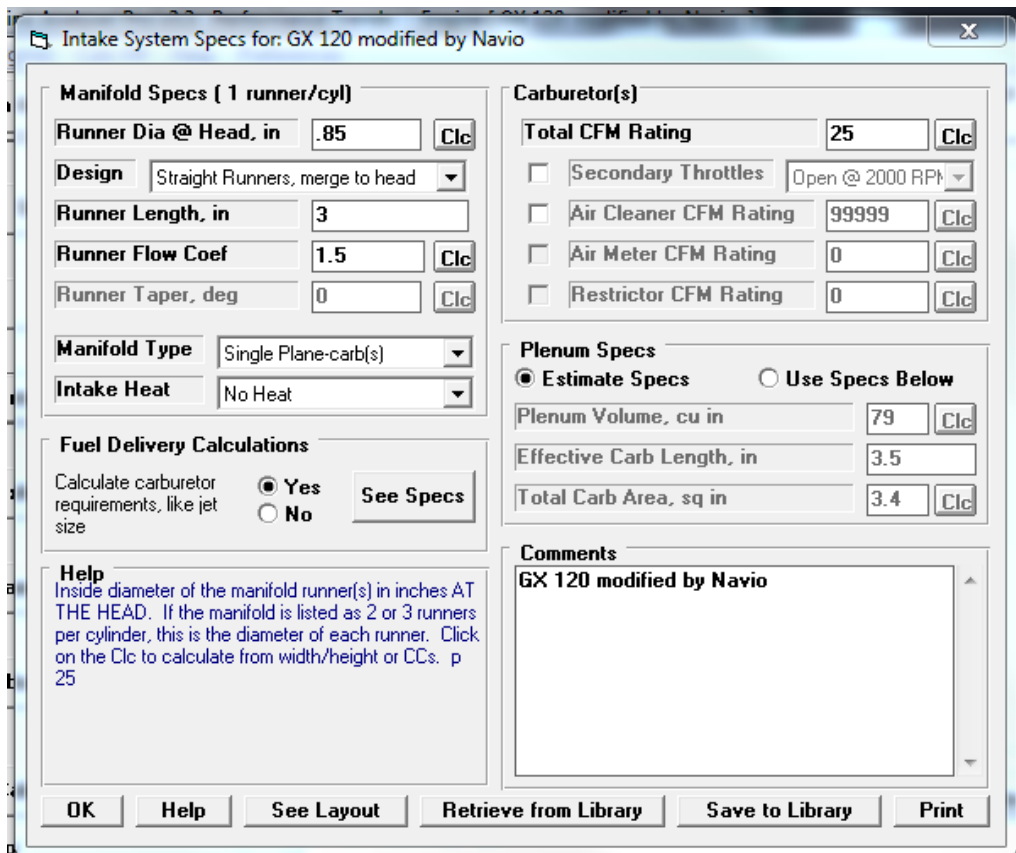


Figura 43 - Intake System Specs.

