



NUNO ANDRÉ MARTINS DOS SANTOS

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DE COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa
novembro, 2021



OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DE COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA

NUNO ANDRÉ MARTINS DOS SANTOS

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Anikó Katalin Horváth da Costa,
Professora Catedrática, FCT-NOVA

Arguentes: Pedro Miguel Ribeiro Pereira,
Professor Associado, FCT-NOVA

Orientador: João Francisco Alves Martins,
Professor Associado, FCT-NOVA

Otimização de Operação de Composição Ferroviária

Copyright © <Nuno André Martins dos Santos>, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Desde já, quero agradecer ao meu professor orientador João Martins por toda a ajuda prestada e por me colocar no caminho certo em todas as fases da dissertação.

Agradeço à comunidade FCT por estes cinco anos de muitas recordações e aprendizagens. Um abraço especial ao João, ao Diogo, ao Victor, ao Pedro e ao Alexandre pelos momentos de estudo, diversão e sobretudo pela amizade desenvolvida.

Por último quero agradecer à minha família e amigos de longa data, que estiveram sempre presentes, desempenhando um papel vital no meu percurso académico e no meu crescimento como pessoa.

RESUMO

O setor ferroviário é vital para a mobilidade de pessoas e mercadorias e as viagens ferroviárias desempenham um papel fundamental a nível socioeconómico, sendo que a sua otimização pode permitir viagens de menor consumo energético e/ou mais rápidas. A presente dissertação apresenta uma solução que permite otimizar as viagens ferroviárias. Para tal foi desenvolvida uma ferramenta que disponibiliza três tipos distintos de otimização para viagens ferroviárias: otimização do tempo de viagem, otimização do consumo energético e uma otimização combinada de ambas as anteriores. Para determinada viagem ferroviária, ao serem introduzidas as características do trajeto e do veículo ferroviário, a ferramenta desenvolvida retorna o melhor perfil de velocidades encontrado para o tipo de otimização escolhida. O processo de procura da melhor solução é realizado através de uma metodologia assente nos algoritmos evolutivos, neste caso algoritmos genéticos, que se apresentam como uma ferramenta eficaz utilizada para resolver problemas de otimização complexos. Para demonstrar o funcionamento da ferramenta desenvolvida, foram considerados vários tipos distintos de percursos: Sintra - Cacém da linha de Sintra (em ambos os sentidos) e o percurso Cascais - Oeiras da linha de Cascais.

Palavras chave: Setor Ferroviário, Viagens Ferroviárias, Consumo Energético, Tempo de Viagem, Ferramenta de Otimização, Perfil de Velocidades, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

The railway sector is vital for the mobility of people and goods, so railway trips play a fundamental role at a socio-economic level and its optimization can allow travelling faster and/or with less energy consumption. This dissertation presents a solution that allows optimizing railway trips. For this purpose, it was developed a tool that provides three different types of optimizations for railway trips: travel time optimization, energy consumption optimization and an optimization that combines both above. For a given railway trip, when the specifications of the route and the railway vehicle are known, the optimization tool returns the best speed profile found for the chosen optimization type. The process of searching for the best solution follows a methodology based on evolutionary algorithms, in this case genetic algorithms, which are an effective tool used to solve complex optimization problems. To demonstrate the functioning of the developed tool, several different types of routes were considered: Sintra - Cacém route on the Sintra line (in both directions) and the Cascais - Oeiras route on the Cascais line.

Keywords: Railway Sector, Railway Trips, Energy Consumption, Travel Time, Optimization Tool, Speed Profile, Genetic Algorithms.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento Geral.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Contribuições inovadoras.....	4
2	ESTADO DA ARTE.....	5
2.1	Considerações iniciais.....	5
2.2	Trabalhos relacionados.....	5
3	DINÂMICA DO MOVIMENTO FERROVIÁRIO.....	11
3.1	Resultante das forças.....	11
3.2	Forças de atrito.....	12
3.2.1	Resistências do rolamento das rodas sobre os carris.....	12
3.2.2	Forças de arranque.....	13
3.2.3	Resistências aerodinâmicas.....	14
3.2.4	Cálculo resistência específica ao movimento.....	14
3.3	Forças derivadas do perfil da linha.....	15
3.3.1	Forças nas curvas.....	15
3.3.2	Forças causadas por declives.....	18
3.4	Regimes de condução.....	19
3.4.1	Considerações iniciais.....	19
3.4.2	Aceleração.....	20

3.4.3	Manutenção.....	20
3.4.4	Deriva	21
3.4.5	Travagem.....	21
3.5	Consumo energético.....	22
4	FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO.....	23
4.1	Visão geral da ferramenta de otimização	23
4.2	Modelo de condução adotado.....	24
4.3	Funcionamento da ferramenta de otimização	24
4.3.1	Elemento fundamental	24
4.3.2	Estrutura da ferramenta de otimização.....	25
4.4	Módulo de Parâmetros.....	27
4.5	Módulo de Simulação Dinâmica.....	28
4.6	Módulo de Cálculo Energético	29
4.7	Módulo Evolutivo	30
4.7.1	Algoritmos genéticos	30
4.7.2	Implementação do Módulo Evolutivo	33
5	RESULTADOS.....	38
5.1	Introdução.....	38
5.2	Veículo ferroviário	39
5.3	Percursos.....	43
5.3.1	Descrição dos percursos	43
5.3.2	Perfil de elevação.....	44
5.4	Aplicação da ferramenta de otimização	48
5.4.1	Sintra - Cacém	48
5.4.2	Cacém - Sintra	60
5.4.3	Cascais - Oeiras	72
5.4.4	Comparação dos resultados.....	83

6	CONCLUSÃO	90
6.1	Trabalhos futuros.....	91
A	ANEXOS	95
A.1	Ficha técnica da locomotiva série 5600.	95
A.2	Ficha técnica do vagão Falls	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Total de energia consumida pela CP (CP, 2018).	2
Figura 2 - Contacto roda-carril (Paulo, 2006).	13
Figura 3 - Forças intervenientes nas curvas (Alonso & Finn, 1992).	16
Figura 4 - Comportamento das rodas numa curva (Paulo, 2006).	17
Figura 5 – Movimento em plano inclinado.	19
Figura 6 - Modelo de condução (Adaptado de Rocha et al., 2018).	20
Figura 7 - Arquitetura da Ferramenta de otimização.	23
Figura 8 - Modelo de condução adotado.	25
Figura 9 - Fluxograma da ferramenta de otimização.	27
Figura 10 - Capacidade de tração.	28
Figura 11 – Arquitetura do simulador.	30
Figura 12 - Fluxograma dos algoritmos genéticos.	32
Figura 13 – Espaço de procura.	35
Figura 14 – Troços das linhas de Cascais e Sintra.	39
Figura 15 – Locomotiva série 5600 (<i>Inventário Portugal Ferroviário</i>).	40
Figura 16 - Vagão falls (<i>Vagões</i> , 2021).	41
Figura 17 - Capacidade de tração da locomotiva 5600.	41
Figura 18 - Esquema das linhas ferroviárias consideradas.	44
Figura 19 – Perfil de elevação Sintra - Cacém.	45
Figura 20 – Perfil de elevação Cascais - Oeiras.	45
Figura 21 – Perfil de elevação Sintra - Cacém corrigido.	47
Figura 22– Perfil de elevação Cascais - Oeiras corrigido.	47
Figura 23 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Sintra-Cacém).	49
Figura 24 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Sintra-Cacém).	51

Figura 25 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Sintra-Cacém).....	51
Figura 26 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais rápida (Sintra-Cacém).....	52
Figura 27 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Sintra-Cacém).....	52
Figura 28 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Sintra-Cacém).	53
Figura 29 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).	55
Figura 30 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).	55
Figura 31 - Potencia desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).....	56
Figura 32 - Processo evolutivo da otimização mista (Sintra-Cacém).....	58
Figura 33 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Sintra-Cacém).	59
Figura 34- Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Sintra-Cacém).	59
Figura 35 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Sintra-Cacém).....	60
Figura 36 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Cacém-Sintra).	61
Figura 37 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Cacém-Sintra).....	63
Figura 38 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Cacém-Sintra).....	63
Figura 39 - Ação das forças externas durante a viagem mais rápida (Cacém-Sintra).....	64
Figura 40 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Cacém-Sintra).....	64
Figura 41 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Cacém-Sintra).	65
Figura 42 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).	66
Figura 43 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).	67
Figura 44 - Potência desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).....	67
Figura 45 - Processo evolutivo da otimização mista (Cacém-Sintra).....	69
Figura 46 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Cacém-Sintra).	70
Figura 47 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Cacém-Sintra).	71
Figura 48 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Cacém-Sintra).....	71
Figura 49 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Cascais-Oeiras).	73
Figura 50 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).....	74
Figura 51 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Cascais-Oeiras).	75

Figura 52 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).....	75
Figura 53 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).....	76
Figura 54 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Cascais-Oeiras).....	77
Figura 55 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras).	78
Figura 56 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras).	78
Figura 57 - Potência desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras)....	79
Figura 58 - Processo evolutivo da otimização mista (Cascais-Oeiras).	81
Figura 59 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Cascais-Oeiras).	82
Figura 60 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Cascais-Oeiras).	82
Figura 61 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Cascais-Oeiras).....	83
Figura 62 - Perfis de velocidade para as otimizações do percurso Sintra-Cacém.....	84
Figura 63 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Sintra-Cacém.....	85
Figura 64 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Sintra-Cacém.....	85
Figura 65 - Perfis de velocidade para as otimizações do percurso Cacém-Sintra.....	86
Figura 66 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Cacém-Sintra.....	87
Figura 67 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Cacém-Sintra.....	87
Figura 68 - Perfis de velocidade para o percurso Cascais-Oeiras.....	88
Figura 69 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Cascais-Oeiras. ..	89
Figura 70 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Cascais-Oeiras.....	89
Figura 71 - Ficha técnica da locomotiva série 5600 (<i>Série 5600 - Ficha Técnica</i> , 2021).	95
Figura 72 - Esquema da locomotiva série 5600.....	96
Figura 73 - Ficha técnica do vagão Fall (<i>Vagões - Falls</i> , 2021).....	96
Figura 74 - Esquema do vagão Fall (<i>Vagões - Falls</i> , 2021).	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica no ano 2018.....	3
Tabela 2 - Consumo de energia gerada através de combustíveis fósseis em 2018.	3
Tabela 3 – Tabela dos coeficientes A, B e C.	15
Tabela 4 - Fórmula de Röckl.....	18
Tabela 5 - Especificações da locomotiva série 5600 (<i>Série 5600 - Ficha Técnica, 2021</i>).....	40
Tabela 6 - Coeficientes das fórmulas de Davis.....	42
Tabela 7 - Rampas no trajeto Sintra-Cacém.	46
Tabela 8 - Rampas no trajeto Cacém-Sintra.	46
Tabela 9 - Rampas no trajeto Cascais-Oeiras.	46
Tabela 10 – Evolução da viagem mais rápida (Sintra-Cacém).....	50
Tabela 11 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Sintra-Cacém).	54
Tabela 12 – Soluções de referência (Sintra-Cacém).....	57
Tabela 13 - Evolução da solução equilibrada (Sintra-Cacém).	58
Tabela 14 - Evolução da viagem mais rápida (Cacém-Sintra).	62
Tabela 15 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Cacém-Sintra).	66
Tabela 16 - Soluções de referência (Cacém-Sintra).....	68
Tabela 17 - Evolução da solução equilibrada (Cacém-Sintra).	70
Tabela 18 - Evolução da viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).	74
Tabela 19 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Cascais-Oeiras).	77
Tabela 20 - Soluções de referência (Cascais-Oeiras).	80
Tabela 21 - Evolução da solução equilibrada (Cascais-Oeiras).	81
Tabela 22 - Otimizações do percurso Sintra-Cacém.....	84
Tabela 23 - Otimizações do percurso Cacém-Sintra.....	86
Tabela 24 - Otimizações do percurso Cascais-Oeiras.	88

ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

a	Aceleração.
A_f	Área frontal do veículo.
b	Comprimento da bitola.
C_E	Custo energético.
C_{misto}	Custo misto.
CP	Comboios de Portugal.
$C_{\Delta t}$	Custo do tempo de viagem.
E	Energia consumida.
E_{max}	Consumo energético máximo.
E_{min}	Consumo energético mínimo.
E_{sim}	Consumo energético simulado.
F_a	Forças de atrito.
F_c	Força centrípeta
F_{carril}	Força que o carril aplica sobre a roda.
F_d	Força derivada de um plano inclinado.
F_{ex}	Forças externas.
F_{in}	Forças internas.
F_r	Força resultante.

F_t	Força de tração.
g	Constante gravitacional.
IP	Infraestruturas de Portugal.
m	Massa.
n	Número de eixos do veículo.
N_v	Número de vagões.
P	Potência.
Pe	Peso por eixo.
r	Raio da curva.
R	Resistência específica ao movimento.
R_C	Resistência específica ao movimento derivada das curvas
R_l	Resistência específica ao movimento causada pela locomotiva.
R_v	Resistência específica ao movimento causada pelos vagões.
t_{max}	Tempo de viagem máximo.
t_{min}	Tempo de viagem mínimo.
t_{sim}	Tempo de viagem simulado.
v	Velocidade.
$v_{cruzeiro}$	Velocidade de cruzeiro.
W	Peso ou força gravítica.
W_x	Componente horizontal da força gravítica.
W_y	Componente vertical da força gravítica.

INTRODUÇÃO

Neste capítulo realiza-se uma introdução ao setor ferroviário e à sua história. Será clarificado o papel do setor e quais as implicações que advêm da atividade do mesmo na sociedade e no ambiente. Para além disto, serão estabelecidos os objetivos da presente dissertação e referidos os aspetos que a tornam diferenciada em relação a outros trabalhos previamente desenvolvidos, que abordam o tema da otimização de viagens ferroviárias.

1.1 Enquadramento Geral

A história dos transportes ferroviários como hoje os conhecemos teve origem no início do século XIX. Foi pela mão do engenheiro Richard Trevithick que no Reino Unido em 1804 surgiu a primeira locomotiva a vapor. Mas recuando mais no tempo, percebemos que os primeiros passos nesta caminhada foram dados por volta do século XVI onde os vagões circulavam sobre carris de madeira para transportar mercadorias em zonas de exploração mineira. Atualmente, num mundo cada vez mais desenvolvido, a composição ferroviária é essencial no transporte de pessoas e mercadorias, desempenhando um papel de extrema importância não só para a mobilidade nos grandes centros urbanos, mas também para que haja uma ligação destes aos meios rurais. Posto isto, é evidente a preponderância socioeconómica que o setor ferroviário assume.

Em Portugal, a gestão da rede ferroviária está a cargo da entidade Infraestruturas de Portugal (IP) e a extensão da via-férrea é de 2526 quilómetro (*Rede Ferroviária / Infraestruturas de Portugal*). Destes 2526 quilómetro a empresa Comboios de Portugal (CP) opera em 2210,61 quilómetro no transporte de passageiros. A CP é uma entidade pública pertencente ao estado português que é a maior responsável pelo transporte ferroviário no território nacional. No ano

de 2018, segundo o relatório de sustentabilidade, esta empresa transportou mais de 126 milhões de passageiros. Este valor demonstra a importância que o setor tem para a mobilidade em Portugal. Contudo, o gasto total de energia atingiu os 1 065 160,1 GJ, o que equivale a 295 877 805 kWh. Os valores dos consumos energéticos totais da empresa de 2014 a 2018 encontram-se representados na Figura 1. Os avultados gastos energéticos da empresa são resultantes na sua grande maioria da produção de tração por parte dos motores dos comboios. Maioritariamente, os comboios circulam alimentados por energia elétrica, mas ainda há a necessidade de recorrer a comboios que se fazem mover por meio da queima de combustíveis fósseis.

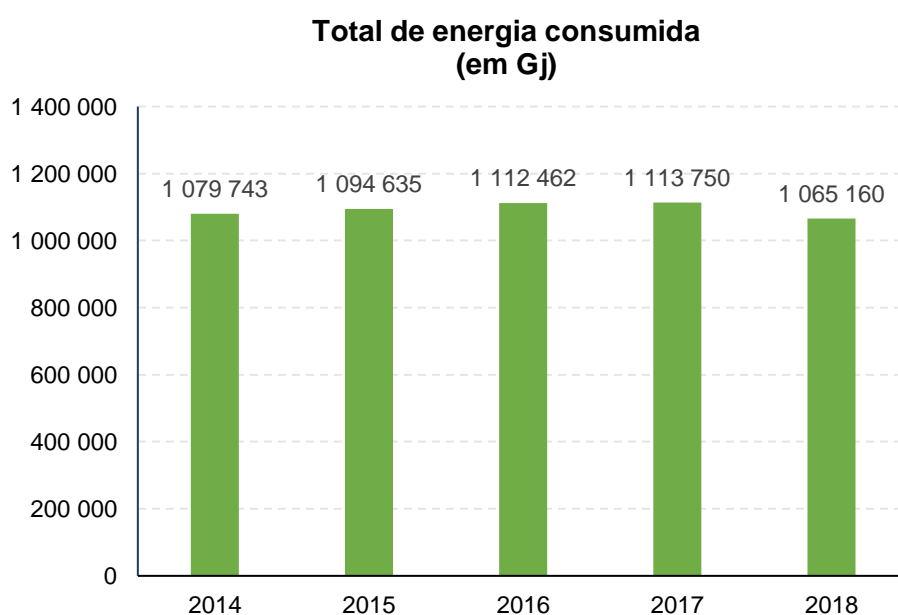


Figura 1 - Total de energia consumida pela CP (CP, 2018).

Os comboios movidos a combustíveis fósseis são cada vez menos comuns. Ao serem mais poluentes, existe a preocupação de reduzir ao máximo o uso destas locomotivas em detrimento das elétricas. Por isso, a maioria dos veículos ferroviários deslocam-se através de energia elétrica, no caso da CP 84% da frota do ano de 2018 era totalmente elétrica. Do total da energia consumida, 773 395 GJ foi a fatia de energia elétrica que a empresa necessitou. Como indicado na Tabela 1, 731 838,5 GJ foram consumidos pelos motores dos comboios em circulação para produzir forças de tração. Os restantes 41 556,6 GJ cobriram outras necessidades das instalações elétricas dos veículos. Portanto, 94,3% da energia elétrica total consumida foi direcionada para a produção de tração. Os dados do consumo de combustíveis fósseis são apresentados na Tabela 2. Para um total de 291 765 GJ de energia consumida, 99,3% foram

gastos para a gerar força de tração, os restantes 0,7% foram utilizados por veículos de apoio (CP, 2018).

Tabela 1- Consumo de energia elétrica no ano 2018.

Energia	Energia consumida (Gj)	Tração vs Não tração (%)
Elétrica de Tração	731 838,5	94,3
Elétrica de instalações	41 556,6	

Tabela 2 - Consumo de energia gerada através de combustíveis fósseis em 2018.

Energia	Energia consumida (Gj)	Tração vs Não tração (%)
Gasóleo Tração	289 601,64	99,3
Gasóleo + Gasolina apoio	2 163,29	

Cada vez mais há a necessidade de reduzir os consumos energéticos e as emissões de gases poluentes para a atmosfera. Face à grande parcela de energia consumida que advém das forças produzidas pelos motores, que permitem a movimentação do comboio, pode-se concluir que uma melhor gestão da tração a nível global teria um impacto positivo. Para além do aspeto energético, é de realçar que este não pode ser a única preocupação. É de extrema importância cumprir os horários estabelecidos para que a poupança não seja atingida a custo de um aumento significativo do tempo das viagens.

1.2 Objetivos

Este trabalho será dedicado ao desenvolvimento de uma ferramenta que permite a otimização de viagens ferroviárias. A metodologia seguida permite otimizar as viagens de três modos distintos: Otimização do tempo de viagem, otimização do consumo energético e otimização conjunta do binómio energia-tempo. Para que isto fosse possível, desenvolveu-se a ferramenta de otimização baseada em algoritmos evolutivos, que para cada tipo de otimização revela a melhor solução encontrada e o respetivo perfil de velocidades. O perfil de velocidades ou perfil de condução define os regimes de condução a adotar pelo veículo ferroviário a cada momento. A cada perfil de velocidades são associados uma duração de viagem e um gasto energético. Ao ser seguido o perfil de velocidades obtido, maximizar-se-á a eficiência temporal, energética ou do binómio energia-tempo, dependendo do tipo de otimização aplicada. Baseado no problema da presente dissertação, foram definidos os seguintes objetivos:

1. Implementação de um simulador da dinâmica do movimento dos comboios;
2. Implementação de um algoritmo inteligente responsável pelo processo de procura da melhor solução;
3. Desenvolvimento de uma ferramenta de otimização composta por ambos o simulador da dinâmica do movimento do comboio e o algoritmo inteligente.

1.3 Contribuições inovadoras

Este trabalho tem uma abordagem inovadora ao problema da otimização dos consumos energéticos e dos tempos de viagem na ferrovia. Os pontos de contraste entre esta dissertação e outros trabalhos são:

- A imposição de um modelo de condução para as viagens;
- A utilização de um algoritmo inteligente para a definição dos pontos de transição entre regimes de condução;
- O desenvolvimento de uma ferramenta que disponibiliza diversos tipos de otimização: otimização do tempo de viagem, otimização do consumo energético e otimização do binómio energia-tempo;

Neste estudo, todas as viagens otimizadas respeitam uma sequência estabelecida de regimes de condução: aceleração, manutenção, deriva e travagem. Os algoritmos evolucionários têm surgido nos trabalhos mais recentes como uma ferramenta de otimização das viagens ferroviárias. Porém, a aplicação dos algoritmos genéticos para decifrar os pontos de transição entre os regimes de condução, respeitando sempre uma sequência de regimes imposta, é um método inovador que será explorado na presente dissertação. Para além disto, este trabalho disponibiliza diversas formas de otimizar viagens ferroviárias e cada uma delas será aplicada a cenários diversos. A otimização do tempo de viagem procura a viagem mais rápida, a otimização do consumo energético pretende alcançar a viagem mais eficiente energeticamente e a otimização do binómio tempo-energia conjuga estes dois parâmetros de naturezas opostas.

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão mencionados trabalhos de outros autores que estejam relacionadas com o tema da otimização das viagens ferroviárias. Após serem introduzidos os trabalhos relacionados, realizar-se-á uma resumida explicação acerca dos aspectos que diferenciam o presente trabalho dos demais.

2.1 Considerações iniciais

Desde a sua criação, a ferrovia, os transportes ferroviários e a forma como estes são operados têm vindo a evoluir com o passar do tempo. Foram publicados múltiplos trabalhos no âmbito da otimização das viagens ferroviárias, que contribuem e irão contribuir para avanços no setor. Como é sabido, a busca por uma maior eficiência na operação ferroviária é um processo contínuo que será sempre objeto de estudo. Conseqüentemente, foi realizada uma pesquisa de trabalhos publicados relacionados com as viagens ferroviárias e em como otimizá-las.

2.2 Trabalhos relacionados

A busca por uma forma de transporte mais eficiente é uma preocupação constante no setor ferroviário. A existência de uma variedade de trabalhos que aprofundam o tema da otimização das viagens ferroviárias é uma mais-valia. Múltiplos conceitos são comuns a todos eles, portanto o estudo das diferentes metodologias usadas para a otimização de viagens na ferrovia, permite adquirir conhecimentos importantes para o desenvolvimento de uma nova metodologia, que ofereça uma contribuição para a evolução do setor.

Em (Açikbaş & Söylemez, 2008) é estudada a otimização das viagens ferroviárias através de perfis de velocidades caracterizados por múltiplos regimes de deriva precedidos de momentos de aceleração. Antes da otimização começar é definido um intervalo fora do qual não são permitidos regimes de deriva. Não são admitidos momentos de deriva durante a travagem e o comboio também não pode iniciar regimes de deriva até que atinja uma determinada velocidade previamente definida. Os autores recorrem aos algoritmos genéticos para gerar soluções com informações sobre onde são iniciadas as fases de deriva. Pretende-se minimizar uma função objetivo, que é dada pela soma dos valores do consumo energético e da duração da viagem normalizados. As soluções geradas são introduzidas numa rede neuronal artificial que calcula a energia consumida e o tempo de viagem. Através da função objetivo é conhecida a aptidão de cada solução. As redes neuronais permitem a obtenção dos outputs em milissegundos, isto é uma vantagem relativamente à utilização de múltiplas simulações que levam mais tempo. Quando o processo evolutivo termina é revelada a melhor solução.

Em (Wong & Ho, 2004) também são estudados perfis de condução com um ou dois regimes de deriva associados dependendo do comprimento do trajeto. Neste trabalho foram utilizados os algoritmos genéticos como ferramenta de otimização. Para avaliar cada solução é utilizada uma função objetivo que se pretende minimizar. Esta função consiste na soma dos valores do gasto energético e do tempo de viagem normalizados. Antes do processo de otimização é sempre necessário definir se são pretendidos um ou dois regimes de deriva. A escolha do número de regimes de deriva deve ser feita pelo operador, para que se cumpra o horário estabelecido. A viagem começa com o regime de aceleração e termina com a travagem. Durante as fases de deriva caso o comboio desça de uma determinada velocidade estabelecida, este pode voltar a acelerar de modo a não parar antes da estação destino. Para ser possível avaliar cada solução, foi criado um simulador em Visual Basic (VB) que permite simular viagens singulares entre estações consecutivas. Esta ferramenta garante o cálculo do custo energético e da duração da viagem para cada solução. No fim do processo iterativo levado a cabo pelos genéticos, obtém-se a melhor solução encontrada.

Em (Manuel Afonso da Rocha et al., 2020; Rocha et al., 2018) é utilizado um algoritmo baseado em simulated annealing para gerar aleatoriamente soluções constituídas por valores das velocidades de cruzeiro e de início de travagem. O objetivo é minimizar o consumo energético respeitando um determinado horário estabelecido. Para cada solução, utilizando a força máxima de tração no regime de aceleração e a força máxima no processo de travagem, o simulador do movimento do comboio constrói um perfil de velocidades sem restrições de velocidade e sem declives no trajeto, todavia atendendo à velocidade de cruzeiro e de início

de travagem definidas pela solução. De seguida, este perfil de velocidades é atualizado a cada intervalo de tempo, conforme as restrições de velocidade e os declives do trajeto. O gasto energético, a duração da viagem e o perfil de velocidades serão devolvidos ao algoritmo de simulated annealing, que avaliará a solução testada. Caso o comboio chegue depois do horário, ou exceda os limites de velocidades estabelecidos, a solução é rejeitada. Se por outro lado estes fatores forem respeitados a solução será guardada. Depois de um determinado número de iterações o processo termina e o algoritmo revela a melhor solução encontrada, juntamente com o respetivo o perfil de velocidades.

Em (Huang et al., 2015) é apresentado outro exemplo do uso dos algoritmos genéticos, onde se pretende minimizar uma função objetivo que corresponde ao consumo energético da viagem. As viagens estudadas são compostas por estações intermédias, contudo o algoritmo desenvolvido calcula o consumo energético e a duração para cada deslocação entre duas estações consecutivas. A procura pela melhor solução é feita através de algoritmos genéticos de multipopulação. Este método permite resolver problemas com vários mínimos locais reduzindo a probabilidade de o algoritmo ficar preso num destes valores, acabando por não encontrar a melhor solução globalmente. O modelo de condução adotado passa pela utilização de apenas três regimes de condução: a aceleração, a deriva e a travagem. A aceleração e a travagem são realizadas à força máxima disponibilizada pelo veículo. Cada deslocação entre duas estações consecutivas é dividida em n secções. Cada secção tem de ser suficientemente pequena para permitir que apenas seja aplicado um só regime de condução por secção. Para garantir o conforto dos passageiros o regime de aceleração e de travagem nunca podem ocorrer consecutivamente. Entre duas estações consecutivas, o primeiro regime de condução é sempre a aceleração e o último a travagem. As soluções geradas pelos algoritmos genéticos são definidas pelo conjunto das sequências dos regimes de condução a adotar para cada troço (ligação entre estações consecutivas). É estabelecido um tempo mínimo e máximo para as deslocações em cada troço. Para que uma solução seja válida, os tempos de todas as deslocações entre estações consecutivas que constituem a viagem, têm de estar contidos entre os valores máximos e mínimos impostos para os troços respetivos. A melhor solução encontrada coincide com o valor mais baixo de consumo energético obtido através do somatório dos gastos energéticos de todos os troços da viagem. Por outras palavras, a melhor solução reflete a viagem mais eficiente do ponto de vista energético que respeita os horários estabelecidos.

Outra abordagem ao problema da otimização das viagens ferroviária é exposta no trabalho (Chang & Sim, 1997). Os autores propõem uma solução gerada a partir de múltiplos regimes de deriva intercalados com períodos de aceleração, sendo que a viagem termina com

um período de travagem. A otimização é realizada com recurso ao uso de algoritmos genéticos. Cada cromossoma é representante de uma solução para o problema e é constituído por vários genes que correspondem aos pontos onde começam e terminam os períodos de deriva. O gene associado à posição mais próxima da estação destino corresponde ao início do período de travagem. As soluções encontradas pelos genéticos são condicionadas pelos horários estabelecidos e pela energia consumida, uma vez que a função objetivo relaciona estes dois fatores. É através de simulações que cada indivíduo é avaliado quanto à sua aptidão, permitindo assim que os algoritmos genéticos otimizem a viagem.

O trabalho (Chevrier et al., 2013) é um exemplo do uso de um algoritmo evolucionário multiobjectivo para a otimização da ferrovia. Os autores pretendem minimizar duas funções objetivo: a duração da viagem e a energia consumida. Para isto os autores dividem o trajeto a percorrer em várias secções. Cada secção é dividida em duas partes. Para cada secção são definidas duas velocidades alvo, uma para cada parte, o comboio tem de atingir de atingir estas velocidades nas respetivas partes. A velocidade alvo da primeira parte da secção é sempre maior ou igual à velocidade da segunda parte. Para a primeira parte o comboio pode acelerar à força máxima ou travar para atingir a velocidade alvo. Quanto à segunda parte, o comboio tem de atingir outra velocidade alvo, dependendo desta a sequência de regimes que se seguem pode variar. Inicialmente o comboio entra numa fase de deriva, de seguida o comboio poderá ter de travar para atingir a velocidade alvo. Caso necessário, um período de manutenção será adicionado para que o veículo ferroviário mantenha a velocidade até ao fim da secção. Cada solução para o problema estabelece as velocidades alvo para todas as secções definidas. Neste trabalho, foi implementado um mecanismo que permitiu simular as viagens e assim determinar a aptidão de cada solução. A atribuição da aptidão de uma solução tem em conta a minimização de ambas as funções objetivo em simultâneo. Assim, o algoritmo evolucionário multiobjectivo tem ao seu dispor todos os meios necessários para realizar a otimização.

A presente dissertação, apesar de partilhar com outros trabalhos o objetivo de otimizar viagens ferroviárias, apresenta características que a diferenciam em parte de cada trabalho já publicado. Como em outros trabalhos, os algoritmos genéticos são usados como uma metodologia de otimização. Porém, a determinação de quatro variáveis de controlo que correspondem a posições de transição entre regimes e a imposição de um modelo de condução onde existe uma sequência obrigatória dos quatro regimes de condução (aceleração, manutenção, deriva e travagem), são aspetos inovadores. Muitos dos trabalhos relacionados com o tema da otimização das viagens ferroviárias, realizam otimizações do binómio energia-tempo ou

pretendem minimizar a função objetivo correspondente ao consumo energético da viagem, definindo um tempo de viagem máximo acima do qual nenhuma solução é válida. Por outro lado, a ferramenta de otimização desenvolvida neste trabalho dispõe de três tipos de otimização:

- Otimização do consumo energético;
- Otimização do tempo de viagem;
- Otimização do binómio energia-tempo.

A otimização do consumo energético procura a viagem mais eficiente energeticamente, enquanto a otimização do tempo de viagem localiza a viagem mais rápida, para um determinado percurso e um determinado veículo ferroviário. Tendo em conta que a minimização do tempo de viagem e a minimização do consumo energético são objetivos antagónicos, foi ainda implementada uma otimização do binómio energia-tempo cuja função custo, que avalia as soluções, relaciona a duração da viagem com o consumo energético da mesma. Este tipo de otimização permite ainda atribuir pesos diferentes às variáveis da função custo, possibilitando aos utilizadores ajustarem o modo de otimização de acordo com as suas preferências. Com o objetivo de testar a ferramenta desenvolvida, foram otimizadas viagens na linha de Sintra e na linha de Cascais. Os perfis de elevação dos trajetos otimizados são bastante diferentes entre eles, assim foi possível demonstrar o funcionamento da ferramenta de otimização para cenários diferentes.

DINÂMICA DO MOVIMENTO FERROVIÁRIO

No presente capítulo é estudado o movimento de um veículo ferroviário. Serão analisadas todas as forças que influenciam a dinâmica do comboio e os diferentes regimes de condução que este pode adotar.

3.1 Resultante das forças

Para o desenvolvimento da ferramenta de otimização, é necessário um estudo da dinâmica do veículo ferroviário. A equação 1 demonstra como se calcula a resultante das forças, F_r , que atuam sobre um comboio quando este se desloca. F_{in} corresponde à força de tração fornecida pelos motores, enquanto F_{ex} representa as forças exteriores ao comboio.

$$F_r = F_{in} - F_{ex} \quad (1)$$

Neste estudo admitir-se-á que:

- Os n motores do comboio são iguais;
- Todos geram o mesmo esforço de tração;
- O coeficiente de aderência é igual para todas as rodas;
- Todas as rodas apresentam o mesmo diâmetro.

Os motores do comboio podem produzir tração, ou podem funcionar em modo de travagem.

As forças externas ao comboio podem-se dividir em dois grupos:

- Forças derivadas do perfil da linha;
- Forças de atrito.

As forças de atrito não dependem das características do trajeto, estão sempre presentes. O atrito engloba as resistências resultantes da interação roda-carril, as resistências aerodinâmicas e as forças de arranque. As forças derivadas do perfil da linha são forças originadas por planos inclinados e por curvas no trajeto. Porém, as curvas não serão consideradas para o cálculo das forças externas. A equação 2 expressa novamente a resultante das forças, evidenciando as diferentes forças de atrito F_a e as forças derivadas de planos inclinados F_d , que pertencem ao conjunto das forças externas.

$$Fr = Fin - (Fa + Fd) \quad (2)$$

Pela segunda lei de Newton, representada na equação 3, tem-se que a força resultante que é aplicada num corpo de massa m , é proporcional ao produto da sua massa pela aceleração, a , obtida pelo mesmo. Neste estudo, a massa de um veículo ferroviário será considerada constante, logo quando a resultante for diferente de zero existirá uma aceleração associada ao próprio.

$$Fr = m \cdot a \quad (3)$$

3.2 Forças de atrito

As forças de atrito englobam diversas forças com diferentes origens que se tentam opor ao movimento do comboio. Com os objetivos da presente dissertação em mente, é importante estudar cada uma destas forças e quantificar o impacto que têm nas viagens ferroviárias.

3.2.1 Resistências do rolamento das rodas sobre os carris

A interação roda-carril que caracteriza a movimentação de veículos na ferrovia é bastante particular. A área de contacto entre estes dois elementos é de apenas cerca de 1 cm^2 (Manuel & Caldeira Martins, 2010). Este facto e a grande massa do comboio provocam deformações nos materiais que originam uma penetração das rodas nos carris (Nuno et al., 2014). A interface entre as rodas do comboio e os carris é bastante eficiente, pois as perdas no contacto são bastante reduzidas. Porém, a passagem do veículo por qualquer zona do trajeto é um fenómeno irreversível. Durante uma viagem, é inevitável a ocorrência de oscilações verticais, laterais e longitudinais. A reduzida área de contacto e o facto de as rodas serem solidárias

com o eixo são fatores que contribuem para os movimentos oscilatórios. Os mesmos participam no desgaste da via que resultará numa progressiva fadiga dos metais das superfícies de contacto. A fricção liberta pequenas partículas metálicas, conseqüentemente surgirão irregularidades nas rodas e nos carris. Quanto maior for o estado de degradação dos carris, maior a quantidade de irregularidades nos mesmos, o que impõe um aumento do atrito e assim uma redução da eficiência. O rolar das rodas sobre carris causa por si só forças resistentes ao movimento, sendo que o estado da via tem um impacto direto na intensidade dessas forças. Irregularidades vão agravar as oscilações e a resistência ao movimento, deste modo, quanto mais homogêneo for o carril, menor a resistência oferecida ao movimento. Em casos severos de desgaste podem ocorrer fraturas. É, portanto, necessário a devida manutenção da composição ferroviária para que os inevitáveis danos sejam monitorizados e reparados. A Figura 2 ilustra a interação roda-carril.

