



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento de software para simulação e otimização de consumo de veículos

Aplicação à Shell Eco-Marathon realizada em Londres

Sérgio Filipe Pinto Ferreira

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

Orientador: Prof. Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

Covilhã, junho de 2017

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que de uma maneira ou de outra contribuíram para o meu sucesso acadêmico.

Resumo

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um software, em Matlab com o intuito de prever e otimizar o consumo de combustível de veículos para a prova elaborada pela Shell, denominada de Shell Eco-Marathon, que se realiza todos os anos entre vários países europeus, cujo objetivo é otimizar o consumo de combustível num veículo contruído para a competição. Para além do consumo, o software também deverá fornecer dados bastante importantes à análise do desempenho do veículo, tais como velocidade, forças, pontos da pista onde o motor esta ligado, entre outros.

O trabalho desenvolvido é assente em três fases distintas. Numa primeira fase foi elaborada uma recolha bibliográfica dos principais fatores que influenciam o consumo de veículos, bem como dos principais modelos para o estimar. A recolha bibliográfica recaiu também sobre as principais equações que governam a modelação de veículos. A segunda fase do trabalho consistiu no desenvolvimento do software, tanto na vertente do algoritmo de cálculo como na vertente da interface gráfica. Por último, numa terceira fase foram efetuadas diversas simulações da prova para diferentes valores de entrada, de modo a aferir a veracidade dos valores obtidos.

Palavras-chave

Shell Eco_Marathon, otimização, consumo de combustível, modelação.

Abstract

The present work describes the development of a software in Matlab to predict and optimize the fuel consumption of vehicles for a Shell competition, called the Shell Eco-Marathon, which takes place every year among several European countries, whose objective is to optimize the fuel consumption in a vehicle built for the competition. In addition to the consumption, the software will also provide important data for the analysis of vehicle performance, such as vehicle speed, forces, points of the track where the engine is running, and so on.

The work is based on three distinct phases. In the first phase, it was elaborated a bibliographical collection of the main factors influencing the consumption of vehicles, as well as the main models for estimating it. The bibliographic collection also covers the main equations that govern vehicle modeling. The second phase consisted in software development, both in terms of the calculation algorithm and in the graphical interface of the software. Finally, in a third phase, several software simulations were performed for different input values, in order to verify the accuracy of the values obtained.

Keywords

Shell Eco_Marathon, optimization, fuel consumption, modeling.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Shell Eco_Marathon	1
1.3	Objetivos	2
1.4	Estrutura do documento.....	2
2	Revisão bibliográfica.....	3
2.1	Fatores que influenciam o consumo de veículos	4
2.1.1	Fatores relativos ao trânsito e condução.....	4
2.1.2	Fatores relativos à estrada	4
2.1.3	Fatores relativos ao veículo.	4
2.2	Modelo para estimar o consumo de veículos.....	5
2.2.1	Modelo instantâneo do consumo de combustível	5
2.2.2	Modelo do consumo de combustível por ciclos.....	6
2.2.3	Modelo do consumo baseado na velocidade do percurso.....	6
2.2.4	Modelo de consumo baseado na velocidade média.....	7
3	Estado da arte em dinâmica de veículos	9
3.1	Introdução	9
3.2	Forças aplicadas no veículo.....	10
3.2.1	Forças de atrito aerodinâmico	11
3.2.2	Forças de atrito de rolamento	12
3.2.3	Forças de atrito em curva.....	17
3.2.4	Força gravítica	19
3.3	Motor.....	19
4	Algoritmo de otimização	23
4.1	Simplificações utilizadas	23
4.2	Modos de funcionamento.....	24
4.2.1	Velocidade	24
4.2.2	Iterativo	24
4.2.3	Manual	25
4.3	Critérios de otimização	25
4.3.1	Critério da velocidade	25
4.3.2	Critério da energia final.....	25
4.3.3	Critério da energia mínima	25
4.4	Fluxo do software	26
4.4.1	Fluxo principal do software.....	26
4.4.2	Fluxo do algoritmo de cálculo.....	29

4.4.3	Fluxograma dos critérios de energia	36
5	Resultados da simulação do software	39
5.1	Valores de entrada	39
5.1.1	Motor	39
5.1.2	Veículo	42
5.1.3	Pista.....	42
5.2	Resultado iterativo	42
5.2.1	Resultados à plena carga.....	42
5.2.2	Resultados a 75% da carga	43
5.3	Resultados detalhados	44
6	Conclusões e trabalhos futuros	53
	Referências	55
	Anexos	57
	Anexo A: Fluxogramas do software.....	59
	Anexo B: Lista de variáveis para a criação de gráficos	65
	Anexo C: Tabelas de valores de entrada referentes à pista	67
	Anexo D: Percursos da prova encolhidos	69
	Anexo E: Manual do utilizador do software	73

Lista de Figuras

Figura 2.1. Consumo final de energia na UE a 28 membros, segundo dados do Eurostat de 2014, baseado em toneladas equivalentes de petróleo. [3]	3
Figura 3.1. Sistema de eixos de um veículo segundo SAE. [8]	9
Figura 3.2. Evolução do coeficiente de atrito aerodinâmico ao longo dos anos. [9]	12
Figura 3.3. Variação do coeficiente de rolamento com a temperatura do pneu. [8].....	14
Figura 3.4. Variação do coeficiente de rolamento com a pressão no interior do pneu. [8]	14
Figura 3.5. Variação do coeficiente de rolamento com a velocidade para 3 tipos de pneus. [8]	15
Figura 3.6. Variação do coeficiente de rolamento para diferentes pneus. [8]	15
Figura 3.7. Variação do coeficiente de rolamento para diferentes ângulos de escorregamento e diferentes velocidades. [8]	16
Figura 3.8. Geometria de viragem de veículos [8]......	17
Figura 3.9. Ângulo de escorregamento (α) da roda. [8]	18
Figura 3.10. Força lateral do veículo ou força centrípeta em função do ângulo de escorregamento [8]......	18
Figura 3.11. Ciclo de combustão de motor de combustão a quatro tempos. [14]	20
Figura 3.12. Curvas características de um motor a gasolina. [8]	21
Figura 3.13. Exemplo mapa do motor para o consumo em função das rotações e da percentagem de pressão do acelerador. [15].....	22
Figura 4.1. Excerto do fluxograma principal do software, 1ª parte.	26
Figura 4.2. Excerto do fluxograma principal do software, 2ª parte.	28
Figura 4.3. Excerto do fluxograma do software principal do programa, 3ª parte.	28
Figura 4.4. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 1ª parte.	29
Figura 4.5. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 2ª parte.	30
Figura 4.6. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 3ª parte.	31
Figura 4.7. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 4ª parte.	32
Figura 4.8. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 5ª parte.	34
Figura 4.9. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 6ª parte.	35
Figura 4.10. Excerto do fluxograma do critério de energia mínima, 1ª parte.	36
Figura 4.11. Excerto do fluxograma do critério da energia mínima, 2ª parte.	37
Figura 4.12. Excerto do fluxograma do critério da energia mínima, 3ª parte.	38
Figura 5.1. Curvas características de binário e potência, do motor GX35. [16].....	40
Figura 5.2. Curvas características de binário, potência e consumo específico para o motor EH035 da Robin/Subaru. [18]	41
Figura 5.3. Janela do software com os resultados obtidos pelo modo de funcionamento iterativo para o motor à plena carga.....	43

Figura 5.4. Janela do software para os resultados obtidos pelo modo de funcionamento Iterativo para o motor a 75 % da carga	44
Figura 5.5. Gráfico 2D da pista com o local onde o motor se encontra ligado assinalado a laranja.	45
Figura 5.6. Perfil de altura da pista com o local onde o motor se encontra ligado assinalado a laranja.	45
Figura 5.7. Perfil da pista em 3D.	46
Figura 5.8. Perfil de velocidade da pista e do vetor ω em função da distância	47
Figura 5.9. Perfil de rotações do motor e perfil de velocidade em função da distância.	48
Figura 5.10. Perfil de consumo instantâneo do motor em gramas em função da distância	49
Figura 5.11. Perfil das forças de atrito (F_a) em Newtons, em função da distância (d) em metros.	50
Figura 5.12. Perfil do binário do motor (T) em Newton metro, em função da distância (d) em metros	50

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Valores do coeficiente de rolamento para diferentes tipos de pisos, para veículos ligeiros de passageiros.	16
Tabela 5.1. Tabela de especificações do motor GX35 retirada da sua ficha técnica. [16] [17]	39
Tabela 5.2. Tabela de variáveis de entrada do veículo.	42

Lista de Acrónimos

Simbologia

α	Ângulo de escorregamento das rodas, graus
θ	Ângulo entre a altura e a distância percorrida pelo veículo, graus
ρ	Densidade do ar, KPa
Δt	Intervalo de tempo
Δv	Intervalo de velocidade
Δd	Intervalo de distância
A	Área frontal do veículo, m ²
a	Aceleração, m/s ²
a_c	Aceleração centrípeta, m/s ²
b	Coeficiente relativo ao atrito de inercia
C _{ae}	Coeficiente de atrito aerodinâmico
C _{cd}	Coeficiente de atrito em curva
C _d	Coeficiente de atrito de arrastamento
C _r	Coeficiente de atrito de rolamento
D ₁	Distância da primeira volta, m
D ₂	Distância da segunda à penúltima volta, m
D ₃	Distância da última volta, m
d	Vetor distancia, m
E _c	Energia cinética, J
E _p	Energia Potencial, J
ET	Energia total, J
ET _{min}	Energia total mínima no ponto mais elevado da pista, J
ET _{final}	Energia total mínima no final da pista, J
F	Força resultante ou força final, N
F _a	Força de atrito, N
F _{ae}	Força de atrito aerodinâmico, N
F _c	Força centrípeta, N
F _{cd}	Força de atrito em curva, N
F _g	Força da gravidade, N
F _m	Força do motor, N
F _r	Força de atrito de rolamento, N
G _c	Consumo em cada ciclo de condução, ml
G _{Ce}	Consumo específico a carga variável, g/Kw.h
G _{Cep}	Consumo específico à plena carga, g/Kw.h

G_d	Consumo de combustível por quilómetro, ml/km
G_e	Fator de eficiência médio para produzir aceleração, ml/s/Kw
G_i	Consumo instantâneo, ml/s
G_{km}	Consumo total em quilómetro por litro, km/l
G_{ligar}	Consumo ao ligar o motor, ml
G_{ml}	Consumo total, ml
G_p	Vetor consumo, g
G_{sa}	Taxa de consumo do motor sem aceleração, ml/s
G_t	Consumo total, ml
g	Aceleração gravítica, m/s^2
H	Altura da pista com altura inicial nula, m
h	Altura da pista, m
l	Razão de transmissão
i	Contador da distância por volta do software
ind	Índice do contador i no ponto mais elevado da pista
j	Contador do número de voltas do software
k	Contador da distância no algoritmo de critério de energia
L	Número de voltas da prova
LL	Número de voltas diferentes da prova
m	Massa do veículo, Kg
n	Rotações do motor, rpm
on	Vetor representativo do estado do motor
P	Potência do motor, Kw
P_r	Pressão ambiente, Kpa
R	Inverso do raio de curvatura da volta em simulação
$R1$	Inverso do raio de curvatura da 1ª volta
$R2$	Inverso do raio de curvatura da 2ª à penúltima volta
$R3$	Inverso do raio de curvatura da última volta
r	Raio da roda, m
T	Binário do motor, N.m
$Tempo$	Tempo máximo da prova, minutos
T_p	Binário do motor à plena carga, N.m
T_r	Temperatura ambiente, °C
t	Tempo gasto em cada metro da prova
t_{min}	Tempo de execução da prova, minutos
t_{sec}	Tempo de execução da prova, s
t_p	Tempo que o motor esteve ligado com o motor parado, s
V	Velocidade em quilómetros por hora, km/h
V_{max}	Velocidade máxima, km/h
V_{med}	Velocidade média, km/h

Vmin	Velocidade mínima, km/h
v	Velocidade em metros por segundo, m/s
X	Coordenada cartesiana X da pista
x	Sentido do eixo longitudinal ao carro
Y	Coordenada cartesiana Y da pista
y	Sentido do eixo perpendicular, na lateral do veículo
W	Peso do veículo, N
z	Sentido do eixo perpendicular, na vertical do veículo

Siglas

EU	União Europeia
ISO	Velocidade no ponto mais elevado da pista
SAE	Society of Automotive Engineers
TPS	Porcentagem de pressão do acelerador

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Face ao aumento exponencial da procura por maior mobilidade por parte da humanidade e por outro lado a uma maior preocupação com o meio ambiente, a sociedade atual depara-se com um grande dilema. De um lado, para que haja uma maior mobilidade é necessário um maior consumo de combustível, principalmente dos derivados do petróleo, como é o caso da gasolina e do gasóleo, que são os mais utilizados atualmente em todo o mundo. Por outro lado, com o aumento do consumo destes combustíveis haverá um aumento das emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera.

Uma das formas de combater o dilema apresentado consiste na otimização do consumo dos motores dos veículos, sendo assim necessário otimizar a mistura de combustível e ar no interior da câmara de combustão, obtendo-se assim o rendimento mais elevado possível. Outra das formas consiste na elaboração de modelações dos veículos cada vez mais aperfeiçoadas. Para este efeito é necessário ter em especial atenção as forças de atrito envolvidas no veículo, como é o caso das forças de atrito aerodinâmico e das forças de atrito de rolamento.

Por último, outro dos fatores que influencia o consumo dos veículos é o modo de condução. Uma vez que, uma condução mais brusca e com maior velocidade irá, inevitavelmente, consumir mais combustível do que uma condução mais suave e preditiva dos obstáculos e do trânsito, como é o caso da Eco-driving.

1.2 Shell Eco_Marathon

Com vista a abordar o problema da redução do consumo de combustível a empresa Shell criou uma competição onde estudantes de engenharia de diversos países competem entre si tendo em vista minimizar o consumo do seu veículo. Nesta competição os participantes são desafiados a desenhar, construir, testar e conduzir um veículo ao longo de um percurso predefinido, onde vence a equipa que conseguir efetuar o número total de voltas, no tempo limite, com o menor consumo.

Nesta competição os participantes podem optar por duas categorias principais: *Prototype* e *UrbanConcept*. A categoria *prototype* é destinada para veículos de menores dimensões, onde o design aerodinâmico e as dimensões são minimizadas ao extremo com o intuito de se obter o melhor resultado possível. Relativamente à categoria *UrbanConcept*, esta destina-se a veículos semelhantes aos que circulam nas estradas atualmente. Havendo, assim, dimensões mínimas a cumprir, tanto para o corpo do veículo como para o espaço do piloto. É também obrigatório

que o peso do piloto seja igual ou superior a 70 kg, em que, caso isto não aconteça, é necessário acrescentar peso ao veículo. Outra aproximação efetuada a esta categoria para se assemelhar com a realidade é o facto de o veículo necessitar de parar ao fim da cada volta, assemelhando-se assim a uma condução urbana, com trânsito.

Por último é de salientar que cada categoria é dividida em três subcategorias: combustão interna (cujos combustíveis podem variar entre gasolina, gasóleo, etanol, gás líquido e gás metano), hidrogénio e bateria elétrica. [1]

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a criação de um software em Matlab tendo em vista a otimização do consumo de veículos. Este irá ser usado essencialmente em meio académico para a prova que se realiza todos os anos pela Shell. O software terá como principal função o melhoramento do veículo com base em simulações, para diferentes características e estratégias. Servirá também para fornecer ao piloto uma melhor caracterização da pista onde se vai realizar a prova e uma melhor distribuição do tempo ao longo desta.

1.4 Estrutura do documento

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, seguida de diversos anexos essenciais à sua compreensão.

No capítulo dois é apresentada uma breve caracterização do consumo de energia no sector dos transportes, seguido pela apresentação dos diversos fatores que influenciam o consumo de combustível no sector. Neste capítulo são ainda apresentados os principais modelos existentes para estimar o consumo de combustível.

No capítulo três é apresentado uma breve revisão bibliográfica relativa à modelação de veículos, onde são apresentadas as principais forças aplicadas bem como a sua caracterização.

No capítulo quatro encontra-se uma explicação detalhada de todo o software, começando pelo seu fluxo e simplificações utilizadas, como também algumas deduções de fórmulas essenciais à sua formulação.

No capítulo cinco são apresentados os valores de entrada e os resultados obtidos pelo software para simulações referentes à prova a realizar em maio de 2017, em Londres.

Por último, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Revisão bibliográfica

A poupança energética é cada vez mais, uma preocupação por parte da sociedade atual, pois relaciona duas temáticas bastante preocupantes para o desenvolvimento da humanidade. A temática da preocupação com o meio ambiente e a da poupança económica, tanto por parte do cidadão como por parte dos governos.

Relativamente à temática da preocupação com o meio ambiente, esta ganhou extrema importância nos últimos anos devido ao aquecimento global, cuja principal causa são os gases de efeito de estufa que são emitidos para a atmosfera. Estes gases são produzidos principalmente pelo sector dos transportes, devido ao seu elevado consumo de combustíveis provenientes de produtos petrolíferos. [2]

No que diz respeito à poupança económica, esta torna-se bastante relevante tendo em conta que, tanto em Portugal como na União Europeia (UE), a extração destes produtos é bastante reduzida. Devido a este facto, é necessário a sua importação, o que provoca a dependência da UE no que diz respeito ao consumo de energia essencialmente no sector dos transportes que, segundo dados do Eurostat, de 2014, representa cerca de 33.2 % do consumo final de energia na UE a 28 membros, como mostra a figura 2.1. [3]

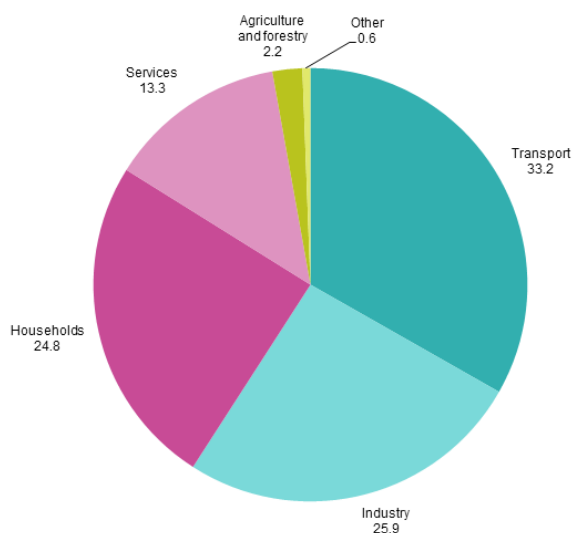


Figura 2.1. Consumo final de energia na UE a 28 membros, segundo dados do Eurostat de 2014, baseado em toneladas equivalentes de petróleo. [3]

Para reduzir a dependência energética por parte da UE, e ao mesmo tempo combater as emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera, é necessário uma redução do consumo de combustíveis provenientes de produtos petrolíferos. Esta redução pode ser obtida através da redução do consumo dos veículos.

2.1 Fatores que influenciam o consumo de veículos

O consumo dos veículos depende de diversos fatores que podem ser agrupados em 3 grandes categorias. Fatores relativos ao trânsito e condução, fatores relativos à estrada e fatores relativos ao veículo. [4]

2.1.1 Fatores relativos ao trânsito e condução

Estes fatores estão relacionados com o condicionamento do trânsito e com o tipo de condução efetuado pelo condutor, principalmente em condução urbana. Incluem velocidade média do veículo, número de paragens, fluxo do escoamento do trânsito, acelerações, travagens e relações da caixa de velocidade. Estes fatores influenciam drasticamente o consumo de veículos pois sabe-se, por exemplo, que uma condução mais agressiva com acelerações e travagens mais bruscas levam a um aumento relevante do consumo, comparativamente a uma condução mais suave.

A esta estratégia de poupança de combustível denomina-se de Eco-driving e baseia-se maioritariamente na previsão do trânsito e de paragens ao longo da viagem, tendo em vista a otimização da velocidade em cada instante, evitando assim acelerações agressivas e travagens bruscas. Estudos realizados sobre o assunto referem que uma condução Eco-driving pode proporcionar uma poupança de 15 % a 25 % no consumo de veículos. [5] [6]

2.1.2 Fatores relativos à estrada

Outro do conjunto de fatores que influenciam o consumo dos veículos são relativos à estrada e estão relacionados com as condições da via onde os veículos se deslocam, incluindo o seu declive e rugosidade do asfalto. Estes fatores podem produzir uma grande variação do consumo nos veículos. Estudos realizados revelam que, para um veículo de passageiros, o consumo pode variar até 11 % de pavimentos mais macios para pavimentos mais ásperos. Em relação à inclinação da via é de conhecimento geral que o veículo consome mais combustível para inclinações mais acentuadas. [7]

2.1.3 Fatores relativos ao veículo.

Por último, outro dos conjuntos de fatores bastante importantes para a redução do consumo de veículos são os fatores intrínsecos ao veículo. Incluem a manutenção deste e a sua modelação.

Como é de conhecimento geral existe uma degradação dos veículos devido à passagem dos anos e devido à sua utilização. Esta degradação provoca aumento do consumo do veículo, logo uma boa manutenção leva a uma redução do consumo de combustível.

Outra das características intrínsecas ao veículo que provoca uma redução do consumo de combustível é a sua constituição. Um veículo com menor peso necessita de menos energia para se deslocar. Por outro lado, um veículo com menor área frontal está sujeito a menor influência das condições atmosféricas.

2.2 Modelo para estimar o consumo de veículos

Ao longo dos anos foram surgindo diversos modelos para estimar o consumo de combustível dos veículos. Estes modelos podem ser agrupados em quatro categorias: Modelo instantâneo do consumo de combustível, modelo de consumo de combustível por ciclos, modelo de consumo baseado na velocidade do percurso e modelo de consumo baseado na velocidade média. [4]

2.2.1 Modelo instantâneo do consumo de combustível

O modelo instantâneo do consumo de combustível baseia-se no princípio da conservação da energia, pois a energia que entra no sistema, neste caso combustível, é igual à energia de perdas por calor gerado no motor, mais a energia que sai do sistema, neste caso energia cinética e energia de perdas por atrito. Este modelo consiste no cálculo do consumo em cada instante do percurso, normalmente de segundo em segundo. Para isto, é necessário saber as forças de atrito em cada instante e subtrair esse valor à potência do motor obtendo-se, assim, a potência que fará o carro se deslocar. Através desta potência obtém-se a velocidade do veículo em cada instante e, por fim, o seu consumo.

O modelo original foi criado por Post em 1984, cujas relações consumo-potência obtidas estão expressas nas equações 2.1 e 2.2. [4]

$$G_i = G_{sa} + G_e * P \quad P > 0 \quad (2.1)$$

$$G_i = G_{sa} \quad P \leq 0 \quad (2.2)$$

Nestas equações, o consumo instantâneo de combustível (G_i) em ml/s, varia apenas com a taxa de consumo do motor sem aceleração (G_{sa}) em ml/s, para potência (P) nula. Caso o motor produza potência adicional, este varia também com o fator de eficiência médio (G_e) em ml/s/Kw, multiplicado pela potência em kw.

Os coeficientes G_{sa} e G_e são relativos ao veículo, onde G_{sa} diz respeito ao valor do consumo de combustível do veículo com o motor sem aceleração. Por outro lado, a taxa de consumo por

potência gerada está relacionada com a eficiência que o veículo tem para produzir potência adicional. Este modelo pode ser aplicado a qualquer situação de tráfego rodoviário, onde a variação da energia da estrada é conhecida.

Para se obter o consumo total de combustível (G_t) é, por fim, necessário efetuar o somatório de todos os consumos instantâneos (G_i) calculados, como mostra a equação 2.3.

$$G_t = \sum G_i \quad (2.3)$$

Este modelo, por calcular todas as variáveis envolvidas no carro em cada instante, é o que produz resultados com menos erros associados, pois as forças de atrito estão sempre a ser corrigidas, devido ao facto de se ter o declive da estrada e a velocidade em cada instante.

2.2.2 Modelo do consumo de combustível por ciclos

Este modelo consiste em dividir o percurso em ciclos, onde cada ciclo é constituído pelas seguintes fases de condução: velocidade cruzeiro, desaceleração, paragem e aceleração. Este modelo baseia-se na multiplicação da taxa de consumo de cada fase de condução pela distância que percorreu, como ilustra a equação 2.4. [4]

$$G_c = G_{c1} * X_1 + G_{c2} * X_2 + G_{c3} * X_3 + G_{c4} * X_4 \quad (2.4)$$

Para se obter o consumo final de combustível é ainda necessário efetuar o somatório do consumo de todos os ciclos, como mostra a equação 2.5.

$$G_t = \sum G_c \quad (2.5)$$

Este modelo é mais restrito e com maiores erros associados que o anterior pois necessita do número total de mudança de modo de condução e da respetiva distância percorrida. Necessita também do consumo específico de cada modo de condução.

2.2.3 Modelo do consumo baseado na velocidade do percurso

Este modelo é utilizado para distâncias maiores que 1 km e consiste em calcular separadamente o consumo de combustível com o veículo em movimento e com o veículo parado como mostra a equação 2.6. [4]

$$G_t = G_d * X_d + G_{sa} * t_p \quad (2.6)$$

Inicialmente, na equação, temos o consumo em movimento, que se obtém multiplicando o consumo por unidade de distância (G_d) pela distância percorrida pelo veículo (X_d). Posteriormente encontra-se na equação o cálculo do consumo do veículo parado onde se multiplica a taxa de consumo, com o veículo sem aceleração (G_{sa}), pelo tempo que este se encontra parado (t_s).

Este tipo de modelo tem um elevado erro associado pois a taxa de consumo de combustível é fixa ao longo de todo o percurso o que na realidade não se verifica, pois este valor varia com as rotações do motor.

2.2.4 Modelo de consumo baseado na velocidade média

Este modelo é adequado para estimar o consumo total de combustível em grandes sistemas de tráfego urbano. O consumo por unidade de distância é obtido através da equação 2.7. [4]

$$G_d = \frac{Gi}{V_m} + b \quad (2.7)$$

Este modelo só pode ser aplicado quando a velocidade máxima é inferior a 50 km/h. Isto deve-se ao facto de que, para velocidades superiores à indicada, a força aerodinâmica torna-se o fator dominante das forças de atrito. Este modelo é bastante simplista pois trata a velocidade ao longo do percurso como sendo constante, o que na realidade não se verifica. Este modelo tem como outra desvantagem o facto de não fazer distinção no consumo do veículo quando este se encontra parado ou em aceleração.

Capítulo 3

3 Estado da arte em dinâmica de veículos

3.1 Introdução

Os veículos são sistemas bastante complexos compostos pelo corpo do veículo e sistema de propulsão. Estes componentes interagem entre si de forma dinâmica, pois quando um veículo está em movimento, a propulsão e as condições externas agem sobre o corpo do mesmo, formando assim um sistema de forças e momentos aplicados diretamente ao veículo, fazendo-o deslocar. Estas forças aplicadas provêm de diversas origens, desde forças vindas do motor (força de propulsão), forças provenientes do contacto de peças e do contacto dos pneus com o asfalto (forças de resistência ao rolamento), forças devido à massa de ar deslocada em redor do corpo do veículo (forças de resistência aerodinâmica) e forças devido ao peso do veículo (força gravítica).

De modo a simplificar o trabalho de modelação de veículos é comum dizer-se que as forças são aplicadas todas no mesmo ponto do veículo, mais propriamente no seu centro de gravidade (CG) como mostra figura 3.1. Esta simplificação é utilizada na maioria da literatura encontrada pois é bastante útil na simplificação da análise dinâmica de veículos, produzindo valores com bastante precisão, pois o veículo tanto ao acelerar, travar ou ao virar, comporta-se como um todo.

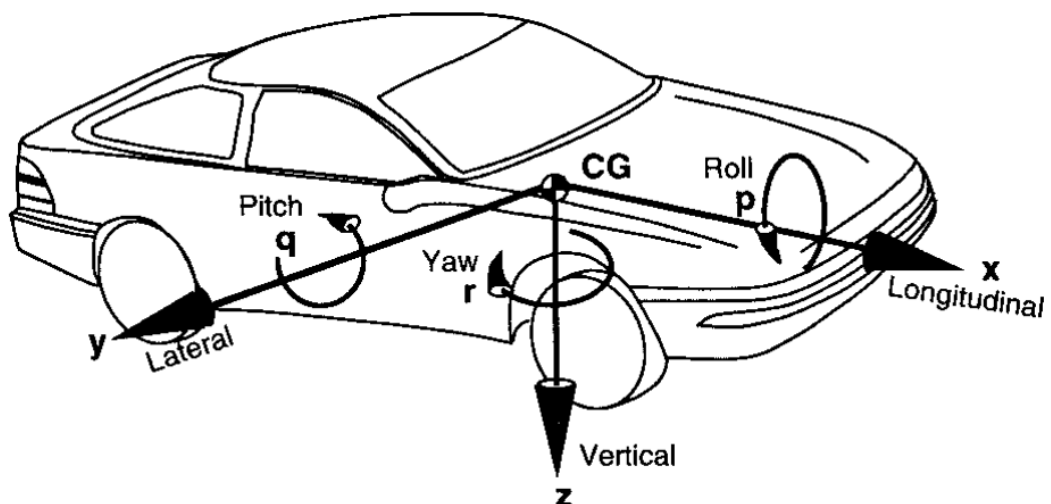


Figura 3.1. Sistema de eixos de um veículo segundo SAE. [8]

Outro dos parâmetros iniciais a considerar quando se trata da dinâmica de veículos é o de fixar o sistema de eixos, cuja origem é CG como mostra a figura 3.1. Segundo o convencionado pela SAE as coordenadas são:

x - Frente do veículo e no plano longitudinal de simetria

y - Lateral para fora do veículo do lado direito

z - Para baixo em relação ao veículo

p - Rotação em torno do eixo x (Roll)

q - Rotação em torno do eixo y (Pitch)

r - Rotação em torno do eixo z (Yaw)

O movimento dos veículos é caracterizado pelo sistema de coordenadas fixas apresentado, onde segundo x são aplicadas as componentes das forças que fazem deslocar o veículo longitudinalmente. Estas componentes das forças são normalmente geradas pela força de propulsão do motor (sentido positivo do eixo x), as forças de atrito de rolamento e aerodinâmica (sentido negativo do eixo x) e a força gravítica, caso esta tenha componente longitudinal. Segundo y encontra-se a componente das forças laterais aplicadas ao veículo. Esta componente das forças surge apenas quando o veículo se encontra a curvar, devido a estradas com declive ou quando existem forças externas aplicadas ao veículo, como por exemplo ventos laterais. Por fim, segundo z encontra-se a força gravítica total, caso o declive da estrada seja nulo, ou a sua componente, caso exista declive na estrada.

Em relação às rotações, segundo x são devidas à inclinação da estrada na lateral, segundo y são devidas à inclinação da estrada longitudinalmente e segundo z são devido às curvas efetuadas pelo veículo.

3.2 Forças aplicadas no veículo

Após a perceção de onde são aplicadas as forças, das suas diferentes origens e das suas componentes em cada eixo é necessário caracterizar todas as forças aplicadas no veículo e modelá-las, de forma a poderem ser obtidas independentemente das características do veículo.