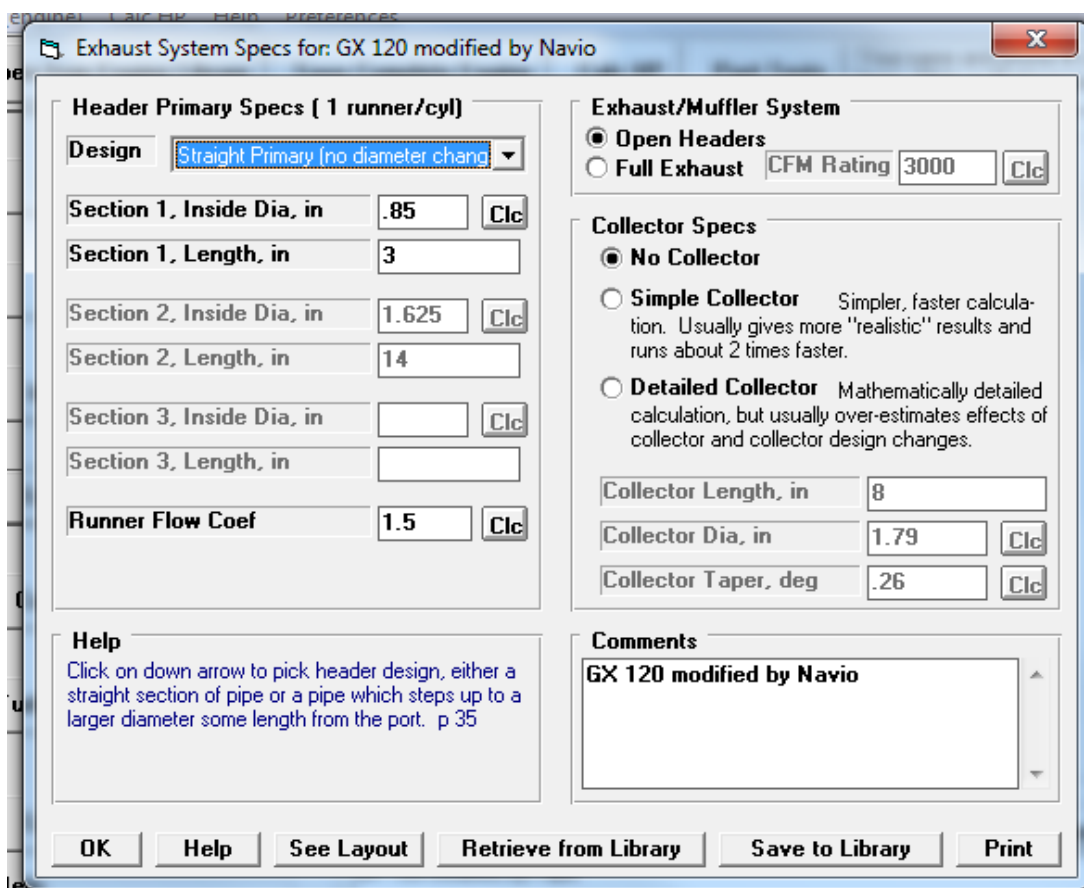


Figura 44 - Exhaust System Specs.

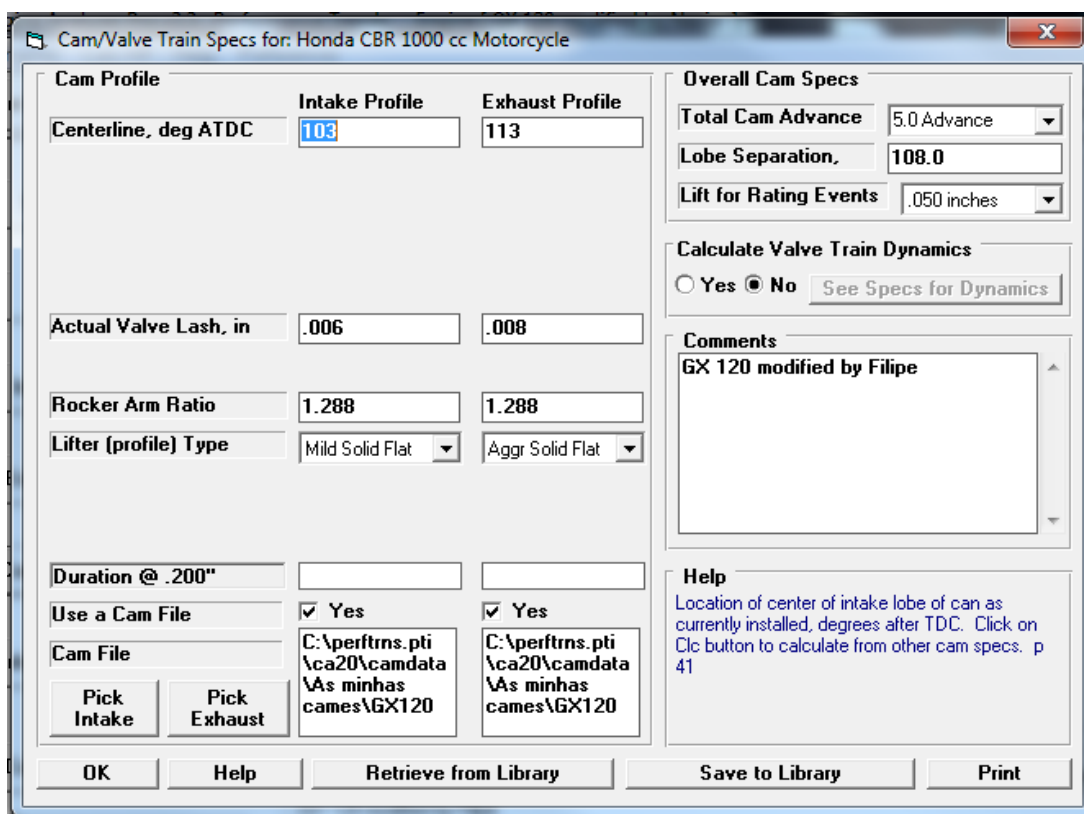


Figura 45 - Cam/Valve Train Specs.