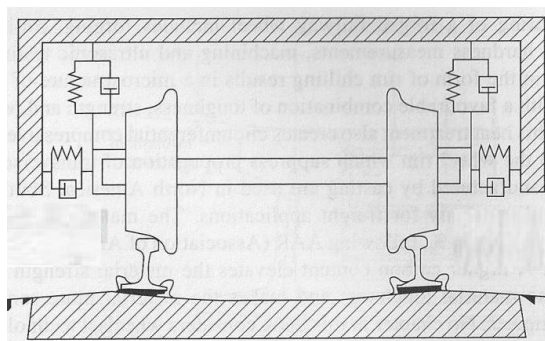


Figura 2 - Contacto roda-carril (Paulo, 2006).

3.2.2 Forças de arranque

Quando o comboio se encontra em repouso e pretende iniciar marcha, intervêm forças que se tentam opor ao movimento do mesmo, chamadas forças de arranque. Estas forças surgem devido ao facto de os rolamentos não se encontrarem totalmente lubrificados numa fase inicial. Conseqüentemente o maior nível de atrito no arranque implica uma ligeira resistência ao movimento. A quantidade de resistência oferecida é influenciada pelo tempo de paragem antes do arranque e pelas condições de temperatura (Paulo, 2006). Estas forças apenas estão presentes a velocidades muito reduzidas e tomam valores também eles baixos, pelo que não serão consideradas para efeitos de cálculo.

3.2.3 Resistências aerodinâmicas

Quando um veículo se move está sempre sujeito ao atrito provocado pelo ar. As forças resultantes das resistências aerodinâmicas têm a mesma direção, mas o sentido contrário ao do vetor velocidade. A resistência aerodinâmica depende da área frontal, da forma, do comprimento e dos espaçamentos entre carruagens do comboio. Esta força de atrito faz-se notar mais a velocidades mais altas, ou seja, quanto maior a velocidade maior será a força resistiva. Por estes motivos a aerodinâmica dos comboios é fundamental para a eficiência do sistema ferroviário (Coals to Newcastle, 2017).

3.2.4 Cálculo resistência específica ao movimento

Com o objetivo de calcular a resistência específica ao movimento causada pelas forças de atrito referidas anteriormente (à exceção das forças de arranque), foram realizados inúmeros testes experimentais através dos quais foram desenvolvidas fórmulas que permitem o cálculo deste fenómeno. Um dos estudos feitos para determinar o cálculo da resistência específica ao movimento resultou na elaboração das chamadas fórmulas de Davis. Em 1926, William J. Davis com base nas fórmulas de Schmidt divulgou a obra "*The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars*" onde expõe a sua solução para o cálculo da resistência específica ao movimento em veículos ferroviários (Coals to Newcastle, 2017; William J. Davis, 1926). A equação de Davis expressa abaixo (equação 4), permite o cálculo da resistência específica ao movimento através de uma função polinomial (Downer, 2016; Paulo, 2006).

$$R = A + Bv + Cv^2 [kg_f / t] \quad (4)$$

Os coeficientes A e B representam resistências mecânicas, tanto que a velocidades baixas a resistência específica é na sua maioria dependente da massa do comboio. O coeficiente C depende da aerodinâmica do comboio, quanto melhor a aerodinâmica do mesmo menor o valor do coeficiente e vice-versa. Com o aumento da velocidade notar-se-á um crescimento notável do valor do termo Cv^2 , pois este é o representante das resistências aerodinâmicas, que são tanto maiores quanto maior for o valor da velocidade a que o veículo ferroviário circula. Deste modo, a velocidades mais baixas a resistência específica provém na sua maioria das resistências mecânicas, já a velocidades mais altas ter-se-á uma fatia maior do valor total proveniente das resistências aerodinâmicas (Boschetti & Mariscotti, 2012). A Tabela 3 exhibe os

valores dos coeficientes A, B e C que constituem as fórmulas de Davis. Pe representa o peso por eixo, n o número de eixos e Af a área frontal do veículo.

Tabela 3 – Tabela dos coeficientes A, B e C.

	FÓRMULAS DE DAVIS		
	A	B	C
Locomotiva	$0,65+13,15/Pe$	$9,32 \times 10^{-3}$	$\frac{4,56 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$
Carruagem motora	$0,65+13,15/Pe$	28×10^{-3}	$\frac{4,56 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$
Reboque dianteiro	$0,65+13,15/Pe$	$14,05 \times 10^{-3}$	$\frac{4,56 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$
Reboque traseiro	$0,65+13,15/Pe$	$14,05 \times 10^{-3}$	$\frac{0,645 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$
Carruagem (passageiros)	$0,65+13,15/Pe$	$9,32 \times 10^{-3}$	$\frac{0,645 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$
Vagão (carga) com bogis	$0,65+13,15/Pe$	$14,05 \times 10^{-3}$	$\frac{0,945 \times 10^{-3} \cdot Af}{n \cdot Pe}$

3.3 Forças derivadas do perfil da linha

3.3.1 Forças nas curvas

Para que um corpo descreva uma curva com sucesso é necessário a intervenção de uma força centrípeta F_c . No caso da ferrovia as curvas geralmente têm uma inclinação com o intuito de produzir esta força. Quando as curvas não possuem inclinação a força centrípeta é proporcionada por uma força lateral que os carris exercem sobre as rodas. Este fenómeno não é exclusivo dos veículos ferroviários, nas estradas é comum existir uma ligeira inclinação nas curvas para auxiliar os carros durante este processo. O declive mencionado permite que o peso dos carros contribua para o sucesso da realização da curva (Alonso & Finn, 1992). O peso divide-se em duas componentes, uma no plano horizontal W_x e outra no plano vertical W_y . Devido à

inclinação, W_x irá atuar como uma força centrípeta. A equação 5 permite o cálculo da força centrípeta conhecendo a massa do corpo m , a velocidade a que circula v e o raio da curva r .

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (5)$$

A Figura 3 apresenta as forças que atuam sobre um veículo ferroviário quando este descreve uma curva.

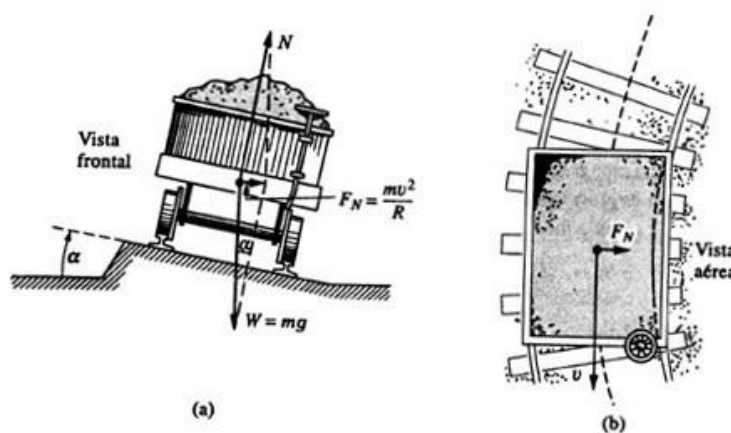


Figura 3 - Forças intervenientes nas curvas (Alonso & Finn, 1992).

Durante a execução de uma curva a resultante das forças terá de ser igual à força centrípeta. Sabe-se que a força centrípeta necessária para que a realização da mesma seja possível, é dada pela soma de W_x com a força lateral que o carril exerce sobre a roda, F_{carril} , como expresso na equação 6.

$$F_c = W_x + F_{carril} \quad (6)$$

Quando a inclinação não é suficiente para que W_x iguale a força centrípeta necessária, entra em ação uma força lateral do carril sobre a roda com a direção do centro da curva. Caso não exista esta inclinação, a força centrípeta provém toda da força que o carril exerce sobre a roda. Por este motivo, geralmente existe um ligeiro declive nas curvas, com o intuito de não aplicar tanta força sobre os carris e as rodas. A equação 7 expõe o cálculo da força centrípeta em curvas sem declives na ferrovia.

$$W_x = 0 \Rightarrow F_c = F_{carril} \quad (7)$$

As rodas dos comboios são solidárias com o veio, não possuem diferencial, portanto os seus centros de massa circulam à mesma velocidade. Para que se realize uma curva, as rodas interiores e exteriores têm de ter a mesma velocidade angular. Como as rodas exteriores percorrem uma maior distância, ocorre um deslizamento das mesmas de modo que isto se verifique (Toledo, 1988). A introdução do formato cónico das rodas ajudou a diminuir o deslizamento, pois durante uma curva as rodas exteriores vão rodar sobre diâmetros maiores do que as rodas interiores (H. Parodi, 1935; Paulo, 2006). Isto ocorre porque a força centrípeta empurra o comboio para fora da curva. A Figura 4 ilustra o comportamento das rodas de um veículo ferroviário durante a realização de uma curva.

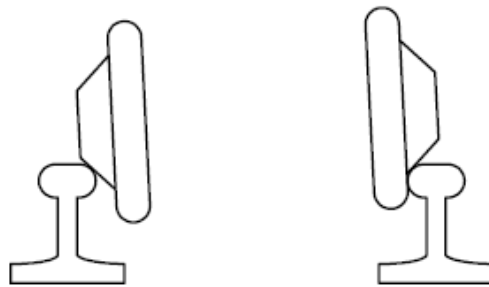


Figura 4 - Comportamento das rodas numa curva (Paulo, 2006).

A solidariedade das rodas, o paralelismo dos eixos e a ação da força centrípeta são responsáveis pela resistência ao movimento existente durante a realização de curvas. Foram realizados estudos acerca das resistências que atuam sobre os comboios em cenários de curvas, o que culminou no desenvolvimento de fórmulas empíricas que permitem a obtenção do valor da resistência específica ao movimento para estes casos. Estas fórmulas constituem formas aproximadas de representar a realidade. O cálculo da resistência específica ao movimento R_c durante a realização de uma curva de raio r , numa linha com um comprimento de bitola b , pode ser realizado através da fórmula de Desdouits exibida na equação 8.

$$R_c = \frac{500 \cdot b}{r} [kg_f/t] \quad (8)$$

Outra forma de obter R_c é através da fórmula de Meitzner, apresentada na equação 9. Para este método, basta conhecer o raio da curva para a realização do cálculo.

$$R_c = \frac{800 - 0,4 \cdot r}{r - 40} [kg_f/t] \quad (9)$$

A fórmula de Röckl dada pela Tabela 4, também pode ser usada para a obtenção da resistência específica ao movimento numa curva.

Tabela 4 - Fórmula de Röckl.

Fórmula de Röckl			
	$R_c [kg_f/t]$		
b = 1,00 m	$\frac{400}{r-20}$		
b = 1,44 m	r < 250 m	250 < r < 350 m	r > 350 m
	$\frac{500}{r-30}$	$\frac{530}{r-35}$	$\frac{650}{r-35}$

3.3.2 Forças causadas por declives

Nem todos os trajetos na ferrovia são planos, por este motivo é necessário estudar como os declives impactam a movimentação do comboio. Todos os declives têm um certo ângulo que corresponde a uma determinada inclinação. Num plano inclinado existe sempre a influência do peso W , mais especificamente da sua componente horizontal W_x . O módulo de W_x depende da massa do veículo e do ângulo α que a rampa faz com a horizontal, como se pode constatar na equação abaixo.

$$W_x = W \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (10)$$

Quanto maior a massa do corpo que se movimenta num plano inclinado, maior o módulo de W_x . O mesmo se dá para a inclinação da rampa, quanto maior a inclinação da mesma, maior será o módulo de W_x . Caso um veículo se encontre a subir uma rampa e pretenda aumentar

ou manter o módulo da sua velocidade, terá de gerar uma força de tração F_t suficientemente intensa para igualar ou vencer esta força somada ao conjunto das forças de atrito. Se por outro lado, o veículo se encontrar a descer uma rampa, W_x auxilia o movimento. A Figura 5 ilustra o movimento de um veículo num plano inclinado ascendente.

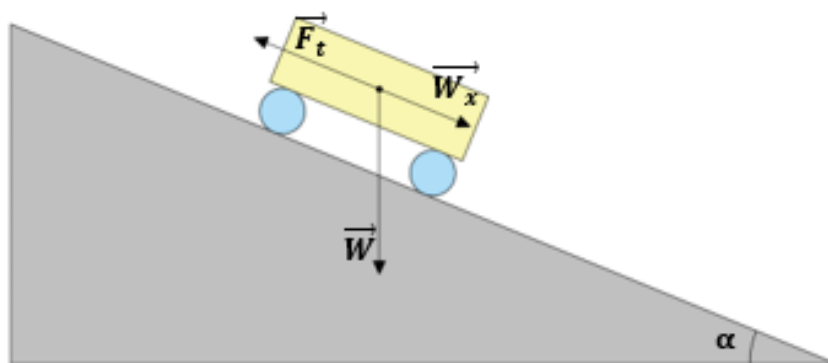


Figura 5 – Movimento em plano inclinado.

Planos inclinados ascendentes introduzem resistência ao movimento do comboio, planos inclinados descendentes aplicam uma força com o sentido e direção do vetor velocidade, auxiliando o movimento. Como na operação ferroviária os comboios têm massas bastante significativas, a força gravítica que é exercida sobre os mesmos toma valores muito elevados. Os declives não devem ser acentuados porque exigiriam enormes forças de tração para que fosse possível a realização de subidas de rampas. Por outro lado, descidas íngremes exigiriam grandes forças de travagem e em caso de falha mecânica poderiam ocorrer graves acidentes.

3.4 Regimes de condução

3.4.1 Considerações iniciais

Uma deslocação de um comboio entre duas estações é sempre caracterizada por uma sequência de regimes de condução. Existem quatro regimes de condução: a aceleração, a manutenção, a deriva e a travagem. A ordem e o número de vezes que cada regime de condução é aplicado varia consoante o modelo de condução aplicado para determinada viagem. A presente dissertação aborda viagens onde é adotado um modelo de condução definido por uma sequência de regimes de condução iniciada pela aceleração, seguida da manutenção, deriva e por último, com a aproximação da estação destino, dá-se a travagem (Ver Figura 6).

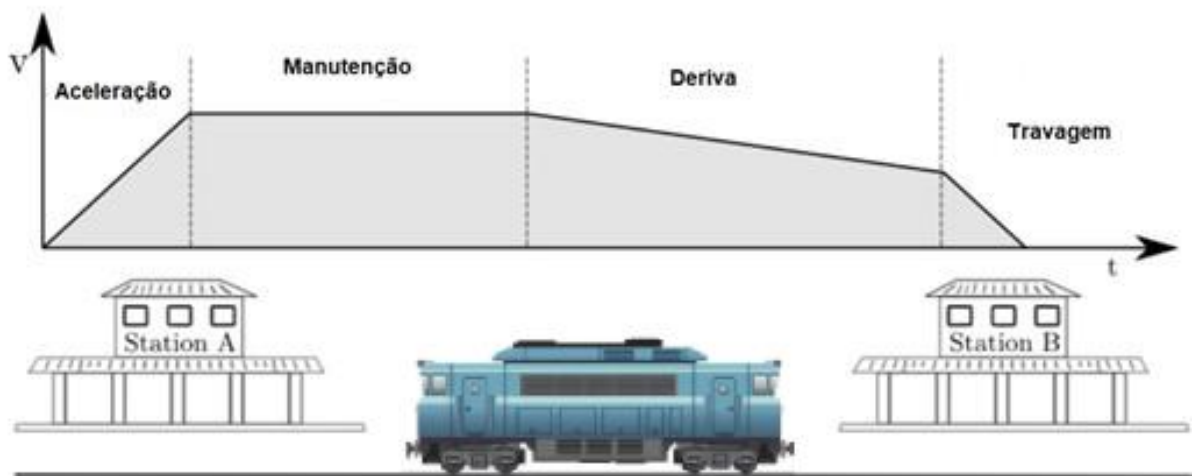


Figura 6 - Modelo de condução (Adaptado de Rocha et al., 2018).

3.4.2 Aceleração

A aceleração é o regime condução que inicia a marcha e dependendo do modelo de condução adotado, pode ser aplicada mais que uma vez numa viagem entre duas estações. Este regime de condução é caracterizado por um aumento da velocidade do comboio, os motores das locomotivas/automotoras geram tração suficiente para que as forças exteriores ao comboio sejam superadas, concedendo ao mesmo um valor de aceleração positivo. No regime de aceleração tem-se que:

$$F_{in} > F_{ex} \quad (11)$$

A aceleração é caracterizada por grandes gastos energéticos, visto que para os motores produzirem força de tração também necessitam de consumir energia. Otimizações de consumos energéticos geralmente não obter soluções com regimes de aceleração mais curtos, enquanto otimizações do tempo de viagem vão resultar em soluções com períodos de aceleração mais prolongados.

3.4.3 Manutenção

O regime de manutenção é caracterizado pela manutenção da velocidade do veículo ferroviário. Para que isto seja possível, é necessário que a força de tração produzida iguale as forças exteriores ao comboio. Os esforços dos motores anulam estas forças, a aceleração é nula e estamos na presença de um movimento de velocidade constante, como demonstrado

na equação 12. Este regime de condução tem associado a si um gasto energético, uma vez que os motores produzem força de tração.

$$\begin{aligned} |F_{in}| = |F_{ex}| &\implies Fr = 0 \\ \text{logo, } a &= 0 \end{aligned} \tag{12}$$

3.4.4 Deriva

Na fase de deriva, inicia-se o processo de desaceleração natural. Os motores deixam de gerar força de tração e o comboio irá perder velocidade por força das resistências que atuam sobre o mesmo. Como não é produzida tração, a resultante das forças será igual às forças exteriores ao comboio, o que na maioria dos cenários implica uma aceleração negativa, consequentemente, a velocidade irá diminuir (ver equação 13).

$$\begin{aligned} F_{in} = 0 &\implies Fr = -F_{ex} \\ \text{logo, } a &< 0 \end{aligned} \tag{13}$$

O processo de deriva está associado a um consumo nulo de energia, o que é vantajoso para quando se pretende poupar energia. Por outro lado, apesar da sua eficiência energética, este regime de condução implica aumentos na duração das viagens. Em percursos urbanos e suburbanos entre estações consecutivas, as durações das fases de deriva podem representar uma percentagem significativa do total da viagem, a correta definição do regime de deriva neste tipo de viagens resulta em poupanças consideráveis de energia.

3.4.5 Travagem

O regime de condução que geralmente termina a viagem é a travagem. Neste regime os motores do comboio passam a funcionar em modo de travagem, o que implica $F_{in} < 0$, permitindo um decréscimo mais rápido da velocidade (equação 14).

$$\begin{aligned} F_{in} < 0 &\implies Fr < 0 \\ \text{logo, } a &< 0 \end{aligned} \tag{14}$$

3.5 Consumo energético

A energia que um comboio consome a cada momento durante o decorrer de uma viagem depende da força de tração gerada pelos motores. É evidente que os gastos energéticos serão tanto maiores quanto maior o esforço de tração desenvolvido durante a viagem. A aceleração e a manutenção são os regimes de condução onde se consome energia com o objetivo de gerar tração. A deriva e a travagem não acarretam gastos energéticos, o processo de travagem permite ainda a recuperação de energia com o recurso à travagem regenerativa. As características do trajeto também influenciam o consumo, a subida de um plano inclinado por parte de um comboio durante um regime de aceleração ou de manutenção, será uma situação onde a exigência é maior do ponto de vista dos motores, quando comparando com um perfil plano para o mesmo regime de condução. Contudo, quando um comboio desce uma rampa a força gravítica ajuda ao movimento, reduzindo o esforço que os motores necessitam de realizar para manter ou aumentar a velocidade do mesmo. Conclui-se que o consumo energético é bastante afetado pelo perfil de elevação do trajeto.

O estudo da presente dissertação incide sobre a potência mecânica desenvolvida pelas locomotivas, pelo que quando são mencionados os conceitos de potência e de consumo energético são referentes a potência mecânica e energia mecânica. A potência P desenvolvida por uma locomotiva a cada momento, é dada pelo produto das forças internas pela velocidade instantânea, como exibido na equação 15.

$$P = F \cdot v \quad (15)$$

Conhecendo os valores da potência aplicada a cada instante da viagem será possível então concluir acerca do consumo energético da viagem:

$$E = \int P \, dt \quad (16)$$

FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

O capítulo 4 consiste na clarificação da estrutura e do modo como a ferramenta de otimização foi implementada. A ferramenta de otimização é composta por módulos funcionais com funções específicas atribuídas. Será explicado o papel de cada módulo no processo de procura de soluções.

4.1 Visão geral da ferramenta de otimização

A ferramenta de otimização implementada permite aplicar vários tipos de otimizações a viagens ferroviárias. São disponibilizadas otimizações do tempo de viagem, otimizações do consumo energético e otimizações combinadas de ambas as anteriores. Para cada uma destas, ao serem inseridos os dados da linha e do veículo ferroviário cuja viagem se pretende otimizar, a ferramenta de otimização devolve o perfil de velocidades correspondente à melhor solução encontrada. A Figura 7 apresenta a arquitetura de alto nível da ferramenta de otimização.

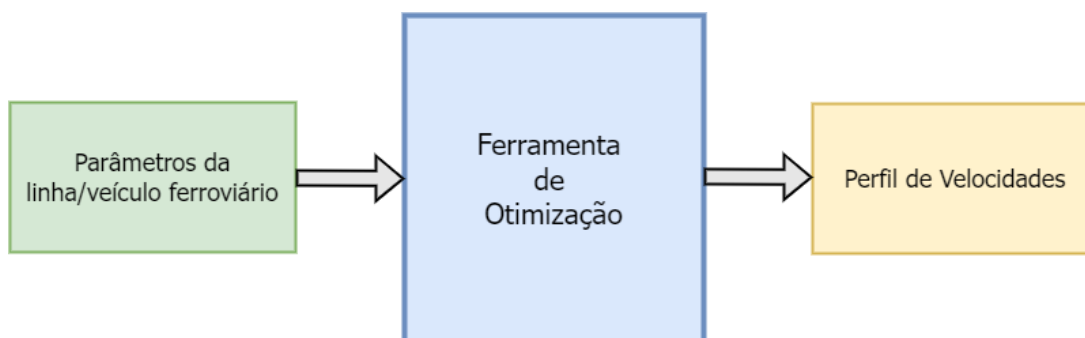


Figura 7 - Arquitetura da Ferramenta de otimização.

4.2 Modelo de condução adotado

Na presente dissertação, estabeleceu-se que seriam estudadas e otimizadas viagens entre duas estações, onde o movimento do comboio se rege pelo seguinte modelo de condução:

1. De início, é aplicado o regime de aceleração desde que o comboio parte da estação inicial, até que a velocidade de cruzeiro é atingida. Durante a aceleração é utilizada a força de tração máxima disponibilizada pelos motores do comboio.
2. No momento em que é atingida a velocidade de cruzeiro, inicia-se o processo de manutenção dessa mesma velocidade.
3. Com a aproximação da estação destino, é executado o regime de deriva, onde o comboio que circula à velocidade de cruzeiro inicia o processo de desaceleração natural.
4. A viagem termina com o regime de travagem. A força de travagem será constante ao longo do processo. No fim da travagem o comboio chega à estação destino

A Figura 8 apresenta o modelo adotado pela ferramenta de otimização.

4.3 Funcionamento da ferramenta de otimização

4.3.1 Elemento fundamental

O elemento mais importante da ferramenta de otimização são as soluções. Cada solução é composta por três variáveis: X_1 , X_2 e X_3 . Cada variável corresponde a um valor real que representa uma posição onde ocorre uma alteração de regime de condução:

- X_1 corresponde à posição onde o comboio termina o regime de aceleração e inicia o processo de manutenção de velocidade.
- X_2 corresponde à posição onde o comboio inicia o regime de deriva;

- X3 corresponde à posição onde o comboio inicia a travagem.

Durante cada otimização realizada pelo algoritmo são geradas inúmeras soluções, onde cada uma corresponde a uma viagem entre duas estações para um determinado veículo ferroviário e um determinado trajeto. A melhor solução descoberta pelo algoritmo respeitará sempre o modelo de condução representado na Figura 8. Soluções geradas que não respeitem o modelo imposto não serão consideradas.

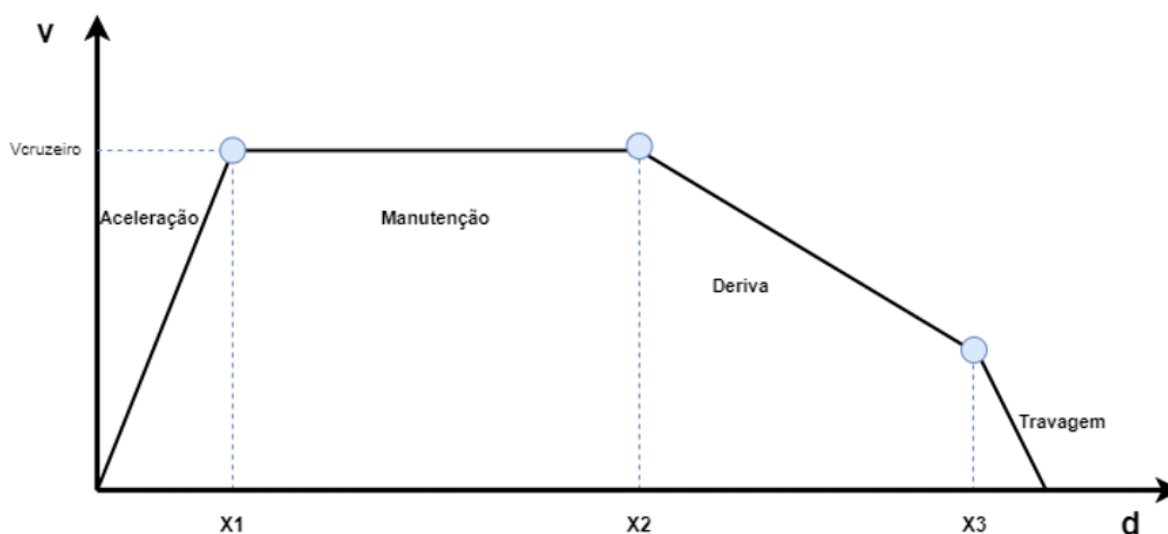


Figura 8 - Modelo de condução adotado.

4.3.2 Estrutura da ferramenta de otimização

A ferramenta de otimização desenvolvida é caracterizada por quatro módulos funcionais que comunicam entre si:

- Módulo de Parâmetros;
- Módulo de Simulação Dinâmica;
- Módulo de Cálculo Energético;
- Módulo Evolutivo.

O módulo de parâmetros integra as informações referentes às características do percurso entre as duas estações, como os dados de distâncias e elevações do trajeto. Este módulo também contém dados relativos às características do veículo ferroviário, como a velocidade máxima, o poder de tração da locomotiva, o tipo de carruagens/vagões que o constituem, área frontal dos seus constituintes, de entre outros parâmetros. O módulo evolutivo desempenha o papel fundamental de coordenar todo o sistema e de aplicar os algoritmos genéticos. O

conjunto do módulo de simulação dinâmica e do módulo de cálculo energético formam um simulador ao qual o módulo evolutivo recorre cada vez que necessita de avaliar uma solução quanto à sua aptidão. O módulo de simulação dinâmica simula o movimento do comboio, enquanto o módulo de cálculo energético calcula o consumo energético da viagem através dos dados da simulação. Após o envio de cada solução para o simulador, o módulo evolutivo aguarda até que estas sejam processadas pelos módulos de simulação dinâmica e de cálculo energético e interpreta os resultados. O processo iterativo implementado na forma dos algoritmos genéticos, permite que no fim do mesmo seja encontrada uma solução sub-ótima (ou ótima) para o problema de otimização.

Numa primeira fase, as informações do módulo de parâmetros são carregadas para o módulo de simulação dinâmica e para o módulo evolutivo. O módulo de simulação dinâmica ao ter acesso às informações do trajeto e do veículo ferroviário, está preparado para receber soluções enviadas pelo módulo evolutivo. Para cada solução recebida, o simulador irá construir o perfil de velocidades correspondente, que lhe permite calcular o custo energético da viagem e enviá-lo juntamente com o tempo de viagem da mesma de volta para o módulo evolutivo. Os valores do consumo energético e da duração da viagem viabilizam a classificação das soluções. Dependendo do tipo de otimização, é atribuído um valor de custo a cada solução. Quanto melhor o valor de custo, maior será a proximidade da solução ao ótimo global. O processo iterativo termina após um determinado número de iterações ser atingido, ou quando a melhor solução encontrada até ao momento não tenha sofrido alterações durante um número definido de iterações. Cabe ao utilizador parametrizar estes valores consoante o seu problema. No fim do processo, obtém-se a melhor solução encontrada para o problema de otimização. O fluxograma da ferramenta de otimização é apresentado pela Figura 9.

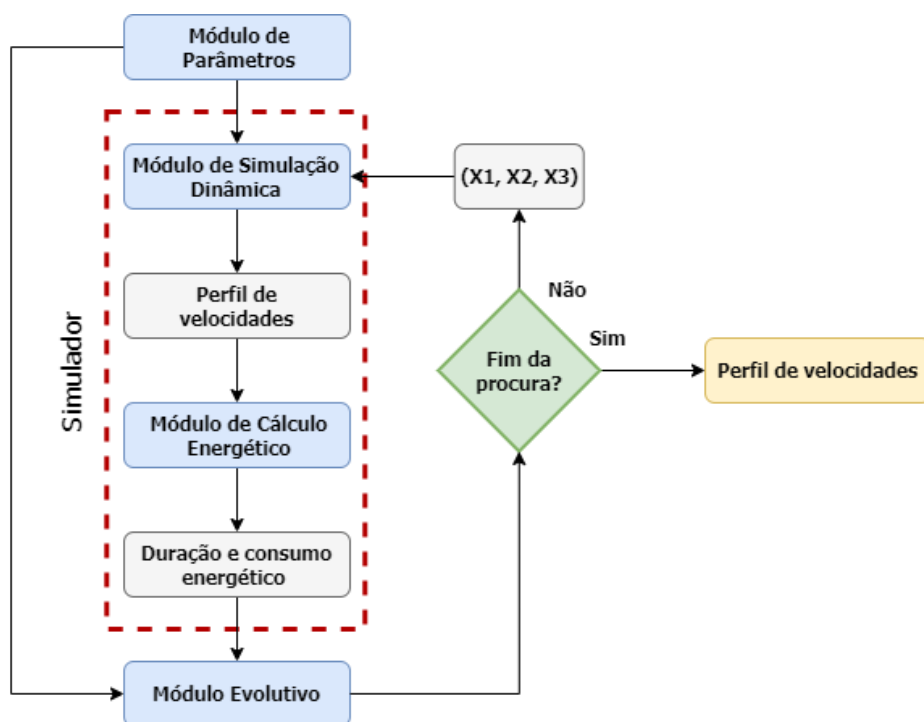


Figura 9 - Fluxograma da ferramenta de otimização.

4.4 Módulo de Parâmetros

Um dos pilares da ferramenta de otimização elaborada é o módulo de parâmetros. Este opera como uma estrutura de dados à qual o algoritmo acede para descarregar parâmetros indispensáveis ao funcionamento do módulo de simulação dinâmica e do módulo evolutivo. As variáveis que o módulo de parâmetros disponibiliza ao módulo de simulação dinâmica são:

- Massa da locomotiva;
- Massa dos vagões/carruagens;
- Número de vagões/carruagens;
- Área Frontal da locomotiva;
- Área frontal dos vagões/carruagens;
- Capacidade de tração da locomotiva;
- Força de travagem;
- Restrições de Velocidade;
- Distância do trajeto;
- Perfil topográfico do trajeto.

Para parametrizar os algoritmos genéticos, o módulo evolutivo recorre ao módulo de parâmetros para obter os seguintes dados:

- Tamanho da população;
- Número de gerações;
- Características da linha;
- Características do veículo ferroviário;
- Tipo de otimização (tempo, consumo, tempo/consumo).

4.5 Módulo de Simulação Dinâmica

O módulo de simulação dinâmica, como o nome indica, é responsável por simular as viagens ferroviárias tendo em conta os parâmetros que as influenciam. Para cada solução, este módulo, partindo dos valores de X1, X2 e X3, tem dados suficientes para definir onde começa e termina cada um dos quatro regimes de condução. A força de tração aplicada depende das locomotivas ou automotoras que constituem o comboio. A Figura 10 apresenta a capacidade de tração simplificada de um veículo ferroviário em função da velocidade:

- O segmento de reta AB define a força máxima aplicável;
- O segmento de reta CD define a velocidade máxima;
- A curva BC define o limite de potência da locomotiva.

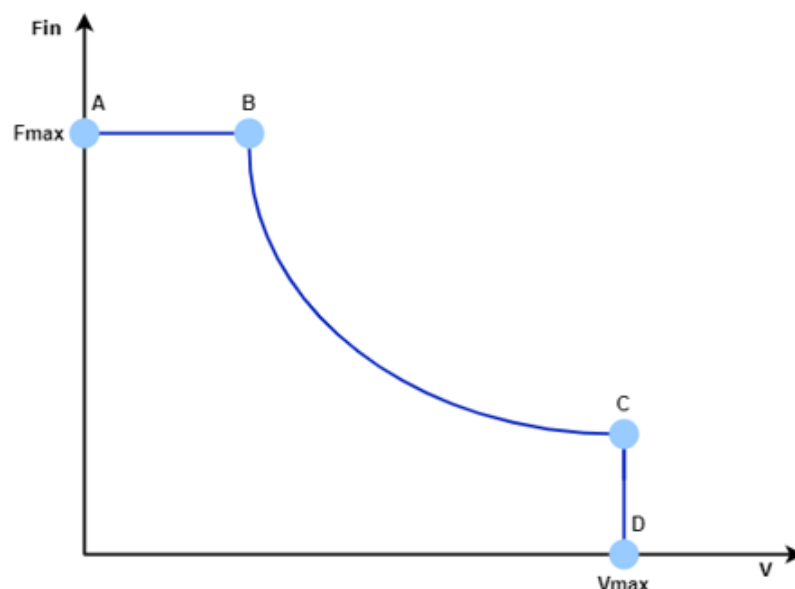


Figura 10 - Capacidade de tração.

O módulo de simulação dinâmica ao ter acesso às características do veículo ferroviário, às características do trajeto e às posições onde o comboio troca de regimes de condução, simula qualquer viagem que respeite o modelo definido. Este módulo calcula as forças internas

geradas pelos motores a cada momento da viagem. A força de tração a aplicar varia com o regime de condução em vigor e com as forças externas ao veículo, que também são calculadas durante toda a simulação. Estas forças estão associadas às resistências mecânicas, às resistências aerodinâmicas e à existência de rampas no trajeto. As forças de atrito são calculadas em todos os momentos da simulação através da fórmula de Davis expressa na equação 4. Os respectivos coeficientes são obtidos através das expressões dadas pela Tabela 3. O módulo de simulação dinâmica tem acesso ao perfil de elevação do trajeto a partir do momento em se inicia qualquer otimização. Com estes dados, o módulo calcula em cada instante as forças externas ao comboio. Ao serem conhecidas a força de tração e as forças externas a atuar sobre o comboio, sendo a massa do mesmo considerada constante, obtém-se a resultante das forças e assim pela segunda lei de Newton (equação 3) é calculada a aceleração em cada instante da simulação. A dinâmica do movimento é dada pelas equações 17 e 18.

$$v = \int a \, dt \quad (17)$$

$$d = \int v \, dt \quad (18)$$

A partir do cálculo da velocidade e da distância percorrida a cada instante é possível elaborar o gráfico do perfil de velocidades por parte do módulo de simulação dinâmica para cada solução recebida.

4.6 Módulo de Cálculo Energético

O módulo de cálculo energético calcula a energia mecânica em jogo durante a viagem. Este cálculo é feito por integral da potência mecânica ao longo de todo o trajeto (equação 19).

$$E = \int Fin. v \, dt \quad (19)$$

A Figura 11 apresenta a implementação do simulador composto pelo módulo de simulação dinâmica e pelo módulo de cálculo energético.