Ao consultarmos a literatura existente, obtemos que a força resultante ou força que faz mover o veículo (F) resulta da força do motor (F_m), das forças de resistência ao movimento ou forças de atrito (F_a) e da força gravítica (F_g). Assim obtém-se a equação 3.1. [8]

$$F = F_m - F_a + F_g \quad (3.1)$$

Sabe-se também que a força de atrito nos veículos provêm de três fenômenos distintos, forças de atrito de rolamento (F_r), forças de atrito em curva (F_{cd}) e forças de atrito aerodinâmicas (F_{ae}), como mostra a equação 3.2.

$$F_a = F_r + F_{cd} + F_{ae} \quad (3.2)$$

3.2.1 Forças de atrito aerodinâmico

A aerodinâmica provoca um grande impacto na performance dos veículos, fazendo estes perderem força de propulsão. Esta força de atrito deve-se à resistência causada pelo movimento do fluido em torno do veículo. É aplicada aos três eixos referidos anteriormente e aos respectivos momentos. Contudo, apenas as forças aplicadas no eixo longitudinal do carro serão abordadas pois são as mais relevantes no estudo proposto.

A força aerodinâmica aplicada segundo o eixo x, ou seja, longitudinal ao veículo, é chamada de força de arrastamento e consiste numa força que ocorre sempre que o veículo se desloca contra o escoamento. Esta força é dependente da forma do veículo, da sua velocidade e das condições atmosféricas como mostra a equação 3.3. [8]

$$F_{ae} = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_d * A \quad (3.3)$$

É se salientar que o termo da equação, $1/2 * \rho * V^2$, diz respeito à pressão dinâmica do ar. Por sua vez, o coeficiente de arrastamento, C_d , é obtido empiricamente para cada veículo pois este depende do formato do mesmo. Por último, a dimensão do veículo, mais propriamente a sua área frontal, A , é outro dos parâmetros bastante relevantes no cálculo da força de atrito aerodinâmico. Desta equação retira-se que a força de atrito aerodinâmico depende maioritariamente da velocidade do veículo pois, esta encontra-se elevada ao quadrado e varia ao longo do percurso, o que não acontece com as restantes variáveis.

Relativamente à densidade do ar, esta depende da temperatura (T_r), pressão (P_r) e humidade, este valor pode ser obtido através da equação 3.4. [8]

$$\rho = 1.225 * \left(\frac{P_r}{101.325} \right) * \left(\frac{5.19}{460 + T_r} \right) \quad (3.4)$$

É de salientar que, para valores padrão de temperatura a 15 °C e considerando estar-se ao nível do mar, o valor da densidade do ar é de 1.225 Kg/m³.

Relativamente ao coeficiente de atrito aerodinâmico, é normalmente obtido de forma empírica em ensaios efetuados num túnel de vento ou em teste de colina abaixo. A sua determinação advém da equação 3.3, obtendo-se que o coeficiente de atrito aerodinâmico é diretamente proporcional à força de atrito aerodinâmica e inversamente proporcional à pressão dinâmica e à área frontal, como mostra a equação 3.5. [8]

$$C_D = \frac{F_{ae}}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A} \quad (3.5)$$

Relativamente aos veículos ligeiros de passageiros, o valor do coeficiente de atrito aerodinâmico tem vindo a diminuir ao longo dos anos, chegando a um valor médio atual de 0.35. O valor mínimo obtido até agora para este coeficiente é de 0.15 e foi alcançado para um veículo com forma de gota de água. [9]

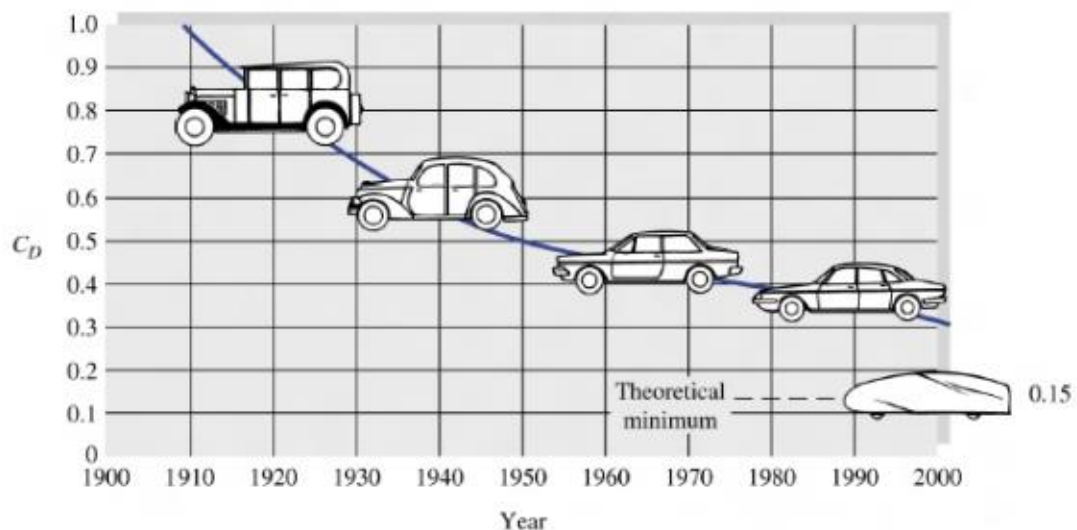


Figura 3.2. Evolução do coeficiente de atrito aerodinâmico ao longo dos anos. [9]

3.2.2 Forças de atrito de rolamento

Outra das principais forças de atrito associadas aos veículos é a força de atrito de rolamento, que, a baixas velocidades, é a principal força de atrito aplicada ao mesmo. Como termo de comparação, apenas a velocidades superiores a 80 km/h, é que o valor da força de atrito aerodinâmico se assemelha ao valor da força atrito de rolamento.

Contrariamente às outras forças aplicadas ao veículo, a força de atrito de rolamento caracteriza-se por estar presente desde o primeiro instante que o veículo se move até ao final

do seu percurso, sendo esta essencialmente exercida no contacto do pneu com o asfalto, passando assim a energia que devia ser usada para mover o veículo para energia térmica. [8]

Existem diversos mecanismos responsáveis pela força de atrito de rolamento, de entre os quais se destacam:

- Perda de energia devido à flexão da parede lateral do pneu, perto da área de contacto com o asfalto.
- Perda de energia devido à flexão dos elementos do piso.
- Deslizamento do pneu nas direções longitudinal e lateral.
- Arrastamento de ar no interior e exterior do pneu.
- Perdas por colisão com obstáculos.

Considerando o veículo como um todo e aplicando a força de atrito de rolamento no seu CG, como referido anteriormente, obtém-se que a força de atrito de rolamento resulta da multiplicação do peso (W) pelo coeficiente de rolamento (C_r) de todo o veículo, como mostra a equação 3.6. [8]

$$F_r = C_r * W \quad (3.6)$$

Para efeitos de simplificação, o peso do veículo é estático, ou seja, não inclui efeitos de aceleração ou de resistência ao ar segundo o eixo z , pois a sua implementação é bastante complexa, tendo pouca influência na precisão dos resultados.

Em relação ao coeficiente de rolamento, este é adimensional, tal como o aerodinâmico, e expressa os efeitos da interação física do pneu com o asfalto, sendo bastante influenciado pelos seguintes fatores: [8]

Temperatura do pneu - Como a energia que se perde no contacto do pneu com o asfalto se transforma em energia térmica, esta faz com que o pneu aumente a sua temperatura ao longo da viagem, principalmente no início da mesma. Desta forma o coeficiente de rolamento irá diminuir pois o material do pneu ficará mais macio. Esta variação do coeficiente de rolamento pode-se visualizar na figura 3.3.

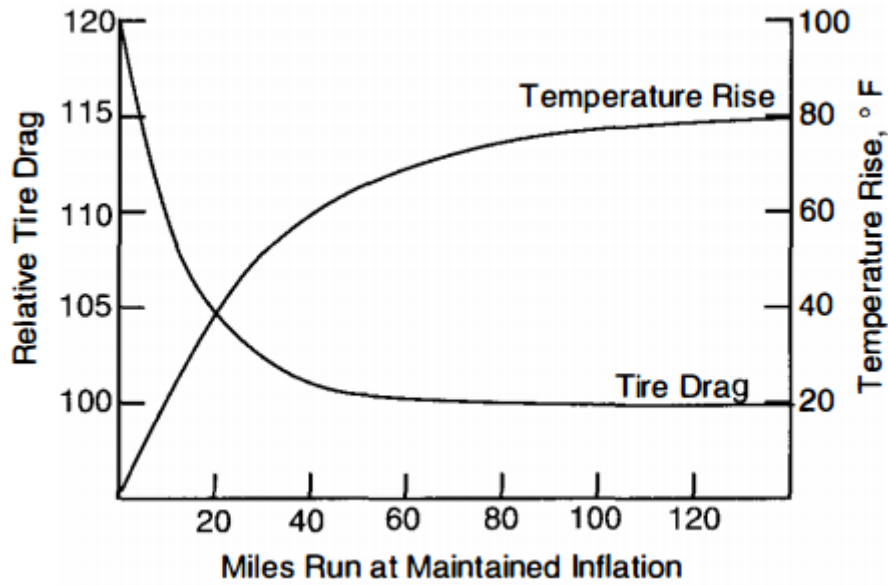


Figura 3.3. Variação do coeficiente de rolamento com a temperatura do pneu. [8]

Pressão dos pneus e solo do percurso - A pressão do pneu determina a sua elasticidade e combinada com a carga a que este está sujeito, determina a flexão total do pneu; logo, quanto mais pressão tiver o pneu, menor será o seu coeficiente de rolamento, nunca devendo ultrapassar o limite máximo do mesmo. Por outro lado, quanto mais duro for o piso do percurso menor será o coeficiente de rolamento do veículo. Esta variação do coeficiente de rolamento pode-se visualizar na figura 3.4.

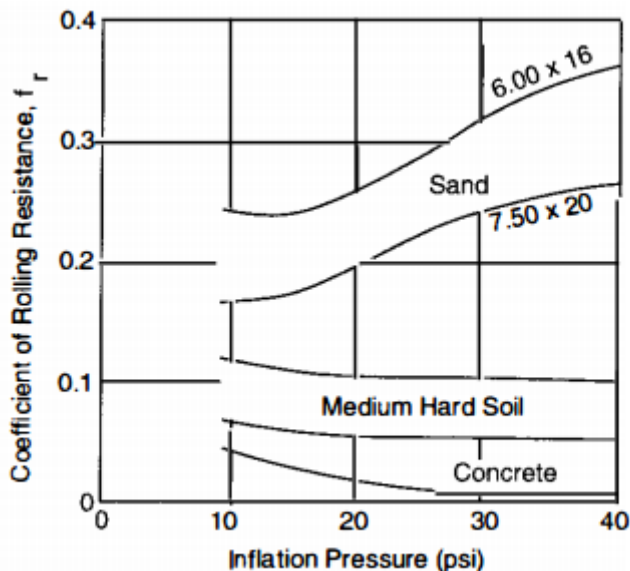


Figura 3.4. Variação do coeficiente de rolamento com a pressão no interior do pneu. [8]

Velocidade - O coeficiente de rolamento é diretamente proporcional à velocidade devido ao aumento da flexão do pneu e das vibrações que o aumento da velocidade produz. O aumento

do coeficiente é mais significativo para velocidades mais elevadas, mantendo-se praticamente constante para velocidades reduzidas. Esta variação do coeficiente de rolamento pode-se visualizar na figura 3.5.

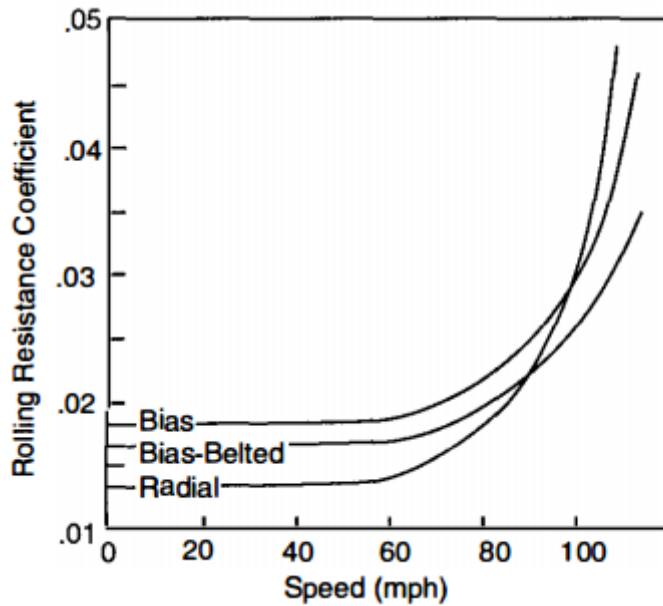


Figura 3.5. Variação do coeficiente de rolamento com a velocidade para 3 tipos de pneus. [8]

Material do pneu e design - O material do pneu e o seu design têm uma grande influência no coeficiente de rolamento, pois pneus feitos com materiais mais rígidos e com maior reforço na sua parede lateral, produzem coeficientes de rolamento mais reduzidos. Esta variação do coeficiente de rolamento pode-se visualizar na figura 3.6.

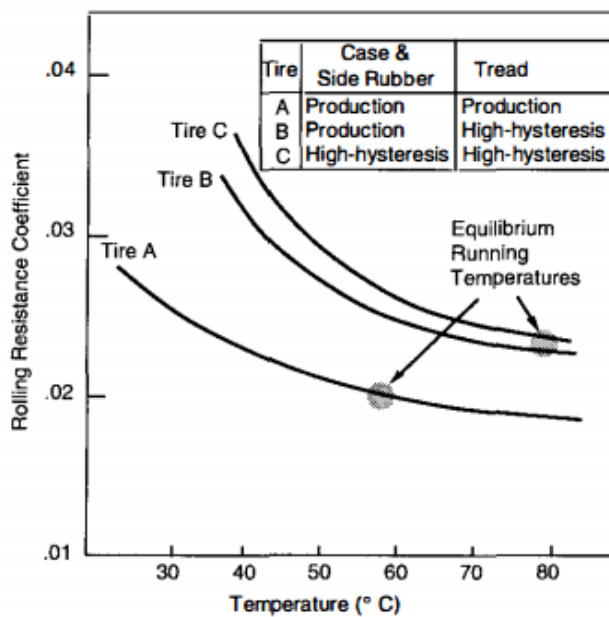


Figura 3.6. Variação do coeficiente de rolamento para diferentes pneus. [8]

Desalinhamento da roda - Por último, outro parâmetro que afeta o coeficiente de rolamento é o desalinhamento das rodas, pois um pneu com um certo ângulo de desalinhamento vai produzir uma ligeira curvatura no percurso aumentando assim a componente lateral da força de propulsão à custa da componente longitudinal. Esta variação do coeficiente de rolamento pode-se visualizar na figura 3.7.

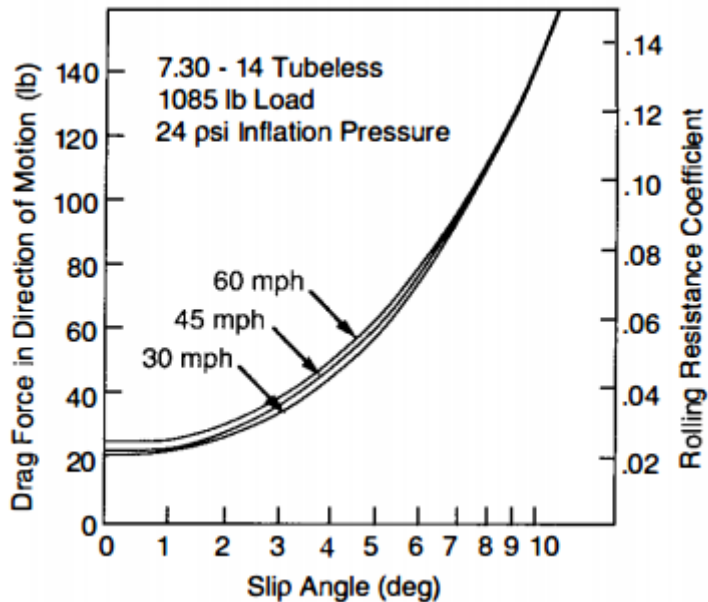


Figura 3.7. Variação do coeficiente de rolamento para diferentes ângulos de escorregamento e diferentes velocidades. [8]

Como o coeficiente de rolamento é bastante complexo e dependente de diversas variáveis, a melhor aproximação que se pode obter é através de estudos empíricos aplicados ao veículo, em diferentes tipos de terrenos. Na tabela 3.1 são apresentados alguns valores de coeficientes de atrito encontrados na literatura para diferentes tipos de piso. [10] [11]

Tabela 3.1. Valores do coeficiente de rolamento para diferentes tipos de pisos, para veículos ligeiros de passageiros.

Tipo de piso	Coefficiente de rolamento (C_R)
Cimento	0.008 - 0.01
Asfalto	0.01 - 0.015
Calçada	0.033 - 0.055
Terra batida	0.03 - 0.08
Areia	0.15 - 0.300

3.2.3 Forças de atrito em curva

O comportamento de um veículo ao curvar tem uma grande importância na sua performance, tanto na sua estabilidade e segurança como nas perdas de energia devido ao atrito produzido. Para uma melhor percepção do comportamento de um veículo em curva, encontra-se lustrado na figura 3.8 a geometria ideal executada pelos veículos ao curvar.

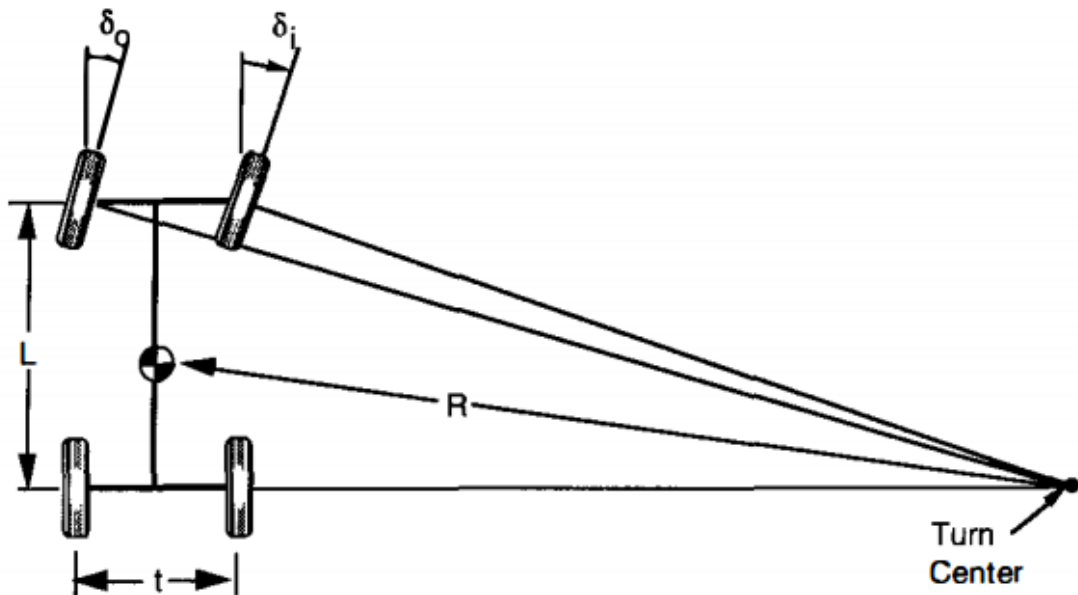


Figura 3.8. Geometria de viragem de veículos [8].

Esta geometria denomina-se de geometria de Ackerman e defende que, um veículo ao curvar possui um único centro de viragem que se encontra no ponto de interseção de todos os eixos das rodas do veículo, evitando assim o seu deslizamento. Para executar esta geometria as rodas dianteiras possuem diferentes ângulos de viragem. Contudo nem sempre o centro de curvatura se encontra num único ponto, formando assim um arrastamento do veículo que, por sua vez irá formar uma força de atrito que depende do ângulo de escorregamento das rodas

Para uma melhor caracterização dos atritos criados ao curvar é necessário dividir o seu comportamento em duas categorias: curvas a baixa velocidade e curvas a elevada velocidade.

3.2.3.1 Curva a baixa velocidade

Qualquer veículo ao curvar está sujeito a uma aceleração centrípeta que, por sua vez irá formar uma força também centrípeta. A baixa velocidade esta força é bastante reduzida, fazendo com que a direção que o veículo segue seja igual à direção das rodas evitando assim o aparecimento de um ângulo de escorregamento entre estes, como está ilustrado na figura 3.9. Devido a este facto as força de atrito em curva a baixa velocidade é praticamente nulas.

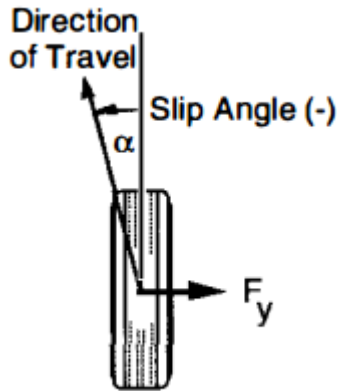


Figura 3.9. Ângulo de escorregamento (α) da roda. [8]

3.2.3.2. Curva a elevada velocidade

Por sua vez, a elevada velocidade, a força centrípeta já é bastante elevada, criando assim um ângulo de escorregamento das rodas em relação à direção do veículo, fazendo assim surgir uma força de atrito em curva que é em função do ângulo de escorregamento das rodas. Esta relação pode ser vista na figura 3.10.

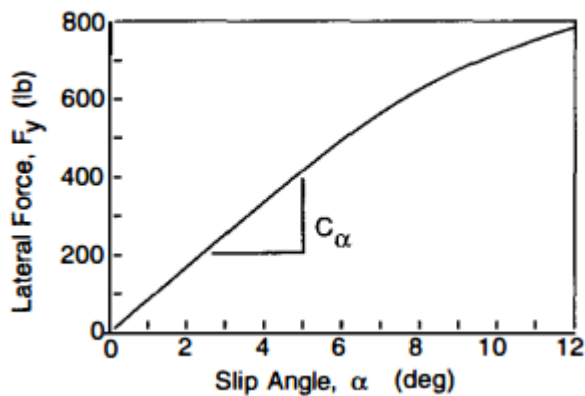


Figura 3.10. Força lateral do veículo ou força centrípeta em função do ângulo de escorregamento [8].

A força lateral ou força centrípeta exercida no veículo advém da aceleração centrípeta a que este está sujeito ao efetuar um movimento circular e é dada pela equação 3.7.

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (3.7)$$

Através da segunda lei de Newton, que enuncia que a força é igual ao produto da massa pela aceleração, obtemos que:

$$F_c = m * \frac{v^2}{R} \quad (3.8)$$

Obtemos assim que a força de atrito em curva é proporcional à força centrípeta do veículo multiplicado por um coeficiente de atrito em curva (Ccd).

$$F_{cd} \sim C_{cd} * m * \frac{v^2}{R} \quad (3.9)$$

O coeficiente de atrito em curva (Ccd) é relativo ao contacto do pneu com o asfalto, tal como o coeficiente de rolamento, só que para um comportamento dinâmico do pneu, pois este encontra-se em movimento com um ângulo de escorregamento. Este coeficiente é afetado tanto pelas variáveis que determinam o coeficiente de atrito de rolamento bem como pelo ângulo de escorregamento das rodas.

Devido à sua complexidade e dificuldade em caracterizar todas as variáveis envolvidas no coeficiente, este normalmente é obtido de forma empírica.

3.2.4 Força gravítica

Outra das forças aplicadas ao veículo quando este se encontra em movimento é a força gravítica exercida sobre este, devido à sua massa e à aceleração gravítica da terra. Esta força é nula, no sentido longitudinal, quando o veículo se encontra num piso plano. Por outro lado, quando este se encontra num piso com inclinação, existe uma componente da força gravítica no sentido longitudinal do veículo que é positiva caso este se encontre a descer, ou negativa caso o veículo se encontre a subir.

Esta força é calculada através da 2ª lei de Newton, só que tomando apenas em consideração a componente da força no sentido longitudinal pois é a que interessa para o caso em estudo. [10]

$$F_g = m * g * \text{sen}(\theta) \quad (3.10)$$

3.3 Motor

Nos veículos a principal fonte de energia propulsora advém do motor. Esta é essencialmente fornecida pelos motores de combustão cuja função é a de transformar energia química, presente no combustível, em energia mecânica, através da combustão da mistura de combustível e ar. Estes motores de combustão interna podem ter diversos tipos de

combustíveis, contudo devido ao assunto tratado neste trabalho, apenas serão abordados os motores a gasolina.

Os motores de combustão interna podem ser divididos em duas grandes categorias, dependendo do seu funcionamento: motores a dois tempos e motores a quatro tempos. Nos motores a dois tempos o pistão apenas executa dois percursos por explosão. O primeiro tempo refere-se à compressão da mistura de ar e combustível, antes da explosão e o segundo tempo refere-se à expansão do mesmo que ocorre após a explosão. Nos motores a quatro tempos, o pistão efetua quatro movimento por explosão, como ilustra a figura 3.11. No primeiro tempo ocorre a admissão do combustível e do ar, no cilindro. No segundo tempo ocorre a compressão da mistura. No terceiro tempo ocorre a expansão do gás. Por último, no quarto tempo ocorre o escape dos gases queimados. É de salientar que o motor a 4 tempos é o mais utilizado na atualidade. [13] [14]

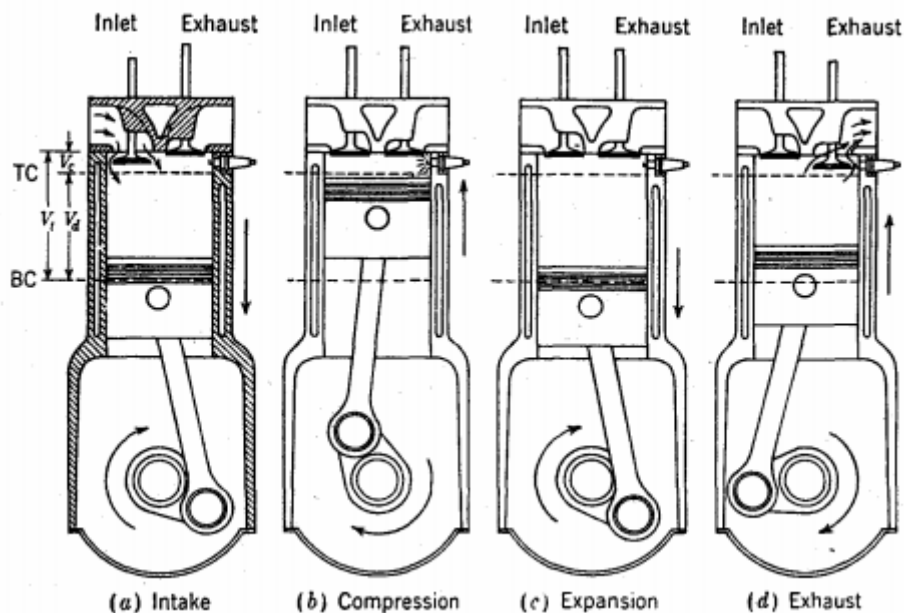


Figura 3.11. Ciclo de combustão de motor de combustão a quatro tempos. [14]

Para se efetuar uma modelação de um motor a combustão é necessário obter-se alguns dos seus parâmetros essenciais, como é o caso da potência, binário e consumo específico. Estes parâmetros são obtidos através de medições efetuadas ao motor à plena carga, normalmente feitas pelo construtor do mesmo, e constituem as suas curvas características. Como podemos ver, na figura 3.12 temos a potência (Kw), o binário (N.m) e o consumo específico (Kg/Kw*h) em função das rotações do motor, logo ao saber-se as rotações do motor, sabe-se cada um dos parâmetros característicos do motor caso este esteja a funcionar à plena carga.

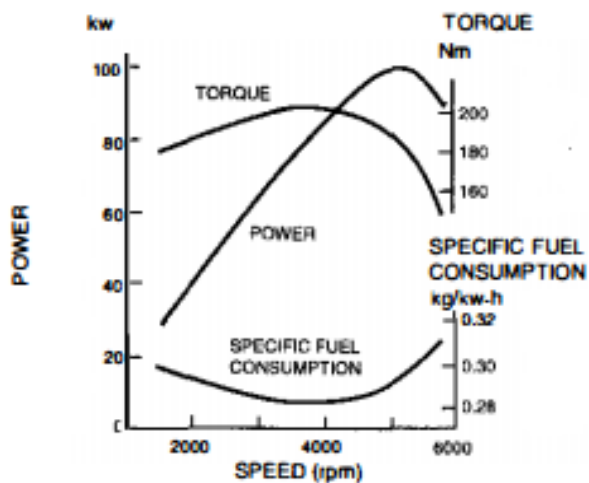


Figura 3.12. Curvas características de um motor a gasolina. [8]

É de referir que as curvas características apresentadas podem ser transcritas em equações de segundo grau ou superior, dependendo da precisão requerida.

Como na grande maioria dos casos, os motores não funcionam à plena carga é necessário obter as curvas características do motor em função das suas rotações e da percentagem de pressão do acelerador. Geralmente estes valores são obtidos num único gráfico de superfície como se encontra ilustrado na figura 3.13 onde está representado o consumo. Estes gráficos são obtidos através de testes ao motor, em que cada resultado se encontra ilustrado na figura 3.13.

Como nem sempre é possível a obtenção de um gráfico deste género, pode-se efetuar uma aproximação multiplicando o valor obtido para o consumo e binário à plena carga, pela percentagem de pressão do acelerador somando-a a um valor mínimo de consumo ou binário. Ou seja, aproximar o valor final através de uma equação de primeiro grau, onde o declive é a percentagem de pressão do acelerador e a variável é o consumo ou binário obtido pelas curvas características em função das rotações.

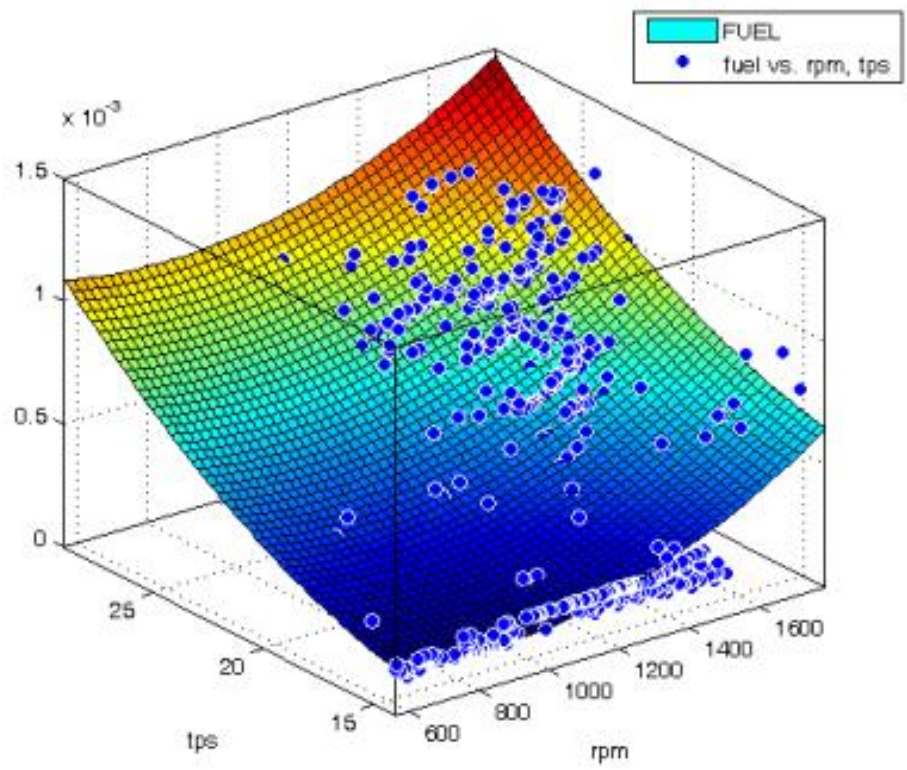


Figura 3.13. Exemplo mapa do motor para o consumo em função das rotações e da percentagem de pressão do acelerador. [15]

Capítulo 4

4 Algoritmo de otimização

Uma vez conhecidos os principais fatores que influenciam o desempenho dos veículos de passageiros e também os fenômenos físicos envolvidos no movimento deste, é necessário desenvolver um método de cálculo sistemático onde, através das características do veículo, do motor e do percurso, se consiga obter o melhor perfil de velocidades possível. Este cálculo sistemático foi desenvolvido no programa Matlab 2015 onde foi utilizado o modelo instantâneo de consumo apresentado no capítulo 2. Este modelo é o mais apropriado para o trabalho desenvolvido pois é o que produz melhores resultados, tendo-se ainda todos os requisitos necessários à sua implementação, como é o caso do perfil da pista. Como este é fornecido metro a metro, o algoritmo efetua o cálculo também de metro a metro, fazendo assim todo o cálculo em função da distância, em vez do tempo, como é mais comum.