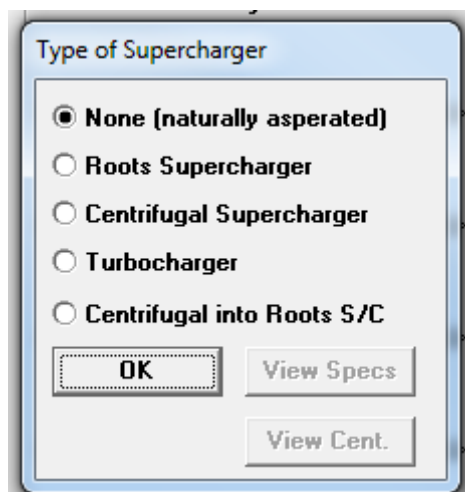


Figura 46 - Turbo/Supercharger Specs.

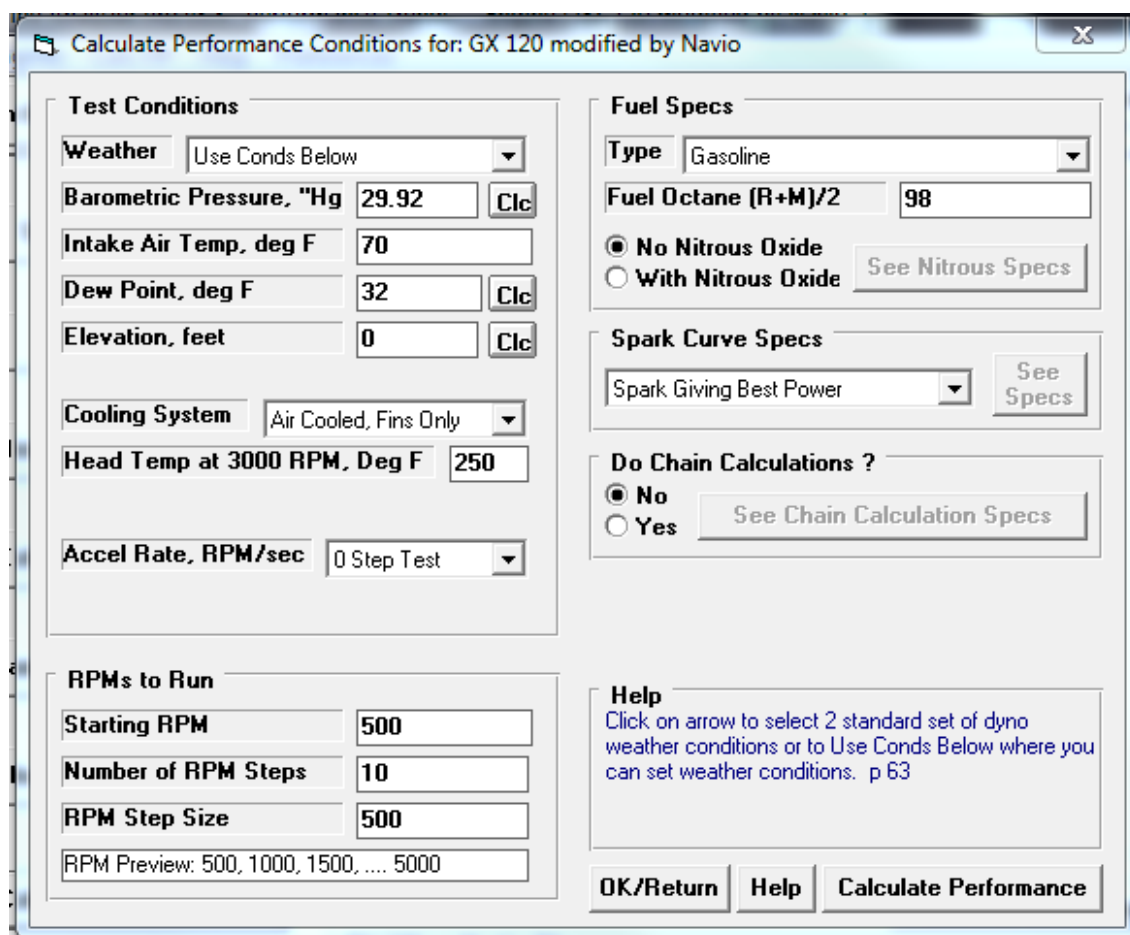


Figura 47 - Calculate Performance Conditions.