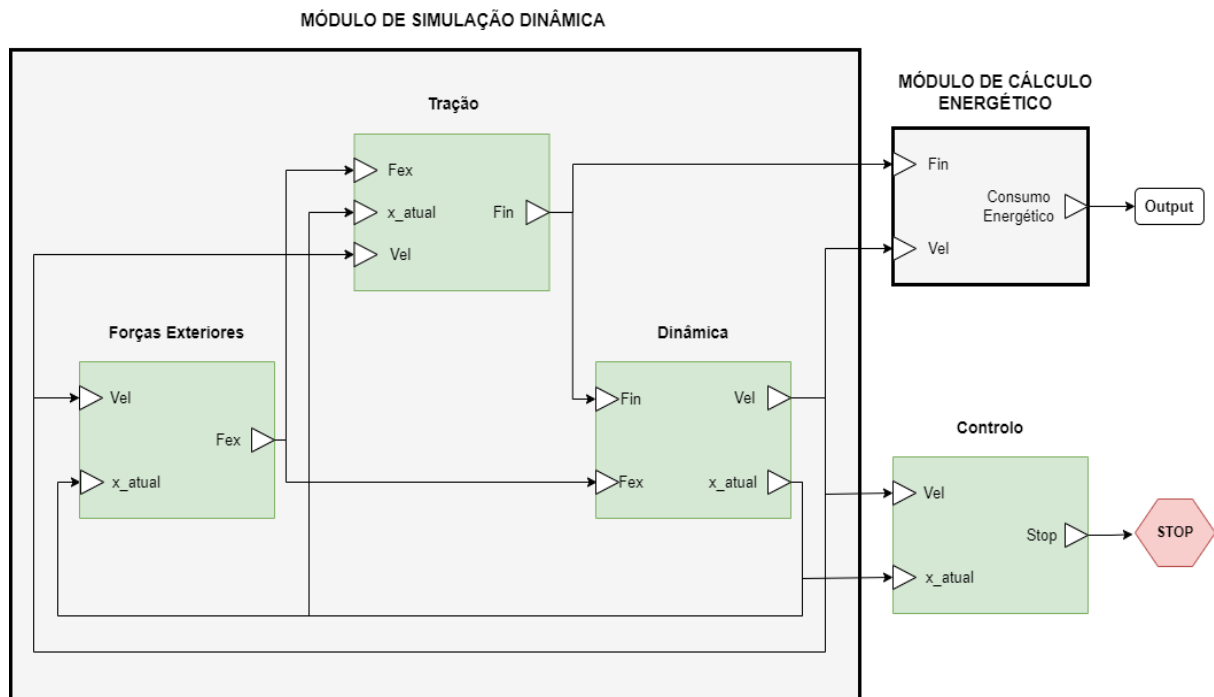


Figura 11 – Arquitetura do simulador.

4.7 Módulo Evolutivo

O módulo evolutivo é responsável pela aplicação dos algoritmos genéticos. Para que a otimização baseada nos algoritmos genéticos seja preformada, estes necessitam de trocar informações com outros módulos funcionais pertencentes à ferramenta de otimização. O módulo evolutivo também é responsável por garantir estas trocas de informação.

4.7.1 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são um mecanismo de otimização que localiza uma solução próxima da solução ideal para a resolução de problemas de otimização complexos. Esta metodologia baseia-se na evolução natural à semelhança do que acontece na natureza. Tudo se inicia com uma população inicial que é constituída por um conjunto de indivíduos. São selecionados os elementos mais aptos para se reproduzirem e darem origem a novos indivíduos. A aptidão dos mesmos é avaliada através de uma função custo ou fitness. No contexto do tema da presente dissertação, como são estudados os parâmetros do consumo energético e do tempo de viagem para avaliar uma solução, utilizar-se-á a terminologia função custo. Quanto melhor o valor de custo associado a um indivíduo, mais apto ele será. Os indivíduos são estruturados por genes, que são os elementos mais básicos dos algoritmos genéticos. Na presente

dissertação, os genes definem as posições onde ocorrem as trocas de regimes de condução. Cada indivíduo é constituído por três genes, correspondentes às posições X1, X2 e X3. Soluções ou Cromossomas são designações que também podem ser atribuídas a um indivíduo. Os algoritmos genéticos são caracterizados pelas seguintes etapas:

1. População inicial — Quando o processo se inicia é gerada aleatoriamente uma população inicial, onde cada indivíduo é uma solução para o problema.
2. Avaliação — Cada indivíduo pertencente a uma população será avaliado quanto à sua aptidão através da função custo. Consequentemente, será atribuído a cada elemento um valor de custo. Os cromossomas rotulados com um melhor valor de custo terão maior probabilidade de se reproduzirem quando comparados com cromossomas de pior valor de custo. Após a avaliação das soluções são verificadas as condições de paragem. São exemplos de condições de paragem o estabelecimento de um número máximo de gerações, a definição de um número máximo de gerações consecutivas em que o indivíduo mais apto não sofre alterações, a imposição de um tempo máximo de simulação, de entre outras. Caso se verifique alguma das condições de paragem estabelecidas, é terminado o processo evolutivo.
3. Reprodução — Após a avaliação dos indivíduos, é criada uma nova população. Nesta etapa são escolhidos os indivíduos que se irão reproduzir. Dependendo do seu valor de custo, cada indivíduo terá uma determinada probabilidade de se reproduzir. Os elementos mais aptos iram ter uma maior probabilidade face aos menos aptos. Quanto melhor a aptidão maior a probabilidade de um indivíduo ser escolhido para ser progenitor, por outro lado quanto menor a aptidão menor a probabilidade de se tornar progenitor. Nesta fase identifica-se o processo de seleção natural, pois os elementos mais aptos terão uma maior probabilidade de se reproduzirem. Um indivíduo pode ser selecionado como progenitor mais do que uma vez durante o processo de criação de uma nova população.
4. Cruzamento — Depois de selecionados os progenitores são gerados novos indivíduos. Como os novos indivíduos resultam da combinação genética dos progenitores, irão herdar muitas das suas características. O processo de cruzamento

envolve dois progenitores e um descendente. Existem diferentes tipos de cruzamentos. Na ferramenta de otimização desenvolvida, durante o processo de cruzamento para cada tipo de gene é escolhido aleatoriamente um dos progenitores. Esse progenitor irá transmitir ao descendente esse mesmo tipo de gene. Ou seja, no contexto desta dissertação, será escolhido aleatoriamente um dos progenitores para passar ao descendente o seu gene X1, o mesmo processo acontece para o gene X2 e X3.

5. **Mutação** — Esta etapa tem como objetivo aumentar a diversidade da população para diminuir a probabilidade de o algoritmo ficar preso num mínimo local. Caso a população inicial não contenha toda a informação necessária para solucionar o problema, o processo de mutação introduz novas informações no sistema. As mutações ocorrem aleatoriamente nos indivíduos de uma população, durante o processo de formação de uma nova geração.

Na Figura 12 é apresentado o fluxograma dos algoritmos genéticos.

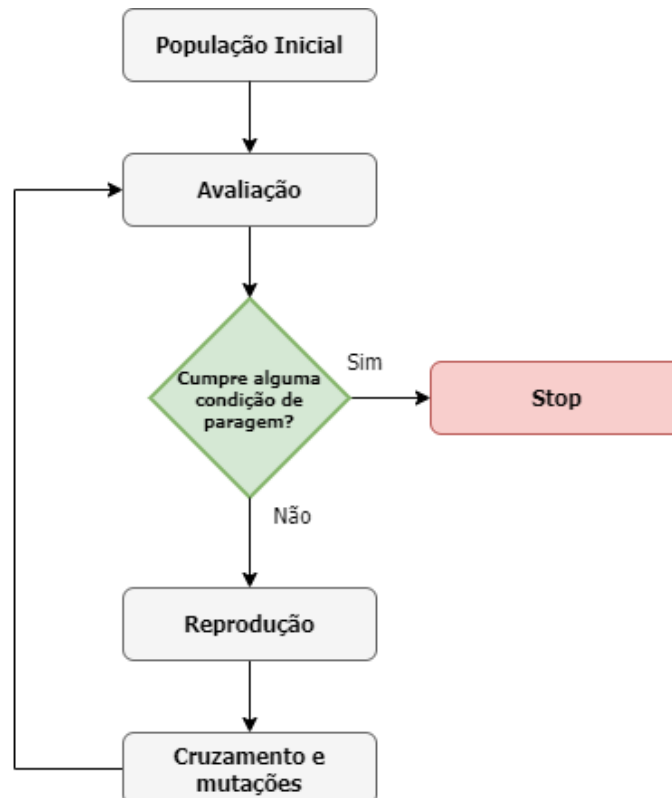


Figura 12 - Fluxograma dos algoritmos genéticos.

4.7.2 Implementação do Módulo Evolutivo

Como previamente referido, o módulo evolutivo é o núcleo da ferramenta de otimização. A responsabilidade do mesmo é executar os algoritmos genéticos e coordenar o funcionamento dos restantes módulos funcionais. É possível descrever a operação dos algoritmos genéticos através das seguintes etapas:

1. É criada uma população inicial aleatória;
2. São geradas sequencialmente novas populações. Em cada geração, o algoritmo utiliza a população atual para dar origem a uma nova população. A criação de uma população é efetuada da seguinte forma:
 - a) É calculado um valor de custo para cada elemento da população;
 - b) São selecionados os progenitores com base no valor da função custo;
 - c) São gerados os descendentes. A criação de descendentes pode ocorrer através do cruzamento entre os dois progenitores, ou através de mutações que podem ocorrer em indivíduos singulares.
 - d) Os descendentes formam a população da seguinte geração.
3. O algoritmo termina o processo quando não se verificam alterações nas populações ao longo de n gerações, ou quando é atingido o número máximo de gerações definido.

O processo de otimização começa e termina no módulo evolutivo. De início, é necessário definir o tamanho das populações e o número de gerações. Através de um processo de tentativa e erro, conclui-se que 20 gerações constituídas por populações de 150 elementos proporcionam bons resultados. Geralmente, entre a décima quinta e a vigésima geração, a evolução genética já estabilizou, ou seja, os elementos da população já não se transformam, a melhor solução para o problema foi encontrada. A redução do número de gerações ou de indivíduos da população pode limitar a eficácia da ferramenta, apesar de acelerar a sua execução. Um número reduzido de elementos da população leva a que o algoritmo muitas vezes não encontre soluções válidas ou fique retido num mínimo local. Isto é um problema grave.

Cruzamentos entre soluções inválidas iram maioritariamente dar origem a soluções também elas inválidas. Como existem menos indivíduos por população, ocorrem menos cruzamentos e menos mutações, o que diminui ainda mais a probabilidade de encontrar soluções válidas. Por outro lado, um número reduzido de gerações não permitirá ao algoritmo convergir, não oferecendo garantias quanto à validade da solução. O aumento do número de gerações e dos indivíduos de uma população, irá melhorar a precisão do algoritmo, diminuindo a probabilidade de este ficar preso num mínimo local, contudo o tempo de execução aumentará exponencialmente.

Cada indivíduo do conjunto de soluções é caracterizado pelo conjunto de genes $[X1, X2, X3]$. Caso não sejam impostos limites cada gene poderia tomar qualquer valor real, o que resultaria num espaço de procura muito vasto. Com o intuito de melhorar a performance do algoritmo, é necessário reduzir o espaço de procura, tendo sido introduzidos mecanismos que contribuem para esta redução. Definiram-se limites inferiores e limites superiores para cada gene de cada solução. Considera-se que o regime de aceleração tem de decorrer pelo menos até à posição em que o comboio atinge a velocidade mínima estabelecida. Por outro lado, o regime de aceleração nunca pode estar definido para além da posição em que o comboio atinge a velocidade máxima determinada. Com o auxílio do módulo de simulação dinâmica, antes dos algoritmos genéticos serem executados, são determinadas as distâncias $X1$ máxima $x1_{max}$ e a distância $X1$ mínima, $x1_{min}$. Para o trajeto e veículo ferroviário definidos, $x1_{max}$ corresponde ao regime de aceleração mais durador, o veículo ferroviário alcança a velocidade máxima possível quando atinge esta posição, $x1_{min}$ corresponde ao regime de aceleração mais curto, onde o comboio alcança a velocidade mínima definida. As velocidades atingidas pelo comboio cumprem as restrições impostas, quer sejam velocidades mínimas, máximas ou as próprias restrições mecânicas do veículo. Os genes $X2$ e $X3$ foram limitados entre zero e a distância total do trajeto, uma vez que para qualquer viagem, o início do regime de deriva e o início do regime de travagem só podem ser definidos entre o começo e o término da viagem (equação 20). A condição expressa pela equação 21 é garantida pela atribuição de um custo infinito na execução da ferramenta de otimização, como explicado adiante.

$$\begin{aligned} x1 &\in [x1_{min}, x1_{max}] \\ x2, x3 &\in [0, xf] \end{aligned} \tag{20}$$

$$x_3 > x_2 > x_1$$

(21)

Para uma correta aplicação dos algoritmos genéticos, os intervalos para a criação dos genes são definidos antes do início do processo de otimização. Portanto, o valor atribuído a cada gene é independente dos valores dos restantes. Os intervalos estabelecidos reduzem drasticamente o espaço de procura, o que melhora bastante a precisão e a velocidade de execução do algoritmo (ver Figura 13).

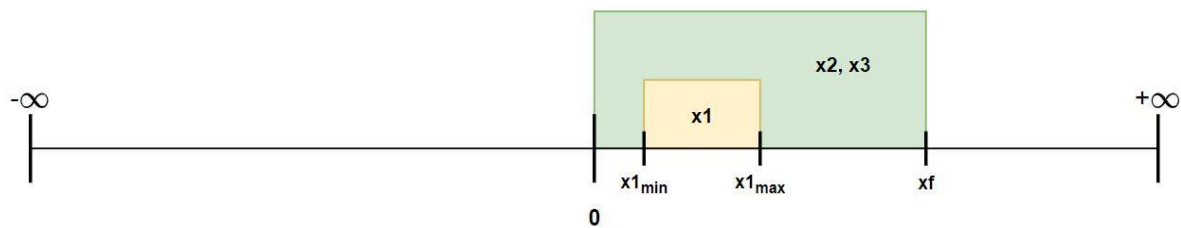


Figura 13 – Espaço de procura.

Após geradas as populações, inicia-se o processo de classificação dos elementos pertencentes às mesmas. Assim sendo, é necessário definir a função custo. A função custo tem o papel de atribuir um valor a cada solução que espelhe a sua aptidão. A avaliação a realizar por esta função depende do tipo de otimização que se pretende efetuar. A ferramenta de otimização elaborada oferece três tipos distintos de otimização:

- Otimização do consumo energético ao longo de todo o trajeto;
- Otimização do tempo de viagem;
- Otimização do binómio energia - tempo (ou mista).

No início do processo, o utilizador da ferramenta indicará o tipo de otimização que pretende realizar e introduz os parâmetros que caracterizam o percurso e o comboio. Estas informações são armazenadas no módulo de parâmetros e são utilizadas pelo módulo de simulação dinâmica cada vez que este é chamado para simular uma viagem. A função custo necessita dos valores dos consumos energéticos e das durações das viagens provenientes do simulador para classificar cada solução gerada. Por este motivo, o módulo de simulação dinâmica realiza uma simulação para cada solução que respeite o modelo de condução imposto.

O cálculo do consumo energético é garantido pelo módulo de cálculo energético. Assim, no fim de cada simulação, a função custo tem ao seu dispor os dados necessários para avaliar qualquer solução. Quando é executada uma otimização do consumo energético o custo atribuído a cada solução toma o valor da energia total despendida. Por outro lado, se for aplicada uma otimização do tempo de viagem, a duração da viagem irá definir o custo das soluções. Quando se pretende efetuar uma otimização simultânea do consumo energético e do tempo de viagem, é necessário que os valores simulados de tempo e de energia consumida sejam normalizados. Para isso, foram executadas previamente várias otimizações do tempo de viagem e de consumo energético afim de retirar o melhor e o pior valor de tempo e de consumo energético para os trajetos estudados. De seguida, obtiveram-se os valores de custo de tempo e de consumo energético normalizados recorrendo à equação 22.

$$C_{\Delta t} = \frac{t_{sim} - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \quad (22)$$

$$C_E = \frac{E_{sim} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}}$$

Outro requisito para uma otimização mista é a definição da constante k . Esta constante varia entre 0 e 1 e permite variar o peso que cada grandeza irá ter na otimização. O cálculo do custo atribuído a cada solução para uma otimização mista é dado pela equação 23.

$$C_{misto} = k.C_{\Delta t} + (k - 1).C_E \quad (23)$$

Outro aspeto importante é a identificação de soluções não desejadas. Como anteriormente mencionado os genes das soluções podem tomar qualquer valor real positivo dentro dos intervalos definidos, então é essencial detetar soluções que não contribuam para a resolução do problema tratado pela presente dissertação. Nesta tese de mestrado, são alvo de estudo viagens ferroviárias em que o comboio atravessa sequencialmente quatro regimes de condução: a aceleração, manutenção, deriva e travagem. Por conseguinte, quando não se verifica $x_3 > x_2 > x_1$ o custo atribuído à solução em questão é infinito e assim o algoritmo interpreta a solução como uma solução indesejada. Qualquer solução com um valor de custo finito será melhor que este tipo de soluções, consequentemente são rapidamente ignoradas. Caso a sequência dos regimes de condução seja correta, é ainda necessário verificar a posição onde o comboio termina a viagem $x_{f_{sim}}$. Para facilitar a procura de soluções por parte da ferramenta de otimização, foi estabelecido um intervalo de tolerância para a posição onde o comboio entra em repouso. Este intervalo corresponde à tolerância da estação. Caso $x_{f_{sim}}$ não

esteja contido neste intervalo de tolerância, o veículo ferroviário não termina a viagem na estação destino e assim é atribuído um custo infinito à solução simulada. Este tipo de soluções também não resolvem o problema. Estabeleceu-se que uma solução será válida se a diferença entre a distância de paragem real e a distância de paragem simulada não for superior à tolerância da estação considerada. Neste trabalho admite-se que a tolerância da estação é de 100 metro (Δ). Uma solução é considerada válida se a condição expressa na equação 24 for respeitada. A consideração da tolerância da estação tem como consequência facilitar a procura de soluções e agilizar o processo de otimização. A tolerância escolhida poderia tomar qualquer outro valor sem prejuízo da metodologia. Contudo, a escolha de uma tolerância de estação muito baixa, obrigaria a aumentar consideravelmente o número de populações e de gerações do processo iterativo, aumentando significativamente os tempos de computação.

$$|x_f - x_{f_{sim}}| < \Delta \quad (24)$$

RESULTADOS

Neste capítulo, depois de definir os cenários que constituem o objeto de estudo, aplicou-se a cada um deles os três diferentes tipos de otimização desenvolvidos. Por fim analisaram-se os resultados obtidos.

5.1 Introdução

Com o objetivo de demonstrar o modo de funcionamento da ferramenta desenvolvida, estabeleceram-se três cenários diferentes onde um comboio de mercadorias circula entre duas estações. Para a aplicação da ferramenta de otimização foram considerados três trajetos com perfis de inclinação bastante distintos. Um deles apresenta um plano inclinado ascendente, outro um plano inclinado descendente e o último é caracterizado por ser estabelecido em plano aproximadamente horizontal. Os cenários estudados foram:

1. O comboio parte de Sintra e termina a viagem no Cacém;
2. O comboio inicia viagem no Cacém terminando em Sintra;
3. O comboio parte de Cascais e termina viagem em Oeiras.

A Figura 14 identifica os troços considerados através de uma imagem satélite. Para possibilitar a utilização da ferramenta desenvolvida foi necessário realizar o estudo dos perfis de elevação das linhas de Sintra e de Cascais. Também foi necessário definir a composição do comboio de mercadorias, escolhendo-se o modelo da locomotiva a considerar e o modelo, carga e número de vagões. Após terem sido transmitidos à ferramenta de otimização os dados técnicos do veículo ferroviário e os perfis de elevação dos percursos, foram executados os três tipos de otimização para cada cenário: otimização do tempo de viagem, otimização da energia consumida ao longo do trajeto e uma otimização mista onde são combinadas as duas anteriores.

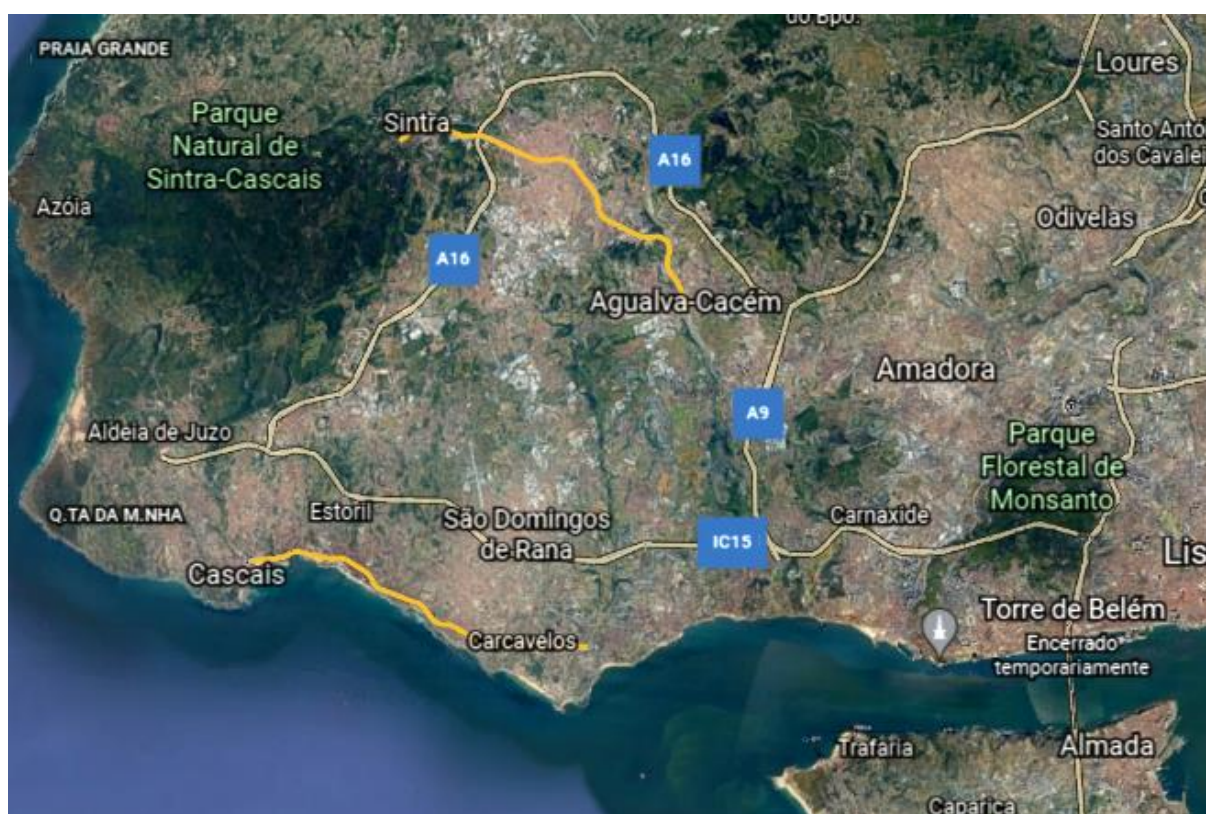


Figura 14 – Troços das linhas de Cascais e Sintra.

5.2 Veículo ferroviário

O veículo ferroviário escolhido é composto por uma locomotiva da série 5600 (Figura 15) pertencente à frota da CP e 5 vagões Falls (Figura 16), frequentemente utilizados para o transporte de inertes. A locomotiva dispõe de quatro motores assíncronos trifásicos de 1400 kW, o que equivale a uma potência total de 5600 kW e pode atingir uma velocidade máxima de 220 km/h. Algumas das especificações desta locomotiva são dadas pela Tabela 5 e a sua capacidade de tração encontra-se representada na Figura 17. As fichas técnicas completas da locomotiva e dos vagões são apresentadas nos anexos A.1 e A.2. (*Frotas, Série 5600 - Ficha Técnica, Vagões - Falls*).

Tabela 5 - Especificações da locomotiva série 5600 (*Série 5600 - Ficha Técnica, 2021*).

Unidades construídas	30
Ano de entrada ao serviço	1993
Disposição dos rodados	Bo'Bo'
Peso em serviço	87 t
Tipo de tração	Elétrica
Tipo de transmissão	Elétrica assíncrona
Tensão de alimentação	25 kV 50 hz
Potência nominal	5600 kW
Velocidade máxima	220 km/h



Figura 15 – Locomotiva série 5600 (*Inventário Portugal Ferroviário*).



Figura 16 - Vagão falls (Vagões, 2021).

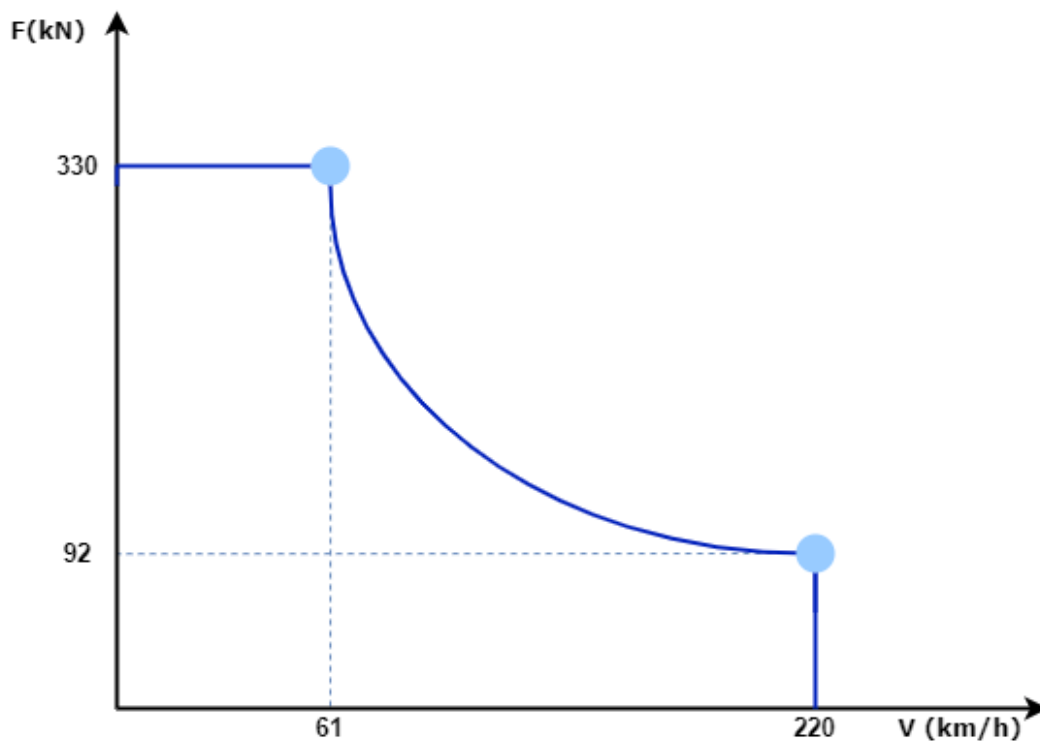


Figura 17 - Capacidade de tração da locomotiva 5600.

A locomotiva apresenta uma massa de 87 toneladas, o que corresponde a 21,75 tonelada por eixo. Os vagões têm uma tara de 24,4 tonelada, porém transportam uma carga de 10 tonelada, o que implica uma massa total de 34,4 tonelada. O peso por eixo dos vagões será de

8,6 tonelada, uma vez que também possuem quatro eixos. Posto isto, conclui-se que a massa total do comboio é de 259 tonelada. A locomotiva dispõe de uma área frontal de aproximadamente 12,9 m², enquanto os vagões têm cerca de 11,0 m². As especificações da locomotiva e dos vagões podem ser consultadas nas respectivas fichas técnicas. Conhecendo os valores da área frontal e da massa da locomotiva e dos vagões, é possível calcular a resistência específica ao movimento que atuará sobre o comboio em função da velocidade de circulação v . Usando como referência os coeficientes das fórmulas de Davis apresentados na Tabela 3, obtiveram-se os respetivos coeficientes para o comboio em estudo e que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes das fórmulas de Davis.

	Locomotiva	Vagões
A	1,2546	2,1791
B	$9,32 \times 10^{-3}$	$1,41 \times 10^{-2}$
C	$6,76 \times 10^{-4}$	$3,03 \times 10^{-4}$

Através dos valores dos coeficientes, o simulador calcula a resistência específica ao movimento causada pela locomotiva R_l , utilizando a equação 25.

$$R_l = 1,25 + 9,32 \cdot 10^{-3} \cdot v + 6,76 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 \quad [kg_f / t] \quad (25)$$

Para cada vagão a resistência específica ao movimento R_v é calculada através da seguinte equação:

$$R_v = 2,18 + 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v + 3,03 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 \quad [kg_f / t] \quad (26)$$

Após calculados os valores de R_l e de R_v , o valor da resistência específica ao movimento para o veículo ferroviário é dado pela equação 27, onde N_v corresponde ao número de vagões.

$$R = R_l + R_v \times N_v \text{ [kg}_f\text{/ t]} \quad (27)$$

Considerando o comboio composto por 5 vagões tem-se que a resistência específica ao movimento que atua sobre este é dada pela equação 28:

$$R = 12,15 + 8,0 \cdot 10^{-2} \cdot v + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \text{ [kg}_f\text{/ t]} \quad (28)$$

As forças de atrito que atuam sobre o comboio são dadas por:

$$F_a = \frac{m \times R \times g}{1000} \text{ [kN]} \quad (29)$$

5.3 Percursos

5.3.1 Descrição dos percursos

Para os cenários definidos foi considerado um troço da linha de Sintra e um troço da linha de Cascais. Foi considerado um percurso único entre duas estações consecutivas das respetivas linhas. A linha de Sintra é caracterizada por um perfil de elevação inclinado, por isso estabeleceu-se que as viagens entre Sintra e o Cacém seriam estudadas nos dois sentidos, uma vez que o perfil de elevação é um fator que influencia o consumo energético. Na linha de cascais o comboio irá partir de Cascais e terminar a sua viagem em Oeiras. Para este cenário apenas será considerado um sentido, pois o trajeto apresenta um perfil aplanado, sendo os resultados semelhantes para ambos os sentidos. O percurso Sintra - Cacém tem uma extensão de 9800 metro, Cascais - Oeiras 9250 metro. A Figura 18 apresenta um esquema dos troços de ambas as linhas.

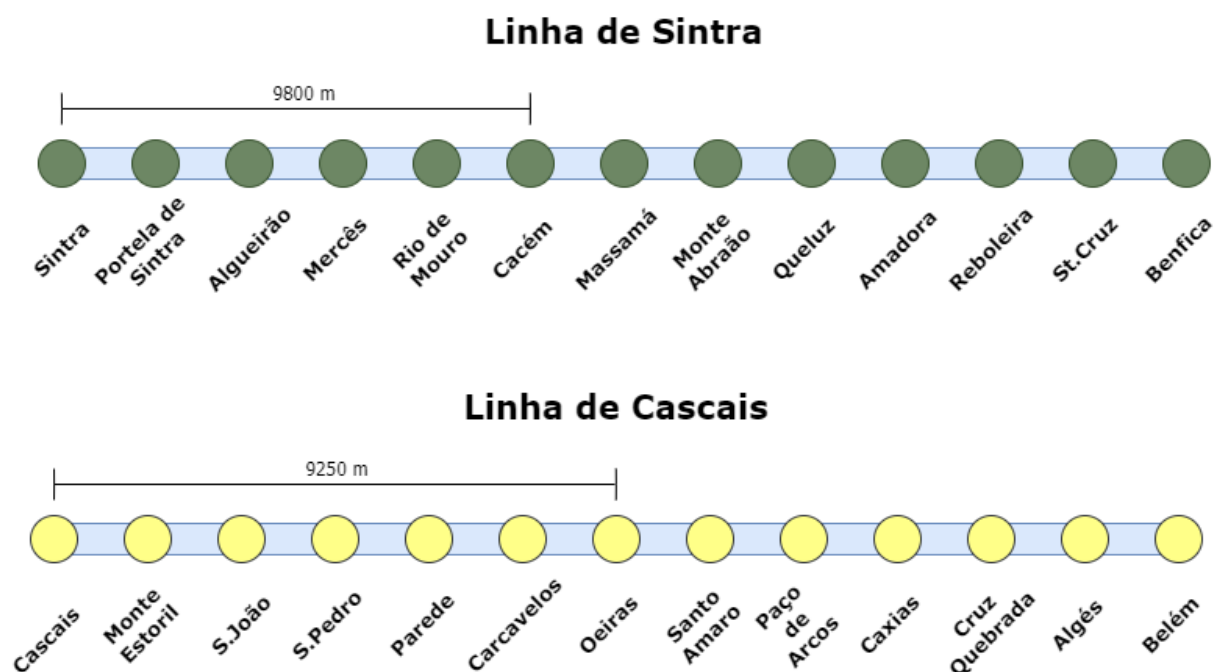


Figura 18 - Esquema das linhas ferroviárias consideradas.

5.3.2 Perfil de elevação

A simulação requer informações acerca do perfil de elevação e das distâncias de ambos os trajetos. Com o objetivo de adquirir estes dados, utilizou-se a ferramenta google earth para definir o trajeto do comboio em ambas as linhas. Foi gerado um ficheiro kml com as informações das coordenadas geográficas dos percursos obtendo-se os dados necessários para a aplicação da ferramenta de otimização. O perfil de elevação obtido através dos dados geográficos do troço Sintra – Cacém está representado na Figura 19, já o perfil de elevação do trajeto Cascais – Oeiras é apresentado na Figura 20. A medição da altitude é feita em relação ao nível do mar. Através da observação dos gráficos, verificam-se as diferenças nos perfis de elevação das duas linhas, como previamente referido. Na linha de Sintra no sentido Sintra – Cacém a viagem será maioritariamente constituída por declives negativos facilitando assim o movimento do comboio. Porém no sentido Cacém – Sintra acontece o oposto, o trajeto é caracterizado por rampas de inclinação positiva o que implica um maior esforço por parte dos motores do comboio. Os três cenários definidos permitem assim demonstrar o funcionamento do algoritmo para trajetos bastante diferentes. É importante realçar que os dados obtidos acerca da elevação dos percursos apresentam alguns erros. Quando o terreno que rodeia a linha apresenta níveis de relevo diferentes da própria linha, por vezes os valores de elevação obtidos dizem respeito ao terreno adjacente e não à própria linha. Construções como pontes e túneis também podem causar este tipo de erro. Isto provoca alterações repentinas nos valores de

elevação e consequentemente declives bastante acentuados. Para ultrapassar este problema foi realizado um aplanamento do perfil de elevação que permitiu a correção desses erros, obtendo-se assim uma melhor aproximação à realidade. As tabelas 6, 7 e 8 indicam as rampas obtidas para cada trajeto após a correção dos perfis de elevação. As figuras 21 e 22 apresentam perfis de elevação corrigidos para a linha de Sintra e linha de Cascais, respetivamente.



Figura 19 – Perfil de elevação Sintra - Cacém.



Figura 20 – Perfil de elevação Cascais - Oeiras.

Tabela 7 - Rampas no trajeto Sintra-Cacém.

$x_i(m)$	$x_f(m)$	$\alpha(^{\circ})$
0	686	-0,84
686	1500	0,49
1500	1850	-0,98
2170	5570	-0,76
6830	7360	0,76
7360	9800	-0,78

Tabela 8 - Rampas no trajeto Cacém-Sintra.

$x_i(m)$	$x_f(m)$	$\alpha(^{\circ})$
0	2440	0,78
2440	2970	-0,76
4230	7630	0,76
7950	8300	0,98
8300	9114	-0,49
9114	9800	0,84

Tabela 9 - Rampas no trajeto Cascais-Oeiras.

$x_i(m)$	$x_f(m)$	$\alpha(^{\circ})$
1160	3280	0,22
3280	5260	0,17
8200	8460	0,88
8460	9430	-0,44
9430	10400	0,47
10400	11900	-0,23
11900	13500	-0,50

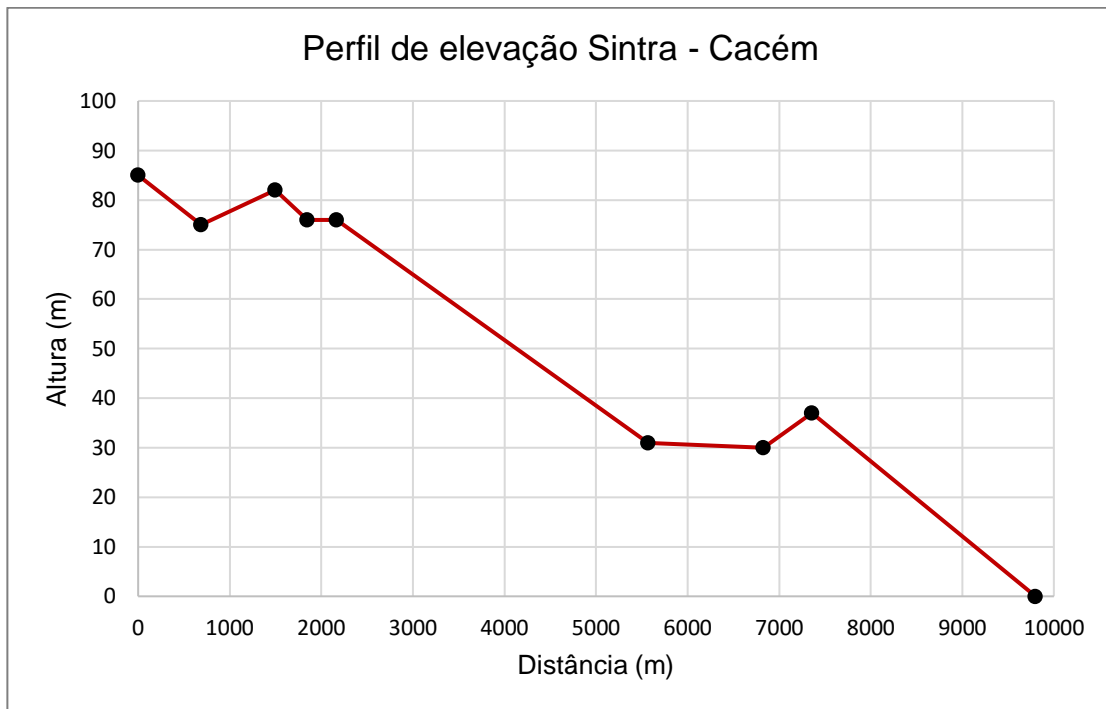


Figura 21 – Perfil de elevação Sintra - Cacém corrigido.