4.1 Simplificações utilizadas

Inicialmente foram feitas diversas simplificações ao problema, essenciais para se conseguir a elaboração do algoritmo de cálculo. Estas encontram-se apresentadas de seguida:

- **Percurso único:** Como a pista possui largura, existe uma infinidade de percursos que se podem efetuar. Devido a este fator optou-se por trabalhar apenas com um percurso, que deverá ser o ideal para efetuar a pista com maior segurança e melhor relação entre raio de curvatura e distância total percorrida.
- **Distância fornecida é igual à distância do percurso escolhido:** Como não existe informação sobre como foi obtido o valor da distância da pista por volta, podendo este ser relativo ao interior, exterior ou meio da pista, optou-se por considerar que a distância fornecida é a distância do percurso escolhido.
- **Curvas efetuadas de forma constante:** Apesar de um veículo, ao efetuar uma curva, alterar o raio de curvatura ao longo desta, para efeitos de simplificação na obtenção dos raios de curvatura, o veículo ao curvar faz o raio de curvatura constante ao longo de toda a curva.
- **Pode haver no máximo 3 voltas distintas:** De modo a diminuir o tempo de cálculo, caso a prova comece e acabe no mesmo local, apenas é considerado a existência de um tipo de volta, ou seja de um único percurso para todas as voltas. Caso o início e o fim da prova sejam em pontos diferentes podem existir, no máximo, 3 percursos diferentes: um para a primeira volta, outro para a ultima volta e por fim um para as voltas intercaladas entre estas.
- **Patinagem da embraiagem no arranque desprezável:** De modo a facilitar o cálculo das rotações do motor no arranque, optou-se por considerar que o motor arranca às

rotações mínimas dadas nas suas curvas características do motor, desprezando assim o escorregamento que existe no arranque do veículo.

- **Força de atrito aerodinâmico apenas no sentido longitudinal:** Para a simplificação do cálculo da força aerodinâmica exercida no carro, só se vai considera a sua componente no sentido longitudinal ao veículo, desprezando as restantes componentes e momentos criados por esta.
- **O coeficiente de atrito de rolamento global:** O coeficiente de atrito de rolamento essencial para a obtenção da força de rolamento, é global, isto é, diz respeito a todas as forças de atrito de fricção e contacto existentes no veículo. Esta simplificação facilita bastante no cálculo da força de atrito total como também na obtenção do coeficiente de rolamento de forma empírica.
- **Caixa de velocidades com rendimento de 100 %:** De modo a facilitar os cálculos, a caixa de velocidades, caso exista, não possui perdas associadas.

4.2 Modos de funcionamento

O software criado possui três modos de funcionamento distintos, cujas principais diferenças residem nas variáveis de entrada que cada modo de funcionamento necessita e na forma como os resultados são obtidos.

4.2.1 Velocidade

O modo de funcionamento *Velocidade* é o principal modo de funcionamento do software e consiste no controlo da velocidade do veículo ao longo de todo o percurso. Utiliza, para isso, alguns critérios de decisão implementados no algoritmo, cuja finalidade é fornecer o estado do motor em cada ponto do percurso. Para o seu funcionamento é necessário fornecer o intervalo de velocidades a que se pretende que o veículo circule, bem como a velocidade a que o mesmo deve chegar ao ponto mais elevado do percurso.

Este modo de funcionamento é utilizado essencialmente para efetuar simulações onde são testadas ligeiras alterações ao veículo ou ao percurso, com o intuito de se perceber onde se podem efetuar melhorias.

4.2.2 Iterativo

Neste modo de funcionamento o software executa o modo de funcionamento *Velocidade*, referido anteriormente, variando de forma controlada o intervalo de velocidades a que o veículo deve circular e a sua velocidade no ponto mais elevado do percurso (VH). Para o seu funcionamento é necessário fornecer ao software o tempo máximo da prova.

Este modo de funcionamento é essencial para se obter o melhor intervalo de velocidades e a velocidade VH ótima.

4.2.3 Manual

Por último, no modo de funcionamento *Manual* é dado o *vetor on* (vetor representativo do estado do motor em cada ponto), desprezando assim qualquer critério de decisão existente no software. Este modo de funcionamento é útil para efetuar ajustes aos resultados obtidos nos outros modos de funcionamento, pois necessita de conhecimento prévio do *vetor on*.

4.3 Critérios de otimização

Como referido anteriormente foram necessários implementar alguns critérios de decisão, com o intuito de controlar a velocidade do veículo em todo o percurso. Estes são responsáveis pela obtenção do *vetor on* do motor, no modo de funcionamento *Velocidade* e por consequência no modo de funcionamento *Iterativo*. A estes critérios foram dados graus de prioridade para que haja apenas um resultado, *on* ou *off* em cada ponto.

4.3.1 Critério da velocidade

Este critério é o que possui menor grau de prioridade, ou seja só é executado quando os restantes critérios não se verificarem. Consiste na análise da velocidade do veículo em comparação com a velocidade mínima e máxima fornecida ao software. Assim, caso o veículo circule a velocidade inferior à velocidade mínima, o critério faz ligar o motor, inserindo um 1 no *vetor on*. Caso a velocidade esteja entre a velocidade mínima e máxima o critério mantém o estado anterior do motor, ou seja, caso o motor esteja ligado no ponto anterior, este vai manter-se ligado, por outro lado, caso se encontre desligado, o motor vai manter-se desligado. Por fim, caso a velocidade do veículo seja superior à velocidade máxima, o motor vai desligar, fornecendo o valor 0 ao *vetor on*.

4.3.2 Critério da energia final

Outro dos critérios implementados baseia-se na energia necessária para o veículo chegar ao final. Este critério tem maior prioridade que o anterior e consiste em calcular o comportamento do veículo caso seja desligado o motor. Para isso, efetua todos os cálculos numa função à parte do algoritmo de cálculo principal e verifica se o veículo com a energia total que possui consegue chegar ao fim do percurso. Caso isto se verifique o critério fornece ao *vetor on* o valor 0. Por outro lado, caso a energia que o veículo possua não seja suficiente, o critério da energia final dá lugar ao critério da velocidade referido anteriormente.

4.3.3 Critério da energia mínima

Por fim, o critério com maior prioridade é o critério da energia mínima cuja principal função é a de controlar a velocidade do veículo no ponto mais elevado do percurso (VH). Este critério é idêntico ao critério da energia final, variando apenas no ponto do percurso onde este é aplicado. Assim, efetua todos os cálculos numa função à parte do algoritmo de cálculo, e verifica se o veículo tem energia suficiente para chegar ao ponto em causa, com uma energia

mínima calculada inicialmente através da velocidade fornecida ao software para esse ponto. Caso a energia do veículo não seja suficiente, entra em função o critério da velocidade.

4.4 Fluxo do software

Para uma melhor compreensão do software e do seu fluxo de cálculo, foram elaborados três fluxogramas distintos onde cada um retrata uma camada do software.

4.4.1 Fluxo principal do software

A camada mais exterior do software diz respeito à entrada de valores, à escolha do modo de funcionamento e de como este é aplicado. O fluxograma encontra-se ilustrado por partes nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 e por inteiro na figura 1 presente no anexo A.

Inicialmente no fluxograma é dada toda a entrada de variáveis essenciais à execução do software, desde as variáveis relativas ao veículo, variáveis relativas à pista e variáveis relativas ao motor. Para além destas variáveis externas, também dão entrada variáveis internas, como por exemplo qual o modo de funcionamento da simulação.

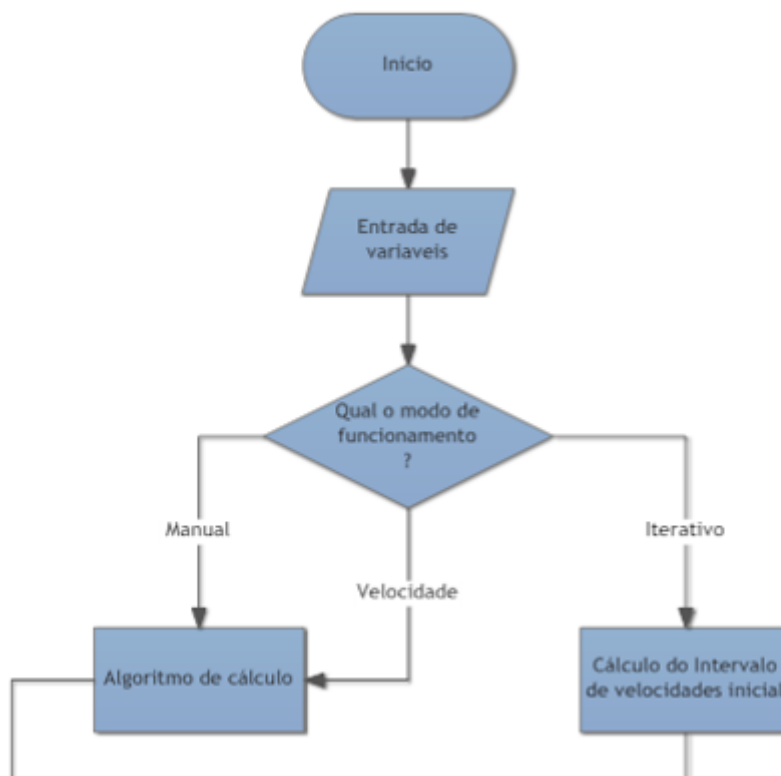


Figura 4.1. Excerto do fluxograma principal do software, 1ª parte.

Seguidamente o software decide qual o modo de funcionamento pretendido através das variáveis de entrada. Caso seja escolhido o modo de funcionamento *Manual* ou *Velocidade*, este apenas executa o algoritmo de cálculo, que se encontra ilustrado no fluxograma da figura 2 do anexo A. Caso o modo de funcionamento escolhido seja o *Iterativo*, este executa inicialmente

o cálculo para o primeiro valor do intervalo de velocidades e da velocidade VH. Este valor é obtido através do cálculo da velocidade média a que o veículo deve efetuar a prova e é dado pela equação 4.1 e 4.2.

$$V_{med} = \left(\frac{D_1 * L}{1000} \right) / \left(\frac{Tempo}{60} \right) \quad (4.1)$$

$$V_{med} = \left(\frac{D_1 + D_2 * (L - 2) + D_3}{1000} \right) / \left(\frac{Tempo}{60} \right) \quad (4.2)$$

A equação 4.1 refere-se ao cálculo da velocidade média quando as voltas são iguais, tendo assim a mesma distância (D_1) em metros, em todas as voltas, este valor é multiplicada pelo número de voltas (L), para se obter a distância total do percurso. Pro fim, este valor é então dividido pelo tempo total da prova em minutos, dando assim a velocidade média em Km/h. Para se obter as unidades no sistema internacional é necessário passar a distância para metros e o tempo para segundos. A equação 4.2 refere-se ao cálculo da velocidade média para a situação em que as voltas não são iguais. Obtendo-se, assim, a distância total através da soma da distância da primeira (D_1) e da última volta (D_3), com a distância das voltas intercalas entre estas (D_2), multiplicado pelo número de voltas menos dois. É de referir ainda que, para diminuir o tempo de execução do software foi atribuído o valor mínimo para a velocidade VH de 5 km/h e o valor mínimo para a velocidade mínima de 10 km/h. Estes valores não invalidam os resultados pois para valores inferiores aos referidos o consumo aumenta de forma drástica.

Seguidamente o primeiro valor da velocidade mínima é dado pelo arredondamento para zero do valor obtido na velocidade média. Em relação à velocidade máxima, esta é obtida através do arredondamento para mais infinito do valor obtido para a velocidade média, somando uma unidade a este. Por último, o valor da velocidade VH inicial é o valor da velocidade mínima. Após a obtenção do intervalo de velocidades e da velocidade VH é efetuado o algoritmo de cálculo ilustrado no fluxograma da figura 2 do anexo A.

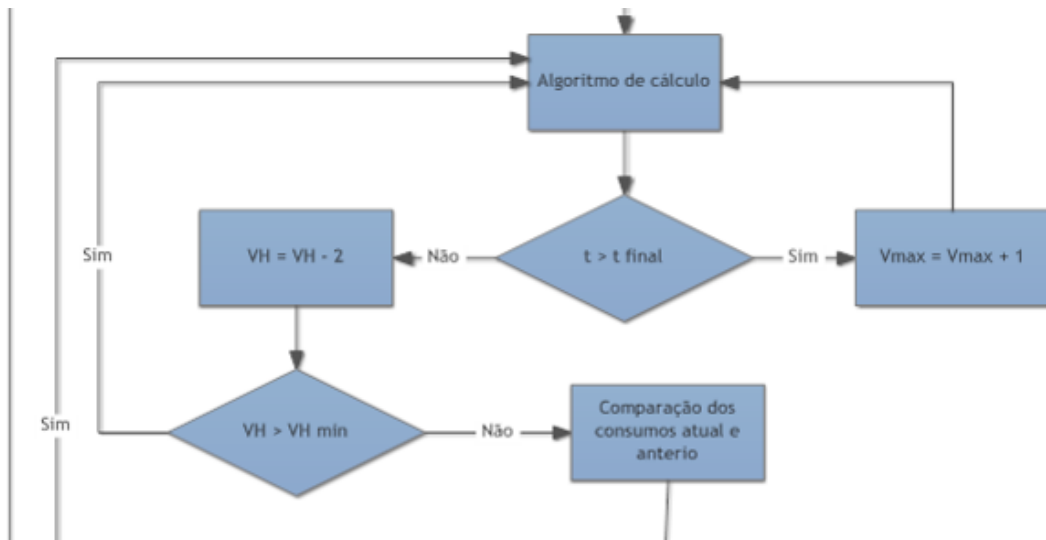


Figura 4.2. Excerto do fluxograma principal do software, 2ª parte.

Posteriormente ao algoritmo de cálculo é obtido o valor do tempo para a simulação efetuada e caso este seja superior ao tempo máximo da prova, o software irá aumentar uma unidade ao valor da velocidade máxima e efetuar de novo o algoritmo de cálculo. Caso o tempo obtido seja inferior ao tempo máximo, são subtraídas duas unidades à velocidade VH. Caso esta seja superior a velocidade VH mínima, o software volta a efetuar o mesmo processo descrito até agora, para a mesma velocidade mínima só que para uma velocidade VH inferior, guardando sempre os resultados obtidos para o VH anterior. Caso a velocidade VH seja inferior à velocidade VH mínima, o software compara todos os resultados obtidos para a mesma velocidade mínima e guarda o melhor resultado.

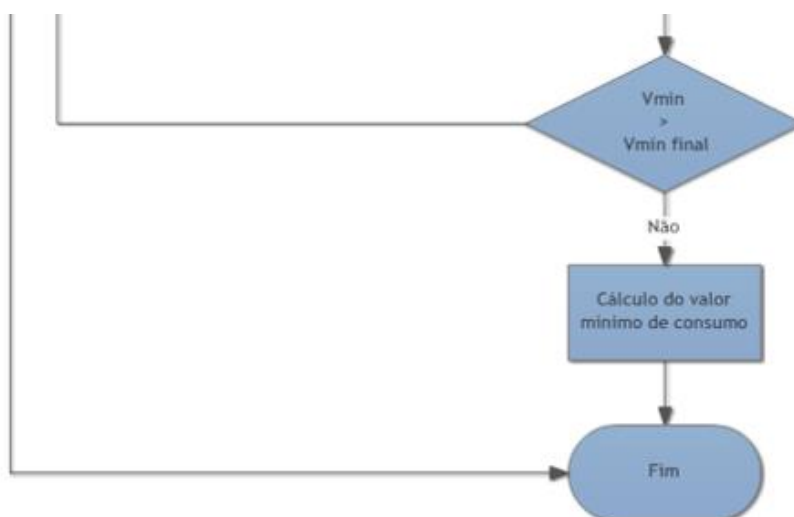


Figura 4.3. Excerto do fluxograma do software principal do programa, 3ª parte.

Por fim é subtraída uma unidade à velocidade mínima e, caso esta seja superior à velocidade mínima final, o software irá executar o processo descrito até agora. Quando a velocidade

mínima for inferior à velocidade mínima final, o software utiliza os valores para cada velocidade mínima e calcula o melhor resultado.

4.4.2 Fluxo do algoritmo de cálculo

A camada principal de cálculo do software refere-se ao algoritmo de cálculo usado para calcular o consumo em cada simulação e encontra-se ilustrada, por partes, nas figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 e na sua totalidade no fluxograma da figura 2 do anexo A.

Inicialmente são introduzidas algumas condições iniciais necessárias ao funcionamento do software como: o motor no ponto inicial está ligado, a velocidade no primeiro ponto é nula, o veículo arranca às rotações mínimas dadas na curva característica do motor e na primeira mudança da caixa de velocidades. É de referir que i é o contador da distância por volta e j é o contador do número de voltas.

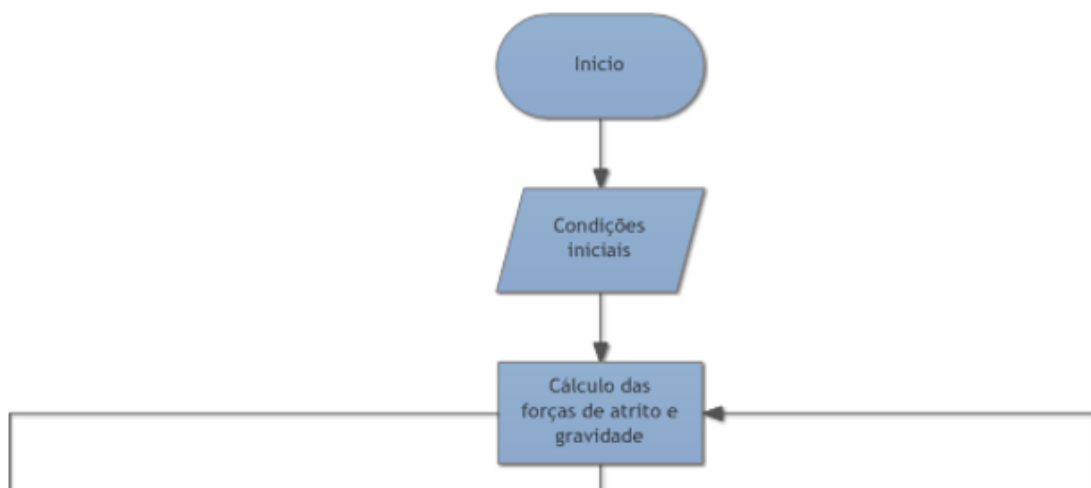


Figura 4.4. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 1ª parte.

O primeiro cálculo a efetuar refere-se às forças de atrito aplicadas ao veículo e à força da gravidade. Relativamente às forças de atrito, o seu cálculo advém da equação 3.2 que ao ser aplicada em cada ponto fica com o formato da equação 4.3.

$$Fa_{(i,j)} = Fae_{(i,j)} + Fr_{(i,j)} + Fcd_{(i,j)} \quad (4.3)$$

O valor da força de atrito aerodinâmica (Fae), rolamento (Fr) e em curva (Fcd) advém das equações 3.3, 3.6 e 3.9, respetivamente, que ao serem aplicadas em cada ponto ficam com o formato das equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$Fae_{(i,j)} = \frac{1}{2} * \rho * v_{(i-1,j)}^2 * Cae * A \quad (4.4)$$

$$Fr_{(i,j)} = Cr * w \quad (4.5)$$

$$Fcd_{(i,j)} = Ccd * m * v_{(i-1,j)}^2 * R_{(i)} \quad (4.6)$$

É de salientar que as forças de atrito de cada origem foram calculados separadamente e somadas na equação 4.3 para uma melhor análise dos seus valores e do seu peso no resultado final. Outro aspeto a referir é que, como ainda não temos a velocidade no ponto em estudo, o valor de velocidade que entra na força de atrito aerodinâmico e na força de rolamento é a velocidade no ponto anterior. Em relação à força gravítica, esta é obtida através da equação 3.10 onde a aceleração da gravidade é considerada 9.81 m/s^2 , e ao ser calculado em cada ponto fica com o formato da equação 4.7.

$$Fg_{(i,j)} = w * \frac{H_{(i-1)} - H_{(i)}}{d_{(i-1)} - d_{(i)}} \quad (4.7)$$

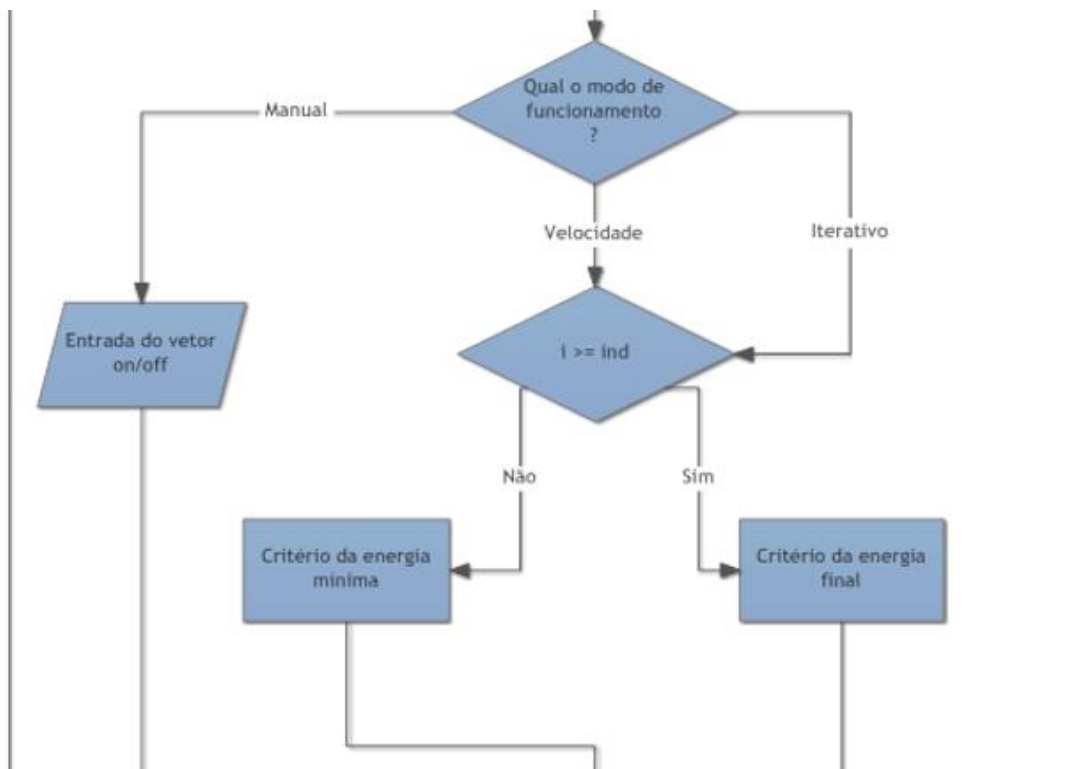


Figura 4.5. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 2ª parte.

Seguidamente, o algoritmo de cálculo sofre uma trifurcação dependendo do modo de funcionamento escolhido para a simulação. Caso tenha sido escolhido o modo de funcionamento *Manual* é dada a entrada do *vetor on*, ficando assim o estado do motor a ser controlado pelo vetor introduzido no software. Por outro lado, caso o modo de funcionamento seja o *Velocidade*

Para se obter o binário em função da pressão do acelerador (abertura da borboleta) é necessário aplicar a equação 4.10, de primeiro grau, em função do binário à plena carga (T_p), onde a_3 e b_3 são constante e dependem das características de cada motor e da percentagem de acelerador pressionado.

$$T_{(i,j)} = a_3 * Tp_{(i,j)} + b_3 \quad (4.10)$$

Através do binário obtém-se a força motriz através da equação 4.11, que multiplica o binário (T), a razão de transmissão (I) e o inverso do raio da roda ($1/r$), pelo vetor on .

$$Fm_{(i,j)} = T_{(i,j)} * I_{(i,j)} * \frac{1}{r} * on_{(i,j)} \quad (4.11)$$

Após saber-se qual a força motriz, o algoritmo calcula a força resultante aplicada o veículo, ou seja, a força que o fará deslocar, aplicando a equação 4.12 que advém da equação 3.1 apresentada anteriormente, aplicada agora a cada ponto.

$$F_{(i,j)} = Fm_{(i,j)} - Fa_{(i,j)} - Fg_{(i,j)} \quad (4.12)$$

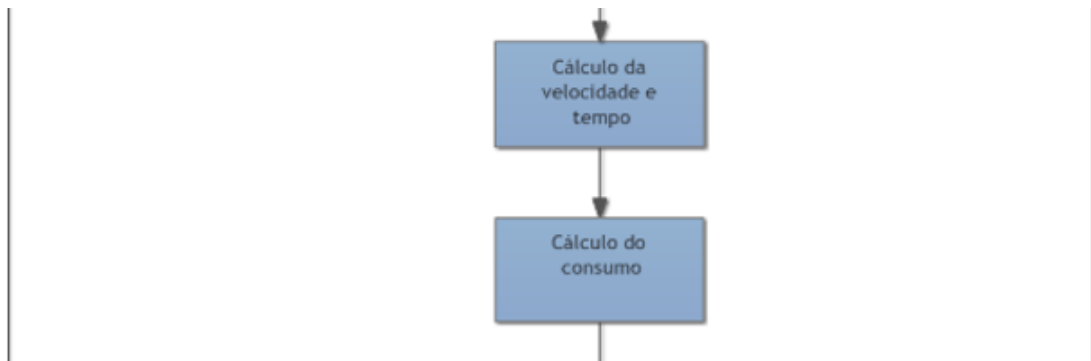


Figura 4.7. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 4ª parte.

Com a força de propulsão ou força resultante, o algoritmo calcula a velocidade em cada ponto do percurso através da equação 4.17, que foi deduzida a partir da equação 4.13, 4.14 e 4.15, que dizem respeito à equação da velocidade, à equação da aceleração e à 2ª lei de Newton, respetivamente.

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta d}{v} \quad (4.13)$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4.14)$$

$$F = m * a \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (4.15)$$

Partindo da equação 4.1 e substituindo as variáveis do intervalo de tempo (Δt) e aceleração (a) pelas suas respectivas equações, obtemos a equação 4.16.

$$\frac{F}{m} = \frac{\Delta v}{\frac{\Delta d}{v}} \quad (=) \quad \frac{F}{m} = \frac{v_{(i)} - v_{(i-1)}}{\frac{d_{(i)} - d_{(i-1)}}{v_{(i)}}} \quad (4.16)$$

Simplificando a equação 4.16 e resolvendo-a em ordem à velocidade atual ($v_{(i)}$) obtemos a equação 4.17, que é utilizada no algoritmo para efetuar o cálculo da velocidade em cada ponto do percurso.

$$v_{(i,j)} = \sqrt{v_{(i-1,j)}^2 + 2 * F_{(i-1,j)} * (d_{(i)} - d_{(i-1)}) * \frac{1}{m}} \quad (4.17)$$

De modo a obtermos a velocidade em km/h, para uma melhor percepção do seu valor, basta aplicar a equação 4.18.

$$V_{(i,j)} = v_{(i,j)} * \frac{3600}{1000} \quad (4.18)$$

Em relação ao cálculo do tempo, este é obtido através da equação 4.14, resolvendo-a em ordem ao tempo. Obtemos, assim, a equação 4.19 para o cálculo do tempo gasto a percorrer cada metro do percurso.

$$t_{(i,j)} = \frac{d_{(i)} - d_{(i-1)}}{v_{(i,j)}} \quad (1.19)$$

O último cálculo que o algoritmo efetua em cada ponto é o cálculo do consumo. Para o seu cálculo, o algoritmo calcula inicialmente o consumo específico à plena carga, através da sua curva caraterística para o consumo do motor que é dado, tal com a curva caraterística do binário, por uma equação de 3º grau em função das rotações com o formato da equação 4.20, onde a_2 , b_2 , c_2 e d_2 são constantes e depende das caraterísticas de cada motor.

$$GCep_{(i,j)} = a_2 * n_{(i,j)}^3 + b_2 * n_{(i,j)}^2 + c_2 * n_{(i,j)} + d_2 \quad (4.20)$$

Para se obter o consumo específico em função da pressão do acelerador (GCe) é necessário aplicar a equação 4.21, de primeiro grau, em função do consumo específico à plena carga (GCep), onde a_3 e b_3 são constante e dependem das características de cada motor e da percentagem de acelerador pressionado.

$$GCe_{(i,j)} = a_3 * GCep_{(i,j)} + b_3 \quad (4.21)$$

Com o consumo específico (GCe) em g/kw.h, o algoritmo calcula o consumo em gramas (Gp), através da equação 4.22, multiplicando o consumo específico em cada ponto pela potência no mesmo ponto em Kw e pelo tempo em segundo.

$$Gp_{(i,j)} = GCe_{(i,j)} * \frac{T_{(i,j)} * 2 * \pi * n_{(i,j)}}{60 * 1000} * \frac{d_{(i)} - d_{(i-1)}}{v_{(i,j)} * 3600} \quad (4.22)$$

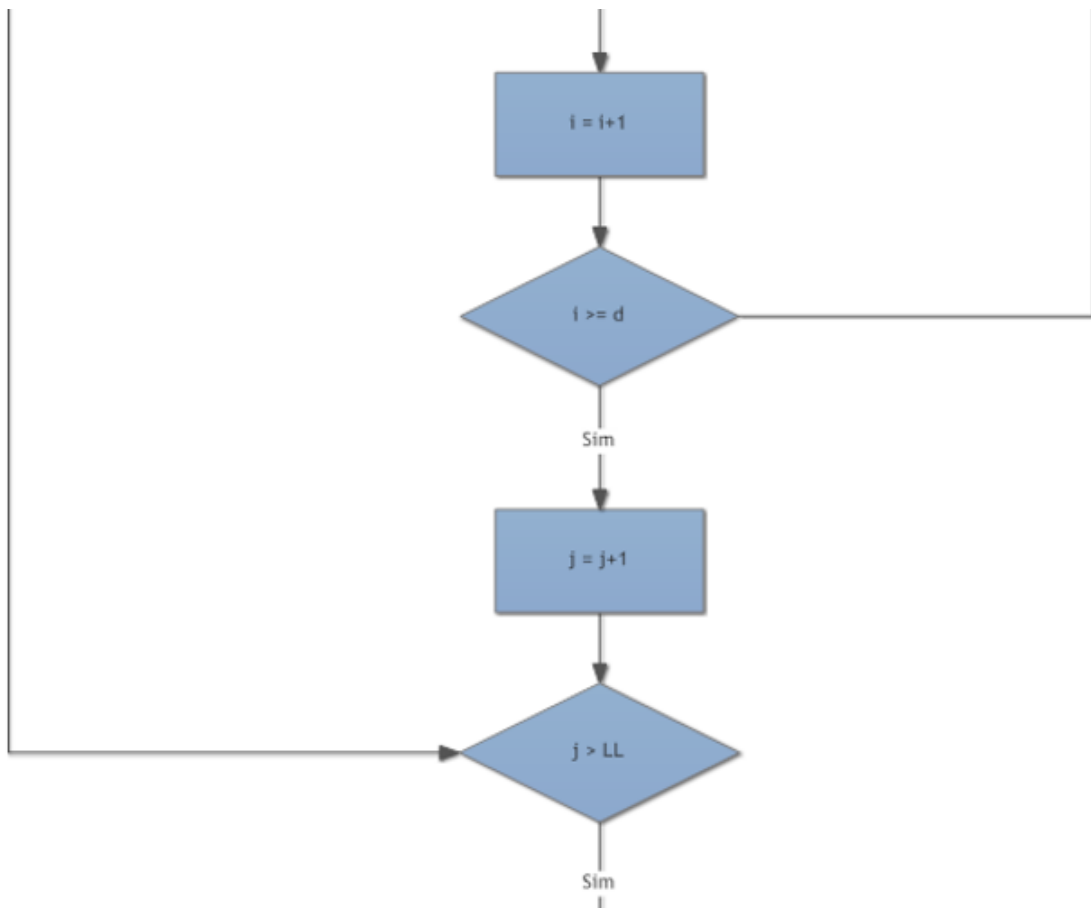


Figura 4.8. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 5ª parte.