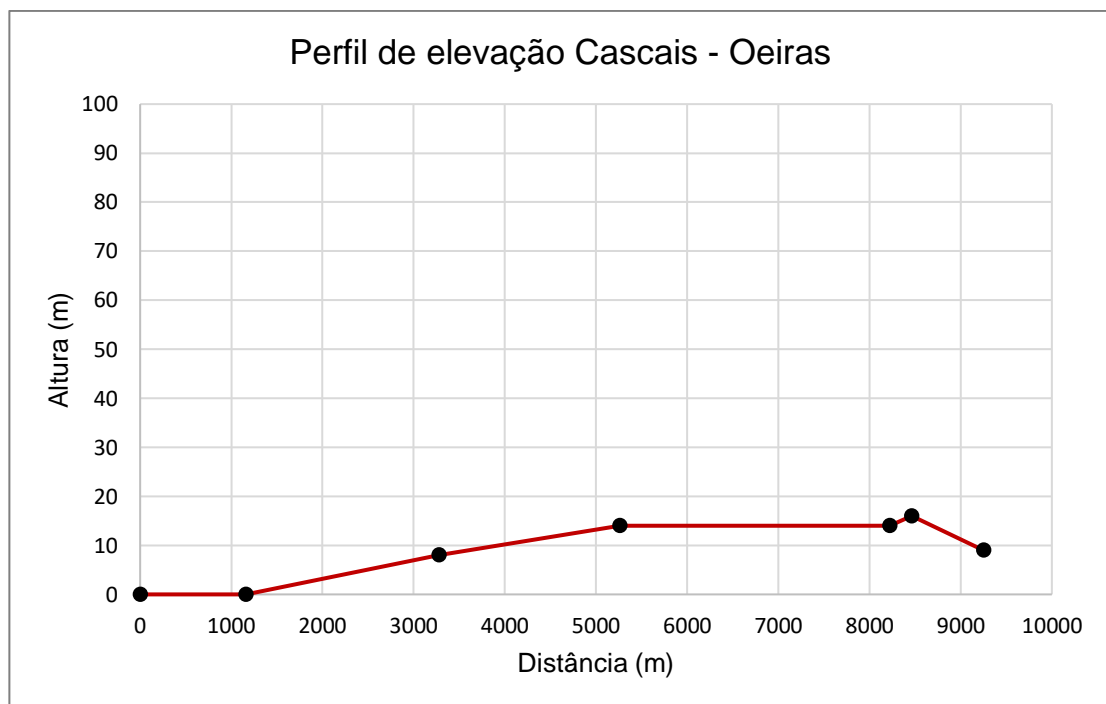


Figura 22– Perfil de elevação Cascais - Oeiras corrigido.

5.4 Aplicação da ferramenta de otimização

Nesta secção, serão apresentados os resultados obtidos após a aplicação da ferramenta de otimização para os três diferentes cenários especificados previamente. Para cada cenário foram executados os três tipos de otimização disponibilizados pela ferramenta de otimização: a otimização do tempo de viagem, a otimização do consumo energético e a otimização do binómio energia-tempo. Os algoritmos genéticos foram parametrizados de forma idêntica para cada otimização. O processo evolutivo decorre ao longo de 20 gerações e cada população é constituída por 150 elementos. Para as otimizações do binómio energia-tempo, estabeleceu-se que o peso da duração da viagem e do consumo energético seriam iguais ($k = 0,5$), dando igual importância ao consumo energético ao longo do trajeto e ao tempo que esse mesmo trajeto leva a ser percorrido.

Foram estabelecidas uma velocidade de cruzeiro máxima de 100 km/h e uma velocidade de cruzeiro mínima de 50 km/h para todos os percursos. A velocidade de cruzeiro máxima foi definida tendo em consideração as limitações dos vagões (velocidade máxima de 120 km/h). A imposição de uma velocidade de cruzeiro mínima exclui viagens com tempos de viagem exagerados.

A aplicação da ferramenta de otimização para cada um dos nove casos de estudo resulta na obtenção dos melhores valores para os pontos de comutação do perfil de condução: X1, X2 e X3.

5.4.1 Sintra - Cacém

5.4.1.1 Otimização do tempo de viagem

Para o cenário em que o comboio parte da estação Sintra e termina a viagem na estação de Cacém, começou-se por aplicar a otimização do tempo de viagem. Na Figura 23, é apresentado o gráfico representativo do processo evolutivo resultante da execução da ferramenta de otimização. Observando o gráfico é possível saber qual o tempo de viagem em minuto, para o elemento mais apto em cada geração, o que corresponde à melhor solução encontrada até ao momento. Para além deste facto, é possível identificar qual o indivíduo menos apto dentro da população. A azul tem-se a viagem mais rápida para cada geração, enquanto a cinzento é representada a viagem mais demorada. Quando não é representado o pior elemento da geração significa que a pior solução é inválida, pelo que tem associada a si uma duração infinita.

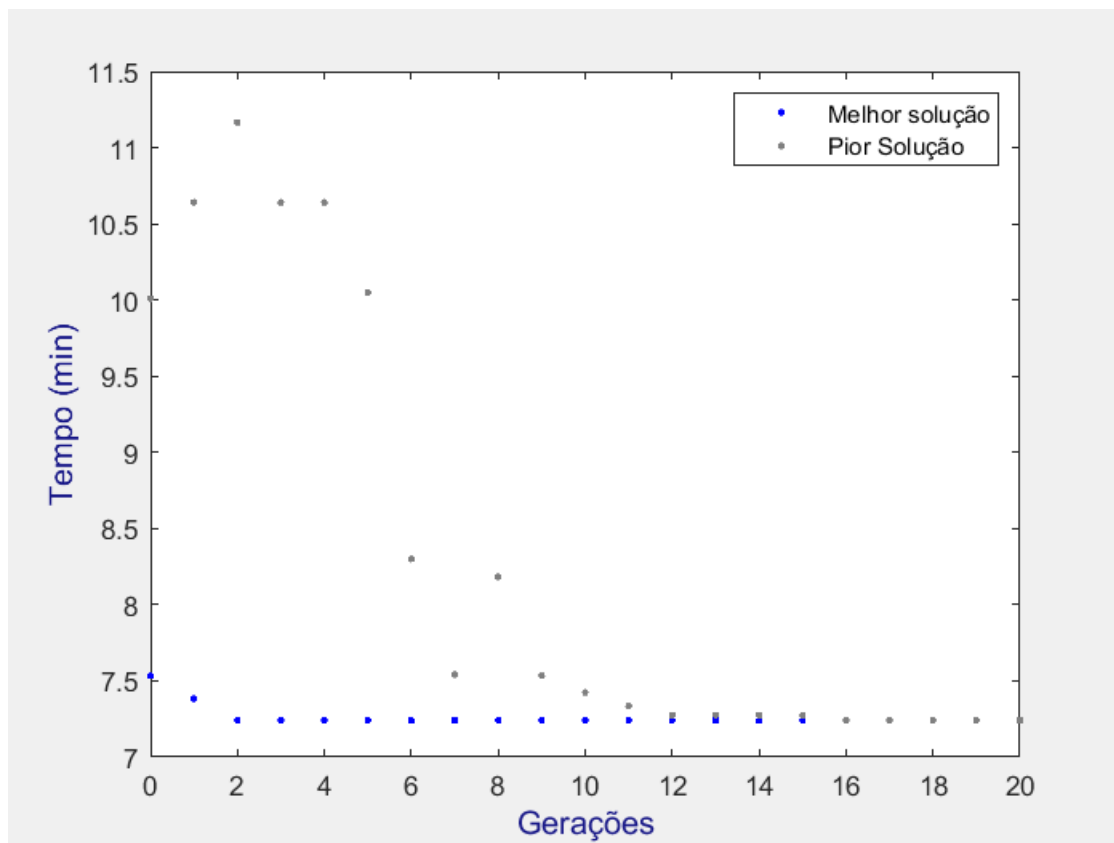


Figura 23 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Sintra-Cacém).

A população inicial é composta por 150 indivíduos gerados aleatoriamente, sendo que nem todos correspondiam a soluções válidas. O indivíduo mais apto nesta população correspondia a uma solução em que o tempo de viagem era de 7,53 minuto. A formação da primeira geração revelou um novo mínimo para a duração da viagem, a descoberta de uma nova solução cuja duração correspondia a 7,38 minuto levou a uma aproximação à melhor solução. A segunda geração marca o momento em que a ferramenta de otimização encontra a solução equivalente à viagem mais rápida. Nesta população, a melhor solução coincide com uma viagem de 7,24 minuto de duração. As seguintes gerações não demonstraram alterações no que diz respeito à duração da viagem da melhor solução, contudo o processo evolutivo continuou. Até à décima terceira geração, as populações incluíam todas soluções inválidas. Com o passar das gerações e com o decorrer do processo evolutivo, estas soluções deram origem gradualmente a soluções válidas, até que na décima quarta geração a pior solução da população apresentava uma duração de 7,28 minuto. A partir da décima sexta geração, todos os elementos da população são iguais. Deste momento em diante, alterações na população seriam extremamente improváveis, o único cenário onde isto se poderia suceder, seria um fenómeno onde as mutações dessem origem a uma solução com uma duração de viagem ainda inferior ao das restantes soluções.

A Tabela 10 demonstra a evolução da melhor solução ao longo do processo de otimização. Na otimização do tempo de viagem é de esperar que, caso o período de aceleração seja maior, a velocidade de cruzeiro também será maior, o que em conjunto com um maior período de manutenção corresponderá a uma viagem mais rápida. Como esperado, verifica-se que a melhor solução de cada geração foi sofrendo aumentos do seu período de aceleração e manifesta um regime de manutenção extenso. A Figura 24, ilustra o perfil de velocidades correspondente à melhor solução obtida. O comboio acelera com a força de tração máxima durante 432,77 metro até atingir a sua velocidade máxima (100 km/h), mantendo essa velocidade até aos 8013,75 metro de viagem. Nessa altura, o veículo ferroviário inicia a fase de deriva. Quando atinge os 9238,82 metro de viagem começa a travar até parar na estação destino.

Tabela 10 – Evolução da viagem mais rápida (Sintra-Cacém).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	353,74	8012,75	9238,82	7,53	194,69
1	407,92	7601,98	9325,98	7,38	204,32
2	432,77	8013,75	9238,82	7,24	212,96

O impacto da existência de inclinações no perfil da linha está representado na Figura 25, onde são apresentados os valores que a componente tangencial do peso toma ao longo da viagem. O percurso Sintra – Cacém é percorrido maioritariamente num plano inclinado descendente, conseqüentemente em grande parte do percurso o movimento do comboio é facilitado pelas características do trajeto. Na Figura 26, tem-se os dados referentes às forças externas que atuam sobre o comboio durante a viagem. Estas forças externas resultam do somatório das forças de atrito calculadas através da equação 29 e da componente tangencial do peso resultante dos declives no trajeto. A Figura 27 representa a potência utilizada pelos motores do comboio durante o decorrer da viagem. Como o percurso se inicia a descer, o comboio apenas necessita de um curto período de funcionamento à força máxima para atingir a velocidade máxima. Durante o regime de manutenção, a passagem por planos inclinados ascendentes leva a que o comboio recorra a uma maior potência para manter a velocidade, por outro lado em planos declinados a potência exigida será menor. O regime de deriva e de travagem são realizados durante uma descida o que permite que o comboio inicie a deriva mais cedo, uma vez que a perda de velocidade não será muito acentuada.

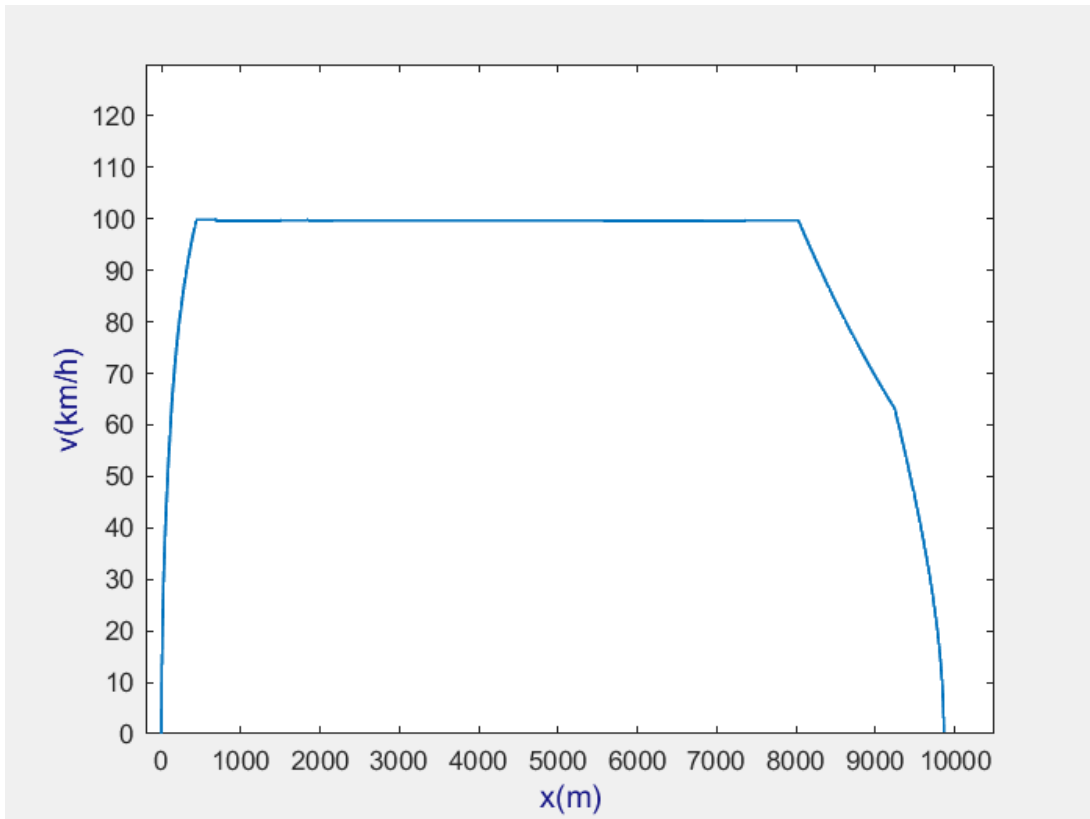


Figura 24 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Sintra-Cacém).

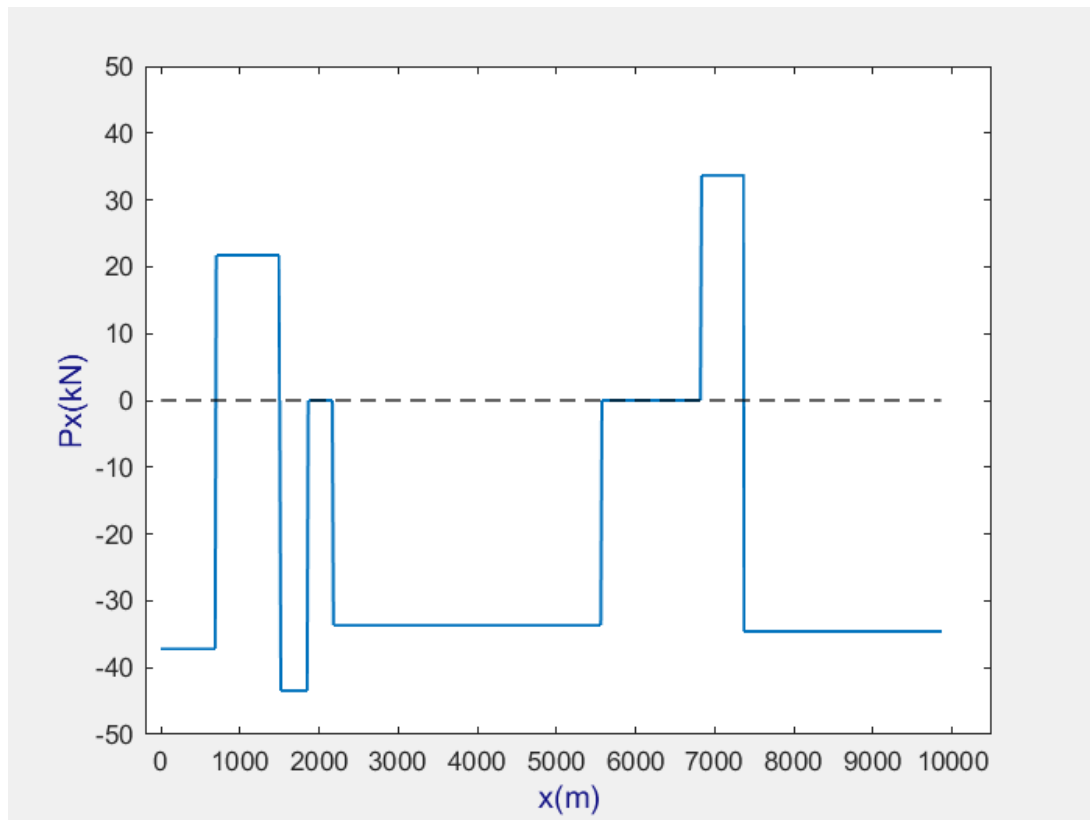


Figura 25 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Sintra-Cacém).

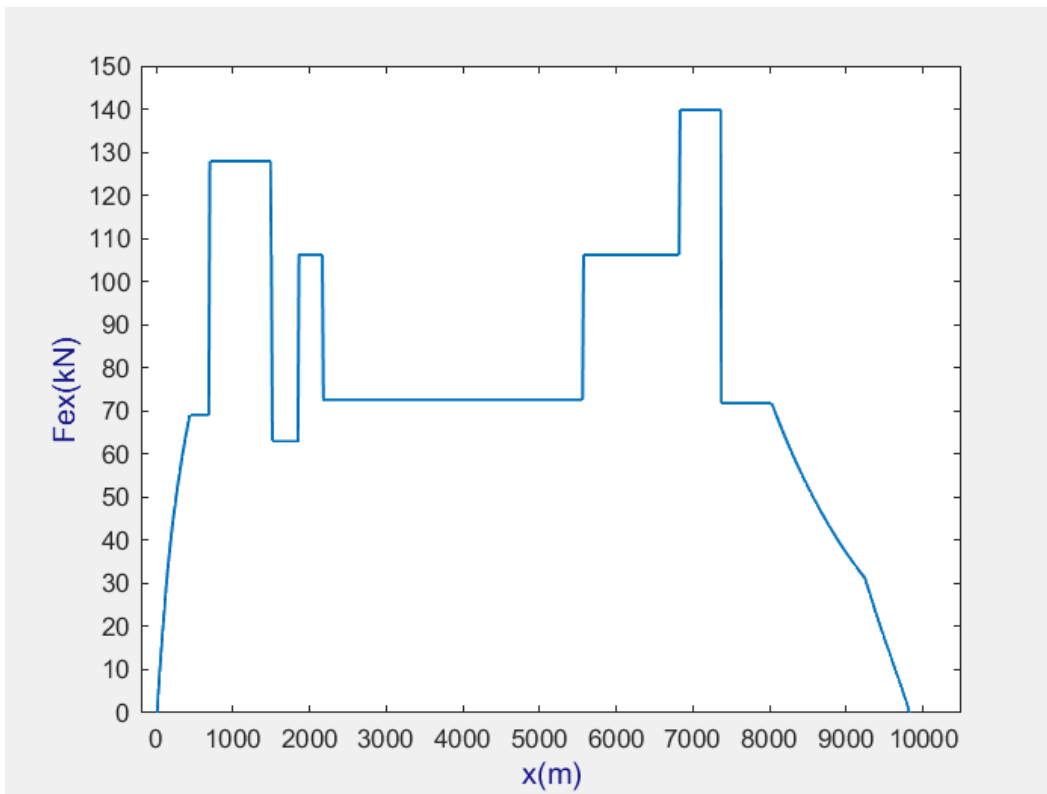


Figura 26 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais rápida (Sintra-Cacém).

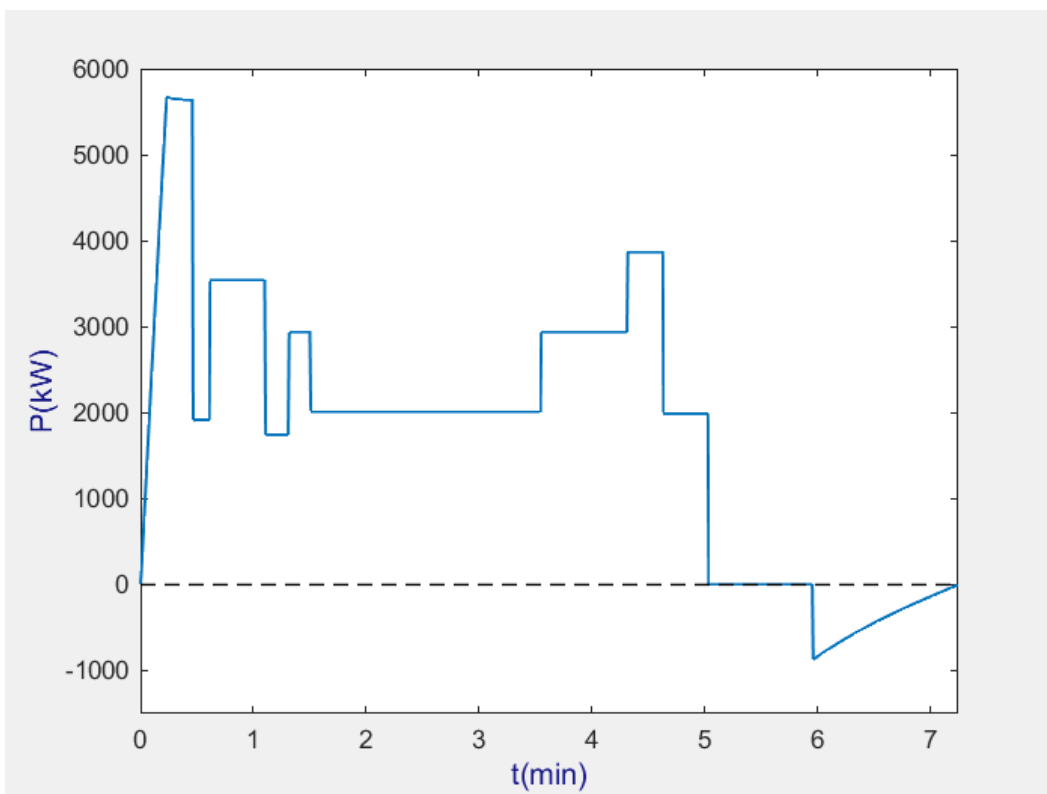


Figura 27 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Sintra-Cacém).

5.4.1.2 Otimização do consumo energético

Para determinar a viagem mais eficiente do ponto de vista energético no sentido Sintra Cacém, executou-se a ferramenta de otimização onde cada solução é avaliada pelo consumo energético correspondente. O processo evolutivo apresenta-se na Figura 28, onde são indicados o melhor e o pior indivíduo para cada geração. Os elementos inválidos de cada população são associados a um custo infinito. A população inicial gerada aleatoriamente, era constituída por soluções válidas e inválidas. O indivíduo mais apto desta população era uma solução que correspondia a um gasto energético de 122,69 kWh. A transição para a primeira geração revelou uma atualização da melhor solução cujo consumo energético correspondia a 112,85 kWh. A melhor solução encontrada foi determinada na segunda geração, esta solução equivale a um custo energético de 94,24 kWh.

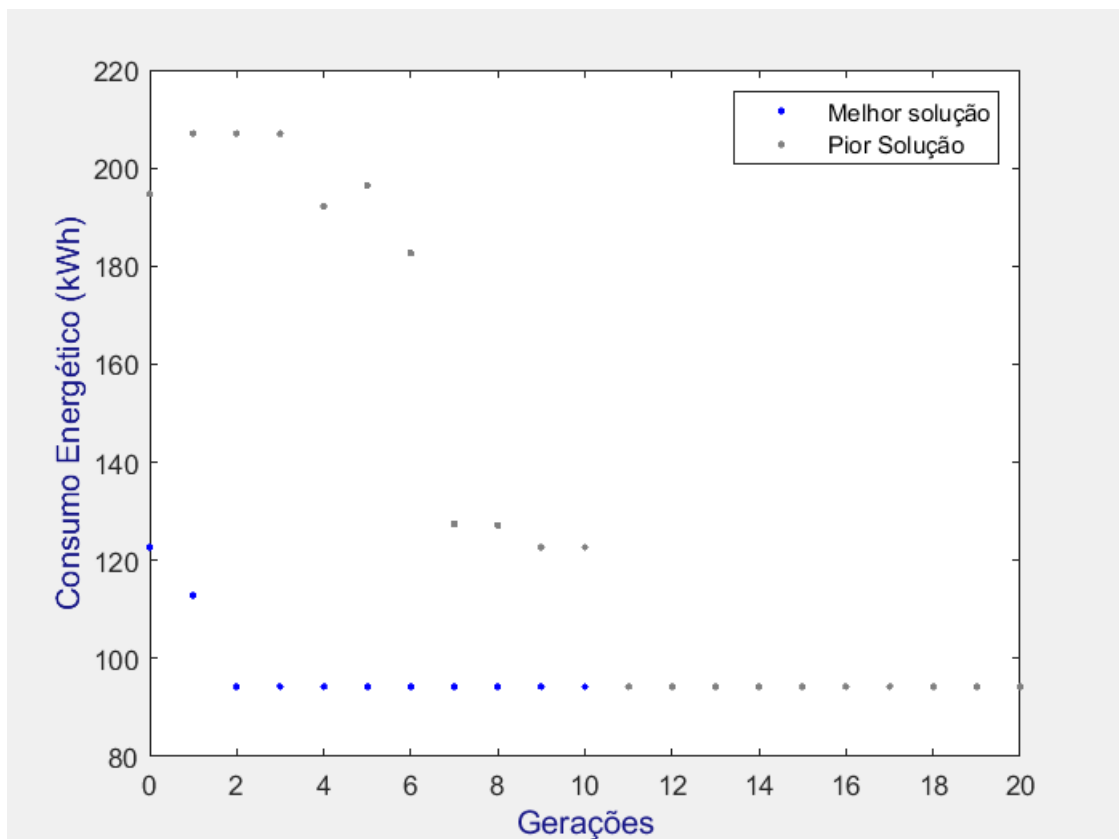


Figura 28 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Sintra-Cacém).

A Tabela 11 apresenta os dados da evolução da melhor solução ao longo das primeiras 20 gerações. Da população inicial para a primeira geração é possível verificar que os genes X2 e X3 são iguais para as melhores soluções. Tal sugere que os respetivos genes da melhor solução da população inicial, através do processo de cruzamento, foram transmitidos à melhor

solução da primeira geração. Porém, o gene X1 revela uma redução do seu valor, consequentemente o comboio terá um menor período de aceleração, o que contribui para uma viagem mais eficiente energeticamente. Na segunda geração, o elemento mais apto apresenta novamente uma descida no valor do gene X1, o que se traduz num regime de aceleração de menor duração, logo a velocidade de manutenção atingida pelo comboio será menor. Isto permite uma viagem mais económica. Outro aspeto importante é a extensão do período de deriva, que contribui para uma redução do consumo energético. Neste caso, o comboio aproveita o declive da linha para ajudar à deriva. Anteriormente na Figura 25, apresentou-se os valores que a força W_x toma ao longo da viagem. Confirma-se que durante a deriva, esta força auxilia o movimento do comboio.

Tabela 11 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Sintra-Cacém).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	Δt (min)	E(kWh)
0	127,30	8866,28	9385,40	10,00	122,69
1	113,05	8866,28	9385,40	10,53	112,85
2	77,50	8866,28	9386,40	11,93	94,24

A Figura 29 ilustra o perfil de velocidades correspondente à melhor solução encontrada. É de notar que o veículo ferroviário acelera até atingir uma velocidade a rondar os 50 km/h, que corresponde à velocidade mínima estabelecida, mantendo-a até aos 8866,28 metro. Nesse momento inicia-se o regime de deriva. Quando são atingidos os 9386,40 metro do percurso finda o regime de deriva e inicia-se o regime de travagem. O gráfico representativo do impacto das forças externas ao longo do trajeto do comboio é exibido na Figura 30. A potência desenvolvida pelo veículo ferroviário a cada instante encontra-se representada na Figura 31. Durante a aceleração os valores de potência de que a locomotiva necessita são mais elevados. Durante a fase de manutenção, declives ascendentes obrigam à utilização de mais potência, contrariamente os declives descendentes permitem uma descida da potência utilizada mantendo a velocidade.

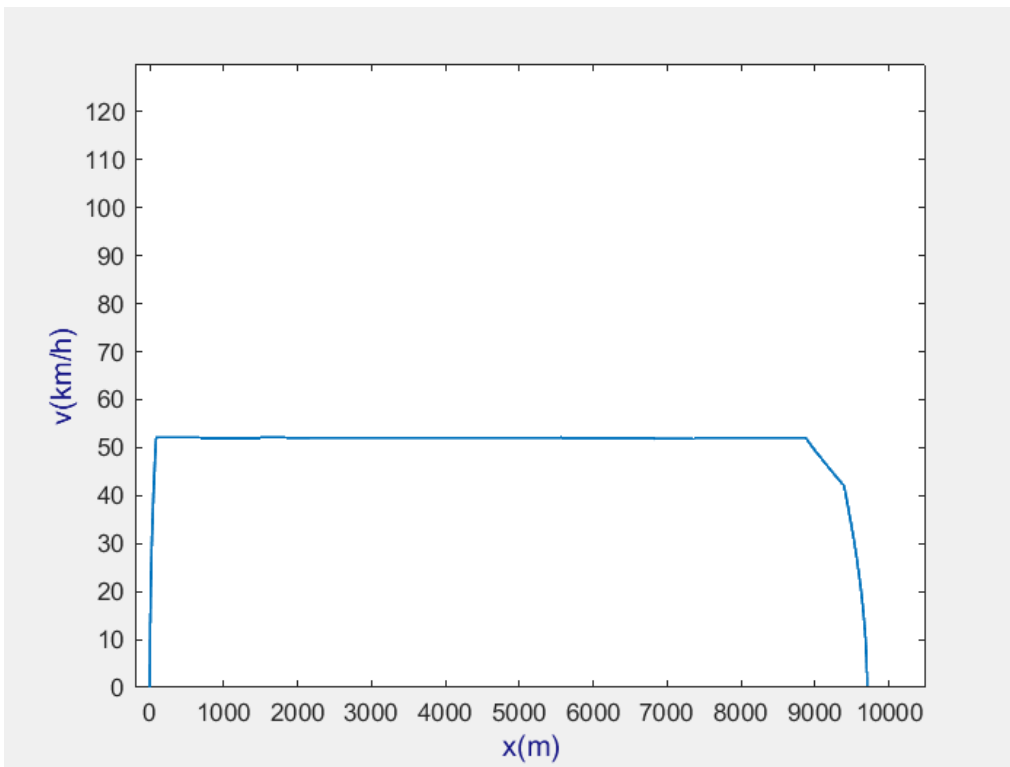


Figura 29 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).

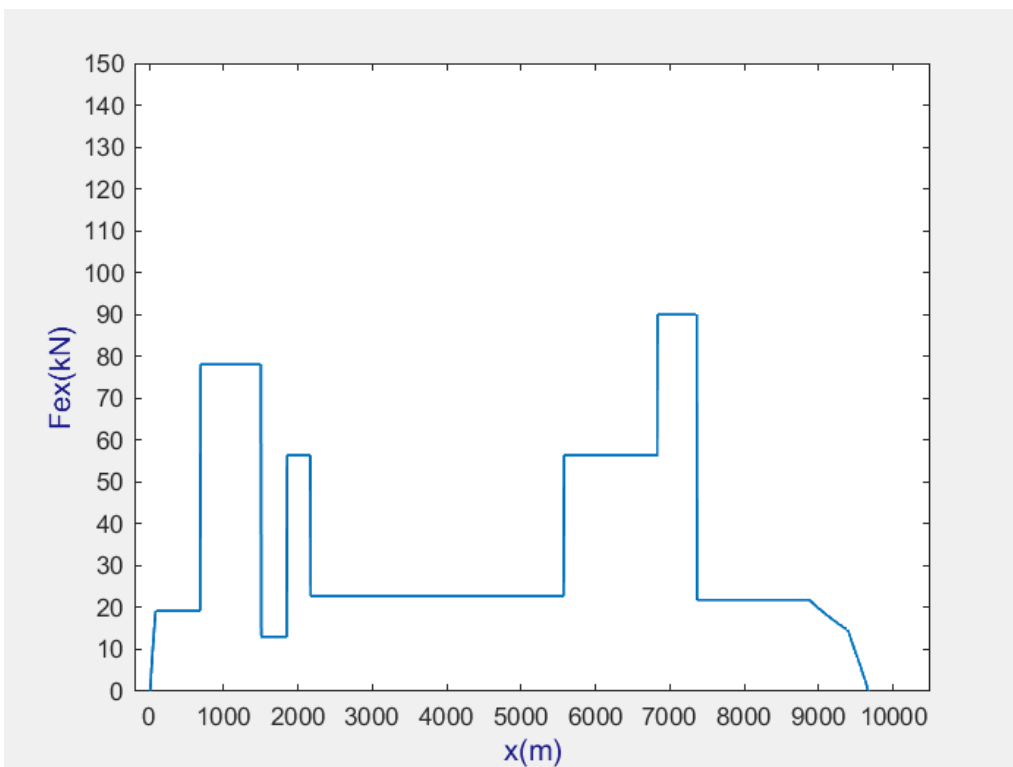


Figura 30 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).

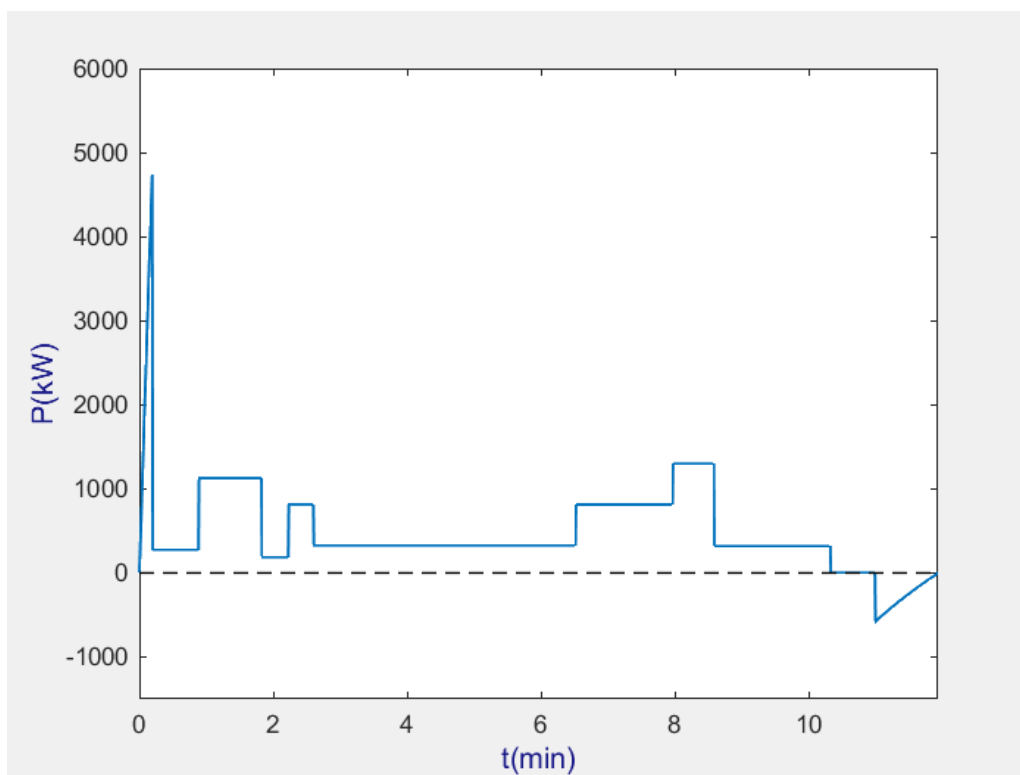


Figura 31 - Potencia desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Sintra-Cacém).

5.4.1.3 Otimização do binómio energia - tempo

A otimização do binómio energia - tempo conjuga ambos o consumo e a duração da viagem para a atribuição do custo às soluções obtidas. Neste tipo de otimização o valor de custo não corresponde a nenhuma grandeza física, como evidenciado previamente na equação 23. Na otimização mista o custo corresponde à soma de ambas as variáveis normalizadas multiplicadas pelos respetivos pesos. Definiu-se que ambas iriam ter o mesmo peso no processo de otimização ($k = 0,5$). Para se proceder à otimização mista foi necessário conhecer qual a melhor e a pior solução simulada para ambos os parâmetros, o tempo e o consumo da viagem, afim de se proceder ao processo de normalização. A melhor solução resultante da otimização do consumo apresenta o menor consumo energético possível e em contrapartida o maior tempo de viagem. Enquanto a melhor solução alcançada através da otimização do tempo de viagem coincide com a viagem mais rápida e menos eficiente energeticamente.