De seguida, o algoritmo soma uma unidade ao contador i , avançando assim um metro na pista. Caso o novo i seja inferior ou igual à distância total do percurso, o algoritmo volta a efetuar todo o processo descrito anteriormente, agora para o novo ponto do percurso. Caso o contador

i seja maior que a distância (d), o algoritmo acabou a volta à pista e irá somar uma unidade ao contador j. Caso o contador j seja inferior ou igual ao número de voltas diferentes, o algoritmo irá calcular de novo todo o processo descrito anteriormente, agora para uma volta diferente. Caso as voltas sejam todas iguais ou o algoritmo tenha efetuado a 3ª volta diferente, Este irá calcular o somatório do tempo gasto a efetuar o percurso e o somatório do consumo em gramas.



Figura 4.9. Excerto do fluxograma do algoritmo de cálculo, 6ª parte.

Para uma melhor apreciação dos resultados, o tempo é convertido em minutos e segundos e o consumo em mililitros, dividindo o consumo em gramas pela densidade do combustível como mostra a equação 4.23. Ao consumo em mililitros é somado o consumo instantâneo do motor ao ligar (a_4) multiplicado pelo número de vezes que este ligou (G_{ligar}) ao longo de toda a prova. É de salientar que a densidade do combustível é fornecida pelos organizadores da prova e é de 0.7646 g/ml.

$$Gml = \frac{Gl}{0.7646} + a_4 * G_{ligar} \quad (4.23)$$

Por fim, para se obter os resultados no formato da competição, ou seja em Km/L, o algoritmo divide a distância total percorrida, em metros, do veículo pelo consumo, em mililitros. É de realçar que a forma que o algoritmo utiliza para calcular a distância total varia caso as voltas sejam ou não iguais, como mostram as equações 4.24 e 4.25.

$$Gkm = \frac{(D_1 + D_2 * (L - 2) + D_3)}{Gml} \quad (4.24)$$

$$Gkm = \frac{D_1 * L}{Gml} \quad (4.25)$$

4.4.3 Fluxograma dos critérios de energia

A camada mais interior do software divide-se em dois algoritmos bastante semelhantes: algoritmo do critério da energia mínima e algoritmo do critério da energia final. Ambos os algoritmos têm como objetivo calcular se o veículo possui energia suficiente para chegar a um determinado ponto da pista. No caso do algoritmo do critério da energia mínima, o ponto em causa é o ponto mais elevado do percurso. Por outro lado, no algoritmo do critério da energia final o ponto em causa é o último de cada volta. Ambos os fluxogramas encontram-se ilustrados nas figuras 3 e 4 do anexo A. Seguidamente será explicado detalhadamente apenas o algoritmo do critério da energia mínima com alguns excertos do fluxograma ilustrados nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 e indicadas as diferenças para o algoritmo do critério da energia final.

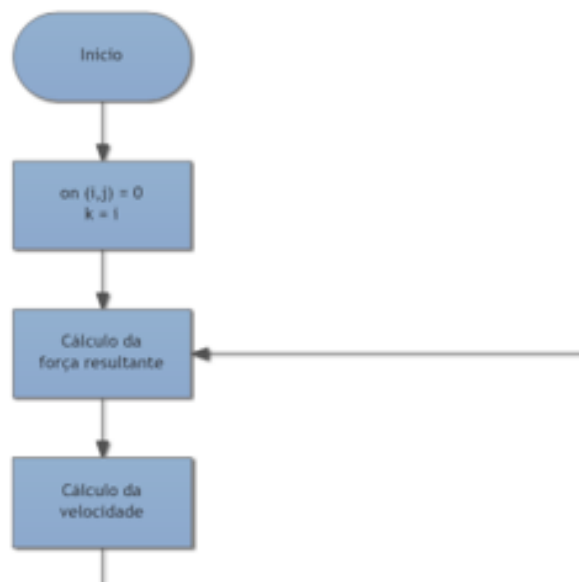


Figura 4.10. Excerto do fluxograma do critério de energia mínima, 1ª parte.

Inicialmente o algoritmo impõem que o motor se encontre desligado e altera o contador i , do algoritmo de cálculo, para k , com o intuito de não haver conflito entre os algoritmos. Seguidamente é calculada a força resultante através da equação 4.12, partindo do valor da força de atrito obtida no algoritmo de cálculo e com força do motor nula. Com a força resultante é calculada a velocidade do veículo através da equação 4.17.

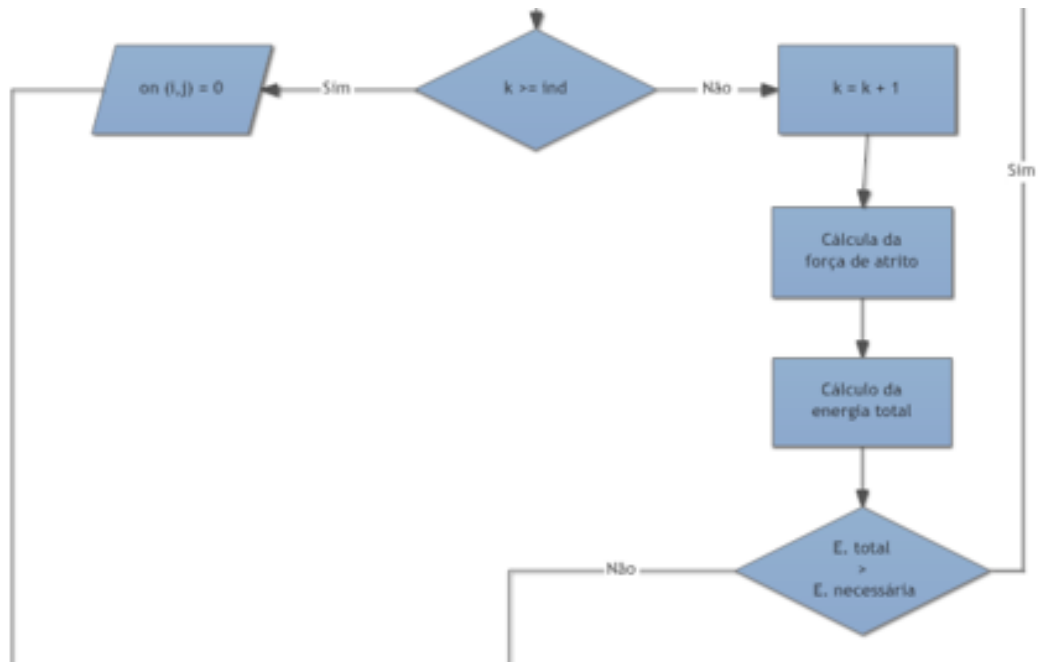


Figura 4.11. Excerto do fluxograma do critério da energia mínima, 2ª parte.

Posteriormente, caso o contador k seja maior ou igual ao índice do ponto mais elevado do percurso (ind), significa que o veículo possui energia suficiente para chegar ao ponto mais elevado do percurso logo, fornece ao algoritmo de cálculo o valor de 0 no *vetor on*, *ate o veiculo passar o ponto em causa*. Por outro lado, caso o contador k seja inferior ao índice (ind), o algoritmo soma uma unidade ao contador e calcula as forças de atrito, para o novo k , através das equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

Com as forças de atrito o algoritmo procede ao cálculo da energia total do veículo no ponto em estudo, utilizando para isso a equação 4.28 que consiste na soma da energia cinética, apresentada na equação 4.26, com a anergia potencial, apresentada na equação 4.27, subtraindo ainda as forças de atrito multiplicadas pela distância.

$$Ec_{(k,j)} = \frac{1}{2} * m * v_{(k-1,j)}^2 \quad (4.26)$$

$$Ep_{(k,j)} = m * g * H_{(k)} \quad (4.27)$$

$$ET_{(k,j)} = \frac{1}{2} * m * v_{(k-1,j)}^2 + m * g * H_{(k)} - (d_{(k)} - d_{(k-1)}) * Fa_{(k,j)} \quad (4.28)$$

O valor obtido pela equação da energia total é comparado com o valor da energia necessária no ponto mais elevado da pista, valor este que é obtido através da mesma equação, só que para

o valor da velocidade VH . Caso se trate do algoritmo do critério da energia final, o valor da energia necessária é calculado para uma velocidade de 2 km/h. Esta não é considerada nula por razões de segurança.

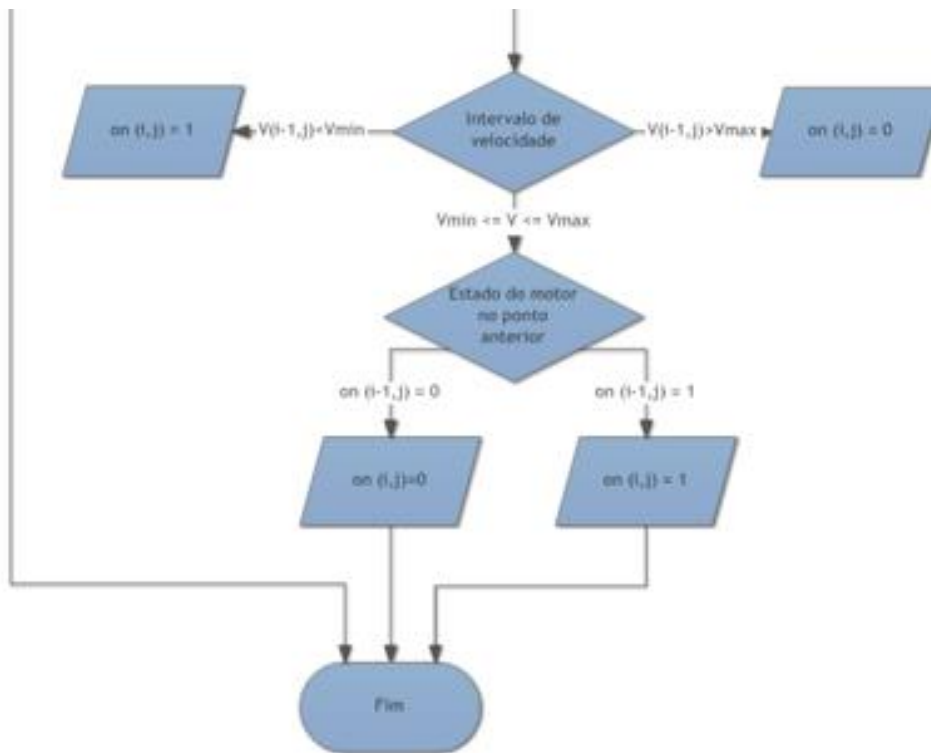


Figura 4.12. Excerto do fluxograma do critério da energia mínima, 3ª parte.

Caso a energia total seja maior que a energia necessária, o algoritmo volta a fazer o mesmo processo descrito anteriormente. Caso isso não se verifique, o algoritmo executa o critério da velocidade. Este critério consiste em comparar a velocidade do ponto (i,j) , com a velocidade mínima e máxima. Caso a velocidade seja inferior à velocidade mínima, o algoritmo liga o motor. Por outro lado, caso a velocidade seja maior que a velocidade máxima, o algoritmo desliga o motor. Por fim, caso a velocidade se encontre entre a velocidade máxima e mínima, o motor mantém o estado anterior.

Resumindo, o algoritmo do critério da energia mínima só é interrompido caso k seja maior que o índice do ponto mais elevado da pista ($on_{(i,j)} = 0$) ou caso a energia total seja inferior à energia do veículo no ponto mais elevado da pista, para uma velocidade VH , executando assim o critério da velocidade.

O algoritmo do critério da energia final só é interrompido caso k seja maior que a distância da pista ($on_{(i,j)} = 0$) ou caso a energia total seja inferior à energia do veículo no final de cada volta para uma velocidade de 2 km/h, executando assim o critério da velocidade.

Capítulo 5

5 Resultados da simulação do software

Uma vez estruturada e devidamente caracterizada a ferramenta de cálculo sistemático proposta, é necessário recorrer à simulação da mesma, para averiguar a sua funcionalidade e veracidade dos resultados.

5.1 Valores de entrada

Para a simulação foram utilizados valores aproximados para o veículo, pois os reais ainda não se encontram definidos. Estes foram aplicados à pista da prova a realizar em Maio de 2017 em Londres e o motor da simulação será o GX35 da Honda.

5.1.1 Motor

O motor escolhido para esta simulação como referido anteriormente é o Honda GX35 que é um motor de baixa cilindrada e baixa potência, cujas principais especificações se encontram apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Tabela de especificações do motor GX35 retirada da sua ficha técnica. [16] [17]

Tipo	4 Tempos
Número de cilindros	1
Diâmetro x curso do cilindro	39 mm x 30 mm
Volume deslocado	35.8 cm ³
Taxa de compressão	8:1
Potência	1.0 KW (1.3 HP) / 7 000 rpm
Binário máximo	1.6 Nm / 0.6 kgfm / 5 500 rpm
Consumo na máxima potência	0.71 L/h - 7 000 rpm
Dimensões	198 x 234 x 240 mm
Peso a seco	3.33 Kg

Da ficha técnica do motor GX35 foi ainda retirada a sua curva característica que se encontra apresentada na figura 5.1.

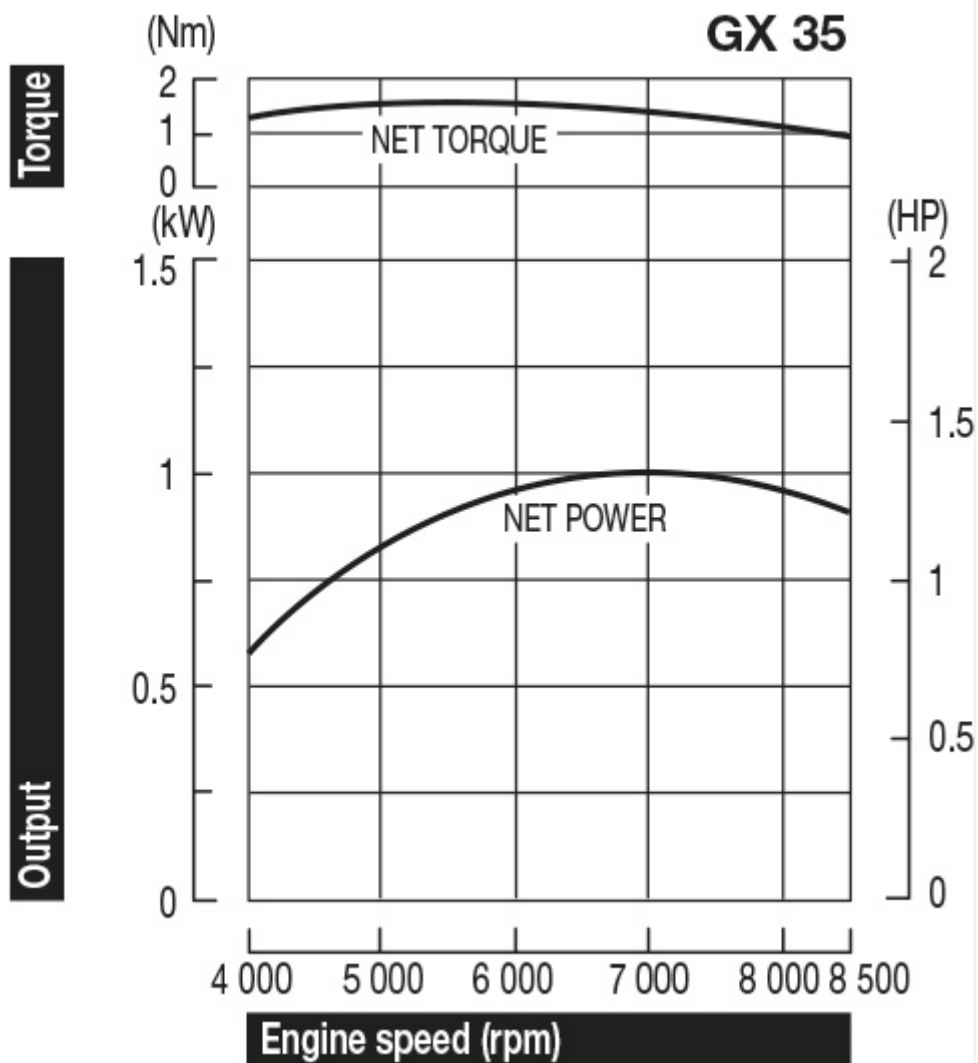


Figura 5.1. Curvas características de binário e potência, do motor GX35. [16]

Após a análise da curva de binário do motor à plena carga, foi retirada a equação 5.1 de terceiro grau, com o formato da equação 4.8.

$$Tp_{(i,j)} = 7 * 10^{-12} * n_{(i,j)}^3 - 2 * 10^{-8} * n_{(i,j)}^2 + 0.0017 * n_{(i,j)} - 2.5822 \quad (5.1)$$

Como a ficha técnica fornecida pelo fabricante não possui a curva característica do consumo em função das rotações, fornecendo apenas o valor constante de 360 g/KW.h, optou-se pela aproximação desta curva recorrendo ao motor EH035 da construtora Robin/Subaru, pois trata-se de um motor bastante semelhante ao utilizado, como se pode verificar pelas suas curvas características que se encontram apresentadas na figura 5.2.

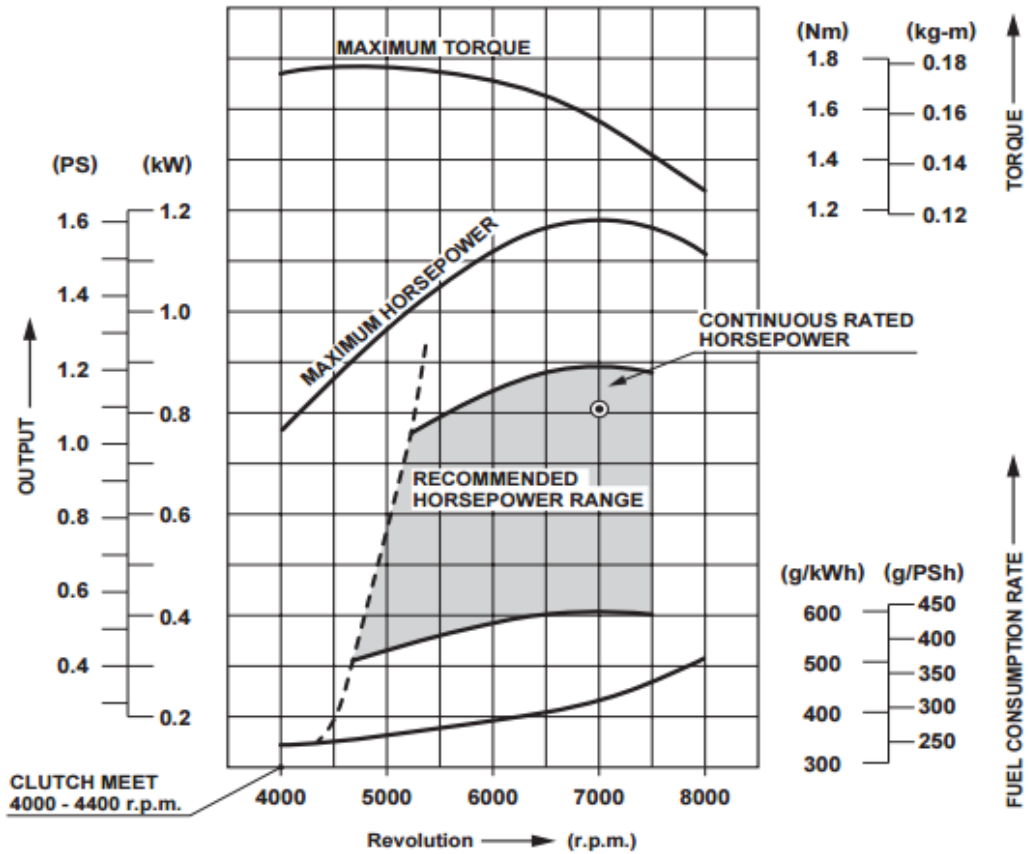


Figura 5.2. Curvas características de binário, potência e consumo específico para o motor EH035 da Robin/Subaru. [18]

Através da curva característica do consumo específico para o motor EH035 obteve-se a equação 5.2 de terceiro grau em função das rotações.

$$GCep_{(i,j)} = 3 * 10^{-9} * n_{(i,j)}^3 - 4 * 10^{-5} * n_{(i,j)}^2 + 0.212 * n_{(i,j)} - 45.7 \quad (5.2)$$

Em relação à abertura da borboleta ou pressão do acelerador, numa primeira simulação será considerada toda aberta, ou seja, o motor funcionará à plena carga utilizando para isso a equação 5.3 e 5.4 para o cálculo do binário e consumo específico, respetivamente. Numa segunda simulação será aplicada uma percentagem de aceleração de 75 %, utilizando para isso a equação 5.5 e 5.6 para o cálculo do binário e consumo específico, respetivamente. Para nenhuma das simulações será dado um valor mínimo quer de binário, quer de consumo.

$$T_{(i,j)} = 1 * Tp_{(i,j)} + 0 \quad (5.3)$$

$$GCe_{(i,j)} = 1 * GCe_{p(i,j)} + 0 \quad (5.4)$$

$$T_{(i,j)} = 0.75 * Tp_{(i,j)} + 0 \quad (5.5)$$

$$GCe_{(i,j)} = 0.75 * GCe_{p(i,j)} + 0 \quad (5.6)$$

Referente ainda ao motor, este terá um consumo instantâneo ao ligar de 1 mililitro e possuirá apenas uma velocidade com uma razão de transição de 1/20. Considera-se também que o motor funciona no mínimo às 4000 rpm.

5.1.2 Veículo

Relativamente ao veículo, as suas características estão apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2. Tabela de variáveis de entrada do veículo.

Variáveis externas		Coeficientes de atrito	
Massa (m)	150 Kg	Aerodinâmico	0.35
Área frontal (A)	0.9 m ²	Rolamento	0.01
Raio da roda (r)	0.27 m	Curva	0.015

5.1.3 Pista

Relativamente à pista, os valores de entrada encontram-se maioritariamente numa tabela cujo excerto se encontra no anexo C. Pelas informações fornecidas pelos promotores da prova, esta terá o tempo máximo de 39 minutos, para efetuar um total de 10 voltas. O percurso escolhido para efetuar a prova encontra-se ilustrado no anexo E, onde se pode verificar que o início e fim da prova é no mesmo local, resultando assim num percurso único.

5.2 Resultado iterativo

5.2.1 Resultados à plena carga

Ao executar o software para as variáveis indicadas anteriormente, os resultados obtidos para o modo de funcionamento iterativo, à plena carga, são os apresentados na figura 5.3, onde é mostrada a janela criada para esse efeito. Nesta janela os resultados encontram-se apresentados à esquerda, no formato de uma tabela, onde se podem verificar o melhor resultado para cada velocidade mínima.

À direita encontram-se ilustrados os mesmos resultados, contudo estes encontram-se apresentados na forma de um gráfico, que relaciona o consumo total do veículo em mililitro com a velocidade mínima do percurso.

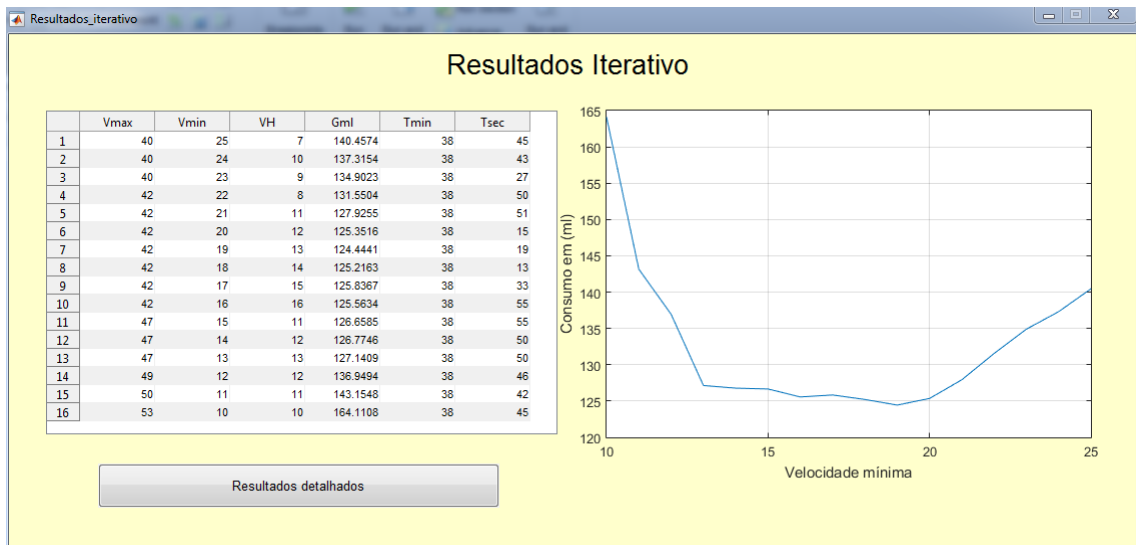


Figura 5.3. Janela do software com os resultados obtidos pelo modo de funcionamento Iterativo para o motor à plena carga

O melhor resultado foi obtido para a velocidade mínima de 19 km/h e velocidade VH de 13 km/h, que fez com que a velocidade máxima necessária para executar a prova no tempo limite seja de 42 km/h. O consumo total em mililitros foi de 124.44 ml e o tempo de duração da prova de 38 minutos e 19 segundos.

5.2.2 Resultados a 75% da carga

Na simulação a 75 % de carga os resultados obtidos encontram-se apresentados na figura 5.3.

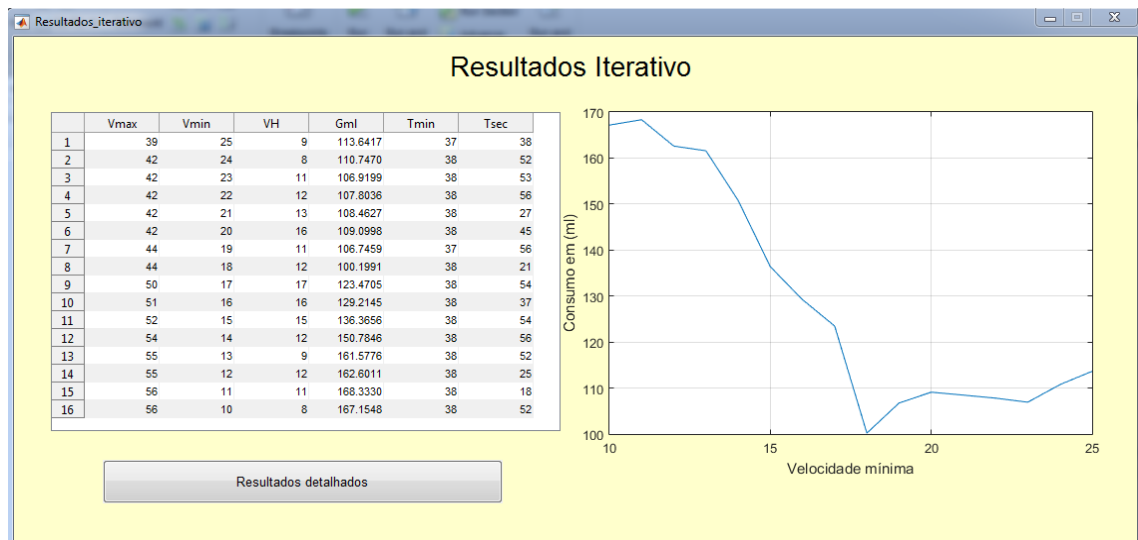


Figura 5.4. Janela do software para os resultados obtidos pelo modo de funcionamento Iterativo para o motor a 75 % da carga

O melhor resultado foi obtido para a velocidade mínima de 18 km/h e velocidade VH de 12 km/h, que faz com que a velocidade máxima necessária para executar a prova no tempo limite seja de 44 km/h. O consumo total em mililitros foi de 100.20 ml e o tempo de duração da prova de 38 minutos e 21 segundos.

Tentou-se ainda simular o software para o valor de 50% de carga, contudo os resultados indicaram que o motor não conseguiria arrancar nem efetuar a subida até ao ponto mais elevado da pista, devido ao facto de as forças de atrito serem superiores à força do motor.

5.3 Resultados detalhados

Após a análise dos resultados do modo de funcionamento Iterativo, serão agora apresentados os resultados detalhados para a melhor performance, ou seja, para o motor a funcionar a 75% da carga, para um intervalo de velocidades entre 18 e 44 km/h e uma velocidade VH de 12 km/h.

O consumo como referido anteriormente foi de 100.20 ml, o que resulta numa distância de 165.5 km/L. A simulação obteve uma velocidade média de 25.9 Km/h e um tempo total de 38 minutos e 21 segundos.

Para uma melhor análise dos resultados foram elaborados 6 gráficos customizados, onde 3 são representativos da pista e 3 da cinemática do veículo. Relativamente aos gráficos relativos à pista, estes encontram-se apresentados nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

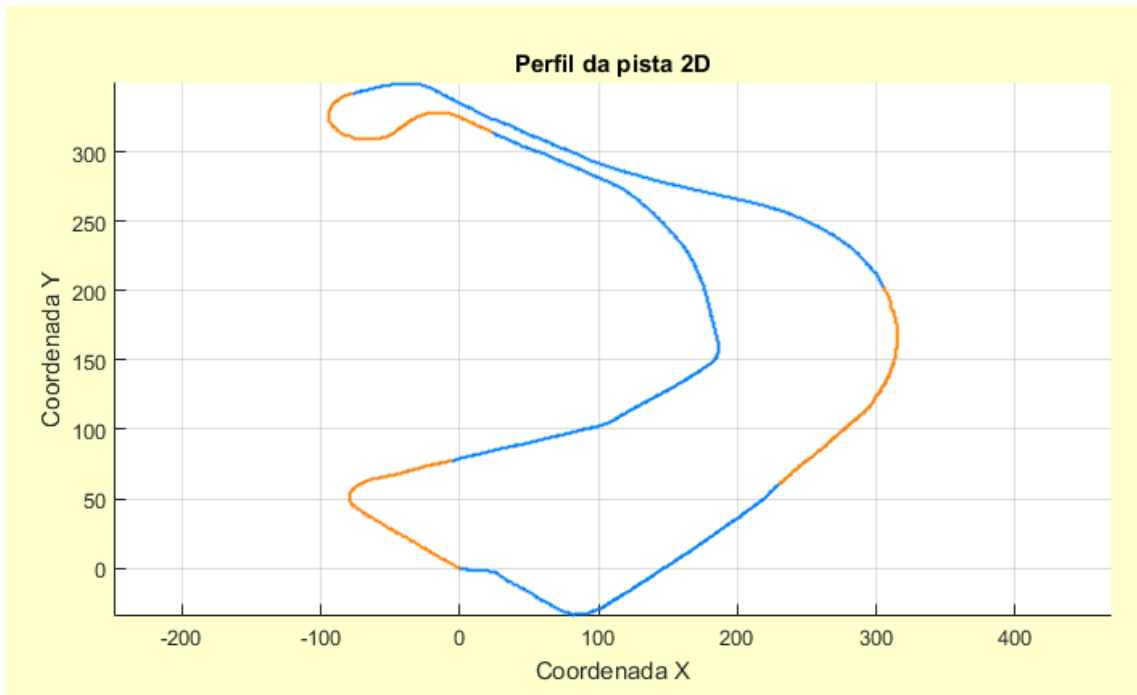


Figura 5.5. Gráfico 2D da pista com o local onde o motor se encontra ligado assinalado a laranja.