Na Tabela 12 estão especificadas as soluções de referência. O algoritmo desenvolvido utiliza os resultados das soluções de referência (tempo e consumo) para normalizar os resultados da solução resultante da otimização mista e de seguida proceder ao cálculo do valor de custo. Uma vez que se conhece a viagem mais rápida e a viagem mais eficiente do ponto de vista energético, conclui-se que qualquer solução válida gerada pelo algoritmo deverá ter uma

duração de viagem compreendida entre 7,24 minuto e 11,93 minuto. O consumo energético das soluções válidas será sempre um valor entre 94,24 kWh e 212,96 kWh. Os resultados do processo evolutivo resultantes da aplicação da otimização mista apresentam-se na Figura 32.

Tabela 12 – Soluções de referência (Sintra-Cacém).

Viagem mais rápida				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
432,77	8013,75	9238,82	7,24	212,96
Viagem mais energeticamente eficiente				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
77,50	8866,28	9386,40	11,93	94,24

Durante o ato de procura da melhor solução, depois da criação da população inicial, ocorreram duas atualizações do valor da melhor solução. A Tabela 13 retrata a evolução da melhor solução encontrada ao longo do processo evolutivo. A melhor solução de entre os elementos da população inicial equivalia a um consumo energético de 122,69 kWh e uma duração de viagem de 10,00 minuto. Na primeira atualização da melhor solução, é detetável um aumento do valor gene X1, o que se traduz numa maior duração do regime de aceleração. Consequentemente, a velocidade de cruzeiro será superior e assim a duração da viagem decresce, contrariamente o consumo energético aumenta. A duração da viagem para esta solução é de 8,96 minuto. Para a última atualização da melhor solução verifica-se um aumento significativo da duração da fase de deriva, o comboio usufrui do declive do terreno, que na fase final da viagem permite ao comboio manter-se neste regime de condução durante uma distância considerável, sem que ocorra um extraordinário aumento do tempo de viagem. Portanto, deu-se um ligeiro aumento no tempo de viagem e uma redução do consumo energético. A melhor solução traduz-se numa viagem de 9,09 minuto com um gasto energético associado de 139,53 kWh. Todas estas soluções apresentam resultados que se encontram entre os valores de referência.

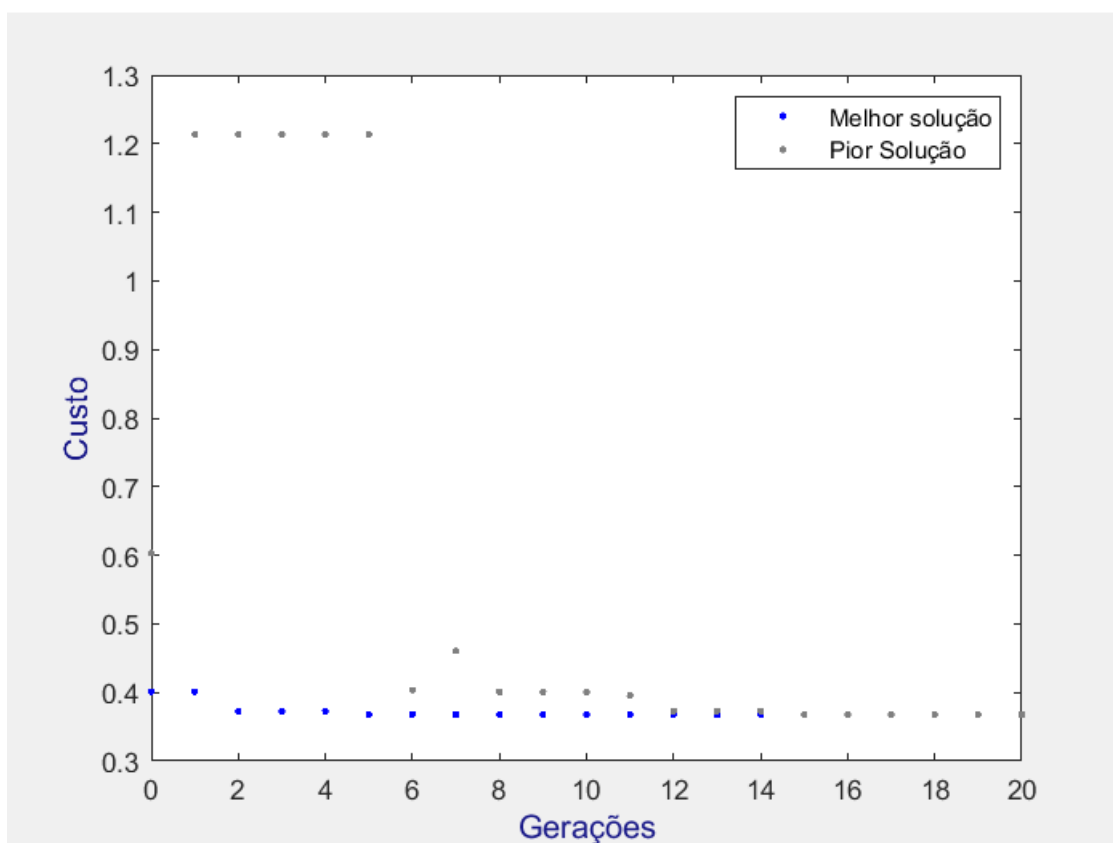


Figura 32 - Processo evolutivo da otimização mista (Sintra-Cacém).

Tabela 13 - Evolução da solução equilibrada (Sintra-Cacém).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	127,30	8866,30	9385,40	10,00	122,69
2	178,86	8731,00	9247,50	8,96	144,29
5	178,86	8013,75	9386,40	9,09	139,53

O perfil de velocidades da melhor solução encontrada pela ferramenta de otimização ao ser executada a otimização mista é apresentado na Figura 33. A fase de aceleração termina aos 178,86 metro de viagem. A velocidade de cruzeiro é mantida até aos 8013,75 metro onde começa o processo de desaceleração natural. Aos 9386,40 metro o comboio inicia a travagem. Nas figuras seguintes são apresentados os dados das forças externas que atuam sobre o comboio e a potência desenvolvida pelo mesmo durante a viagem. De uma forma semelhante às restantes viagens, a potência requerida pelo comboio é afetada pelo regime de condução e pelas rampas presentes no trajeto.

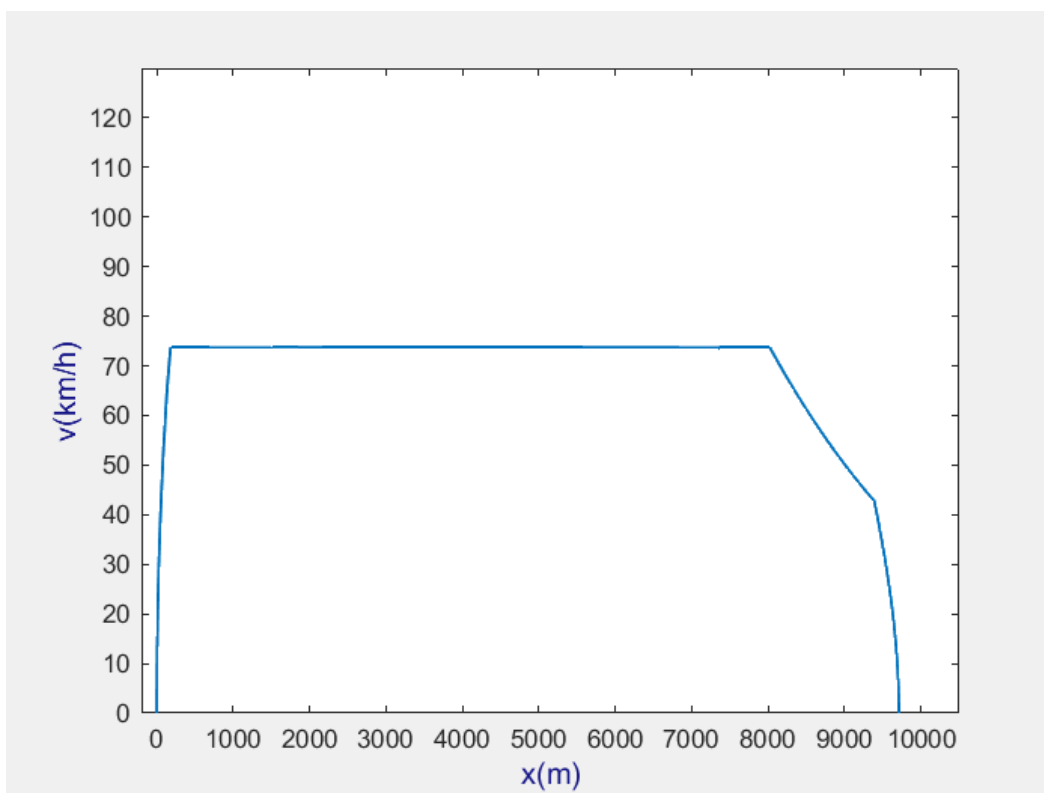


Figura 33 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Sintra-Cacém).

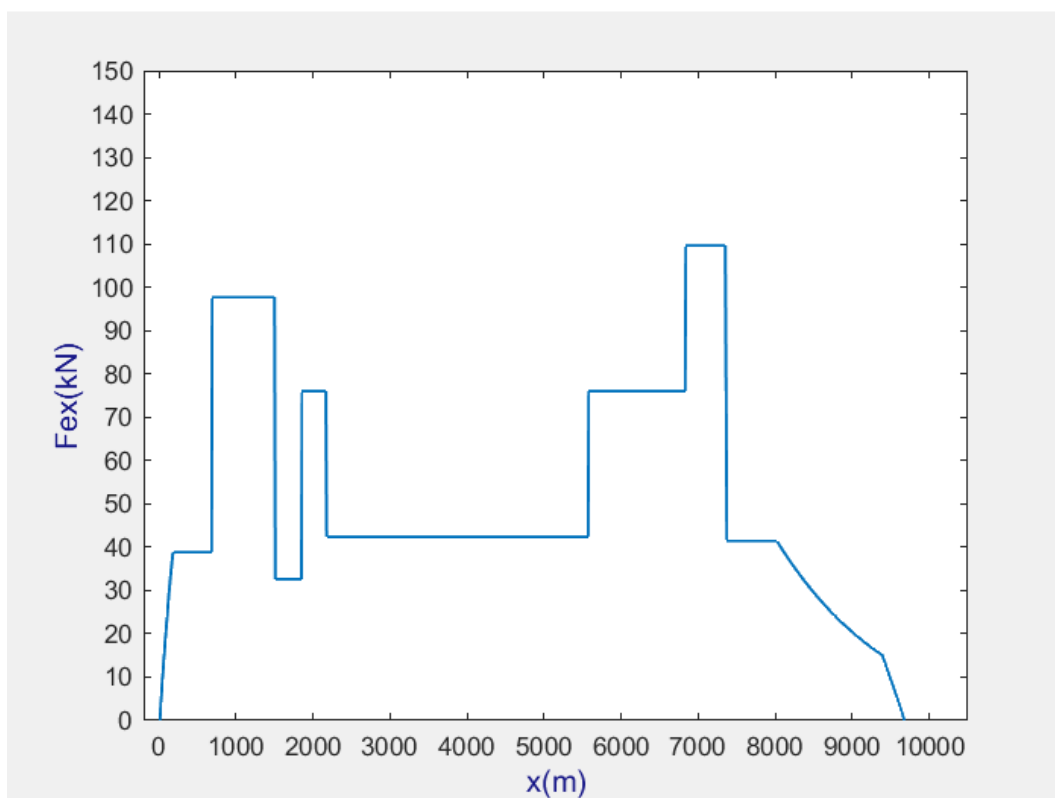


Figura 34- Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Sintra-Cacém).

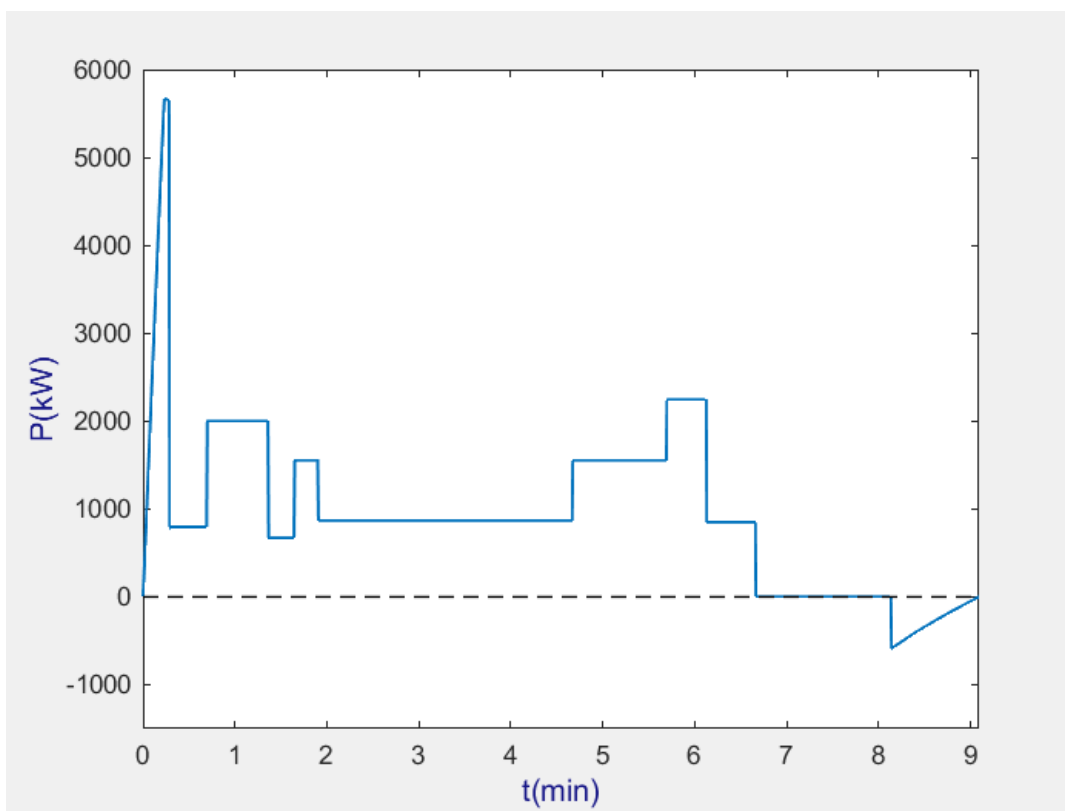


Figura 35 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Sintra-Cacém).

5.4.2 Cacém - Sintra

5.4.2.1 Otimização do tempo de viagem

Para o sentido Cacém-Sintra, os resultados do processo otimização do tempo de viagem levado a cabo pelos algoritmos genéticos, encontram-se expressos na Figura 36. Entre os 150 elementos da população inicial, não existia uma única solução válida. Porém, devido aos sucessivos cruzamentos e mutações, o algoritmo na sexta geração descobriu um elemento que correspondia a uma solução válida de 9,83 minuto de duração. Os cruzamentos que se sucederam para dar origem à população da seguinte geração, tiveram sempre como um dos progenitores esta única solução válida. Assim, na sétima geração já se verificava a presença de algumas soluções válidas dentro da população. Um novo mínimo foi localizado com um tempo de viagem de 9,82 minuto. A oitava geração é marcada pela presença de uma solução cujo tempo de viagem é bastante inferior quando comparado com as soluções das gerações anteriores. O elemento mais apto dessa população concordava com uma duração de viagem de 7,28 minuto. Uma nova atualização da melhor solução aconteceu na décima geração, o correspondente tempo de viagem era de 7,18 minuto de viagem. A descoberta da melhor solução para o problema surgiu na décima segunda geração com um tempo de viagem de 6,63 minuto.

Ao fim das 20 gerações a população ainda abrigava uma solução inválida, todavia sabendo que 144 elementos da população retratavam a melhor solução encontrada até ao momento, não seriam exetáveis futuras atualizações da melhor solução caso o processo evolutivo continuasse.

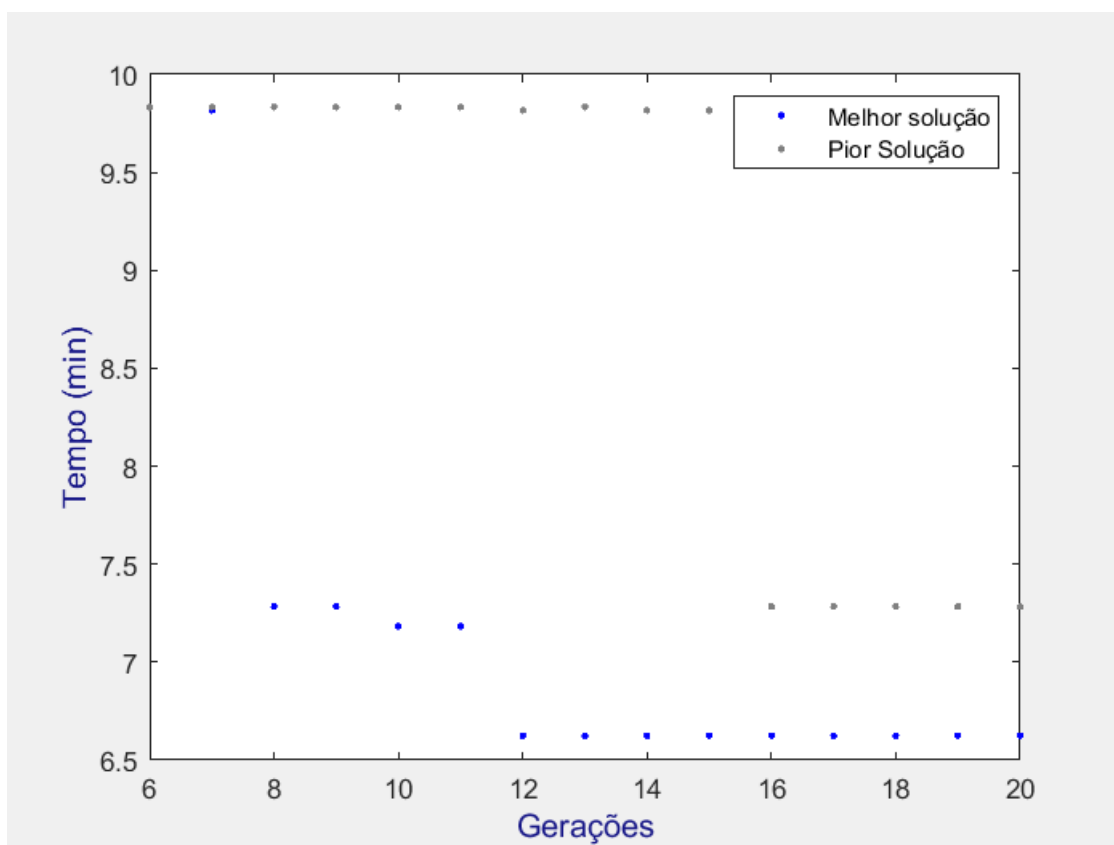


Figura 36 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Cacém-Sintra).

A evolução da melhor solução ao longo do processo evolutivo é apresentada na Tabela 14. A observação desta tabela permite a clara percepção da forma de operação dos algoritmos genéticos para resolução deste problema de otimização. O melhor indivíduo da sétima geração contém os mesmos genes X1 e X3 que o melhor indivíduo da sexta geração. Isto indica que o melhor indivíduo da sexta população foi um dos progenitores intervenientes no cruzamento que deu origem à melhor solução da geração seguinte. Na oitava geração o gene X3 é idêntico ao das melhores soluções da geração 6 e 7. O gene X2 da melhor solução da décima geração é equivalente ao mesmo gene da melhor solução da oitava geração. O melhor elemento da geração 12 contém os genes X2 e X3 também presentes no melhor elemento da geração 10. Devido aos cruzamentos, as informações genéticas dos indivíduos mais aptos são passadas de geração em geração como seria de esperar ao serem aplicados os algoritmos genéticos. Como

existiram sempre soluções inválidas em todas as populações, a pior solução correspondeu sempre a uma solução inválida. É evidente a tendência para um aumento do gene X1 com o passar das gerações para os elementos mais aptos. Um regime de aceleração mais prolongado permite a obtenção de uma velocidade de manutenção mais elevada, o que conduz a uma viagem mais rápida. O perfil de velocidades da viagem mais rápida é exibido na Figura 37. Nesta viagem em particular o veículo ferroviário acelera até aos 693,06 metro de viagem, onde atinge a velocidade de cruzeiro de 100 km/h. O comboio inicia a fase de desaceleração natural aos 9187,50 metro de viagem. O processo de travagem inicia-se aos 9321,73 metro. É de notar que nesta viagem o regime de deriva é bastante reduzido, cerca de 135 metro, o que se deve ao facto de o final do percurso ser caracterizado por uma rampa ascendente. As variações dos módulos da força W_x e da força F_{ex} estão representadas na Figura 38 e 39, respetivamente. A potência desenvolvida pelo comboio durante a viagem é apresentada na Figura 40. O perfil de elevação do trajeto é composto maioritariamente por rampas ascendentes, o que exige um maior esforço por parte dos motores do comboio.

Tabela 14 - Evolução da viagem mais rápida (Cacém-Sintra).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
6	150,19	9406,78	9671,15	9,83	232,47
7	150,19	9351,59	9671,15	9,82	231,24
8	428,54	9187,01	9671,15	7,28	305,77
10	428,54	9187,50	9321,73	7,18	302,55
12	693,06	9187,50	9321,73	6,63	339,27

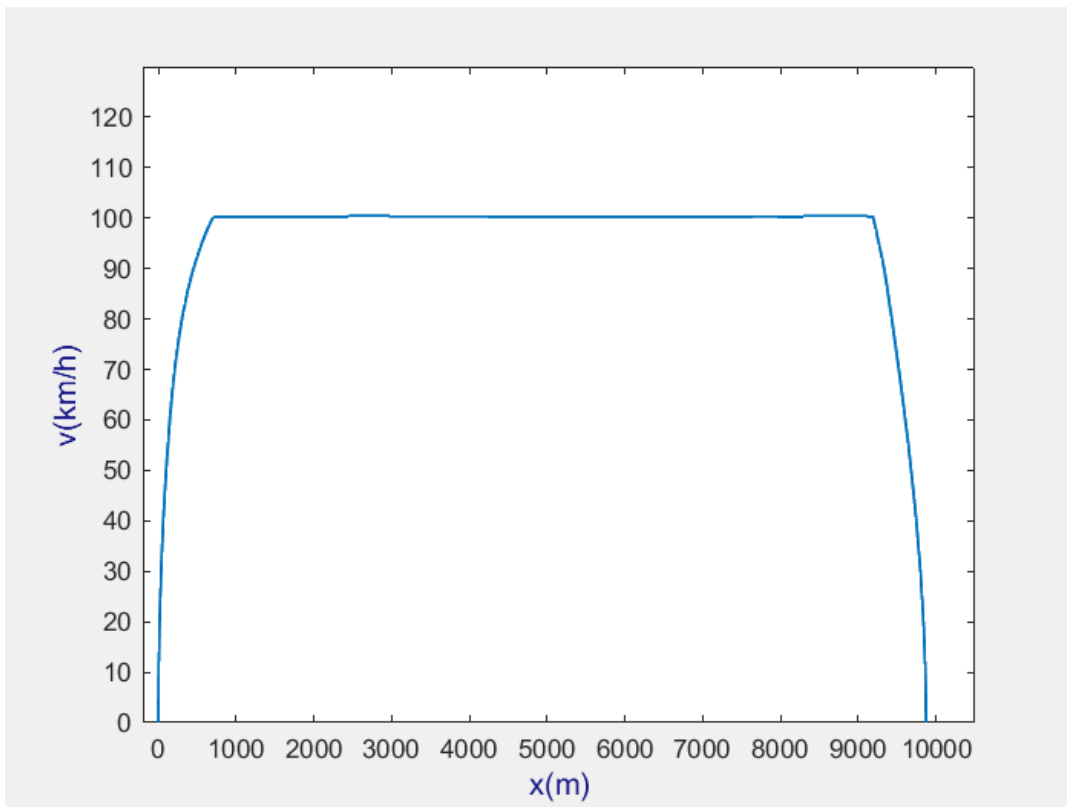


Figura 37 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Cacém-Sintra).

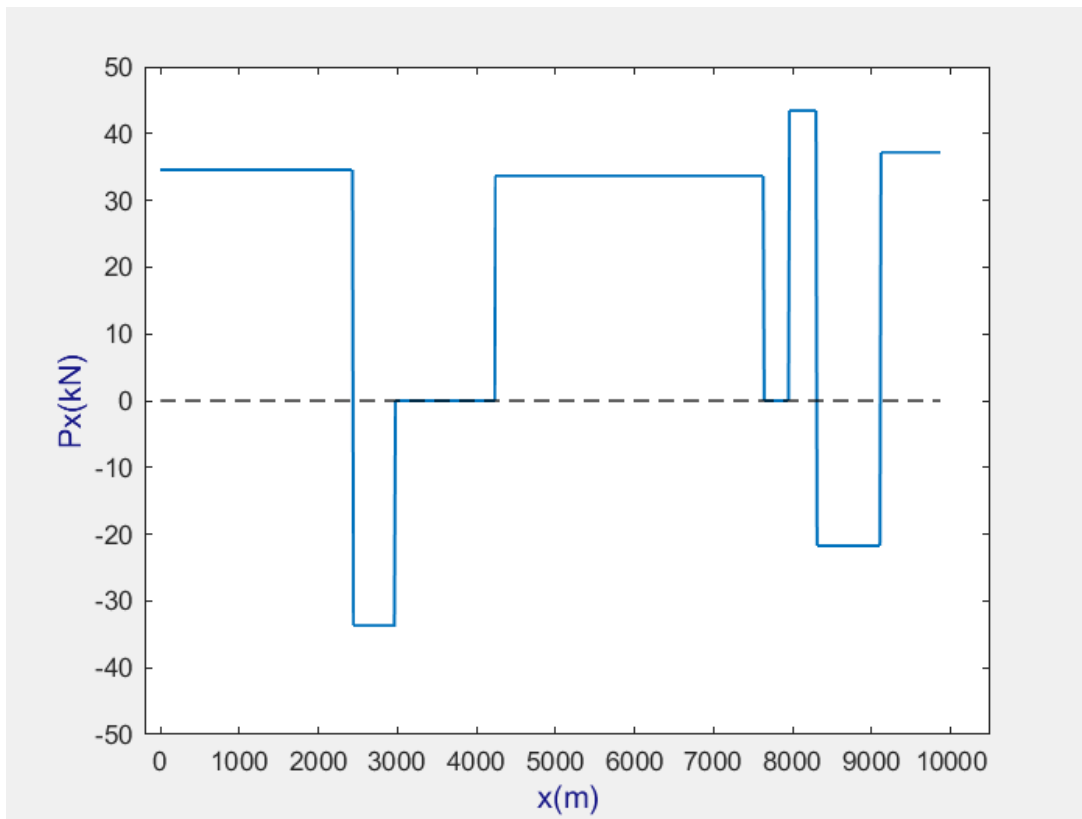


Figura 38 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Cacém-Sintra).

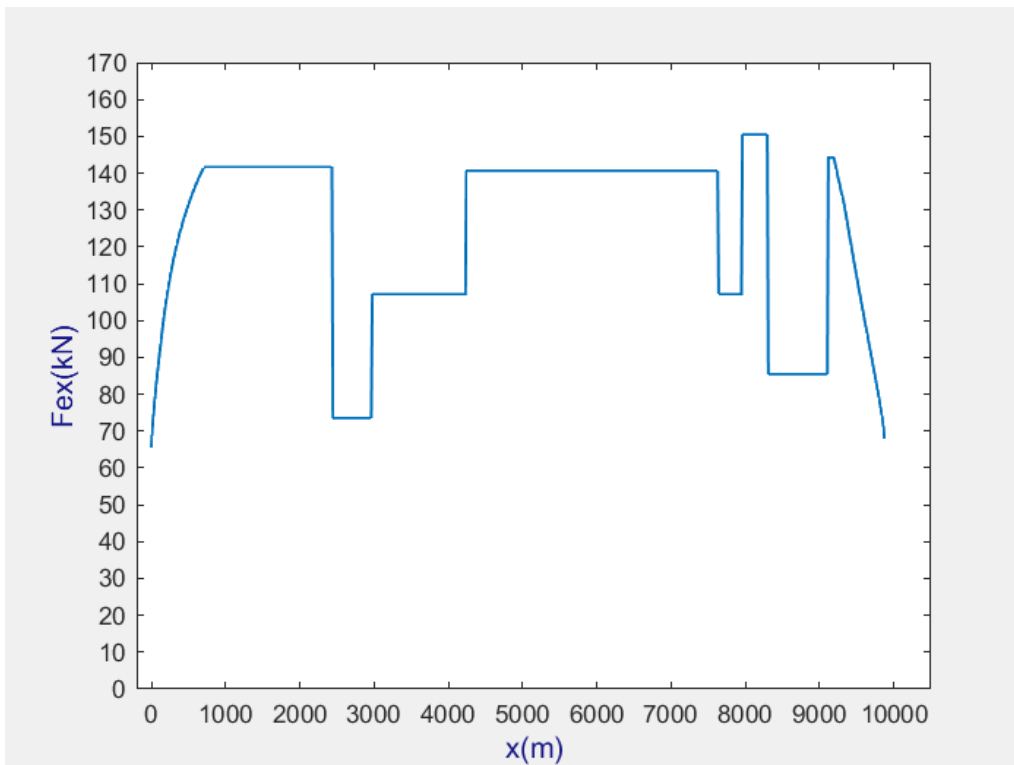


Figura 39 - Ação das forças externas durante a viagem mais rápida (Cacém-Sintra).

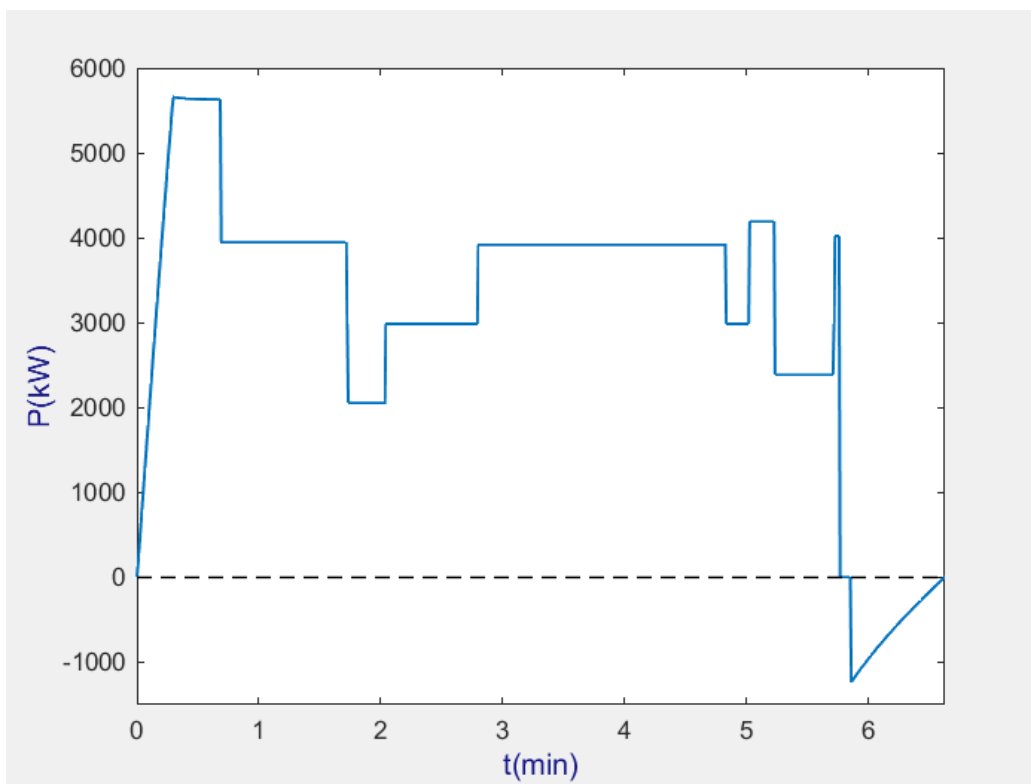


Figura 40 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Cacém-Sintra).

5.4.2.2 Otimização do consumo energético

Com o objetivo de obter o perfil de velocidades mais eficiente energeticamente para a viagem Cacém – Sintra, aplicou-se a otimização do consumo energético disponibilizada pela ferramenta de otimização. A Figura 41 ilustra o desenrolar do processo de otimização. A melhor solução da população inicial implicava um consumo energético de 232,90 kWh. As atualizações seguintes da melhor solução ocorreram na terceira e na quinta geração, com os consumos energéticos de 224,90 e 205,66 kWh, respetivamente. A Tabela 15 evidencia a evolução da melhor solução ao longo do processo evolutivo.

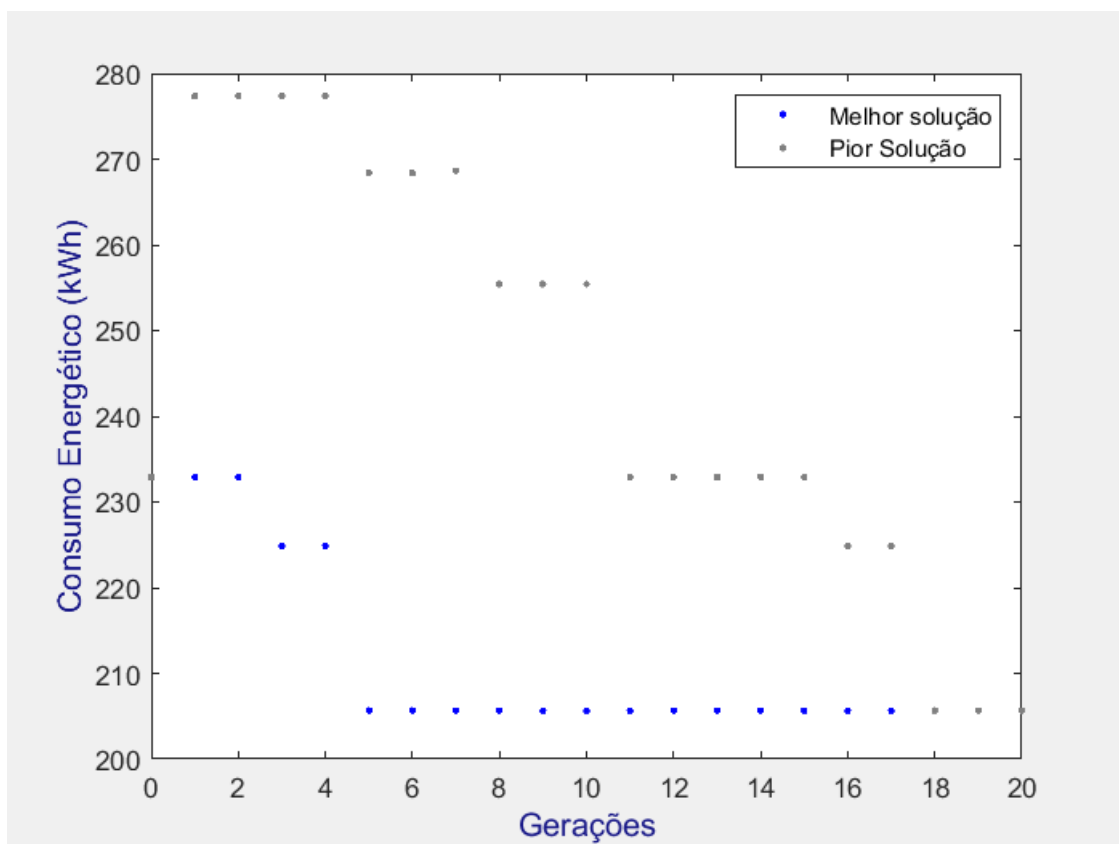


Figura 41 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Cacém-Sintra).

A evolução da melhor solução ocorreu de forma semelhante à da otimização do consumo energético do percurso Sintra - Cacém. Devido à tolerância da estação que a ferramenta de otimização admite para a posição onde o comboio termina viagem, a melhor solução encontrada termina viagem na posição 9730 metro. Enquanto a melhor solução da população inicial e da terceira geração terminam viagem aos 9827,39 e 9791 metro, respetivamente. Como seria de esperar a melhor solução encontrada apresenta o regime de aceleração de menor extensão. O perfil de elevação do percurso não permite um extenso regime de deriva, uma vez que o final do trajeto é caracterizado por uma rampa ascendente, levando a que o

comboio perca bastante velocidade ao não produzir tração. O perfil de velocidades da melhor solução é exibido na Figura 42. A ação das forças externas e a potência de que os motores do comboio necessitaram ao longo da viagem, são representadas na Figura 43 e 44, por essa ordem.