No gráfico da figura 5.5 podemos observar o perfil da pista a duas dimensões onde, a laranja, se encontram os locais da pista onde o motor está ligado e, a azul, os locais onde o motor se encontra desligado. Como podemos verificar o motor apenas liga 3 vezes por volta. É de salientar que o começo e fim da prova é na coordenada (0,0).

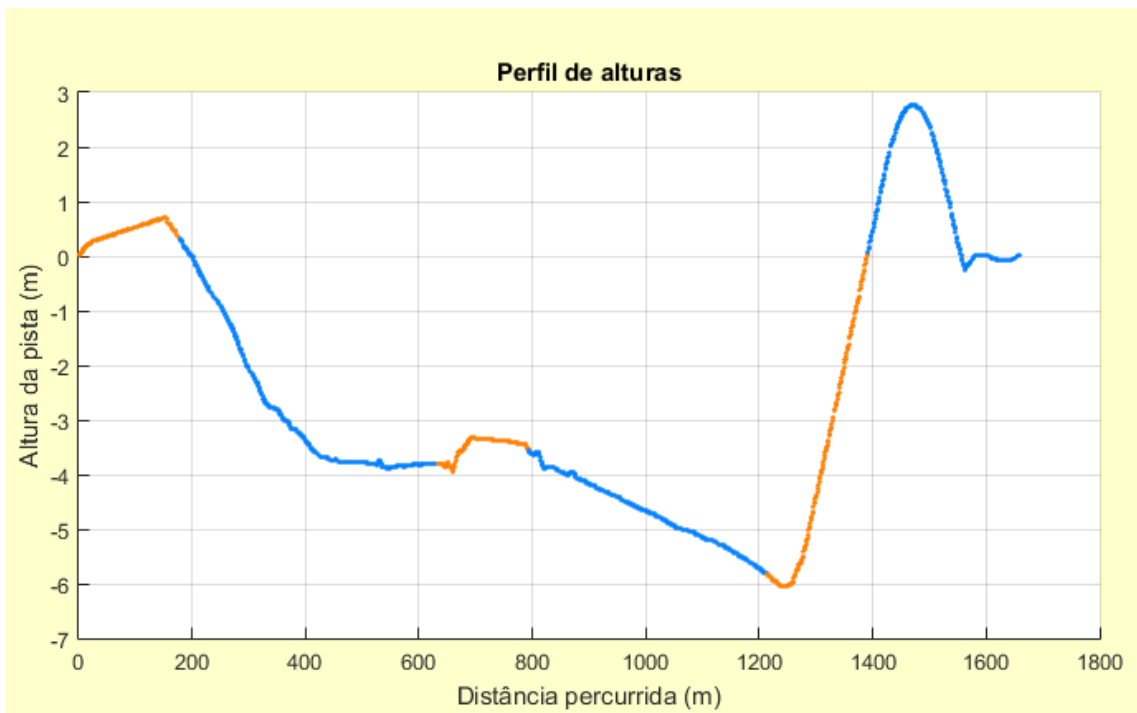


Figura 5.6. Perfil de altura da pista com o local onde o motor se encontra ligado assinalado a laranja.

No gráfico da figura 5.6 encontra-se ilustrado o perfil de altura de uma volta da pista, tendo como ponto de referencia a altura inicial nula, funcionando assim como referência. Através deste gráfico obtemos que o motor encontra-se ligado do ponto [1,178], [623,794] e [1214,1392].

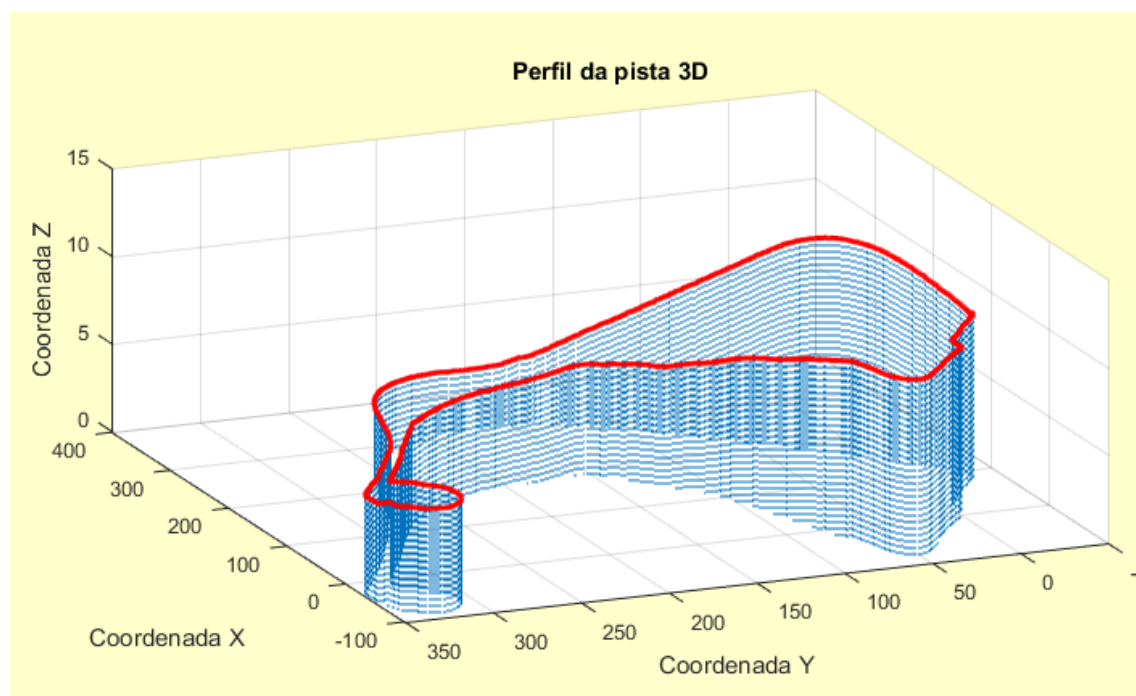


Figura 5.7. Perfil da pista em 3D.

No gráfico da figura 5.7 podemos observar o perfil da pista em 3 dimensões para uma melhor percepção da altura da pista em função das curvas, obtendo-se assim as curvas críticas da prova, como é o caso da curva após a descida do ponto mais elevado. É de salientar que a prova começa e acaba no ponto de coordenada (0,0,Z).

Relativamente aos gráficos da cinemática do veículo, estes encontram-se apresentados nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

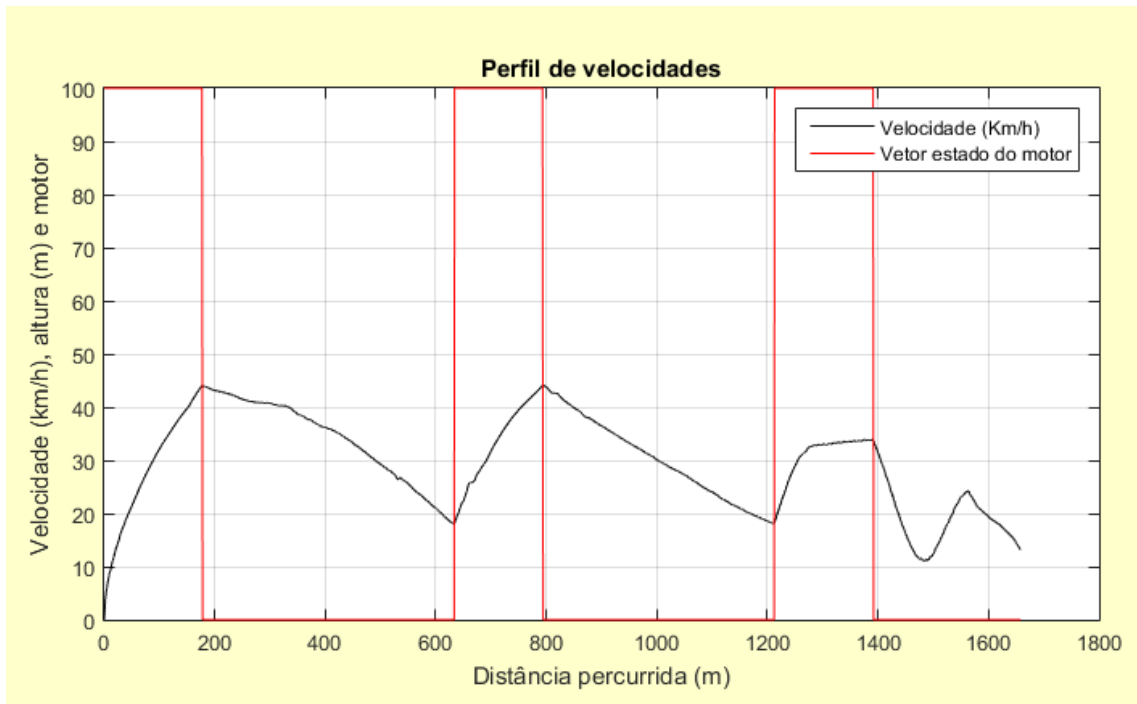


Figura 5.8. Perfil de velocidade da pista e do vetor on em função da distância

No gráfico da figura 5.8 podemos observar, a preto, o perfil de velocidade do veículo e, a vermelho, o *vetor on* multiplicado por 100 para uma melhor visualização do mesmo, ambos em função da distância. Ao analisar este gráfico, observamos que existe um ganho de velocidade quando o motor se encontra ligado, mas também existe um ganho de velocidade quando o veículo se encontra a descer após o ponto mais elevado da pista, que se situa próximo dos 1500 metros do percurso. É de salientar também que o veículo não chega ao final de cada volta com velocidade próxima de 0, pois a decida referida anteriormente é bastante acentuada e próxima da meta. O valor da velocidade final poderia ser reduzido diminuindo a velocidade VH, mas esta redução implicaria um aumento do consumo pois o veículo teria de aumentar a velocidade ao longo de toda a pista de modo a concluí-la no tempo estipulado.

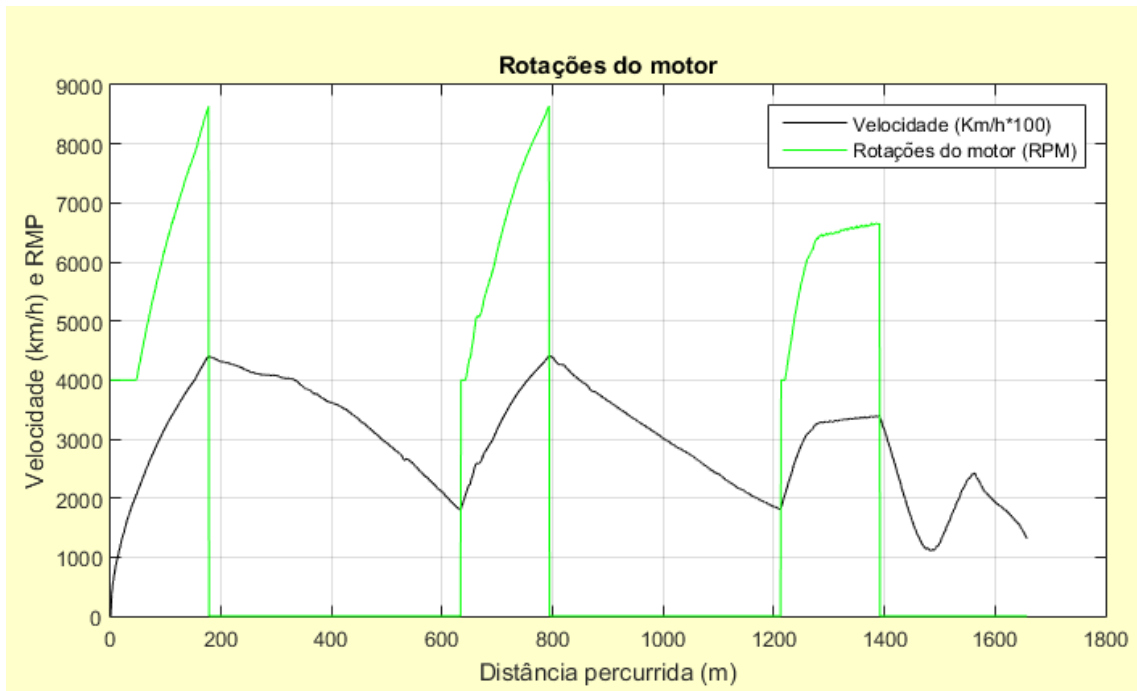


Figura 5.9. Perfil de rotações do motor e perfil de velocidade em função da distância.

No gráfico da figura 5.9 podemos observar, a verde, o perfil de rotações do motor em rpm e a preto o perfil de velocidade do veículo multiplicado por 100, ambos em função da distância. As rotações, como esperado, situam-se entre o intervalo de rotações do motor obtido no gráfico das curvas características do motor, ou seja entre as 4000 e as 8000 rpm. Como referido anteriormente, o motor não trabalha abaixo das 4000 rotações, devido à patinagem da embraiagem, formando assim uma reta no perfil das rotações sempre que o motor liga.

E de destacar que, sempre que o motor se encontra ligado as rotações aumentam, de forma quase constante. Este facto só não se verifica na subida para o ponto mais elevado do percurso, onde as rotações do motor são aproximadamente constantes, funcionando assim o motor no ponto de binário máximo,

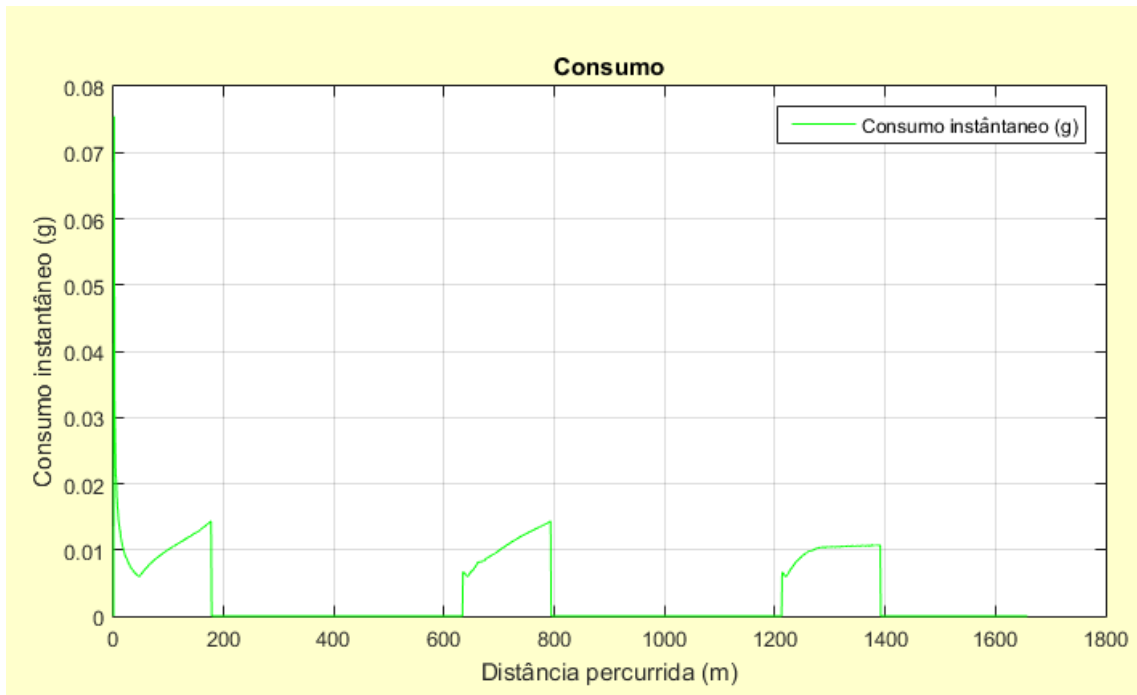


Figura 5.10. Perfil de consumo instantâneo do motor em gramas em função da distância

No gráfico da figura 5.10 podemos observar, a verde, o consumo em gramas de cada ponto do percurso. Podemos verificar que no arranque existe um consumo bastante elevado e com o aumento das rotações do motor, este também tende a aumentar chegando a ser aproximadamente o dobro às 8500 rotações.

Para além dos gráficos customizados apresentados, ainda podem ser obtidos diversos gráficos cujas variáveis apenas necessitam de ser implementadas na janela de resultados detalhados do software. A lista de variáveis que podem ser utilizadas encontra-se apresentada no anexo B. Os principais gráficos que podem ser criado são relativos às forças de atrito em função da distância e ao binário, também em função da distância. Estes gráficos encontram-se ilustrados nas figuras 5.11 e 5.12.

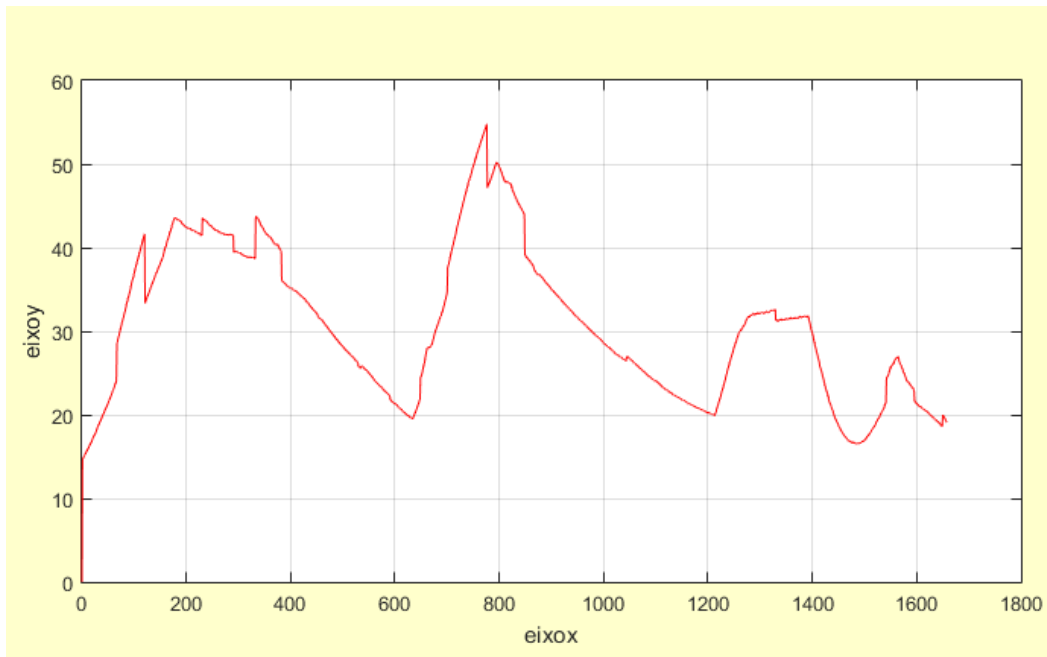


Figura 5.11. Perfil das forças de atrito (F_a) em Newtons, em função da distância (d) em metros.

No gráfico da figura 5.11 podemos visualizar o perfil das forças de atrito totais aplicadas ao veículo, em cada ponto do percurso. Podemos verificar ainda que existe sempre um valor constante de atrito que diz respeito ao atrito de rolamento. Relativamente à variação suave da força de atrito, esta trata-se da componente do atrito relativo à força aerodinâmica. Por último, a componente da força de atrito com maior oscilação refere-se à força de atrito em curva.

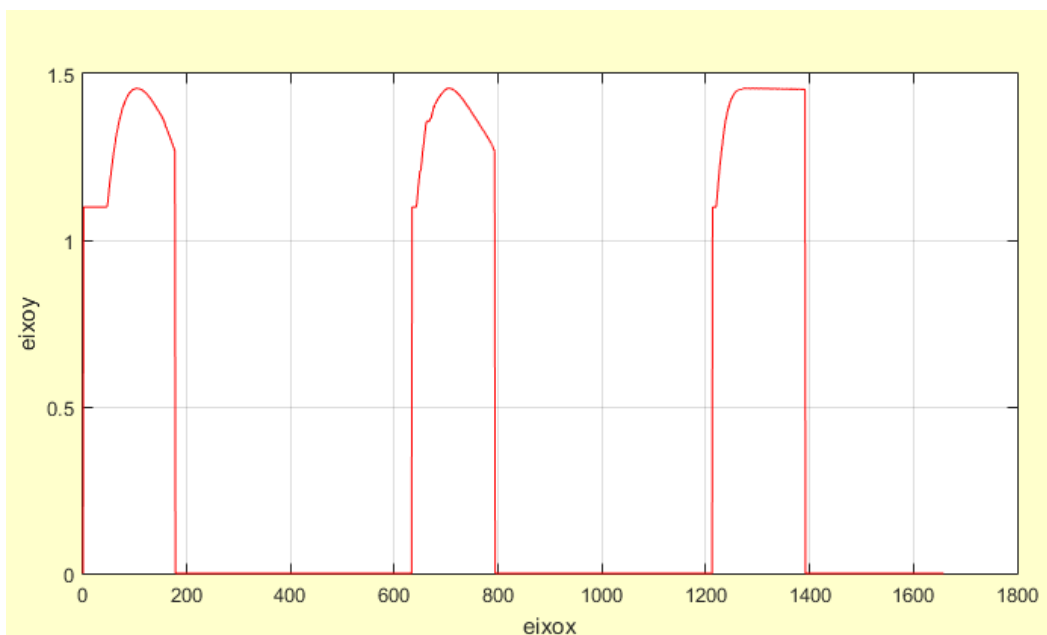


Figura 5.12. Perfil do binário do motor (T) em Newton metro, em função da distância (d) em metros

No gráfico da figura 5.12 podemos observar o perfil de binário do motor ao longo de uma volta do percurso. Como referido anteriormente, no arranque o motor trabalha sempre às 4000 rpm, devido à patinação da embraiagem. Este fenómeno pode-se verificar no início de cada excerto do percurso onde o motor está ligado, pois como as rotações são constantes o binário também é constante. Após serem ultrapassadas as 4000 rpm, as curvas de binário obtidas assemelham-se à curva característica de binário do motor, dado pelo fabricante. Este fenómeno apenas não se verifica na 3ª vez que o motor liga, pois o veículo encontra-se a subir para o ponto mais elevado da pista, trabalhando assim no ponto de binário máximo.

Capítulo 6

6 Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos através do software desenvolvido em Matlab, provam que este é capaz de simular e obter valores consistentes em condições reais de condução do veículo ao longo da prova. O software mostra também ser robusto e versátil devido às suas diferentes formas de funcionamento, diferentes critérios de decisão e diferentes tipos de resultados possíveis.

Relativamente aos valores obtidos para as simulações efetuadas, conclui-se que o melhor resultado foi obtido para o funcionalmente a 75 % da carga, resultando num intervalo de velocidade de 18 a 44 km/h e uma velocidade no ponto mais elevado de 12 km/h, cujo consumo final foi de 100.2 ml, que perfaz uma distância de 165.5 km por cada litro de combustível. Com isto, resulta um tempo de prova de 38 minutos e 21 segundos. Para estes resultados o veículo ligou 3 vezes o motor ao longo de cada volta do percurso obtendo-se, assim, o *vetor on* igual a 1 para os valores da distância entre [1,178], [623,794] e [1214,1392]

Estes resultados podem ser melhorados, bastando para isso simular o software para diferentes percentagens de carga do motor e para diferentes motores. Este melhoramento não foi efetuado neste trabalho pois as características do veículo ainda não são todas conhecidas, tendo por isso algumas sido aproximadas das reais. Contudo estas simulações aproximadas serviram para descartar algumas estratégias utilizadas em provas anteriores, como é o caso da velocidade no ponto mais elevado da pista. Inicialmente pensava-se que quanto menor fosse esta velocidade, melhor seriam os resultados. Este facto não é inteiramente verdadeiro pois quanto menor a velocidade VH, maior será a velocidade em toda a pista para efetuar a prova no tempo regulamentado.

Como trabalhos futuros, surge a obtenção dos coeficientes de atrito de rolamento (Cr), coeficiente de atrito aerodinâmico (Cae) e coeficiente de atrito em curva (Ccd) de forma empírica, efetuando assim ensaio de colina abaixo ao veículo final. Outro dos trabalhos futuros a realizar seria a obtenção dos mapas de todos os motores existentes no laboratório, que possam ser inseridos no veículo. Havendo, desta forma, maior precisão nas características dos motores e possibilidade de uma melhor escolha do motor para cada prova. Por último, outro dos trabalhos futuros seria a implementação de um sistema sensorial no veículo, que permitisse a obtenção dos valores reais da prova podendo, assim, serem comparados com os obtidos na simulação. Com isto, podem-se corrigir erros de pilotagem, como também deteção de imprecisões no software.

Referências

- [1] Shell. (2017). Shell Eco-Marathon 2017 Official Rules Chapter 1
- [2] Relatório do Estado do Ambiente 2016, Dezembro 2016, Agencia Portuguesa do Ambiente
- [3] Eurostat, Eurostat Yearbook 1016
- [4] Chair, H.A.R., Trani, A.A. e Hobeika, A.G. 2000. Quantifying the Impact of Traffic-Related and Driver-Related Factors on Vehicle Fuel Consumption and Emissions. Faculty of the Virginia polytechnic institute. Blacksburg, Virginia.
- [5] Hiraoka, T., Matsumoto, S., Terakado, Y. e Yamabe, S. (2009). Quantitative Evaluation of Eco-Driving on Fuel Consumption Based on Driving Simulator Experiments. Japan
- [6] Fernández, S.T., Jiménez, F. e Montiel, W.C. (2014). System for Road Vehicle Energy Optimization Using Real Time Road and Traffic Information. University Institute for Automobile Research (INSIA), Technical University of Madrid (UPM).
- [7] Joint EAPA/Eurobitume e Task Group Fuel Efficiency (2014). Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements. Industry Report.
- [8] Gillespie, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc.
- [9] Santos, N. (2012). Medição Experimental do Coeficiente de Resistência o Rolamento e do Coeficiente de Arrastamento Aerodinâmico de um Veículo Automóvel de Elevada Eficiência Energética. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra.
- [10] Morgado, D. (2013). Controlo de Velocidade de um Veículo Elétrico Autónomo, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- [11] Leal, L., Nicolazzi, L. e Rosa, E. (2012). Uma Introdução à Modelagem Quase-Estática de Automóveis. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- [12] Johansson, S. e Persson, V. (2015). Tire/Road Friction Estimation for Front Wheel Driven Vehicle. Department of Automatic Control, LUND University.
- [13] Blair, G.P. (1999). Design and Simulation of Four-Stroke Cycle Engines. Society of Automotive Engineers, Inc.
- [14] Heywood, J.B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill.

[15] Jung, K.K., Lee, M.G., Park, Y.K. e Yoo, J.J. (2011). Estimation of Fuel Consumption Using In-Vehicle Parameters. International Journal of u- and e- Service, Science and Technology.