Tabela 15 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Cacém-Sintra).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	158,01	9409,28	9723,97	9,87	232,90
3	138,86	9409,28	9723,97	10,34	224,90
5	100,72	9409,28	9722,47	11,86	205,66

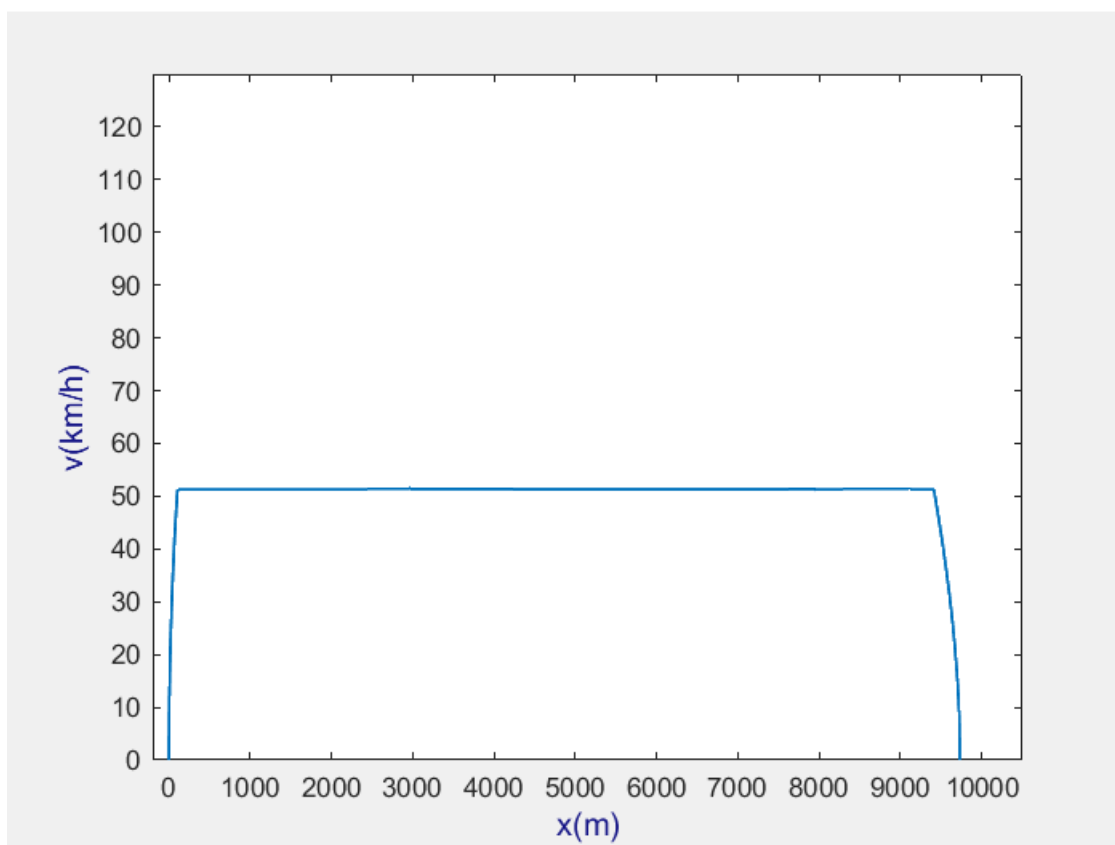


Figura 42 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).

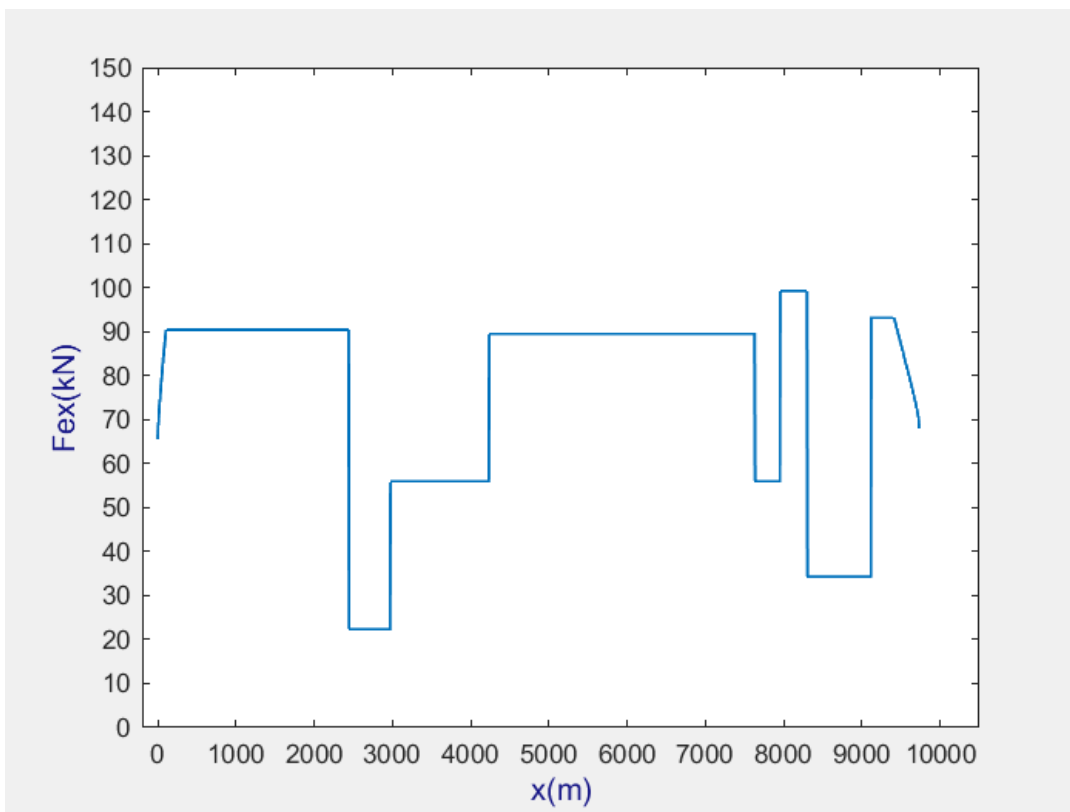


Figura 43 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).

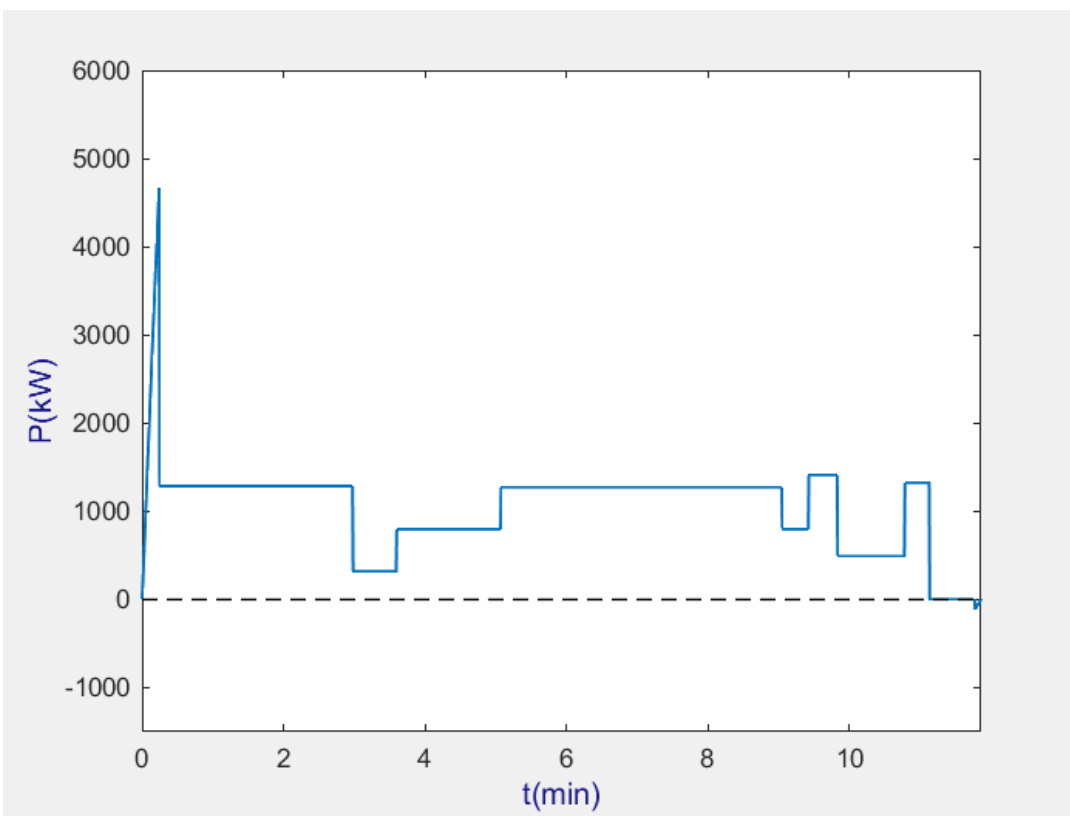


Figura 44 - Potência desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Cacém-Sintra).

5.4.2.3 Otimização do binómio energia - tempo

Como previamente referido, para executar a otimização mista é indispensável normalizar o tempo e o consumo energético das viagens correspondentes às soluções válidas. Para isto, foram analisadas a viagem mais rápida e a viagem mais eficiente energeticamente. As soluções correspondentes a estas viagens são exibidas na Tabela 16.

Tabela 16 - Soluções de referência (Cacém-Sintra).

Viagem mais rápida				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
693,06	9187,50	9321,73	6,63	339,27
Viagem mais energeticamente eficiente				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
100,72	9409,28	9722,47	11,86	205,66

Qualquer solução válida terá de apresentar uma duração de viagem entre os 6,63 e os 11,86 minutos. Da mesma forma que o consumo energético associado a qualquer solução válida situar-se-á entre os 205,66 e os 339,27 kWh. À semelhança do que foi feito para o trajeto Sintra – Cacém, ambos a duração da viagem e o consumo energético são considerados e têm o mesmo peso para a determinação da aptidão das soluções. Os resultados da aplicação da otimização mista são apresentados na Figura 45, que exhibe a melhor e a pior solução em cada geração ao longo do processo evolutivo. Ao ser gerada aleatoriamente a população inicial, destaca-se de entre os elementos da população uma solução cujo consumo energético equivale a 290,12 kWh e a duração de viagem corresponde a 7,49 minutos. A primeira geração não revelou alterações no que diz respeito à melhor solução, mas ao ser criada a segunda geração a melhor solução passou a refletir uma viagem de 7,61 minutos de duração e 284,88 kWh de consumo energético. A melhor solução encontrada pela ferramenta de otimização foi descoberta na terceira geração, esta solução condiz com uma viagem com 7,88 minutos de duração e 273,87 kWh de consumo energético.

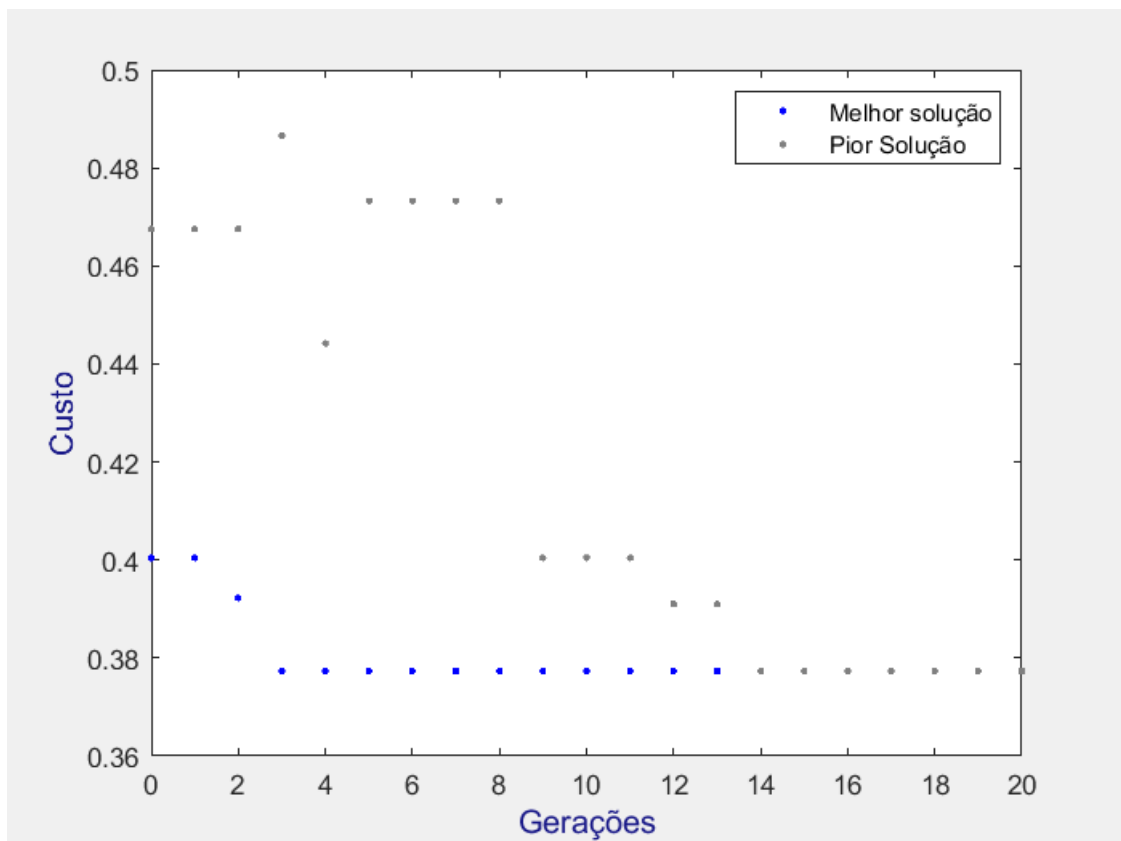


Figura 45 - Processo evolutivo da otimização mista (Cacém-Sintra).

A Tabela 17 apresenta as atualizações da melhor solução ao longo do processo evolutivo. Durante o processo evolutivo os genes X2 e X3 da melhor solução mantiveram-se praticamente iguais, porém o gene X1 sofreu uma redução progressiva do seu valor, implicando numa extensão menor do regime de aceleração e conseqüentemente uma velocidade de manutenção menor. Isto provocou uma redução no consumo energético e um aumento do tempo de viagem. Da mesma forma que os resultados das restantes otimizações para este trajeto apresentam regimes de deriva curtos devido à rampa ascendente que caracteriza o final do trajeto, o mesmo se verifica para a presente otimização. A Figura 46 exhibe o perfil de velocidades correspondente à melhor solução encontrada. O comboio acelera até aos 296,51 metro de viagem, onde inicia a fase de manutenção. A manutenção da velocidade termina aos 9254,93 metro e os motores deixam de gerar força de tração. Aos 9321,15 metro é iniciada a travagem. As Figura 47 e Figura 48 ilustram a ação da força F_{ex} e a utilização da potência por parte dos motores ao longo do percurso, respetivamente.

Tabela 17 - Evolução da solução equilibrada (Cacém-Sintra).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	360,14	9254,93	9321,15	7,49	290,12
2	337,85	9254,93	9330,41	7,61	284,88
3	296,51	9254,93	9321,15	7,88	273,87

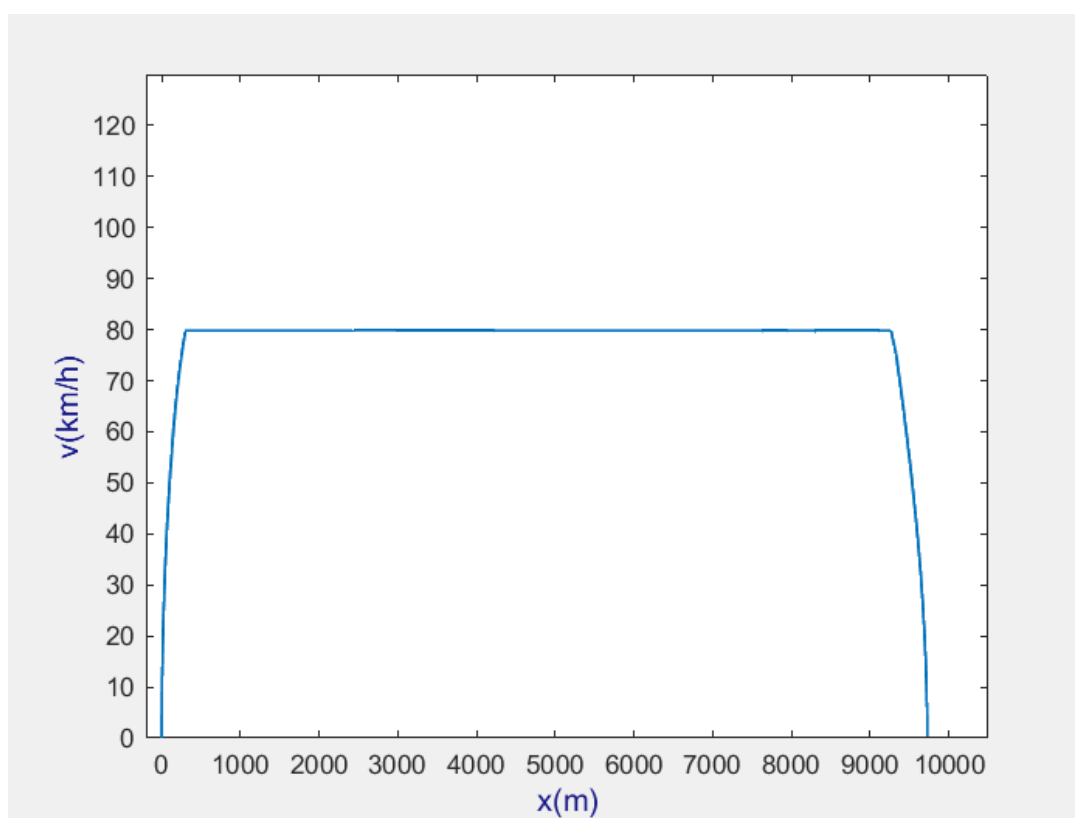


Figura 46 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Cacém-Sintra).

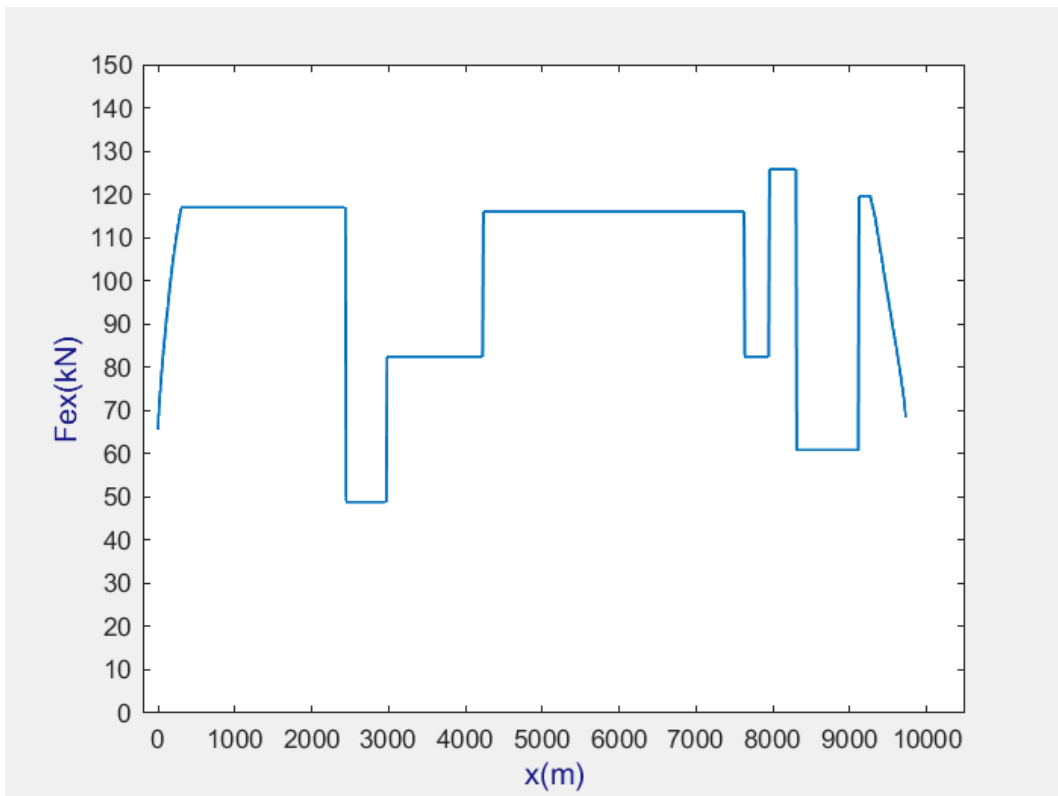


Figura 47 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Cacém-Sintra).

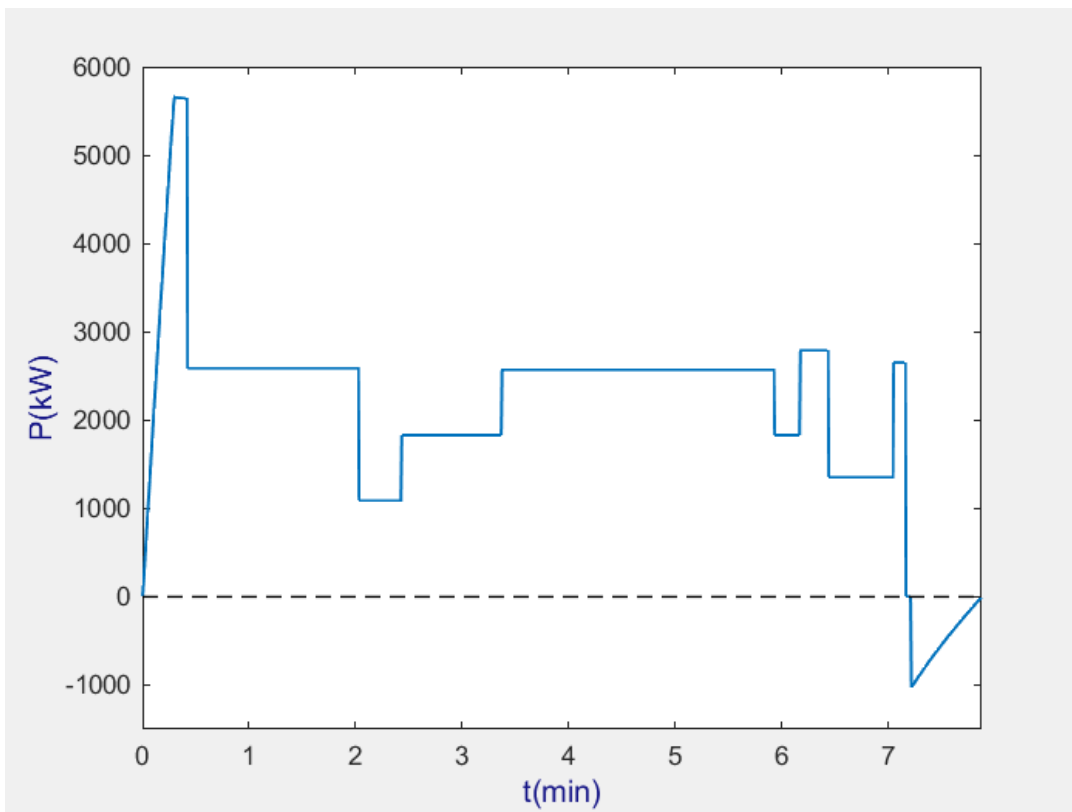


Figura 48 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Cacém-Sintra).

5.4.3 Cascais - Oeiras

Ao contrário dos percursos estudados anteriormente, Cascais - Oeiras trata-se de um percurso plano, quase sem declives. Os resultados da aplicação da ferramenta de otimização são apresentados de seguida.

5.4.3.1 Otimização do tempo de viagem

À semelhança dos percursos anteriores, com o objetivo de conhecer qual a viagem mais rápida para o troço Cascais – Oeiras aplicou-se a otimização do tempo de viagem disponibilizada pela ferramenta de otimização. A Figura 49 apresenta os resultados obtidos. Ao ser gerada a população inicial, de entre os 150 elementos destaca-se uma solução com um menor tempo de viagem. Esta solução tem a si associado um tempo de viagem de 6,74 minuto. A população inicial deu origem a uma nova população, onde se deteta uma aproximação subtil à solução ideal. A melhor solução da população em questão representa uma viagem de 6,72 minuto de duração. Com a transição para a segunda geração obteve-se um novo mínimo dentro da população, uma solução cujo tempo de viagem correspondia a 6,63 minuto. A terceira geração não foi exceção e obteve-se uma viagem de 6,60 minuto de duração. A viagem mais rápida foi descoberta na quarta geração, com uma duração de 6,58 minuto. Desse momento em diante o processo evolutivo estabilizou e a partir da décima quarta geração todos os elementos da população coincidiam com a viagem mais rápida.

A Tabela 18 evidencia as alterações que a melhor solução sofreu ao longo do processo evolutivo. É expectável que a viagem mais rápida corresponda a uma viagem com um período de aceleração que permita atingir a velocidade máxima permitida e um regime de manutenção extenso. Na população inicial já tinha sido encontrada uma boa solução. O aumento do valor do gene X1 permitiu atingir a velocidade máxima permitida na segunda geração. As três últimas atualizações da melhor solução são soluções bastante idênticas o que varia entre elas é a posição onde o comboio termina a viagem.

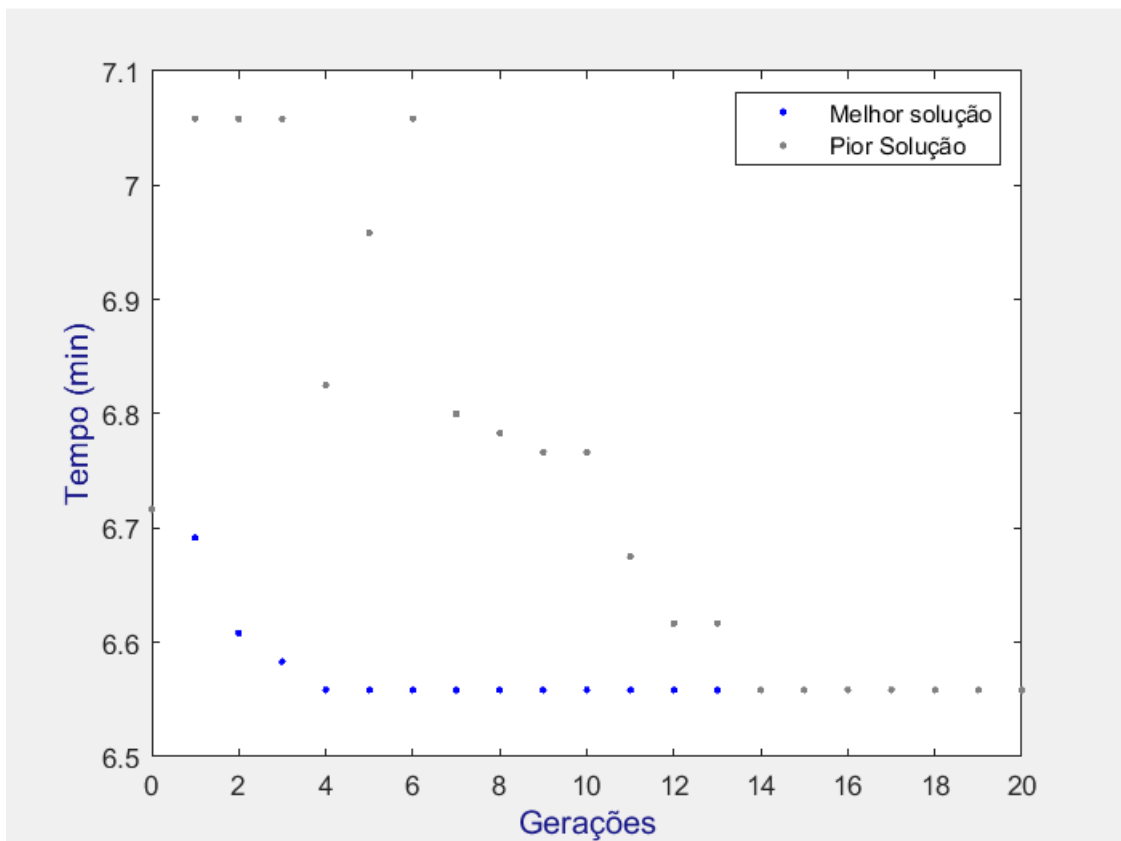


Figura 49 - Processo evolutivo da otimização do tempo de viagem (Cascais-Oeiras).

A Figura 50 ilustra o perfil de velocidades da viagem mais rápida. O veículo ferroviário acelera até aos 530,37 metro de viagem, de seguida mantém a velocidade até atingir os 8128,35 metro, onde inicia o regime de deriva. Aos 8635,50 metro o comboio começa a travar até terminar a viagem. A ação da força W_x ao longo do percurso é apresentada pela Figura 51. Como o trajeto é maioritariamente plano, a força W_x toma valores reduzidos durante grande parte da viagem. A ação de F_{ex} é exibida na Figura 52. A potência desenvolvida pelos motores da locomotiva ao longo da viagem é apresentada na Figura 53. O perfil horizontal da linha permite uma clara distinção dos regimes de condução com base na potência utilizada pelo comboio a cada instante.

Tabela 18 - Evolução da viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	479,40	8175,00	8704,81	6,74	259,47
1	479,40	8175,00	8635,50	6,72	258,99
2	530,37	8175,00	8704,81	6,63	268,16
3	530,37	8175,00	8635,50	6,60	267,66
4	530,37	8128,35	8635,50	6,58	266,56

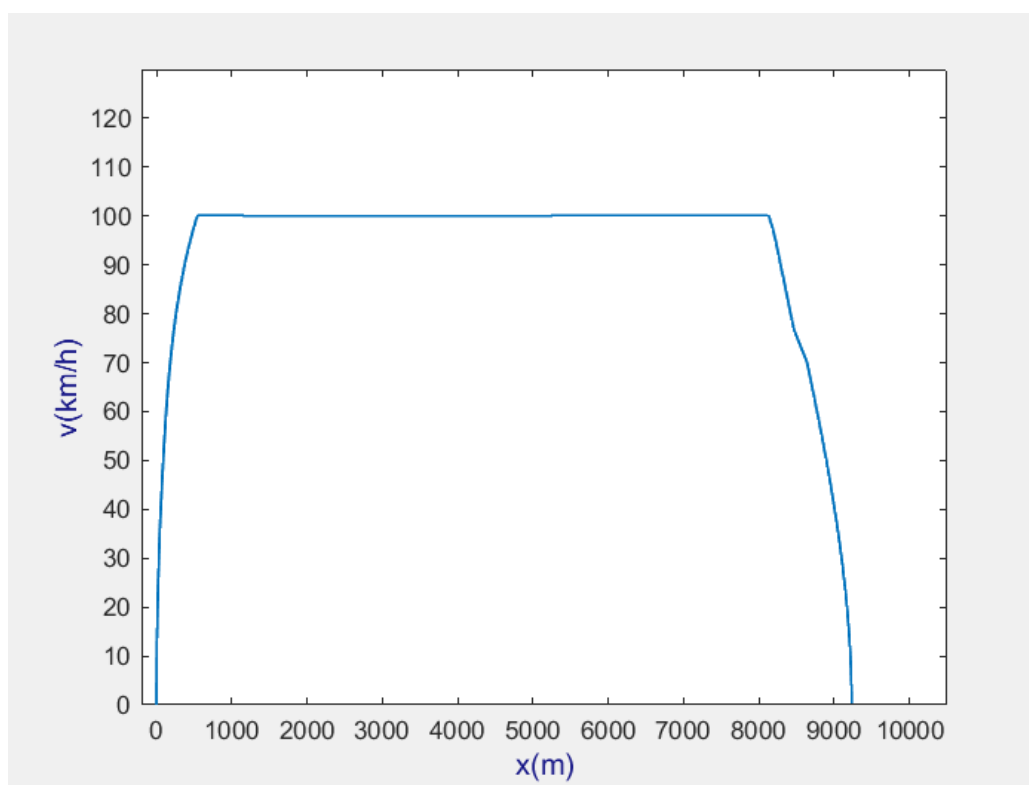


Figura 50 - Perfil de velocidades correspondente à viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).

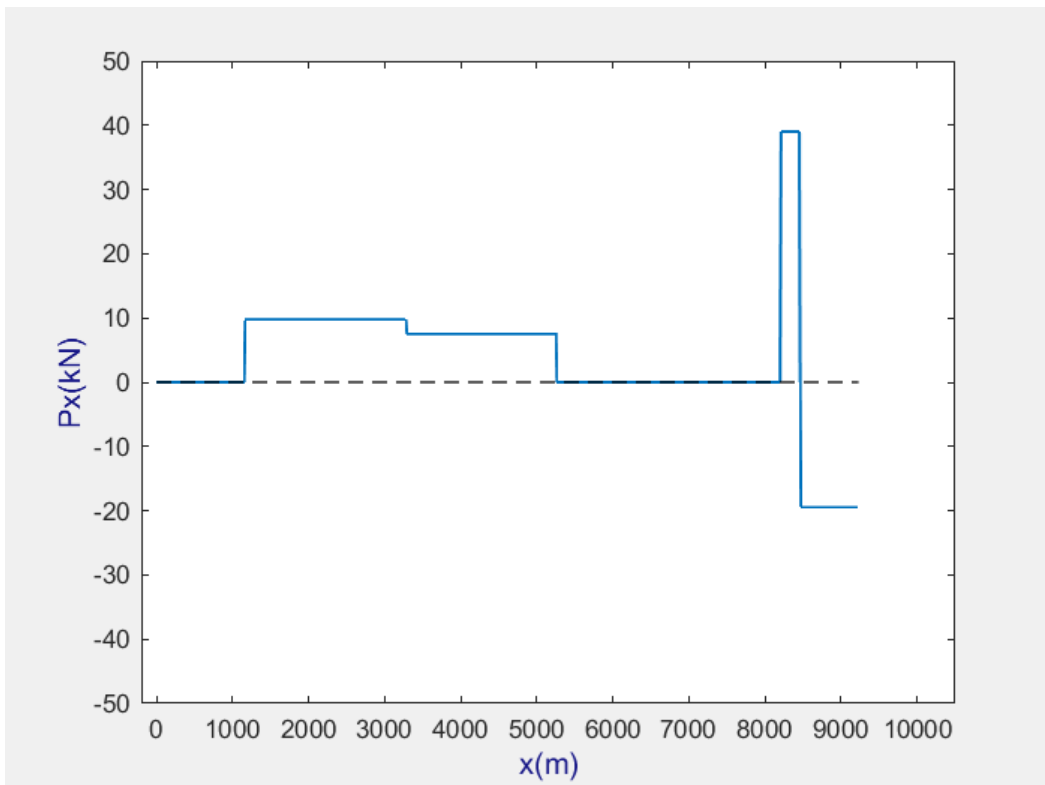


Figura 51 - Ação da componente horizontal do peso W_x (Cascais-Oeiras).

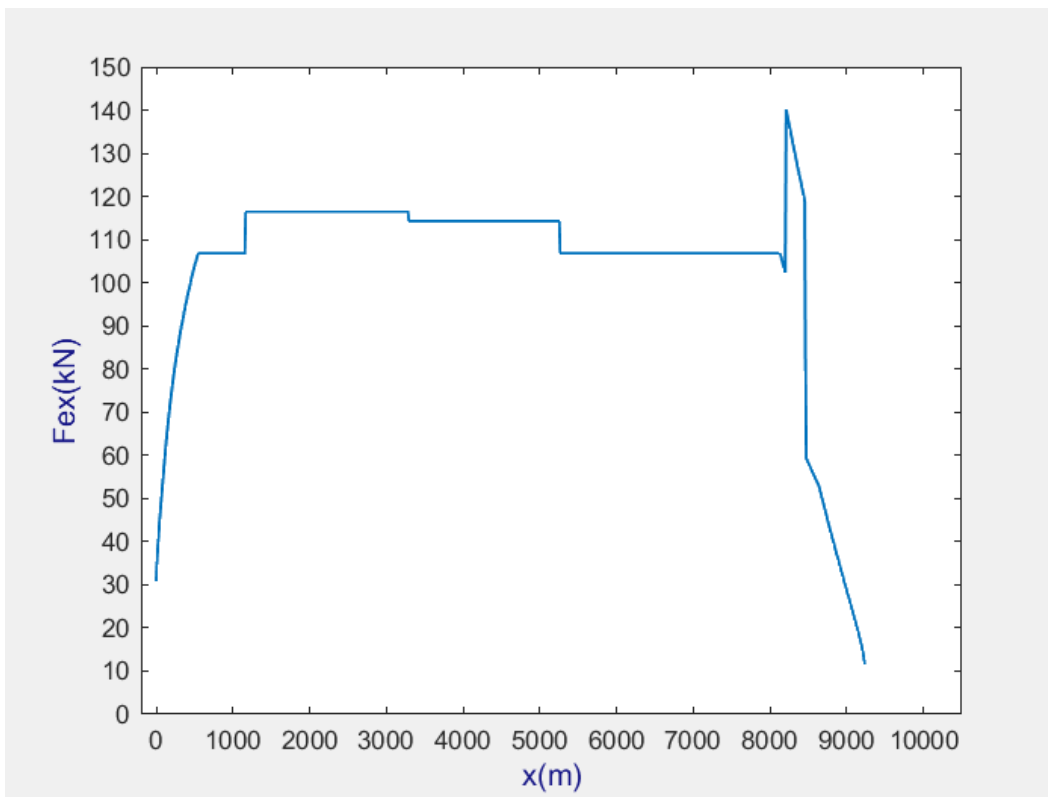


Figura 52 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).

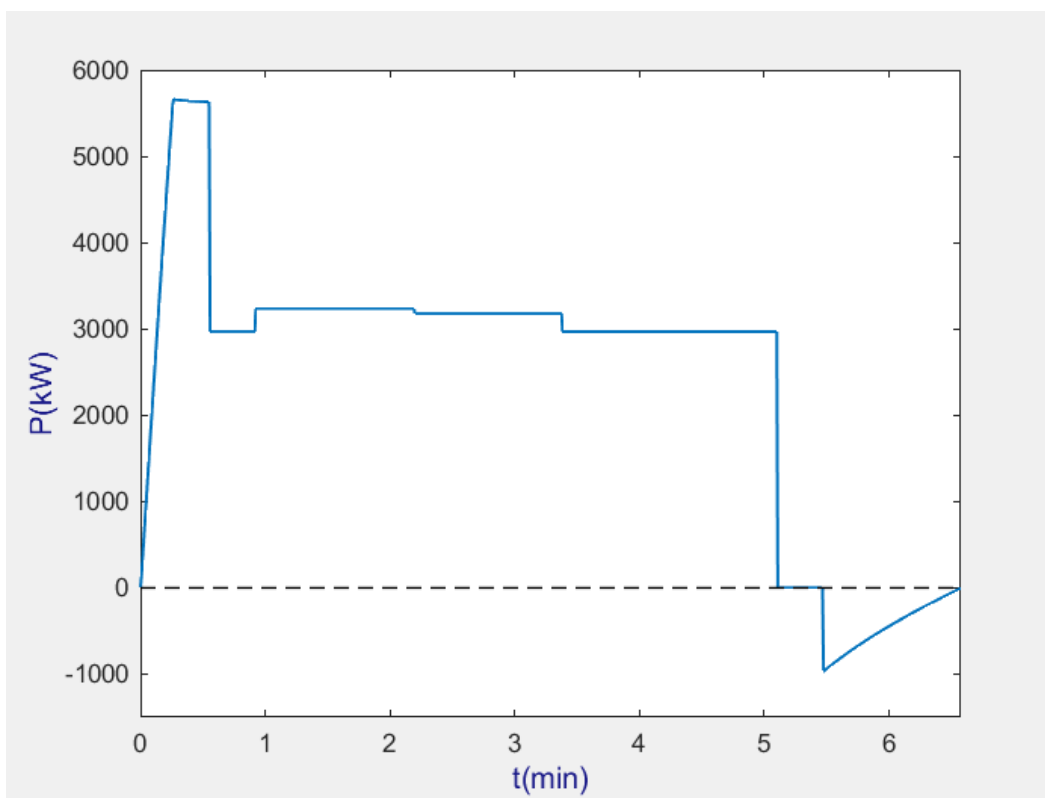


Figura 53 - Potência desenvolvida durante a viagem mais rápida (Cascais-Oeiras).

5.4.3.2 Otimização do consumo energético

Para determinar a viagem mais eficiente energeticamente para o trajeto Cascais – Oeiras, aplicou-se o algoritmo de otimização com o foco exclusivo no consumo energético das soluções geradas. A Figura 54 apresenta a evolução das várias gerações na busca pela viagem de menor consumo energético. Ao ser concebida a população inicial, uma das soluções geradas traduzia-se numa viagem cujo consumo era de 213,60 kWh. Este valor correspondia ao menor gasto energético de entre os restantes elementos da população. A transição para a primeira geração revelou mudanças dentro da população, contudo não houve uma alteração na viagem mais eficiente energeticamente. A segunda geração culminou na descoberta de um novo mínimo para o consumo energético de uma viagem. A solução em questão implica um consumo energético de 157,75 kWh. A última atualização da melhor solução sucedeu-se na sexta geração, a viagem em questão demandaria um consumo energético de 153,74 kWh. Durante o resto do processo evolutivo não foi descoberta uma solução melhor. Com o passar das gerações os indivíduos da população foram se aproximando da melhor solução, até que na décima sétima geração a população era composta na sua totalidade por elementos idênticos à melhor solução. Pela observação da Tabela 19 verifica-se que o encurtar da distância de aceleração ao longo do processo evolutivo, que permite a redução do consumo energético.

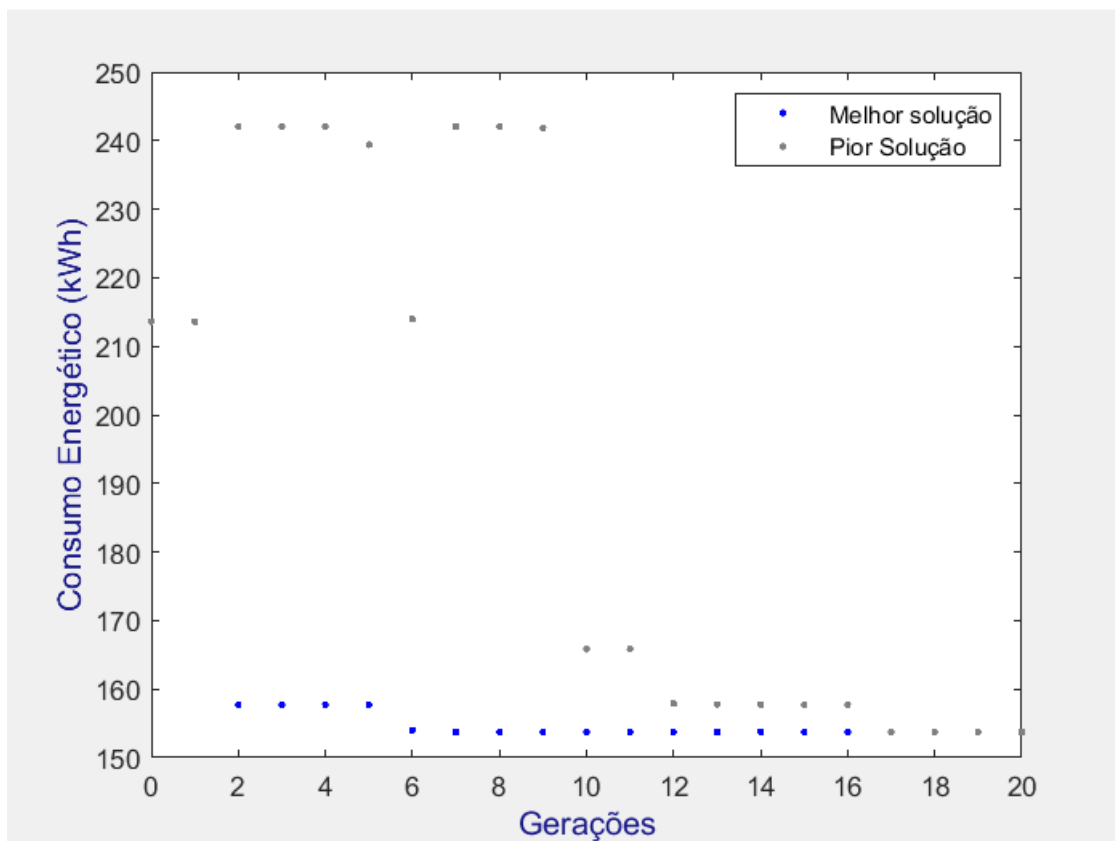


Figura 54 - Processo evolutivo da otimização do consumo energético (Cascais-Oeiras).

Tabela 19 - Evolução da viagem de menor consumo energético (Cascais-Oeiras).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
0	270,13	8025,54	9083,58	7,94	213,60
2	104,22	8408,64	9052,03	10,64	157,75
6	95,88	8408,64	9052,03	10,97	153,74

A Figura 55 representa o perfil de velocidades da viagem mais económica. O comboio acelera até aos 95,88 metro de viagem e mantém a velocidade até aos 8408,64 metro. A partir deste momento o veículo ferroviário inicia a deriva. Aos 9052,03 metro inicia-se a travagem. O declive descendente que caracteriza a parte final do trajeto permite que o comboio se mantenha em deriva durante 644 metro, maximizando a poupança energética. A ação de Fex e a utilização da potência ao longo do trajeto para a melhor solução são dadas pela Figura 56 e Figura 57, respetivamente.

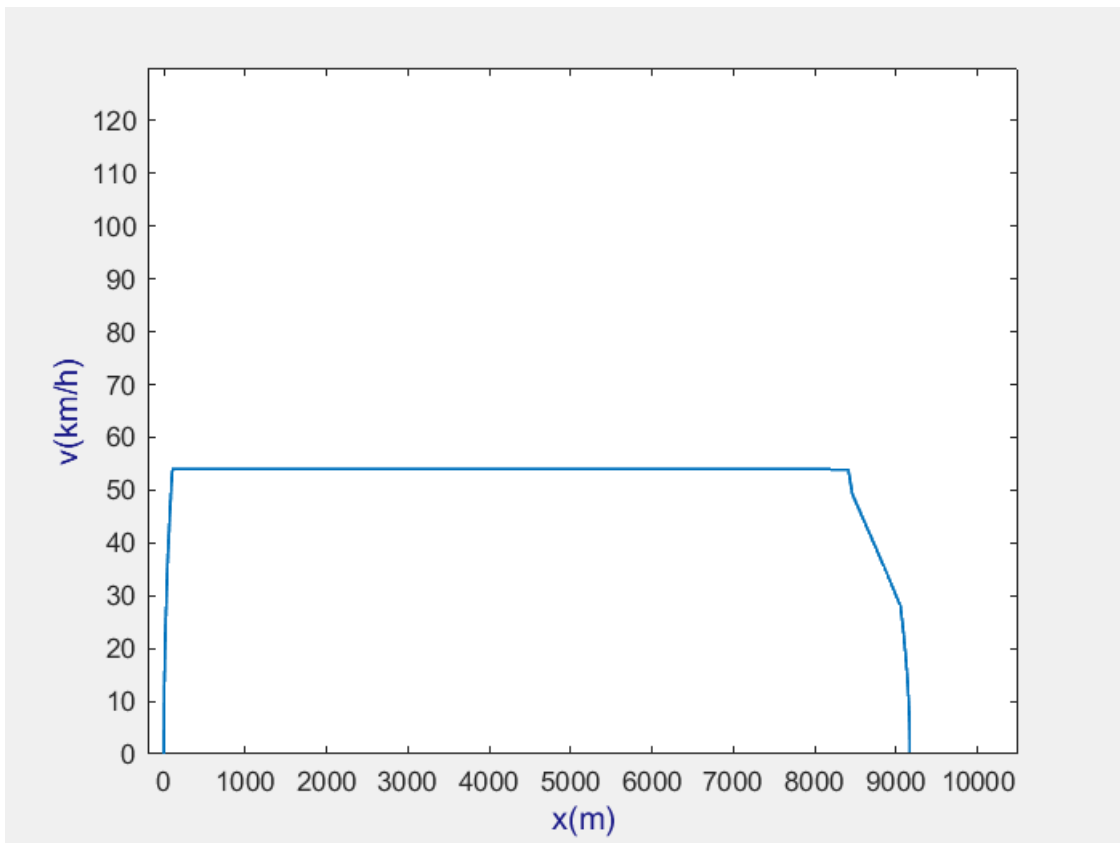


Figura 55 - Perfil de velocidades correspondente à viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras).

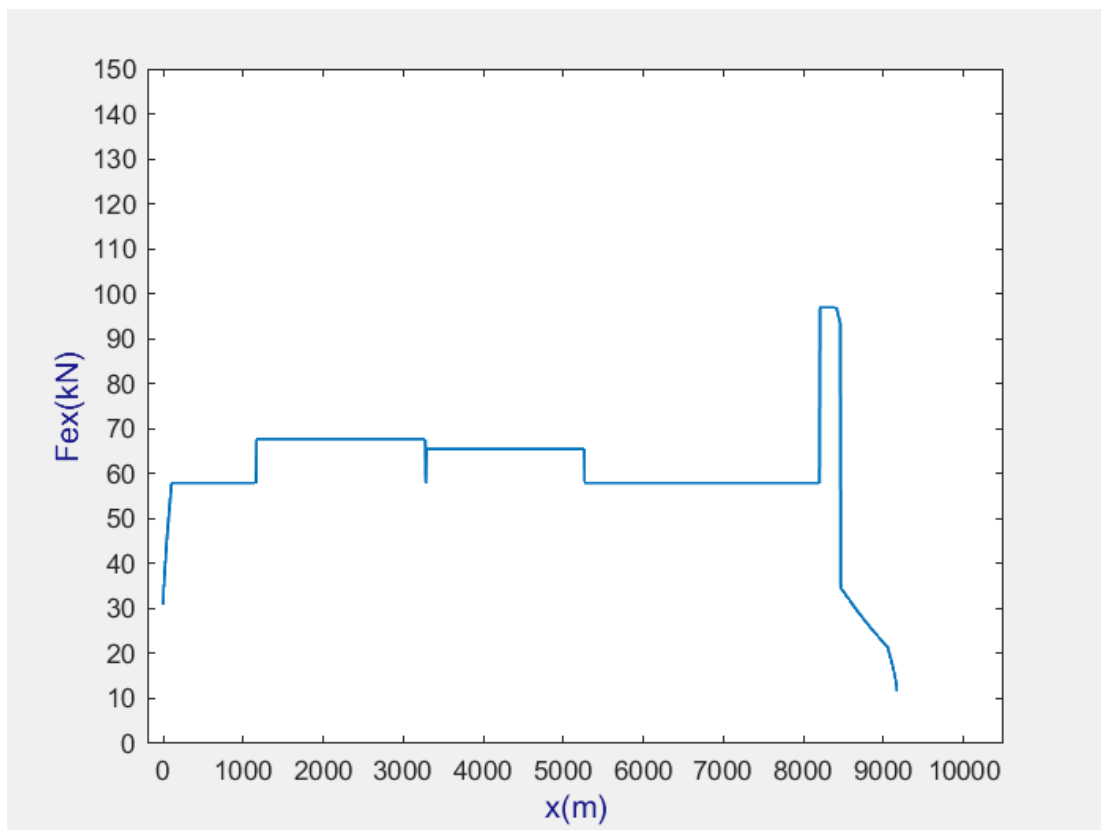


Figura 56 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras).

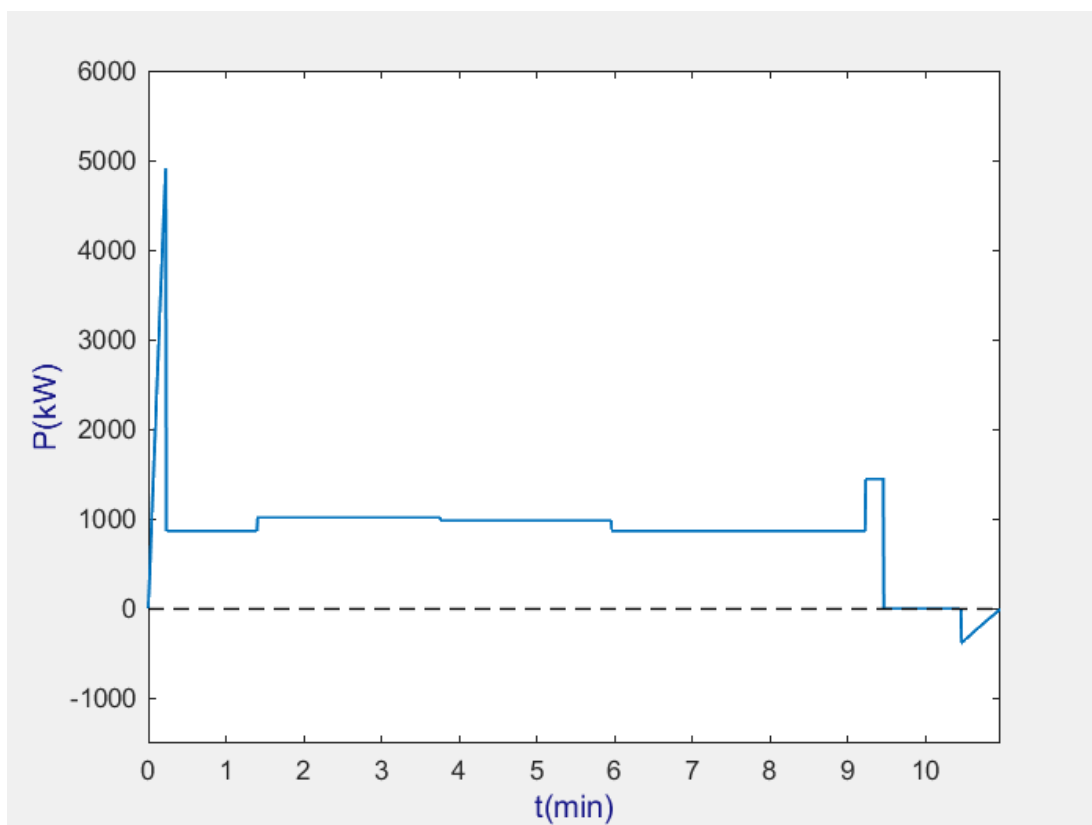


Figura 57 - Potência desenvolvida durante a viagem de menor consumo (Cascais-Oeiras).

5.4.3.3 Otimização do binómio energia - tempo

Para o percurso Cascais – Oeiras a aplicação da otimização do binómio energia - tempo é realizada da mesma forma que para os restantes. Por forma a ser possível normalizar as soluções geradas pelo algoritmo de otimização, é necessário ter em conta as soluções resultantes da otimização do tempo de viagem e da otimização do consumo. A Tabela 20 exhibe estas soluções e os respetivos consumos energéticos e tempos de viagem. Ao serem conhecidas as soluções de referência é possível então aplicar a otimização mista. Qualquer solução válida terá uma duração de viagem superior a 6,58 minuto e inferior a 10,97 minuto, o consumo energético situar-se-á entre os 153,74 kWh e os 266,56 kWh. Os resultados da otimização encontram-se expressos na Figura 58. Pela observação da figura é possível perceber quando ocorreram as atualizações das características correspondentes à melhor solução até ao momento. A melhor solução de entre os diversos indivíduos da população inicial equivalia a uma viagem de 6,73 minuto e de 263,99 kWh de consumo energético. Uma viagem de custo combinado inferior à referida anteriormente foi descoberta com a criação da primeira geração, com uma duração de 6,70 minuto e um custo energético de 260,09 kWh. A transição para a segunda geração não resultou em nenhuma atualização da melhor solução, contudo na terceira geração

identificou-se uma viagem cuja duração correspondia a 6,88 minuto e o custo energético era de 248,58 kWh. Nas seguintes gerações houve alterações nas populações, mas a melhor solução não sofreu alterações até se atingir a sétima geração. A população dessa geração registou uma solução com 8,41 minuto de duração e 195,05 kWh de consumo energético e assim tomou o lugar de melhor solução. A melhor solução para o problema foi descoberta na oitava geração e coincide com uma viagem de 8,40 minuto de tempo de viagem e 194,82 kWh de consumo energético. De este momento em diante os indivíduos foram se transformando até serem idênticos à melhor solução encontrada. Na décima oitava geração todos os elementos da população representavam a melhor solução encontrada. Como previsto todas as soluções estão dentro dos intervalos definidos pelas soluções de referência.

Tabela 20 - Soluções de referência (Cascais-Oeiras).

Viagem mais rápida				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
530,37	8128,35	8635,5	6,58	266,56
Viagem mais energeticamente eficiente				
X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
95,88	8408,64	9052,03	10,97	153,74

A evolução da melhor solução ao longo do tempo é dada pela Tabela 21. O perfil de velocidades correspondente à melhor solução encontrada pelo algoritmo de otimização é apresentado na Figura 59. O veículo ferroviário acelera até aos 192,91 metro de viagem, onde inicia o regime de manutenção. Ao atingir os 8352,23 metro o comboio inicia o processo de desaceleração natural e aos 8859,59 metro entra no regime de travagem. Figura 60 e Figura 61 representam a ação das forças externas ao longo da viagem e a utilização da potência por parte da locomotiva para a melhor solução, respetivamente.

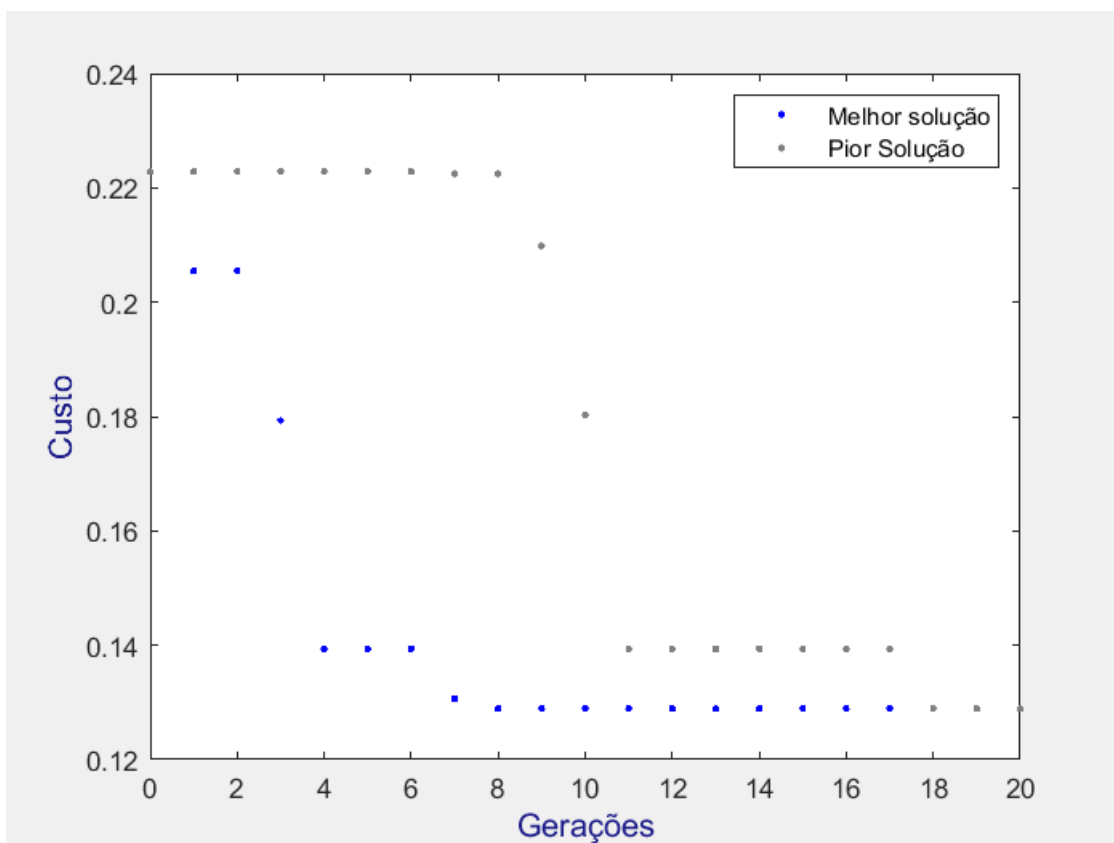


Figura 58 - Processo evolutivo da otimização mista (Cascais-Oeiras).

Tabela 21 - Evolução da solução equilibrada (Cascais-Oeiras).

Nº Geração	X1(m)	X2(m)	X3(m)	Δt (min)	E(kWh)
0	485,93	8351,98	8458,69	6,73	263,99
1	507,57	7934,09	8859,33	6,70	260,09
3	434,33	7915,36	8859,33	6,88	248,58
4	231,99	8351,98	8859,33	7,98	208,85
7	192,91	8352,48	8859,33	8,41	195,05
8	192,91	8352,23	8859,59	8,40	194,82

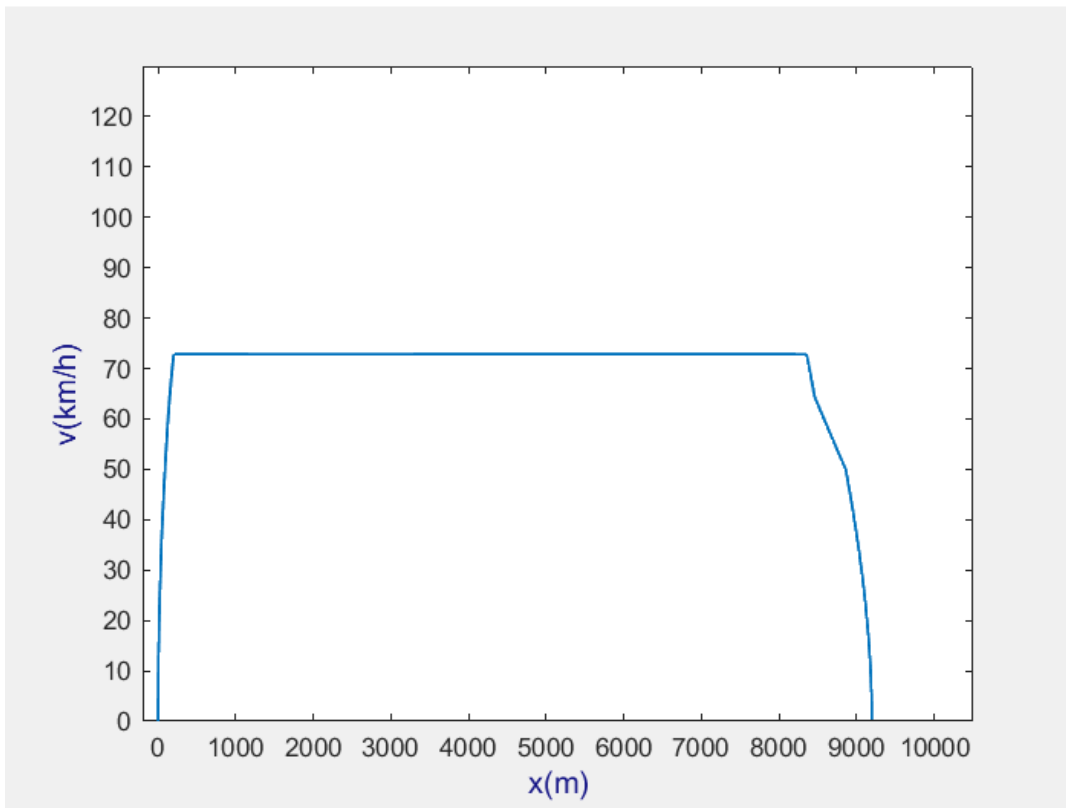


Figura 59 - Perfil de velocidades correspondente à solução mais equilibrada (Cascais-Oeiras).

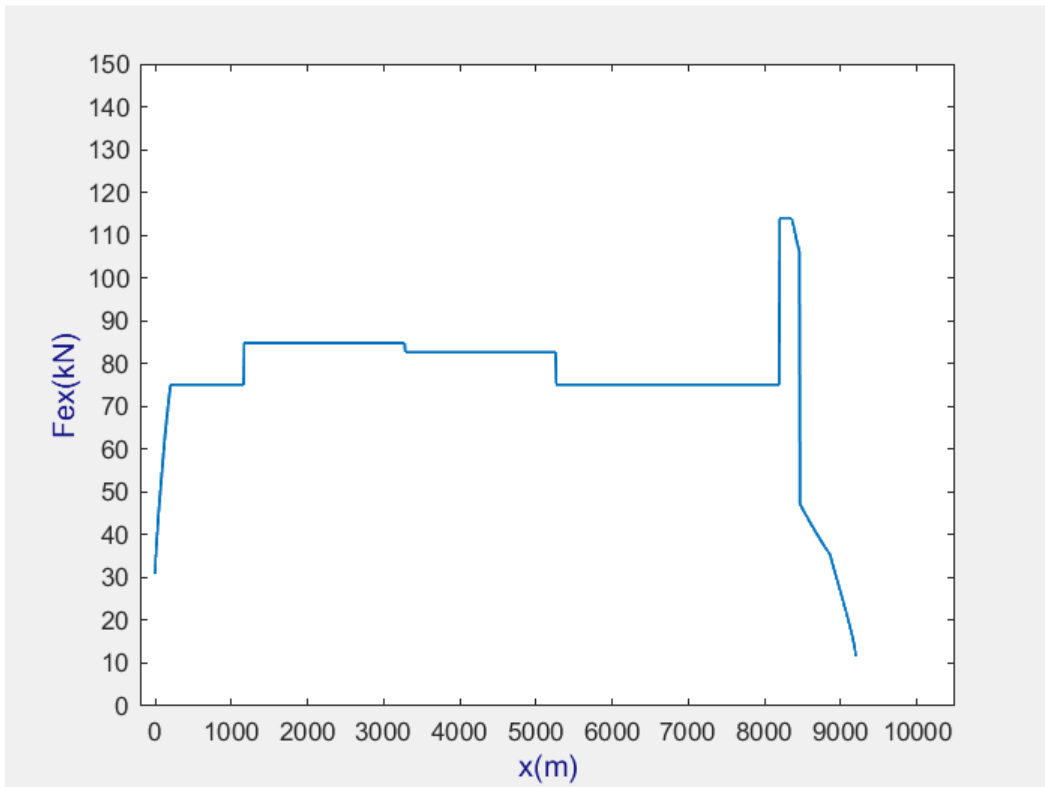


Figura 60 - Ação das forças externas F_{ex} durante a viagem mais equilibrada (Cascais-Oeiras).

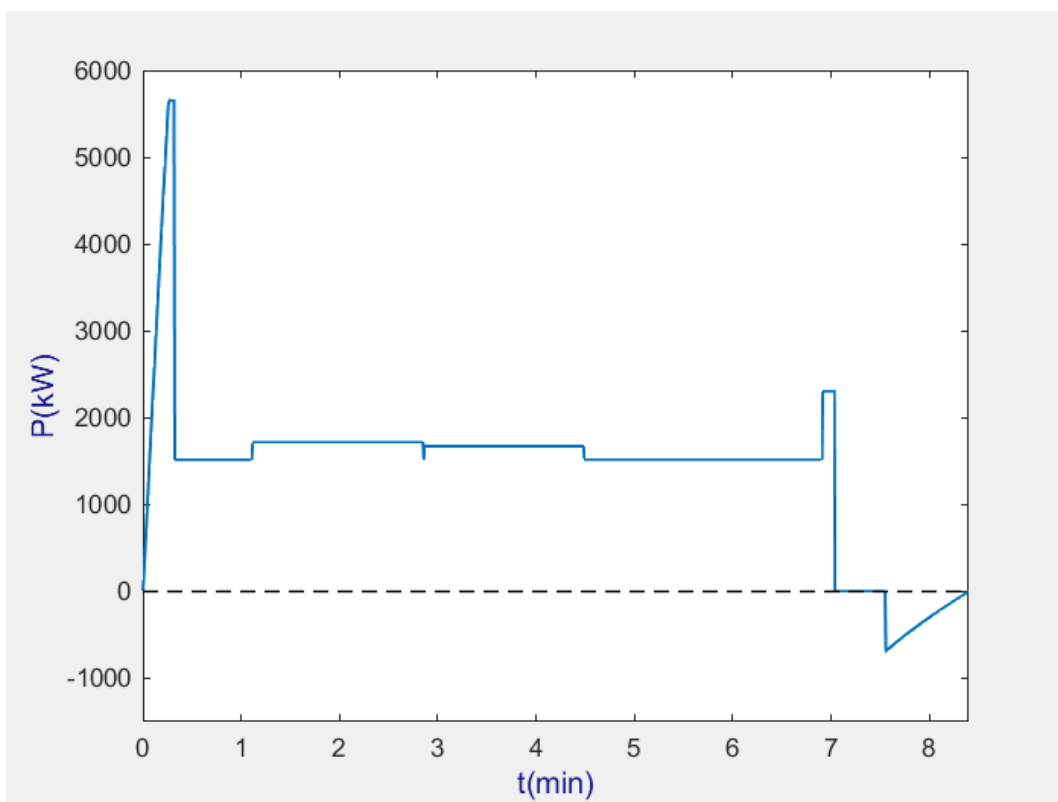


Figura 61 - Potência desenvolvida durante a viagem mais equilibrada (Cascais-Oeiras).

5.4.4 Comparação dos resultados

Os resultados da aplicação da ferramenta de otimização aos três cenários propostos são apresentados abaixo. Para permitir a comparação dos resultados das diferentes otimizações para cada percurso, são apresentadas as tabelas com a melhor solução encontrada para cada otimização executada. Também são apresentados os gráficos dos perfis de velocidade, da potência desenvolvida em função do tempo de viagem e da potência desenvolvida em função da distância. Para todos os gráficos, os resultados da otimização do tempo de viagem são apresentados a azul, os da otimização do consumo energético a verde e os da otimização do binómio energia - tempo (ou mista) a vermelho. A Tabela 22 exibe as soluções resultantes das otimizações aplicadas ao percurso Sintra - Cacém. A Figura 62 representa os perfis de velocidades, enquanto as Figura 63 e Figura 64 exibem a potência desenvolvida pelo comboio em função da distância e em função do tempo, respetivamente para este percurso. A Tabela 23 apresenta as soluções obtidas para o percurso Cacém - Sintra. A Figura 65 expressa os perfis de velocidade da melhor solução encontrada para cada otimização deste percurso. A potência desenvolvida pelo veículo ferroviário em função da distância e do tempo é dada pela Figura 66 e pela Figura 67, por esta ordem. Por último, para o percurso Cascais - Oeiras, as soluções

encontradas para cada otimização são especificadas pela Tabela 24. As Figura 68, Figura 69 e Figura 70 representam os perfis de velocidade, a potência desenvolvida pelo comboio em função da distância e a potência desenvolvida em função do tempo, por esta ordem.

Tabela 22 - Otimizações do percurso Sintra-Cacém

Tipo de otimização	X1(m)	X2(m)	X3(m)	Δt (min)	E(kWh)
Tempo de viagem	432,77	8013,75	9238,82	7,24	212,96
Consumo energético	77,5	8866,28	9386,4	11,93	94,24
Mista	178,86	8013,75	9386,4	9,09	139,53

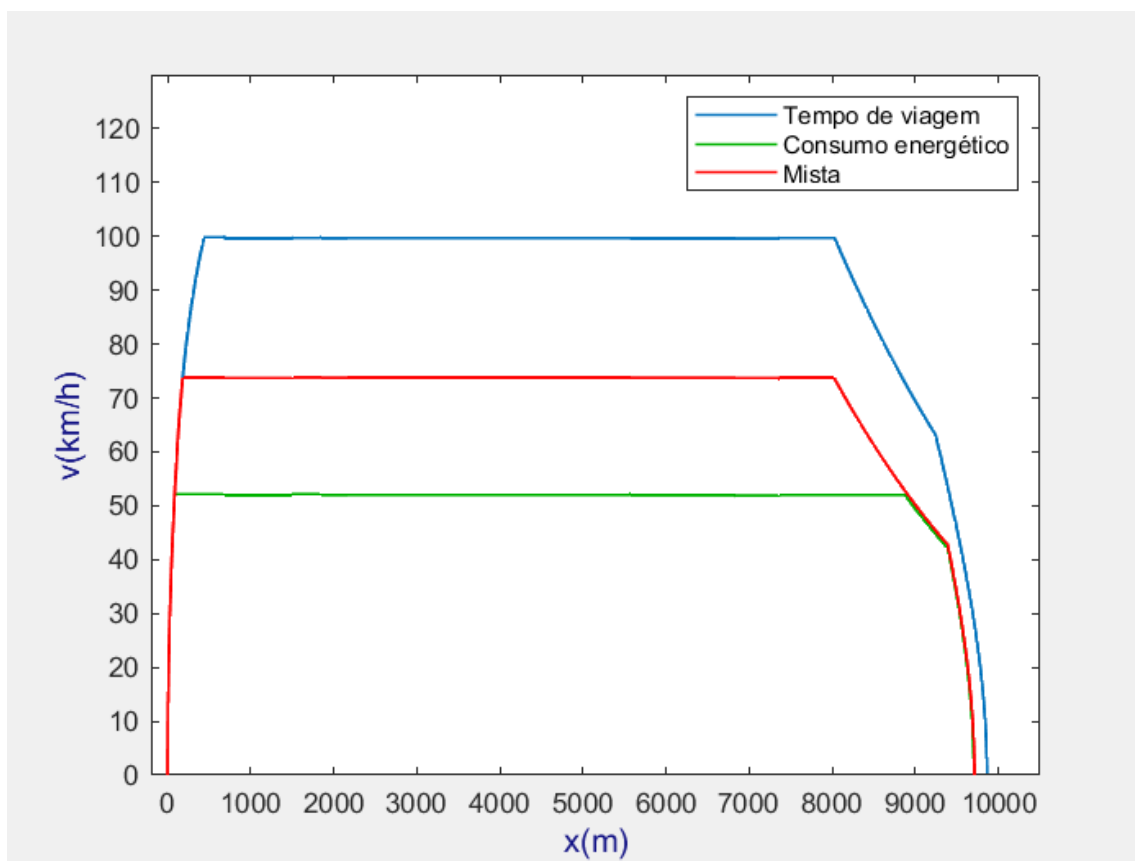


Figura 62 - Perfis de velocidade para as otimizações do percurso Sintra-Cacém.