[16] Honda, manual do proprietário, Disponível em:

<http://www.smallenginewarehouse.com/core/media/media.nl/id.29748/c.3401423/.f?h=2f29c2428a57279b2dba>

[17] Honda, GX35 Mini 4-Stroke engine, Disponível em: http://www.honda-engines-eu.com/documents/10912/15808/02_TS_GX35_2013.pdf

[18] Robin/Subaru, SERVICE MANUAL Model EH025/EH035 ENGINE, Disponível em: <https://www.smallenginesuppliers.com/html/engine-specs/robin/EH025-035-Service.pdf>

Anexos

Anexo A: Fluxogramas do software

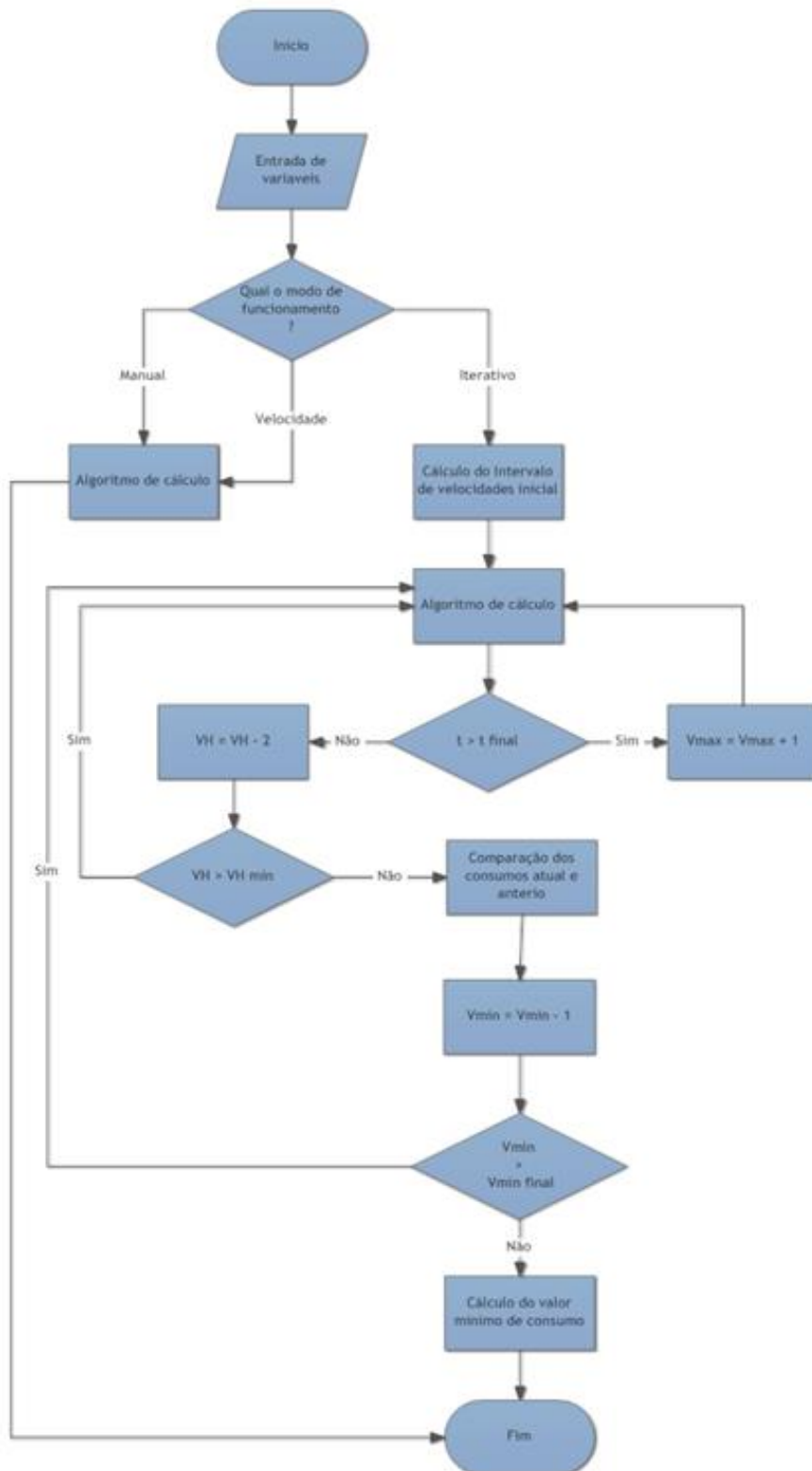
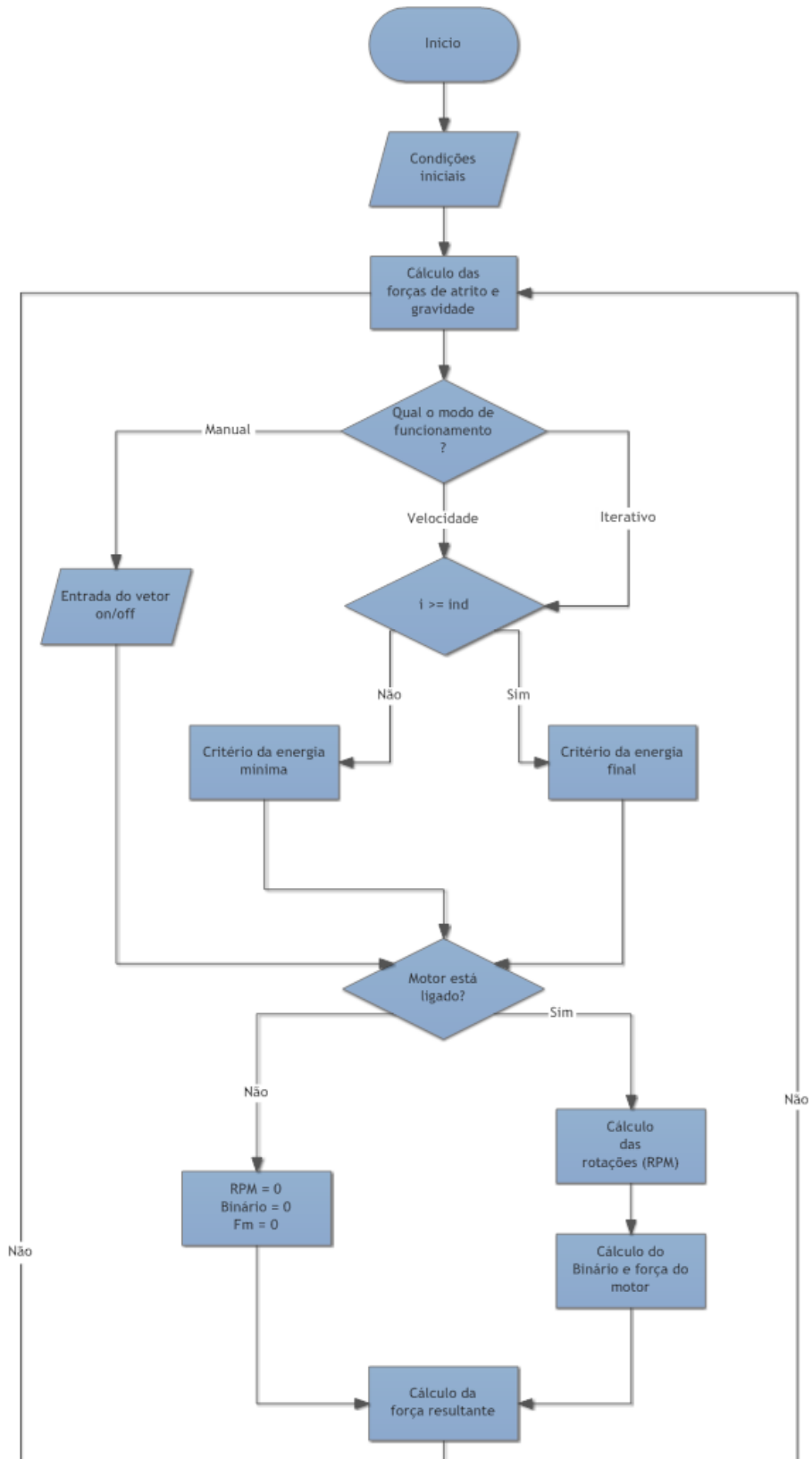


Figura 1. Fluxograma principal do software



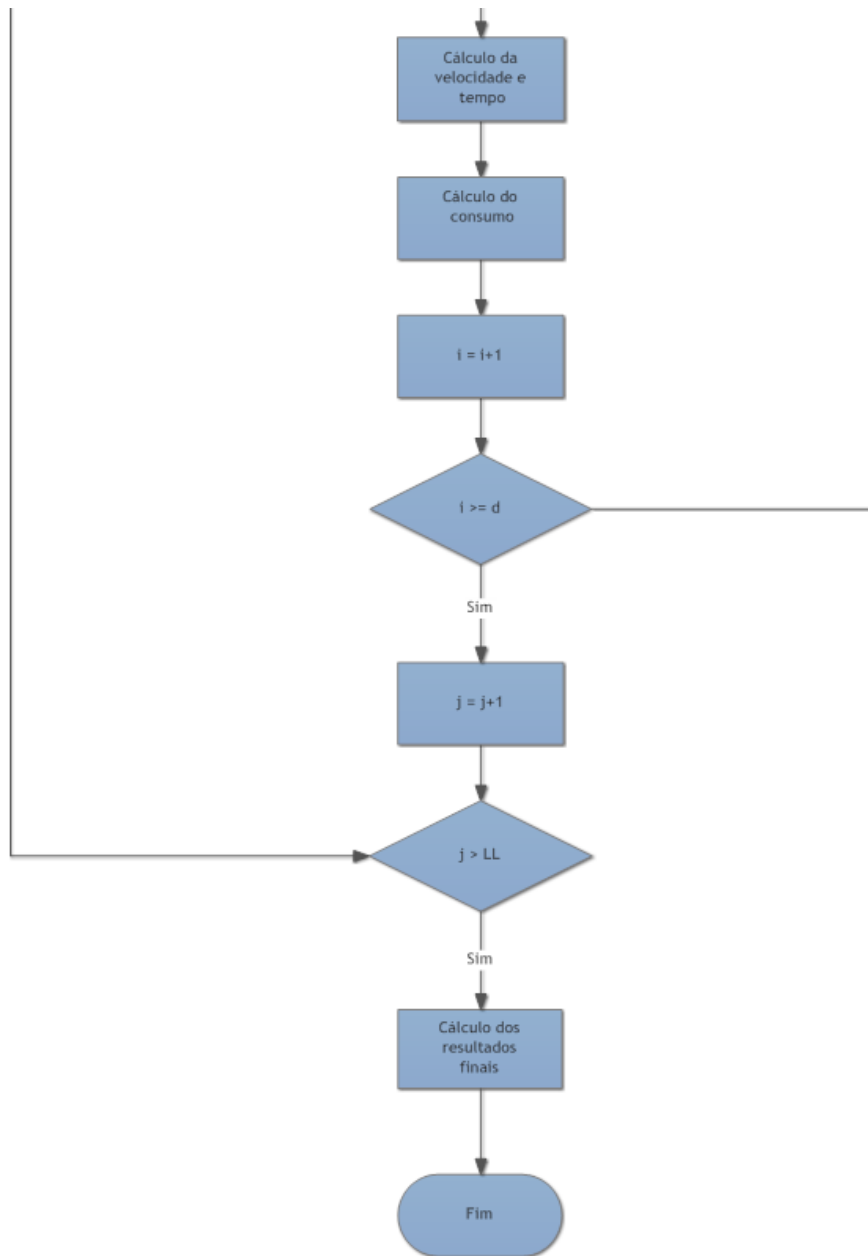


Figura 2. Fluxograma do algoritmo de cálculo do software.

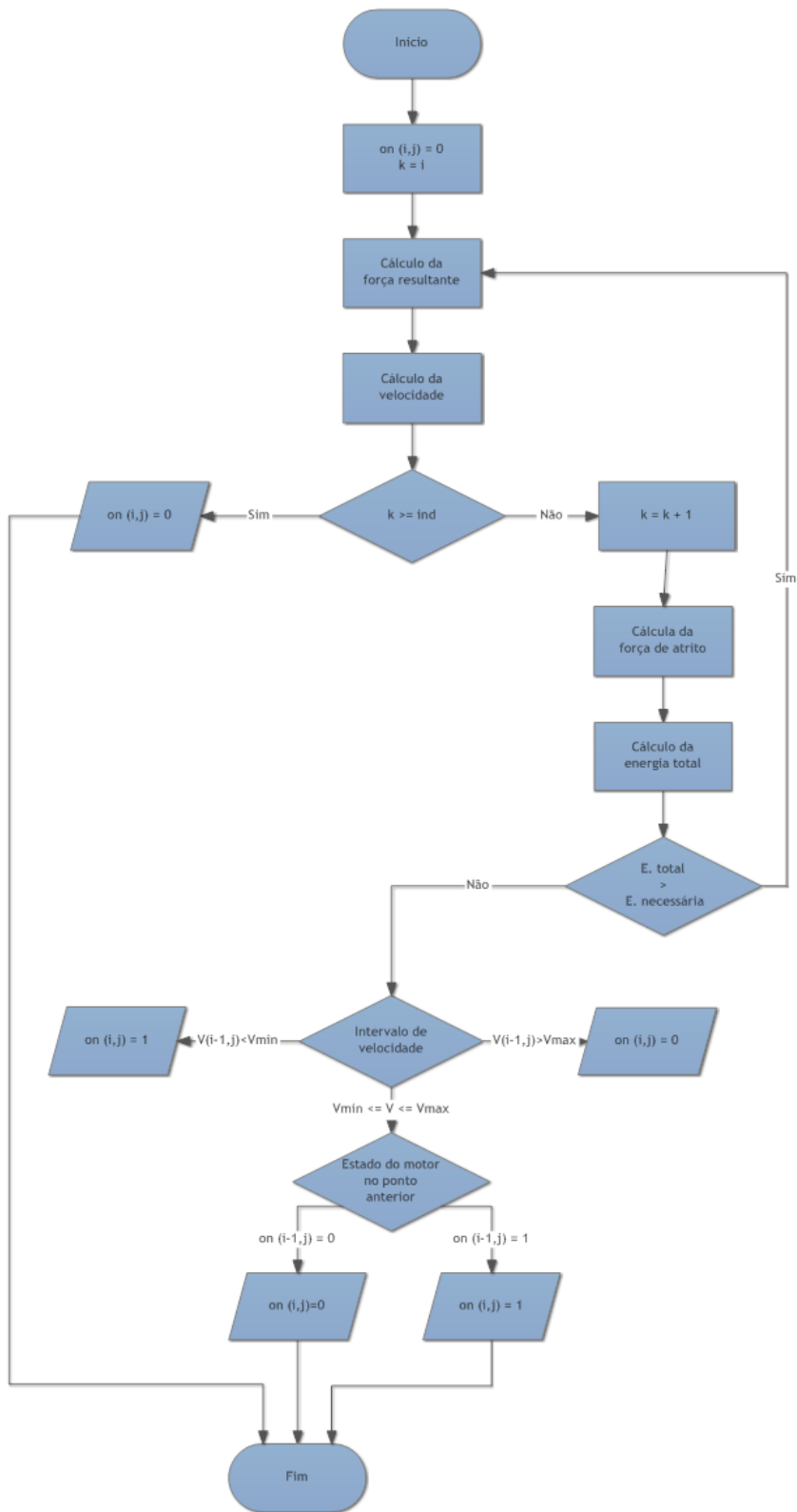


Figura 3. Fluxograma do critério de energia mínima

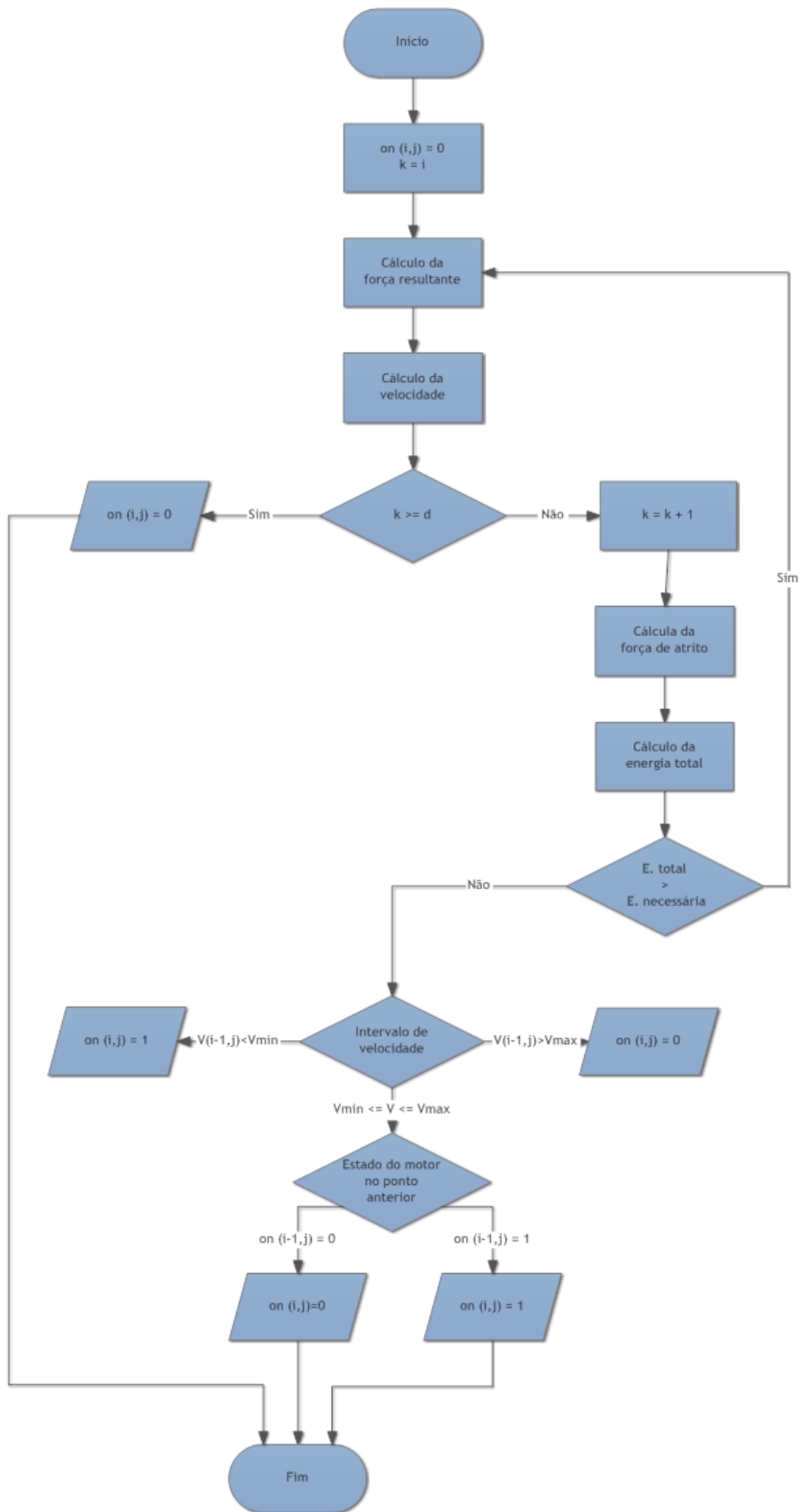


Figura 4. Fluxograma do critério da energia final

Anexo B: Lista de variáveis para a criação de gráficos

➤ Pista

- X - Coordenada x da pista;
- Y - Coordenada y da pista;
- d - Distância em metros da pista, por volta;
- h - Perfil de altura da pista;
- H - Perfil de altura da pista, com a altura inicial como referência, ou seja, com altura inicial zero;
- R1 - Inverso do raio de curvatura da primeira volta;
- R2 - Inverso do raio de curvatura da segunda até à penúltima volta;
- R3 - Inverso do raio de curvatura da última volta;

➤ Forças

- F_r - Força de atrito rolamento (N);
- F_{ae} - Força de atrito aerodinâmico (N);
- F_{cd} - Força de atrito dinâmico em curva (N);
- F_g - Força da gravidade (N);
- F_a - Força de atrito total (N);
- F_m - Força do motor (N);
- F - Somatório das forças exercidas no veículo;

➤ Cinemática

- T - Binário do motor (N.m);
- n - Rotações do motor (rpm);
- V - Velocidade do veículo (Km/h);
- v - Velocidade do veículo (m/s);

➤ Outras

- I - Vetor com as relações de transmissão em cada ponto;
- on - Vetor indicativo do estado do motor em cada ponto;
- GCep- Consumo específico à plena carga (g/kw.h);
- GCe - Consumo específico para carga variável (g/kw.h);
- Gp - Consumo em cada ponto (g);

Anexo C: Tabelas de valores de entrada referentes à pista

Tabela 1. Excerto de tabela de valores de entrada referentes à pista da prova realizada em Londres em 2016.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	X	Y	d	h	H	R1	R2	R3
2	707244.8	5713853	0	9.854	0	0	0.031095	0.031095
3	707244.5	5713854	1.005793	9.854	0	0	0.031095	0.031095
4	707244.2	5713855	2.011586	9.867	0.013166	0	0.031095	0.031095
5	707243.9	5713856	3.017379	9.867	0.013166	0	0.031095	0.031095
6	707243.6	5713857	4.023172	9.88	0.026331	0	0.031095	0.031095
7	707243.4	5713858	5.028965	9.88	0.026331	0	0.031095	0.031095
8	707243.1	5713859	6.034758	9.88	0.026331	0	0.031095	0.031095
9	707242.8	5713860	7.040551	9.887	0.032914	0	0.031095	0.031095
10	707242.5	5713861	8.046344	9.887	0.032914	0	0.031095	0.031095
11	707242.2	5713862	9.052137	9.9	0.04608	0	0.031095	0.031095
12	707241.9	5713863	10.05793	9.907	0.052662	0	0.031095	0.031095
13	707241.7	5713864	11.06372	9.913	0.059245	0	0.031095	0.031095
14	707241.4	5713865	12.06952	9.92	0.065828	0	0.031095	0.031095
15	707241.1	5713866	13.07531	9.933	0.078994	0	0.031095	0.031095
16	707240.8	5713867	14.0811	9.933	0.078994	0	0.031095	0.031095
17	707240.5	5713868	15.0869	9.94	0.085576	0	0.031095	0.031095
18	707240.2	5713869	16.09269	9.946	0.092159	0	0.031095	0.031095
19	707240	5713870	17.09848	9.953	0.098742	0	0.031095	0.031095
20	707239.7	5713871	18.10427	9.953	0.098742	0	0.031095	0.031095
21	707239.4	5713872	19.11007	9.959	0.105325	0	0.031095	0.031095
22	707239.1	5713873	20.11586	9.959	0.105325	0	0.031095	0.031095
23	707238.8	5713874	21.12165	9.973	0.11849	0	0.031095	0.031095
24	707238.5	5713875	22.12745	9.973	0.11849	0	0.031095	0.031095
25	707238.3	5713876	23.13324	9.979	0.125073	0	0.031095	0.031095

Tabela 2. Excerto de tabela de valores de entrada referentes à pista da prova realizada em Londres em 2017.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	X	Y	d	h	H	R1	R2	R3
2	0	0	0	9.529	0	0		
3	-0.88383	0.467815	1	9.564	0.035	0		
4	-1.76765	0.935629	2	9.564	0.035	0		
5	-2.65148	1.403444	3	9.582	0.053	0		
6	-3.53531	1.871258	4	9.582	0.053	0		
7	-4.41913	2.339073	5	9.618	0.089	0		
8	-5.30296	2.806887	6	9.618	0.089	0		
9	-6.18151	3.284499	7	9.635	0.106	0		
10	-7.05866	3.764712	8	9.653	0.124	0		
11	-7.93582	4.244924	9	9.653	0.124	0		
12	-8.81297	4.725136	10	9.671	0.142	0		
13	-9.69012	5.205348	11	9.689	0.16	0		
14	-10.5673	5.685561	12	9.706	0.177	0		
15	-11.4444	6.165773	13	9.706	0.177	0		
16	-12.3216	6.645985	14	9.724	0.195	0		
17	-13.1982	7.127111	15	9.724	0.195	0		
18	-14.0743	7.609213	16	9.742	0.213	0		
19	-14.9505	8.091315	17	9.76	0.231	0		
20	-15.8266	8.573417	18	9.76	0.231	0		
21	-16.7027	9.055519	19	9.76	0.231	0		
22	-17.5788	9.53762	20	9.76	0.231	0		
23	-18.4549	10.01972	21	9.76	0.231	0		
24	-19.331	10.50182	22	9.777	0.248	0		
25	-20.1933	11.00754	23	9.795	0.266	0		

Anexo D: Percursos da prova encolhidos

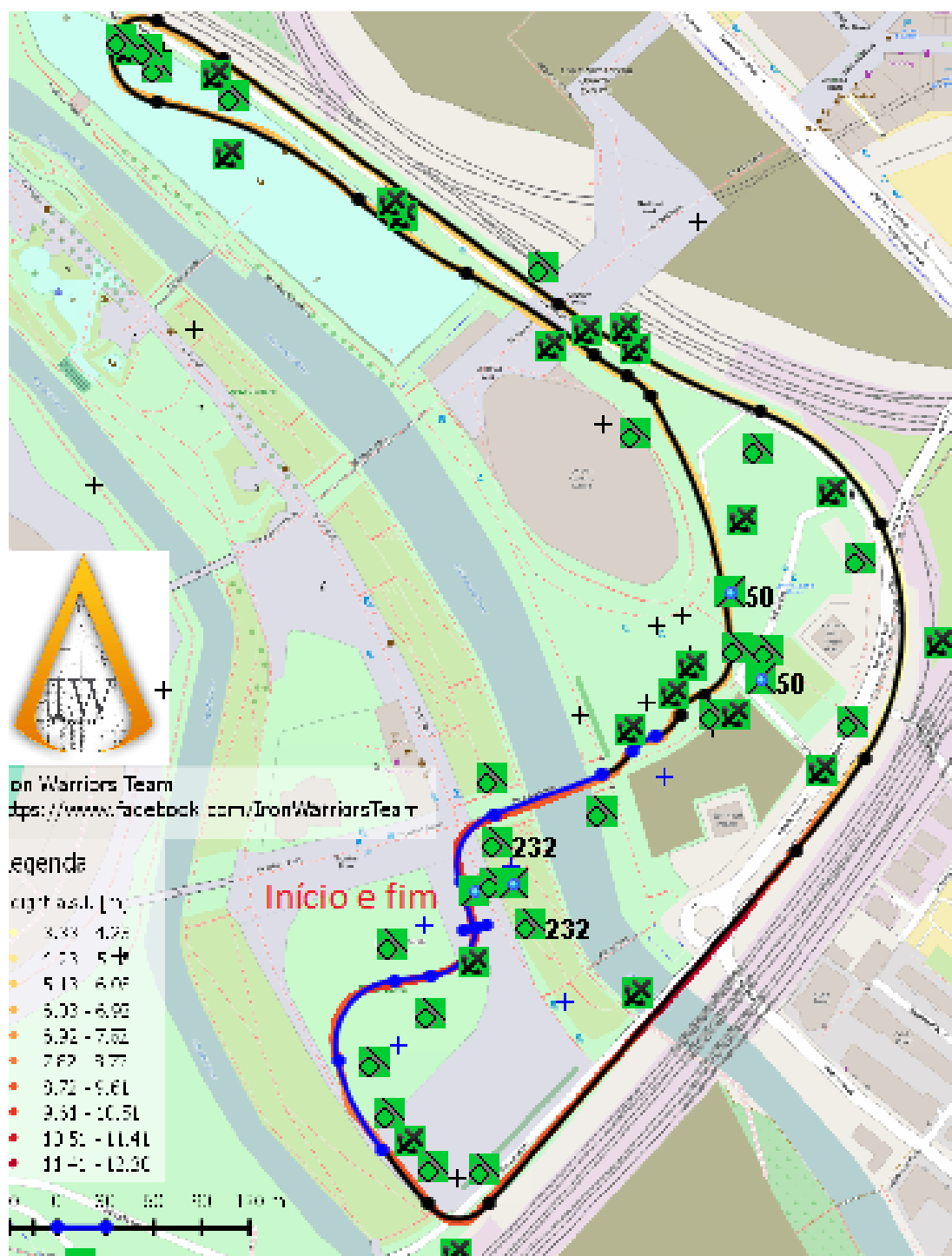


Figura 1. Percurso escolhido para a primeira volta da prova realizada em Londres em 2016.

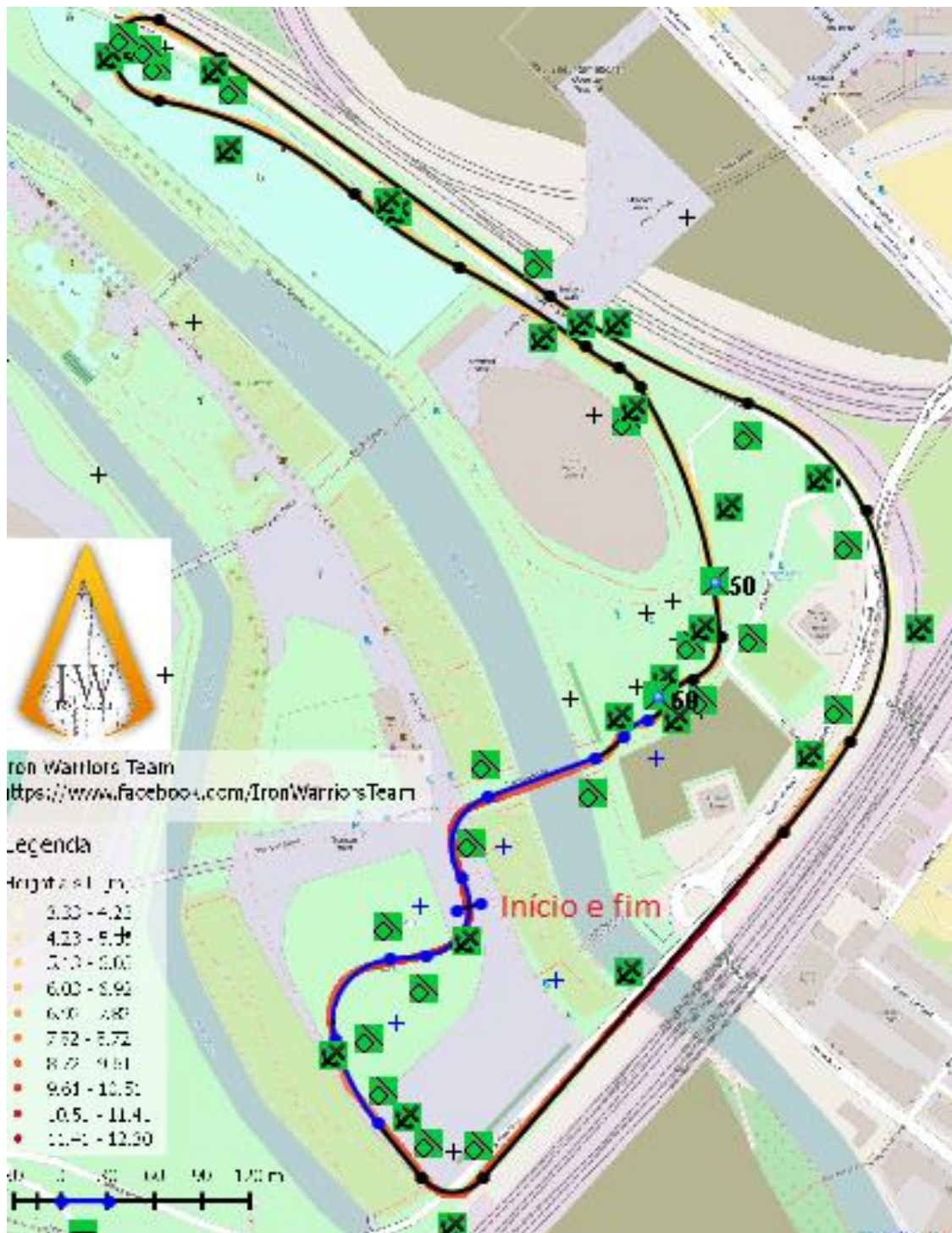


Figura 2. Percurso escolhido para a segunda ate a penúltima volta da prova realizada em Londres em 2016.

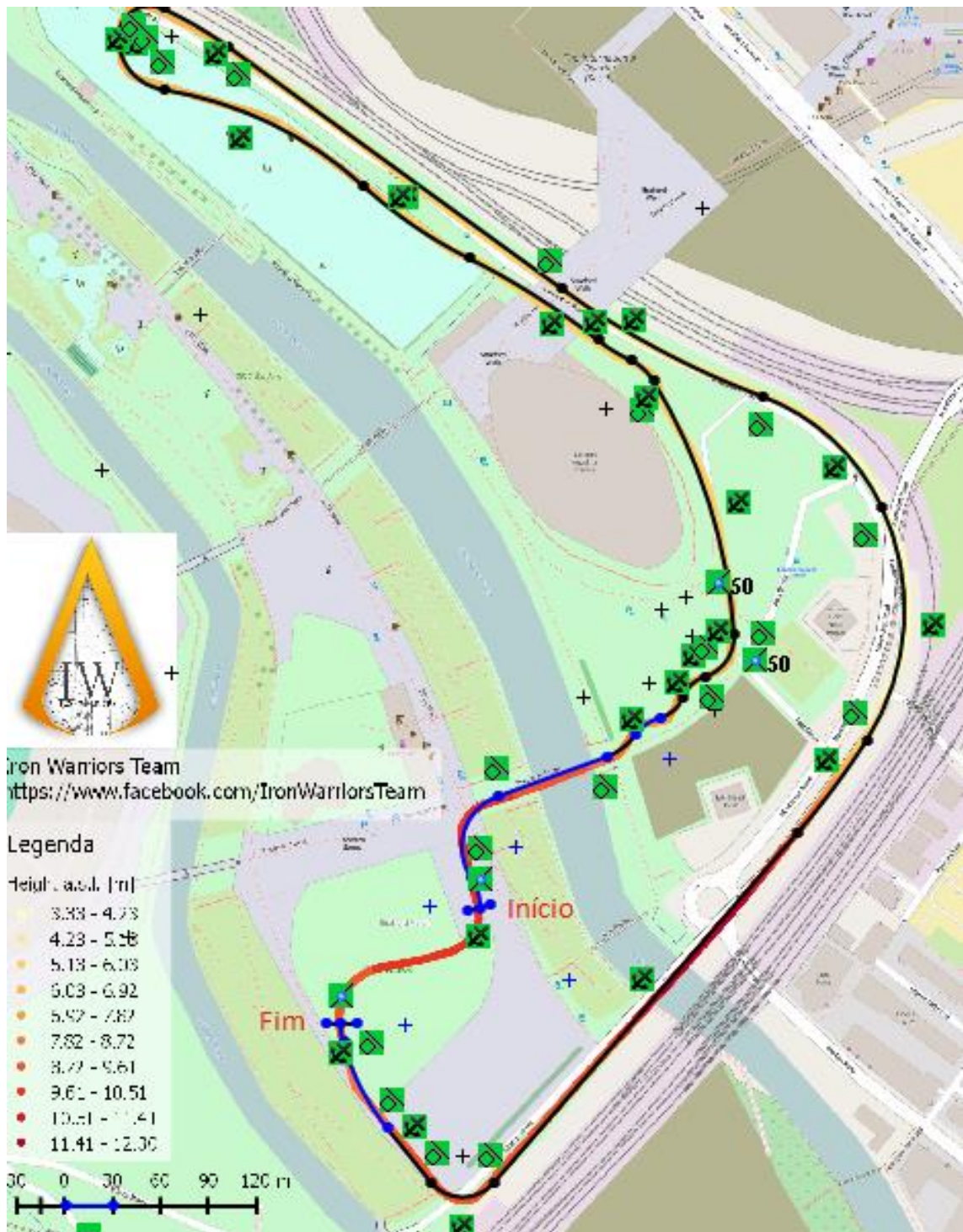


Figura 3. Percurso escolhido para a última volta da prova realizada em Londres em 2016.

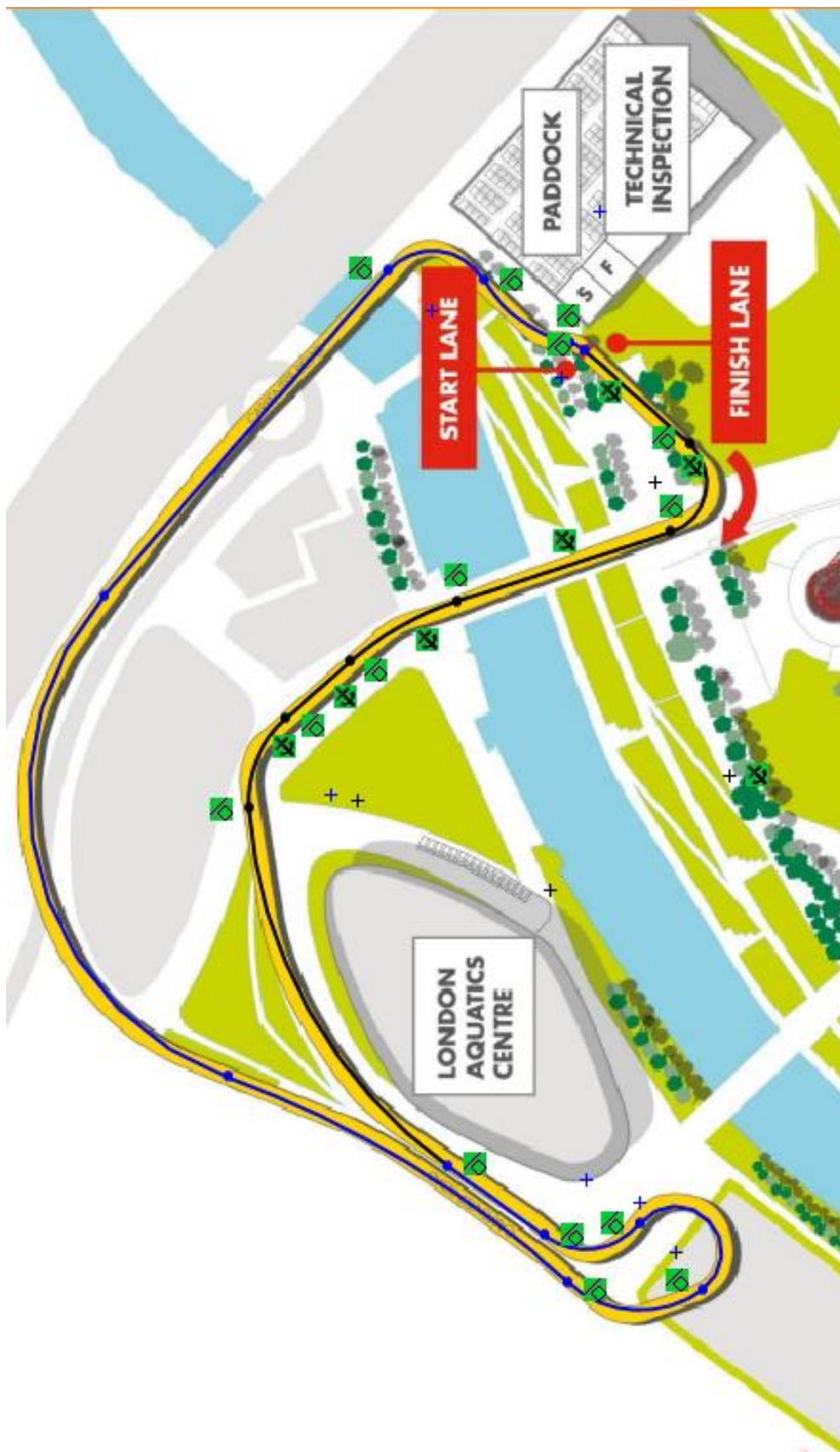


Figura 4. Percurso escolhido para todas as voltas da prova realizada em Londres em 2017.

Anexo E: Manual do utilizador do software



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Manual de utilizador **Software Shell Eco Marathon**

Sérgio Filipe Pinto Ferreira

Covilhã, junho de 2017

Índice

1.	Introdução	79
1.1.	Introdução ao software	79
1.2.	Modos de funcionamento	79
1.2.1.	Funcionamento Velocidade	79
1.2.2.	Funcionamento Manual	80
1.2.3.	Funcionamento Iterativo	80
2.	Pré-requisitos	81
2.1.	Adicionar pastas do software à pasta do Matlab	81
2.2.	Criar ficheiro com características da pista	82
3.	Variáveis de entrada.....	87
3.1.	Pista.....	88
3.2.	Veículo.....	88
3.3.	Motor.....	89
3.4.	Caixa de velocidades.....	90
3.5.	Modos de funcionamento.....	91
3.5.1.	Funcionamento Manual	91
3.5.2.	Funcionamento Velocidade	93
3.5.3.	Funcionamento Iterativo	93
3.6.	RUN.....	94
4.	Resultados	95
4.1.	Resultados Iterativo	95
4.2.	Resultados detalhados	95
5.	Alterações ao software.....	101
5.1.	Alterações ao código do software	101
5.2.	Alterações ao interface gráfico do software.....	102
5.2.1.	Exemplos de alterações	102

1. Introdução

Com o presente trabalho pretende-se descrever detalhadamente como trabalhar com software elaborado, em meio acadêmico, para competição internacional realizada anualmente pela Shell, denominada de Shell Eco-Marathon.

Esta competição tem como principal objetivo a otimização do consumo de combustível de um veículo elaborado por cada participante. A competição consiste em realizar um certo número de voltas, a um determinado percurso, dentro de um limite máximo de tempo. Vence a competição o participante que conseguir realizar a prova, dentro do tempo estipulado, com o menor consumo, na sua categoria de combustível.

1.1. Introdução ao software

O software elaborado tem como principal objetivo obter o perfil de velocidades mais favoráveis, para que o consumo seja o menor possível. Para esse efeito é necessário tomar em consideração as características do carro, as características da pista e as características do motor.

Em relação aos valores de saída do software, para além do perfil de velocidades, podem-se obter outros valores que auxiliam na redução do consumo e na navegação ao longo do percurso com mais segurança. Destes, destaca-se o vetor correspondente ao estado do motor ao longo da pista (on/off), vetor de binário, vetor rotações, vetor das forças de atrito, entre outros.

1.2. Modos de funcionamento

Na elaboração do software optou-se por implementar três modos de funcionamento distintos para executar o código principal. Estes três modos têm como principais diferenças os valores de entrada e a forma como se obtém o estado do motor em cada ponto do percurso.

1.2.1. Funcionamento Velocidade

Um dos modos de funcionamento existentes resulta dos critérios de velocidade presentes no software, cuja finalidade é a de controlar a velocidade do veículo, ao longo do percurso. Para efetuar esse controlo da velocidade é necessário fornecer o intervalo de velocidade, a que o veículo deve circular, bem como a velocidade que este deve atingir no ponto mais elevado do percurso.

Através dos valores fornecidos, o software calcula o estado em que se encontra o motor em cada ponto, originando assim um vetor, constituído unicamente por 0 (motor desligado) ou 1 (motor ligado) que representa o estado do motor.

Na utilização deste modo de funcionamento é necessário ter em atenção que a prova tem um tempo máximo para a sua execução, logo é essencial que a velocidade média do intervalo

fornecido seja igual ou superior à velocidade média a que o veículo tem de circular de modo a fazer o percurso no tempo limite. É também de salientar que com a diminuição da velocidade no ponto mais elevado, as velocidades máxima, mínima ou ambas deverão aumentar devido ao mesmo fator.

1.2.2. Funcionamento Manual

Outro dos modos de funcionamento implementados no software diz respeito ao funcionamento manual. Neste caso é dado diretamente o vetor que representa o estado do motor. Devido a este facto este modo de funcionamento é usado preferencialmente para efetuar ajustes aos dados obtidos pelos outros modos de funcionamento ou efetuar experiências.

1.2.3. Funcionamento Iterativo

Por fim, outro dos modos de funcionamento implementados no software é o iterativo. Neste caso, o software executa o modo de funcionamento Velocidade, referido anteriormente, para diferentes intervalos de velocidades e diferentes valores de velocidade no ponto mais elevado.

O primeiro intervalo de velocidades é obtido através da velocidade média. Os seguintes intervalos são obtidos decrescendo a velocidade mínima em uma unidade, até à velocidade de 10 km/h. É de salientar que para cada intervalo, o valor da velocidade no ponto mais elevado da pista é decrescido em duas unidades, iniciando-se no valor da velocidade mínima até atingir a velocidade de 5 km/h.

O resultado final é obtido através da obtenção do valor mínimo do consumo de todas as iterações.

2. Pré-requisitos

Antes de qualquer tentativa de execução do software é necessário respeitar alguns pré-requisitos essenciais. O principal é a presença do Matlab, de preferência 2015, pois foi a versão utilizado na criação do software, evitando assim problemas de incompatibilidades com versões posteriores. É também aconselhável que o utilizador tenha alguns conhecimentos em Matlab, tanto na parte de programação em c, como na parte de interface gráfico (Guide).

2.1. Adicionar pastas do software à pasta do Matlab

Após a verificação da existência do Matlab e respetiva versão, é necessário que a pasta do programa se encontre anexada às pastas das funções do Matlab. Para isso é necessário que o utilizador abra o Matlab e prima [Set Path] que se encontra no menu “Home” na parte superior da janela, como mostra a figura 1.

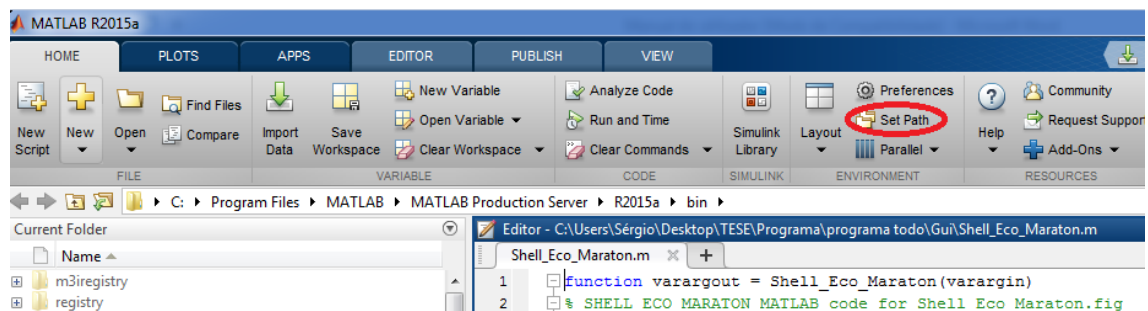


Figura 1- Janela do Matlab com indicações para o utilizador.

Após premir [Set Path], abrir-se-á a janela que se encontra na figura 2 sendo necessário, de seguida, premir [Add Folder], indicado na figura 2, e localizar a pasta onde o software se encontra. Após seleccionar a pasta, o diretório da mesma deverá aparecer à direita da janela. Por fim é necessário guardar a alteração efetuada clicando no botão [Save] também indicado na figura 2.

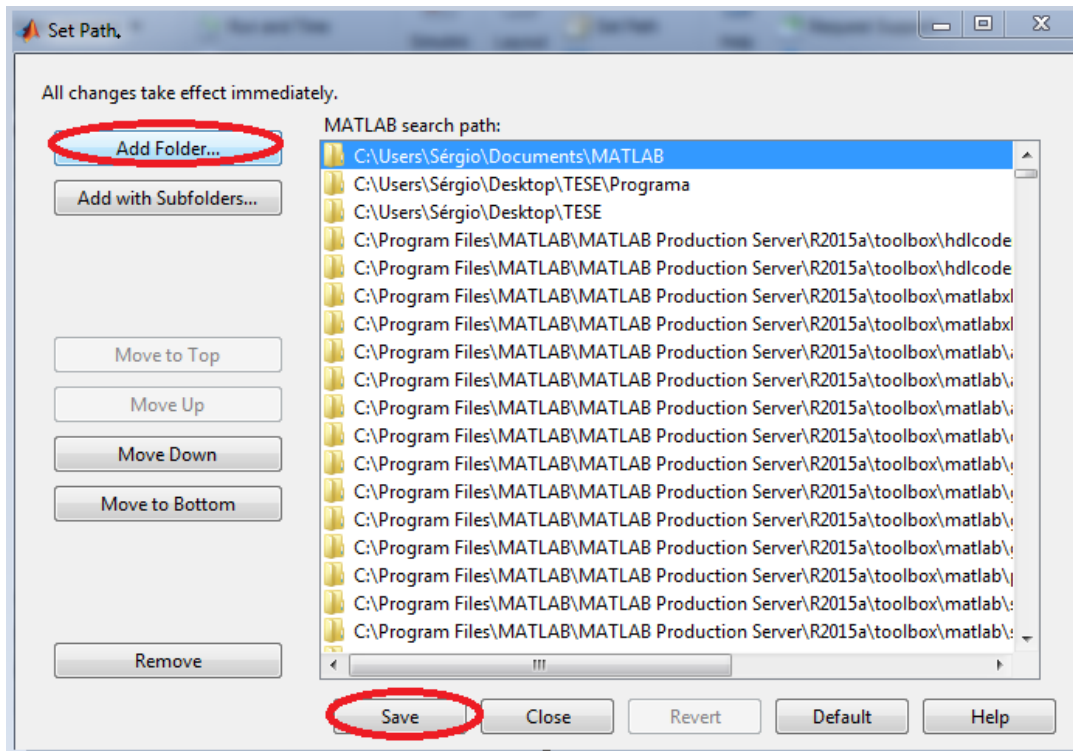


Figura 2- Janela do Matlab para adicionar a pasta do software às pastas do Matlab.

É de salientar que este processo só é necessário efetuar caso seja a primeira vez que o software seja utilizado no computador, ou caso o diretório da pasta do software tenha sido alterada.

2.2. Criar ficheiro com características da pista

Outro dos pré-requisitos para a execução do software é a existência de um ficheiro, de extensão .m, com as características do percurso. Esse ficheiro deve-se encontrar na pasta do software e deve conter as seguintes variáveis:

- Coordenada X da pista (X);
- Coordenada Y da pista (Y);
- Distância em metros do percurso (d);
- Altura em metros da pista (h);
- Altura em metros da pista, com a altura inicial como referência, ou seja, com altura inicial nula (H);
- Inverso do raio de curvatura da primeira volta (R1);
- Inverso do raio de curvatura das voltas seguintes até à antepenúltima (R2);

- Inverso do raio de curvatura da última volta (R_3);

No caso das coordenadas X e Y da pista, altura da pista e distância do percurso, os valores são fornecidos pela organização da prova. Em relação aos raios de curvatura é necessária a sua obtenção. Para isto, aconselha-se o utilizador a abrir a imagem da pista, fornecida pela organização e colocá-la no SolidWorks. De seguida, o utilizador deve traçar o melhor percurso para o piloto efetuar a prova utilizando, para este efeito, linhas retas e circunferências como ilustra a figura 3. É de salientar que para uma melhor aproximação aos valores reais, as linhas retas e circunferências na imagem devem ser coincidentes e tangentes, das vizinhas.

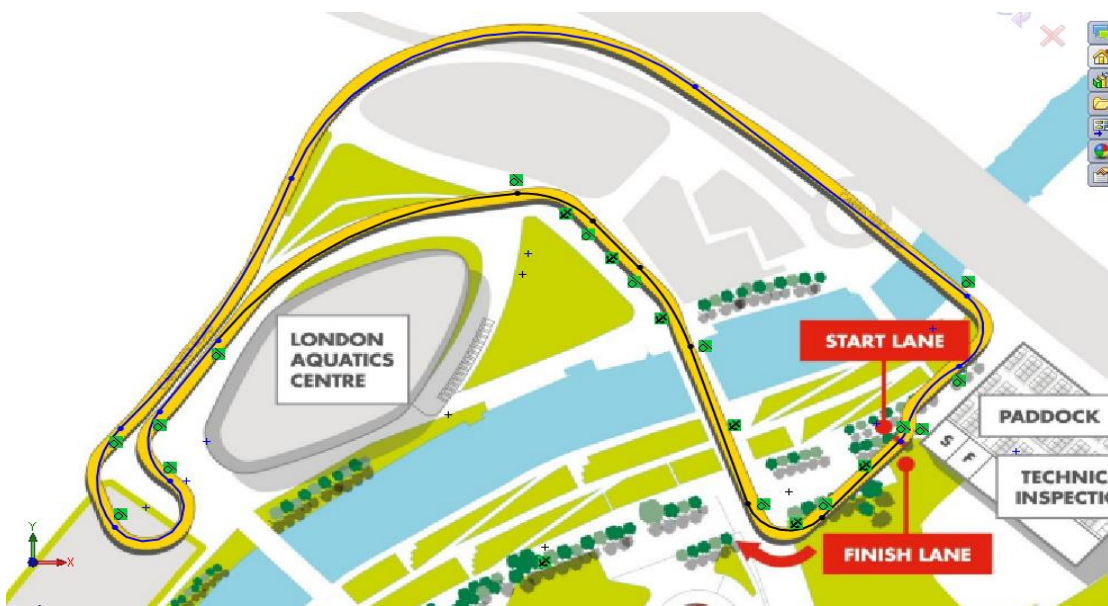


Figura 3 - Imagem da pista de Londres 1017, com o percurso do veículo.

Após a definição do percurso, retira-se os raios de curvatura da pista em função da imagem. Estes, ao serem multiplicados pela escala da imagem, fornecem uma aproximação bastante razoável aos raios de curvatura reais.

É de salientar que pode ser necessário retirar um ou três perfis de raios de curvatura, pois caso a pista inicie e acabe sempre no mesmo local (como é o caso da figura 3) as voltas são todas aproximadamente iguais, logo só existe um perfil de raios de curvatura. Caso o início e o fim da prova não coincidam no mesmo local, existem três voltas distintas durante a prova, pois a primeira volta e a última são diferentes das intermédias. Para uma melhor aproximação, nestes casos, é necessário retirar três perfis de raios de curvatura. O primeiro para a primeira volta. O segundo para as voltas intercaladas entre a primeira e a última volta. O terceiro perfil para a última volta.

Após a obtenção de todos os valores que devem constar no ficheiro da pista, é necessário criar inicialmente um ficheiro em Excel, onde deverão constar todas as variáveis necessárias como ilustrado na figura 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	X	Y	d	h	H	R1	R2	R3			
2	0	0	0	9.529	0	0					
3	-0.88383	0.467815	1	9.564	0.035	0					
4	-1.76765	0.935629	2	9.564	0.035	0					
5	-2.65148	1.403444	3	9.582	0.053	0					
6	-3.53531	1.871258	4	9.582	0.053	0					
7	-4.41913	2.339073	5	9.618	0.089	0					
8	-5.30296	2.806887	6	9.618	0.089	0					
9	-6.18151	3.284499	7	9.635	0.106	0					
10	-7.05866	3.764712	8	9.653	0.124	0					
11	-7.93582	4.244924	9	9.653	0.124	0					
12	-8.81297	4.725136	10	9.671	0.142	0					
13	-9.69012	5.205348	11	9.689	0.16	0					
14	-10.5673	5.685561	12	9.706	0.177	0					
15	-11.4444	6.165773	13	9.706	0.177	0					

Figura 4 - Imagem do ficheiro em Excel com as variáveis de entrada da pista.

Na criação do ficheiro em Excel é necessário ter em atenção que mesmo que as voltas sejam todas iguais, é necessário incluir os três perfis de curvatura, deixando o segundo (R2) e o terceiro (R3) vazios. Após a criação do ficheiro em Excel é necessário exportá-lo para a extensão .CSV.

Para a criação do ficheiro final .m, é necessário abrir o Matlab e de seguida premir [Import Data] que se encontra no menu Home, como ilustrado na figura 5.

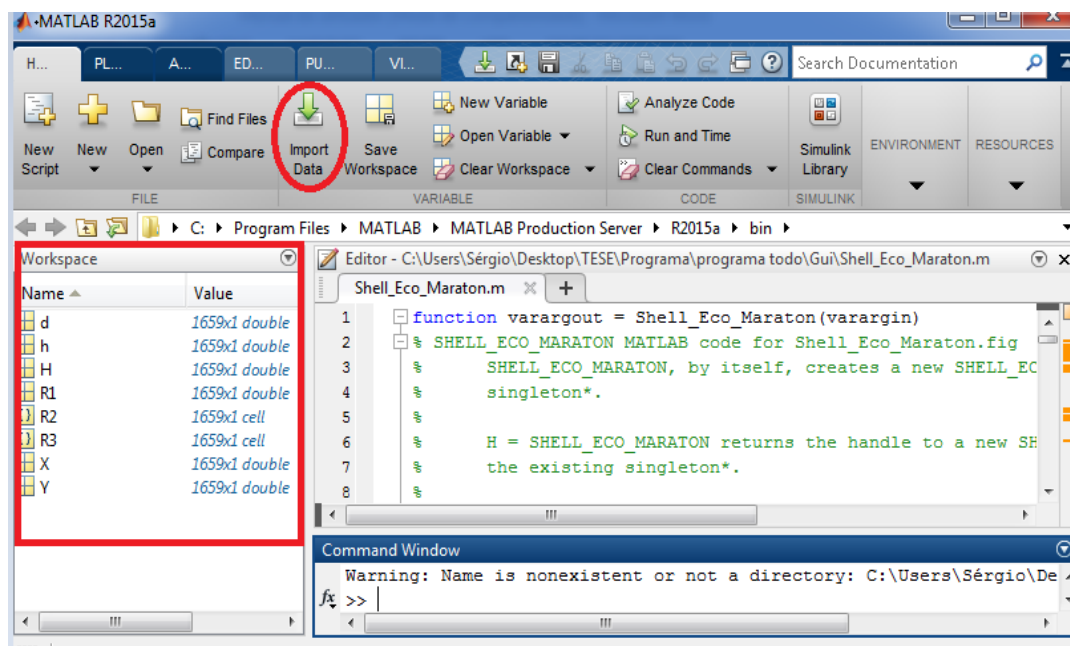


Figura 5 - Janela do Matlab com indicação do local de importação de dados e do Workspace do Matlab.

De seguida irá abrir uma janela de busca, onde o utilizador deve procurar o ficheiro .csv criado anteriormente. Após seleccionar o ficheiro .csv, irá abrir uma janela onde deverão aparecer as variáveis mencionadas anteriormente, como ilustrado na figura 6. Nessa janela o utilizador deverá premir [Import Selection], que se encontra assinalado na figura 6 e as variáveis vão ser importadas para o ambiente de trabalho do Matlab, como mostrado na figura 5.

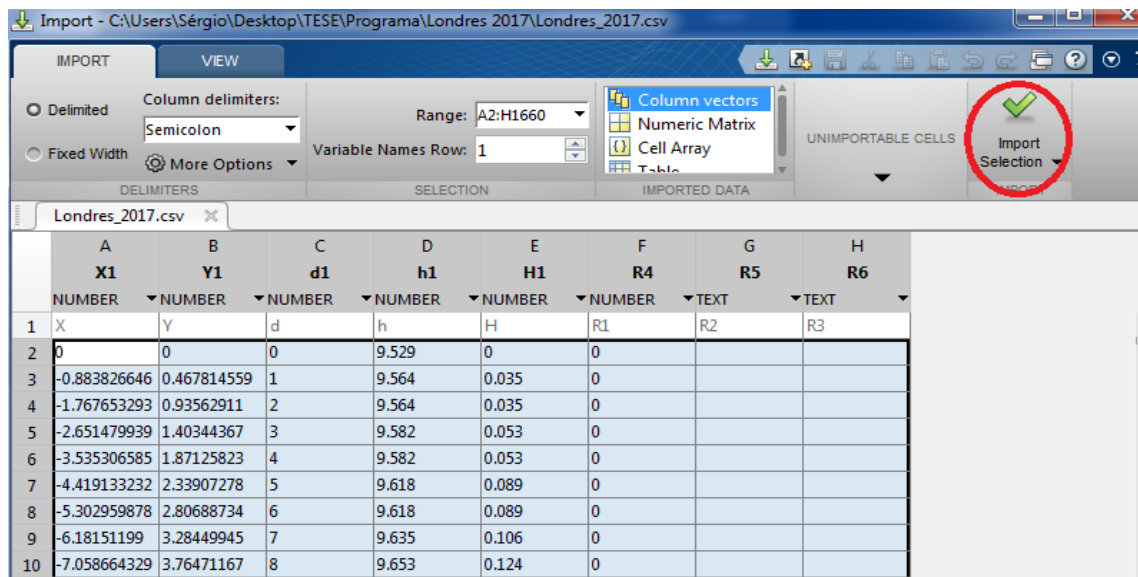


Figura 6- Janela de importação das variáveis.

Após a importação das variáveis é necessário guardar o ambiente de trabalho do Matlab num ficheiro de extensão .m. Para isso deverá ser premido o triângulo invertido, localizado à frente do ambiente de trabalho do Matlab, como demonstra a figura 7. De seguida, o utilizador deverá premir [Save] para guardar o ficheiro.

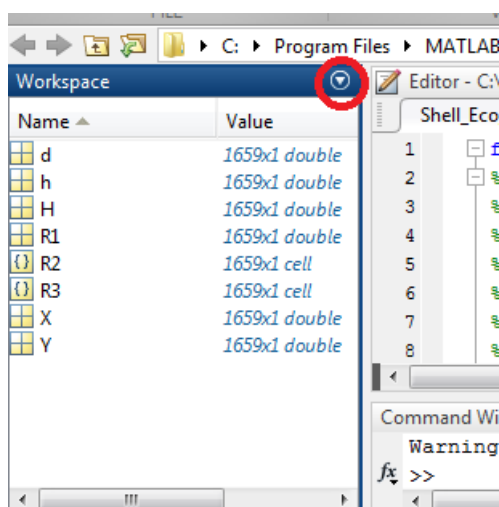


Figura 7- Excerto da janela do Matlab onde se encontra representado o ambiente de trabalho do Matlab e as variáveis nele existentes.

É de referir que o ficheiro tem de ser guardado na pasta do software e para uma melhor identificação da pista, aconselha-se ao utilizador guardar o ficheiro com o nome da cidade onde se vai realizar a prova, seguido do ano (exemplo: Londres_2017).

Caso os vetores, das variáveis não sejam do mesmo tamanho, é necessário importar os dados dos vetores com tamanhos diferentes separadamente, guardando igualmente todo no mesmo ficheiro .m. Este caso pode acontecer se a voltas forem diferentes entre si, como referido anteriormente.

3. Variáveis de entrada

Após o cumprimento dos pré-requisitos indicados anteriormente, já é possível efetuar simulações com o software. Para este efeito, é necessário que o utilizador abra o ficheiro Shell_Eco_Marathon.m existente na pasta do software e o execute premindo [RUN], situado no menu EDITOR. De seguida irá abrir a janela principal do software, que se encontra na figura 8.



Figura 8 - Janela principal do software.

É de salientar que os campos editáveis já se encontram preenchidos pelos valores das variáveis da última simulação simplificando, assim, o trabalho do utilizador. Pois desta forma, não se estará obrigado a introduzir as variáveis sempre que pretenda executar o software.

Caso o utilizador pretenda alterar alguma variável ou modo de funcionamento do software, encontra-se explicado de seguida.

3.1. Pista

Caso o utilizador pretenda alterar a pista, o utilizador necessita de premir o botão [pista] e seleccionar o ficheiro .m onde as características da pista se encontram. Após seleccionar a pista basta premir [Finish] e as características da pista serão seleccionadas. Para verificar a pista que se encontra seleccionada no software, basta visualizar a caixa de texto que se encontra, imediatamente abaixo do botão [pista].

Caso o utilizador pretenda alterar o número de voltas, basta que este edite a caixa de texto que se encontra no canto superior direito da janela ilustrada na figura 8.

Por último, para que o utilizador altere a indicação das características das voltas, basta seleccionar ou não, o quadrado “Voltas Iguais” que se encontra abaixo do número de voltas. Caso as voltas da pista sejam iguais, o utilizador deve seleccionar a opção, caso contrário, não selecciona.

3.2. Veículo

Em relação às características do veículo, estas podem ser editadas premindo o botão [Carro], que se encontra na janela principal do software, sendo aberta, assim, uma nova janela, ilustrada na figura 9, onde as variáveis do veículo se encontram.

Na janela indicada, é possível alterar seis variáveis, bastando para isso editar as caixas de texto da janela. É de salientar que no lado esquerdo, encontram-se as variáveis dimensionais, como é o caso da massa do veículo expressa em quilogramas (Kg). De seguida, encontra-se a área frontal, expressa em metros quadrados (m^2). Por último, encontra-se o raio da roda expresso em metros (m). No lado direito da janela encontram-se as variáveis adimensionais do veículo, nomeadamente os coeficientes de atrito. A primeira caixa de texto editável diz respeito ao coeficiente de atrito aerodinâmico, a segunda ao coeficiente de atrito de rolamento e, por último, encontra-se a caixa de texto relativa ao coeficiente de atrito em curva. Após todas as alterações, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.



Figura 9 - Janela do software onde o utilizador pode alterar as variáveis do veículo.

3.3. Motor

No que diz respeito ao motor, o software permite a implementação das características de cinco motores diferentes. Para a escolha do motor pretendido basta seleccionar este no menu popup, que se encontra acima do botão [Alterar motor], na janela principal do programa.

Em relação à alteração das características dos motores, o utilizador necessita de premir [Alterar motor], que se encontra na janela principal do software. Esta ação abrirá uma nova janela, ilustrada na figura 10, onde se encontram as equações para os 5 motores possíveis.

Para alterar as equações dos motores basta editar as caixas de texto presentes em cada equação. É de salientar que, para cada motor, existem 3 equações e duas constantes. A primeira equação é representativa do binário no motor e caracteriza-se por ser uma equação de terceiro grau. A segunda equação representa o consumo específico do motor em função das rotações do motor, também caracterizada por uma equação de terceiro grau. A terceira equação refere-se à abertura da borboleta do motor, que é indicada como uma equação de primeiro grau. A primeira constante é referente o consumo, ao ligar o motor, expressa em mililitro (ml), por sua vez a segunda constante refere-se às rotações mínimas do motor, expressas em RPM. Após todas as alterações efetuadas, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.

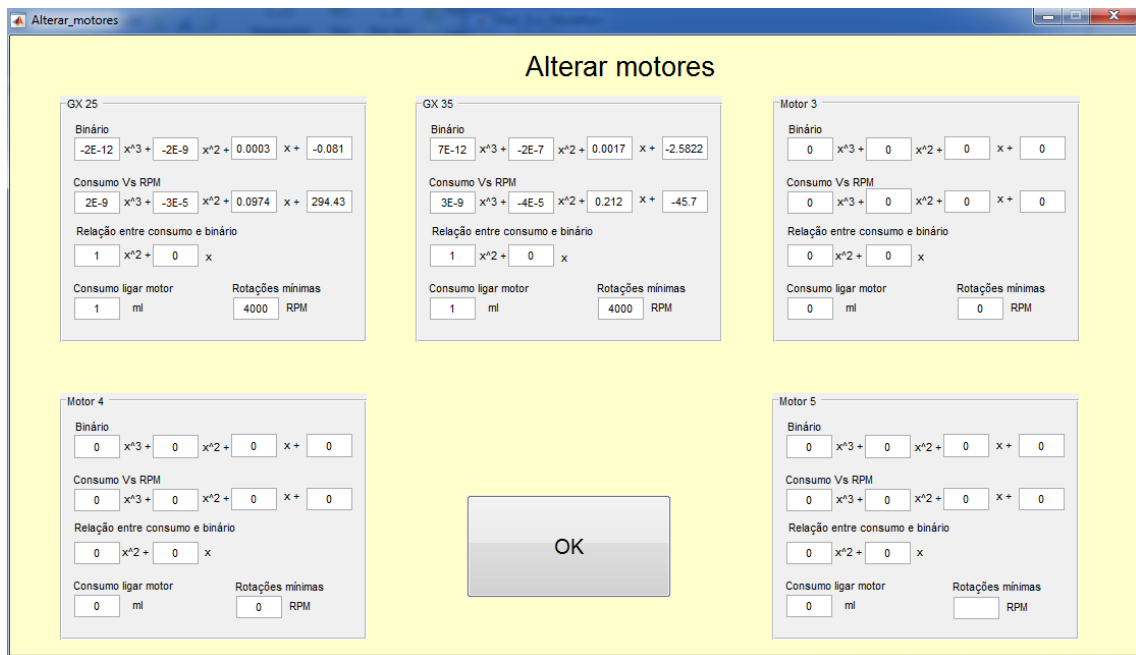


Figura 10 - Janela do software onde o utilizador pode editar as características dos motores.

É de salientar que após serem alteradas as variáveis do motor é necessário voltar a escolher o motor a utilizar, para que as novas variáveis deem entrada no software.

3.4. Caixa de velocidades

Outro dos parâmetros editáveis no software é a caixa de velocidades, bastando, para isso, premir [Caixa de velocidades] presente na janela principal do software. Esta ação irá abrir uma nova janela, ilustrada na figura 11. Nesta janela, o utilizador pode alterar o número de velocidades, relações de transmissão e rotações do motor onde deve ocorrer a mudança da velocidade da caixa. É de salientar que apenas podem existir um máximo de quatro velocidades.

Para alterar o número de velocidades basta selecionar o número pretendido no painel à esquerda da janela. Após a escolha do número de velocidades, irão apenas aparecer os campos necessários para as velocidades selecionadas. A primeira coluna da janela, situada a seguir ao painel indicativo do número de velocidades, indica a razão de transmissão de cada velocidade. A coluna do meio indica as rotações do motor onde o software deve reduzir a velocidade na caixa. A coluna mais a direita refere-se às rotações do motor onde o software deve aumentar a velocidade da caixa. Após todas as alterações feitas, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.

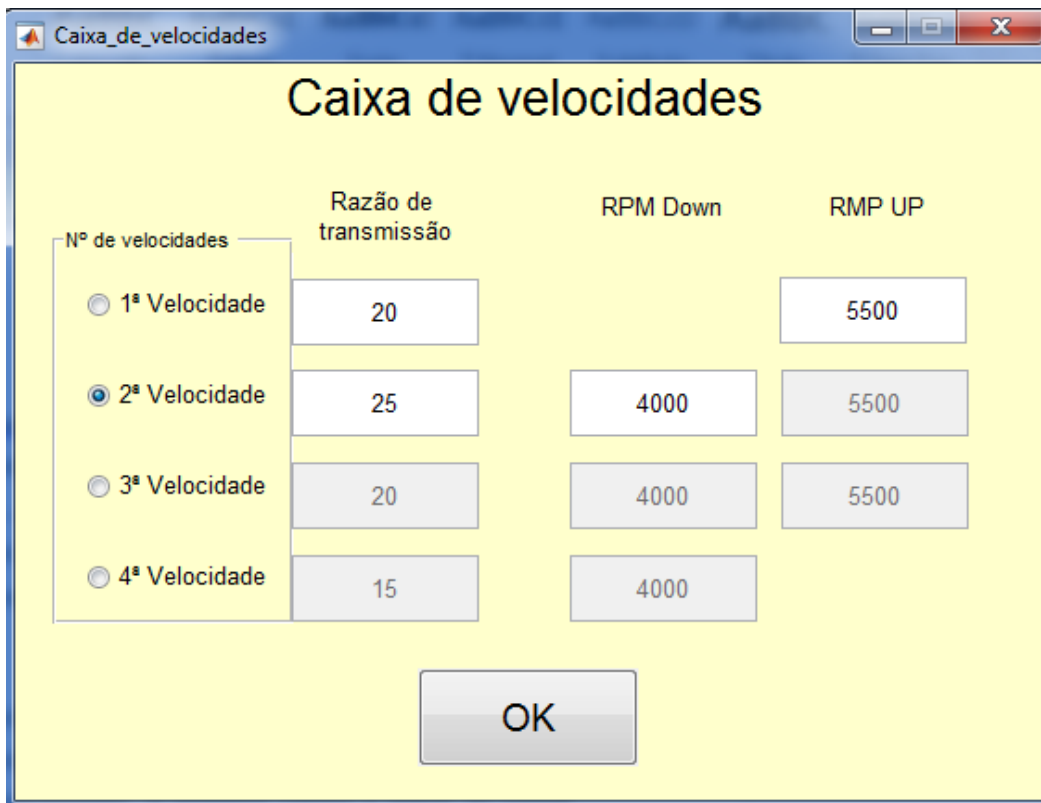


Figura 11 - Janela do software onde o utilizador pode alterar as características da caixa de velocidades.

3.5. Modos de funcionamento

Como referido no capítulo 1, o software pode ser executado de três formas distintas, logo o utilizador necessita de escolher o modo de funcionamento que pretende efetuar. Para este efeito, o utilizador tem à sua disposição um menu popup que se encontra no fundo da janela principal do software.

Para a alteração dos valores de entrada de cada modo de funcionamento, o utilizador deve premir os três botões representativos de cada modo de funcionamento.

3.5.1. Funcionamento Manual

Caso o utilizador pretenda alterar o vetor representativo do estado do motor, no modo de funcionamento manual, basta premir [Manual] que se encontra na janela principal do software. Esta ação irá abrir uma nova janela, ilustrada na figura 12.

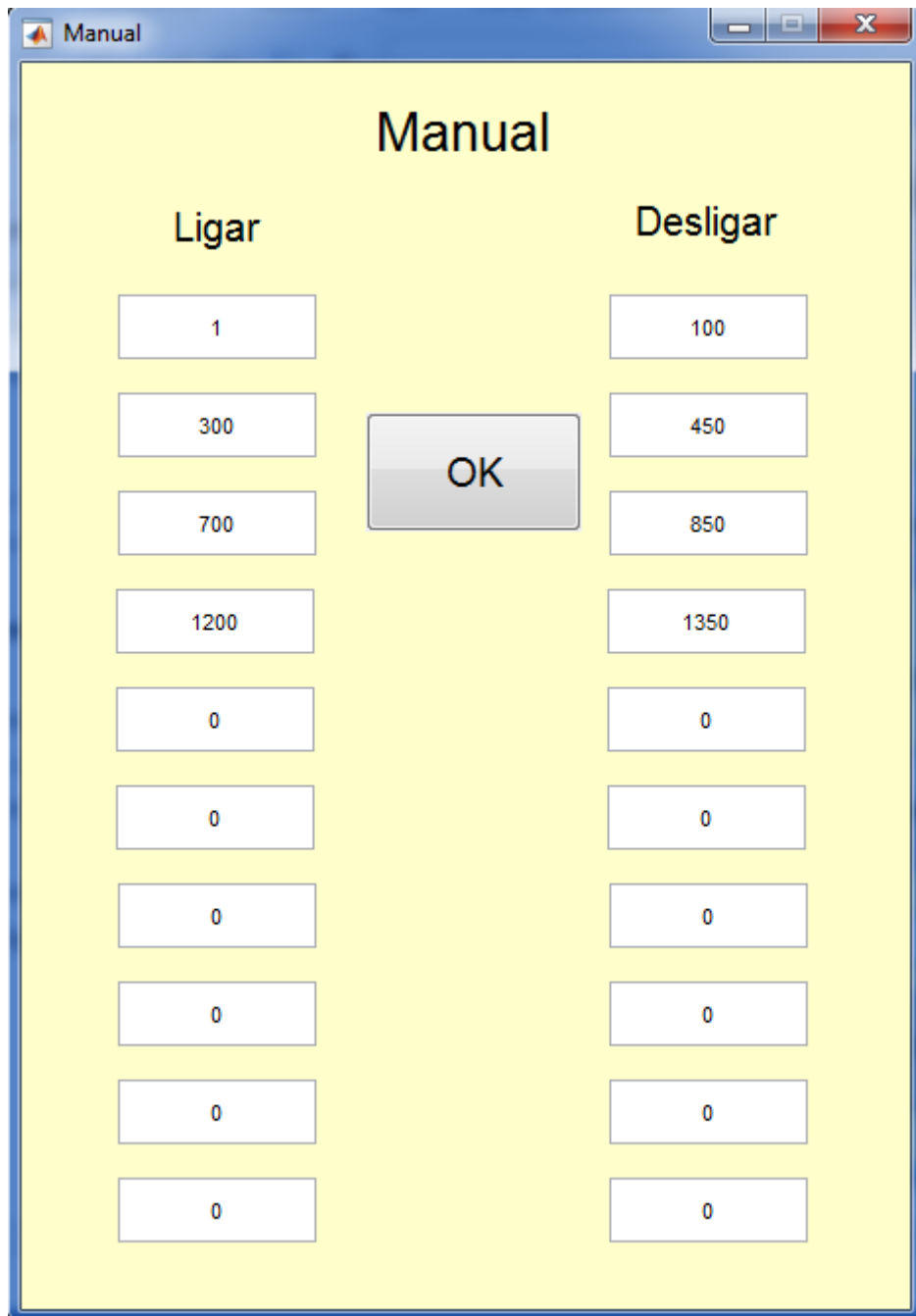


Figura 12 - Janela do software onde o utilizador pode alterar os pontos em que o motor se encontra ligado.

Na nova janela existem duas colunas editáveis, a coluna do lado esquerdo referente aos pontos onde o motor deve ligar e a coluna do lado direito refere-se ao ponto onde o motor deve desligar. É de salientar que o motor pode ligar no máximo dez vezes por volta. Outro aspeto importante é o facto de os pontos a inserir coincidirem com a distância da pista. Após todas as alterações efetuadas, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.

3.5.2. Funcionamento Velocidade

Caso o utilizador pretenda alterar o intervalo de velocidade ou a velocidade no ponto mais elevado da pista, no modo de funcionamento Velocidade, deve premir [Velocidade] que se encontra na janela principal do software. Essa ação irá abrir uma nova janela, ilustrada na figura 13.

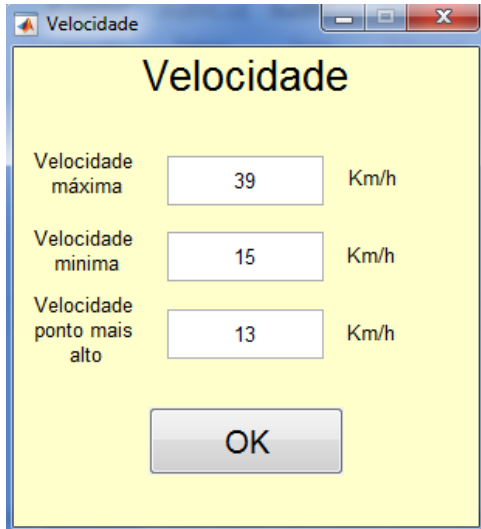


Figura 13 - Janela do software onde o utilizador pode alterar os valores de entrada do modo de funcionamento Velocidade.

Nessa janela constam três caixas de texto editáveis, onde, na primeira, o utilizador insere a velocidade máxima a que pretende que o veículo circule, na segunda caixa de texto editável, o utilizador insere a velocidade mínima pretendida e na última caixa de texto editável, o utilizador insere a velocidade que pretende no ponto mais elevado da pista. Todas as velocidades inseridas são expressas em quilómetros por hora (Km/h). Após todas as alterações feitas, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.

3.5.3. Funcionamento Iterativo

Por último, caso o utilizador pretenda alterar o tempo máximo da prova, no modo de funcionamento Iterativo, basta premir [Iterativo] que se encontra na janela principal do software. Essa ação irá abrir uma nova janela, ilustrada na figura 14.

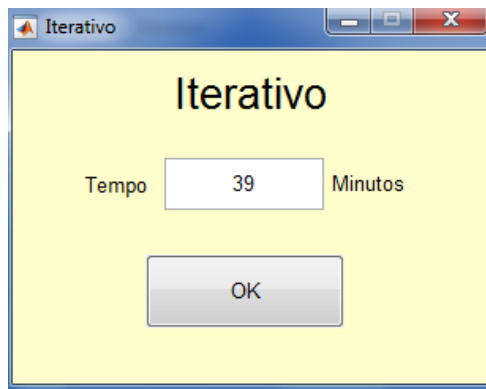


Figura 14 - Janela do software onde o utilizador pode editar o valor de entrada do modo de funcionamento Iterativo.

Nessa janela irá aparecer uma única caixa de texto editável, onde o utilizador deve colocar o tempo máximo da prova em minutos. Após a alteração feita, o utilizador deve premir [OK] para guardar as alterações.

3.6. RUN

Após todas as variáveis verificadas e alteradas caso necessário, o utilizador necessita de premir [RUN], que se encontra no fundo da janela principal do software, para começar a simulação.

4. Resultados

Após a execução do software, os resultados obtidos, podem ser apresentados de duas formas distintas, dependendo do modo de funcionamento utilizado.

4.1. Resultados Iterativo

Caso o utilizador tenha optado pelo modo de funcionamento Iterativo, os resultados serão apresentados numa janela, como ilustrado na figura 15. Nesta janela, os resultados são apresentados numa tabela, situada à esquerda, onde consta o melhor resultado para cada variação da velocidade mínima (Vmin). Os valores presentes na tabela são: a velocidade mínima (Vmin), a velocidade máxima (Vmax), a velocidade no ponto mais elevado (VH), o consumo total de combustível em mililitros (Gml) e, por fim, o tempo em minutos (tmin) e segundos (tsec).

À direita da janela encontra-se um gráfico que representa o consumo em função da velocidade mínima.

Por fim, abaixo da tabela encontra-se o botão [Resultados detalhados], que permite ao utilizador obter os resultados detalhados do melhor resultado.

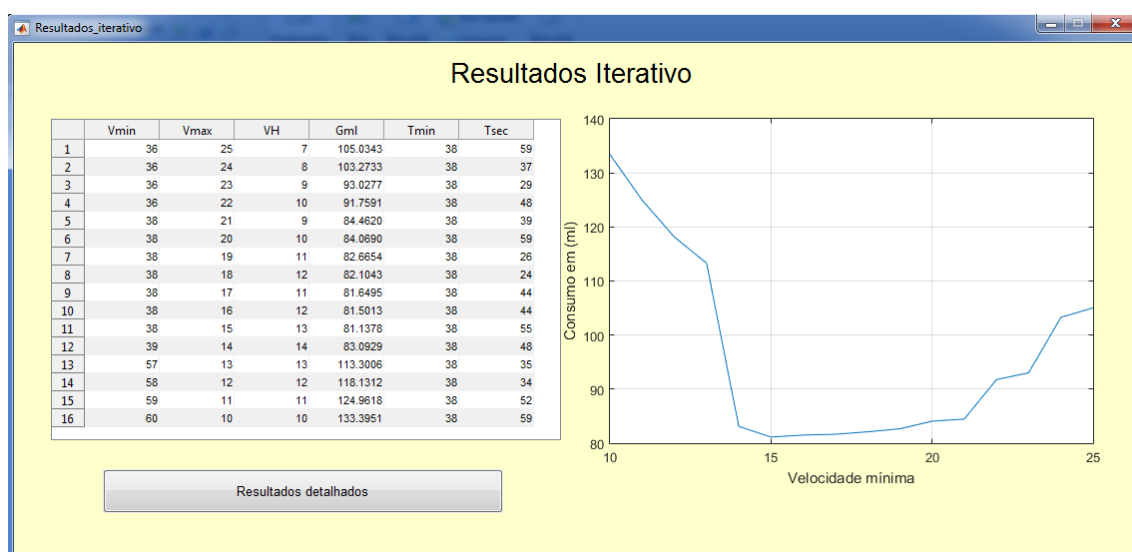


Figura 15 - Janela do software onde são apresentados os resultados do modo de funcionamento Iterativo.

4.2. Resultados detalhados

Caso o utilizador prima o botão [Resultados detalhados] presente na janela de resultados Iterativo ou execute o software no modo de funcionamento Manual ou Velocidade, o software

irá abrir uma nova janela, ilustrada na figura 16. Nesta janela, são inicialmente apresentados os resultados obtidos para o consumo, quer em mililitros quer em quilómetros por litro. Seguidamente é apresentada a velocidade média do veículo em quilómetros por hora e, por fim, o tempo, em minutos e segundos que demora a percorrer todo o percurso.

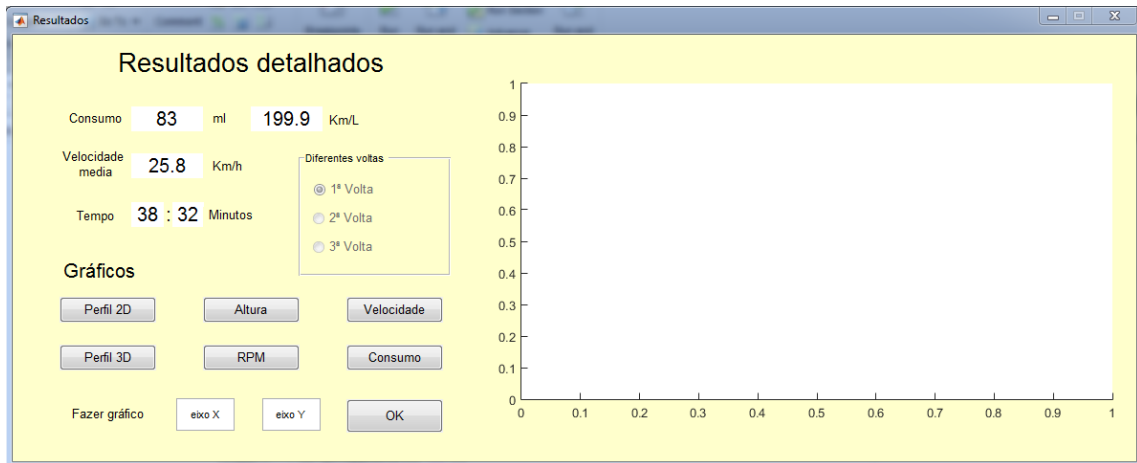


Figura 16 - Janela do software onde se encontram apresentados os resultados detalhados.

Posteriormente, são apresentados seis botões que, ao serem premidos, apresentam gráficos customizados no lado direito da janela de resultados. Destes seis botões, três são representativos da pista e três representativos dos resultados obtidos.

Os gráficos representativos da pista são:

- Perfil 2D - O gráfico ilustra a pista num perfil em duas dimensões, onde está representado a laranja os pontos onde o motor se encontra ligado e a azul os pontos onde o motor se encontra desligado, como demonstra a figura 17a.

- Altura - Este gráfico ilustra o perfil de altura da pista, tendo como referência a altura inicial igual a zero. Tal como no gráfico do perfil 2D, está representado a laranja os pontos onde o motor se encontra ligado e a azul os pontos onde o motor se encontra desligado, como mostra a figura 17b.

- Perfil 3D - O gráfico ilustra a pista num perfil em três dimensões, como ilustra a figura 17c, podendo este ser rodado para uma melhor visualização do mesmo.

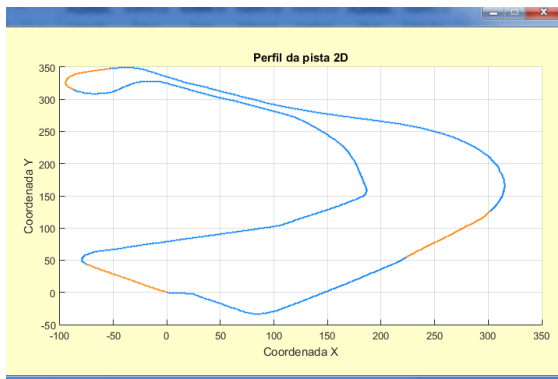


Figura 17a - Perfil 2D da pista.

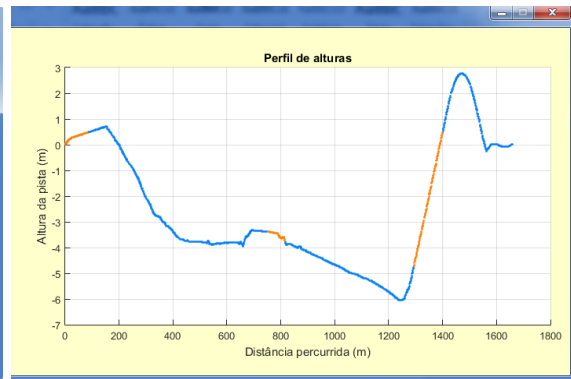


Figura 17b - Perfil de altura da pista.

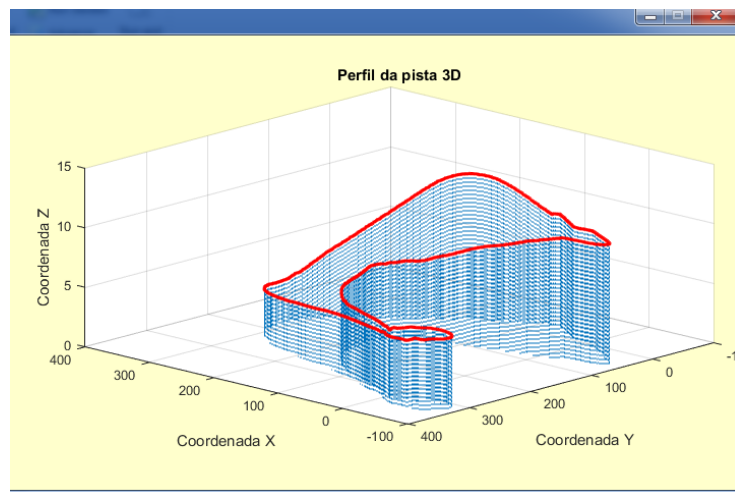


Figura 17c - Perfil 3D da pista.

Os gráficos representativos dos resultados são:

- Velocidade - O gráfico ilustra, a preto, o perfil de velocidades em quilómetros por hora e a vermelho o vetor representativo do estado do motor multiplicado por cem. Todas as curvas são em função da distância da pista, como ilustrado na figura 18a.

- RPM - O gráfico ilustra, a preto, o perfil de velocidades multiplicados por cem, para uma melhor visualização do gráfico, e a verde o perfil de rotações por minuto (RPM) do motor. Ambas as curvas são em função da distância, como ilustrado na figura 18b.

- Consumo - O gráfico ilustra, a verde, o consumo específico em função da distância, como ilustrado na figura 18c.

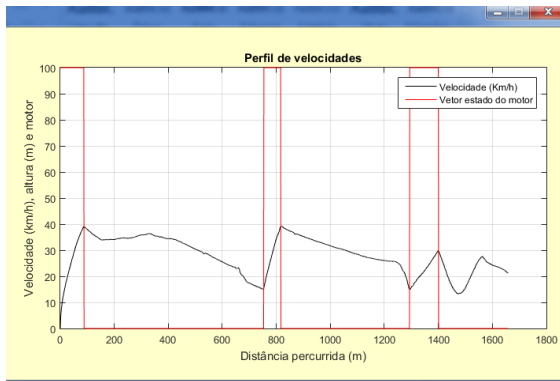


Figura 18a - Perfil de velocidades.

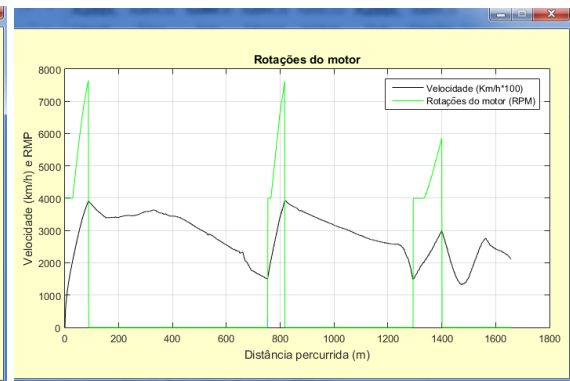


Figura 18b - Perfil de rotações do motor.

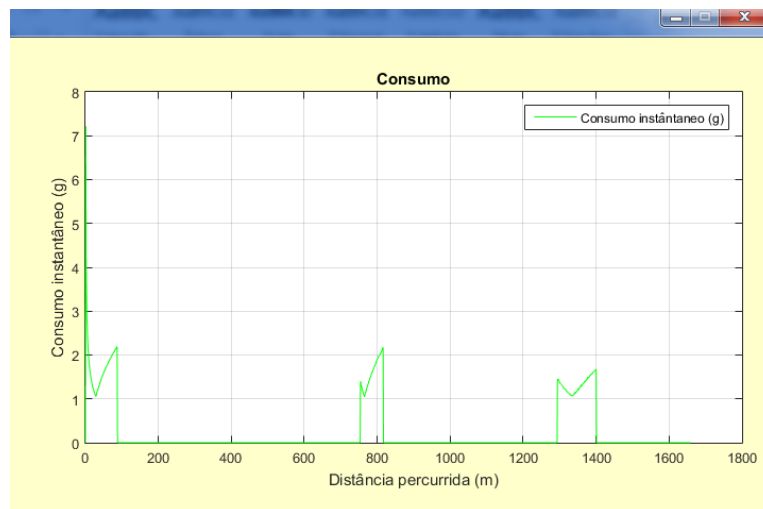


Figura 18c - Perfil de consumo do motor.

Caso as voltas da pista sejam diferentes, o utilizador pode escolher qual a volta que pretende visualizar no gráfico bastando, para isso, escolher a volta pretendida no painel [diferentes voltas] presente na janela de resultados detalhados.

Para além dos gráficos customizados apresentados anteriormente, o utilizador pode ainda criar outros gráficos à sua escolha bastando, para isso, preencher as duas caixas de texto editáveis, com as variáveis que pretende ver no gráfico e, de seguida, premir [OK]. É de referir que a primeira caixa de texto editável corresponde ao eixo das abcissas (x) e a segunda ao eixo das ordenadas (y).

As variáveis possíveis de utilizar para efetuar estes gráficos são:

- Pista
 - X - Coordenada x da pista;

- Y - Coordenada y da pista;
- d - Distância em metros da pista, por volta;
- h - Perfil de altura da pista;
- H - Perfil de altura da pista, com a altura inicial como referência, ou seja, com altura inicial zero;
- R1 - Inverso do raio de curvatura da primeira volta;
- R2 - Inverso do raio de curvatura da segunda até à penúltima volta;
- R3 - Inverso do raio de curvatura da última volta;

➤ Forças

- F_r - Força de atrito rolamento (N);
- F_{ae} - Força de atrito aerodinâmico (N);
- F_{cd} - Força de atrito dinâmico em curva (N);
- F_g - Força da gravidade (N);
- F_a - Força de atrito total (N);
- F_m - Força do motor (N);
- F - Somatório das forças exercidas no veículo;

➤ Cinemática

- T - Binário do motor (N.m);
- n - Rotações do motor (rpm);
- V - Velocidade do veículo (Km/h);
- v - Velocidade do veículo (m/s);

➤ Outras

- I - Vetor com as relações de transmissão em cada ponto;
- on - Vetor indicativo do estado do motor em cada ponto;
- GC_{ep} - Consumo específico à plena carga (g/km.h);
- GC_e - Consumo específico para carga variável (g/kw.h);
- G_p - Consumo em cada ponto (g);

5. Alterações ao software

Caso o utilizador pretenda fazer alguma alteração ao software, é aconselhável que o mesmo tenha conhecimentos na área da programação em c e na criação de interfaces gráficas (guide), ambos presentes no Matlab. É também aconselhável ler a dissertação elaborada sobre o desenvolvimento do software, intitulada: Desenvolvimento de software para simulação e otimização de consumo de veículos: Aplicação à Shell Eco-Marathon realizada em Londres.

As alterações aplicáveis ao software podem ser divididas em dois grupos distintos: alterações ao código e alterações ao interface gráfico.

5.1. Alterações ao código do software

No que diz respeito às alterações efetuadas ao código do software, estas são feitas na estrutura principal do programa, que engloba diversas funções distintas. Essas funções encontram-se isoladas em ficheiros, de extensão .m, situados na pasta do software. Os ficheiros em causa são:

- `Codigo_Programa` - Neste ficheiro encontra-se a estrutura principal do programa, com as diversas equações relativas às forças aplicadas, à cinemática do veículo e ao consumo do motor.
- `Codigo_Critério_Energia_Mínima` - Neste ficheiro encontra-se a função que calcula se o carro possui energia suficiente para chegar ao ponto mais elevado da pista, com a velocidade predefinida pelo utilizador. Esta função é utilizada para fornecer ao ficheiro principal, o estado do motor, até o veículo ultrapassar o ponto mais elevado da pista.
- `Codigo_Critério_Energia_Final` - Neste ficheiro encontra-se a função que calcula se o carro possui energia suficiente para chegar ao final da pista com a velocidade aproximada de 2 km/h. Esta função é utilizada para fornecer ao ficheiro principal, o estado do motor, a partir do ponto mais elevado da pista.
- `Codigo_Caixa_De_Velocidade` - Neste ficheiro encontra-se a função que define a velocidade da caixa de velocidades, caso exista, fornecendo ao ficheiro principal a relação de transmissão em cada ponto.
- `Codigo_Iterativo` - Neste ficheiro encontra-se a função que calcula os diferentes intervalos de velocidade e a velocidade no ponto mais elevado, fornecendo esses valores ao ficheiro principal. A função também calcula o melhor caso fornecido pelo modo de funcionamento iterativo.

5.2. Alterações ao interface gráfico do software

Em relação as alterações ao interface gráfico do software, estas são feitas inicialmente nos ficheiros de extensão .fig e, seguidamente, no respetivo ficheiro .m com o mesmo nome, situados na pasta do software. Os ficheiros alteráveis são:

- Shel_Eco_Marathon - Neste ficheiro encontra-se a janela principal do software.
- Carro - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis do veículo.
- Caixa_de_velocidades - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis da caixa de velocidades.
- Altera_motores - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis dos motores.
- Iterativo - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis do modo de funcionamento Iterativo.
- Velocidade - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis do modo de funcionamento Velocidade.
- Manual - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador pode alterar as variáveis do modo de funcionamento Manual.
- Resultados - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador visualiza os resultados detalhados das simulações efetuadas.
- Resultados Iterativo - Neste ficheiro encontra-se a janela onde o utilizador visualiza os resultados do modo de funcionamento Iterativo.

Os restantes ficheiros existentes na pasta do software dizem respeito às pistas existentes para simulação e às variáveis guardadas para cada janela do software.

5.2.1. Exemplos de alterações

Uma das alterações que poderá vir a ser necessário efetuar é a alteração do nome dos motores, tanto no menu popup existente na janela principal do software, como nos painéis dos motores presentes na janela de alteração dos motores.

Para a alteração do nome dos motores na janela principal do software, o utilizador necessita de escrever na linha de comandos do Matlab o comando “guide”. De seguida irá aparecer uma janela onde o utilizador deve selecionar o ficheiro Shell_Eco_Marathon.fig. Por fim, a janela principal do ficheiro deverá abrir, em modo editável, bastando agora ao utilizador efetuar duplo clique no menu popup onde se encontram o nome dos motores e, após o duplo clique, alterar a String na nova janela.

Para alterar o nome dos motores na janela, para a alteração dos motores, o utilizador deve efetuar o mesmo processo descrito anteriormente, mudando apenas o ficheiro para Alterar_motores.fig e o duplo clique será agora no painel que se pretende editar.