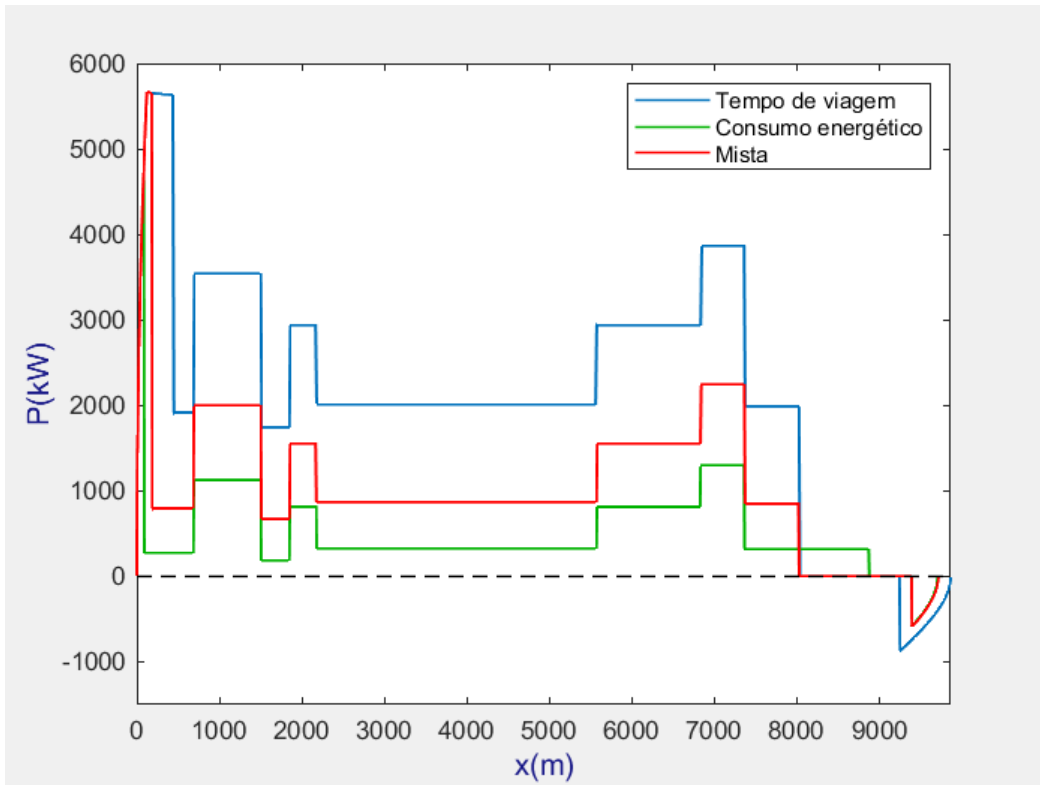


Figura 63 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Sintra-Cacém.

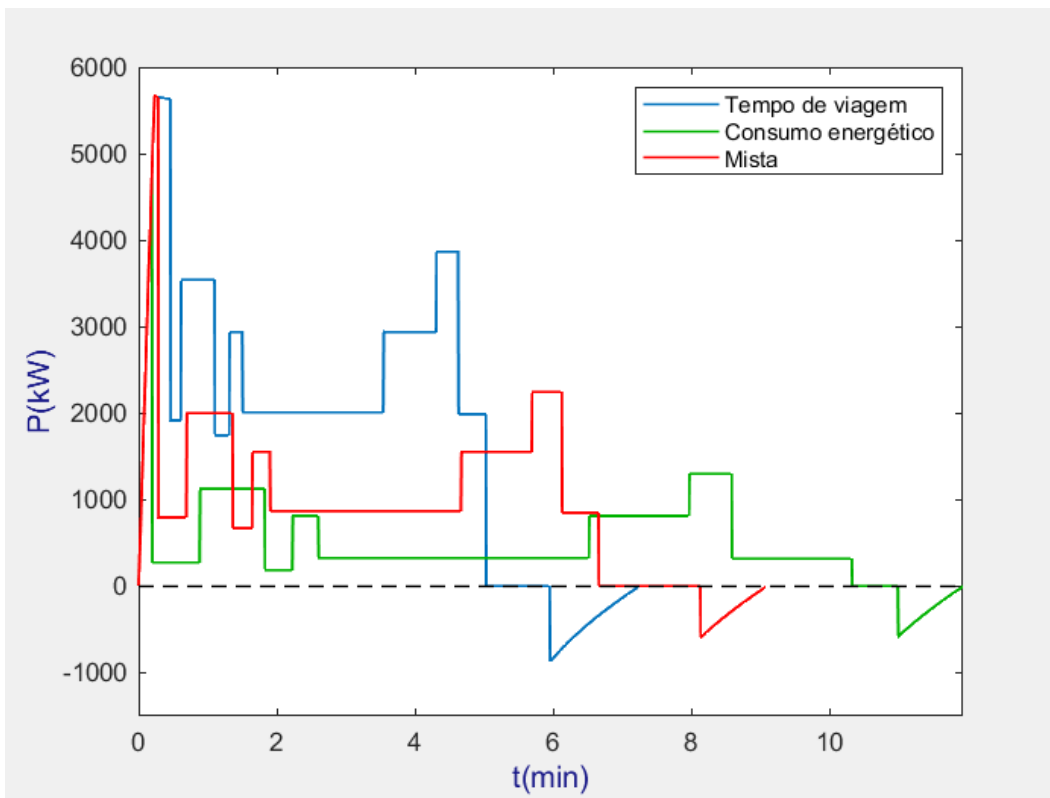


Figura 64 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Sintra-Cacém.

Tabela 23 - Otimizações do percurso Cacém-Sintra.

Tipo de otimização	X1(m)	X2(m)	X3(m)	Δt (min)	E(kWh)
Tempo de viagem	693,06	9187,5	9321,73	6,63	339,27
Consumo energético	100,72	9409,28	9722,47	11,86	205,66
Mista	296,51	9254,93	9321,15	7,88	273,87

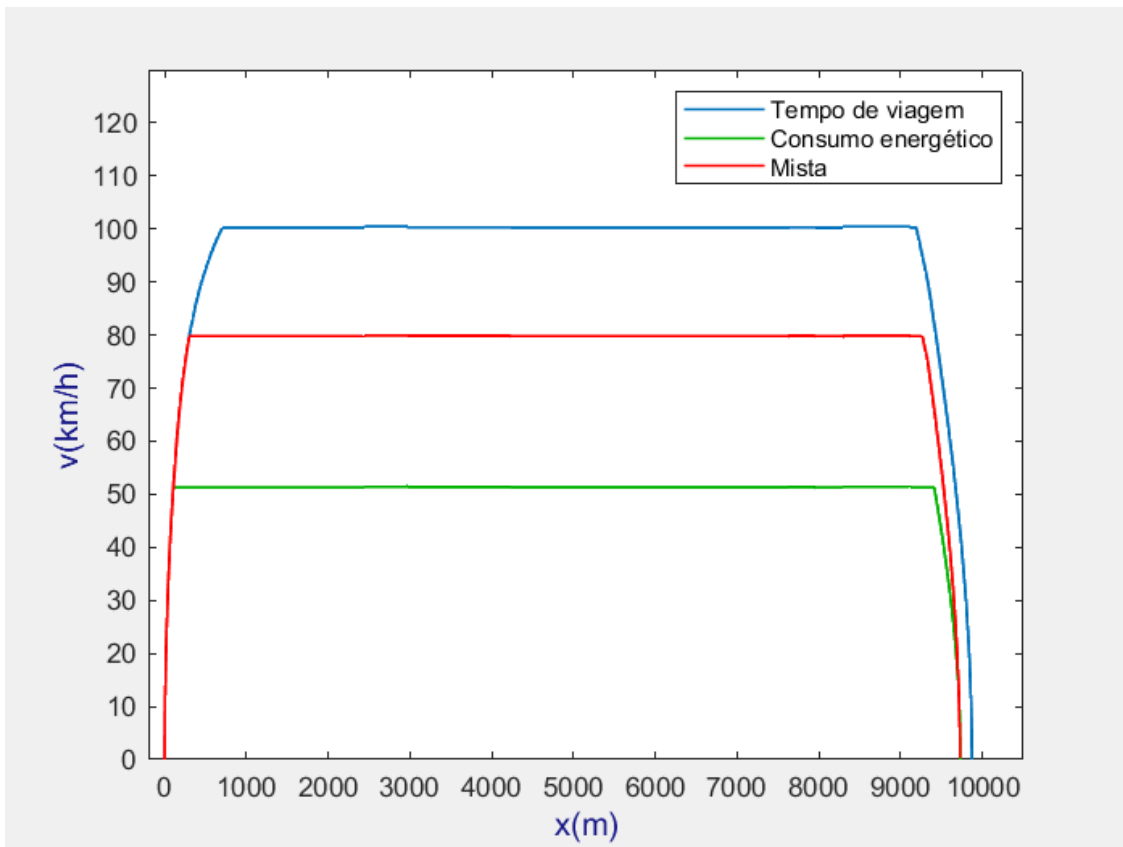


Figura 65 - Perfis de velocidade para as otimizações do percurso Cacém-Sintra.

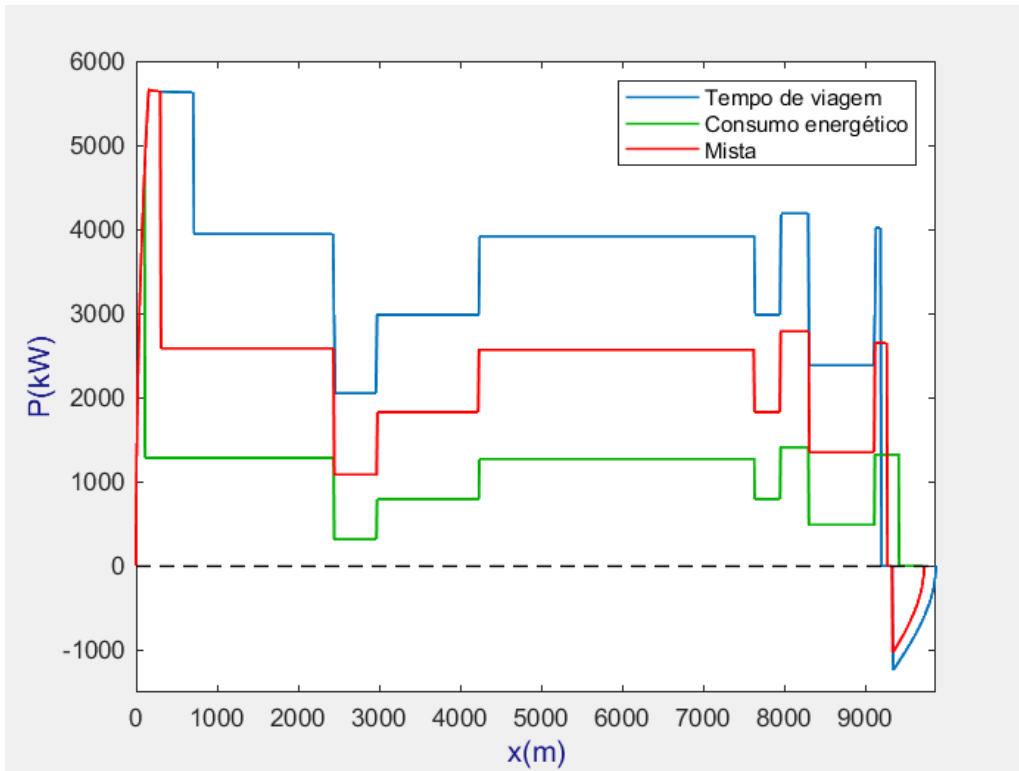


Figura 66 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Cacém-Sintra.

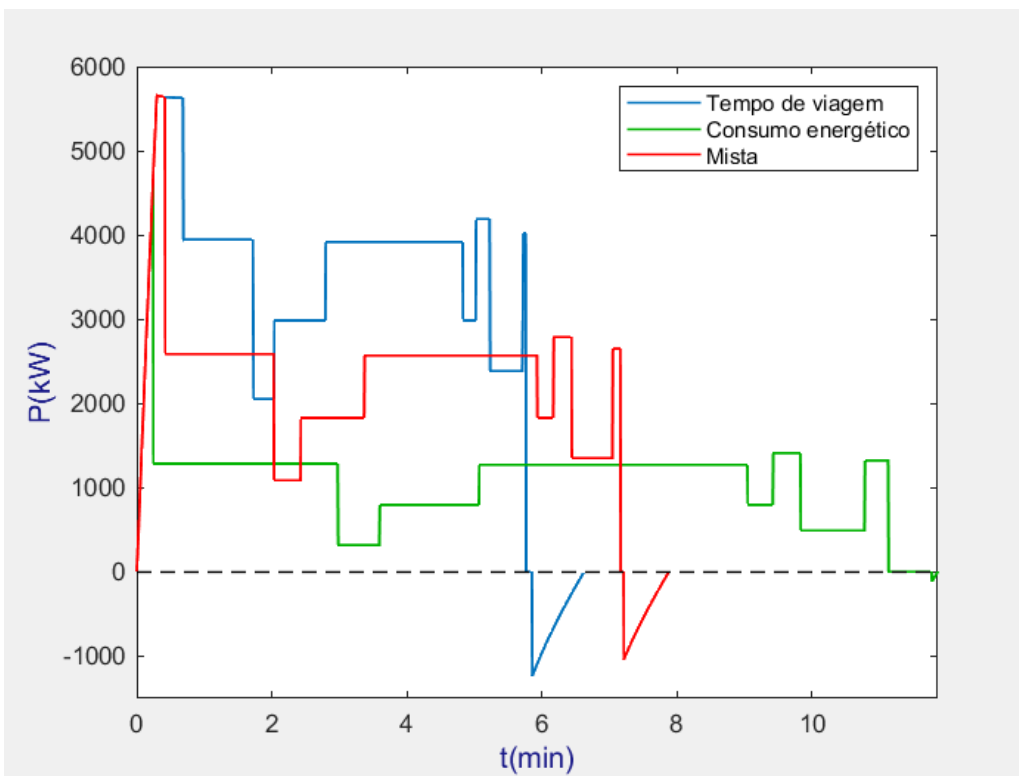


Figura 67 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Cacém-Sintra.

Tabela 24 - Otimizações do percurso Cascais-Oeiras.

Tipo de otimização	X1(m)	X2(m)	X3(m)	$\Delta t(\text{min})$	E(kWh)
Tempo de viagem	530,37	8128,35	8635,5	6,58	266,56
Consumo energético	95,88	8408,64	9052,03	10,97	153,74
Mista	192,91	8352,23	8859,59	8,40	194,82

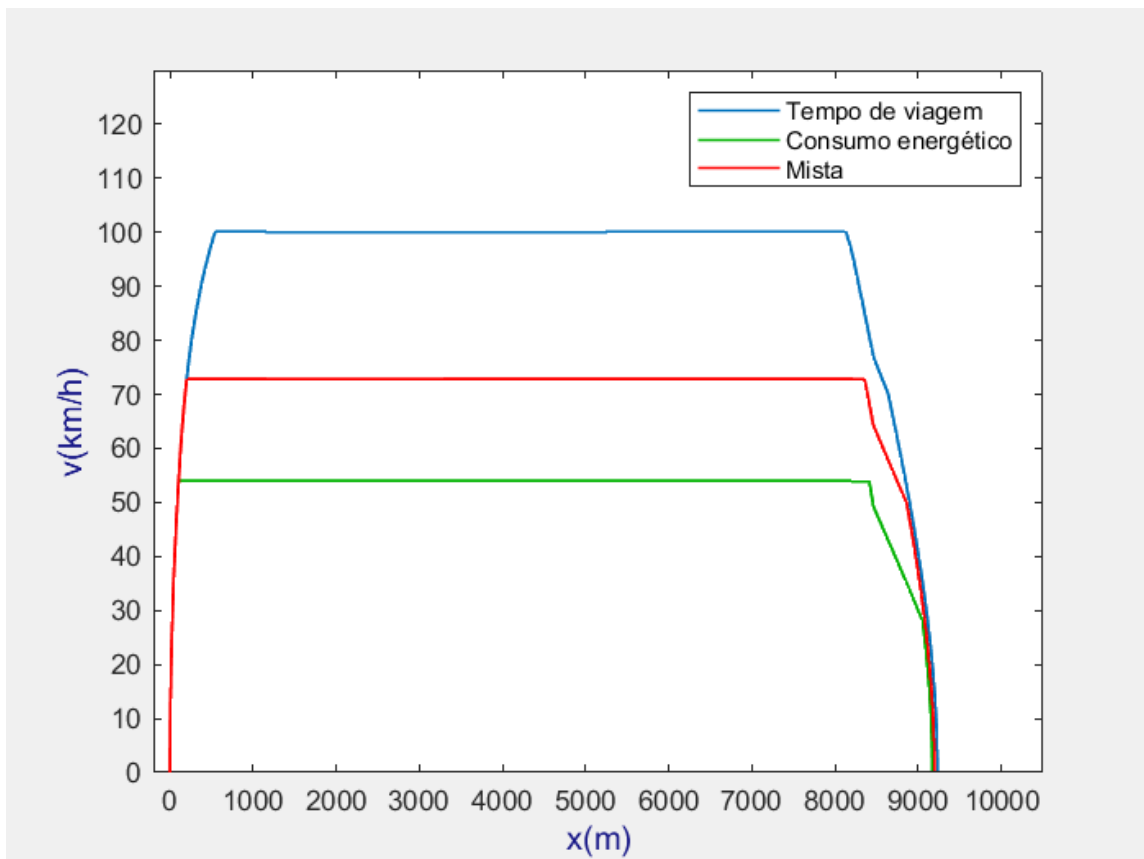


Figura 68 - Perfis de velocidade para o percurso Cascais-Oeiras.

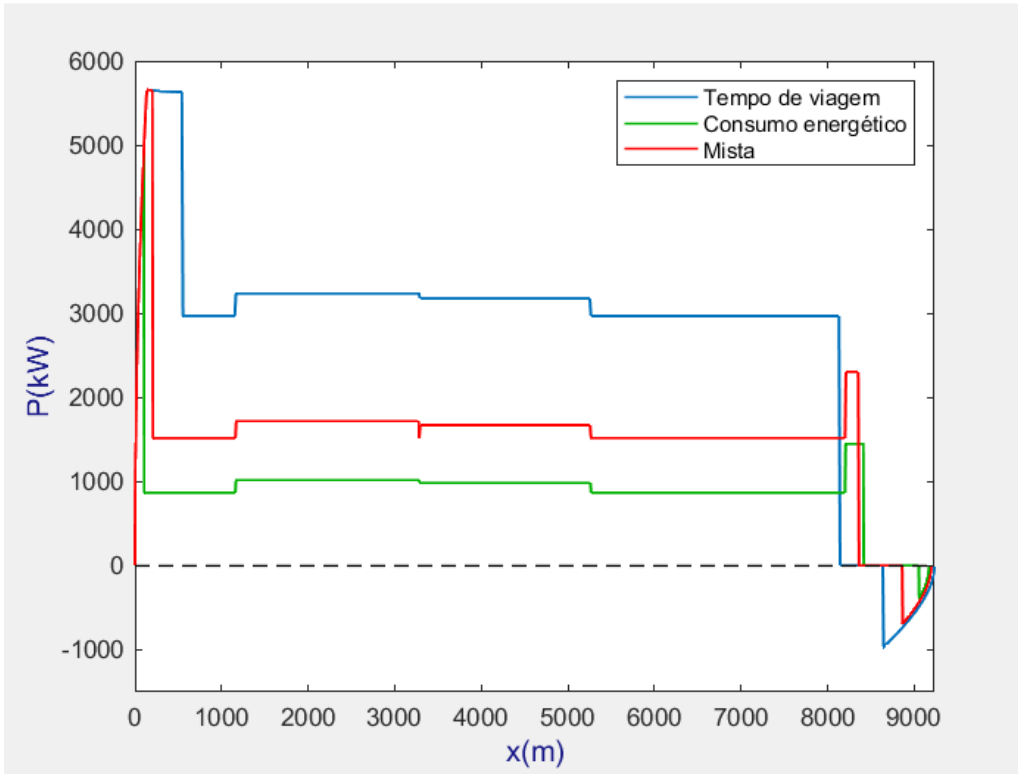


Figura 69 - Potência desenvolvida em função da distância para o percurso Cascais-Oeiras.

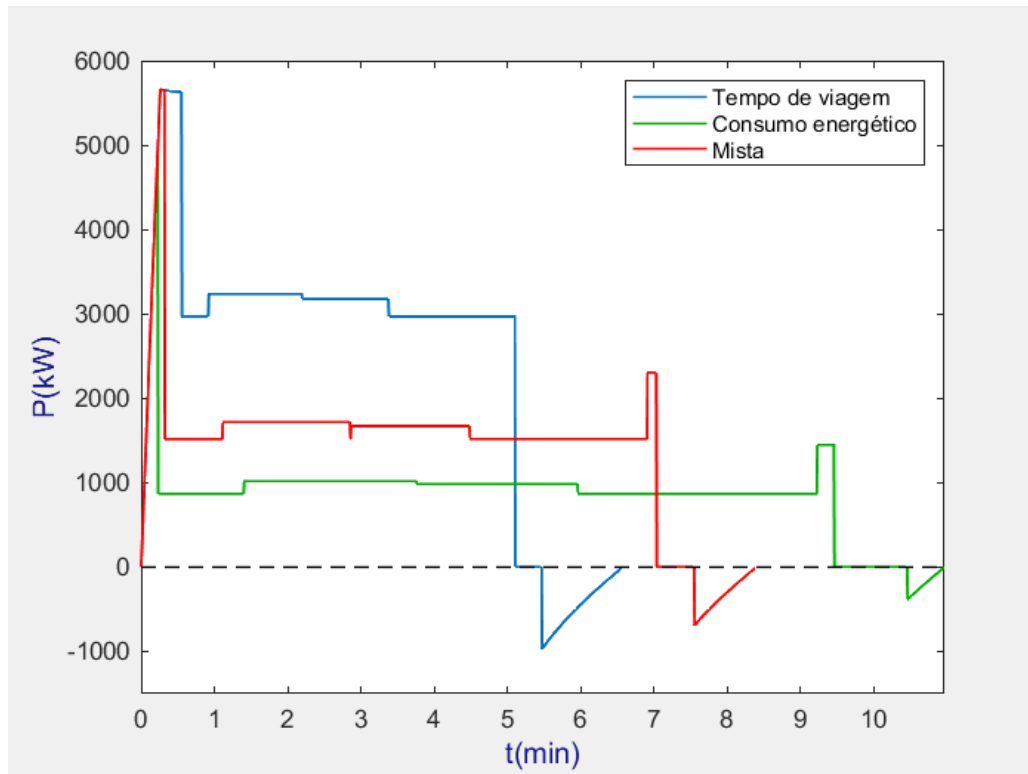


Figura 70 - Potência desenvolvida em função do tempo para o percurso Cascais-Oeiras.

CONCLUSÃO

Sendo o setor ferroviário bastante importante para a mobilidade das populações e para o transporte de mercadorias, a otimização das viagens na ferrovia pode ter consequências positivas a nível económico, social e ambiental. De modo a dar resposta a esta questão, foi desenvolvida uma ferramenta de otimização que permite otimizar qualquer viagem ferroviária quanto ao tempo de viagem, quanto ao consumo energético e considerando ainda uma otimização combinada de ambas as anteriores.

Para demonstrar o funcionamento da ferramenta desenvolvida, foram escolhidos dois troços, um pertencente à linha de Sintra e outro pertencente à linha de Cascais. Para estes dois troços foram definidos três cenários. Para a linha de Sintra foi otimizada a deslocação de um comboio entre Sintra e Cacém nos dois sentidos e para a linha de Cascais otimizou-se o percurso Cascais - Oeiras (apenas no sentido Cascais - Oeiras). Os resultados obtidos a partir da utilização da ferramenta desenvolvida permitem concluir que, as viagens mais rápidas são menos eficientes do ponto de vista energético e que as viagens mais económicas apresentam maiores tempos de viagem. Para além disto, as soluções obtidas através da execução da otimização do binómio energia - tempo (com $k=0,5$), correspondem a viagens cujo consumo energético e tempo de viagem apresentam valores intermédios. A velocidade de cruzeiro atingida pelo veículo ferroviário neste tipo de otimização, corresponde a um valor aproximadamente médio entre as velocidades máxima e mínima estabelecidas. Com base nos resultados obtidos, também se depreende que as simulações das viagens ferroviárias revelam resultados precisos, sendo evidente o impacto das rampas na dinâmica do veículo e na energia consumida pelo comboio.

6.1 Trabalhos futuros

A ferramenta de otimização desenvolvida foi projetada para permitir futuras modificações. Existem dois tipos de trabalhos futuros a considerar:

- A inclusão das componentes elétricas do sistema ferroviário na ferramenta de otimização;
- A inclusão de componentes adicionais de forças resistivas, como a contemplação da resistência ao movimento provocada pela existência de curvas no trajeto.

Note-se que ambas as alterações se destinam ao simulador, não tendo estas impacto no funcionamento ou na arquitetura global da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- Açıkbaş, S., & Söylemez, M. T. (2008). Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. *IET Electric Power Applications*, 2(3), 172–182. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20070381>
- Alonso, M., & Finn, E. J. (1992). Física. In *Física* (pp. 118–119).
- Boschetti, G., & Mariscotti, A. (2012). *THE PARAMETERS OF MOTION MECHANICAL EQUATIONS AS A SOURCE OF UNCERTAINTY FOR TRACTION SYSTEMS SIMULATION*. https://www.researchgate.net/publication/265843501_The_parameters_of_motion_mechanical_equations_as_a_source_of_uncertainty_for_traction_systems_simulation
- Chang, C. S., & Sim, S. S. (1997). IEE Proceedings online no. In *IEE*.
- Chevrier, R., Pellegrini, P., & Rodriguez, J. (2013). Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 20–41. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.09.007>
- Coals to Newcastle. (2017). *The Application of the Davis Formula to set Default Train Resistance in Open Rails*. 16.
- CP. (2018). *relatorio-de-sustentabilidade-2018*.
- Downer, F. S. (2016). *ROLLING RESISTANCE REVISITED*.
- Frotas. (2021). <https://www.simef.pt/index.php/pt/frotas>
- H. Parodi, T. (1935). *La traction électrique et le chemin de fer*. Paris.
- Huang, Y., Ma, X., Su, S., & Tang, T. (2015). Optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic algorithm. *Energies*, 8(12), 14311–14329. <https://doi.org/10.3390/en81212433>
- Inventário Portugal Ferroviário*. (2021). <https://inventario.portugalferroviario.net/motor/phototrain.php?tid=362&photo=1777>
- Manuel Afonso da Rocha, A., Luís Sousa Araújo, A., & João Sepúlveda Mesquita Freitas, M. (2020). *Optimizing Energy Efficiency for Train Operation Constrained to Scheduling*.
- Manuel, P., & Caldeira Martins, G. L. (2010). *Desgaste Ondulatório em Caminhos de Ferro INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA Departamento de Engenharia Mecânica ISEL*.
- Nuno, J., Vieira, M., Nuno, D., Baltazar, A., & Moreira, S. (2014). *Condução Energeticamente Eficiente na Exploração Ferroviária em Portugal Aplicação ao caso dos serviços regionais na linha do Douro*.
- Paulo, S. (2006). *CASSIANO LOBO PIRES SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA METRO-FERROVIÁRIA*.
- Rede Ferroviária / Infraestruturas de Portugal*. (2021 C.E.). <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/infraestruturas/rede-ferroviaria>
- Rocha, A., Araujo, A., Carvalho, A., & Sepulveda, J. (2018). A new approach for real time train energy efficiency optimization. *Energies*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/en11102660>
- Série 5600 - Ficha Técnica*. (2021). https://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Gabinete/fich_loc5600.htm

- Toledo, E. D. (1988). *Tração Elétrica* (Nobel (Ed.)).
- Vagões. (2021). [http://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Fotografias/out_vagoes\(01\).htm](http://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Fotografias/out_vagoes(01).htm)
- Vagões - Falls. (2021). https://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Gabinete/fich_V_Falls.htm
- William J. Davis. (1926). *The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars*.
- Wong, K. K., & Ho, T. K. (2004). Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm. *International Journal of Systems Science*, 35(13–14), 835–846. <https://doi.org/10.1080/00207720412331203633>

ANEXOS

A.1 Ficha técnica da locomotiva série 5600.

Características Técnicas	
Construtores	
Partes Mecânicas:	Krauss Maffei
Equip. Eléctrico:	Siemens
Transmissão:	Siemens
Freio:	Knorr
Características Gerais	
Tipo da Locomotiva	LE 5600
Potência Nominal da Loco. (rodas)	7.620 cv
Disposição dos Rodados	Bo' Bo'
Diâmetro das Rodas (novas)	1.250 mm
Número de Cabinas de Condução	2
Freio Pneumático	UIC
Freio Dinâmico	Reostático e Recuperação
Areiros (número)	8
Sistema de Homem-Morto	Deuta
Comando em Unidades Múltiplas	até 2
Lubrificador de Verdugos	Delimon
Registador de Velocidade	Convel + Sibas 16
Equipamento Eléctrico de Tracção	
Transformador	
Construtor e Tipo	Trafo Union e Motra Efat 6844
Primário	25 KV - 6.650 KVA
Secundário de Tracção	6 x 1.500 V - 6 x 975 kVA
Climatização	1.500 V - 800 kVA
Conversores de Potência	
Construtor e Tipo	Siemens - 420050.9015.005
Características	Entrada: 3x1,5 kV AC 50 Hz-700 A Saída: 2x0 a 2,2 kV 3f 650A - 0 a 140Hz 2250 kVA
Conversores Auxiliares	
Construtor e Tipo	Abb Bur 2x28d-2-50
Características	Entrada: 1x2800 V cc Saída: 2x440 V 3f 60Hz, P1=38,4 e P2=41,8+2x150 a 440 V 3f 23/40/50/60 Hz, P3=P4=57,9 kVA
Transmissão de Movimento	
Motores de Tracção	
Construtor	Siemens
Tipo	1TB 2824
Características Essenciais	Motor Trifásico Assíncrono Autoventilado Rotor em Curto Circuito 4 Polos Isolamento Classe 200
Características de Funcionamento	
Tracção	
Velocidade Máxima	220 km/h
Esforço de Tracção no Arranque	330 kN
Esforço de Tracção no Regime Cont.	250 kN
Velocidade Corresp. ao Regime Cont.	70 km/h
Esforço de Tracção à Velocidade Máx.	92 kN
Freio Dinâmico	
Esforço Máximo das Rodas	170 kN
Vel. Correspondente (Reostático)	10 a 71 km/h
Vel. Correspondente (Recuperação)	10 a 118,6 km/h
Equipamento de Ar Condicionado	
Construtor	Stone Ibéria
Potência	Aquecimento: 5,0 kW Refrigeração: 5,3 kW

Figura 71 - Ficha técnica da locomotiva série 5600 (*Série 5600 - Ficha Técnica*, 2021).

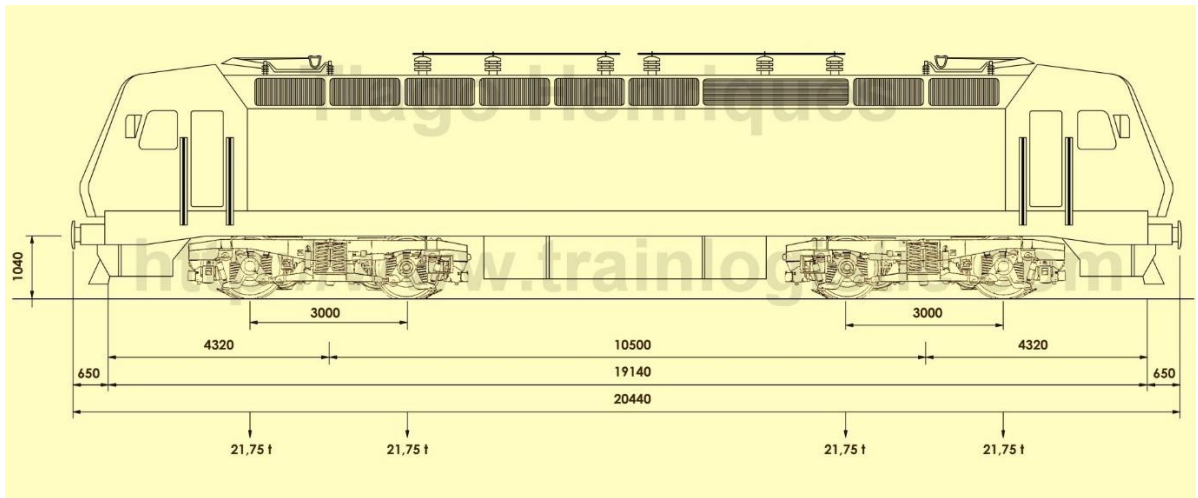


Figura 72 - Esquema da locomotiva série 5600.

A.2 Ficha técnica do vagão Falls

Construtor	Metalsines
Ano de Fabrico	1997
Velocidade Max.	120 Km/h
Tara Média	24.400 Kg
Carga Máxima	65.600 Kg
Rodas	920 mm
Caixa de Eixo	Rolamentos de Rolo
Moentes	130 x 191 mm
Freio Ke GP - A	28 - 78 t
Freio manual máximo	15 t
Cilindros de ar	2 x 12"
Regulador	DRV 2A - 300
Distribuidor	KE 1c SL
Válvula de Pesagem	WM 10
Caixa "Vazio-Carregado"	LAB3-R
Válvula "Vazio-Carregado"	VTA
Volume útil	47.000 L

Figura 73 - Ficha técnica do vagão Fall (*Vagões - Falls*, 2021).

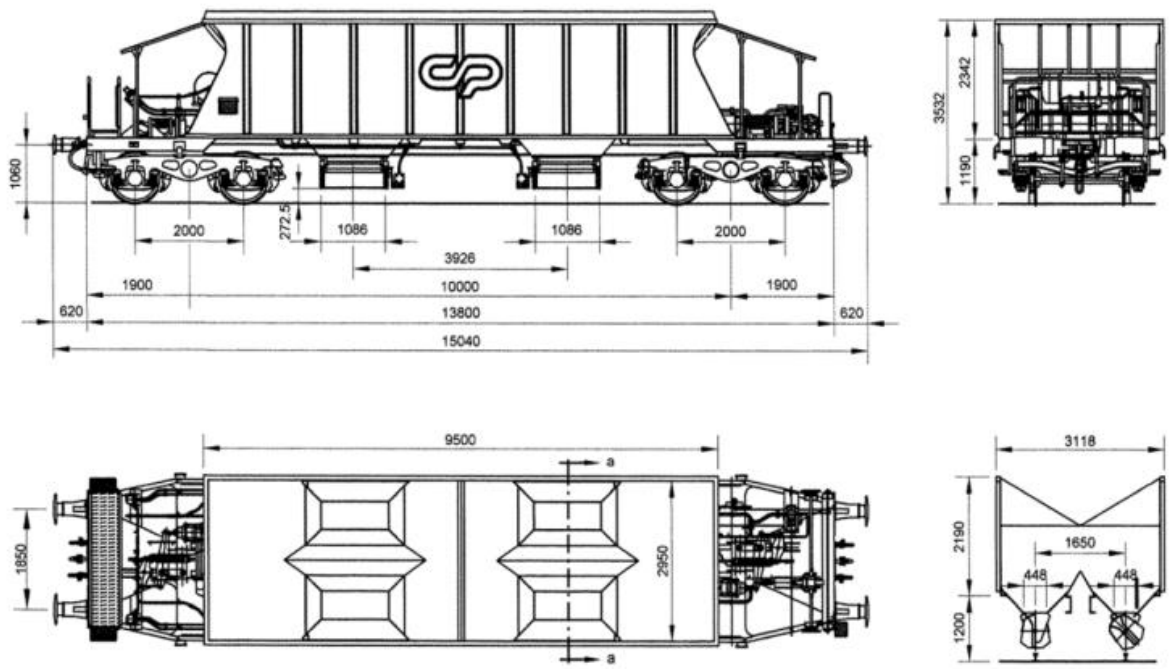


Figura 74 - Esquema do vagão Fall (*Vagões - Falls, 2021*).



2021

NUNO SANTOS

OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DE COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA