



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

ISEL

Soluções de Transporte Ferroviário - Simulação de Marcha e de Tráfego de Veículos de Tração Diesel e Elétrica

Luís Filipe Aleixo Marques

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

(Documento Definitivo)

Orientadores:

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Filipe de Oliveira Mendonça e Costa

Vogal: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Vogal: Prof. Nuno Paulo Ferreira Henriques.

Janeiro de 2014

Agradecimentos

Gostaria, antes de mais, de agradecer ao Professor Nuno Henriques, orientador deste trabalho, pelo constante apoio, incentivo e disponibilidade demonstrados durante todo o desenvolvimento deste trabalho, por todas as reuniões acerca do trabalho, pelo esclarecimento de dúvidas, pelos elementos de consulta disponibilizados, pela revisão linguística e científica do texto e, principalmente, pela amizade.

Gostaria igualmente de agradecer ao professor Mário Mendes, coorientador deste trabalho, igualmente pela disponibilidade demonstrada no esclarecimento de dúvidas, pela orientação dada e pela revisão do texto.

Ao Professor Nuno Dias pelo constante acompanhamento do trabalho, pelo esclarecimento de dúvidas, pelos dados fornecidos acerca das vias-férreas da região de Lisboa e dos veículos ferroviários do parque da CP, indispensáveis ao desenvolvimento do trabalho e, sobretudo, pela amizade.

Aos professores João Sabino e Fernando Carreira pelo esclarecimento de dúvidas relativas à programação em MATLAB e por me facultarem elementos de consulta relativos também à linguagem de programação.

Aos colegas Alexandre Dias e Rui Gaspar pela importante ajuda dada no início deste trabalho relativamente à programação em MATLAB.

À minha família pelo apoio e motivação dados não só na realização deste trabalho, mas também ao longo de todo o meu percurso académico.

Resumo

O transporte ferroviário ocupa atualmente uma posição relevante no setor dos transportes, não só no transporte de passageiros como também no transporte de mercadorias, pelo que é importante ter um conhecimento detalhado das marchas dos comboios.

Este trabalho tem como objetivos principais simular a marcha de um comboio ao longo de um percurso, bem como quantificar o consumo de energia elétrica nesse percurso, e realizar a simulação do tráfego ferroviário dos vários comboios que podem circular em simultâneo numa rede ferroviária.

A primeira fase do trabalho, e a de maior importância, diz respeito à simulação de marcha, a qual compreende por sua vez duas etapas: uma pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo e a simulação de marcha propriamente dita em regime de tempo horário.

Para se poder realizar a simulação de marcha, é necessário, em primeiro lugar, desenvolver um algoritmo, que seja capaz de prever todas as situações possíveis de ocorrer, em termos do movimento de um comboio, normalmente estabelecidas pelas velocidades máximas a que um comboio pode circular nos diferentes troços de uma linha ferroviária. A partir deste algoritmo será desenvolvido um programa em MATLAB, que permite, após a introdução dos dados do comboio e do percurso necessários à realização da simulação de marcha, obtêm-se obter os resultados da simulação sob a forma de diagramas de marcha, os quais permitem conhecer a velocidade e o tempo de percurso correspondente a cada posição do comboio ao longo do percurso.

Simultaneamente à realização da simulação de marcha, pode-se quantificar a energia consumida por um dado comboio para percorrer um determinado percurso.

Após se conhecerem as marchas dos comboios que podem circular numa rede ferroviária, através da simulação de tráfego, pode-se prever a ocorrência de situações de risco. Verifica-se deste modo a necessidade de realizar uma correta gestão do tráfego ferroviário não só para evitar a ocorrência de acidentes como também para maximizar a nível económico a exploração das linhas.

Pretende-se, portanto, caracterizar a marcha de um comboio de forma pormenorizada tanto ao nível do movimento, nomeadamente velocidade de circulação e tempo de percurso relativo a cada posição do comboio, como a nível do consumo de energia elétrica. Por fim, realiza-se a simulação de tráfego das marchas dos comboios numa determinada rede ferroviária.

Palavras-chave: comboios, percursos, simulação, marcha, tráfego, diagramas de marcha, consumo de energia.

Abstract

Railway transport has an important role in the transportation sector, not only of passengers but also of commercial goods. Therefore it's necessary to have a detailed knowledge about the train movement.

This thesis main goal is to simulate the movement of a train during a journey, as well as to determine the amount of energy consumed during this journey, and perform traffic simulations considering all the trains in movement during the same period of time in a particular rail network.

The first stage of this analysis, and the most important one, is the train movement simulation, which comprises two steps: the first one is a pre-simulation for a minimum journey time and the second is the real train movement simulation for the real journey time.

In order to accomplish all the goals of this assignment, firstly, it's necessary to create an algorithm able to predict all the possible situations that may occur during a train journey, which are usually defined by the maximum speed at which the train can travel in the different parts of a railway line. Based on this algorithm and using the data about the train and the railway track, it will be developed a program in MATLAB, which allows us to get graphics about the train movement as a result of the simulation. These graphics can give us information about the train speed and the travel time at each point of the railway track.

Simultaneously to the previous simulation, it's intended to quantify the amount of energy consumed for a specific train during a particular railway journey.

Furthermore, the correct use of the information, obtained through the traffic simulation, can be used not only to predict and prevent potentially dangerous situations but also to maximize the profit of the railway network.

In conclusion, this project aims to characterize, in detail, the journey of a given train considering its movement, namely the circulation speed and travel time relative to the position of the train, and its energy consumption. Finally, it is presented a traffic simulation regarding the movement of the trains on a specific railway network.

Keywords: train, journey, simulation, movement, traffic, graphics, energy consumption.

Glossário

- Aparelhos de via: elementos existentes na via e indispensáveis ao seu correto funcionamento, nomeadamente sinais, agulhas nos entroncamentos, cancelas nas passagens de nível, etc...
- Cantão: troço de linha cujo comprimento deve ser, pelo menos, igual ou superior à distância de frenagem do comboio mais desfavorável em circulação nessa linha.
- Circulação: comboio que inicia a sua marcha a uma hora específica numa dada estação de um determinado percurso.
- Comboio ou composição ferroviária: conjunto de veículos ferroviários motores e rebocados. A automotora é, apesar de também ser considerada um veículo ferroviário pelo fato dos veículos que a constituem serem inseparáveis, uma composição ferroviária, uma vez que, tal como já se referiu, é constituída por mais que um veículo. As automotoras em circulação atualmente mais comuns possuem normalmente dois, três ou quatro veículos na sua composição.
- Esforço de tração: esforço motor desenvolvido ao nível dos veículos motores do comboio.
- Etapa de inclinação do perfil compensado: troço da linha férrea em que a inclinação do perfil compensado permanece constante.
- Etapa de velocidade limite: troço da linha férrea em que a velocidade máxima a que o comboio pode circular não se altera.
- Etapa do tipo -2: etapa de velocidade limite em que a velocidade limite, $VL(i)$, é inferior à velocidade limite da etapa anterior, $VL(i-1)$, bem como à velocidade limite da etapa seguinte, $VL(i+1)$.
- Etapa do tipo -1: etapa de velocidade limite em que a velocidade limite é inferior à velocidade limite da etapa anterior e superior à velocidade limite da etapa seguinte.
- Etapa do tipo 1: etapa de velocidade limite em que a velocidade limite é inferior à velocidade limite da etapa anterior e superior à velocidade limite da etapa seguinte.
- Etapa do tipo 2: etapa de velocidade limite em que a velocidade limite é superior tanto à velocidade limite da etapa anterior como à velocidade limite da etapa seguinte.
- Linha ferroviária: infraestrutura sobre a qual se desloca o comboio, ou seja, os carris.
- Percurso global: espaço percorrido entre a estação de partida e a estação de chegada num dado percurso.

- Percurso intermédio: espaço percorrido entre duas estações nas quais o comboio efetua paragem.

- Percurso parcial: espaço percorrido entre uma paragem e uma etapa do tipo -2, entre duas etapas do tipo -2 e entre uma etapa do tipo -2 e uma paragem num dado percurso intermédio.

- Período de frenagem: período de marcha durante o qual se verifica uma redução da velocidade de circulação do comboio até à sua imobilização, em caso de paragem, ou apenas até velocidades inferiores.

- Serviços auxiliares: conjunto de equipamentos existentes no comboio não envolvidos na sua marcha, mas que por outro lado são bastante importantes ao transporte, principalmente de passageiros, nomeadamente a iluminação, ar condicionado, abertura e fecho de portas, etc...

- Veículo ferroviário: veículo do parque ferroviário que se movimenta sobre as linhas férreas. Os veículos ferroviários dividem-se em veículos motores e rebocados. Os veículos motores designam-se por locomotivas e podem ser de tração elétrica ou diesel. Os veículos rebocados para o transporte de passageiros designam-se por carruagens e para o transporte de mercadorias por vagões. Existe também um veículo que consiste numa solução intermédia, isto é, um único veículo indeformável já constituído por veículos motores e rebocados, denominado automotora. A automotora pode, por sua vez, apresentar diversas configurações, dependendo do número de veículos na sua constituição, e pode também ser associada em série com outras automotoras, sendo normalmente todas idênticas.

- Via-férrea: conjunto da linha ferroviária, dos aparelhos de via e das instalações inerentes à linha, tais como as estações, as oficinas de reparação, etc...

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTUDO E ORGANIZAÇÃO DO MOVIMENTO	3
2.1 Equação do movimento	3
2.2 Resistências ao movimento.....	4
2.2.1 Resistência ao avanço	4
2.2.2 Resistência devido à inclinação das rampas da via	9
2.2.3 Resistência devido às curvas da via.....	10
2.4 Perfil compensado da via	11
2.5 Resistência à aceleração	12
2.6 Aderência	13
2.6.1 Valores do coeficiente de aderência.....	15
2.8 Esforços de tração no arranque	19
2.9 Cargas máximas rebocáveis	20
2.10 Frenagem	21
2.10.1 Princípio de funcionamento.....	21
2.10.2 Distância de frenagem	23
2.10.3 Frenagem regenerativa	25
2.11 Diagramas de marcha.....	26
2.12 Gráficos do horário.....	29
2.13 Organização da circulação ferroviária.....	31
2.14 Espaçamento mínimo entre circulações	34
3. PROGRAMAS DE GESTÃO DAS BASES DE DADOS.....	39
3.1 Introdução	39
3.2 Programa da base de dados da via-férrea	39
3.3 Programa para a definição dos itinerários e dos percursos.....	43
3.4 Programa da base de dados do material circulante.....	46
3.5 Programa para a constituição das composições ferroviárias.....	50
4. SIMULAÇÃO DE MARCHA.....	53
4.1 Introdução	53
4.2 Algoritmo de simulação de marcha	53
4.3 Pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.....	60
4.4 Simulação de marcha em regime de tempo rígido	73

4.5 Apresentação de resultados.....	83
4.6 Consumo de energia	85
5. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	91
6. CASO DE ESTUDO	97
6.1 Introdução	97
6.2 Definição do percurso	98
6.3 Constituição do comboio	102
6.4 Simulação de marcha	105
6.4.1 Em regime de tempo mínimo.....	105
6.4.2 Em regime de tempo rígido.....	113
6.5 Balanço energético.....	118
6.5.1 Comboio com carga normal em regime de tempo mínimo	119
6.5.2 Comboio com carga normal em regime de tempo rígido	121
6.5.3 Comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo.....	123
6.5.4 Comboio com carga máxima em regime de tempo rígido.....	124
7. CONCLUSÕES.....	127
8. BIBLIOGRAFIA	131

Índice de figuras

Figura 1 – Representação das grandezas físicas verificadas no movimento de um comboio [4]..	3
Figura 2 - Valores típicos da resistência mecânica e das suas componentes em função da velocidade para um comboio de passageiros de 30,5 t [5].	5
Figura 3 - Valores típicos da resistência aerodinâmica em função da velocidade para um comboio de passageiros de 34,1 t [5].	6
Figura 4 - Evolução do coeficiente A da resistência ao avanço em função da massa e do número de eixos e do comboio para um comboio de mercadorias [9].	8
Figura 5 - Evolução do coeficiente B da resistência ao avanço em função da massa e do comprimento do comboio para um comboio de mercadorias [9].	8
Figura 6 - Diagrama de corpo livre de um veículo sobre uma rampa [10].	9
Figura 7 - Perfil compensado da via [13].	12
Figura 8 - Forças aplicadas numa roda acoplada a um eixo motor [14].	13
Figura 9 - Forças envolvidas no movimento de um comboio [13].	15
Figura 10 - Curva de Curtis e Kniffler determinada através de ensaios efetuados na Alemanha em 1943 [11].	16
Figura 11 - Curvas do esforço de tração específico no arranque em função da inclinação da via para comboios de passageiros (1) e de mercadorias (2) [1].	19
Figura 12 - Conjunto de forças resultantes da aplicação de calços contras as rodas dos veículos [1].	22
Figura 13 - Representação do diagrama $v(t)$ com os períodos de marcha característicos da marcha de um comboio [15].	27
Figura 14 - Diagrama $s(t)$ típico para a marcha de um comboio entre duas paragens [1].	28
Figura 15 - Representação de um exemplo típico de um gráfico horário para um determinado troço de linha.	31
Figura 16 - Esquema do cantonamento telefónico de uma dada linha [1].	33
Figura 17 - Esquema do cantonamento de plena via de uma dada linha [1].	34
Figura 18 - Espaçamentos mínimo entre circulações consecutivas [16].	35
Figura 19 - Esquema representativo do funcionamento do programa de gestão da base de dados das vias férreas.	42
Figura 20 - Representação das etapas de velocidade limite e de perfil compensado para um dado troço de uma via-férrea.	43
Figura 21 - Esquema representativo do funcionamento do programa desenvolvido para a elaboração dos itinerários.	44
Figura 22 - Esquema representativo do funcionamento do programa utilizado para o estabelecimento dos percursos	46
Figura 23 - Esquema representativo do funcionamento do programa de gestão da base de dados do material circulante.	49
Figura 24 - Esquema representativo do funcionamento do programa utilizado para a constituição das composições ferroviárias.	51
Figura 25 - Exemplo típico de uma etapa do tipo -2.	54
Figura 26 - Exemplo típico de uma etapa do tipo -1.	54
Figura 27 - Exemplo típico de uma etapa do tipo 1.	55
Figura 28 - Exemplo típico de uma etapa do tipo 2.	55

Figura 29 - Representação dos diversos tipos de percurso que podem ocorrer no trajeto entre duas estações.	56
Figura 30 - Esquema representativo do funcionamento do programa desenvolvido para a definição das circulações.	57
Figura 31 - Fluxograma do algoritmo para o cálculo da aceleração do comboio.	62
Figura 32 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo 2.	63
Figura 33 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular 1 de uma etapa do tipo 2.	64
Figura 34 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular 2 de uma etapa do tipo 2.	66
Figura 35 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular 3 de uma etapa do tipo 2.	67
Figura 36 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo 1.	68
Figura 37 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular de uma etapa do tipo 1.	69
Figura 38 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo -1.	70
Figura 39 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular de uma etapa do tipo -1.	71
Figura 40 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo -2.	72
Figura 41 - Diagrama $v(t)$ para o percurso entre duas estações.	74
Figura 42 - Diagramas de marcha para percursos entre duas estações do tipo ascendente (a) e do tipo descendente (b).	76
Figura 43 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação de marcha num percurso do tipo ascendente.	77
Figura 44 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação de marcha num percurso do tipo ascendente.	78
Figura 45 - Diagramas de marcha para hipotéticas situações de marcha num percurso do tipo descendente.	79
Figura 46 - Diagrama de marcha de um percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.	79
Figura 47 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação num percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.	80
Figura 48 - Diagramas de marcha para as restantes hipotéticas situações de marcha num percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.	81
Figura 49 - Diagrama de marcha com as possíveis localizações de um percurso parcial num percurso intermédio entre duas estações.	82
Figura 50 - Esquema representativo do funcionamento do programa de simulação da marcha de um comboio ao longo de um determinado percurso.	84
Figura 51 - Esquema relativo ao cálculo do esforço de tração nos períodos de marcha de um comboio.	85
Figura 52 - Esquema relativo ao cálculo das potências desenvolvidas devido às resistências movimento no período de aceleração.	87
Figura 53 - Esquema relativo ao cálculo das potências desenvolvidas devido às resistências movimento no período de marcha em regime.	87
Figura 54 - Esquema representativo do funcionamento do programa de simulação de tráfego entre circulações.	95
Figura 55 - Representação do perfil de velocidades do sentido ascendente da via.	100
Figura 56 - Representação do perfil compensado do sentido ascendente da via.	101
Figura 57 - Curva do esforço de tração do comboio.	104
Figura 58 - Representação das etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso considerando as paragens nas estações.	107

Figura 59 - Representação das alterações nas etapas de velocidade limite após a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.	109
Figura 60 - Curva $v(s)$ da velocidade do comboio em função da distância de percurso percorrida.	111
Figura 61 - Curva $v(t)$ da velocidade do comboio em função do tempo de percurso.	112
Figura 62 - Curva $s(t)$ da distância de percurso percorrida em função do tempo de percurso. .	113
Figura 63 - Representação das alterações nas etapas de velocidade limite após a simulação de marcha em regime de tempo rígido.	115
Figura 64 - Curva $v(s)$ da velocidade do comboio em função da distância percorrida.	116
Figura 65 - Curva $v(t)$ da velocidade do comboio em função do tempo de percurso.	117
Figura 66 - Curva $s(t)$ da distância de percurso percorrida em função do tempo de percurso. .	118
Figura 67 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.	119
Figura 68 - Representação da distribuição por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.	120
Figura 69 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.	121
Figura 70 - Representação da distribuição por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.	122
Figura 71 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.	123
Figura 72 - Representação da distribuição por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.	124
Figura 73 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.	125
Figura 74 - Representação da distribuição por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.	125

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores do coeficiente de aderência para veículos motores alimentados em CC, com arranque reostático.	17
Tabela 2 - Valores do coeficiente de aderência para veículos motores alimentados em CC, equipados com conversores contínuo-contínuo, ou alimentados em CA monofásica.	17
Tabela 3 - Valores do tempo de reação em função da velocidade do comboio para comboios de passageiros.	23
Tabela 4 - Valores do tempo de reação em função da velocidade do comboio para comboios de mercadorias.	24
Tabela 5 - Valores da distância de libertação em função da velocidade do comboio.	36
Tabela 6 - Definição do tipo de etapa para a primeira etapa de um percurso intermédio.	58
Tabela 7 - Definição do tipo de etapa para as etapas intermédias de um percurso intermédio. ...	58
Tabela 8 - Definição do tipo de etapas para a última etapa de um percurso intermédio.	59
Tabela 9 - Definição das velocidades inicial e final para a primeira etapa de um percurso intermédio.	59
Tabela 10 - Definição das velocidades inicial e final para as etapas intermédias de um percurso intermédio.	60
Tabela 11 - Definição das velocidades inicial e final para a última etapa de um percurso intermédio.	60
Tabela 12 - Etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso.	99
Tabela 13 - Estações do percurso.	101
Tabela 14 - Etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso considerando as paragens nas estações.	106
Tabela 15 - Alterações nas etapas de velocidade limite após a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.	108
Tabela 16 - Distâncias e tempos mínimos de percurso entre paragens e tempos de paragem para a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.	110
Tabela 17 - Tempos e distâncias de percurso entre paragens e tempos de paragem.	113
Tabela 18 - Alterações nas etapas de velocidade limite após a simulação de marcha em regime de tempo rígido.	114
Tabela 19 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.	119
Tabela 20 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.	120
Tabela 21 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.	121
Tabela 22 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.	122
Tabela 23 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.	123
Tabela 24 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.	123
Tabela 25 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.	124

Tabela 26 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime. 125

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Numa linha ferroviária, as circulações, bem como a sua frequência, devem ser estabelecidas de modo a satisfazer as necessidades de transporte, quer de passageiros quer de mercadorias, das áreas abrangidas pela linha. Deve portanto, procurar-se que o transporte ferroviário seja uma alternativa aos outros meios de transporte que possam existir nessas áreas, nomeadamente, o transporte rodoviário, público ou privado, e em, certos casos, o transporte fluvial.

O transporte ferroviário será uma escolha para o consumidor em função de diversos fatores, dos quais se podem destacar o custo da viagem, o tempo de percurso e a regularidade do transporte. Por esse motivo, as empresas ferroviárias, após um estudo detalhado das necessidades de transporte das áreas que a linha serve, levando em consideração as suas características demográficas e socioeconómicas, encontram-se em condições de poder oferecer um serviço atrativo à população e às empresas dessas áreas.

O serviço de transporte disponibilizado deve, em função das necessidades de transporte verificadas, constituir a solução mais vantajosa para a empresa ferroviária, garantindo o serviço pretendido ao mais baixo custo possível e otimizando ao mesmo tempo os recursos da empresa, ao nível dos veículos do parque ferroviário e das vias férreas.

Para uma gestão racional e eficiente dos recursos das empresas ferroviárias, verifica-se a necessidade de se determinar os parâmetros que caracterizam a marcha de uma composição ferroviária ao percorrer um percurso.

Os parâmetros que caracterizam o movimento de um comboio podem ser determinados com recurso à simulação computacional. Por esse motivo, o principal objetivo deste trabalho consiste fundamentalmente no desenvolvimento de um algoritmo que seja capaz de prever todas as situações possíveis de marcha num percurso entre paragens consecutivas e, posteriormente, com base nesse algoritmo, proceder ao desenvolvimento de um programa, através do qual se pode simular a marcha de um comboio ao longo de um percurso. Os resultados obtidos compreendem os parâmetros necessários à caracterização da marcha do comboio, nomeadamente a sua velocidade de circulação e o tempo de percurso correspondentes a cada posição ocupada pelo comboio ao longo desse percurso, a partir dos quais se podem construir diagramas característicos da marcha.

Outro dos objetivos deste trabalho passa por analisar, em termos energéticos, a marcha de um dado comboio ao longo de um determinado percurso.

Este trabalho é composto por um segundo capítulo dedicado ao estudo do movimento do comboio, em que se apresentam e analisam as diversas expressões necessárias à determinação dos parâmetros que permitem caracterizar a marcha de um comboio ao

longo de um percurso. Neste capítulo, apresentam-se os diagramas típicos da marcha de um comboio e refere-se igualmente a importância da segurança na circulação ferroviária, nomeadamente os tipos de cantonamento que se podem adotar numa linha e o espaçamento mínimo entre circulações.

No terceiro capítulo descreve-se o funcionamento dos programas desenvolvidos em MATLAB utilizados para a introdução e gestão dos dados das linhas ferroviárias e para a definição dos itinerários e dos percursos. Para o material circulante, desenvolveram-se igualmente programas para a introdução dos dados dos veículos ferroviários, motores e rebocados, e para a constituição dos comboios.

No capítulo quatro apresenta-se o algoritmo do programa de simulação da marcha de um dado comboio ao longo de um determinado percurso que compreende uma pré-simulação inicial em regime de tempo mínimo e uma simulação em regime de tempo rígido. A análise energética à marcha do comboio encontra-se descrita neste capítulo.

O programa que pode posteriormente vir a ser desenvolvido para realizar a simulação de tráfego é descrito no capítulo cinco.

No sexto capítulo encontra-se a descrição da aplicação dos programas desenvolvidos, já referidos anteriormente, a um caso de estudo de modo a simular a marcha de um dado comboio ao longo de um determinado percurso e analisar ao mesmo tempo do ponto de vista energético a marcha do comboio.

Por fim, no último capítulo apresentam-se as conclusões relativas aos diagramas obtidos e aos consumos energéticos, após comparação das diferentes circulações em estudo. Indicam-se também as principais dificuldades sentidas ao longo do trabalho e sugerem-se propostas acerca do trabalho a desenvolver no futuro dentro desta área.

Capítulo 2

2. ESTUDO E ORGANIZAÇÃO DO MOVIMENTO

2.1 Equação do movimento

A simulação de marcha tem como objetivo, tal como se referiu anteriormente, determinar o tempo de percurso e a velocidade de marcha correspondente a cada posição do comboio ao longo do percurso. No entanto, devido à extensão do comboio, existe a possibilidade dos veículos que o formam se encontrarem, por exemplo, em troços de linha com diferentes características tanto ao nível da velocidade máxima de circulação permitida como ao nível do raio de curvatura e da inclinação da via. Pode-se, portanto, verificar, que quanto maior for a extensão do comboio maior será o problema. Por esse motivo, deveria ser considerado o movimento individual de cada veículo do comboio bem como as ligações entre os mesmos, o que conduziria, por outro lado, à análise de elementos pouco relevantes, em termos quantitativos, para o estudo da marcha do comboio [1]. Deste modo, dado que o que interessa analisar é o movimento geral do comboio ao longo do percurso, pode admitir-se que o movimento do comboio é similar ao movimento de um ponto material, considerando que toda a massa do comboio se encontra concentrada no seu centro de gravidade [1,2,3].

O movimento de um comboio obedece à Segunda Lei de Newton, que pode ser expressa na seguinte forma (1) [1]:

$$F = M'a + \sum R \quad (1)$$

em que:

F – esforço de tração (N);

$\sum R$ – conjunto de resistências ao movimento (N);

M' - massa inercial do comboio (kg);

a – aceleração do comboio ao longo da trajetória (m/s^2).

Pode-se, assim, verificar que o movimento de um comboio se encontra condicionado pelo esforço de tração dos veículos motores e pelo conjunto de resistências ao movimento que é necessário vencer (Figura 1) [4].



Figura 1 – Representação das grandezas físicas verificadas no movimento de um comboio [4].

De referir, que o termo M' representa uma massa fictícia do comboio, ligeiramente superior à massa real do comboio, de modo a levar em conta a influência da inércia das peças móveis [1,2,3,5].

Relativamente ao conjunto de resistências ao movimento, estas resistências dependem das velocidades de marcha, tal como a resistência ao avanço, e do traçado da via-férrea, nomeadamente a resistência devido à inclinação da via e a resistência devido às curvas da via.

Deste modo, pode concluir-se que as forças resistentes ao movimento de um comboio podem, de um modo geral, dividir-se em três tipos:

R_a - resistência ao avanço, a qual é igual em módulo, mas de sentido contrário, à força necessária para manter o comboio a uma determinada velocidade constante, em reta e em patamar;

R_i - resistência devido às inclinações das rampas da via, que é equivalente à componente tangencial do peso do comboio, sendo positiva nas subidas e negativa nas descidas;

R_c - resistência devido às curvas da via, resultante do aumento da resistência de atrito entre os carris e os rodados em curva devido ao efeito da força centrífuga, uma vez que os planos dos carris não se mantêm paralelos aos da marcha [1,2,3,6].

A resistência ao avanço apresenta um carácter dinâmico e aumenta com a velocidade, a resistência devido às inclinações da via depende das características do traçado da linha em perfil e, por último, a resistência devido às curvas da via depende também das características da via, mas em planta [1].

2.2 Resistências ao movimento

2.2.1 Resistência ao avanço

A resistência ao avanço tem, por sua vez, origem num conjunto de resistências que se podem dividir em dois tipos:

- a) uma resistência mecânica, F_R , resultante dos atritos mecânicos existentes entre os componentes móveis no interior do comboio e do rolamento das rodas sobre o carril;
- b) uma resistência aerodinâmica, F_L , provocada pelo ar ao movimento do comboio [1,5].

A componente da resistência mecânica devida aos atritos dos veios nas chumaceiras ou nos rolamentos depende fundamentalmente da velocidade de rotação, da pressão de serviço exercida, do método de lubrificação, da natureza do lubrificante e da temperatura de serviço verificada. Para valores normais de carga, o valor da resistência diminui com o aumento da velocidade de rotação e da carga. Tal como se pode observar através da curva 1 da figura 2, verifica-se que no arranque da composição esta

componente da resistência mecânica adota valores elevados, que apesar de verificarem apenas num regime transiente inicial, resultam do facto de ainda não se encontrarem estabelecidas as condições ótimas de lubrificação, as quais somente se estabelecem após um certo período de rotação. A resistência devido aos atritos nos rolamentos pode ser reduzida e os elevados valores iniciais podem ser eliminados através do uso de rolamentos de rolos, os quais apresentam como desvantagem um preço mais elevado, o que, na maioria dos casos, não justifica a sua utilização já que esta componente da resistência mecânica apresenta um valor reduzido. O valor desta componente da resistência mecânica pode, portanto, considerar-se constante [5].

Dentro da componente mecânica, tem-se uma resistência, originada principalmente pelo rolamento das rodas sobre os carris e também pelo atrito resultante do contacto intermitente entre os verdugos das rodas e as faces internas dos carris, cuja variação, é proporcional à massa e à velocidade de marcha do comboio, tal como se pode verificar através da curva 2 da figura 2 [5].

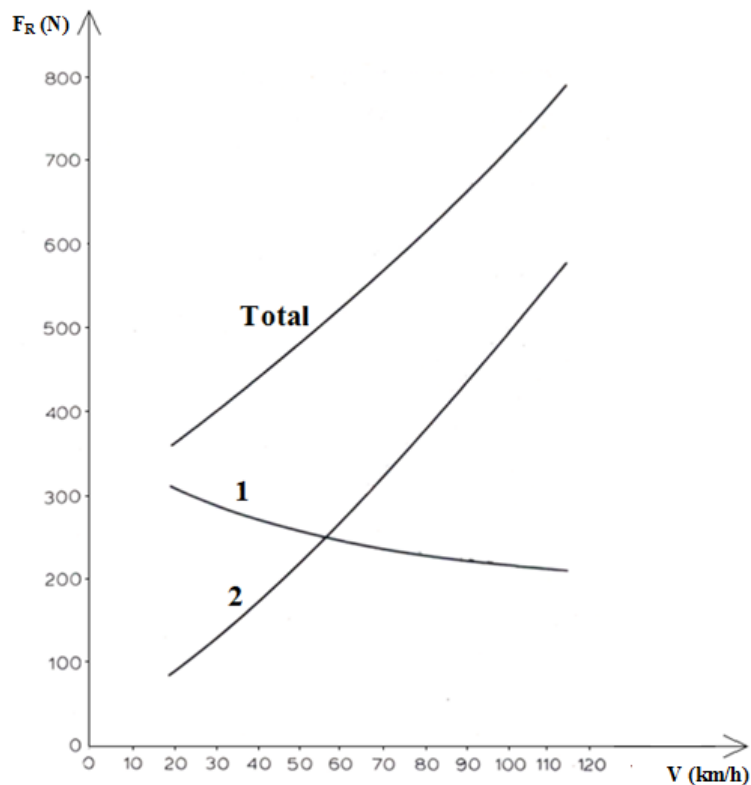


Figura 2 - Valores típicos da resistência mecânica e das suas componentes em função da velocidade para um comboio de passageiros de 30,5 t [5].

Além da componente mecânica, a resistência ao avanço apresenta uma componente aerodinâmica, resultante:

- a) da pressão do ar sobre a superfície frontal do primeiro veículo do comboio e da depressão exercida na superfície posterior do último veículo;
- b) do escoamento turbulento do ar ao longo das superfícies laterais dos veículos do comboio e das turbulências criadas nos espaços entre os veículos que formam o comboio e entre a via e a parte inferior dos veículos [7].

A resistência aerodinâmica, cujo valor varia aproximadamente com o quadrado da velocidade, depende, portanto, das dimensões exteriores do comboio (comprimento, altura e largura) e é principalmente influenciada pela componente referente à pressão exercida na superfície frontal do comboio [5].

Na figura 3 encontra-se representada a curva relativa à componente aerodinâmica da resistência ao avanço em função da velocidade de marcha do comboio.

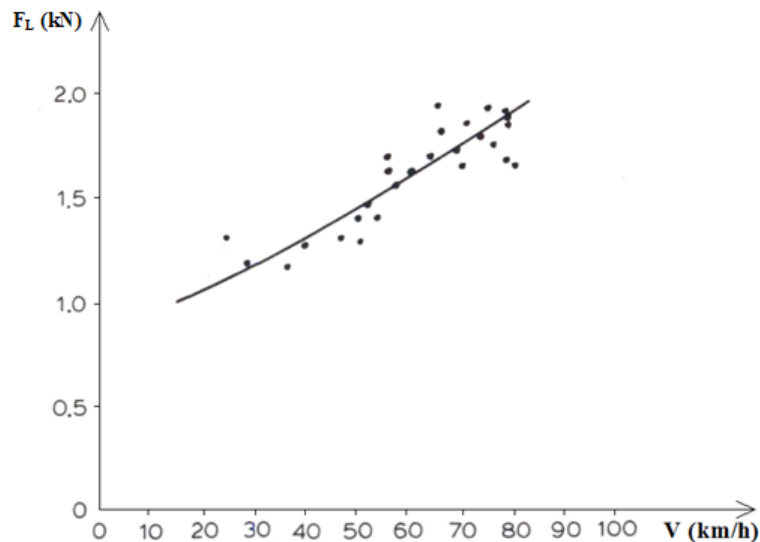


Figura 3 - Valores típicos da resistência aerodinâmica em função da velocidade para um comboio de passageiros de 34,1 t [5].

Verifica-se que a resistência aerodinâmica é maior em comboios de passageiros do que em comboios de mercadorias, pelo facto das velocidades a que os primeiros se deslocam também serem maiores. Deste modo, pode concluir-se que a resistência aerodinâmica constitui o termo mais relevante da resistência ao avanço para comboios de passageiros [1].

Uma vez que as resistências mecânica e aerodinâmica anteriormente apresentadas não podem ser quantificadas analiticamente com rigor, o valor da resistência ao avanço é encontrado por intermédio de expressões empíricas obtidas a partir de ensaios experimentais [1].

O valor da resistência ao avanço pode ser calculado por intermédio da seguinte expressão [1, 5, 6, 7, 8]:

$$R_a = A + BV + CV^2 \quad (2)$$

sendo:

R_a – resistência ao avanço;

V – velocidade do comboio;

A , B , C – coeficientes numéricos dependentes do material circulante e da via-férrea.

O coeficiente A, segundo a empresa francesa SNCF, pode ser expresso em função da massa total do comboio e da carga por eixo, sendo necessário considerar um coeficiente λ que representa certos fatores qualitativos.

Determina-se, então, o coeficiente A através da seguinte equação [1]:

$$A = \lambda \sqrt{\frac{10}{m}} M \quad (3)$$

em que:

A – coeficiente de resistência ao avanço (N);

λ – coeficiente numérico;

M – massa total do comboio (t);

m – carga média por eixo (t).

Quanto ao coeficiente λ , o seu valor situa-se normalmente entre 9 e 18. Para unidades múltiplas suburbanas e regionais, considera-se um valor próximo do seu limite superior, enquanto para composições automotoras para alta velocidade, como o TGV, se considera um valor próximo de seu limite inferior. Para as composições clássicas de locomotiva e carruagens para os serviços rápidos e diretos de longo curso, o valor de λ empregue encontra-se entre 10 e 11.

Por sua vez, o coeficiente B, também proporcional à massa do comboio, obtém-se com recurso à seguinte expressão [1]:

$$B = bM \quad (4)$$

em que:

B – coeficiente da resistência ao avanço (N/km/h);

b – coeficiente numérico;

M – massa total do comboio (t).

Admite-se para o coeficiente b, um valor normal de 0,1.

Verifica-se assim que a componente mecânica da resistência ao movimento pode ser determinada através da seguinte expressão [9]:

$$F_R = A + BV \quad (5)$$

Em que o termo A corresponde à componente da resistência mecânica resultante dos atritos veios nos rolamentos ou nas chumaceiras e o termo BV à componente devida ao rolamento das rodas sobre os carris.

Na figura 4 apresenta-se a evolução do coeficiente A em função da massa e do número de eixos do comboio.

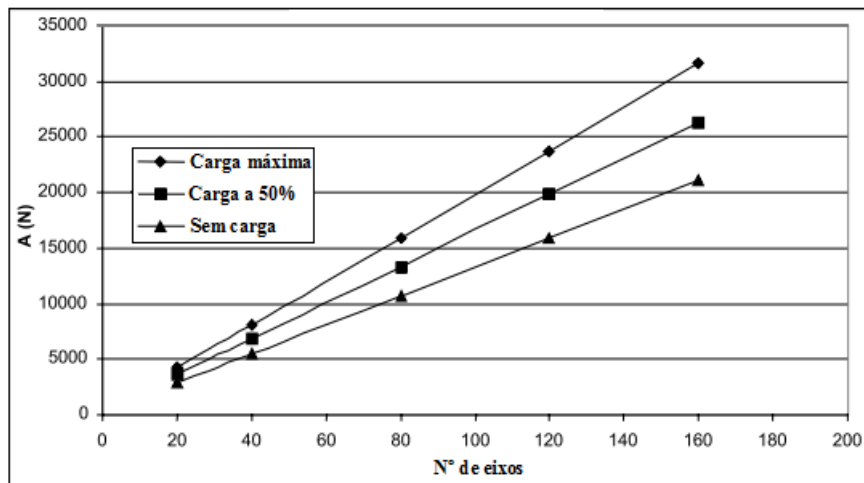


Figura 4 - Evolução do coeficiente A da resistência ao avanço em função da massa e do número de eixos e do comboio para um comboio de mercadorias [9].

Do mesmo modo, na figura 5 apresenta-se a evolução do coeficiente B em função da massa e do comprimento do comboio.

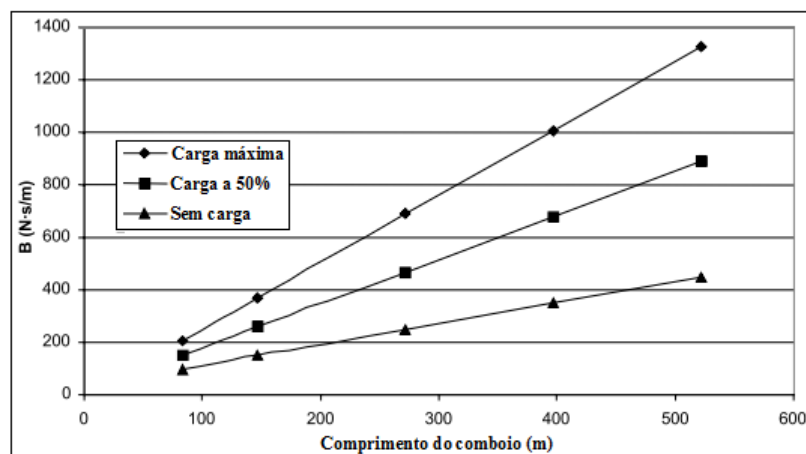


Figura 5 - Evolução do coeficiente B da resistência ao avanço em função da massa e do comprimento do comboio para um comboio de mercadorias [9].

Por último, tem-se o coeficiente C, o qual ao contrário dos coeficientes anteriores, não é função da massa do comboio, dependendo somente da forma e das dimensões exteriores do comboio.

O seu valor calcula-se por intermédio da expressão:

$$C = k_1 S + k_2 L \quad (6)$$

em que:

C – coeficiente da resistência ao avanço ($N/km^2/h^2$);

k_1 - coeficiente global de forma das extremidades do comboio (frente e traseira);

k_2 - coeficiente característico da rugosidade da superfície molhada do comboio (superfície superior e superfícies laterais);

S – área transversal projetada (m^2);

p – perímetro molhado, de carril a carril (m);

L – comprimento total do comboio [1].

O coeficiente k_1 apresenta um valor de 20×10^{-3} , determinado experimentalmente, para as composições clássicas de locomotiva e carruagens ou unidades múltiplas. Para as composições concebidas para alta velocidade o valor de k_1 é aproximadamente metade do anterior.

O coeficiente k_2 situa-se entre 22×10^{-5} e 24×10^{-5} para carruagens e entre 27×10^{-5} e 33×10^{-5} para unidades múltiplas. Tal como no caso de k_1 , também para as composições de alta velocidade, o coeficiente k_2 toma um valor mais reduzido, $k_2 = 21 \times 10^{-5}$.

De referir que as expressões anteriormente apresentadas para o cálculo da resistência ao avanço se aplicam exclusivamente após o início da marcha do comboio ($V \geq 5\text{km/h}$) [1].

2.2.2 Resistência devido à inclinação das rampas da via

A resistência ao movimento devido à ação exercida pela gravidade resulta da inclinação das rampas da via, sendo equivalente ao valor da componente tangencial do peso do comboio [3].

Considerando-se uma rampa de ângulo α relativamente à horizontal, tal como se apresenta na seguinte figura:

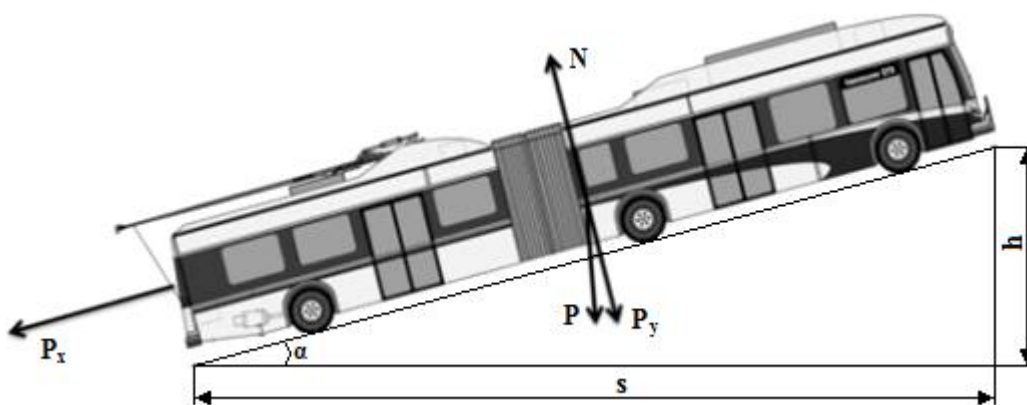


Figura 6 - Diagrama de corpo livre de um veículo sobre uma rampa [10].

sendo h a altura da rampa e s a projeção da rampa no plano horizontal.

A componente tangencial do peso do comboio pode ser calculada por intermédio da seguinte expressão [6, 8, 10, 11]:

$$P_x = R_i = Mgsin\alpha = Mg \frac{h}{l} \quad (7)$$

A inclinação da rampa é dada por:

$$i = \tan \alpha = \frac{h}{s} \quad (8)$$

Dado que em tração por simples aderência, a inclinação das rampas, geralmente, não ultrapassa cerca de 3% (30‰), o ângulo α com a horizontal toma normalmente valores inferiores a 2° , pelo que se pode considerar que $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ até à quarta casa decimal [11].

Desta forma, tendo em conta o que foi referido anteriormente, para uma determinada rampa da via, com inclinação i , a resistência ao movimento devido à inclinação de um comboio, de peso Mg , que percorre essa rampa pode ser dada pela seguinte expressão [1, 3, 5, 6, 11]:

$$R_i = Mgi \quad (9)$$

sendo:

R_i - resistência ao movimento devido à inclinação da via (N);

M – massa total do comboio (t);

i – inclinação da rampa (‰);

g – aceleração da gravidade (m/s^2).

De modo a minimizar a resistência devido à inclinação da via, as inclinações máximas das rampas devem apresentar valores reduzidos para que nem os esforços de tração requeridos sejam muito elevados nem as velocidades de marcha sejam muito baixas, o que seria impraticável do ponto de vista económico. Deste modo, no nosso país, a inclinação máxima das rampas é cerca de 18 a 20‰ para as linhas de via larga e de 25‰ para as linhas de via estreita [1].

É importante referir que se a inclinação da rampa for negativa, no caso de se tratar de uma descida, a resistência devido à inclinação será negativa, o que é favorável ao movimento do comboio [2, 3].

2.2.3 Resistência devido às curvas da via

A resistência ao movimento devido às curvas da via é causada pela solidariedade das rodas com o eixo, pelo paralelismo dos eixos e pelo aumento do atrito entre o verdugo da roda dianteira externa e o carril exterior, bem como pelo aumento do atrito entre o verdugo da roda traseira interna e o carril interno, resultantes do efeito da força centrífuga [11].

A expressão através da qual se pode determinar a resistência ao movimento devido à curvatura da via é a seguinte [1, 6, 8, 11]:

$$R_c = \frac{k}{\rho} M \quad (10)$$

em que:

R_c – resistência ao movimento devido às curvas da via (N);

M – massa total do comboio (t);

P – raio de curvatura (m);

k – constante dependente do material circulante e da bitola da via.

Uma vez que atualmente as condições de inscrição em curva são praticamente idênticas para todo o material circulante, admite-se, segundo a SNCF, para a bitola europeia (1,435 m), que a constante k toma um valor único de 8000 [1, 6, 8, 11].

Por fim, pode concluir-se que a resistência global ao movimento do comboio pode ser obtida através da seguinte expressão [1]:

$$R = R_a + R_c + R_i = A + BV + CV^2 + Mgi + M\frac{k}{\rho} \quad (11)$$

2.4 Perfil compensado da via

O conceito de perfil compensado da via consiste em substituir um determinado troço de linha em rampa de inclinação constante i com várias curvas por um troço retilíneo equivalente e em rampa com inclinação i' , a qual se designa por inclinação compensada [11].

Deste modo, a resistência ao movimento devido à inclinação e às curvas numa rampa real tem valor idêntico à resistência ao movimento devido à inclinação compensada de uma rampa fictícia equivalente [1].

De modo a se entender melhor o conceito de perfil compensado, apresenta-se na figura 7 uma rampa que faz um ângulo α com a horizontal e com uma projeção horizontal S , representando ρ_j e L_j os raios e as extensões, respetivamente, das n curvas C_j que se encontram na rampa [11].

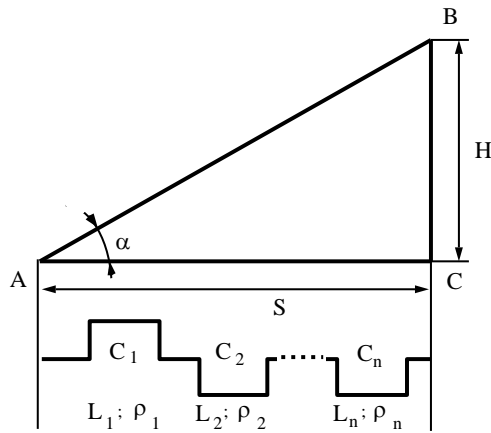


Figura 7 - Perfil compensado da via [13].

A resistência ao movimento devido à inclinação do perfil compensado da rampa fictícia vem dada pela seguinte expressão [1, 11]:

$$R'_i = Mgi' \quad (12)$$

em que:

R'_i - resistência ao movimento devido à inclinação do perfil compensado da via (N);

i' - inclinação da rampa fictícia do perfil compensado da via (%);

M - massa total do comboio (t);

g - aceleração da gravidade (m/s^2).

O conceito de inclinação do perfil compensado permite, como se pode verificar, representar o traçado de uma determinada via-férrea por um menor número de troços de inclinação constante correspondentes a rampas fictícias de inclinação i' , sendo, desta forma, excluídas as curvas da via [11].

Em suma, pode-se concluir que a resistência ao movimento de um comboio ao longo da sua trajetória numa dada via-férrea pode ser determinada através da aplicação da expressão 13 a cada um dos troços de perfil compensado em que se divide o traçado da via [1].

$$R = R_a + R'_i = A + BV + CV^2 + Mgi' \quad (13)$$

2.5 Resistência à aceleração

A aceleração do comboio, quer seja no arranque ou em qualquer outro período em que se pretende apenas aumentar a velocidade, só é possível à custa do desenvolvimento de um esforço de tração adicional, o qual pode ser traduzido por uma resistência ao movimento, que também é necessário vencer, podendo, portanto, ser designado por “resistência à aceleração” [1].

O valor da resistência à aceleração pode ser determinado através da seguinte expressão [1]:

$$F_a = \lambda(M_L + M_C)a = M'a \quad (14)$$

sendo o termo λ designado por coeficiente global de correção das massas rotativas, o qual representa o efeito de inércia das peças rotativas, que se traduz, por sua vez, num aumento da massa do comboio, situando-se o seu valor, normalmente, entre 1,05 e 1,07.

Por seu lado, o termo M' , que é o produto da massa total do comboio pelo coeficiente de correção global das massas rotativas, é designado por massa inercial do comboio, tal como se referiu anteriormente, sendo o seu valor ligeiramente superior ao da massa real [1,2,3,5].

Deste modo, o movimento de um comboio ao longo da via-férrea pode ser definido segundo a equação anteriormente referida apresentada na seguinte forma [1]:

$$F = M'a + A + BV + CV^2 + Mgi' \quad (15)$$

Esta equação é de fundamental importância no que diz respeito a todos os cálculos relativos à tração ferroviária, nomeadamente o cálculo da aceleração [1].

2.6 Aderência

A aplicação de um binário motor T a um eixo resulta no aparecimento, ao nível de uma roda acoplada a esse eixo, de duas forças iguais, mas de sentido oposto: Z e Z' . A força Z que se encontra aplicada no eixo da roda, designada por esforço de tração, é responsável pelo movimento da roda, devendo ser suficiente para vencer uma força resistente R que se opõe ao movimento. Por outro lado, a força Z' aplicada no ponto de contacto da roda com o carril, origina o aparecimento de uma força designada por aderência (A), que constitui uma força de atrito que se opõe, por sua vez, ao escorregamento da roda (Figura 8) [11].

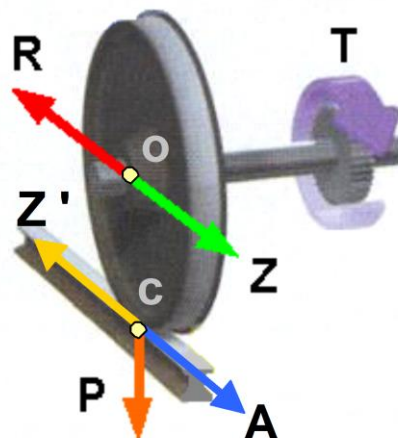


Figura 8 - Forças aplicadas numa roda acoplada a um eixo motor [14].

O esforço de tração Z não deve, portanto, ultrapassar o valor máximo da aderência, o qual além de depender do peso P da roda e da natureza das superfícies em contato, verifica-se que, na prática, diminui com o aumento da velocidade de rotação da roda.

Deste modo, pode concluir-se que desde que o esforço de tração F não seja superior a um determinado limite, que representa uma fração do peso P , verifica-se a existência de aderência, o que permite o movimento da roda. A seguinte expressão exprime esta relação [11]:

$$Z \leq \mu P \quad (16)$$

em que o termo μ se designa por coeficiente de aderência, sendo definido como o quociente entre o esforço de tração máximo que é possível aplicar à roda sem que ocorra o seu escorregamento, e o peso P que a mesma pode suportar [1, 13].

Por outro lado, se o esforço de tração Z ultrapassar o valor limite μP , verifica-se a rutura da aderência, ocorrendo o deslizamento do ponto de contato da roda com o carril no sentido oposto ao do movimento. Este fenómeno é designado por “patinagem”.

Em termos práticos, não é possível considerar de modo individual o esforço de tração de um determinado motor Z e o peso P correspondente. Por esse motivo, considera-se um coeficiente de aderência global, definido pelo quociente entre o esforço de tração total F desenvolvido pelo veículo motor imediatamente antes de qualquer um dos seus eixos motores patinhar, e o peso aderente total P_a do veículo ferroviário. O peso aderente é definido como o peso total exercido apenas sobre os eixos motores do veículo [1, 3, 11].

Deste modo, o valor limite μP_a definido pela aderência representa o esforço de tração máximo, que em qualquer momento, pode ser aplicado a um veículo motor, sem que nenhum dos seus eixos motores patinhe. Portanto, para que uma composição ferroviária arranque ou mantenha o seu movimento, o esforço de tração F desenvolvido pelos seus veículos motores deve ser suficiente para vencer a resistência ao movimento R , não podendo ultrapassar o limite máximo μP_a imposto pela aderência (Figura 9) [1, 11].

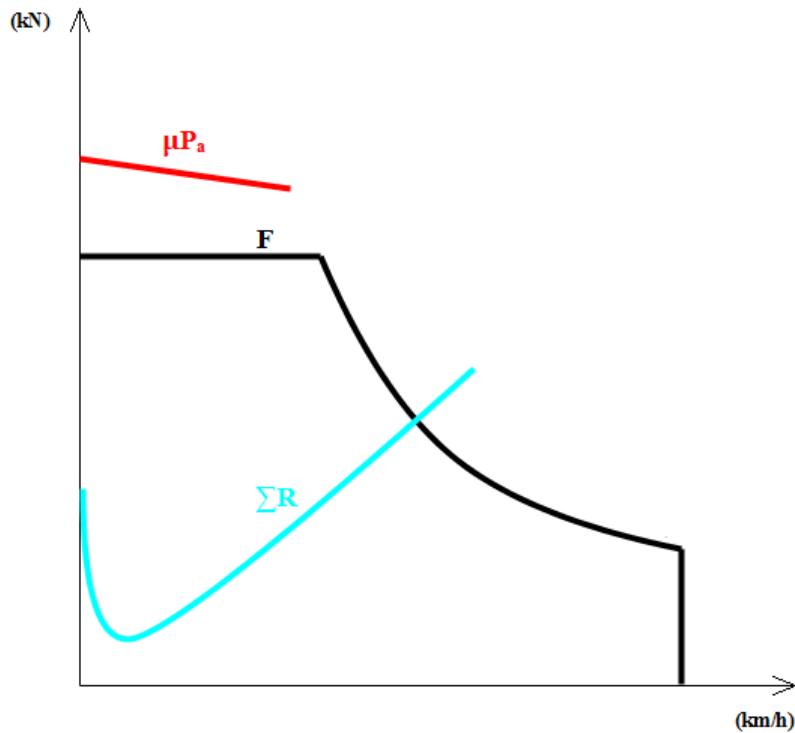


Figura 9 - Forças envolvidas no movimento de um comboio [13].

2.6.1 Valores do coeficiente de aderência

O coeficiente de aderência depende de diversos fatores relativos quer à via-férrea quer ao veículo ferroviário, nunca apresentando, portanto, um valor constante. Deste modo, para se determinar o valor do coeficiente de aderência com o mínimo de precisão devem-se realizar ensaios com o material circulante para diversas condições de contacto da roda com o carril.

Os fatores referentes à via-férrea dependem do estado da superfície dos carris, das irregularidades na mesa de rolamento dos carris e das curvas da via. Por sua vez, dos fatores relativos ao próprio veículo ferroviário apresentam-se os seguintes: as oscilações do veículo, os movimentos de “lacete”, a diminuição do peso aderente do veículo devido ao efeito de “empinamento”, o comando individual dos eixos e as irregularidades no binário motor ou variações bruscas no esforço de tração [1].

Quando se realizam ensaios de linha do material circulante motor e se registam para diferentes velocidades, os esforços de tração correspondentes ao momento do início da patinagem, não se obtém uma curva, mas sim um conjunto de pontos dispersos, o que torna difícil traçar curvas típicas. Contudo, conseguem-se deduzir curvas médias nas situações em que se dispõe de um número suficientemente elevado de pontos (Fig. 10) [1, 6, 11].

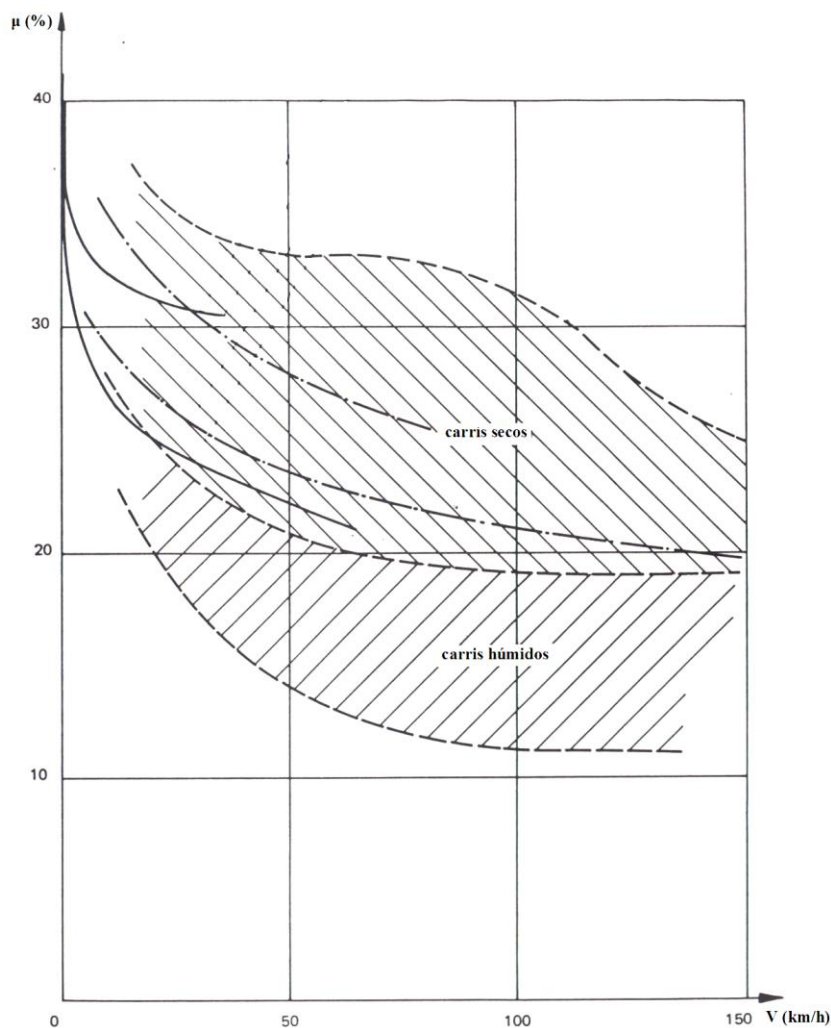


Figura 10 - Curva de Curtis e Kniffler determinada através de ensaios efetuados na Alemanha em 1943 [11].

A partir dos ensaios realizados obteve-se a seguinte expressão [3, 11]:

$$\mu = \mu_0 \frac{8+0,1V}{8+0,2V} \quad (17)$$

sendo V a velocidade em km/h e μ_0 o coeficiente de aderência médio no arranque ($V=0$) igual a 0,33 neste caso, valor definido em função da locomotiva utilizada nos ensaios [11].

No caso da CP, é usada, no cálculo do coeficiente de aderência, para qualquer tipo de material motor a seguinte expressão [1]:

$$\mu = \frac{\mu_0}{0,33} \left(0,161 + \frac{7,5}{V+44} \right) \quad (18)$$

A partir desta expressão obtém-se valores idênticos aos obtidos utilizando na expressão anterior [1].

O coeficiente de aderência médio no arranque, o qual é determinante no dimensionamento da carga a rebocar, depende tanto do estado da superfície dos carris

no arranque como do tipo de locomotiva. Deste modo, para cada tipo de locomotiva adota-se um diferente coeficiente de aderência, cujo valor depende do tipo de tração do veículo motor e, dentro de cada tipo, das características construtivas do sistema de tração dos veículos [1].

Apresentam-se, de seguida, os coeficientes de aderência médios no arranque utilizados na prática para carris secos ou húmidos (com recurso à utilização de areia):

a) Para veículos motores alimentados em corrente contínua, com arranque reostático [6]:

	Comando individual dos eixos	Comando conjugado dos eixos
Sem dispositivo anti-patinhagem	0,22	-
Com dispositivo anti-patinhagem	0,25	0,27

Tabela 1 - Valores do coeficiente de aderência para veículos motores alimentados em CC, com arranque reostático.

b) Para veículos motores alimentados em corrente contínua, equipados com conversores contínuo-contínuo, ou alimentados em corrente alternada monofásica [6]:

Comando individual dos eixos	Comando conjugado dos eixos
0,33	0,35

Tabela 2 - Valores do coeficiente de aderência para veículos motores alimentados em CC, equipados com conversores contínuo-contínuo, ou alimentados em CA monofásica.

Pode, portanto, concluir-se, através destes valores, que o tipo de veículo motor é de fundamental importância no que diz respeito à carga que se pode rebocar no arranque, já que relativamente ao coeficiente de aderência se verificam diferenças consideráveis [1]

2.7 Consumo de energia

O esforço de tração que os veículos motores necessitam de desenvolver para que seja possível rebocar uma determinada carga a velocidade constante tem que ser suficiente para vencer o conjunto das forças resistentes ao movimento quando o comboio se desloca a essa velocidade e ao mesmo tempo não pode ultrapassar um valor máximo a partir do qual deixa de existir aderência, tal como se referiu anteriormente.

Portanto, satisfeitas as condições anteriores, a potência mecânica, ao nível das rodas do veículo motor, necessária para se desenvolver o esforço de tração requerido a uma dada velocidade vem dada pela seguinte expressão [1, 8, 9]:

$$P = F \times V \quad (19)$$

em que:

P_{rodas} – potência mecânica ao nível das rodas (kW);

F – esforço de tração (kN);

V – velocidade de circulação (km/h).

Para os veículos de tração eléctrica, a potência eléctrica a desenvolver, ao nível do motor, considerando o rendimento do motor e da transmissão, pode ser determinada através da seguinte expressão [3,14]:

$$P_{motor} = \frac{P_{rodas}}{\eta_m \times \eta_T} \quad (20)$$

sendo:

P_{motor} – potência mecânica ao nível do motor (kW);

η_T – rendimento da transmissão;

η_m - rendimento do motor.

Através destas expressões, pode-se definir a potência nominal da locomotiva ou automotora a utilizar para rebocar uma determinada carga numa dada gama de velocidades [1].

Para os veículos motores de tração eléctrica, para o cálculo da potência, ao nível do motor, é necessário levar em conta o fator de potência do motor, representado por $\cos\varphi$.

Por sua vez, a energia eléctrica consumida é obtida pelo produto da potência eléctrica pelo intervalo de tempo durante o qual o comboio se movimenta a velocidade constante:

$$E = P \times \Delta t \quad (21)$$

em que:

E – energia consumida pelo veículo motor (kWh);

Δt – intervalo de tempo (s).

2.8 Esforços de tração no arranque

No início do arranque, para qualquer valor de aceleração pretendido, a resistência ao avanço de um comboio é consideravelmente superior ao valor que se verifica após a marcha já estar iniciada.

Portanto, seria expectável que para uma composição de elevada massa arrancar numa rampa com uma inclinação considerável, o esforço de tração requerido teria também que ser bastante elevado, havendo, por isso, a possibilidade do limite estabelecido pela aderência ser ultrapassado e, conseqüentemente, tornar o arranque impossível.

Contudo, na realidade este inconveniente é minimizado pelo facto de as composições ferroviárias não se tratarem de um conjunto de veículos indeformável, o arranque dos veículos não ocorre em simultâneo, mas sim de modo sucessivo. Desta forma, pode-se reduzir o esforço de tração inicialmente previsto a fim de se respeitar o limite máximo imposto pela aderência.

Dado que os veículos arrancam de forma sucessiva, não se considera a resistência específica no arranque para o conjunto dos veículos do comboio. Deste modo, para comboios de passageiros e de mercadorias, a empresa ferroviária francesa SNCF, fornece as curvas do esforço de tração específico no arranque, f_0 , em função da inclinação do perfil compensado (Fig. 11).

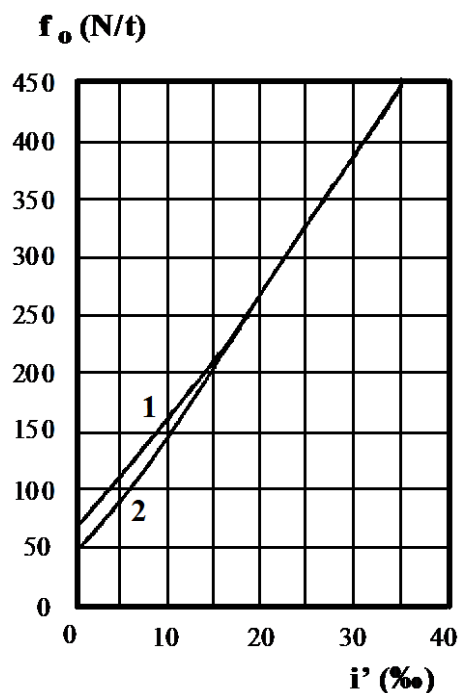


Figura 11 - Curvas do esforço de tração específico no arranque em função da inclinação da via para comboios de passageiros (1) e de mercadorias (2) [1].

Através destas curvas, sabe-se que, em patamar, no arranque de comboios de mercadorias e de passageiros se deve considerar um esforço de tração mínimo de 45 N/t e de 68 N/t, respetivamente. O maior esforço de tração requerido no arranque de comboios de passageiros deve-se ao facto de se pretender um arranque em simultâneo

dos veículos de modo a haver uma maior conforto. Por esse motivo, a folga nos engates entre veículos é menor pelo que ficam sujeitos a uma maior tensão, em relação aos engates dos comboios de mercadorias.

Para as rampas comuns com inclinação até 10 ‰, as curvas apresentadas na figura anterior podem ser representadas pelas retas $f_0 = 45 + i'$ (N/t) para comboios de mercadorias e $f_0 = 68 + i'$ (N/t) para comboios de passageiros. Contudo, para inclinações superiores a 15 ‰, o esforço de tração para ambos os tipos de comboios passa a ser idêntico visto que ocorre a sobreposição das curvas. Este acontecimento resulta do facto de em rampas mais inclinadas, os veículos se encontrarem de certa forma suspensos uns aos outros, o que tem como consequência o arranque em conjunto e, por isso, em simultâneo, dos veículos, devido aos engates ficarem mais tensos [1, 6, 11].

2.9 Cargas máximas rebocáveis

A carga máxima que uma locomotiva pode rebocar é função do esforço de tração máximo que pode ser desenvolvido pelos veículos motores no arranque, o qual não deve ultrapassar o limite imposto pela aderência, e do esforço de tração mínimo requerido para o arranque da composição numa rampa de inclinação compensada i' .

O esforço de tração máximo que pode ser desenvolvido no arranque pelas n locomotivas de uma composição vem dado pela seguinte expressão:

$$F \leq \mu_0 n P_a \quad (22)$$

Por outro lado, o esforço de tração mínimo requerido para o arranque da composição numa rampa com inclinação i' pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$F_0 = f_0 (n M_L + M_C) \quad (23)$$

O esforço de tração específico no arranque f_0 pode ser determinado a partir das curvas da figura 11. Relativamente aos termos M_L e M_C , estes representam a massa da locomotiva e da carga rebocada, respetivamente.

Deste modo, no cálculo da carga máxima rebocável deve-se respeitar simultaneamente as condições apresentadas anteriormente, podendo o seu valor ser determinado através da seguinte expressão [1]:

$$M_{C_{max}} = n \left(10000 \mu_0 \frac{P_a}{f_0} - M_L \right) \quad (24)$$

em que:

$M_{C_{max}}$ - massa total da carga máxima rebocável (t);

M_L - massa da locomotiva (t);

n – número de locomotivas;

μ_0 – coeficiente de aderência médio no arranque;

P_a - peso aderente da locomotiva (t);

f_0 - esforço de tração específico no arranque (N/t).

Deve-se ter em conta ainda outro fator no dimensionamento da carga máxima rebocável relativo à resistência dos engates de atrelagem [1].

Na atualidade, os comboios de passageiros e de mercadorias do tipo normal, encontram-se, geralmente, equipados com engates de esforço de rutura de 700 kN, enquanto os comboios de mercadorias do tipo especializado se equipam com engates de esforço reforçado de rutura de 850 kN.

Dado que se verificam durante os períodos de arranque e de frenagem, consideráveis variações do valor médio do esforço de tração nos engates entre veículos, deve-se adotar um coeficiente de segurança de 2,35, o que origina um esforço de tração máximo de 300kN e de 360 kN para os engates de 700 kN e de 850 kN, respetivamente [6].

Deste modo, a carga máxima rebocável, tendo em conta o esforço de tração máximo permitido pelos engates, pode ser determinada segundo a seguinte expressão [1]:

$$M'_{C_{max}} = \frac{F_e}{f_0} \quad (25)$$

em que:

$M'_{C_{max}}$ - massa total da carga máxima rebocável (t);

F_e - esforço de tração máximo nos engates (N);

f_0 - esforço de tração específico no arranque (N/t).

2.10 Frenagem

2.10.1 Princípio de funcionamento

A frenagem pode ser utilizada para reduzir a velocidade de marcha do comboio totalmente, conduzindo à sua imobilização, por exemplo numa estação, ou apenas parcialmente, de modo a respeitar os limites de velocidade permitidos nos diferentes troços da linha, a velocidade de marcha do comboio.

Na figura 12, encontra-se representada, a frenagem de um veículo ferroviário.

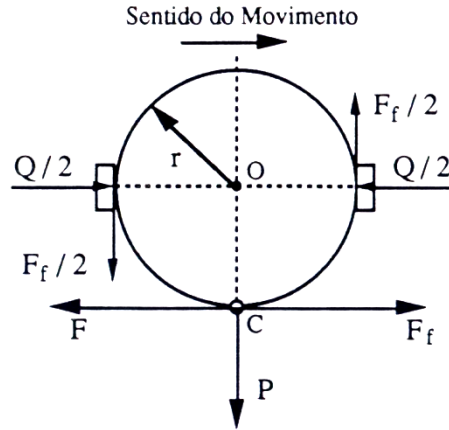


Figura 12 - Conjunto de forças resultantes da aplicação de calços contras as rodas dos veículos [1].

A frenagem obtém-se com recurso à aplicação de um esforço de frenagem Q por intermédio de calços ou freios contra as rodas ou eixos dos veículos que constituem o comboio, o que origina o aparecimento de uma força retardadora F_f tangencial ao ponto de aplicação [1]:

$$F_f = \varphi Q \quad (26)$$

em que φ representa o coeficiente de atrito de escorregamento no contacto calço-aro da roda.

Durante o período de frenagem deve-se garantir que a roda continua a girar, não ocorrendo o fenómeno de “patinagem”. Por esse motivo, é necessário assegurar que o binário retardador produzido pela força retardadora não ultrapassa o binário acelerador originado pela força F responsável pelo movimento da roda.

Com o objetivo de se garantir que durante a frenagem a roda continua a girar, não ocorrendo, assim, o fenómeno de “patinagem”, tem que se verificar que o binário retardador provocado pela força retardadora F_f não ultrapassa o binário acelerador originado pela força F responsável pelo movimento de rotação da roda. Deste modo, é necessário verificar a seguinte condição [1]:

$$F_f < F \quad (27)$$

equivalente a [1]:

$$\varphi Q < fP \quad (28)$$

sendo f o coeficiente de atrito roda-carril sem escorregamento e P o peso do veículo exercido sobre a roda em causa.

Caso esta condição não seja respeitada a roda passa a escorregar sobre o carril em vez de rodar, ocorrendo a “blocagem da roda”, deixando de se poder controlar a frenagem do comboio e, conseqüentemente, não será possível parar o comboio no local inicialmente previsto [1].

2.10.2 Distância de frenagem

A segurança da circulação ferroviária depende sobretudo do conhecimento das distâncias de frenagem dos comboios às velocidades de circulação. Por esse motivo, para que um comboio possa interromper a sua marcha tem, obrigatoriamente, que ser lhe dada a indicação de paragem antecipadamente e sempre a uma distância do local onde deve parar, no mínimo, igual ou superior à distância de frenagem correspondente à velocidade limite do troço da via em causa [1].

O período de frenagem pode dividir-se em duas fases distintas:

- a) uma primeira relativa ao acionamento do sistema de frenagem, que compreende os tempos de reação do maquinista e do sistema de frenagem, durante a qual não se verifica qualquer redução da velocidade do comboio;
- b) uma última referente à ‘‘frenagem útil’’ durante a qual se verifica uma efetiva redução da velocidade inicial do comboio [1].

Desta forma, para a primeira fase o comboio durante um intervalo de tempo t_c mantém a sua velocidade de marcha inicial V_0 e percorre uma determinada distância L_c , a qual pode ser determinada através da seguinte expressão [1]:

$$L_c = V_0 t_c \quad (29)$$

Os tempos de reação típicos dos maquinistas e dos sistemas de frenagem em utilização na atualidade, em função da velocidade de circulação do comboio, encontram-se normalmente situados nos intervalos apresentados de seguida [1]:

- a) Para comboios de passageiros:

V_0	t_c
km/h	s
100	8 - 9
120	6 - 8
140	5 - 6

Tabela 3 - Valores do tempo de reação em função da velocidade do comboio para comboios de passageiros.

b) Para comboios de mercadorias:

V_0	t_c
km/h	s
60	10 - 12
80	8 - 10

Tabela 4 - Valores do tempo de reação em função da velocidade do comboio para comboios de mercadorias.

Por outro lado, para a segunda fase do período de frenagem, o comboio percorre durante um tempo t_d uma distância de frenagem útil L_d , que pode ser obtida através da seguinte expressão [1]:

$$L_d = \frac{\lambda V_0^2}{2g(a+i'+\Psi m)} \quad (30)$$

Assim, a distância de frenagem total do comboio pode ser obtida por intermédio da seguinte expressão [1]:

$$L_f = \frac{V_0 t_c}{3,6} + \frac{\lambda V_0^2}{2g(a+i'+\Psi m)} \quad (31)$$

sendo:

L_f – distância de frenagem do comboio (m);

V_0 - velocidade do comboio no instante de acionamento dos freios (km/h);

t_c - tempo de reação do maquinista e do sistema de frenagem (s);

λ - coeficiente global das massa rotativas;

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

a – coeficiente específico da resistência ao movimento (N);

i' - inclinação da rampa compensada (‰);

Ψ - proporção de peso-freio do comboio;

m – coeficiente dependente da velocidade do comboio.

O coeficiente proporção de peso-freio do comboio Ψ é dado pelo quociente entre o peso freio de cada veículo do comboio (Qk) e o seu peso bruto (P). Na seguinte tabela apresenta-se a proporção mínima de peso-freio, em percentagem, que se deve verificar

para comboios de passageiros, em função da velocidade máxima do comboio, em km/h, [1]:

$V_{\max} < 100$	105
$100 < V_{\max} < 120$	110
$120 < V_{\max} < 140$	130
$V_{\max} > 140$	150

Os valores apresentados para a proporção peso-freio podem referir-se tanto a veículos isolados como a comboios, sendo que no caso destes últimos o peso-freio é a soma dos pesos-freios dos veículos que o formam o comboio [1].

O fator m , igualmente dependente da velocidade do comboio, cujo valor é geralmente retirado de tabelas ou determinado analiticamente a partir dos valores de variação da velocidade [1].

Por último, relativamente ao termo a , este é o quociente entre o termo A da resistência ao avanço do comboio e o peso do comboio P [1].

Relativamente à fase de frenagem útil, pode admitir-se, numa abordagem teórica, que o movimento do comboio é uniformemente retardado, podendo a distância L_d ser igualmente determinada através da seguinte equação [1]:

$$L_d = \frac{v_0^2}{2d} \quad (32)$$

em que o termo d representa o valor da desaceleração ou “aceleração de frenagem” em m/s^2 , o qual é negativo.

Igualando as equações 30 e 32, vem que a desaceleração, em função dos fatores inerentes ao comboio referidos anteriormente, pode ser dada por [1]:

$$d = \frac{g}{\lambda} (a + i' + \Psi m) \quad (33)$$

O valor da desaceleração dos sistemas de frenagem em utilização situa-se normalmente entre 0,4 e 0,6 m/s^2 para comboios de mercadorias e entre 0,6 e 0,8 m/s^2 para comboios de passageiros. No caso de comboios de alta velocidade, em resultado da maior potência dos freios, o valor da desaceleração pode ser superior a 1,0 m/s^2 [1].

2.10.3 Frenagem regenerativa

A frenagem elétrica consiste na utilização de motores elétricos reversíveis que tanto podem funcionar como motores de tração, durante os períodos de aceleração e de marcha em regime, absorvendo corrente elétrica da catenária e produzindo o esforço de

tração, ou como geradores, durante o período de frenagem, produzindo energia elétrica a partir da energia mecânica resultante da travagem do comboio [8, 14].

Este tipo de frenagem tanto pode ser aplicado em tração elétrica como em tração diesel-elétrica e, dentro de cada tipo de tração, em corrente contínua ou em corrente alternada [8].

Podem considerar-se três tipos de frenagem elétrica, nomeadamente: reostática, regenerativa e mista. No primeiro, a energia elétrica recuperada é dissipada sob a forma de calor através de um conjunto de resistências elétricas normalmente montadas sobre o próprio comboio. Por outro lado, na frenagem regenerativa, a energia elétrica é devolvida à catenária, sendo por esse motivo necessária a existência de um consumidor que a absorva, normalmente outros comboios ou subestações reversíveis. Este sistema de recuperação de energia elétrica é principalmente utilizado em linhas alimentadas com corrente alternada pelo facto de em corrente contínua as subestações serem irreversíveis.

A frenagem regenerativa permite recuperar cerca de 30% da energia elétrica fornecida pela catenária ao comboio para percorrer um determinado percurso [14].

2.11 Diagramas de marcha

O percurso entre duas paragens consecutivas de qualquer composição ferroviária pode dividir-se em vários períodos de marcha ordenados da seguinte forma [1,7,15]:

- a) Aceleração: o comboio acelera até atingir uma determinada velocidade de regime V_r ;
- b) Marcha em regime: o comboio circula à velocidade de regime durante um determinado intervalo de tempo;
- c) Marcha em deriva: o comboio percorre uma certa distância sem esforço de tração;
- d) Frenagem: o comboio procede à operação de travagem de modo a interromper a marcha ou apenas a reduzir a velocidade de circulação. Proceder a uma operação de travagem, de modo a parar ou a alcançar uma velocidade inferior imposta previamente.

Na figura 13, apresenta-se um diagrama de marcha $v(t)$ típico com a identificação dos períodos de marcha.

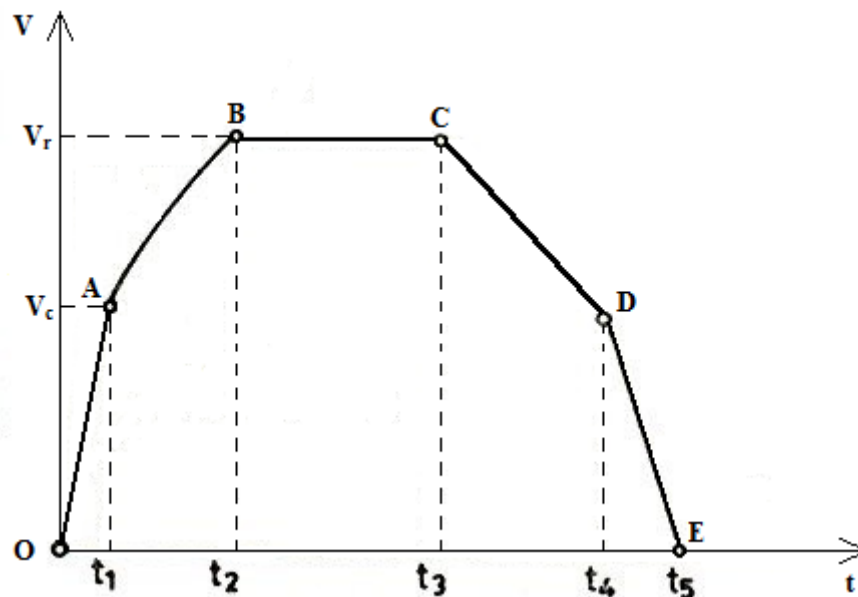


Figura 13 - Representação do diagrama $v(t)$ com os períodos de marcha característicos da marcha de um comboio [15].

Pode verificar-se que os tempos de percurso e as distâncias percorridas durante os períodos de aceleração e de frenagem dependem do material circulante em utilização, uma vez que são função dos esforços de tração desenvolvidos pelos veículos motores e do sistema de frenagem do comboio, respetivamente [1].

O período de aceleração caracteriza-se por uma fase inicial, correspondente ao arranque do comboio, durante a qual a aceleração é praticamente constante até ser atingida uma determinada velocidade crítica V_c . Após a velocidade crítica ser ultrapassada, a aceleração vai diminuindo até se anular ao se atingir a velocidade de regime V_r .

Quando se atinge a velocidade de regime, o comboio circula durante um certo período de tempo a velocidade constante, o qual se representa em patamar.

A este último período pode seguir-se um período de marcha em deriva, durante o qual se anula o esforço de tração, a redução de velocidade do comboio se deve somente ao conjunto das forças resistentes ao movimento. Devido a este período, verifica-se um aumento do tempo de percurso, o que é, por outro lado, compensado pela redução do consumo de energia.

A duração e a extensão dos períodos de marcha em regime e de marcha em deriva dependem geralmente da distância total do percurso a percorrer pelo que também são função dos valores da aceleração e da desaceleração característicos do material circulante e da velocidade média entre estações.

Por último, no período de frenagem, através da aplicação dos freios, ocorre a redução da velocidade do comboio até à sua paragem ou apenas até atingir uma velocidade de marcha inferior.

Um comboio pode percorrer um determinado percurso segundo diversas marchas, sendo cada uma caracterizada pelos diferentes instantes de entrada nos vários regimes de condução. O tipo de marcha depende, por sua vez, de vários fatores, tais como: as características topográficas da via-férrea ao longo do percurso, as características de desempenho do comboio, a experiência do maquinista e a natureza do serviço prestado, que pode ser urbano, suburbano e de longo curso.

Pode, portanto, verificar-se que a marcha de um comboio num determinado percurso sem o período de marcha em deriva, para uma dada velocidade de regime, conduz a tempos de percurso mínimos. Este tipo de marcha é geralmente adotado nos serviços urbano e suburbano, uma vez que as paragens são frequentes e os tempos disponíveis para percorrer os percursos entre paragens são relativamente curtos.

No caso da tração elétrica, dado que o sistema de frenagem permite a recuperação de energia, pode considerar-se unicamente o período em marcha de regime entre a aceleração e a frenagem. Deste modo, é possível obter um menor consumo de energia e tempos de percurso mais reduzidos, aumentando igualmente a capacidade de transporte da via-férrea considerada.

Para um dado veículo ferroviário, o conhecimento dos tempos de marcha relativos à aceleração e à frenagem permite estimar a extensão do percurso em que a circulação se faz à velocidade de regime e consequentemente, determinar os tempos de marcha correspondentes. Deste modo, pode-se proceder ao estabelecimento do horário numa determinada linha férrea. O diagrama $s(t)$ permite determinar o tempo de percurso entre duas estações [1].

Na figura 14 apresenta-se um diagrama de marcha $s(t)$ característico para o percurso entre duas estações, correspondendo os troços inicial e final da curva aos períodos de aceleração e de frenagem, respetivamente.

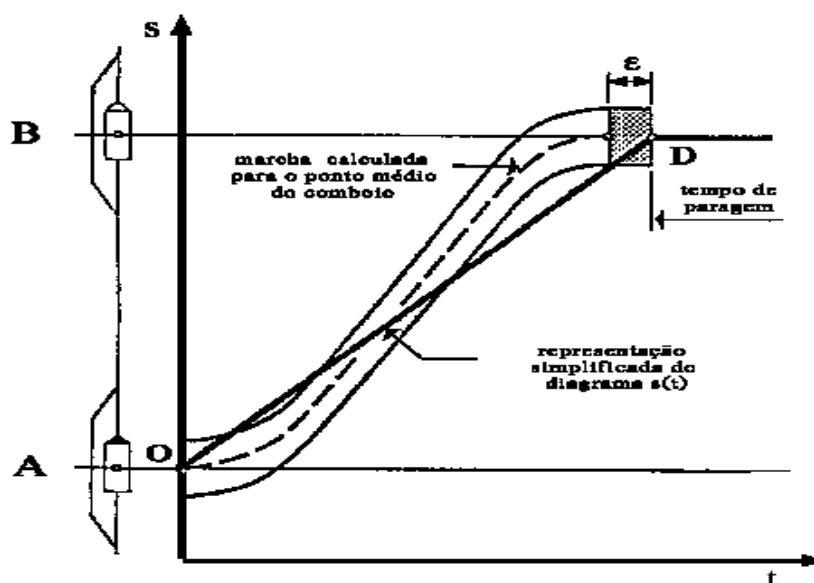


Figura 14 - Diagrama $s(t)$ típico para a marcha de um comboio entre duas paragens [1].

Para uma maior facilidade na construção e utilização do gráfico, substituem-se normalmente as curvas reais de marcha entre duas paragens consecutivas por segmentos de reta, admitindo-se, portanto, que entre esses dois pontos o comboio circula a uma velocidade constante, ou seja, a velocidade média real. Esta aproximação pode ser considerada aceitável, não sendo os erros relevantes, desde que se considerem extensões limitadas de linha no cálculo dos valores das velocidades médias.

De facto, as marchas individuais dos comboios são estabelecidas segundo o método acima referido. Os tempos de percurso entre pontos de referência na linha, normalmente as estações, são tempos exatos e, por isso, as horas de passagem nessas estações serão também exatas, constituindo os pontos-base para a construção dos gráficos. Deste modo, as diferenças entre os tempos teóricos e reais de passagem dizem apenas respeito aos pontos intermédios.

Deve-se ainda considerar a possibilidade dos comboios poderem realizar inúmeras marchas reais diferentes da marcha teórica prevista, em função da variação das acelerações e das velocidades de marcha estabelecidas de acordo com as necessidades verificadas. Desta forma, deve ser considerada a ocorrência de atrasos ou avanços relativamente aos tempos de percurso teóricos previamente calculados.

Portanto, no diagrama $s(t)$ deve-se considerar um determinado intervalo de tempo, representado pelo termo ϵ , que corresponde a um aumento do tempo de percurso previsto para um determinado percurso de modo a poder compensar quaisquer alterações.

Por fim, para uma análise completa da marcha de um comboio no percurso entre duas estações consecutivas deve-se obter o diagrama de marcha $v(s)$ através do qual se pode conhecer a velocidade de marcha do comboio correspondente a cada posição no percurso [1].

2.12 Gráficos do horário

As empresas ferroviárias, no que respeita ao transporte conjunto de passageiros e de mercadorias, procuram normalmente fazer a gestão do tráfego com base principalmente no serviço de comboios previsto, o qual em parte é regular, nomeadamente o de passageiros. Por outro lado, a circulação dos comboios de mercadorias, na maioria dos casos de carácter excecional, deve ser ajustada de modo a satisfazer as necessidades de transporte exigidas.

Quanto ao transporte de passageiros, verifica-se a necessidade de os passageiros conhecerem antecipadamente o horário das circulações, nomeadamente a hora de partida e de paragem nas estações.

Por sua vez, em relação ao transporte de mercadorias, já que o serviço é de carácter extraordinário, as circulações devem ser estabelecidas havendo um estudo prévio das marchas dos comboios e tendo em conta as circulações regulares e outras circulações

também suplementares inicialmente previstas no horário no período de tempo considerado.

A circulação dos comboios deve, portanto, respeitar os horários estabelecidos de forma rigorosa a fim de se garantir uma distância mínima entre circulações sucessivas, imposta por motivos de segurança, e também porque a própria via assim o exige, já que quer os cruzamentos quer as ultrapassagens só se podem realizar em locais específicos da via.

Pode concluir-se que se devem compilar num único gráfico todas as circulações previstas no horário de uma determinada linha para que se possa ter uma perceção do tráfego existente nessa linha. Os gráficos devem conter informação sobre a distribuição das circulações na linha durante um determinado intervalo de tempo horário, os pontos de cruzamento e os de ultrapassagem. Desta forma, podem-se tomar as melhores decisões relativamente ao controlo das circulações, no caso de ocorrência de qualquer incidente na circulação ou simplesmente por haver atrasos, o que obriga à alteração dos cruzamentos ou ultrapassagens. Do mesmo modo, quando se pretender introduzir uma circulação suplementar na linha, verifica-se que também estes gráficos constituem uma ferramenta de fundamental importância [1].

Estes gráficos são designados por “gráficos do horário”, apresentando-se na figura 15 um exemplo típico.

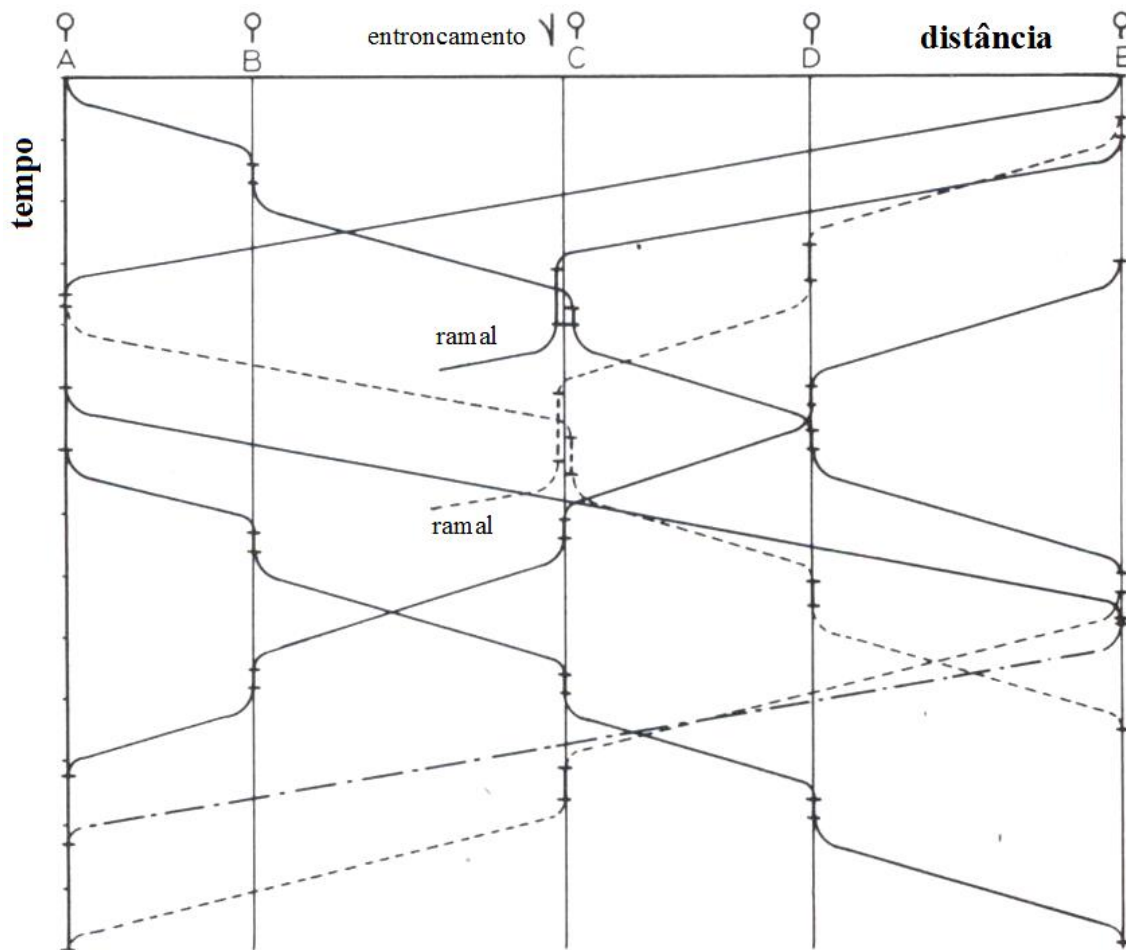


Figura 15 - Representação de um exemplo típico de um gráfico horário para um determinado trecho de linha.

Os gráficos do horário tratam-se, portanto, de diagramas $s(t)$ através dos quais é possível conhecer a posição, correspondente a cada instante de tempo, das diferentes circulações na linha.

2.13 Organização da circulação ferroviária

A segurança da circulação ferroviária depende principalmente do conhecimento das distâncias de frenagem dos comboios às velocidades de circulação. Por esse motivo, para que um comboio consiga interromper a sua marcha, em conformidade com a indicação dada por um sinal fechado, tem obrigatoriamente que ser lida a indicação de paragem antecipadamente e, sempre, a uma distância do local onde deve parar igual ou superior à distância de frenagem correspondente à velocidade limite do troço da via em que o comboio se encontra em circulação.

Deste modo, pode estabelecer-se que o princípio básico para a segurança da circulação ferroviária consiste em assegurar, em qualquer caso, uma distância mínima entre comboios consecutivos num mesmo percurso. Esta distância deve ser suficiente para que um comboio que circula à velocidade máxima permitida num dado troço de via

consiga abrandar ou mesmo parar, sem que exista a possibilidade de ocorrência de choque com o comboio que o antecede.

Por esse motivo, admite-se que qualquer linha se encontra dividida em troços, denominados cantões, cuja extensão deve obrigatoriamente ser superior à distância de frenagem do comboio mais desfavorável em circulação nessa linha. Desta forma, a regra básica para a circulação ferroviária estabelece que num dado cantão não pode circular, num determinado instante, mais do que um comboio.

Verifica-se, por isso, antes do comboio entrar num dado cantão, a necessidade de se ter conhecimento, acerca do cumprimento do horário e do estado de ocupação desse cantão. Esta informação é dada por um intermédio de um sinal posicionado à entrada de cada cantão.

Como resultado das elevadas distâncias de frenagem características dos comboios, não se pode aplicar a circulação de marcha à vista, adotada na circulação rodoviária, uma vez que quando o sinal à entrada do cantão se torna visível a distância a percorrer pode já não ser suficiente para interromper a marcha do comboio. Por esta razão, deve-se adotar um sistema de sinalização que possibilite ao maquinista conhecer antecipadamente a indicação de paragem.

O sistema de sinalização aplicado consiste na utilização de um sinal principal, de carácter absoluto, que protege a entrada de cada cantão antecedido de um sinal avançado, de carácter permissivo, que repete a indicação dada pelo sinal principal. Este sistema de sinalização permite ao maquinista saber, com suficiente antecedência, se um dado cantão se encontra ou não livre, o que lhe permite, no caso de estar ocupado, interromper a marcha antes de entrar nesse cantão.

A fim de se aumentar a segurança na circulação devido principalmente às maiores velocidades de circulação dos comboios, encontram-se, atualmente, disponíveis sistemas de repetição automática das indicações dos sinais a bordo dos veículos motores para que o maquinista possa conhecer com antecedência o estado de ocupação dos cantões.

De igual modo, com a finalidade de se evitar a ocorrência de acidentes, caso não sejam respeitadas as indicações dadas pelos sinais, recorre-se, de modo geral, à utilização de dispositivos de comprovação da observação dos sinais, sendo estes acionados pelos maquinistas durante a marcha. Têm-se igualmente sistemas de controlo da velocidade dos comboios e de frenagem automática, os quais são principalmente utilizados nas linhas de tráfego intenso ou onde circulam comboios de alta velocidade.

Desta forma, quando um comboio entra num cantão, o sinal de entrada e, conseqüentemente o sinal avançado correspondente, devem ser fechados, impedindo a entrada no referido cantão de qualquer outro comboio. De referir, que a reabertura desse sinal não pode ser realizada sem que esse cantão se encontre completamente livre.

permissivos”. Deste modo, pode-se autorizar a entrada dos comboios num cantão ocupado desde que se verifique a circulação em regime de “marcha à vista”, efetuando paragem caso o sinal à entrada esteja fechado. Por esta razão, este tipo de cantonamento é denominado de “permissivo”.

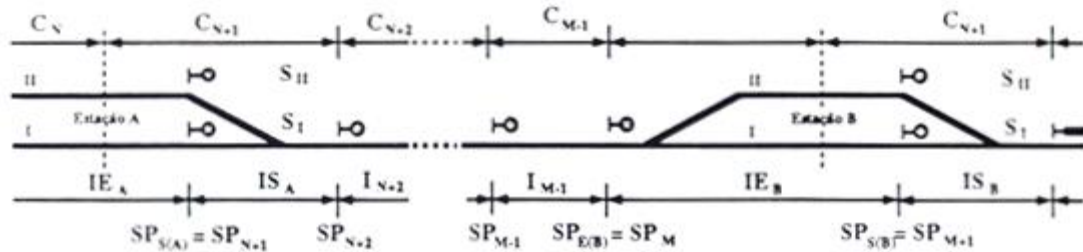


Figura 17 - Esquema do cantonamento de plena via de uma dada linha [1].

Caso o troço de linha apresentado anteriormente seja explorado em cantonamento de plena via, tal como se encontra representado na figura 17, o comboio, estabelecido o horário de saída IS_A da estação **A**, circula até ao primeiro sinal de cantonamento SP_{N+2} , situado imediatamente a jusante da estação **A**, e pode entrar nos cantões consecutivos de plena via se os sinais que os protegem se encontrarem abertos. Tal como no cantonamento telefónico, o comboio entra na estação **B** se o respetivo sinal de entrada $SP_{E(B)}$ estiver também aberto.

Do mesmo modo, com o objetivo de se aproveitar para a exploração das linhas, todas as potencialidades das infraestruturas existentes, adota-se o cantonamento de plena via também em linhas de via única e consideram-se as duas vias como linhas de via dupla, existindo em cada a sinalização adequada aos dois sentidos de circulação.

2.14 Espaçamento mínimo entre circulações

O problema do espaçamento entre comboios sucessivos consiste fundamentalmente na extensão dos cantões relativamente ao comprimento dos comboios e às distâncias de frenagem correspondentes às diferentes velocidades de circulação, uma vez que podem ocorrer situações em que os tempos de espaçamento mínimos entre comboios se afastam significativamente dos tempos requeridos para os comboios percorrerem os referidos cantões. Deste modo, a fim de se determinar devidamente esse espaçamento, o esquema geral do cantonamento necessita portanto de ser corretamente interpretado, já que os resultados obtidos só são suficientemente aproximados no caso de a extensão dos cantões ser muito maior que o comprimento máximo das composições e das distâncias de frenagem [1].

Na figura 18 encontra-se um esquema relativo à distância mínima que deve verificar entre comboios sucessivos:

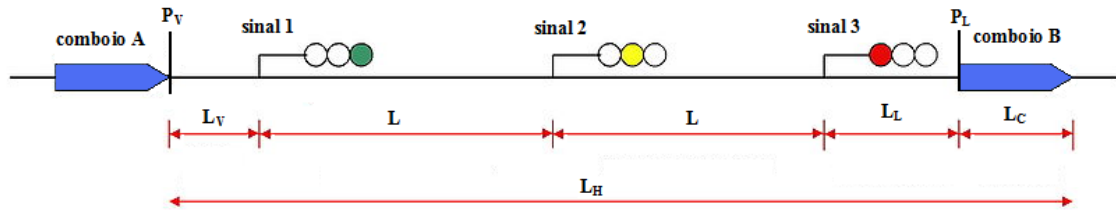


Figura 18 - Espaçamentos mínimo entre circulações consecutivas [16].

Através desta figura pode verificar-se que a distância mínima entre circulações consecutivas pode ser dada pela seguinte expressão [17, 18]:

$$L_H = L_V + L + L + L_L + L_C \quad (34)$$

em que:

L_H - distância mínima entre comboios sucessivos (m);

L_V - distância mínima de visibilidade do sinal avançado (m);

L - extensão do cantão (m);

L_L - distância de libertação do cantão ou "overlap" (m);

L_C - comprimento do comboio (m).

Em relação à distância mínima de visibilidade L_V do sinal avançado, que se deve verificar quando o comboio atinge o ponto P_V , esta depende basicamente das velocidades máximas permitidas para a circulação na linha e, por esse motivo, é de fundamental importância, uma vez que a posição do respetivo sinal avançado é estabelecida em conformidade com essa distância. Podem-se considerar normalmente valores mínimos na ordem de 200 e 300 metros para velocidades de 100 a 120 km/h [1].

Por sua vez, a distância de libertação L_L , imediatamente a jusante do sinal de cantonamento que se prolonga até ao ponto de libertação P_L , pode-se considerar como uma distância de segurança que, em caso de a distância de frenagem ter sido determinada de forma incorreta, podendo, por isso, a distância real ser superior à expetável, ou em caso de ocorrência de situações inesperadas, como por exemplo, aparecimento de fumos ou nevoeiro, escorregamento das rodas do comboio, falha do sistema de frenagem ou mesmo por motivos de distração do maquinista, possa garantir que numa extensão de linha considerável após o cantão não se encontre outro comboio em circulação [17, 18]. Por esta razão, o cantão só se pode considerar totalmente libertado quando o último eixo do comboio passar o ponto de libertação P_L [1]. Os valores que a distância de libertação pode adotar são igualmente função da velocidade de circulação do comboio (Tabela 5) [19].

V	L_L
km/h	m
> 60	200
≤ 60	100
≤ 40	50
≤ 30	0

Tabela 5 - Valores da distância de libertação em função da velocidade do comboio.

Do mesmo modo, o tempo que o comboio demora para percorrer a distância L_H é o tempo mínimo entre comboio sucessivos, que também pode se designado por “headway”. O headway pode ser definido como o inverso do número de comboios que percorrem um dado troço de linha, de extensão, pelo menos, igual ou superior à distância L_H no período de uma hora. Por exemplo, se durante uma hora 5 comboios percorrem esse troço de linha, o headway será portanto de 12 minutos. Deste modo, pode-se concluir que o headway é um fator indicativo da capacidade de transporte de qualquer linha ferroviária. Como facilmente se entende, os comboios de passageiros devem apresentar um headway superior aos comboios de mercadorias pelo facto dos primeiros terem um serviço regular e não ocasional como ocorre, na maioria dos casos, com os comboios de mercadorias. Para uma linha de tráfego reduzido, em que o tempo entre comboios sucessivos pode ser elevado, a capacidade de transporte da linha pode ser compensada pelo aumento do número de passageiros ou de mercadorias por cada comboio em circulação [17].

O esquema apresentado na figura anterior é relativo a linhas com tráfego intenso, nas quais se procura reduzir ao mínimo a distância entre comboios sucessivos, de modo a satisfazer as necessidades de transporte. Recorre-se, por esse motivo, a cantões de plena via de reduzida extensão, o que constitui uma solução para a redução dos tempos mínimos entre comboios sucessivos. No entanto, a extensão dos cantões não dever ser inferior às distâncias de frenagem consideradas em cada caso, já que essa distância corresponde à situação em que o sinal avançado de um dado cantão é ao mesmo tempo o sinal principal que protege o cantão anterior [1].

Deste modo, da fusão deste dois sinais, tem-se um novo de tipo de sinal que apresenta três posições: “via livre”, “paragem” e “anúncio de paragem”, tal como no caso apresentado na figura 18. Esta última posição comanda a redução da velocidade do comboio, indicando que o próximo cantão se encontra livre, mas que o cantão seguinte está ocupado, ordenando paragem o sinal que o protege, o qual é também de carácter absoluto, tal como todos os outros [1].

Neste tipo de cantonamento, a ocupação de qualquer cantão compreende duas fases distintas: uma primeira de interdição absoluta, durante a qual o comboio percorre o

cantão, e uma última de marcha condicionada, referente à circulação do comboio no cantão seguinte.

Por sua vez, nos casos em que a extensão dos cantões é muito maior que as distâncias de frenagem verificadas a respetiva proteção é assegurada por intermédio de um sinal principal, de duas posições, precedido pelo respetivo sinal avançado, também de duas posições, posicionado a uma distância pelo menos igual ou superior à distância de frenagem do comboio mais desfavorável em circulação.

Por outro lado, relativamente a cantões de extensão muito reduzida, inferior à distância de frenagem verificada, o comando de paragem deve obrigatoriamente ser dada antes do próprio sinal principal do cantão antecedente, constituindo-se assim uma segunda fase de marcha condicionada, correspondente a um “pré-aviso” de abrandamento da velocidade do comboio.

Adotam-se, por esse motivo, sinais com quatro posições, conseguindo-se reduzir desta forma ao mínimo o espaçamento entre circulações, o que permite atingir os valores máximos no que diz respeito à capacidade de transporte da linha [1].

Capítulo 3

3. PROGRAMAS DE GESTÃO DAS BASES DE DADOS

3.1 Introdução

A simulação, por intermédio de meios informáticos, da marcha de uma composição ferroviária ao longo de um percurso passa pelo desenvolvimento de um conjunto de programas destinados à introdução e gestão de dados, à criação de percursos e composições ferroviárias, à simulação da marcha e, por fim, à apresentação dos resultados dessa simulação.

Deste modo, numa fase inicial o utilizador procede à introdução e gestão dos dados necessários para a definição de uma via-férrea ou de um veículo ferroviário, sendo toda esta informação armazenada em bases de dados.

A partir das bases de dados da via-férrea e do material circulante, constitui-se o comboio e define-se o percurso para o qual se pretende simular a marcha, guardando-se igualmente os dados referentes aos comboios e percursos criados em bases de dados.

Pode-se proceder, então, à simulação da marcha, que compreende duas fases, uma pré-simulação em regime de tempo mínimo e uma simulação em regime de tempo rígido ou horário. Na pré-simulação em regime de tempo mínimo, na qual a velocidade de circulação que se pretende atingir em cada etapa do percurso é a velocidade limite da respetiva etapa, determina-se o tempo necessário para o comboio percorrer cada etapa. Por sua vez, na simulação de marcha em regime de tempo rígido obtém-se o tempo relativo e a velocidade de circulação correspondentes a cada posição do comboio ao longo do percurso.

Por fim, apresentam-se os resultados da simulação sob a forma dos diagramas de marcha velocidade-tempo, $v(t)$, posição-tempo, $s(t)$, e velocidade-posição $v(s)$, entre outros.

3.2 Programa da base de dados da via-férrea

Na base de dados da via-férrea encontram-se armazenados os dados relativos às linhas ou troços de linha que constituem uma rede ferroviária. Deste modo, para se definir uma nova linha ou troço de linha, têm que se estabelecer os seguintes elementos referentes às características da linha:

a) Dados gerais, que incluem a designação, os pontos quilométricos inicial e final, o número de estações e/ou apeadeiros, número de etapas de velocidade máxima, número de etapas de inclinação de perfil compensado, número de blocos de sinalização, número de troços de via única e, por último, número de entroncamentos com outra(s) via(s);

- b) Estações, nomeadamente o nome de cada uma e o respetivo ponto quilométrico;
- c) Etapas de velocidade máxima, para as quais se define a velocidade máxima a que o comboio pode circular naquela zona da via e o ponto quilométrico final dessa etapa;
- d) Etapas de perfil compensado, tal como no caso anterior das etapas de velocidade máxima, introduz-se para cada etapa o valor da inclinação compensada e o respetivo ponto quilométrico final;
- e) Blocos de sinalização, referentes a todos os sinais que podem ocorrer na linha, tais como os sinais a montante e a jusante das estações, os sinais de cantonamento, os sinais nos cruzamentos com outras linhas da rede ferroviária e também os sinais indicadores da alteração do número de vias, e o respetivo ponto quilométrico;
- f) Troços de via única, caso haja secções na via em que não se verifica a possibilidade de circulação de comboios no sentido ascendente e descendente simultaneamente, é necessário identificá-las através dos pontos quilométricos que marcam o seu início e fim;
- g) Entroncamento(s), uma vez que uma linha faz parte de uma rede ferroviária, devem, por isso, existir ligações com uma ou mais linhas dessa mesma rede. Deste modo, para qualquer linha indica-se o ponto quilométrico do cruzamento e o(s) nome(s) da(s) linha(s) com que este ocorre.

Após a introdução destes dados, ficam assim estabelecidos todos os parâmetros que o utilizador deve obrigatoriamente introduzir na caracterização de qualquer linha numa rede ferroviária.

Solicita-se, portanto, ao utilizador que introduza, sempre que criar uma nova linha, os dados referentes a cada um destes campos tanto para o sentido ascendente como para o sentido descendente de circulação, de modo a ficar armazenada na base de dados toda a informação acerca dessa linha, obtendo-se assim uma caracterização completa da mesma.

No caso das estações, pode admitir-se, para simplificação do programa e porque, na maioria das linhas é, regra geral, o que se verifica, que estas ocorrem na linha numa ordem inversa de um sentido relativamente a outro e, portanto, basta definir o seu ponto quilométrico para um dos sentidos, já que para o outro este pode ser definido automaticamente pelo programa.

Por outro lado, quanto aos troços de linha com sentido único e aos entroncamentos com outras linhas, verifica-se a necessidade de terem de ser definidos separadamente para ambos os sentidos de circulação, já que normalmente não surgem de modo simétrico na linha.

Quanto às etapas de velocidade limite e às de perfil compensado, apesar de em algumas, mas poucas, situações se poderem gerar automaticamente os seus dados para um sentido

a partir do outro, já antes definido, tal como no caso das estações, é comum o utilizador ter que definir para ambos os sentidos de circulação os dados destes campos, uma vez que não surgem de forma simétrica na linha de um sentido para outro, aumentando esta possibilidade com a extensão da linha.

Por último, relativamente aos diferentes tipos de sinais na linha, é facilmente perceptível que o utilizador deve obrigatoriamente definir a sua localização para ambos os sentidos de circulação.

Neste programa, desenvolvido para a gestão da base de dados, apresentam-se ao utilizador diversas opções, no que diz respeito à definição da rede ferroviária, podendo o utilizador ou introduzir novos dados, através da criação de uma nova linha ou do carregamento de uma outra linha, já existente em outro local de trabalho, ou alterar os dados referentes a linhas já existentes na base de dados.

Relativamente à alteração de dados, existe a hipótese de o utilizador poder corrigir dados introduzidos erradamente numa primeira fase, introduzir novos dados que foram omitidos, isto é, intercalar dados com os já existentes, acrescentar novos dados, o que se verifica, por exemplo, caso ocorra um prolongamento na linha ou surja uma nova estação e, por fim, apagar dados, ou por não estarem corretos ou porque se verificou a ocorrência de modificações na linha.

Nesta fase, apresentam-se ao utilizador todos os campos que é preciso definir para caracterizar uma linha, como por exemplo a informação relativa às estações, às etapas de velocidade máxima, etc, e este tem a possibilidade de seleccionar concretamente aqueles em que pretende efetuar alterações.

Por outro lado, se o utilizador quiser criar uma nova linha ou carregar uma já existente contida noutra "drive" de trabalho, a qual até pode ser externa, determina-se em primeiro lugar o número de linhas já existentes na base de dados, isto é a dimensão desta base em termos de elementos, e atribui-se a posição que esta nova linha deve tomar na base de dados não só para que seja ordenada corretamente bem como para se evitarem sobreposições com as linhas já armazenadas.

Ainda nesta fase de introdução de dados, o programa deve garantir que o utilizador não pode introduzir dados incoerentes ou que não façam qualquer sentido em termos práticos, tais como velocidades máximas negativas ou inclinações muito elevadas superiores a um limite máximo aceitável. Ou seja, é necessário evitar a introdução de valores que em situação alguma se poderiam verificar na realidade.

Na figura 19, encontra-se representado um fluxograma que descreve o funcionamento do programa desenvolvido para a gestão da base de dados das vias férreas.

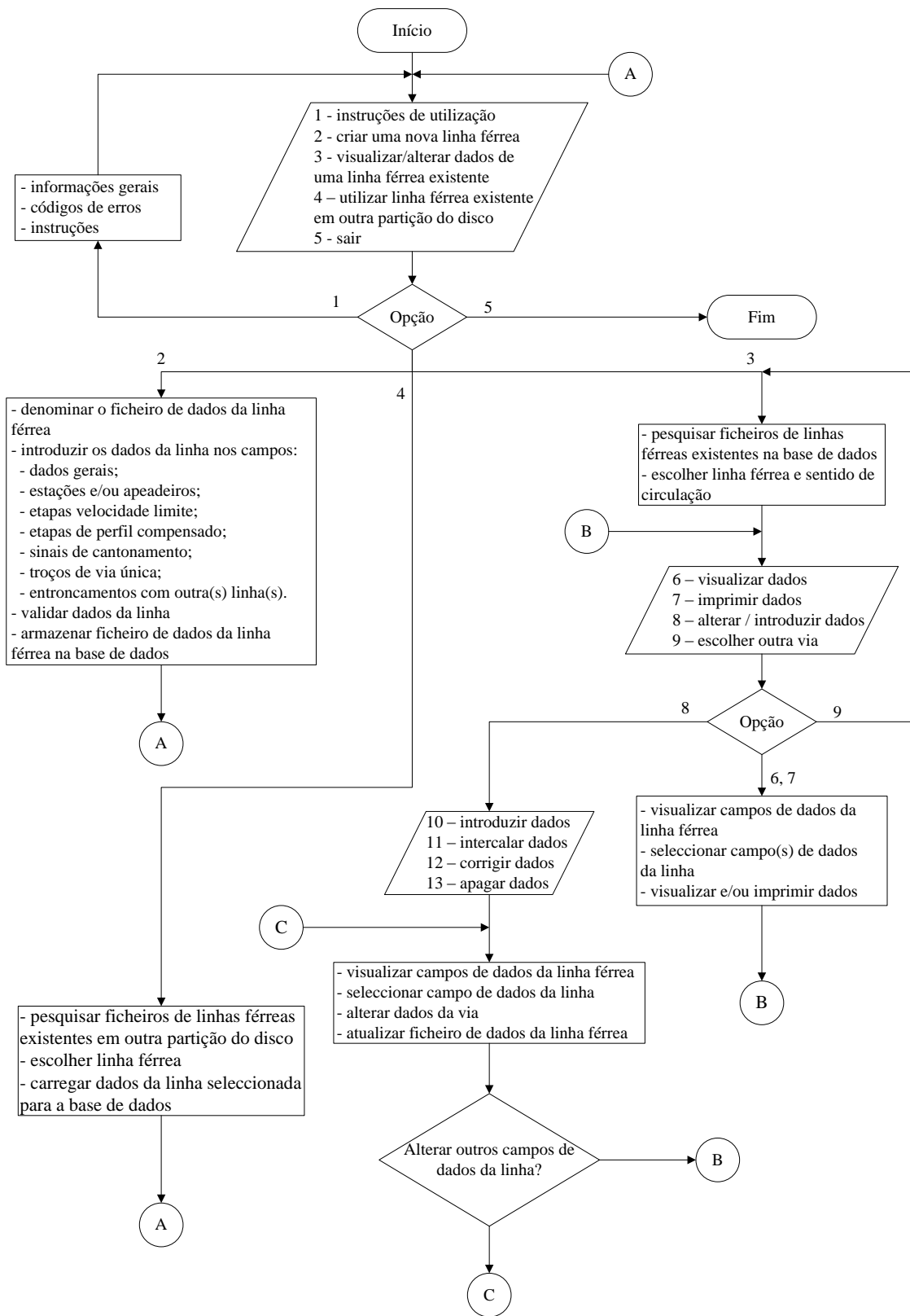


Figura 19 - Esquema representativo do funcionamento do programa de gestão da base de dados das vias férreas.

Por forma a ficar claro o que se entende por etapa de velocidade máxima/limite e por etapa de perfil compensado, faz-se de seguida a definição e apresenta-se também um exemplo de cada um destes tipos de etapas.

Em relação às etapas de velocidade limite, estas correspondem às zonas da linha férrea em que a velocidade máxima a que o comboio pode circular não se altera, enquanto as etapas de inclinação do perfil compensado dizem respeito às zonas da linha férrea em que a inclinação do perfil compensado permanece constante.

Na figura 20 encontram-se representados exemplos das etapas de velocidade limite e de perfil compensado num determinado troço de uma linha férrea.

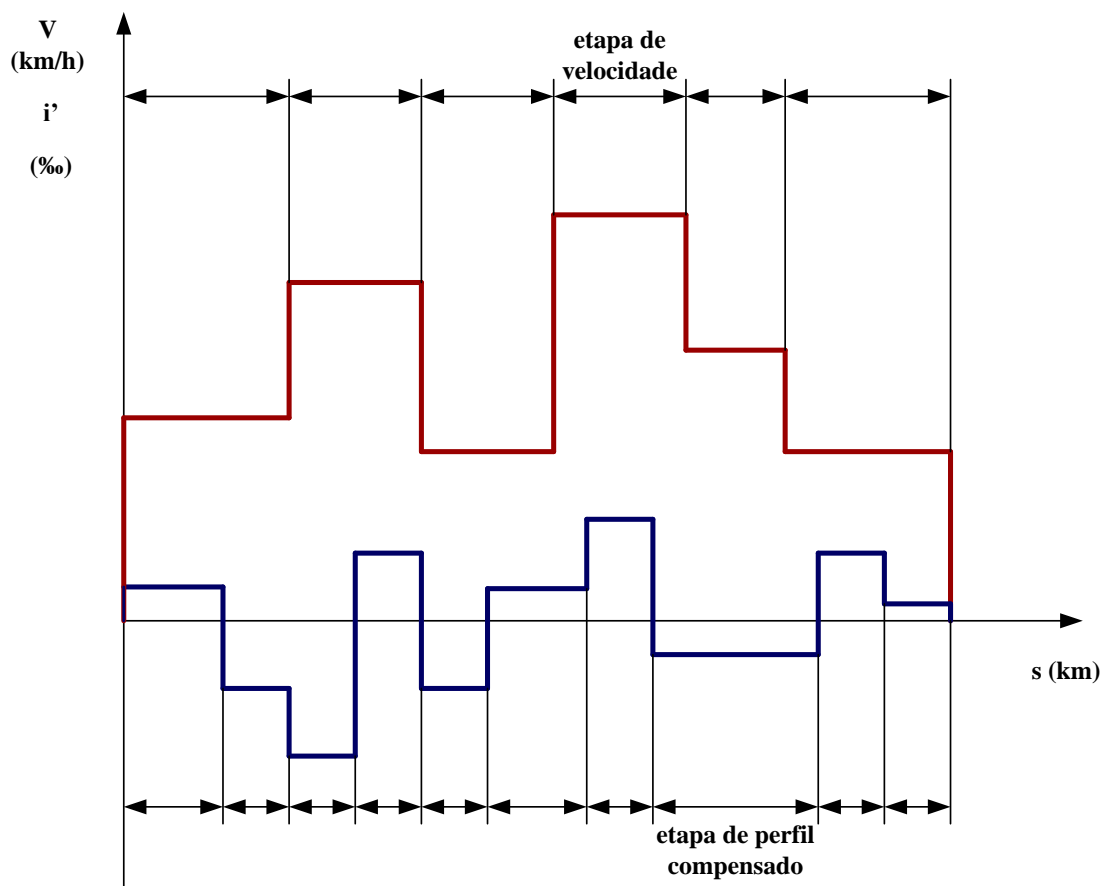


Figura 20 - Representação das etapas de velocidade limite e de perfil compensado para um dado troço de uma via-férrea.

Por outro lado, apesar desta distinção, ao longo deste capítulo sempre que surgir o termo “etapa” está-se a fazer referência a etapas de velocidade limite.

3.3 Programa para a definição dos itinerários e dos percursos

Estando definida a rede ferroviária, pode-se então estabelecer o itinerário, que contém o percurso, em que circula o comboio, também constituído pelo utilizador, para o qual se pretende realizar a simulação de marcha.

A fim de se estabelecer o itinerário, o utilizador tem que definir, as estações inicial e final e caso, estas estações não façam parte da mesma linha, tem que definir igualmente por quais dos entroncamentos deve circular o comboio.

Dependendo do grau de complexidade da rede ferroviária, isto é do número de linhas e de entroncamentos entre as mesmas, existe a possibilidade de se poderem seguir diversos ‘‘caminhos’’ para se chegar à estação final do itinerário a partir da estação inicial, pelo que cabe também ao utilizador seleccionar os cruzamentos em que o comboio deve mudar de linha.

Ao se estabelecer um itinerário, guardam-se automaticamente numa base de dados, designada por ‘‘Base de dados dos itinerários’’, todos os elementos relativos às estações, às etapas de velocidade limite, às etapas de perfil compensado, à sinalização e aos troços de via única, se existirem, das linhas ou troços de linha que fazem parte desse itinerário.

Na figura 21, tem-se um fluxograma que traduz de modo simplificado o programa utilizado para o estabelecimento dos itinerários.

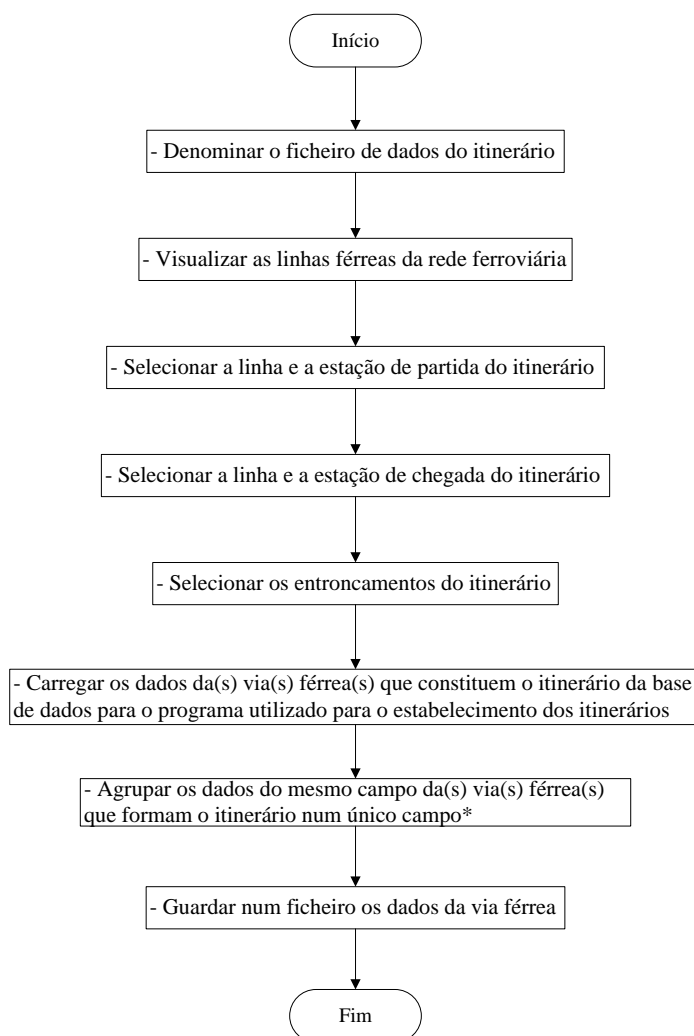


Figura 21 - Esquema representativo do funcionamento do programa desenvolvido para a elaboração dos itinerários.

Dentro de cada itinerário, podem coexistir inúmeros percursos. Por exemplo, um percurso pode ser definido da estação inicial à estação final do itinerário, enquanto um outro, de menor extensão, pode estar compreendido entre apenas duas das estações

intermédias do itinerário. Os diversos percursos que podem ocorrer num mesmo itinerário podem ser estabelecidos, por exemplo, em função da necessidade de transporte de passageiros entre certas localidades num determinado período de tempo horário.

Deste modo, para qualquer percurso num determinado itinerário, o utilizador deve definir em quais das estações intermédias o comboio irá parar bem como o respetivo tempo de paragem. Para além disso, o utilizador tem igualmente que introduzir o tempo necessário para o comboio percorrer o percurso entre duas paragens consecutivas, indispensável para a realização da simulação de marcha em regime de tempo rígido. Este intervalo de tempo pode ser obtido, para percursos em exploração, a partir do horário estabelecido para esse mesmo percurso disponibilizado pela empresa ferroviária. Por outro lado, para percursos ‘fictícios’ ou para percursos em estudo para futura implementação, o tempo de percurso entre paragens deve ser definido em conformidade com o tempo mínimo necessário para percorrer esses mesmos percursos, determinado através da pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.

Do mesmo modo, toda a informação relativa a um dado percurso será igualmente armazenada nesta mesma base de dados, para posterior utilização no programa da simulação de marcha.

Na figura 22, encontra-se representado um fluxograma que descreve o funcionamento do programa desenvolvido para o estabelecimento dos percursos.

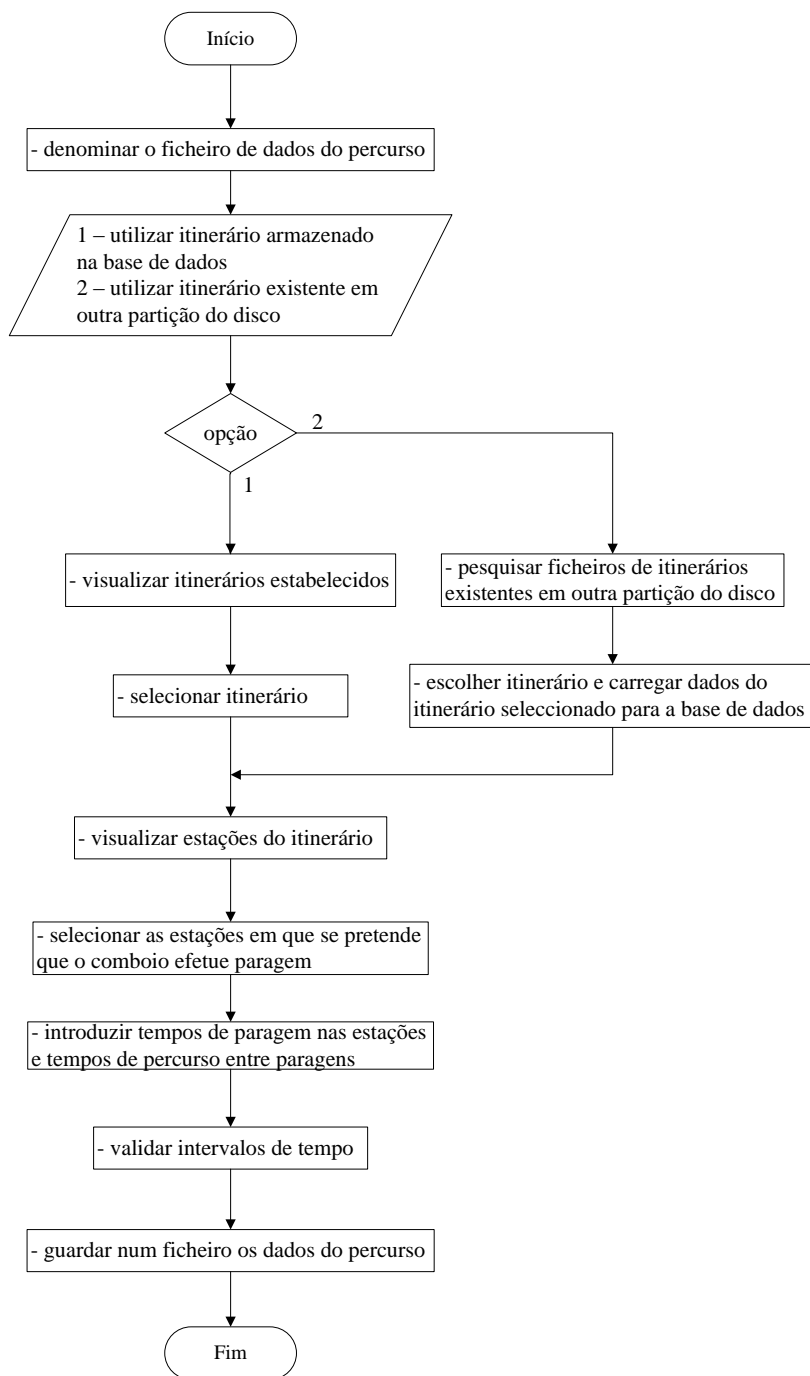


Figura 22 - Esquema representativo do funcionamento do programa utilizado para o estabelecimento dos percursos

3.4 Programa da base de dados do material circulante

O material circulante divide-se em veículos motores e rebocados. Os veículos motores compreendem as locomotivas e as unidades múltiplas e podem ser de tração elétrica ou diesel. Por sua vez, os rebocados dizem respeito às carruagens de passageiros e aos vagões de mercadorias.

Na base de dados do material circulante, o utilizador introduz a informação referente aos veículos ferroviários, nomeadamente locomotivas, carruagens e unidades múltiplas,

constituintes do parque ferroviário considerado. Após a introdução destes dados, o utilizador pode então constituir o comboio, composição clássica de locomotiva e carruagens ou associação de unidades múltiplas, para o qual se pretende simular a marcha num determinado percurso. Os dados relativos a qualquer comboio constituído pelo utilizador e, por sua vez, necessários à simulação da marcha serão também armazenados nesta base de dados.

Em relação à natureza da carga a transportar, os comboios podem ser classificados como sendo de passageiros (unidades múltiplas ou composições de locomotiva e carruagens), de mercadorias (composições de locomotivas e vagões) ou “mistos”, uma vez que pode haver comboios de passageiros com vagões para transporte de mercadorias.

Para qualquer veículo a introduzir pelo utilizador na base de dados devem-se obrigatoriamente definir todos os elementos necessários à sua caracterização e que constituem dados imprescindíveis caso se pretenda simular a marcha desse veículo ou de um comboio de que esse veículo seja parte constituinte.

Em primeiro lugar, define-se se o veículo é do tipo rebocado ou motor, classificando-se ainda os últimos segundo o tipo de tração, elétrica ou diesel.

Para qualquer veículo ferroviário, seja do tipo rebocado ou motor, atribui-se uma designação e definem-se as suas características físicas, geométricas e mecânicas. As características físicas compreendem a massa total do veículo e o número de eixos, enquanto as geométricas, se referem às dimensões do veículo, nomeadamente o comprimento, a altura e a largura. Por último, as características mecânicas dizem respeito à velocidade máxima a que o veículo pode circular e ao coeficiente das massas rotativas do veículo, λ .

No caso de o veículo a introduzir ser uma carruagem ou um vagão, os elementos acima referidos seriam suficientes para a sua caracterização. Por outro lado, caso seja um veículo motor, locomotiva ou automotora, é necessário inserir a informação referente ao seu sistema de tração.

Para além disso, para os veículos motores, dentro das características físicas estabelece-se ainda o peso aderente, ou seja, o peso exercido apenas sobre os eixos motores do veículo, o coeficiente de aderência médio no arranque, μ_0 . Relativamente às características mecânicas, introduzem-se também os polinómios que definem os vários troços, dois ou três na maioria dos casos, que constituem a curva do esforço de tração do veículo em função da velocidade, a aceleração máxima no arranque e o valor da desaceleração máxima durante o período de frenagem.

Para os veículos motores de tração elétrica, define-se ainda, quanto ao motor e ao sistema de recuperação, o rendimento e o fator de potência, e a potência que se encontra disponível para a realização de serviços auxiliares, como por exemplo ar condicionado, iluminação, etc.

Encontra-se, assim, definida toda a informação que o utilizador necessita de ter conhecimento acerca de um veículo que pretender introduzir na base de dados do material circulante.

Na figura seguinte, apresenta-se um fluxograma que explica o funcionamento do programa desenvolvido para a gestão da base de dados do material circulante.

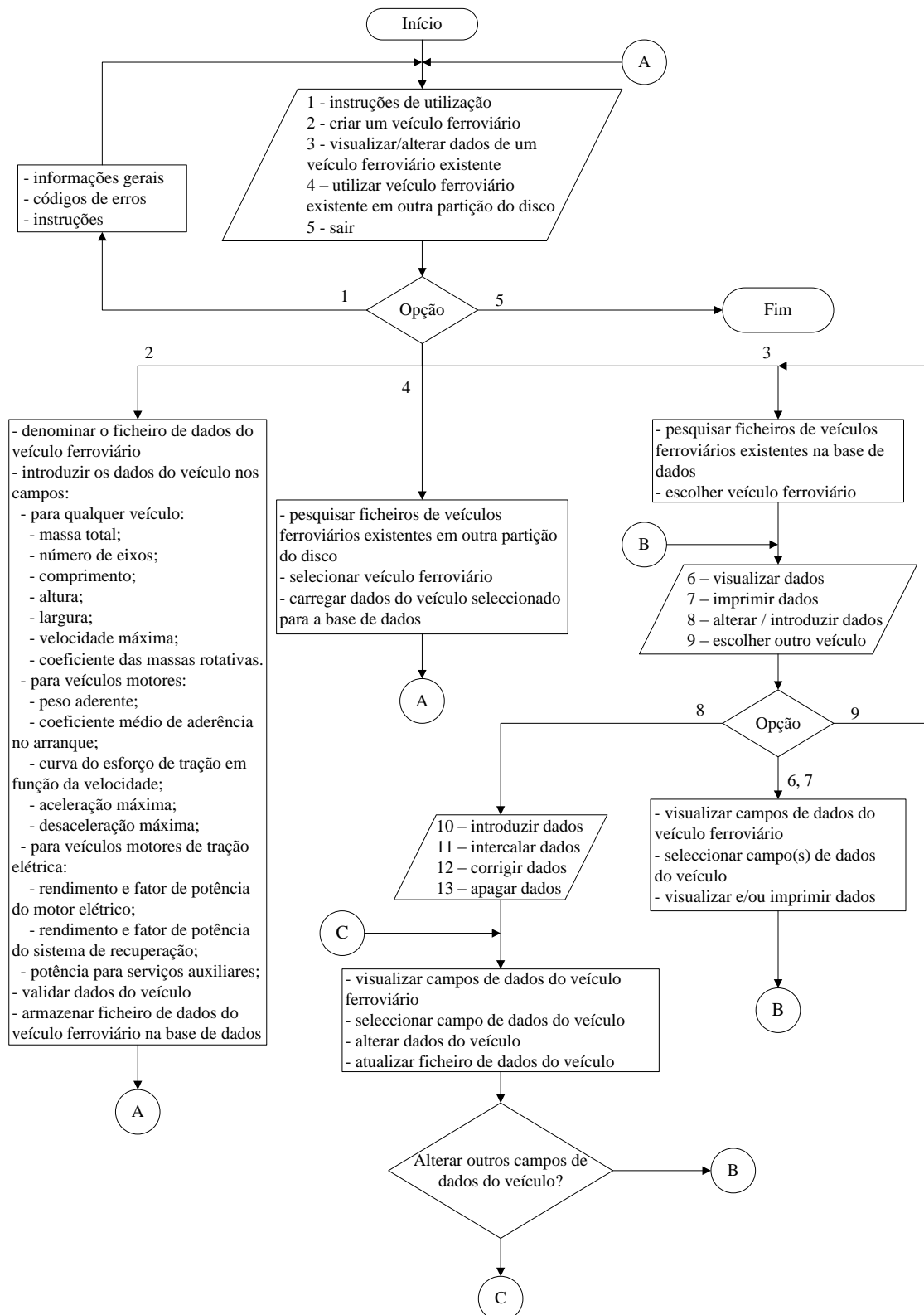


Figura 23 - Esquema representativo do funcionamento do programa de gestão da base de dados do material circulante.

3.5 Programa para a constituição das composições ferroviárias

Nesta base de dados, encontram-se guardados os dados referentes aos comboios formados pelo utilizador recorrendo aos veículos ferroviários rebocados e motores contidos na base de dados do material circulante, que posteriormente serão necessários para simular a marcha de um dado comboio num determinado percurso.

Na constituição do comboio, para que não ocorra a possibilidade de se constituírem comboios que na realidade não existem e que não fazem qualquer sentido, impõem-se algumas restrições nomeadamente:

a) Se um comboio for constituído por mais que um veículo motor, estes podem ser todos idênticos, o que normalmente se verifica, ou no caso de serem diferentes a sua potência deve ser limitada a um valor máximo que seja, pelo menos, concordante com a potência do veículo mais desfavorável;

b) A massa total do comboio não pode ultrapassar um limite máximo estabelecido de acordo com as equações 3.37 e 3.38 apresentadas no capítulo anterior;

c) O comprimento do comboio não pode ser superior à extensão do cais das estações em que o comboio efetua paragem.

Desta forma, o utilizador começa por definir o tipo de tração, elétrica ou diesel, e o tipo de serviço a desempenhar, o qual pode ser de passageiros ou de mercadorias, sendo apresentados ao utilizador os veículos motores e rebocados contidos na base de dados do material circulante que se adequam ao tipo de tração e de serviço deste comboio.

Para cada comboio constituído, os dados mínimos que devem ser guardados relativos às suas características físicas, geométricas e mecânicas, são os seguintes:

- Curva do esforço de tração em função da velocidade $F(v)$;
- Valores máximos da aceleração e desaceleração que se podem verificar no arranque e frenagem do comboio, respetivamente;
- Coeficientes numéricos A, B e C necessários ao cálculo da resistência ao avanço;
- Massa inercial total do comboio, M' ;
- Peso aderente total referente aos veículos motores, P_a ;
- Coeficiente de aderência no arranque, μ_0 ;
- Esforço de tração no arranque, F_0 ;
- Dimensões geométricas (comprimento, altura e largura).

Definida toda a informação necessária à caracterização do comboio, pode-se então proceder à simulação da marcha deste comboio no percurso anteriormente selecionado.

O fluxograma representado na figura 24 apresenta de modo simplificado o programa utilizado para a constituição das composições ferroviárias.

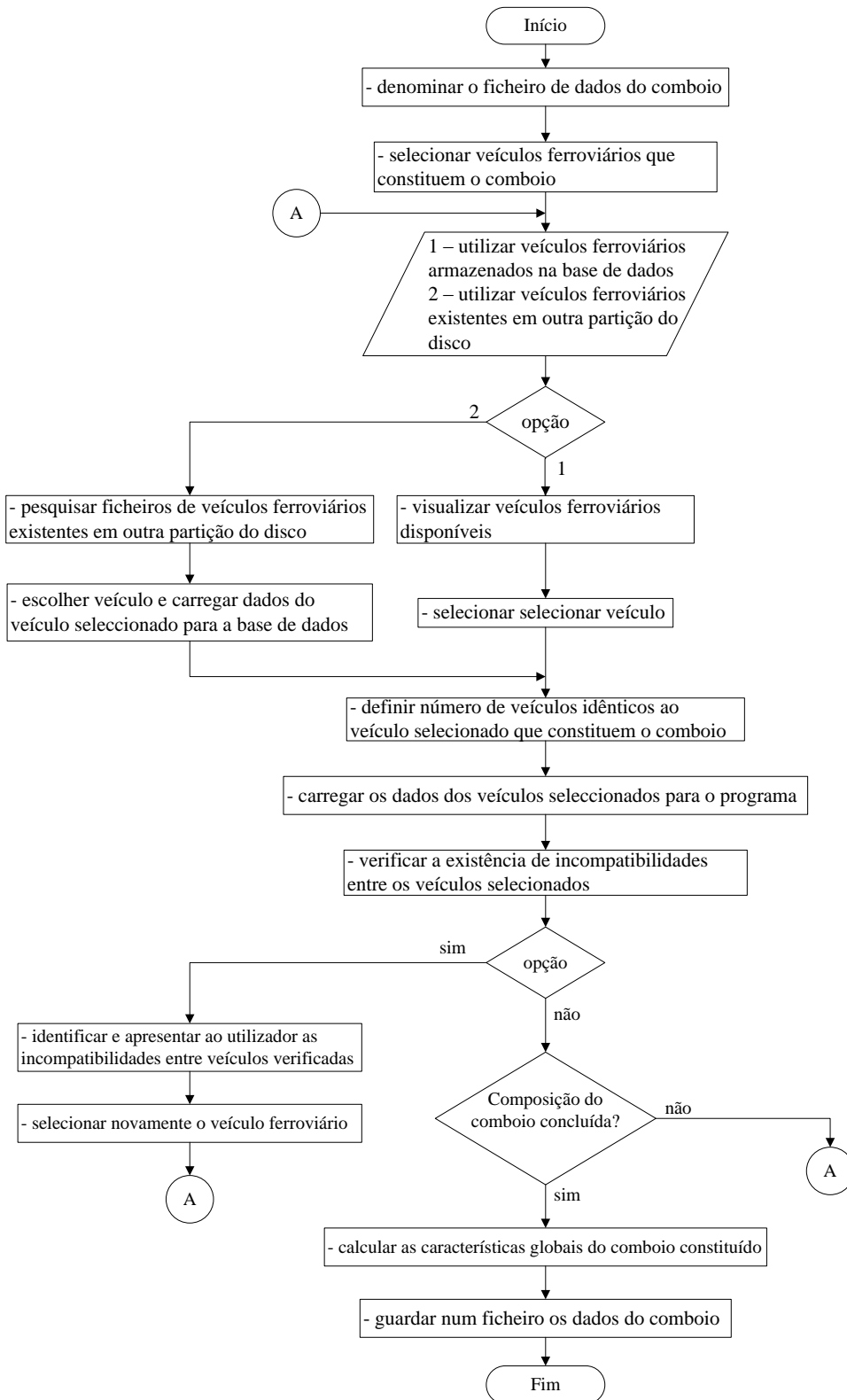


Figura 24 - Esquema representativo do funcionamento do programa utilizado para a constituição das composições ferroviárias.

Capítulo 4

4. SIMULAÇÃO DE MARCHA

4.1 Introdução

A simulação da marcha de um dado comboio num determinado percurso compreende duas fases: uma pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo e uma simulação de marcha em regime de tempo rígido.

A pré-simulação tem como objetivo determinar a aceleração média nas etapas (de velocidade) do percurso e o tempo mínimo despendido pelo comboio para percorrer essas etapas, considerando que a velocidade limite de cada etapa constitui a velocidade máxima permitida.

Na simulação em regime de tempo rígido, o intervalo de tempo disponível para o comboio percorrer o percurso entre paragens consecutivas (o qual pode ser igual ou superior ao determinado através da pré-simulação anterior) é retirado do horário estabelecido para esse percurso e, portanto, o que se pretende através desta simulação é determinar a nova velocidade limite das etapas para este novo intervalo de tempo dado pelo horário. Deste modo, para um determinado percurso, verifica-se que caso o intervalo de tempo for igual ao determinado através da pré-simulação em regime de tempo mínimo, as velocidades limite das etapas não se alteram. Por outro lado, caso seja superior, as novas velocidades limite serão tanto menores quanto maior for esse intervalo de tempo.

Calculadas as velocidades limite das etapas, pode-se então proceder à simulação de marcha no percurso a fim de se obter para cada posição do comboio ao longo do percurso o tempo relativo e a velocidade de circulação correspondentes.

A partir destas grandezas, procede-se então à construção dos diagramas de marcha $s(t)$, $v(s)$ e $v(t)$, através dos quais é possível saber qual a velocidade a que o comboio circula num determinado ponto do percurso bem como o tempo absoluto correspondente a essa posição.

4.2 Algoritmo de simulação de marcha

Antes de se fazer a abordagem ao algoritmo que constitui a base do programa desenvolvido para a simulação da marcha de um dado comboio num determinado percurso, é necessário introduzir algumas designações que foram adotadas e que irão surgir ao longo deste capítulo.

No que diz respeito às etapas de velocidade limite que podem ocorrer num percurso, considera-se, no modelo de simulação adotado [1], que estas podem ser do tipo -2, -1, 1 ou 2, o qual, por sua vez, é definido de acordo com a relação entre a velocidade limite

da etapa em análise com a velocidade limite das etapas adjacentes a esta, tal como se apresenta de seguida:

a) Etapa tipo -2

Neste tipo de etapa, a sua velocidade limite, $VL(i)$, é inferior à velocidade limite da etapa anterior, $VL(i-1)$, bem como à velocidade limite da etapa seguinte, $VL(i+1)$.

Na figura 25, apresenta-se um exemplo de uma etapa do tipo -2.

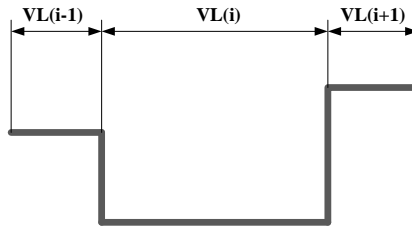


Figura 25 - Exemplo típico de uma etapa do tipo -2.

b) Etapa tipo -1

Nas etapas do tipo -1, a sua velocidade limite é inferior à velocidade limite da etapa anterior e superior à velocidade limite da etapa seguinte (Fig. 26).

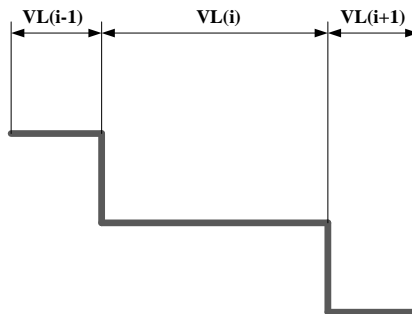


Figura 26 - Exemplo típico de uma etapa do tipo -1.

c) Etapa tipo 1

Quanto às etapas do tipo 1, a sua velocidade limite é inferior à velocidade limite da etapa anterior e superior à velocidade limite da etapa seguinte, tal como se apresenta na figura seguinte:

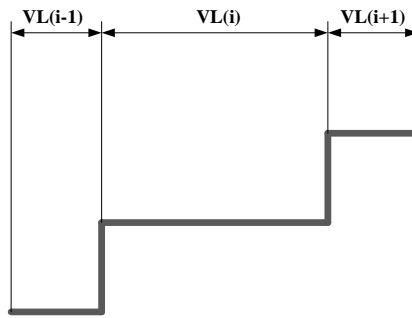


Figura 27 - Exemplo típico de uma etapa do tipo 1.

d) Etapa tipo 2

Por último, em relação às etapas do tipo 2, a sua velocidade limite é superior tanto à velocidade limite da etapa anterior como à velocidade limite da etapa seguinte (Fig. 28).

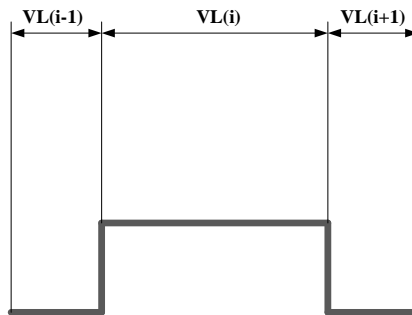


Figura 28 - Exemplo típico de uma etapa do tipo 2.

Relativamente aos tipos de percurso que se podem considerar dentro de um percurso compreendido entre estações terminais, estes dividem-se em percursos globais, percursos intermédios e percursos parciais. Na figura 29 encontram-se representados exemplos destes tipos de percurso.

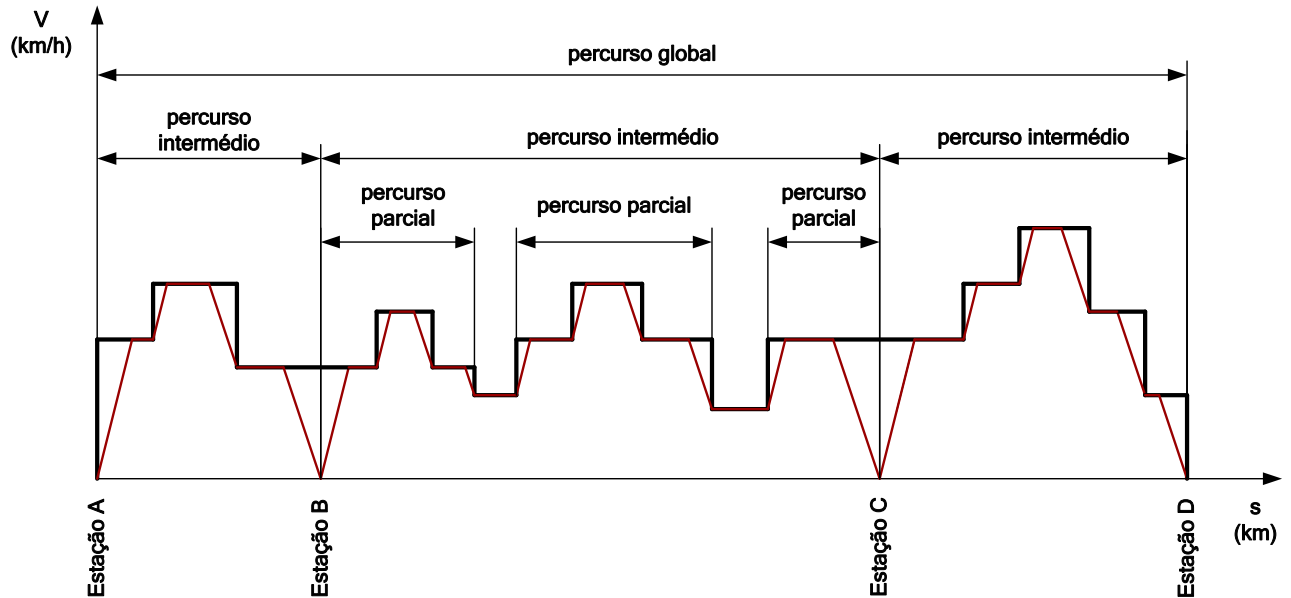


Figura 29 - Representação dos diversos tipos de percurso que podem ocorrer no trajeto entre duas estações.

Entende-se por cada um destes termos o seguinte:

- a) percurso global – espaço percorrido entre a estação de partida e a estação de chegada num dado percurso;
- b) percurso intermédio – espaço percorrido entre duas estações nas quais o comboio efetua paragem;
- c) percurso parcial – espaço percorrido entre uma paragem e uma etapa do tipo -2, entre duas etapas do tipo -2 e entre uma etapa do tipo -2 e uma paragem num dado percurso intermédio.

Deste modo, num percurso intermédio com uma ou mais etapas do tipo -2 podem existir diversos percursos parciais.

Após estas definições, é possível apresentar o programa que permite simular a marcha de uma composição ferroviária ao longo do seu percurso numa via-férrea.

Deste modo, o utilizador deve, em primeiro lugar, estabelecer a circulação para a qual pretende simular a marcha, através da seleção da composição ferroviária e do percurso que esta irá percorrer.

Na seguinte figura, apresenta-se o programa, por intermédio de um fluxograma, que permite ao utilizador constituir as circulações.

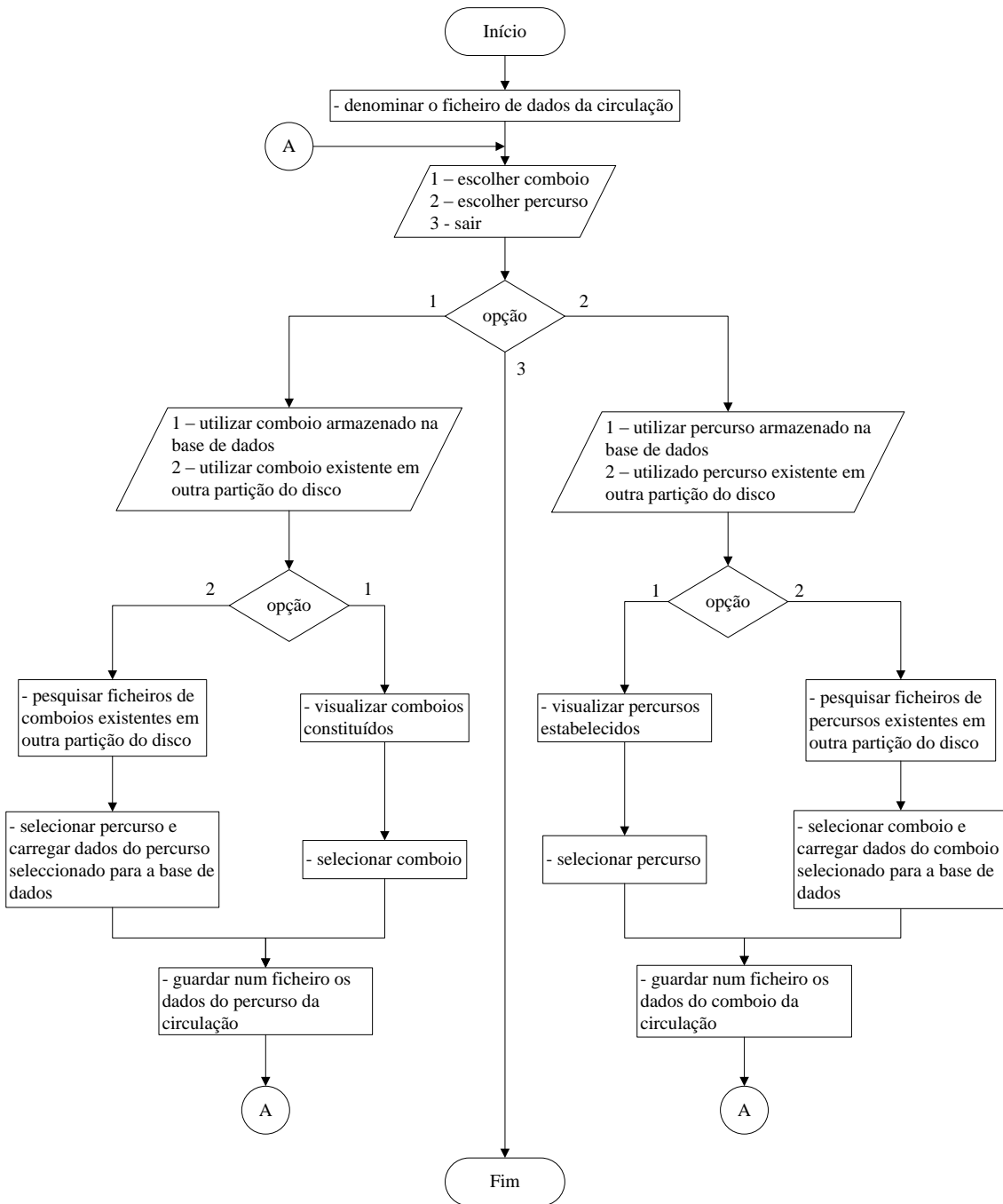


Figura 30 - Esquema representativo do funcionamento do programa desenvolvido para a definição das circulações.

Relativamente aos dados referentes, tanto ao comboio como ao percurso, indispensáveis para a realização da simulação, estes devem ficar estabelecidos quando o utilizador constitui o comboio e concebe o percurso nos programas especificamente desenvolvidos para o efeito já abordados anteriormente.

Deste modo, verifica-se, em primeiro lugar, se a velocidade limite de cada etapa no percurso entre as estações terminais é inferior ou igual à velocidade máxima do comboio. Caso esta condição não se verifique, a velocidade limite da etapa passa a ser igual à velocidade máxima do comboio.

Caso surjam etapas adjacentes, isto é, etapas consecutivas, com igual velocidade limite, devido ao facto de poderem existir etapas adjacentes com velocidade limite superior à velocidade máxima do comboio, é necessário agrupá-las numa única etapa, cujo comprimento total é o somatório dos comprimentos de cada uma destas etapas.

De seguida, no caso de o comboio parar em alguma das estações intermédias do percurso, determina-se o número de percursos entre paragens e procede-se, daqui em diante, na simulação em regime de tempo mínimo e de tempo rígido, ao tratamento individual de cada um destes percursos intermédios.

Deste modo, para cada uma das etapas que integram cada percurso intermédio, identifica-se o seu tipo, que, tal como se referiu anteriormente, pode ser -2, -1, 1 ou 2.

Caso o percurso intermédio seja constituído por apenas uma etapa, esta é obrigatoriamente do tipo 2.

Para os restantes percursos intermédios com mais que uma etapa na sua constituição, a identificação do tipo de etapa é feita do seguinte modo:

- a) Para a primeira etapa do percurso

Condição		Tipo de etapa
Etapa seguinte		
$VL(i+1) < VL(i)$		2
$VL(i+1) > VL(i)$		1

Tabela 6 - Definição do tipo de etapa para a primeira etapa de um percurso intermédio.

- b) Para as etapas intermédias do percurso, isto é, exceto a primeira e a última etapa do percurso

Condição		Tipo de etapa
Etapa anterior	Etapa seguinte	
$VL(i-1) > VL(i)$	$VL(i+1) < VL(i)$	-1
$VL(i-1) > VL(i)$	$VL(i+1) > VL(i)$	-2
$VL(i-1) < VL(i)$	$VL(i+1) < VL(i)$	2
$VL(i-1) < VL(i)$	$VL(i+1) > VL(i)$	1

Tabela 7 - Definição do tipo de etapa para as etapas intermédias de um percurso intermédio.

c) Para a última etapa do percurso

Condição	Tipo de etapa
Etapa anterior	
$VL(i-1) > VL(i)$	-1
$VL(i-1) < VL(i)$	2

Tabela 8 - Definição do tipo de etapas para a última etapa de um percurso intermédio.

Após se definir o tipo de etapa, determina-se para cada etapa do percurso, as suas velocidades inicial (VI) e final (VF), o seu comprimento (D) e a sua posição inicial (SI).

Caso o percurso seja constituído por apenas uma etapa, as suas velocidades inicial e final são, como facilmente se compreende, iguais a zero.

Por outro lado, caso o percurso seja constituído por mais que uma etapa, analisa-se de modo individual a primeira etapa, as etapas intermédias e a última etapa.

As velocidades inicial e final das etapas determinam-se em função da sua posição (primeira etapa, etapas intermédias ou última etapa) no percurso intermédio e do tipo de etapa.

a) Para a primeira etapa

A primeira etapa pode ser do tipo 1 ou 2.

Velocidades iniciais e finais:

Tipo de etapa	Velocidade inicial (VI)	Velocidade limite (VL)	Velocidade final (VF)
1	0	$VL(i)$	$VL(i)$
2	0	$VL(i)$	$VL(i+1)$

Tabela 9 - Definição das velocidades inicial e final para a primeira etapa de um percurso intermédio.

b) Para as etapas intermédias:

As etapas intermédias podem ser do tipo -2, -1, 1 ou 2.

Velocidades iniciais e finais:

Tipo de etapa	Velocidade inicial (VI)	Velocidade limite (VL)	Velocidade final (VF)
-1	VL(i)	VL(i)	VL(i+1)
-2	VL(i)	VL(i)	VL(i)
2	VL(i-1)	VL(i)	VL(i+1)
1	VL(i-1)	VL(i)	VL(i)

Tabela 10 - Definição das velocidades inicial e final para as etapas intermédias de um percurso intermédio.

c) Para a última etapa do percurso:

A última etapa pode ser do tipo -1 ou 2.

Velocidades iniciais e finais:

Tipo de etapa	Velocidade inicial (VI)	Velocidade limite (VL)	Velocidade final (VF)
-1	VL(i)	VL(i)	0
2	VL(i-1)	VL(i)	0

Tabela 11 - Definição das velocidades inicial e final para a última etapa de um percurso intermédio.

4.3 Pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo

Na simulação da marcha para cada percurso intermédio, em regime de tempo mínimo, o objetivo é determinar, para cada etapa em cada percurso intermédio, a aceleração média, $a_{médio}$, excluindo-se deste cálculo as etapas dos tipos -1, -2 e também certas etapas do tipo 2, por não apresentarem período de aceleração, e o tempo que o comboio leva para percorrer cada etapa, o qual é denominado por tempo mínimo de etapa, T_{min} .

É importante referir, que para cada um destes tipos de etapas, se tem um caso geral bem como diversos casos particulares. Diz-se que uma etapa se enquadra no seu caso geral quando na marcha do comboio ao percorrer essa etapa, se verificam todos os períodos de marcha que à partida seriam teoricamente expetáveis de ocorrer. Isto é, por exemplo quando um comboio percorre uma etapa do tipo 2, deve haver na sua marcha um período de aceleração, de velocidade constante e, por último, de frenagem. Contudo, podem aparecer no percurso etapas do tipo 2, em que na marcha do comboio só se

verifica, entre outras possibilidades, ou período de aceleração ou período de aceleração e de velocidade constante, correspondendo estas situações a casos particulares de etapas do tipo 2. Desta forma, conclui-se, que para cada tipo de etapa o conjunto dos respetivos casos geral e particulares deve abranger todas as possíveis situações de marcha suscetíveis de acontecer quando o comboio percorrer uma etapa desse tipo.

De notar ainda, que somente as etapas do tipo -2, não apresentam qualquer caso particular, uma vez que se admite que o comboio percorre estas etapas à sua velocidade limite, como se pode observar de seguida.

Deste modo, e após esta breve explicação, procede-se ao cálculo da aceleração e do tempo mínimo para cada etapa do percurso, de acordo com o tipo de etapa:

a) Etapa tipo 2

Assim, para qualquer etapa do tipo 2, independentemente da posição ocupada no percurso intermédio, determina-se o valor da aceleração correspondente a cada posição do comboio durante o período de aceleração, de acordo com o fluxograma da seguinte figura:

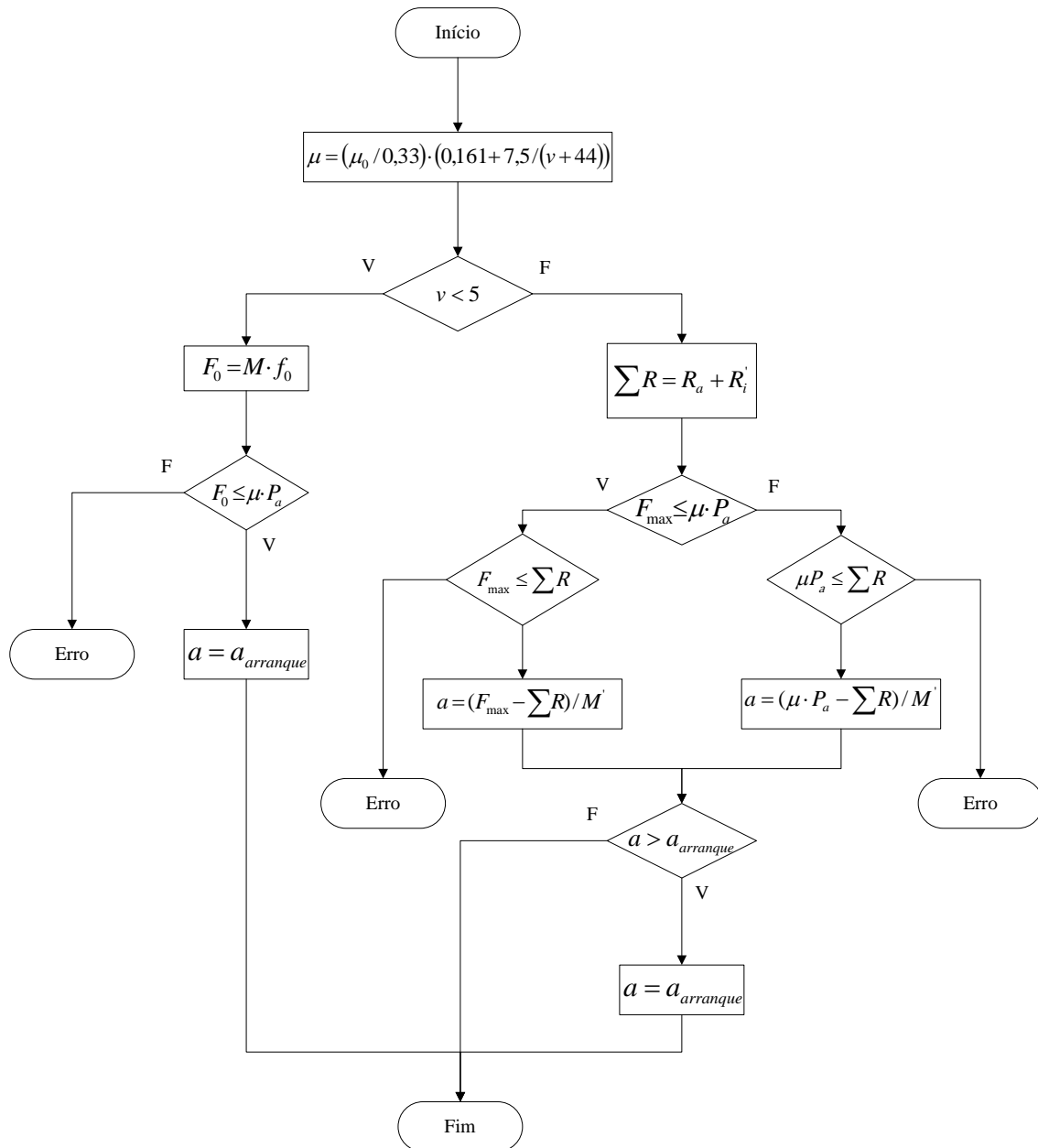


Figura 31 - Fluxograma do algoritmo para o cálculo da aceleração do comboio.

A aceleração média no período de aceleração da etapa determina-se através da seguinte equação:

$$a_{medio}(i) = \frac{\left(\left(\frac{v(i, j)}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{VI(i)}{3,6} \right)^2 \right)}{2 \times (s(i, j) - SI(i))} \quad (35)$$

Em que, o termo $v(i, j)$ se refere à velocidade do comboio quando termina o período de aceleração e o termo $s(i, j)$ corresponde à posição do comboio no fim do período de aceleração.

De seguida, determina-se a distância de aceleração (SA) e a distância de frenagem (SD) do comboio na etapa.

A distância de aceleração é a distância necessária para o comboio atingir a velocidade limite da etapa a partir da sua velocidade inicial.

$$SA = \frac{\left(\frac{VL(i)}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2}{2 \times a_{medio}(i)} \quad (36)$$

A distância de frenagem é a distância necessária para o comboio atingir a velocidade final da etapa a partir da sua velocidade limite.

$$SD = \frac{\left(\frac{VL(i)}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2}{2 \times d} \quad (37)$$

Por fim, para se determinar o tempo mínimo que o comboio precisa para percorrer a etapa, tem, em primeiro lugar, que se verificar se a etapa do tipo 2 ou corresponde ao caso geral ou a um dos casos particulares.

Caso geral: $(D(i) \geq SA + SD)$

A figura seguinte representa uma etapa do 2 correspondente ao caso geral.

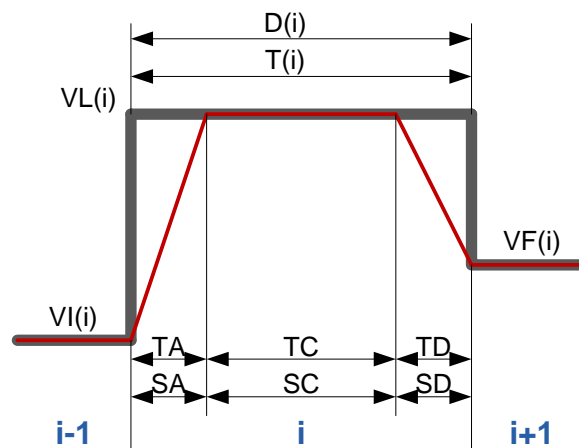


Figura 32 - Diagrama v(t) para o caso geral de uma etapa do tipo 2.

O comprimento da etapa é superior ou igual à soma da distância de aceleração e da distância de frenagem.

No caso de o comprimento ser superior, haverá nesta etapa período de aceleração, de marcha em regime e de frenagem. Por outro lado, se o comprimento for igual, haverá somente período de aceleração e de frenagem.

Em ambos os casos, o veículo ferroviário atinge a velocidade limite da etapa pelo que esta se mantém inalterada.

Para se calcular o tempo mínimo despendido pelo veículo ferroviário para percorrer a etapa, é necessário determinar o tempo correspondente a cada um destes períodos de marcha.

a) Período de aceleração:

$$TA = \frac{VL(i) - VI(i)}{3,6 \times a_{medio}(i)} \quad (38)$$

b) Período de marcha em regime:

$$TC = \frac{D(i) - SA - SD}{\frac{VL(i)}{3,6}} \quad (39)$$

c) Período de frenagem:

$$TD = \frac{VL(i) - VF(i)}{3,6 \times d} \quad (40)$$

Deste modo, o tempo mínimo é determinado da seguinte forma:

$$T_{min}(i) = TA + TC + TD \quad (41)$$

Caso particular 1: ($D(i) < SA + SD$)

A figura seguinte representa uma etapa do 2 correspondente ao caso particular 1.

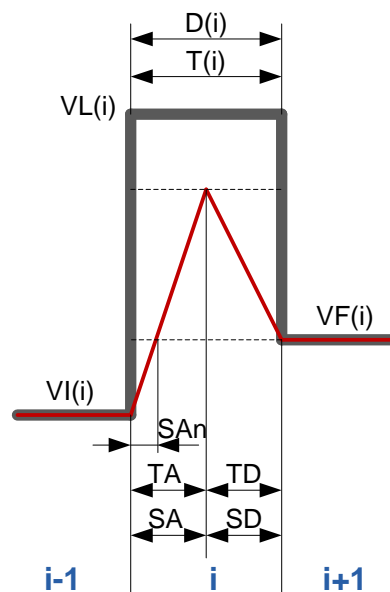


Figura 33 - Diagrama v(t) para o caso particular 1 de uma etapa do tipo 2.

O comprimento da etapa é inferior à soma da distância de aceleração e de frenagem e, por isso, o comboio não atinge a velocidade limite da etapa pelo que se determina a velocidade máxima que consegue alcançar, a qual será inferior à velocidade limite da etapa, através da seguinte expressão:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times a_{\text{medio}}(i) \times d \times D(i) + \left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2 \times d + \left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2 \times a_{\text{medio}}(i)}{a_{\text{medio}}(i) + d}} \times 3,6 \quad (42)$$

Deste modo, a velocidade limite da etapa passa a ser a velocidade máxima.

O valor da aceleração média usado nesta expressão tem que ser calculado novamente, uma vez que o período de aceleração não termina quando o comboio atinge a velocidade limite da etapa, mas sim quando a soma da distância de aceleração e de frenagem for igual ao comprimento da etapa.

Com o objectivo de calcular o tempo mínimo despendido pelo comboio para percorrer a etapa, é necessário determinar o tempo correspondente a cada um dos períodos de marcha.

a) Período de aceleração:

$$TA = \frac{V_{\max} - VI(i)}{3,6 \times a_{\text{medio}}(i)} \quad (43)$$

b) Período de frenagem:

$$TD = \frac{V_{\max} - VF(i)}{3,6 \times d} \quad (44)$$

Deste modo, o tempo mínimo é determinado da seguinte forma:

$$T_{\min}(i) = TA + TD \quad (45)$$

Caso particular 2: ($D(i) < SA + SD$ e $D(i) < SA_n$)

A figura seguinte representa uma etapa do 2 correspondente ao caso particular 2.

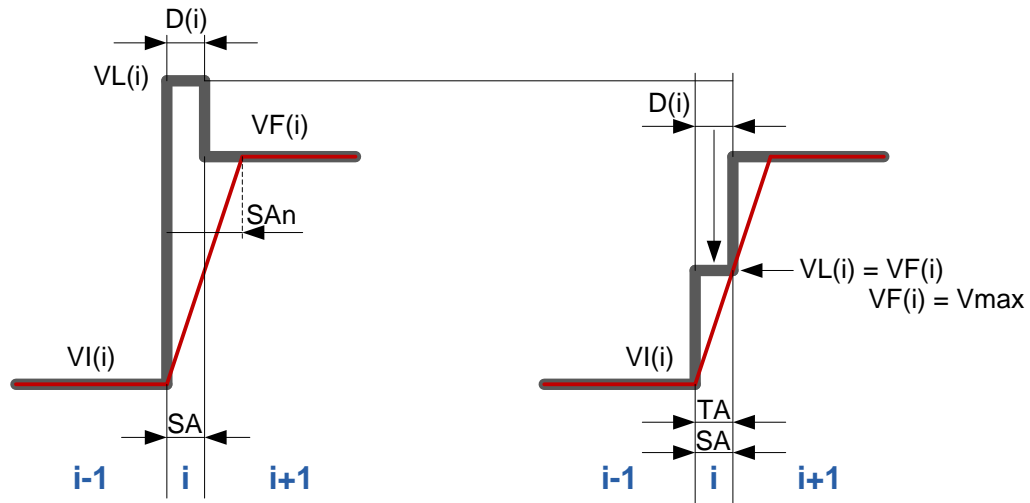


Figura 34 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular 2 de uma etapa do tipo 2.

Quando a velocidade inicial da etapa é inferior à sua velocidade final, calcula-se a distância de aceleração necessária para o comboio atingir a velocidade final da etapa a partir da sua velocidade inicial, a qual se designa por SA_n , através da seguinte expressão.

$$SA_n = \frac{\left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2}{2 \times a_{medio}(i)} \quad (46)$$

O valor da aceleração média usado nesta expressão tem que ser calculado novamente, uma vez que o período de aceleração não termina quando o comboio atinge a velocidade limite da etapa, mas sim quando o comboio atinge a velocidade final da etapa.

Esta etapa passa a ser do tipo 1, já que na sua marcha só existe período de aceleração e a sua nova velocidade limite e velocidade final, que será inferior à anterior, calcula-se através da seguinte expressão:

$$V_{max} = \sqrt{\left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2 + 2 \times a_{medio}(i) \times D(i) \times 3,6} \quad (47)$$

O tempo mínimo despendido pelo comboio para percorrer a etapa vem:

$$T_{min}(i) = TA = \frac{V_{max} - VI(i)}{a_{medio}(i) \times 3,6} \quad (48)$$

Relativamente à etapa seguinte, esta passa a ser do tipo 1 ou 2 e a sua velocidade final será igual à velocidade limite desta etapa.

Se a velocidade inicial da etapa for igual à sua velocidade final, a distância SA_n , será zero, já que $VI(i) = VF(i)$.

Caso particular 3: ($D(i) < SA + SD$ e $D(i) < SD_n$)

A figura seguinte representa uma etapa do 2 correspondente ao caso particular 3.

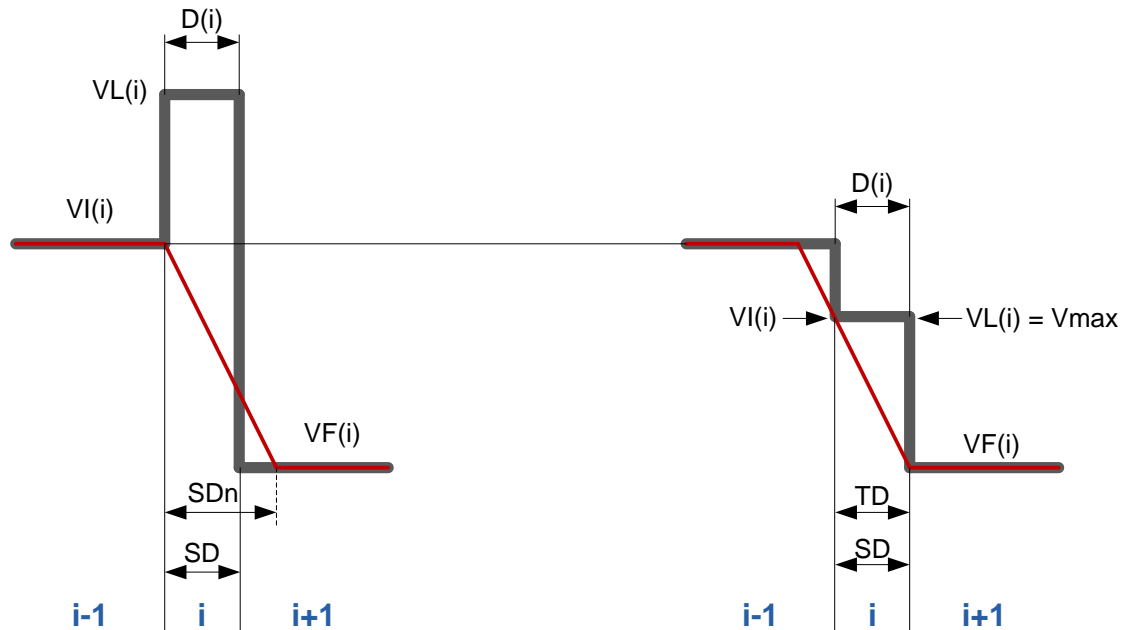


Figura 35 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular 3 de uma etapa do tipo 2.

Se a velocidade inicial da etapa for superior à sua velocidade final, calcula-se a distância de frenagem necessária para o comboio atingir a velocidade final a partir da velocidade inicial, a qual se designa por SD_n , através da seguinte expressão:

$$SD_n = \frac{\left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2}{2 \times d} \quad (49)$$

Esta etapa passa a ser do tipo -1, só existe período de frenagem e a sua nova velocidade limite e velocidade inicial, que será inferior à anterior, calcula-se através da seguinte expressão:

$$V_{\max} = \sqrt{\left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2 + 2 \times d \times D(i) \times 3,6} \quad (50)$$

O tempo mínimo que o comboio leva para percorrer a etapa é dado pela seguinte expressão:

$$T_{\min}(i) = TD = \frac{V_{\max} - VF(i)}{d \times 3,6} \quad (51)$$

Relativamente à etapa anterior, esta passa a ser do tipo -1 ou 2 e a sua velocidade final, que será inferior à anterior, será igual à velocidade limite da etapa seguinte.

Deste modo, é necessário repetir a simulação de marcha para a etapa anterior, uma vez que é nessa etapa que tem início o período de frenagem.

b) Etapa tipo 1

Tal como para as etapas do tipo 2, obtém-se a aceleração média no período de aceleração nas etapas do tipo 1 e a distância correspondente a esse período, através das expressões 3.1 e 3.2, respetivamente, anteriormente apresentadas.

Do mesmo modo, verifica-se se esta etapa do tipo 1 em análise ou corresponde ao caso geral ou ao caso particular.

Caso geral: ($D(i) \geq SA$)

A figura seguinte representa uma etapa do tipo 1 correspondente ao caso geral.

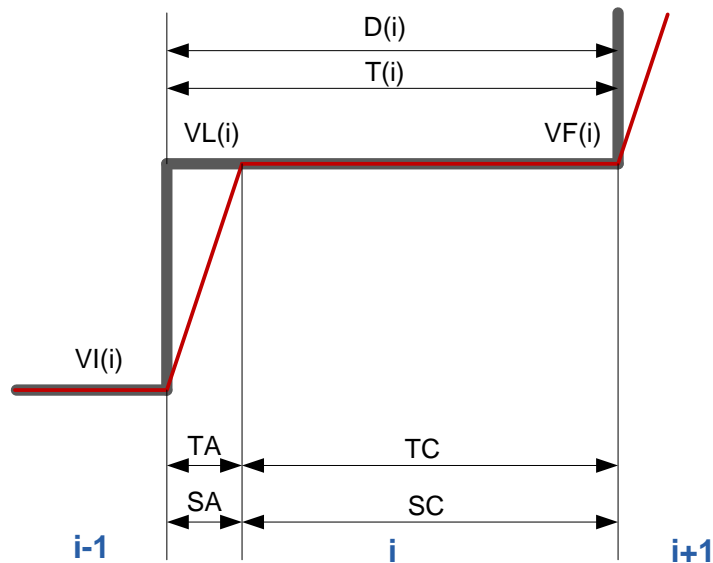


Figura 36 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo 1.

O comprimento da etapa é igual ou superior à distância de aceleração.

No caso de o comprimento ser superior, há nesta etapa período de aceleração e de marcha em regime. Por outro lado, se o comprimento for igual, haverá somente período de aceleração.

Em ambos os casos, o veículo ferroviário atinge a velocidade limite da etapa pelo que esta se mantém inalterada.

De modo a calcular o tempo mínimo despendido pelo veículo ferroviário para percorrer a etapa, é necessário determinar o tempo correspondente a cada um destes períodos de marcha.

a) Período de aceleração:

$$TA = \frac{VL(i) - VI(i)}{3,6 \times a_{medio}(i)} \quad (52)$$

b) Período de marcha em regime:

$$TC = \frac{D(i) - SA - SD}{\frac{VL(i)}{3,6}} \quad (53)$$

c) Deste modo, o tempo mínimo é determinado da seguinte forma:

$$T_{min}(i) = TA + TC \quad (54)$$

Caso particular: ($D(i) < SA$)

A figura seguinte representa uma etapa do tipo 1 correspondente ao caso particular.

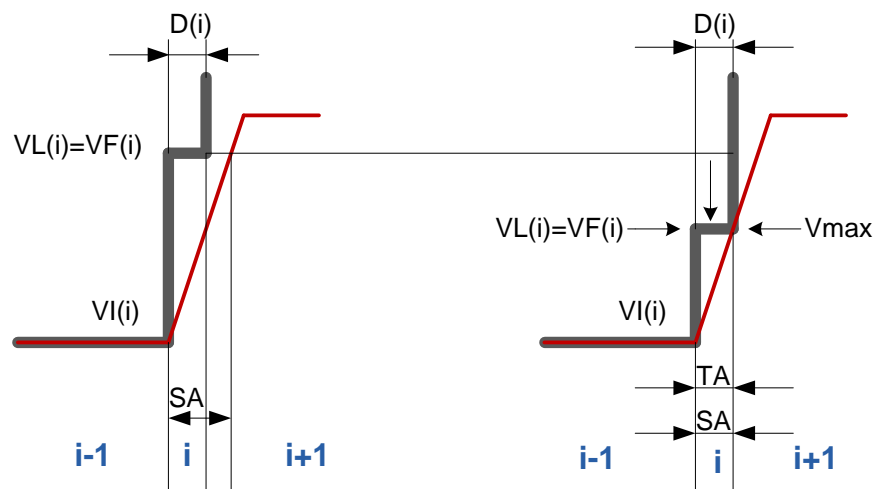


Figura 37 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular de uma etapa do tipo 1.

O comprimento da etapa é inferior à distância de aceleração e, portanto, o comboio não atinge a velocidade limite da etapa. Deste modo, calcula-se a velocidade máxima que o comboio pode atingir na etapa, que é inferior à velocidade limite, através da seguinte expressão:

$$V_{max} = \sqrt{\left(\frac{VI(i)}{3,6}\right)^2 + 2 \times a_{medio}(i) \times D(i) \times 3,6} \quad (55)$$

O valor da aceleração média usado nesta expressão tem que ser recalculado, já que o período de aceleração termina quando a distância percorrida pelo comboio na etapa for igual ao comprimento da própria etapa.

A velocidade limite da etapa, que é igual à sua velocidade final, toma o valor da velocidade máxima calculada.

Relativamente à etapa seguinte, a sua velocidade inicial passa a ser igual à velocidade limite da etapa anterior.

O tempo despendido pelo comboio para percorrer a etapa vem dado pela expressão:

$$T_{\min}(i) = TA = \frac{V_{\max} - VI(i)}{a_{\text{medio}}(i) \times 3,6} \quad (56)$$

c) Etapa tipo -1

Para as etapas do tipo -1, determina-se inicialmente a distância correspondente ao período de frenagem, SD , com recurso à expressão 3.3, também já introduzida no tratamento das etapas do tipo 2.

Verifica-se igualmente se a etapa se enquadra ou no caso geral ou no caso particular.

Caso geral: ($D(i) \geq SD$)

A figura seguinte representa uma etapa do -1 correspondente ao caso geral.

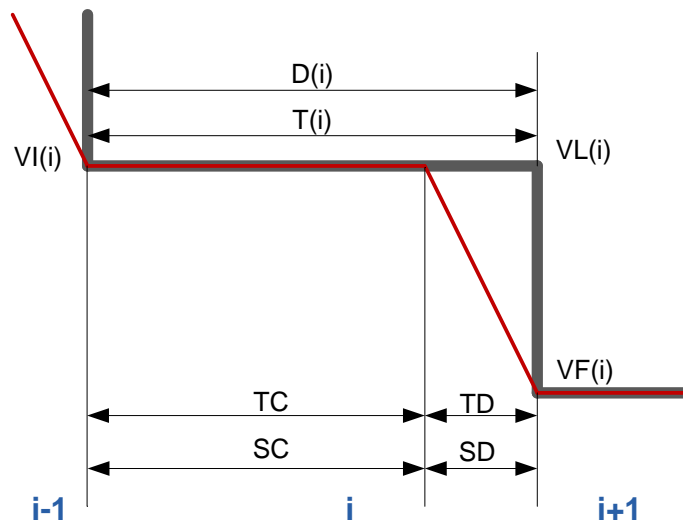


Figura 38 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo -1.

O comprimento da etapa é superior ou igual à distância de frenagem.

No caso de o comprimento ser superior, há nesta etapa período de marcha em regime e de frenagem. Por outro lado, se o comprimento for igual, ocorre somente período de frenagem.

A fim de se calcular o tempo mínimo despendido pelo comboio para percorrer a etapa, é necessário determinar o tempo correspondente a cada um destes períodos de marcha.

a) Período de marcha em regime:

$$TC = \frac{D(i) - SA - SD}{\frac{VL(i)}{3,6}} \quad (57)$$

b) Período de frenagem:

$$TD = \frac{VL(i) - VF(i)}{3,6 \times d} \quad (58)$$

Deste modo, o tempo mínimo é determinado da seguinte forma:

$$T_{\min}(i) = TC + TD \quad (59)$$

Caso particular: ($D(i) < SD$)

A figura seguinte representa uma etapa do -1 correspondente ao caso particular.

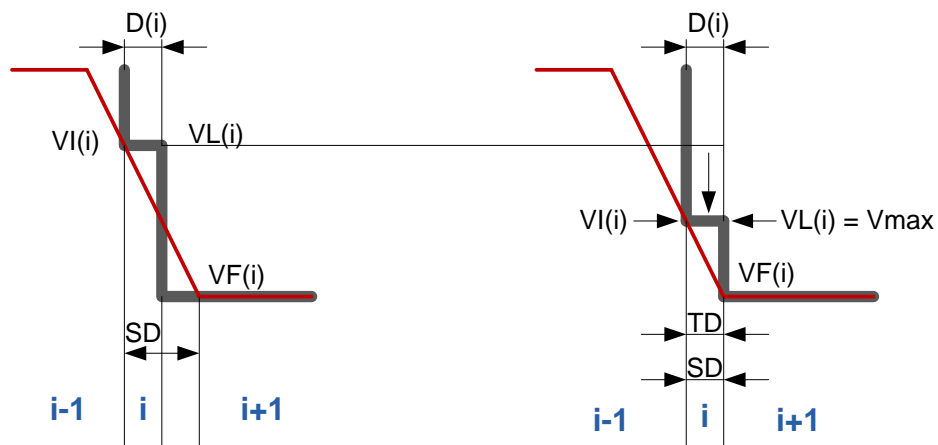


Figura 39 - Diagrama $v(t)$ para o caso particular de uma etapa do tipo -1.

O comprimento da etapa é inferior à etapa à distância de frenagem pelo que na etapa só existe período de frenagem.

Portanto, é necessário calcular a velocidade máxima que o comboio pode atingir na etapa, a qual é igual à sua velocidade inicial, através da seguinte expressão:

$$V_{\max} = \sqrt{\left(\frac{VF(i)}{3,6}\right)^2 + 2 \times d \times D(i) \times 3,6} \quad (60)$$

A velocidade limite da etapa passa a ser igual à velocidade máxima calculada.

Relativamente à etapa anterior, a sua velocidade final passa a ser igual à velocidade limite da etapa seguinte.

O tempo despendido pelo comboio para percorrer a etapa é dado pela seguinte expressão:

$$T_{\min}(i) = TD = \frac{V_{\max} - VF(i)}{d \times 3,6} \quad (61)$$

Quanto à etapa anterior, a sua velocidade final passa a ser igual à velocidade limite desta etapa.

Torna-se necessário repetir a simulação de marcha para a etapa anterior, já que é nessa etapa que se inicia o período de frenagem.

d) Etapa tipo -2

A figura seguinte representa uma etapa do -2.

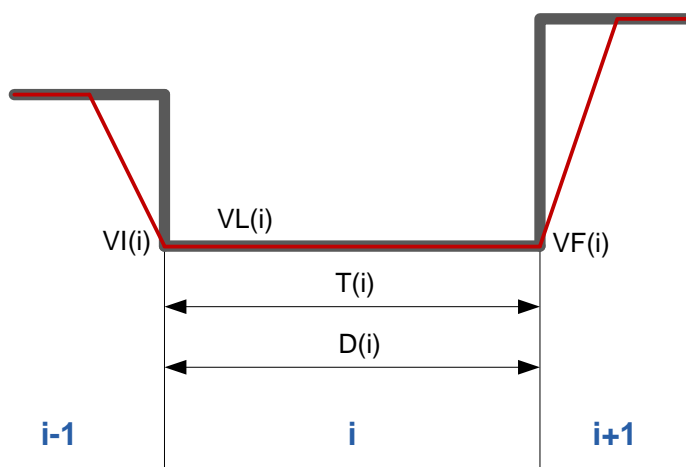


Figura 40 - Diagrama $v(t)$ para o caso geral de uma etapa do tipo -2.

Nas etapas deste tipo, só existe período em marcha de regime.

O tempo despendido pelo comboio para a percorrer é determinado da seguinte forma:

$$T_{\min}(i) = \frac{D(i)}{VL(i)} \quad (62)$$

Relativamente aos casos particulares para este tipo de etapa, como se referiu anteriormente, estes não existem.

Por último, concluída a simulação em regime de tempo mínimo e, portanto, já determinados os valores da aceleração média e do tempo mínimo referentes a cada etapa, verifica-se se no percurso intermédio, tal como se fez antes de proceder à simulação, se existem etapas adjacentes com igual velocidade limite. Em caso afirmativo, adota-se o mesmo procedimento usado anteriormente.

Pode-se, assim, simular a marcha do comboio em regime de tempo rígido ou horário, para cada percurso intermédio.

4.4 Simula o de marcha em regime de tempo rígido

Tal como na simula o de marcha em regime de tempo mínimo, antes de se proceder   simula o em regime de tempo rígido determina-se novamente o tipo de etapa, as velocidades inicial e final e o comprimento de cada etapa que faz parte de cada percurso intermédio.

Na simula o em regime de tempo rígido, determina-se, em primeiro lugar, o tempo mínimo total relativo a cada percurso intermédio através da soma do tempo mínimo de cada uma das etapas desse percurso, o qual tem obrigatoriamente que ser inferior ou igual ao intervalo de tempo, disponível para o comboio percorrer esse percurso intermédio, que o utilizador introduziu anteriormente no programa segundo o qual se estabelece o percurso a simular, com base no horário disponibilizado pela empresa ferroviária.

Na possibilidade desta condi o não ser respeitada para algum dos percursos intermédios, o utilizador tem que introduzir um novo intervalo de tempo igual ou superior ao tempo mínimo correspondente a esse percurso.

Estabelece-se, neste momento, para cada período da marcha do comboio (acelera o, marcha em regime e frenagem) as respetivas equa es do movimento, em ordem a posteriormente se poder determinar o valor da velocidade máxima ou velocidade de regime que o comboio pode atingir numa determinada distância para um dado período de tempo.

Para os diferentes períodos de marcha do comboio, apresentam-se as seguintes equa es do movimento:

a) Período de acelera o:

$$V_{\max}^2 = V_{\text{inicial}}^2 + 2 \times a \times \Delta s_{\text{acelera o}} \quad (63)$$

b) Período em marcha de regime:

$$V_{\max} \times \Delta t_{\text{marcha em regime}} = \Delta s_{\text{marcha em regime}} \quad (64)$$

c) Período de frenagem:

$$V_{\text{final}}^2 = V_{\max}^2 + 2 \times d \times \Delta s_{\text{frenagem}} \quad (65)$$

No diagrama de marcha da figura 41, encontram-se representados os pontos que assinalam o início e o fim de cada um dos destes períodos.

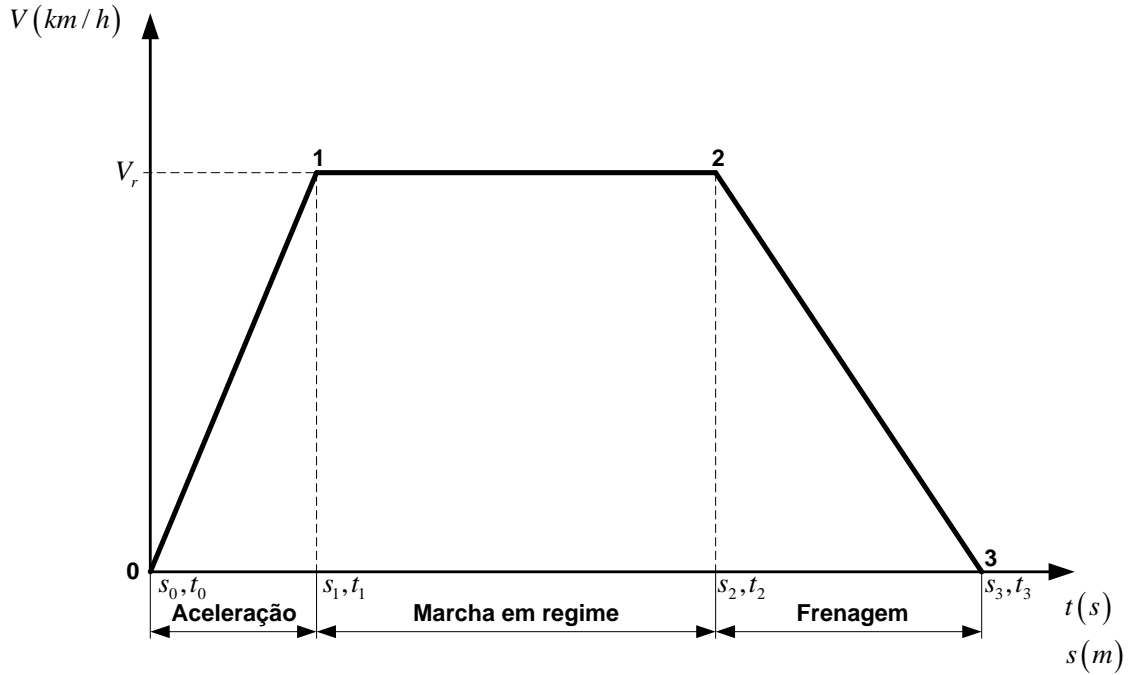


Figura 41 - Diagrama $v(t)$ para o percurso entre duas estações.

Substituindo nas equações do movimento, os termos correspondentes à velocidade, posição e tempo no início e fim de cada período, estas podem ser escritas na seguinte forma:

a) Período de aceleração:

$$V_r^2 = V_0^2 + 2 \times a \times (s_1 - s_0) \quad (66)$$

b) Período em marcha de regime:

$$V_r \times (t_2 - t_1) = (s_2 - s_1) \quad (67)$$

c) Período de frenagem:

$$V_3^2 = V_r^2 + 2 \times d \times (s_3 - s_2) \quad (68)$$

Em que os termos que representam dados relativos à marcha do comboio são os seguintes: V_0 (velocidade inicial), V_3 (velocidade final), a (aceleração média), d (aceleração de frenagem ou desaceleração), s_0 (posição inicial), s_3 (posição final).

Ainda assim, existem para as 3 equações, 5 incógnitas, pelo que este sistema de equações se torna impossível de resolver.

Torna-se, portanto, necessário substituir os termos t_1 e t_2 , por equações equivalentes, as quais se podem obter a partir de outras equações do movimento, igualmente desenvolvidas para os períodos de aceleração e frenagem, que se apresentam em seguida:

a) Período de aceleração:

$$V_r = V_0 + a \times (t_1 - t_0) \quad (69)$$

b) Período de frenagem:

$$V_3 = V_r + d \times (t_3 - t_2) \quad (70)$$

Resolvendo as equações anteriores em ordem a t_1 e t_2 , respetivamente, vem para o período de aceleração:

$$t_1 = \frac{V_r - V_i}{a} + t_0 \quad (71)$$

E para o período de frenagem:

$$t_2 = \frac{V_r - V_f}{d} + t_3 \quad (72)$$

Substituindo agora os termos t_1 e t_2 na equação do movimento referente ao período em regime de marcha, obtém-se um sistema de 3 equações com 3 incógnitas, as quais se passam a enumerar: a velocidade de regime, V_r , e os termos s_1 e s_2 relativos à posição do comboio no início e no fim do período de marcha de regime, respetivamente.

Deste modo, resolve-se o sistema de equações, obtido com as equações do movimento para cada um dos períodos de marcha do comboio, a fim de se determinar a velocidade de regime, V_r , obtendo-se a seguinte equação do 2º grau, que se apresenta de forma simplificada:

$$AV_r^2 + BV_r + C = 0 \quad (73)$$

sendo cada um dos coeficientes:

a) Coeficiente A:

$$A = d - a \quad (74)$$

b) Coeficiente B:

$$B = 2 \cdot a \cdot V_r - 2 \cdot d \cdot V_i - 2 \cdot a \cdot d \cdot t_{percurso} \quad (75)$$

c) Coeficiente C:

$$C = d \cdot V_i^2 - a \cdot V_f^2 - 2 \cdot a \cdot d \cdot s_{percurso} \quad (76)$$

em que, por sua vez, $V_i = V_0$, $V_f = V_3$, $t_3 - t_0 = t_{\text{percurso}}$ e $s_3 - s_0 = s_{\text{percurso}}$.

Pode-se, neste momento, proceder à análise individual de cada percurso intermédio, com o objetivo, de através da simulação em regime de tempo rígido, se determinar a velocidade de regime para cada etapa desse percurso, a qual corresponde à velocidade máxima que, numa marcha em situação real, o comboio procura atingir em cada etapa de modo a respeitar o intervalo de tempo estabelecido de acordo com o horário.

Assim, para cada percurso intermédio, no caso de ser constituído por três ou mais etapas, verifica-se se alguma das suas etapas intermédias é do tipo -2.

Faz-se, então, o tratamento dos percursos que possuem menos de 3 etapas e dos percursos com 3 ou mais etapas, mas sem etapas intermédias do tipo -2, separadamente do tratamento dos percursos que apresentam 3 ou mais etapas, com pelo menos uma etapa intermédia do tipo -2.

Dentro do primeiro conjunto, se o percurso intermédio for constituído por apenas uma etapa, a qual é do tipo 2, determina-se de imediato a velocidade de regime neste percurso de acordo com a equação 73.

Ainda para o primeiro conjunto de percursos intermédios, verifica-se para os percursos com 3 ou mais etapas se alguma das suas etapas intermédias é do tipo 2 e tratam-se, novamente, em separado os percursos com apenas duas etapas e os percursos que possuem três ou mais etapas, mas sem nenhuma etapa intermédia do tipo 2, dos percursos com 3 ou mais etapas, mas que possuem etapas intermédias do tipo 2.

Portanto, para os percursos com apenas duas etapas e para os percursos com 3 ou mais etapas, mas sem etapas intermédias do tipo 2, a configuração das suas etapas ou é do tipo ascendente, quando a primeira etapa é do tipo 1 e a última etapa é do tipo 2, ou é do tipo descendente, se a primeira etapa for do tipo 2 e a última etapa for do tipo -1.

Na figura 42 a) encontra-se representado um percurso do tipo ascendente e na figura 42 b) encontra-se representado um percurso do tipo descendente.

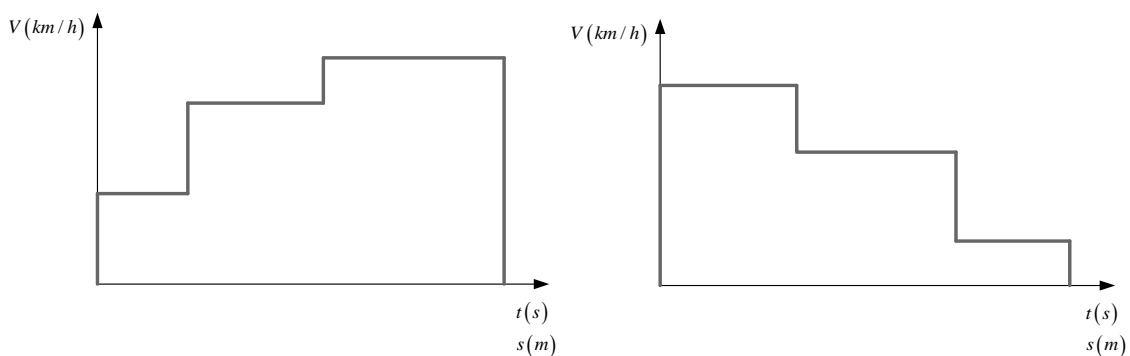


Figura 42 - Diagramas de marcha para percursos entre duas estações do tipo ascendente (a) e do tipo descendente (b).

De seguida, verifica-se a qual destas situações pertence cada um dos percursos intermédios.

Para ambos os casos, numa primeira abordagem ao cálculo da velocidade de regime no percurso, relativamente aos parâmetros iniciais, s_{percurso} é o comprimento total do percurso, t_{percurso} é o tempo de horário disponível para o comboio percorrer esse percurso, a_{percurso} é a aceleração média no período de aceleração da primeira etapa do percurso e VI e VF são as velocidades inicial e final no percurso, respetivamente, as quais se consideram ambas iguais a zero nesta primeira abordagem, uma vez que o comboio se encontra imobilizado quando inicia a marcha e se imobiliza no fim do percurso.

Para os percursos do tipo ascendente, verifica-se se velocidade limite da primeira etapa do percurso, uma vez que é esta etapa a que apresenta menor velocidade limite das etapas que constituem os percursos deste tipo, é igual ou superior à velocidade de regime anteriormente calculada.

Em caso afirmativo, a velocidade limite de todas as etapas deste percurso passa a ser a velocidade de regime. A figura 43 constitui um exemplo deste tipo de situação.

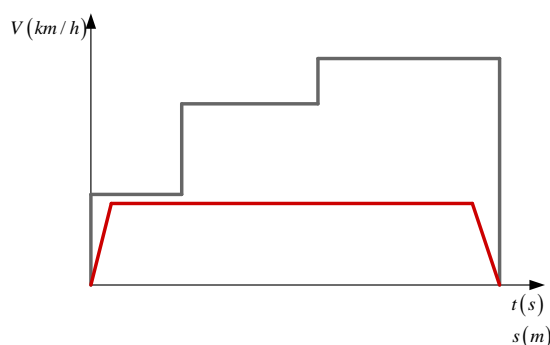


Figura 43 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação de marcha num percurso do tipo ascendente.

Se pelo contrário, a velocidade limite da primeira etapa for inferior à velocidade de regime, a velocidade limite desta etapa continua a ser a mesma e torna-se necessário calcular novamente a velocidade de regime para o percurso, excluindo desta vez a primeira etapa. Ou seja, determina-se a velocidade de regime somente para as restantes etapas do percurso.

Deste modo, quando se forem estabelecer de novo os parâmetros iniciais, é necessário subtrair o comprimento da primeira etapa ao comprimento total do percurso, o tempo mínimo que o comboio demora a percorrer a primeira etapa ao tempo disponível para o comboio percorrer o percurso, o valor da aceleração passa a ser a aceleração média no período de aceleração da segunda etapa do percurso e considera-se como velocidade inicial a velocidade limite da primeira etapa, já que é a esta velocidade que o comboio está quando acaba de percorrer a primeira etapa e inicia a segunda.

Após se determinar a velocidade de regime para esta segunda abordagem, verificam-se novamente estas condições e caso a velocidade de regime continue a ser superior à velocidade limite da segunda etapa do percurso, e simultaneamente primeira etapa do conjunto de etapas agora considerado, aplica-se o método já explicado. Em suma, enquanto a velocidade de regime não for igual ou inferior à primeira etapa do conjunto continua-se a aplicar este método até, em último caso, ser necessário calcular a velocidade de regime para a última etapa do percurso. Na figura 44 encontra-se representado este tipo de caso.

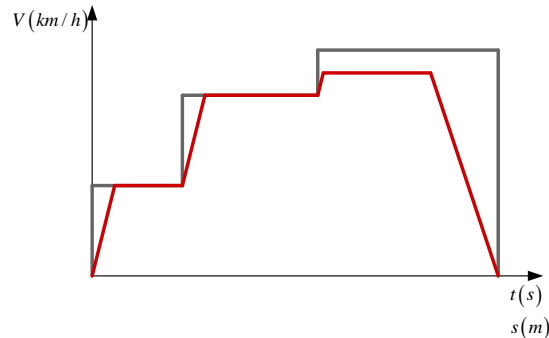


Figura 44 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação de marcha num percurso do tipo ascendente.

De notar que, para um determinado percurso entre duas paragens somente no caso de o tempo de horário ser igual ao tempo mínimo é que as velocidades limite das etapas que formam esse percurso permaneceriam inalteradas. Portanto, conclui-se que quanto maior for a diferença entre o tempo de horário e o tempo mínimo menor será a velocidade média do comboio no percurso, porque a(s) nova(s) velocidade(s) limite das etapas do percurso serão também menores.

Relativamente aos percursos do tipo descendente o método aplicado tem exatamente o mesmo princípio, sendo a única diferença o facto de se considerar a última etapa do percurso e não a primeira, já que neste caso é a última etapa a que apresenta menor velocidade limite.

Portanto, compara-se na primeira abordagem a velocidade de regime à velocidade limite da última etapa do percurso e caso seja necessário, na segunda abordagem, compara-se a velocidade de regime à velocidade limite da penúltima etapa e assim sucessivamente até, em último caso, se chegar à primeira etapa do percurso, a qual tem a maior velocidade limite.

Nas figuras 45 a) e 45 b), encontram-se representados, tal como no caso dos percursos do tipo ascendente, os dois tipos de situações que podem acontecer, dependendo sempre, como já se demonstrou, da diferença entre o tempo de horário e o tempo mínimo.

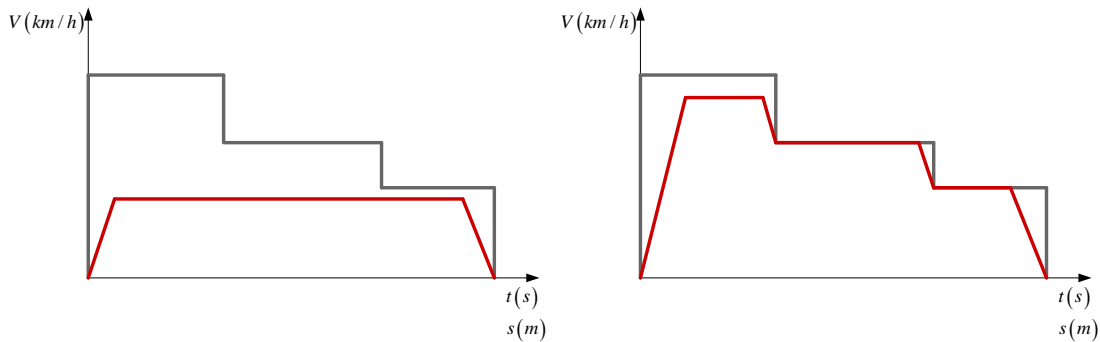


Figura 45 - Diagramas de marcha para hipotéticas situações de marcha num percurso do tipo descendente.

Quanto aos percursos parciais constituídos por três ou mais etapas e que possuem uma etapa intermédia do tipo 2, determina-se, em primeiro lugar, a posição da etapa do tipo 2.

Na figura 46 encontra-se ilustrado um exemplo deste tipo de percurso.

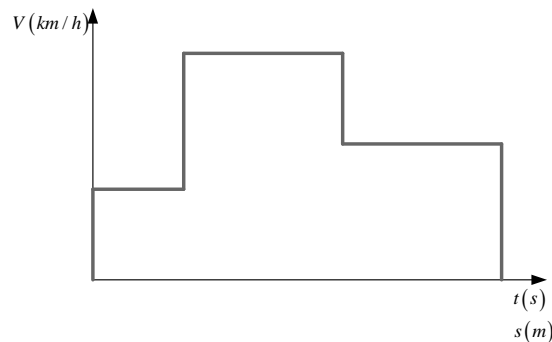


Figura 46 - Diagrama de marcha de um percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.

Em seguida, tal como nos casos anteriores, estabelecem-se os parâmetros iniciais do percurso (comprimento, tempo de horário, velocidades inicial e final e aceleração média no período de aceleração) e determina-se a velocidade de regime no percurso.

Após se determinar a velocidade de regime, compara-se esta velocidade com as velocidades limite da primeira e da última etapa do percurso.

Deste modo, verifica-se que pode ocorrer uma de quatro situações possíveis: a velocidade de regime é inferior tanto à velocidade limite da primeira como da última etapa, a velocidade de regime é superior à velocidade limite da primeira e da última etapa, a velocidade de regime é inferior à velocidade limite da primeira etapa e superior à velocidade limite da última etapa ou a velocidade de regime é superior à velocidade limite da primeira etapa e inferior à velocidade limite da última etapa.

Destas quatro situações, somente na primeira se interrompe imediatamente o cálculo da velocidade de regime, uma vez que esta passa a ser a nova velocidade limite de cada etapa que constitui o percurso, por ser menor que a velocidade limite de qualquer uma destas etapas. Na figura 47 encontra-se representada esta situação.

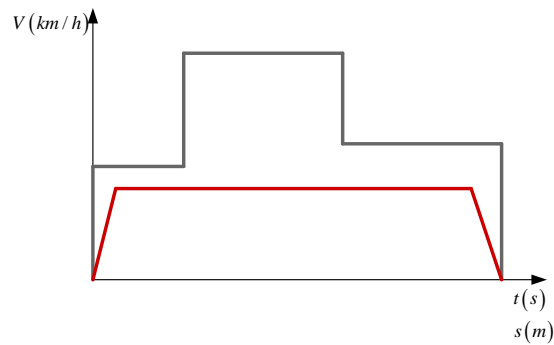
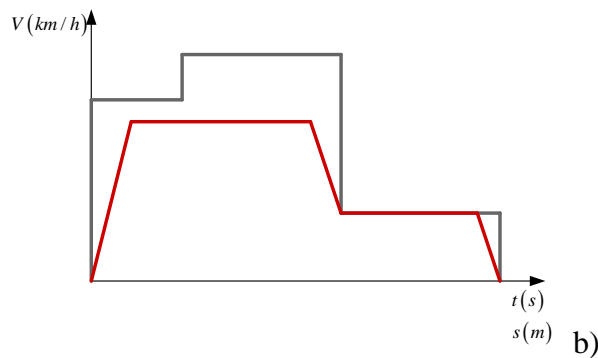
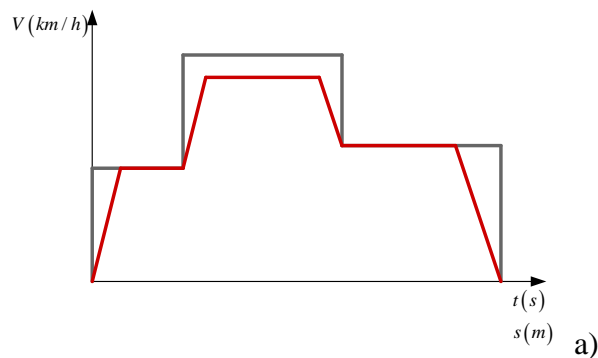


Figura 47 - Diagrama de marcha de uma hipotética situação num percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.

Nas restantes situações, mantém-se a velocidade limite da(s) etapa(s) com velocidade limite inferior à velocidade de regime, estabelecem-se de novo os parâmetros iniciais e determina-se a velocidade de regime para o percurso, mas excluindo desta vez a(s) etapa(s) (a primeira e/ou a última) cuja velocidade limite é inferior à velocidade de regime calculada.

Este procedimento aplica-se sempre que a primeira condição não se verificar até, em último caso, só restar no percurso a etapa do tipo 2, pelo facto de ser esta a que apresenta maior velocidade limite entre as etapas do percurso.

As figuras 48 a), b) e c) constituem exemplos da segunda, terceira e quarta situações, respetivamente.



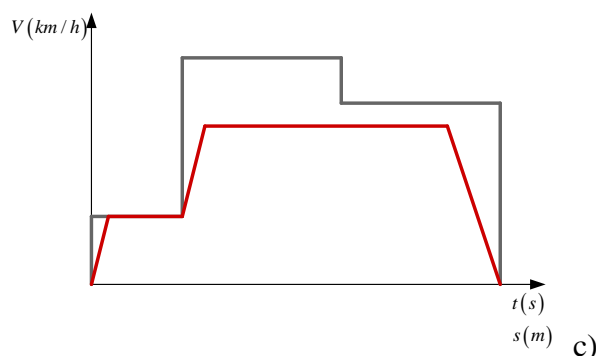


Figura 48 - Diagramas de marcha para as restantes hipotéticas situações de marcha num percurso intermédio com uma etapa intermédia do tipo 2.

Após se analisarem os percursos intermédios constituídos por apenas uma ou duas etapas e os percursos constituídos por três ou mais etapas, mas que não apresentam etapas intermédias do tipo -2, podem-se então analisar os percursos constituídos por três ou mais etapas que têm etapas do tipo -2 na sua constituição.

Para os percursos deste tipo, determina-se, em primeiro lugar, a posição das etapas do tipo -2 e o número total de etapas do tipo -2 existentes no percurso.

Em seguida, determina-se o número de etapas existentes entre a etapa inicial do percurso e a primeira etapa do tipo -2, entre as etapas do tipo -2, caso haja mais que uma, e entre a última etapa do tipo -2 e a etapa final do percurso, constituindo estes conjuntos de etapas os chamados “percursos parciais” referidos anteriormente. Por último, determina-se igualmente o número de percursos parciais por percurso intermédio.

Para este conjunto de percursos, o procedimento adotado para o cálculo da velocidade de regime em cada uma das etapas é o mesmo apresentado anteriormente para os percursos intermédios sem etapas intermédias do tipo -2. Podem-se, assim, também dividir os percursos parciais em percursos de apenas uma etapa, em percursos do tipo ascendente, em percursos do tipo descendente ou em percursos com etapas intermédias do tipo 2.

As únicas diferenças, no tratamento destes percursos em relação aos anteriores, encontram-se ao nível da definição do tempo de percurso e das velocidades inicial e final, que constituem, como já se referiu, parâmetros que é necessário estabelecer para o cálculo da velocidade de regime.

Por forma a se conhecer o intervalo de tempo rígido relativo a cada percurso parcial, determina-se o tempo rígido associado a cada etapa do percurso intermédio, já que os tempos obtidos a partir do horário dizem respeito a percursos intermédios, isto é a percursos entre estações e não a percursos parciais, através da equação 3.42 e somam-se os tempos rígidos, agora calculados, para cada etapa que constitui esse percurso parcial.

$$T_{horario\ etapa}(i) = \frac{T_{min}(i)}{T_{min\ total}(ii) - T_{min\ etapas\ -2}(ii)} \times (T_{horario}(ii) - T_{min\ etapas\ -2}(ii)) \quad (77)$$

em que:

$T_{horario\ etapa}$ - intervalo de tempo rígido relativo a cada etapa num percurso intermédio (s);

$T_{min\ total}$ - intervalo de tempo mínimo total referente ao percurso intermédio; (s)

$T_{min\ etapas\ -2}$ - intervalo de tempo mínimo apenas correspondente à(s) etapa(s) do tipo -2 do percurso intermédio (s);

$T_{horario}$ - intervalo de tempo rígido, estabelecido pelo horário, referente ao percurso intermédio (s).

Por outro lado, as velocidades inicial e final não são ambas nulas, como no caso dos percursos intermédios sem etapas do tipo -2, mas são função da localização dos percursos parciais dentro do percurso intermédio. Na figura 49, apresentam-se as três possíveis localizações de um percurso parcial num percurso intermédio.

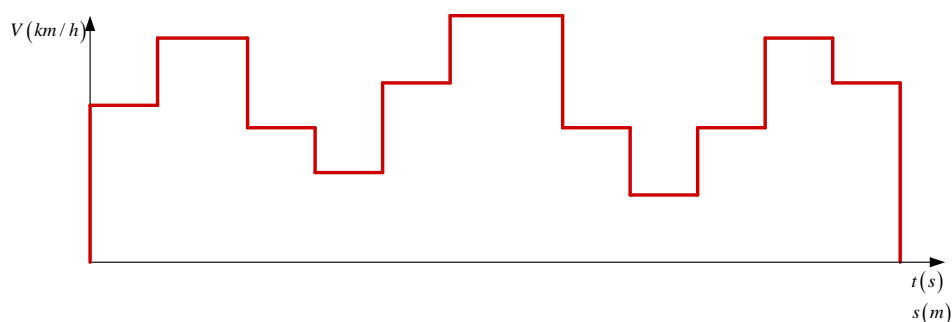


Figura 49 - Diagrama de marcha com as possíveis localizações de um percurso parcial num percurso intermédio entre duas estações.

Deste modo, dependendo se o percurso parcial ocupa uma posição inicial (entre uma estação e uma etapa do tipo -2) quando for iniciar a marcha, uma posição intermédia (entre as duas etapas do tipo -2) ou uma posição final (entre uma etapa do tipo -2 e uma estação) quando for interromper a marcha, escabecem-se as velocidades inicial e final para uma primeira abordagem ao cálculo da velocidade de regime.

Definidos todos os parâmetros iniciais, pode-se então determinar a velocidade de regime para cada etapa do percurso.

Por último, já encontradas as velocidades de regime para cada etapa do percurso, que como se viu anteriormente passam a constituir a velocidade objetivo que o comboio pretende atingir em cada etapa numa situação de marcha real, verifica-se, novamente, se com a simulação em regime de tempo rígido, surgiram no percurso etapas adjacentes com igual velocidade limite e, em caso afirmativo, também como para a marcha em regime de tempo mínimo agrupam-se numa única etapa equivalente.

4.5 Apresentação de resultados

Neste ponto, procede-se a uma nova simulação de marcha, semelhante à simulação de marcha em regime de tempo mínimo, mas incluindo, desta vez, os períodos de marcha em velocidade de regime e de desaceleração, para cada etapa do percurso e para as paragens nas estações, com o objetivo de se determinar o tempo relativo e a velocidade corresponde a cada posição do comboio ao longo do percurso.

Pode-se, por fim, apresentar os resultados da simulação da marcha de um dado comboio num determinado percurso através dos diagramas de marcha velocidade-tempo, $v(t)$, posição-tempo, $s(t)$, e velocidade-posição, $v(s)$, obtidos para esse percurso.

De referir que para os diagramas de marcha $v(t)$ e $s(t)$, os tempos apresentados podem ser relativos ou absolutos, caso se tenha em conta o tempo absoluto de partida do comboio da estação inicial desse percurso.

Por último, apresenta-se na figura 50, um fluxograma que explica de modo sucinto o funcionamento do programa utilizado para a simulação da marcha de um dado comboio num determinado percurso.

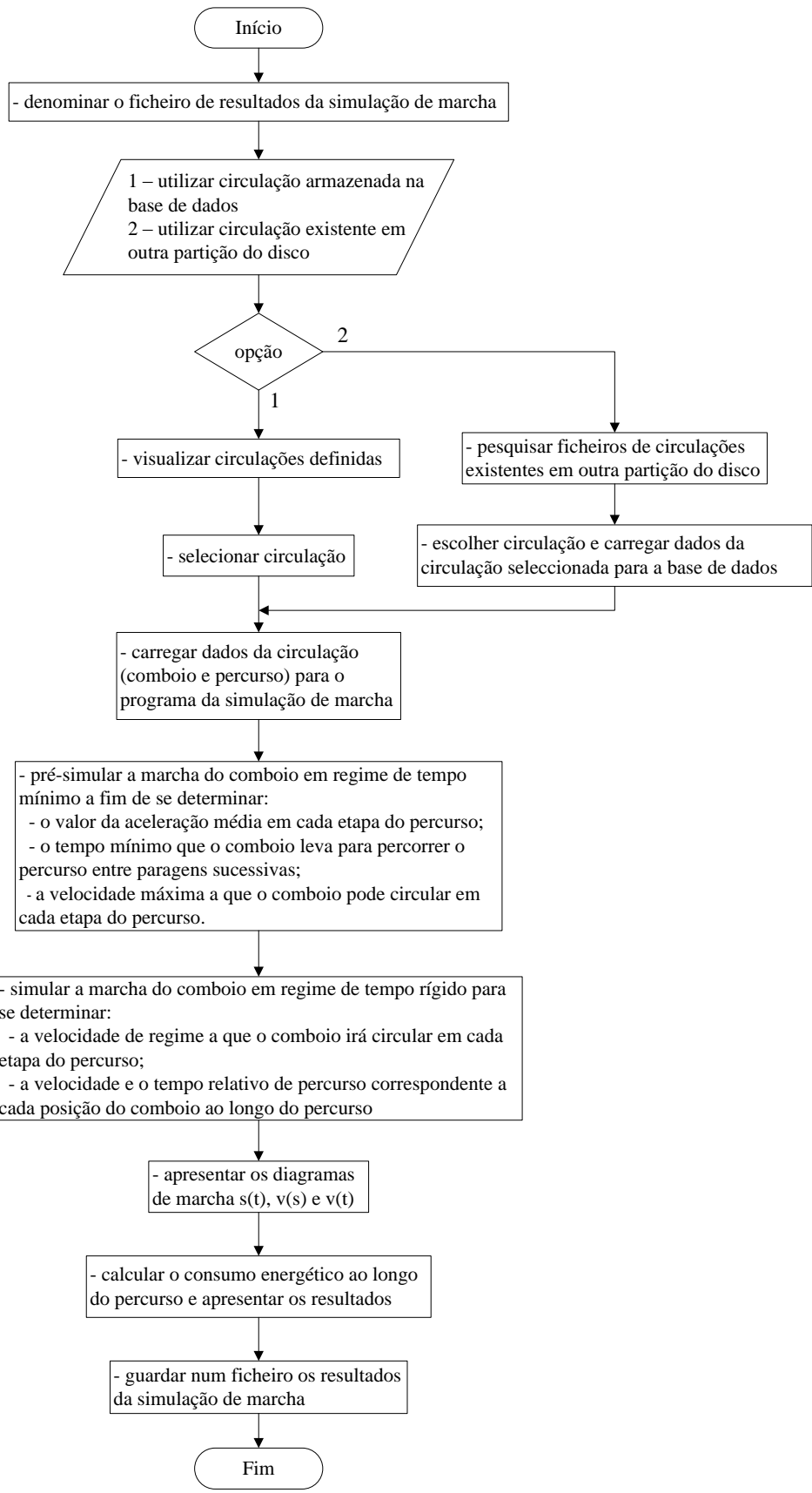


Figura 50 - Esquema representativo do funcionamento do programa de simulação da marcha de um comboio ao longo de um determinado percurso.

4.6 Consumo de energia

No cálculo da energia consumida em cada percurso, deve-se analisar cada etapa individualmente e para cada etapa deve-se determinar a energia consumida pelo comboio para se deslocar de uma posição inicial para outra posição mais a jusante no percurso, considerando o incremento no espaço adotado.

Deste modo, pode determinar-se o esforço de tração correspondente a cada posição do comboio ao longo do percurso nos períodos de aceleração e de marcha em regime de cada etapa do percurso. Na figura 51 apresenta-se o fluxograma segundo o qual se pode quantificar o esforço de tração.

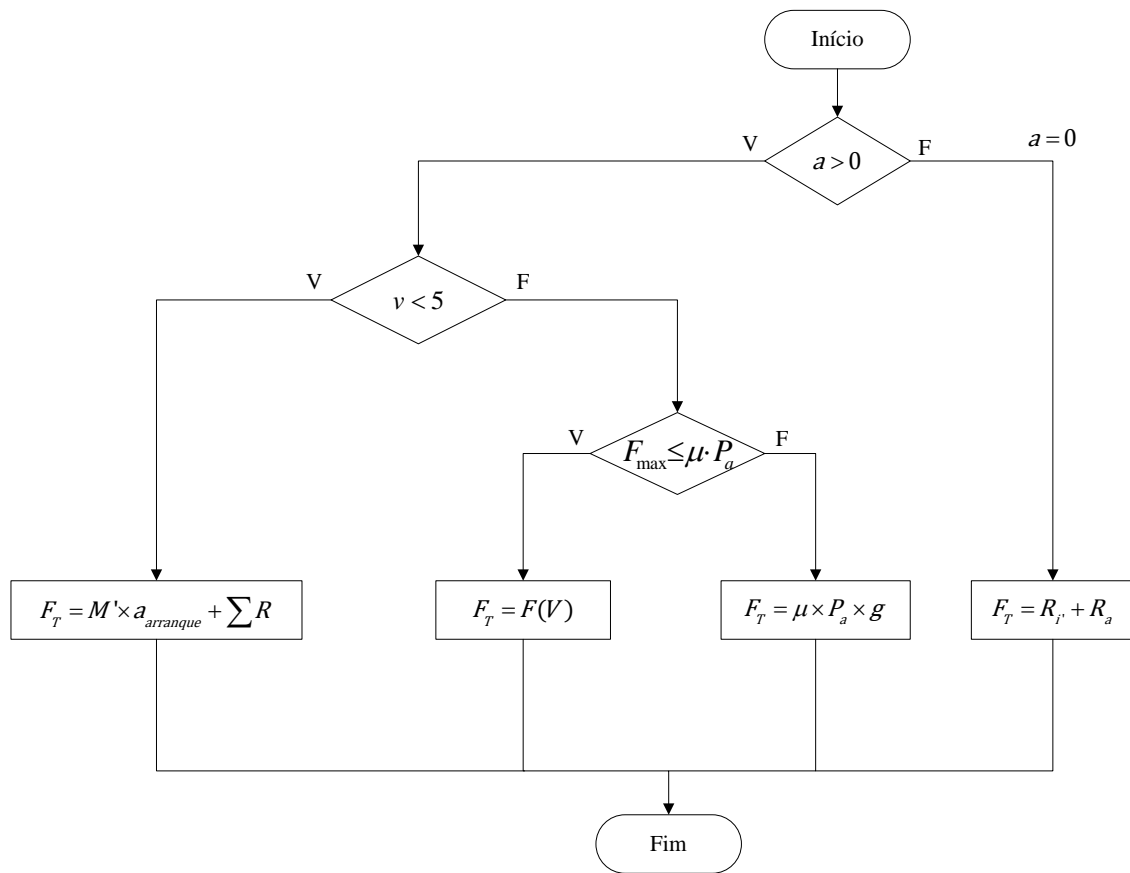


Figura 51 - Esquema relativo ao cálculo do esforço de tração nos períodos de marcha de um comboio.

Sendo conhecido o esforço de tração correspondente a cada posição do comboio no percurso, pode-se determinar a potência total desenvolvida pelos veículos motores, as potências necessárias para vencer as resistências ao movimento, nomeadamente a resistência ao avanço e à inclinação do perfil compensado da via, e a potência necessária para o comboio aumentar a velocidade de marcha, também designada por resistência à aceleração. As expressões utilizadas para calcular estas diferentes potências apresentam-se de seguida:

- a) Potência total:

$$P_T = F_T \times \frac{v}{3,6} \quad (78)$$

b) Potência para vencer a resistência à inclinação do perfil compensado:

$$P_{R_{i'}} = R_{i'} \times \frac{v}{3,6} \quad (79)$$

c) Potência para vencer a resistência ao avanço:

$$P_{R_a} = R_a \times \frac{v}{3,6} \quad (80)$$

d) Potência para vencer a resistência ao avanço:

$$P_a = a \times M' \times \frac{v}{3,6} \quad (81)$$

em que os valores do esforço de tração (F_T) e das resistências ($R_{i'}$ e R_a) são dados em kN, da aceleração (a) em m/s^2 , da velocidade (v) em km/h , da massa inercial do comboio (M') em kg e, por último, as potências ($P_T, P_{R_{i'}}, P_{R_a}$ e P_a) vêm em kW.

Ao se calcular a potência devido à inclinação do perfil compensado da via verifica-se que esta pode tomar valores negativos, em consequência da inclinação da rampa também ser negativa, a qual irá influenciar o cálculo das restantes potências consideradas. A referida influência será tanto maior quanto maior for o valor da resistência à inclinação do perfil compensado, em valor absoluto, relativamente ao valor das restantes resistências. Deste modo, para que seja possível quantificar corretamente a potência que os veículos motores devem desenvolver para vencer cada uma das resistências em particular, deve analisar-se e distribuir-se o esforço de tração total por cada componente resistiva.

Na figura 52, encontra-se representado o cálculo das potências anteriormente referidas, no período de aceleração, para os casos em que a potência necessária para vencer a resistência à inclinação do perfil compensado é negativa e a potência necessária para o comboio aumentar a velocidade do comboio ou é inferior ou igual à potência total ou é, por outro lado, superior à potência total. De referir, que a potência total pode ser inferior à potência requerida para acelerar o comboio pelo facto da resistência devido à inclinação tomar um valor superior à resistência ao avanço, o que resulta num somatório das forças resistentes também negativo, o qual é somado, por sua vez, ao valor do esforço de tração.

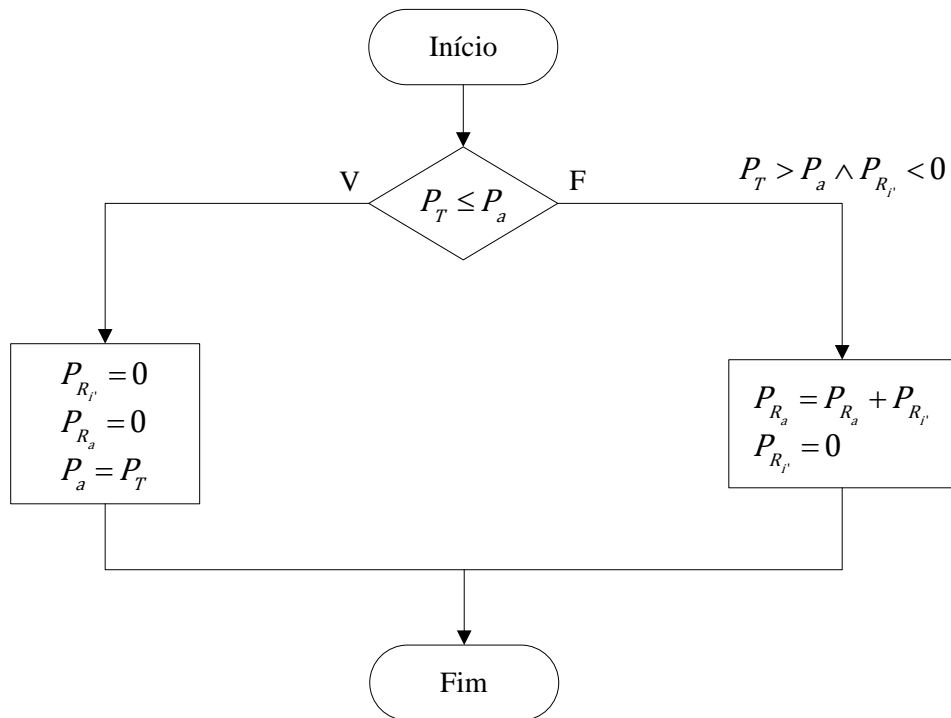


Figura 52 - Esquema relativo ao cálculo das potências desenvolvidas devido às resistências movimento no período de aceleração.

Para o período de marcha em regime, as potências consideradas podem ser determinadas de acordo com o fluxograma apresentado na seguinte figura:

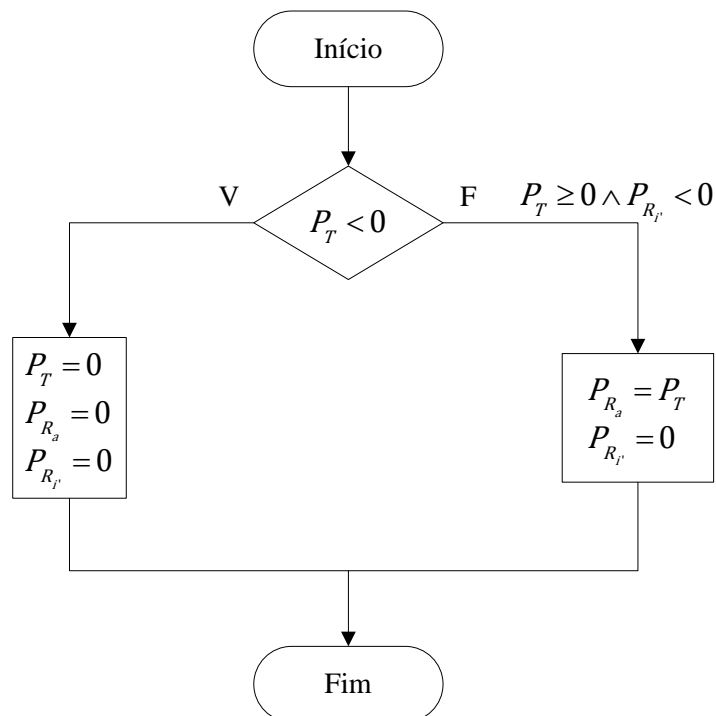


Figura 53 - Esquema relativo ao cálculo das potências desenvolvidas devido às resistências movimento no período de marcha em regime.

A energia total e a energia devido a cada uma das resistências ao movimento e à aceleração consumida pelo comboio, relativa a cada posição ocupada ao longo do percurso, podem ser determinadas do seguinte modo:

a) Energia total:

$$E_T = \frac{P_T \times \Delta t}{3600} \quad (82)$$

b) Energia consumida devido à resistência do perfil compensado da via:

$$E_{R_{iv}} = \frac{P_{R_{iv}} \times \Delta t}{3600} \quad (83)$$

c) Energia consumida devido à resistência ao avanço:

$$E_{R_a} = \frac{P_{R_a} \times \Delta t}{3600} \quad (84)$$

d) Energia consumida devido à aceleração:

$$E_a = \frac{P_a \times \Delta t}{3600} \quad (85)$$

em que Δt é o intervalo de tempo necessário para o comboio se deslocar de uma posição para outra mais a jusante na linha, igual a $\Delta t = t(i) - t(i-1)$, em segundos (s), as potências desenvolvidas são dadas em kW e as energias consumidas vêm dadas em kW.h.

Caso a frenagem seja eléctrica e regenerativa, interessa quantificar a energia que é possível recuperar durante o período de frenagem.

Desta forma, determina-se o esforço de frenagem para cada posição do comboio ao longo deste período de marcha através da seguinte equação:

$$F_F = M' \times d + \sum R \quad (86)$$

Definido o esforço de tração, a potência correspondente vem dada por:

$$P_F = F_F \times \frac{V}{3,6} \quad (87)$$

A energia eléctrica recuperada pelo sistema de frenagem pode então ser determinada através da seguinte expressão:

$$E_F = \frac{P_F \times \Delta t}{3600} \quad (88)$$

No entanto, a quantidade de energia devolvida à catenária será inferior ao valor calculado anteriormente, uma vez que é necessário levar em conta o rendimento e o

fator de potência do sistema de recuperação. A energia efetivamente recuperada é assim dada por:

$$E_{recuperada} = E_{F_{total}} \times \eta_F \times \cos \varphi_F \quad (89)$$

Por sua vez, a energia fornecida ao comboio para percorrer a totalidade do percurso, considerando-se igualmente o rendimento e o fator de potência dos motores de tração e o rendimento da transmissão mecânica, pode ser determinada do seguinte modo:

$$E_{fornecida} = \frac{E_{T_{total}}}{\eta_T \times \eta_m \times \cos \varphi_m} \quad (90)$$

Conhecida a quantidade de energia total requerida pelo comboio e a quantidade de energia devolvida à catenária, pode-se determinar a percentagem de energia elétrica que é possível recuperar em relação à energia total consumida da seguinte forma:

$$\% = \frac{E_{recuperada_{total}}}{E_{fornecida_{total}}} \times 100 \quad (91)$$

Relativamente aos serviços auxiliares, a energia elétrica consumida por estes equipamentos pode ser quantificada através da seguinte expressão:

$$E_{SA} = \frac{P_{SA} \times t_{percurso}}{3600} \quad (92)$$

Por último, ao se somar a energia elétrica necessária para o comboio percorrer o percurso com a energia consumida pelos equipamentos auxiliares, tem-se a energia total consumida pelo comboio ao longo do percurso:

$$E_{percurso} = E_{T_{total}} + E_{SA} \quad (93)$$

Capítulo 5

5. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Após se realizar a simulação de marcha em regime de tempo rígido de uma dada composição ferroviária num determinado percurso, os resultados dessa simulação, nomeadamente os tempos de percurso, de carácter relativo, e as velocidades de marcha correspondentes a cada posição nesse percurso, armazenam-se numa base de dados, designada por ‘‘Resultados da simulação de marcha’’.

No que diz respeito à simulação de tráfego de uma dada circulação relativamente a outra ou outras circulações, é necessário considerar o tempo absoluto de partida da estação inicial do percurso dessa circulação, a fim de se obterem tempos absolutos de percurso em vez de tempos relativos. Por este motivo, no programa desenvolvido para a simulação de tráfego de uma dada circulação, soma-se, em primeiro lugar, o tempo absoluto de partida da circulação aos tempos relativos de percurso, que se encontram na base de dados acima referida, e em seguida, verifica-se se essa circulação respeita um espaçamento mínimo em relação a outras circulações que possam circular num determinado troço de linha em comum às circulações em análise, de modo a verificar-se a regra básica de segurança na circulação ferroviária. Os resultados da simulação de tráfego armazenam-se, por sua vez, numa base de dados denominada ‘‘Resultados da simulação de tráfego’’. Deste modo, sempre que se proceder à simulação de tráfego de um nova circulação, verifica-se a existência de incompatibilidades dessa circulação em relação às circulações existentes na base de dados anteriormente referida. Ou seja, armazenam-se nessa base de dados somente as circulações que não apresentem quaisquer incompatibilidades com as circulações que já se encontram nessa base de dados. Este programa, permite, portanto, efetuar uma gestão correta do tráfego das circulações em exploração numa determinada rede ferroviária.

Numa rede ferroviária, podem verificar-se circulações de carácter regular e circulações especiais. No caso de circulações regulares, que na grande maioria dos casos se destinam ao transporte de passageiros, os tempos absolutos de partida das circulações podem ser retirados dos horários previamente estabelecidos pelas empresas ferroviárias. Por outro lado, no caso de uma circulação especial, normalmente estabelecida para o transporte de mercadorias, que extraordinariamente percorre um determinado percurso, define-se o tempo absoluto de partida dessa circulação, mas considerando as circulações que normalmente circulam nesse percurso ou em troços desse percurso. Deste modo, pode concluir-se que na simulação de tráfego, se passam a considerar os tempos horários, de carácter absoluto, correspondentes a cada posição do comboio no referido percurso. Definem-se igualmente, no caso dos comboios de passageiros, os tempos de paragem nas estações de partida e de chegada do percurso, para entrada e saída de pessoas, respetivamente. Por outro lado, no caso dos comboios de mercadorias,

normalmente o carregamento e descarregamento das cargas têm lugar em ramais especificamente desenvolvidos para o efeito.

No programa desenvolvido para a simulação de tráfego, podem verificar-se duas situações: uma relativa a cada percurso propriamente dito, compreendendo as circulações nos dois sentidos de marcha, o que permite obter o “gráfico do horário” para esse percurso, e uma outra referente a percursos com troços de linhas em comum, a qual tem, por sua vez, como objetivo obter o “gráfico do horário” para uma linha ou apenas para um troço de linha, sendo portanto possível observar nesse gráfico, de modo sucinto, os diagramas de marcha (s,t) relativos às circulações nesses diferentes percursos.

Quanto à primeira situação, uma vez que o que se pretende obter é o diagrama de marcha posição-tempo para ambos os sentidos do percurso num determinado intervalo de tempo horário, tem que se determinar qual o intervalo de tempo mínimo que obrigatoriamente se deve verificar entre os tempos absolutos de partida de circulações sucessivas no mesmo sentido de circulação.

Este intervalo de tempo é influenciado por dois parâmetros:

- a) Regra básica de segurança na circulação ferroviária, que estabelece, como foi exposto anteriormente, que dois comboios não podem circular em simultâneo no mesmo cantão, em cada instante de tempo;
- b) Intervalo de tempo mínimo que o comboio demora para, nas estações terminais do percurso, inverter o sentido de marcha para poder percorrer novamente o percurso, mas desta vez em sentido contrário ao anterior.

Relativamente à primeira condição, para um determinado percurso, conhecidas as posições do sinal avançado e do respetivo sinal principal à entrada de cada cantão, é possível determinar qual o intervalo de tempo mínimo a respeitar entre comboios sucessivos, de modo a assegurar que num determinado cantão, não se encontra em circulação, no mesmo instante de tempo, mais que um comboio. Para isso, estando os tempos absolutos referentes a cada posição do comboio no percurso já armazenados na base de dados, através do programa da simulação de tráfego, procede-se à identificação do tempo absoluto correspondente à posição do ponto de libertação de cada cantão e verifica-se se para esse tempo absoluto a composição seguinte se encontra antes do ponto de visibilidade do cantão anterior. Caso haja conflitos entre a marcha de duas circulações consecutivas, pode-se atuar sobre diversos parâmetros, nomeadamente o tempo absoluto de partida da estação inicial do percurso e os tempos de paragem nas estações intermédias, caso existam. Pode-se igualmente atuar a nível do próprio comboio, através da sua substituição por outro que permita realizar maiores ou menores tempos de percurso, consoante a situação pretendida, ou com o mesmo objetivo não utilizando toda a potência de tração disponível nos seus veículos motores.

Quanto à segunda condição, deve-se definir o número de comboios (n) que aguardam nas estações terminais do percurso para iniciar a marcha, o tempo de partida absoluto

para o primeiro dos comboios a iniciar a marcha, o intervalo de tempo entre os tempos absolutos de partida dos comboios da estação inicial do percurso e o intervalo de tempo mínimo requerido para o comboio inverter o sentido de marcha nas estações terminais do percurso. De referir que, para o mesmo sentido de marcha, os comboios em circulação podem ser diferentes e, relativamente à frequência de partida dos comboios e ao tempo mínimo para a inversão do sentido de marcha, os valores podem igualmente ser diferentes. Estas diferenças devem-se sobretudo, no caso do tempo mínimo para inverter o sentido de marcha nas estações terminais, às próprias infraestruturas, e no que diz respeito às composições e à sua frequência de partida, às necessidades de transporte existentes no percurso, o que, regra geral, depende do período de tempo ao longo do dia que se pretende considerar.

Pode-se então determinar automaticamente o tempo de partida absoluto do comboio $n+1$ para ambos os sentidos de marcha. Facilmente se compreende, que o comboio $n+1$, por exemplo a iniciar a marcha no sentido ascendente do percurso, é o mesmo comboio que iniciou a marcha em primeiro lugar no sentido descendente do percurso.

Como se sabe qual o tempo absoluto de partida do primeiro comboio em ambos os sentidos, determina-se assim o intervalo de tempo entre a primeira circulação e a circulação $n+1$. A partir deste valor, determina-se o intervalo de tempo mínimo que se deve verificar entre circulações sucessivas, tendo em conta o número de comboios que já se encontram em cada estação terminal preparados para iniciar a marcha.

Destes dois valores determinados para o intervalo de tempo mínimo entre os tempos absolutos de circulações sucessivas, verifica-se qual é o maior e assegura-se que o valor introduzido pelo utilizador para o mesmo efeito é igual ou superior a este.

Dado que no horário disponibilizado pela empresa ferroviária para um determinado percurso se encontram, naturalmente, definidos os tempo absolutos de partida, para todos os dias ao longo do ano, de todas as circulações, este procedimento visa assim verificar se o intervalo de tempo entre partidas sucessivas disponibilizado pelo horário respeita o intervalo de tempo mínimo calculado anteriormente.

Em caso negativo, é necessário estabelecer novamente o horário, considerando agora um intervalo de tempo entre partidas sucessivas que respeite o intervalo de tempo mínimo determinado segundo a metodologia acima descrita.

Por último, para o intervalo de tempo horário para o qual se pretende construir o diagrama de marcha $s(t)$ no percurso, determina-se o número de circulações que iniciam a marcha nas estações terminais dentro desse intervalo de tempo e define-se o tempo absoluto de partida para cada uma.

Em suma, obtém-se para cada percurso do itinerário os tempos absolutos de partida para cada comboio que em cada percurso inicia a marcha nas estações terminais em ambos os sentidos dentro de um intervalo de tempo horário para o qual se pretende obter o diagrama de marcha $s(t)$.

Relativamente à segunda situação, que já compreende os diferentes percursos que englobam um determinado troço de linha ou apenas um cruzamento, verifica-se a necessidade de garantir que em cada cantão desse troço de linha apenas se encontra em circulação simultaneamente uma única composição.

De notar que, somente para percursos de itinerários diferentes é necessário considerar os cruzamentos entre esses mesmos percursos. Dentro destes, verifica-se ainda que se tem a possibilidade de haver um troço de linha em comum ou apenas o cruzamento propriamente dito. No que diz respeito aos cantões dos percursos onde se encontra o cruzamento entres esses percursos, passam a considerar-se esses cantões como um único cantão. Por outro lado, quanto aos percursos num mesmo itinerário, facilmente se entende que, os cruzamentos que possam existir não constituem elementos relevantes para a simulação de tráfego.

Portanto, estando um cantão desse troço de linha ocupado por um comboio, deve portanto assegurar-se que é interdita a entrada de qualquer outro comboio, que percorre um diferente percurso, nesse mesmo cantão. Para isso, sempre que se adicionam os resultados de uma nova circulação à base de dados, verifica-se obrigatoriamente se não há qualquer incompatibilidade que possa colocar em causa a segurança da marcha dessa nova circulação, em relação às circulações já armazenadas na referida base de dados.

Deve, por esse motivo, analisar-se, de maneira idêntica à descrita anteriormente para o caso de comboios consecutivos no mesmo percurso, se no instante em que um comboio atinge o ponto de visibilidade de cada cantão desse troço de linha, não se encontra em circulação nenhum comboio nesse mesmo cantão.

Após o tratamento individual de cada uma das circulações já guardadas na base de dados, apresentam-se aquelas em que ocorrem conflitos, do ponto de vista da segurança, com a nova circulação.

No caso de se verificarem conflitos, havendo o risco de ocorrerem acidentes, podem-se tomar diversas medidas, tal como se referiu anteriormente, de modo a prevenir a ocorrência de acidentes.

De qualquer modo, mesmo que se continuem a verificar incompatibilidades, a sinalização na via referente à segurança, nomeadamente o conjunto do sinal avançado e do respetivo sinal principal, posicionado na entrada de cada cantão, permite garantir que em situação de marcha em tempo real, seja interdita a entrada de uma dado comboio num cantão que não esteja completamente libertado.

Pode, assim, concluir-se que, tanto para circulações em exploração como para circulações que se pretendem implementar, pode-se, através da simulação de tráfego, antever o aparecimento de conflitos entre circulações.

Na figura 54, apresenta-se um fluxograma que descreve de modo simplificado o funcionamento do programa desenvolvido para a simulação de tráfego entre circulações.

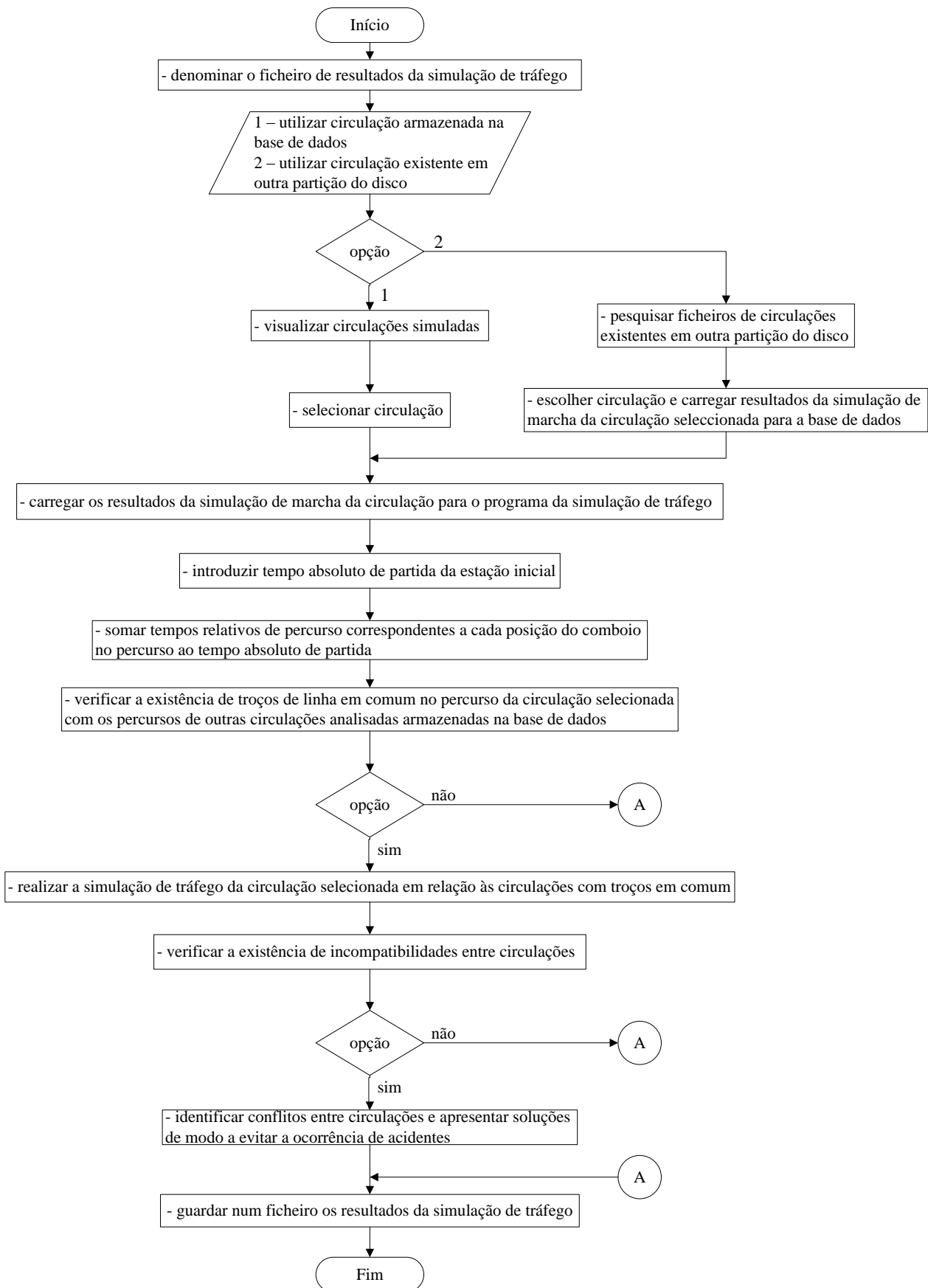


Figura 54 - Esquema representativo do funcionamento do programa de simulação de tráfego entre circulações.

Capítulo 6

6. CASO DE ESTUDO

6.1 Introdução

Neste capítulo, pretende-se simular a marcha de um dado comboio, em regime de tempo mínimo e de tempo rígido, ao longo de um determinado percurso com o objetivo de obter os diagramas de marcha e os consumos energéticos relativos a esse mesmo percurso.

Em primeiro lugar, é necessário estabelecer o itinerário a partir das linhas, que formam a rede ferroviária, guardadas na base de dados da via-férrea e, de seguida, para o itinerário considerado, define-se, de igual modo, o percurso a percorrer.

Por sua vez, constitui-se o comboio que se desloca no percurso estabelecido, também a partir dos veículos ferroviários, que se encontram armazenados na base de dados do material circulante.

De referir, que a combinação de um dado percurso com um determinado comboio constitui uma ‘circulação ferroviária’.

Quanto aos diagramas de marcha, tal como se referiu no capítulo 2, podem-se obter as curvas velocidade-tempo, $v(t)$, posição-tempo, $s(t)$, e velocidade-posição, $v(s)$.

As primeiras duas permitem conhecer a velocidade e posição do comboio na linha em função do tempo de circulação do comboio, absoluto ou relativo, enquanto a terceira curva permite saber a velocidade do comboio em cada ponto da linha. Também a partir da primeira e última curva, se podem identificar os diferentes períodos (aceleração, marcha em regime e frenagem) que se verificam na marcha de um veículo ferroviário. Por outro lado, os ‘gráficos do horário’ para um dado troço de uma via-férrea, obtêm-se a partir da sobreposição dos diagramas $s(t)$ das diferentes circulações que se deslocam nesse troço dentro de um determinado intervalo de tempo considerado.

Relativamente ao balanço energético, o que se pretende fazer é quantificar a energia consumida pelo comboio ao longo da sua marcha, nomeadamente nos períodos de aceleração e de marcha em regime, e a energia que se pode recuperar durante o período de frenagem, no caso de o comboio ser de tração elétrica e possuir um sistema de recuperação na frenagem. Dentro da energia consumida, é ainda possível determinar a energia necessária para vencer exclusivamente as resistências ao movimento, a resistência ao avanço e a resistência devido à inclinação do perfil compensado da via, e a energia requerida para acelerar o comboio, designada também por resistência ao avanço.

6.2 Definição do percurso

Para este caso de estudo em particular, no processo de definição do percurso a percorrer pelo comboio na simulação, introduz-se, em primeiro lugar, na base de dados da via-férrea, uma nova linha, designada por “Linha 1”, com todos os elementos necessários à sua caracterização.

De referir que a linha introduzida não se trata de uma linha já existente e em exploração, uma vez que, apesar de haver a possibilidade de se trabalhar com uma linha real, nomeadamente da região de Lisboa (linha de Sintra, linha da Azambuja, etc) da qual se conhecem todos os seus dados. Opta-se por se criar uma nova linha “imaginária” de modo a se poderem verificar todos os casos gerais e particulares, suscetíveis de ocorrerem nos diferentes tipos de etapas, num único percurso. Deste modo, recorre-se a uma linha imaginária para simular a marcha de um comboio não só porque nas linhas existentes não se verificam todos os casos particulares, que se pretendem analisar no caso de estudo, como também pela enorme extensão que, normalmente a maioria destas linhas apresentam, o que torna morosa a simulação, a qual se faz em função da distância percorrida no percurso com um incremento de um metro, sendo, por isso, o tempo de simulação diretamente proporcional ao comprimento total da linha.

Quanto ao perfil de velocidades, é também importante mencionar que em linhas reais as etapas de velocidade limite possuem maior extensão que aquela considerada neste percurso, não havendo, portanto, na realidade tantas divisões, em termos de zonas de velocidade limite.

Por outro lado, em relação ao perfil compensado da via, as respetivas etapas assemelham-se aos casos reais, nos quais se verificam bastantes zonas com diferentes inclinações compensadas, decorrentes das curvas e das rampas que ocorrem na via.

Dos elementos introduzidos para a definição da nova linha, destacam-se, relativamente aos dados gerais da linha necessários à simulação da marcha, os seguintes:

Dados gerais:

Designação: Linha 1

Ponto quilométrico inicial: 0 km

Ponto quilométrico final: 12 km

Comprimento da linha: 12 km

Número de estações: 6

Sentido de marcha: ascendente

Número de etapas de

- velocidade limite: 17

- perfil compensado: 47

Verifica-se, assim, que nesta fase, os dados referentes aos blocos de sinalização, aos entroncamentos com outras vias-férreas e aos troços de via única, caso existam, não constituem informação relevante para a simulação de marcha.

Por outro lado, a caracterização da via quanto às etapas de velocidade limite e às etapas de perfil compensado é de fundamental importância para a simulação de marcha.

Na tabela 12, apresenta-se para cada etapa de velocidade limite na linha 1, o valor da velocidade máxima a que o comboio pode circular e o respetivo ponto quilométrico final.

	Velocidade máxima (km)	P. Q. final (km)
1	40	0,4
2	80	1,0
3	90	1,1
4	50	1,7
5	60	2,0
6	50	2,3
7	60	3,7
8	90	4,1
9	70	5,5
10	60	6,0
11	80	7,0
12	60	7,7
13	70	8,7
14	100	9,05
15	90	10,0
16	80	11,0
17	50	12,0

Tabela 12 - Etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso.

Associada à tabela anterior, na figura seguinte, encontram-se representadas as etapas de velocidade limite no sentido ascendente da linha 1.

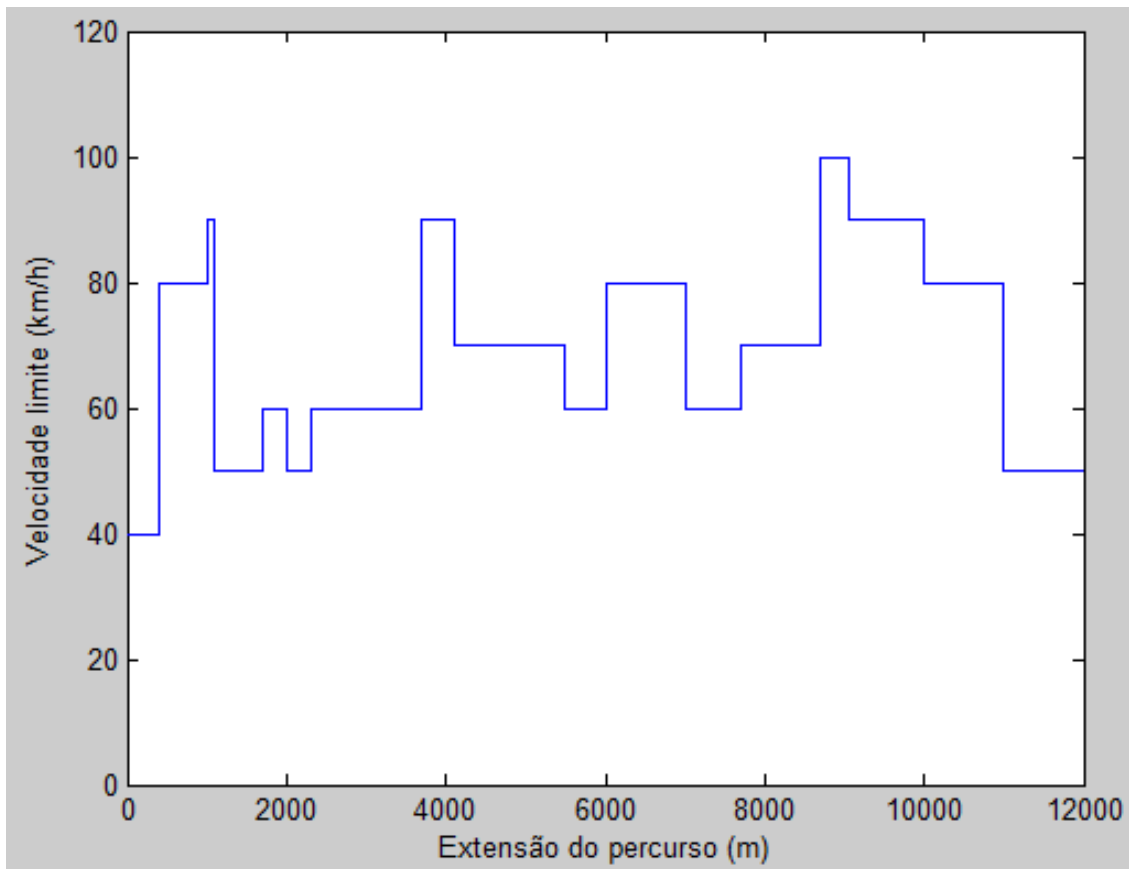


Figura 55 - Representação do perfil de velocidades do sentido ascendente da via.

Do mesmo modo, tem-se uma representação das etapas de perfil compensado no sentido ascendente da linha 1 (Fig. 56).

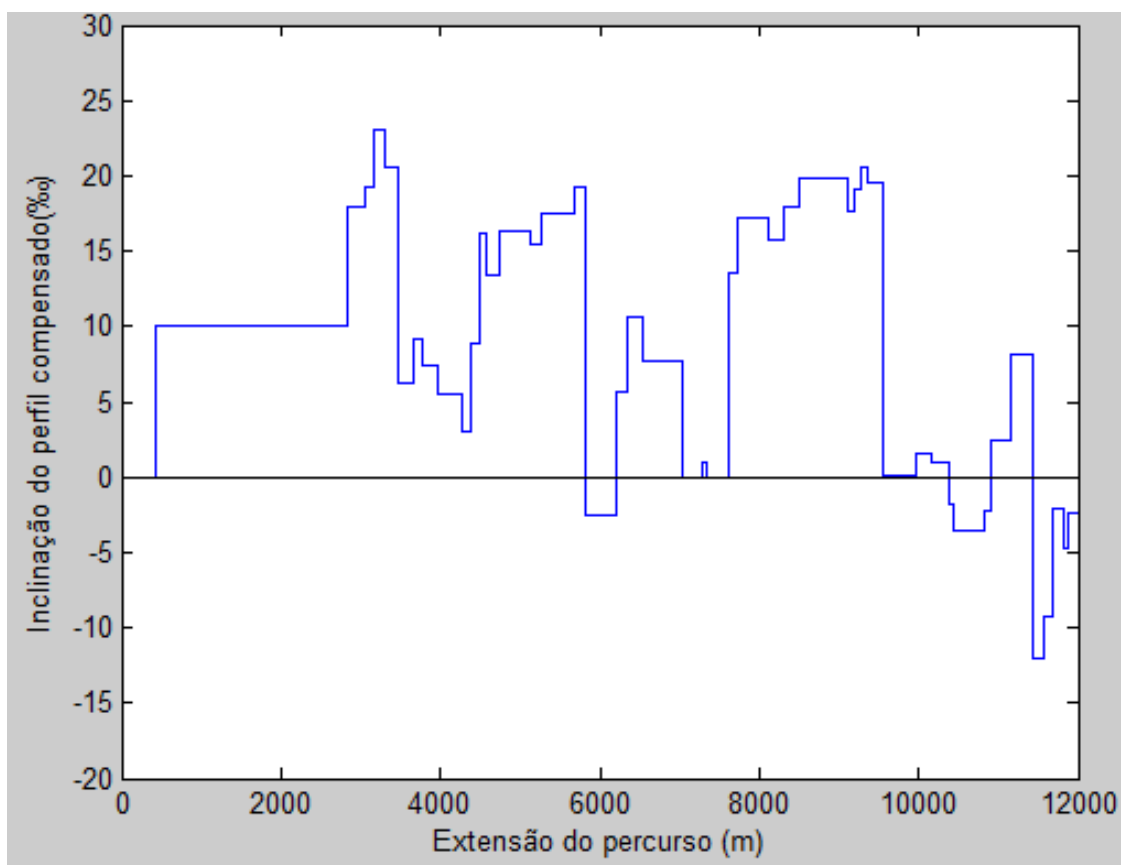


Figura 56 - Representação do perfil compensado do sentido ascendente da via.

Por último, na tabela seguinte, apresentam-se as estações da linha com o respetivo ponto quilométrico.

	Estação	P. Q. (km)
1	A	0,0
2	B	1,5
3	C	2,8
4	D	5,6
5	E	8,5
6	F	12,0

Tabela 13 - Estações do percurso.

Admite-se que esta linha constitui um itinerário, sendo as suas estações terminais as estações A e F.

Dentro deste itinerário, tal como se referiu anteriormente, podem verificar-se diversos percursos. Relativamente ao caso de estudo, considera-se que o percurso a simular é coincidente com o próprio itinerário, ou seja, a estação de partida é a estação A e a

estação de chegada a estação F. Considera-se também que o comboio realiza paragem em todas as estações intermédias do percurso.

Estabelece-se, igualmente, o intervalo de tempo que o comboio leva para percorrer o percurso entre duas paragens bem como o tempo de paragem na estação.

É necessário salientar, que para um percurso real, ambos os tempos anteriores seriam obtidos a partir do horário desse percurso, disponibilizado pela empresa ferroviária, construído, por sua vez, através de ensaios realizados nesse percurso.

Como, neste caso de estudo, se considera um percurso que na realidade não existe, estabelecem-se os tempos de horário entre paragens em função dos tempos mínimos de percurso, determinados através da simulação de marcha em regime de tempo mínimo. Garante-se, desta forma, que tanto para percursos imaginários, somente utilizados como casos de estudo, como para percursos reais, mas que ainda não foram implementados, os tempos de horário são sempre iguais ou superiores aos tempos mínimos.

Encontra-se, assim, apresentada toda a informação, referente às características do percurso, necessária à simulação de marcha.

6.3 Constituição do comboio

O comboio considerado, neste caso de estudo, consiste numa automotora quadrupla elétrica (UQE) do parque ferroviário da CP, tendo sido todos os dados relativos a este veículo necessários à simulação disponibilizados pela própria empresa, os quais se apresentam de seguida.

Dados do comboio:

Tipo de tração: elétrica

Designação: UQE

Massa total do veículo

- com carga normal: M : 225,8 t

- com carga máxima: M_{\max} : 249,3 t

Peso aderente, P_a : 190 t

Disposição dos rodados (UIC): Bo' Bo' + 2' 2' + 2' 2' + Bo' Bo'

Disposição dos veículos: M + R + R + M

Número de eixos do veículo, n : 16

Carga média por eixo, m : 15,08125 t

Comprimento total do veículo, L : 95,59 m

Altura do veículo com pantógrafo(s) fechado(s), H: 3,388 m

Largura do veículo, L: 3,016 m

Coefficiente de correção das massas rotativas, λ : 1,1

Aceleração máxima no arranque, a: 1,1 m/s²

Desaceleração máxima na frenagem, d: -0,84 m/s²

Coefficiente de aderência médio no arranque, μ_0 : 0,27

Velocidade máxima, v_{\max} : 120 km/h

Sistema de frenagem:

Tipo: regenerativa

Rendimento global: 0,97

Fator de potência: 1

Sistema de tracção:

Rendimento global: 0,97

Fator de potência: 1

Potência nominal (nas rodas): 4218 CV

Potência para serviços auxiliares: 150 kW

A curva do esforço de tração, em função da velocidade, deste comboio é definida por troços, ou seja, em intervalos de velocidade, através dos seguintes polinómios:

$$F(v) = \begin{cases} 271,46 & : 0 < v < 40 \\ 0,0282 \cdot v^2 - 6,7 \cdot v + 491,27 & : 40 \leq v < 120 \end{cases}$$

A curva obtida encontra-se representada na seguinte figura:

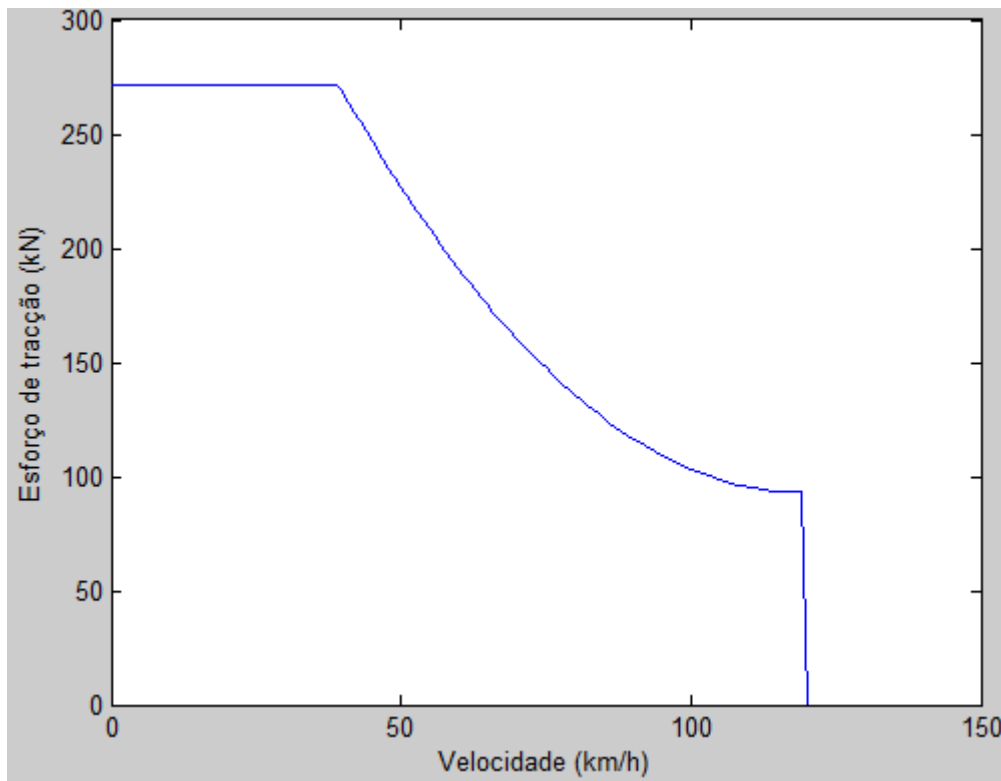


Figura 57 - Curva do esforço de tração do comboio.

Para se realizar a simulação da marcha de um veículo ferroviário, é preciso determinar, em primeiro lugar, os coeficientes A, B e C a fim de se calcular a resistência ao avanço em cada posição do veículo ao longo do percurso.

- a) Para o cálculo do coeficiente A da resistência ao avanço:

Coeficiente numérico, λ : 18

- b) Para o cálculo do coeficiente B da resistência ao avanço:

Coeficiente numérico, b: 0,1

- c) Para o cálculo do coeficiente C da resistência ao avanço:

- d) Coeficiente global de forma das extremidades do comboio, k_1 : 20×10^{-3}

- e) Coeficiente global característico da rugosidade da superfície molhada, k_2 :
 33×10^{-5}

Definidos os coeficientes anteriores, dentro dos intervalos permitidos em função do tipo de comboio, determinam-se agora os valores dos coeficientes A, B e C através das expressões apresentadas no capítulo 2 na secção da resistência ao avanço. Os valores obtidos foram os seguintes:

- a) Coeficiente A = $3,5368 \times 10^3$

- b) Coeficiente B = 24,13
- c) Coeficiente C = 0,6691

Estão, assim, definidos todos os dados acerca do comboio necessários à simulação da sua marcha ao longo de qualquer percurso.

6.4 Simulação de marcha

6.4.1 Em regime de tempo mínimo

Tal como se viu anteriormente, faz-se, em primeiro lugar a simulação da marcha em regime de tempo mínimo ao longo do percurso considerado a fim de se obter o tempo que o comboio demora para percorrer o percurso entre paragens.

Tendo em conta as paragens no percurso, apresenta-se um novo perfil de velocidades, com maior número de etapas de velocidade, sendo no total 25 (Tabela 14 e Fig. 58).

	Velocidade máxima (km)	P. Q. final (km)	Tipo de etapa
1	40	0,4	1
2	80	1,0	1
3	90	1,1	2
4	50	1,5	-1
5	0	1,5	-
6	50	1,7	1
7	60	2,0	2
8	50	2,3	-2
9	60	2,8	2
10	0	2,8	-
11	60	3,7	1
12	90	4,1	2
13	70	5,5	-1
14	60	5,6	-1
15	0	5,6	-
16	60	6,0	1
17	80	7,0	2
18	60	7,7	-2
19	70	8,5	2
20	0	8,5	-
21	70	8,7	1
22	100	9,05	2
23	90	10,0	-1
24	80	11,0	-1
25	50	12,0	-1

Tabela 14 - Etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso considerando as paragens nas estações.

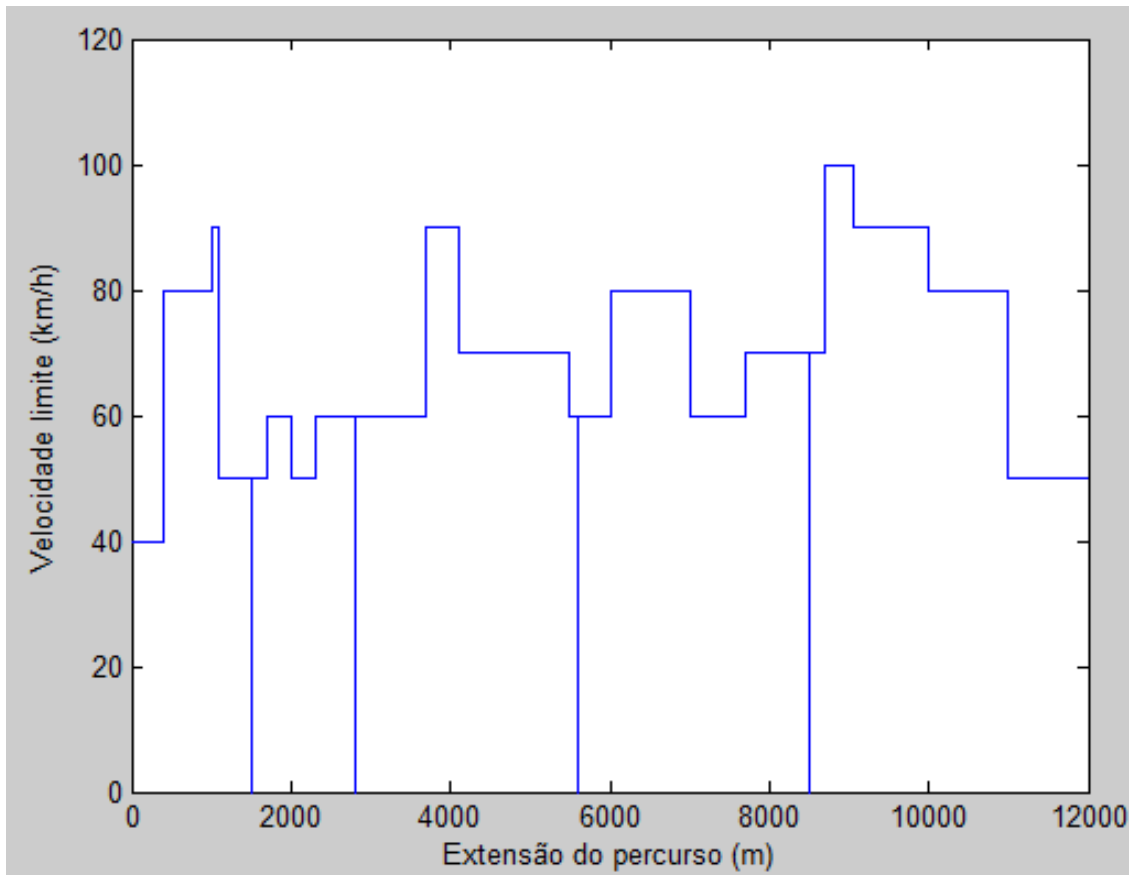


Figura 58 - Representação das etapas de velocidade limite no sentido ascendente do percurso considerando as paragens nas estações.

Procede-se, então, à simulação de marcha em regime de tempo mínimo, através da qual se verifica se o comboio atinge a velocidade máxima permitida nas várias etapas existentes no percurso.

De lembrar que, sempre que um comboio percorre uma determinada etapa e a sua marcha se adequa ao caso geral dessa etapa significa que o comprimento da etapa é suficiente para que se possa atingir a sua velocidade limite.

Por outro lado, para qualquer um dos casos particulares que podem ocorrer, consoante o tipo de etapa, sabe-se que o comboio não consegue circular à velocidade máxima permitida nessa etapa e/ou respeitar a velocidade final da etapa, devido ao facto do comprimento da etapa ser insuficiente. Deste modo, torna-se necessário determinar uma nova velocidade limite para essa etapa, inferior à primeira.

Da simulação de marcha em regime de tempo mínimo, na qual a velocidade máxima de cada etapa constitui a velocidade a que se pretende circular, obtêm-se os novos valores da velocidade limite para as etapas em que não se verifica o seu caso geral, como se apresenta na seguinte tabela.

	Velocidade máxima (km)	P. Q. final (km)	Tipo de etapa
1	40	0,4	1
2	80	1,0	2
3	75,1	1,1	-1
4	50	1,5	-1
5	0	1,5	-
6	50	1,7	1
7	60	2,0	2
8	50	2,3	-2
9	60	2,8	2
10	0	2,8	-
11	60	3,7	1
12	85,9	4,1	2
13	70	5,5	-1
14	46,7	5,6	-1
15	0	5,6	-
16	60	6,0	1
17	80	7,0	2
18	60	7,7	-2
19	70	8,5	2
20	0	8,5	-
21	62,7	8,7	1
22	86,1	9,05	1
23	90	10,0	2
24	80	11,0	-1
25	50	12,0	-1

Tabela 15 - Alterações nas etapas de velocidade limite após a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.

Através da tabela anterior, verificam-se alterações nos valores da velocidade limite e também no tipo de etapa, assinaladas a vermelho, em diversas etapas do percurso, por estas constituírem casos particulares do tipo de etapa.

Para melhor se perceber quais as alterações verificadas, apresentam-se as seguintes curvas referentes ao perfil de velocidades no percurso antes e após a simulação de marcha em regime de tempo mínimo a azul e a verde, respetivamente (Figura 59).

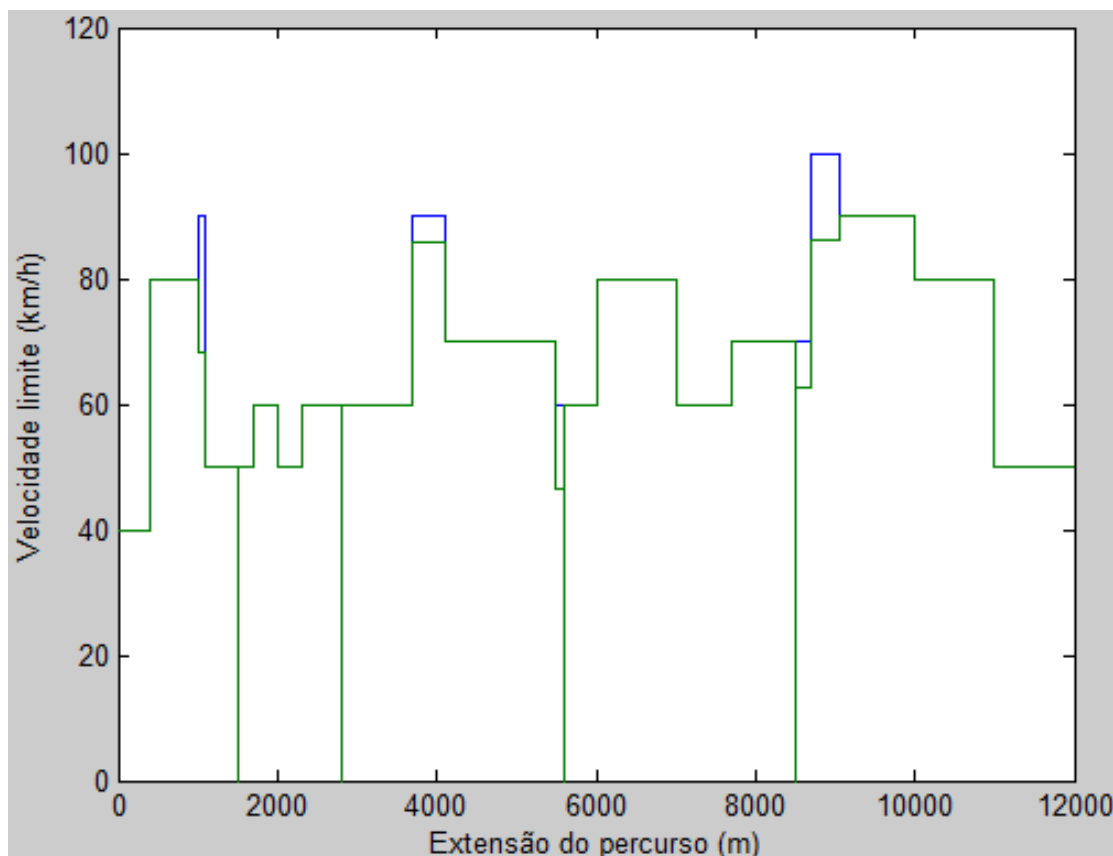


Figura 59 - Representação das alterações nas etapas de velocidade limite após a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.

De um modo particular, faz-se de seguida uma breve análise a cada uma das etapas em que ocorreram variações.

Verificaram-se alterações, em relação à velocidade limite das etapas e/ou ao seu tipo em sete etapas do percurso:

- a) Na 3^a etapa do percurso, que é do tipo 2, o comboio além de não conseguir atingir a velocidade máxima permitida nessa zona, também não tem a possibilidade de reduzir a sua velocidade até a velocidade final da etapa, enquadrando-se, por isso, no caso particular 3 das etapas do tipo 2;
- b) Na 12^a etapa, também do tipo 2, o comboio não chega a circular à velocidade limite da etapa, pertencendo, por esse motivo, ao caso particular 1 das etapas do tipo 2;
- c) Na 14^a etapa, do tipo -1, não é possível ao comboio interromper a sua marcha dentro do comprimento da etapa a fim de parar na estação, pelo que esta etapa constitui um caso particular das etapas do tipo -1;
- d) Na 21^a etapa, do tipo 2, o comboio não atinge a velocidade limite da etapa e, portanto, esta etapa consiste num caso particular das etapas do tipo 1.

e) Na etapa 22, na qual o comboio não atinge a velocidade máxima da etapa nem tão pouco consegue alcançar a velocidade final da etapa, fazendo, deste modo, parte dos casos particulares 2 das etapas do tipo 2.

De referir ainda, as etapas 2 e 23 do percurso, que apesar das suas velocidades máximas permanecerem constantes, não sendo reduzidas como no caso das etapas anteriores, passaram a ser etapas dos tipos 2 e 1, respetivamente, devido à alteração na velocidade limite das etapas adjacentes.

Tal como se viu anteriormente, no capítulo 3 encontra-se uma explicação detalhada de todos os casos particulares suscetíveis de ocorrer em cada tipo de etapa.

Na tabela 16, apresentam-se os tempos mínimos de percurso entre paragens, obtidos através da simulação de marcha em regime de tempo mínimo, e os tempos de paragem nas estações, definidos, para os comboios de passageiros, de acordo com o número de passageiros que entram e saem do comboio. Admite-se que o tempo mínimo de paragem não dever ser inferior a 30 segundos.

Estação		Tempo de percurso	Tempo de paragem	Distância de percurso
Origem	Destino	(h:m:s)	(m:s)	(km)
A	B	00:01:57	00:30	1,5
B	C	00:01:43	01:00	1,3
C	D	00:02:53	00:30	2,8
D	E	00:02:57	00:45	2,9
E	F	00:03:26	-	3,5

Tabela 16 - Distâncias e tempos mínimos de percurso entre paragens e tempos de paragem para a pré-simulação de marcha em regime de tempo mínimo.

Se o comboio percorrer o percurso em regime de tempo mínimo, obtêm-se os seguintes diagramas de marcha:

a) Curva velocidade-espaço percorrido (Figura 60):

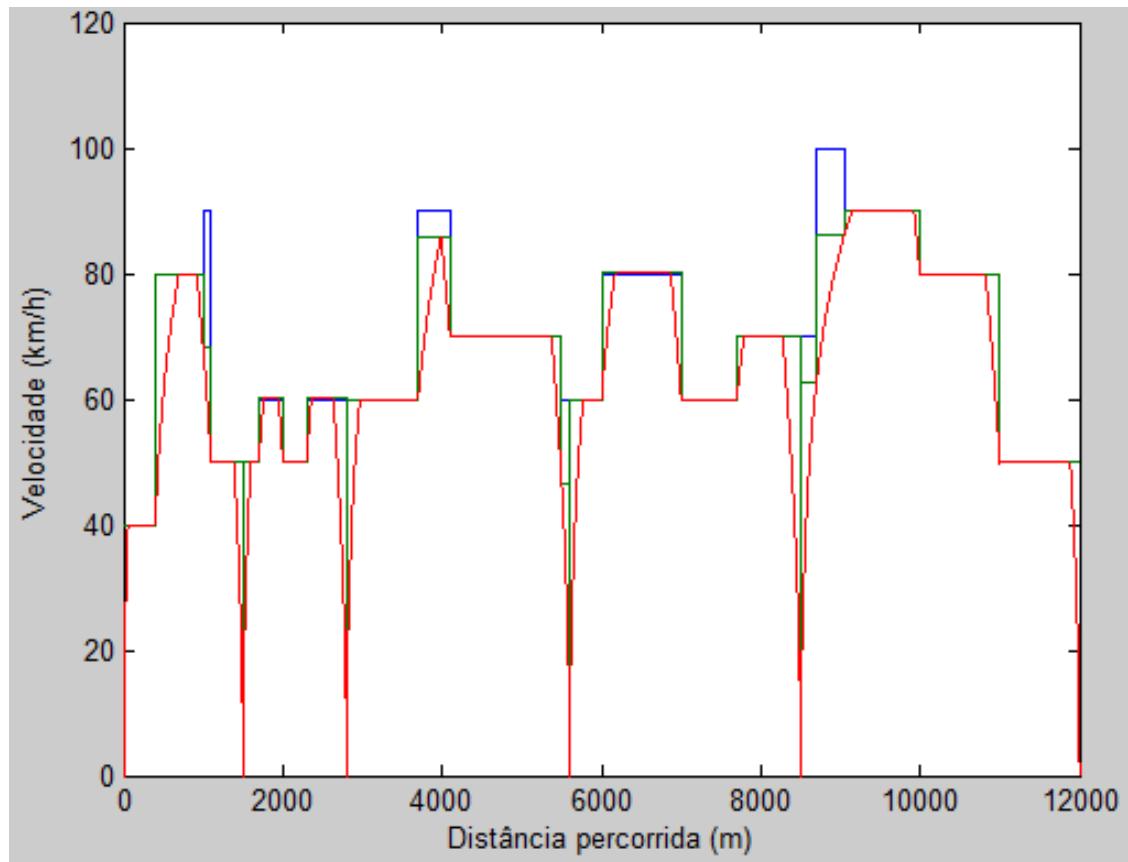


Figura 60 - Curva $v(s)$ da velocidade do comboio em função da distância de percurso percorrida.

b) Curva velocidade-tempo de percurso (Figura 61):

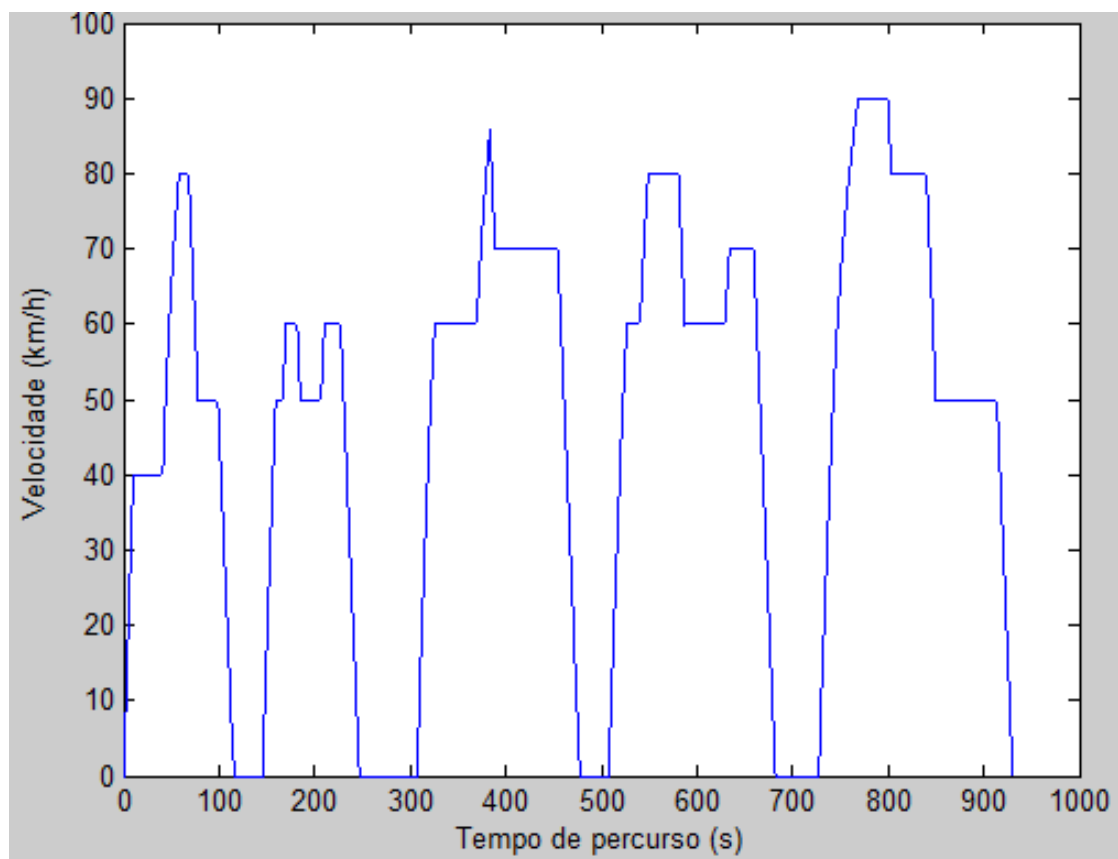


Figura 61 - Curva $v(t)$ da velocidade do comboio em função do tempo de percurso.

c) Curva tempo de percurso-espaco percorrido (Figura 62):

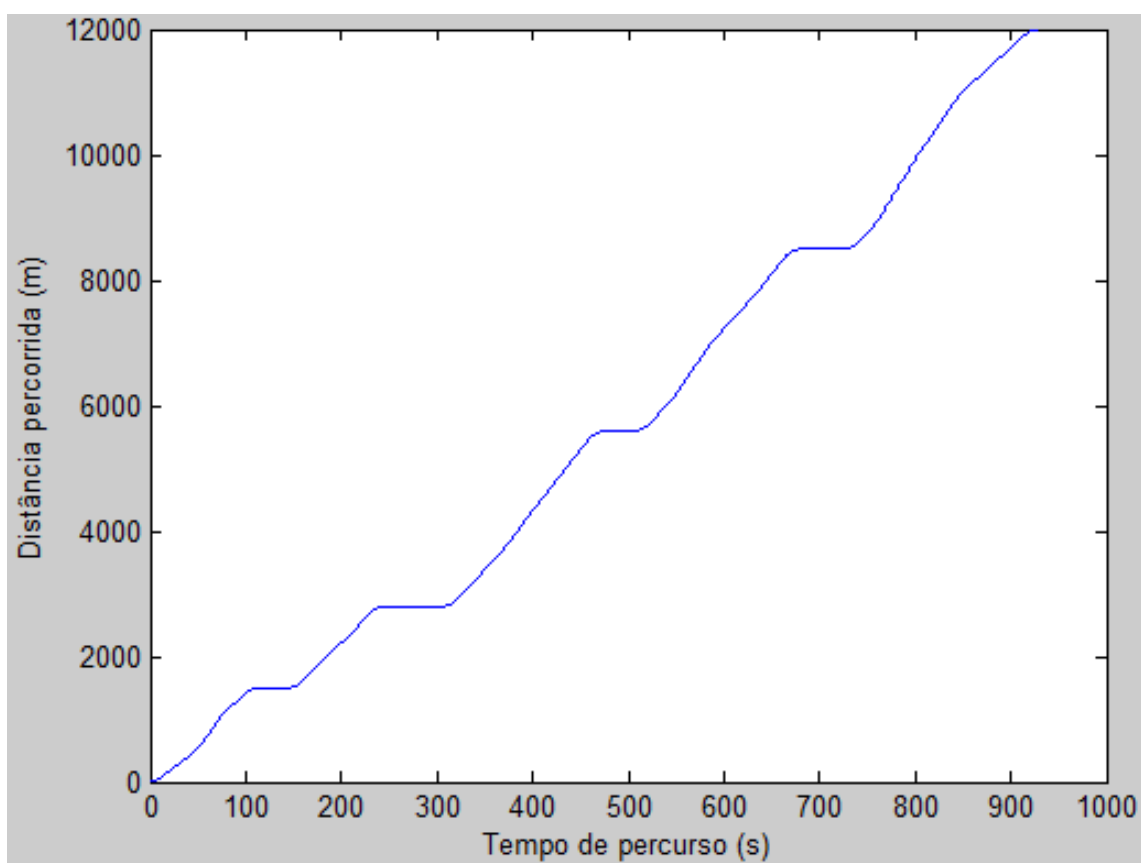


Figura 62 - Curva $s(t)$ da distância de percurso percorrida em função do tempo de percurso.

De notar, que nos últimos dois diagramas os tempos apresentados dizem respeito a tempos relativos, não tendo, portanto, em conta o tempo absoluto de partida da estação inicial.

6.4.2 Em regime de tempo rígido

Conhecidos os tempos mínimos de percurso entre duas paragens consecutivas, pode-se estabelecer agora o tempo rígido ou horário disponível para o comboio percorrer esses percursos (Tabela 17), não esquecendo que estes, em qualquer caso, têm que ser, pelo menos, iguais ou superiores aos tempos mínimos correspondentes.

Estação		Tempo de percurso	Tempo de paragem	Distância de percurso
Origem	Destino	(h:m:s)	(m:s)	(km)
A	B	00:02:00	00:30	1,5
B	C	00:01:45	01:00	1,3
C	D	00:03:00	00:30	2,8
D	E	00:03:00	00:45	2,9
E	F	00:03:30	-	3,5

Tabela 17 - Tempos e distâncias de percurso entre paragens e tempos de paragem.

Desta forma, da simulação de marcha em regime de tempo rígido resulta um menor número de etapas de velocidade limite com valores máximos mais baixos decorrentes dos maiores tempos de percurso.

Na tabela 18, apresentam-se as novas etapas de velocidade limite com o respetivo valor máximo e o tipo de etapa correspondente.

	Velocidade máxima (km)	P. Q. final (km)	Tipo de etapa
1	40	0,4	1
2	64,3	1,1	2
3			
4	50	1,5	-1
5	0	1,5	-
6	50	1,7	1
7	54,2	2,0	2
8	50	2,3	-2
9	55,6	2,8	2
10	0	2,8	-
11	60	3,7	1
12	65,2	5,5	2
13			
14	46,7	5,6	-1
15	0	5,6	-
16	60	6,0	1
17	75,1	7,0	2
18	60	7,7	-2
19	66,4	8,5	2
20	0	8,5	-
21	62,7	8,7	1
22	79,9	11,0	2
23			
24			
25	50	12,0	-1

Tabela 18 - Alterações nas etapas de velocidade limite após a simulação de marcha em regime de tempo rígido.

Como se pode verificar, há uma redução de 4 etapas no percurso, passando a ser no total 21.

Sabe-se também que quanto maior for o tempo de percurso, menor será a velocidade de circulação e, conseqüentemente, menor será o número de etapas de velocidade, havendo a possibilidade de se ter apenas uma etapa no percurso entre paragens consecutivas.

Na figura 63, encontra-se representado o perfil de velocidades do percurso, através da curva a vermelho, para a marcha em regime de tempo rígido.

De referir que, a curva a verde diz respeito ao perfil de velocidade resultante da simulação de marcha em regime de tempo mínimo.

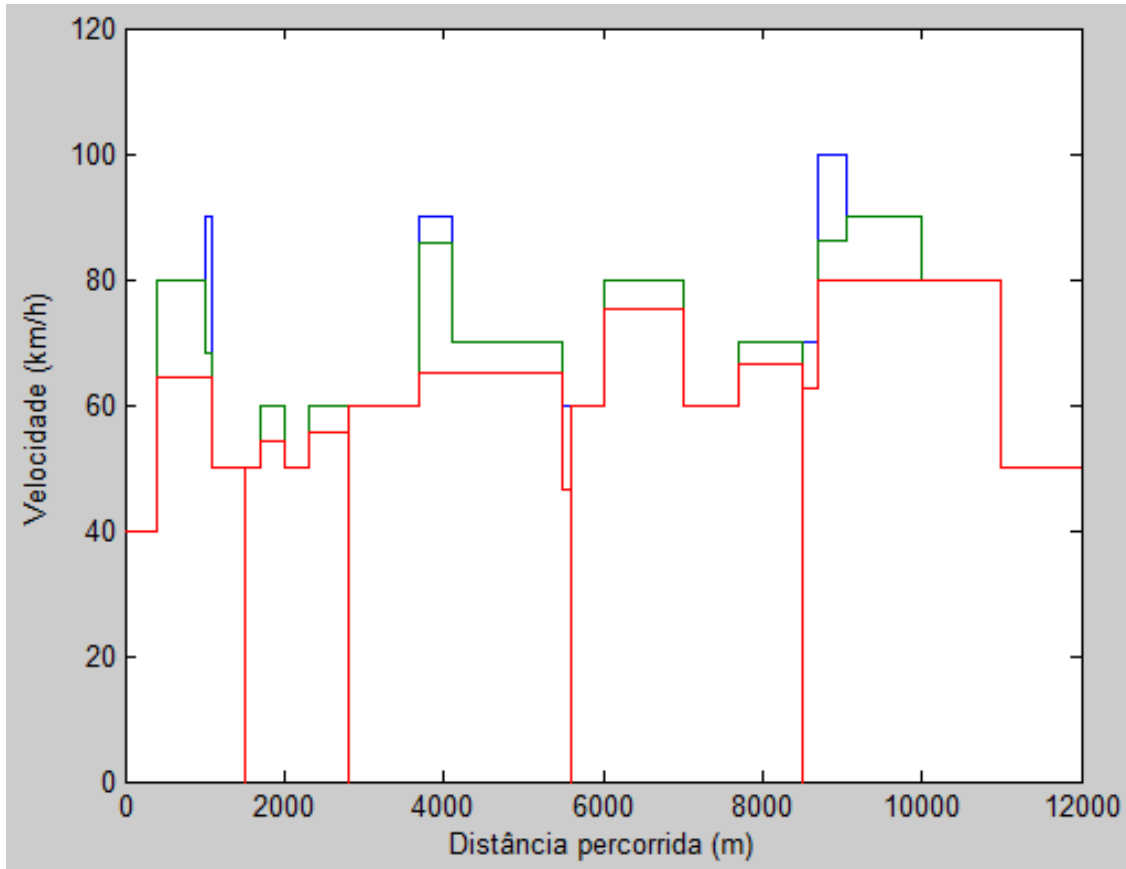


Figura 63 - Representação das alterações nas tepas de velocidade limite após a simulação de marcha em regime de tempo rígido.

Apresentam-se, por fim, os diagramas de marcha obtidos para esta circulação:

a) Diagrama de marcha velocidade-espço (Figura 64):

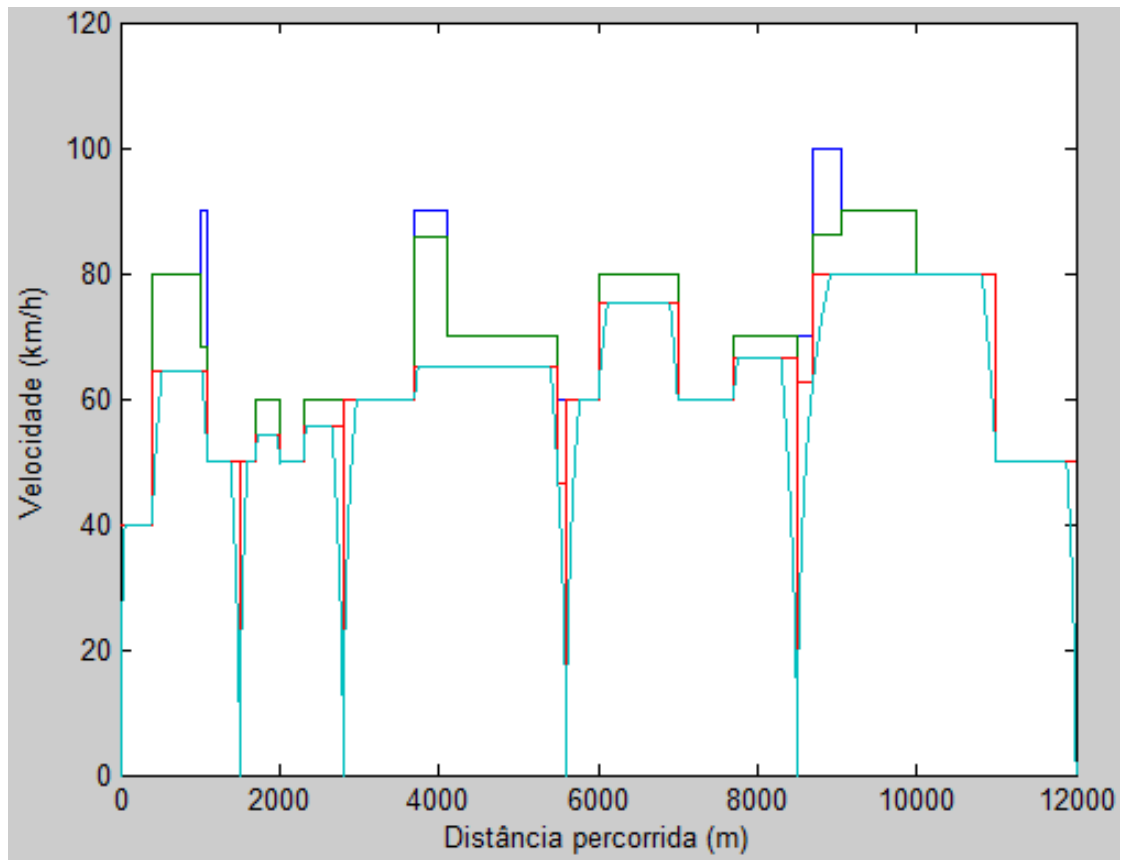


Figura 64 - Curva v(s) da velocidade do comboio em função da distância percorrida.

b) Diagrama de marcha velocidade-tempo (Figura 65):

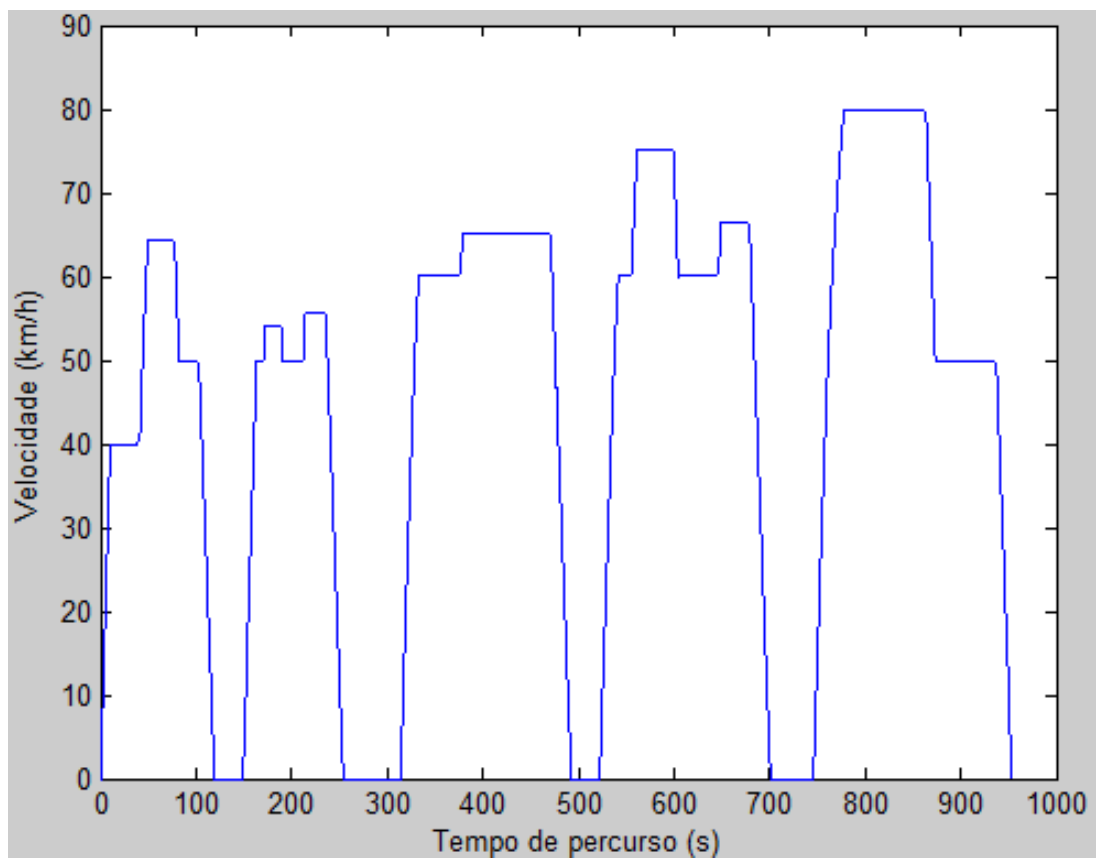


Figura 65 - Curva $v(t)$ da velocidade do comboio em função do tempo de percurso.

c) Diagrama de marcha espaço-tempo (Figura 66):

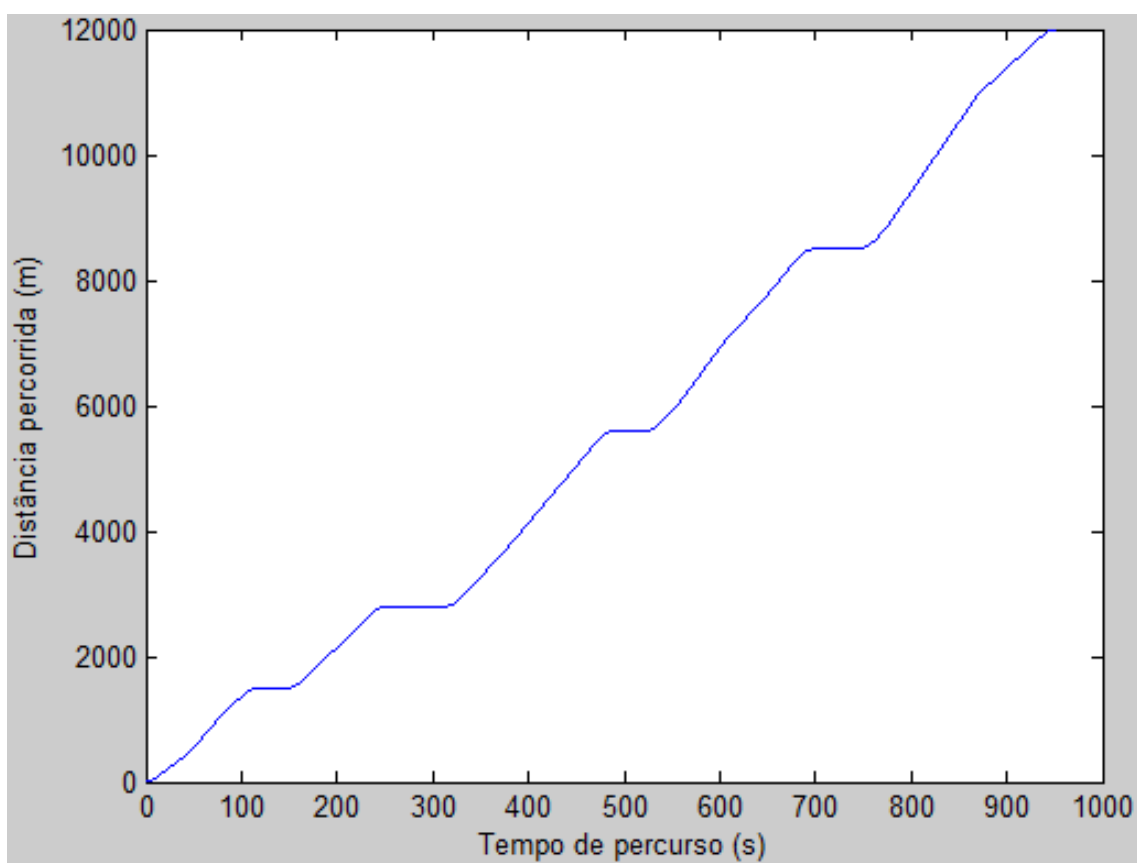


Figura 66 - Curva $s(t)$ da distância de percurso percorrida em função do tempo de percurso.

6.5 Balanço energético

Por último, por forma a se fazer uma análise completa da simulação da marcha de um comboio num dado percurso, quantifica-se a energia consumida devido às resistências ao movimento, nomeadamente a resistência devida ao avanço e à inclinação do perfil compensado da via, e a energia necessária para acelerar o comboio.

Por outro lado, determina-se também a energia consumida nos períodos de aceleração e marcha em regime que se verificam na marcha do comboio e a energia recuperada durante os períodos de frenagem.

Deste modo, é possível saber a quantidade de energia que é necessário fornecer ao comboio e também a quantidade de energia que o mesmo pode devolver à catenária.

Na análise energética, consideram-se as duas circulações já apresentadas, do comboio considerado com carga normal em regime de tempo mínimo e de tempo rígido e ainda duas outras circulações, do mesmo comboio, igualmente em regime de tempo mínimo e de tempo rígido, mas com carga máxima, indicada pelo fabricante. De referir, que este aumento de carga é de cerca de 23,5 t, representando um aumento de cerca de 10%.

6.5.1 Comboio com carga normal em regime de tempo mínimo

Na seguinte tabela, apresenta-se a energia consumida para vencer cada uma das resistências ao movimento e a devida à resistência à aceleração.

Energia Consumida		
Componentes	kW.h	%
$R_{\text{avanço}}$	33,8	13,06
R_{via}	132,7	51,27
$R_{\text{aceleração}}$	92,3	35,67
Total	258,8	-

Tabela 19 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.

No gráfico circular da figura 67, tem-se a distribuição da energia consumida devido a cada uma destas forças em percentagem.

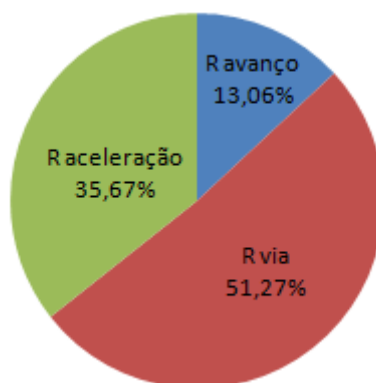


Figura 67 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Verifica-se, assim, que 51,27% da energia consumida no percurso se deve às curvas e às rampas existentes na via. Os restantes 48,73%, distribuem-se pela resistência ao avanço, com 13,06%, e pela resistência à aceleração (35,67%).

Por outro lado, na tabela 20, encontram-se os valores da energia consumida quer nos períodos de aceleração quer nos períodos de marcha em regime que ocorrem ao longo do percurso.

Energia Consumida		
Períodos de marcha	kW.h	%
Aceleração	113,4	43,84
Marcha em regime	145,3	56,16
Total	258,8	-

Tabela 20 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.

Apresenta-se, igualmente, a distribuição da energia consumida nestes períodos (Fig. 68).

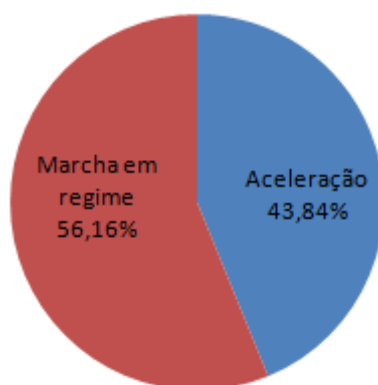


Figura 68 - Representação da distribuição por um comboio com carga normal em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.

Através dos elementos anteriores, sabe-se, portanto, que 56,16% da energia é consumida nos períodos de marcha em regime.

Ao valor da energia consumida pelo comboio devido ao conjunto de forças resistentes ao movimento soma-se a energia consumida pelos serviços auxiliares ao longo do percurso, que é de 38,7 kW.h, considerando o valor da potência dos serviços auxiliares indicada pelo fabricante de 150 kW. Deste modo, a energia total consumida durante o percurso apresenta um valor de 297,5 kW.h.

Contudo, é necessário ter em conta o rendimento e o fator de potência dos motores de tração e o rendimento da transmissão mecânica, sendo, portanto, a energia total solicitada pelo comboio para percorrer o percurso, excluindo os serviços auxiliares, igual a 266,8 kW.h.

Quanto ao período de frenagem, a energia que se pode recuperar é de 76,5 kW.h. Considerando, igualmente, o rendimento e o fator de potência do sistema de recuperação, a energia que efetivamente pode ser recuperada durante os períodos de frenagem ao longo do percurso é de 74,2 kW.h.

Verifica-se que a energia que é possível reaver através do sistema de recuperação utilizado na frenagem constitui cerca de 27,8% da quantidade de energia consumida pelo comboio para percorrer o percurso.

6.5.2 Comboio com carga normal em regime de tempo rígido

Na tabela 21, apresentam-se, de igual modo, para marcha do comboio em regime de tempo rígido, a energia consumida, em valores absolutos e em percentagem, devido às forças resistentes ao movimento e ao aumento de velocidade.

Energia Consumida		
Componentes	kW.h	%
R avanço	31,0	13,67
R via	128,4	56,73
R aceleração	67,0	29,6
Total	226,3	-

Tabela 21 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Na figura 69, tem-se a distribuição da energia consumida pelas várias resistências.

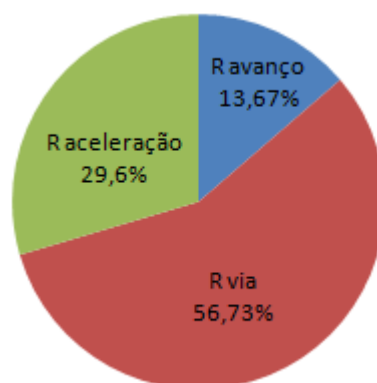


Figura 69 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Quanto aos períodos de aceleração e de marcha em regime, na tabela 22 vêm os valores da energia consumida nestes períodos e na figura 70 a correspondente distribuição.

Energia Consumida		
Períodos de marcha	kW.h	%
Aceleração	80,5	35,56
Marcha em regime	145,9	64,44
Total	226,3	-

Tabela 22 - Valores da energia consumida por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.

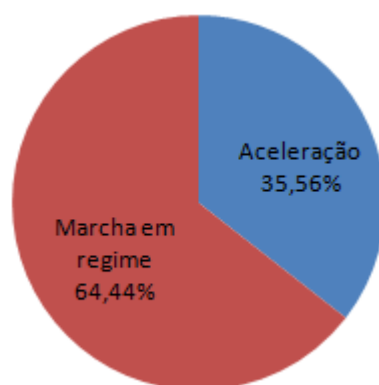


Figura 70 - Representação da distribuição por um comboio com carga normal em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.

Por último, apresentam-se os valores relativos à energia pedida à catenária, nos períodos de aceleração e de marcha em regime, e à energia devolvida à catenária, durante os períodos de frenagem, assim como a relação entre ambos.

Energia consumida pelos serviços auxiliares	39,7 kW.h
Energia consumida no percurso.....	226,3 kW.h
Energia pedida à catenária.....	233,3kW.h
Energia recuperada na frenagem.....	54,6 kW.h
Energia devolvida à catenária.....	53,0 kW.h
Relação entre a energia devolvida e a pedida à catenária.....	22,7%

6.5.3 Comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo

Na tabela 23, tem-se, para a marcha do comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo, a energia consumida, em valores absolutos e em percentagem, devido às forças resistentes ao movimento e ao aumento de velocidade.

Energia Consumida		
Componentes	kW.h	%
R avanço	35,1	12,4
R via	147,0	51,91
R aceleração	101,1	35,69
Total	283,3	-

Tabela 23 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Na figura 71, apresenta-se a distribuição da energia consumida pelas várias resistências.

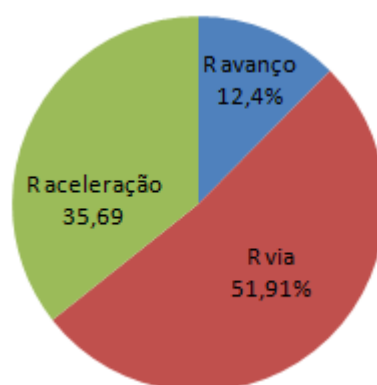


Figura 71 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Quanto aos períodos de aceleração e de marcha em regime, na tabela 24 vêm os valores da energia consumida nestes períodos e na figura 72 a correspondente distribuição.

Energia Consumida		
Períodos de marcha	kW.h	%
Aceleração	127,1	44,85
Marcha em regime	156,2	55,15
Total	283,3	-

Tabela 24 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.

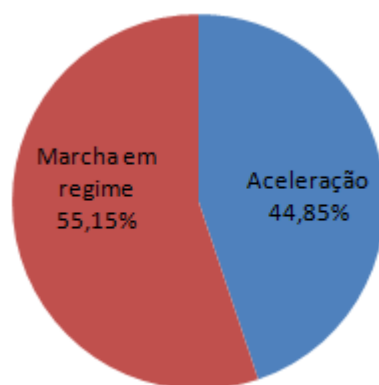


Figura 72 - Representação da distribuição por um comboio com carga máxima em regime de tempo mínimo nos períodos de aceleração e marcha em regime.

Por último, apresentam-se os valores relativos à energia pedida à catenária, nos períodos de aceleração e de marcha em regime, e à energia devolvida à catenária, durante os períodos de frenagem, assim como a relação entre ambos.

Energia consumida pelos serviços auxiliares	39,0 kW.h
Energia consumida no percurso.....	283,3 kW.h
Energia pedida à catenária.....	292,1 kW.h
Energia recuperada na frenagem.....	83,8 kW.h
Energia devolvida à catenária.....	81,3 kW.h
Relação entre a energia devolvida e a pedida à catenária.....	27,8%

6.5.4 Comboio com carga máxima em regime de tempo rígido

Tal como nos casos anteriores, também para a marcha do comboio com carga máxima em regime de tempo rígido, apresentam-se os valores da energia consumida, em termos absolutos e relativos, devido às resistências que se verificam ao longo do percurso (Tab. 25 e Fig. 73) e em todos os períodos de aceleração e marcha em regime, que ocorrem na marcha do comboio na tabela 26 e na figura 74.

Energia Consumida		
Componentes	kW.h	%
R avanço	32,2	12,78
R via	141,2	55,99
R aceleração	78,8	31,23
Total	252,2	-

Tabela 25 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.

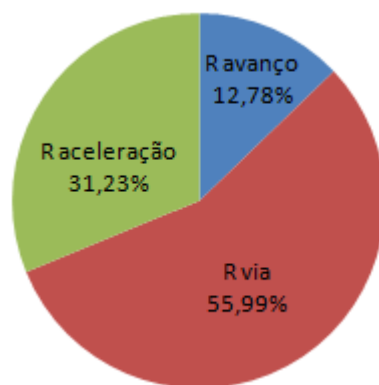


Figura 73 - Representação da distribuição da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido devido às resistências ao movimento e à aceleração.

Energia Consumida		
Períodos de marcha	kW.h	%
Aceleração	97,4	38,6
Marcha em regime	154,9	61,4
Total	252,2	-

Tabela 26 - Valores da energia consumida por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.

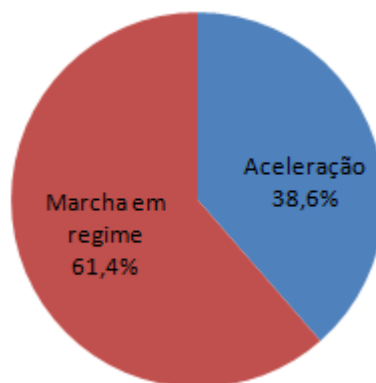


Figura 74 - Representação da distribuição por um comboio com carga máxima em regime de tempo rígido nos períodos de aceleração e marcha em regime.

Por último, determinam-se os valores referentes à energia total pedida e devolvida à catenária para esta circulação e a razão entre estes.

Energia consumida pelos serviços auxiliares	39,7 kW.h
Energia consumida no percurso.....	252,2 kW.h
Energia pedida à catenária.....	260,0 kW.h
Energia recuperada na frenagem.....	64,2 kW.h
Energia devolvida à catenária.....	62,3 kW.h
Relação entre a energia devolvida e a pedida à catenária.....	24,0%

Capítulo 7

7. CONCLUSÕES

Ao se realizar este trabalho, pode-se concluir, que a simulação de marcha, que inclui uma pré-simulação em regime de tempo mínimo e uma simulação em regime de tempo rígido, constitui uma ferramenta de fundamental importância para a caracterização da marcha de qualquer comboio ao longo de um percurso e, conseqüentemente para o estabelecimento do horário nesse percurso. É através da simulação de marcha que se pode determinar a posição que um dado comboio ocupa num percurso e a respetiva velocidade de circulação bem como o tempo de percurso correspondente. A simulação de marcha pode, portanto, ser utilizada no estudo prévio de circulações que se pretendem implementar numa linha ferroviária ou de circulações de carácter ocasional que possam surgir.

Pode-se, igualmente concluir, que ao se ter conhecimento acerca das características do traçado do percurso, em perfil e em planta, bem como das características dos veículos motores e rebocados existentes no parque ferroviário, a simulação de marcha permite encontrar a composição ferroviária que mais se adequa ao serviço que se pretende realizar, ao nível da capacidade de transporte e do tempo de percurso pretendido, de modo a satisfazer as necessidades de transporte verificadas numa dada região.

Relativamente ao percurso entre duas paragens consecutivas, é também possível analisar diferentes marchas que o comboio pode realizar para percorrer esse percurso com o objetivo de se encontrar a solução mais vantajosa, no que diz respeito ao tempo de percurso e ao consumo energético, apresentando assim benefícios tanto para os clientes como para a empresa ferroviária que disponibiliza o serviço.

No que diz respeito ao programa de simulação de marcha desenvolvido, pelo facto de se considerar no percurso entre duas paragens consecutivas um período inicial de aceleração, um período intermédio de marcha em regime e, por último, um período de frenagem, excluindo-se assim o período de marcha em deriva, pode-se concluir que a sua aplicação se destina principalmente ao serviço de transporte urbano devido à maior intensidade de tráfego verificada, na maioria dos casos, relativamente ao transporte suburbano.

Quanto aos diagramas de marcha obtidos para as circulações analisadas, verifica-se que a velocidade de regime atingida nas diversas etapas do percurso será tanto mais baixa quanto maior for o tempo disponível para o comboio percorrer esse percurso e menor for a massa do comboio.

Por sua vez, no que diz respeito aos consumos de energia verificados nessas circulações, verifica-se, como seria exetável, que é na situação em que o comboio percorre o percurso com carga normal em regime de tempo rígido, que é consumida uma menor

quantidade de energia. Comparativamente com a primeira circulação, com carga normal em regime de tempo mínimo, o consumo desta é maior pelo facto das velocidades de regime a atingir em cada etapa, também serem mais elevadas, o que, por outro lado, tem como vantagem, tal como já foi visto, um menor tempo de percurso. Relativamente à circulação com carga máxima em regime de tempo mínimo, verifica-se em relação à primeira circulação, igualmente, um aumento do tempo máximo de percurso e um aumento da energia consumida durante o percurso. Por último, quanto à circulação com carga máxima em regime de tempo rígido, verifica-se, relativamente à segunda circulação, com carga normal em regime de tempo rígido, que apesar do tempo de percurso se manter inalterado, o consumo energético é maior em resultado da maior carga transportada.

Verifica-se ainda, através desta análise energética, que a energia devolvida à catenária, nos períodos de frenagem, graças à utilização de um sistema de recuperação de energia, permite obter uma poupança, relativamente à energia consumida ao longo do percurso, na ordem de 28% para as circulações com carga normal e com carga máxima em regime de tempo mínimo, de 23% para a circulação com carga normal em regime de tempo rígido e de 24% para a circulação com carga máxima em regime de tempo rígido. Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que o aumento do tempo disponível para o comboio percorrer o percurso, para a mesma massa do comboio, leva à diminuição da quantidade de energia recuperada durante a frenagem. Tal ocorrência deve-se ao facto do aumento do tempo de percurso conduzir à redução do período de frenagem como resultado das menores velocidades de regime verificadas. Pode igualmente verificar-se que o aumento da massa do comboio, para o mesmo tempo de percurso, traduz-se num ligeiro aumento da quantidade de energia recuperada na frenagem em relação à energia total consumida, a qual, como já se referiu, aumenta sempre com o aumento da massa do comboio. Deste modo, pode-se concluir que é por esse motivo, que a recuperação de energia através do sistema de frenagem atinge o maior valor para a circulação com carga normal em regime de tempo mínimo. De referir que nos comboios equipados com sistemas de frenagem regenerativa a energia recuperada pode ser cerca de 30% da energia total consumida [14].

Em relação à distribuição da energia eléctrica consumida devido às resistências ao movimento, nomeadamente ao avanço e à inclinação do perfil compensado da via, e a resistência à aceleração, pode-se verificar que a maior componente é, para todos os casos, a referente à resistência devido às rampas e às curvas da via-férrea, seguida da componente devida à resistência à aceleração e, por fim, da componente devida à resistência ao avanço.

Ambas as resistências anteriormente referidas tomam para as circulações com carga máxima em regime de tempo mínimo e com carga normal em regime de tempo rígido os maiores e os menores valores, respetivamente. Deste modo, pode-se concluir que os aumentos do tempo de percurso, mantendo-se constante a massa do comboio, e da massa do comboio, não se alterando o tempo de percurso, se traduzem num agravamento das resistências ao movimento.

Relativamente, ao consumo de energia nos períodos de marcha do comboio, aceleração e marcha em regime, pode-se verificar que a maior componente da energia consumida se deve, em todas as circulações analisadas, ao período de marcha em regime, pelo facto do comboio circular durante uma maior extensão de linha, a velocidade constante, dentro do período de marcha em regime.

A energia consumida durante o período de aceleração é maior para a circulação com carga máxima em regime de tempo mínimo e menor para a circulação com carga normal em regime de tempo rígido. Pode-se, igualmente, concluir que a energia consumida no período de aceleração aumenta com a redução do tempo de percurso e com o aumento da massa do comboio.

Por último, pode-se verificar que tanto para as circulações com carga normal como para as circulações com carga máxima, a energia consumida no período de marcha em regime quer em regime de tempo mínimo como em regime de rígido apresentam valores praticamente idênticos. Deste modo, pode-se concluir que para a mesma carga do comboio, o aumento do tempo de percurso não se traduz num aumento considerável da energia consumida. Por outro lado, o aumento da massa do comboio resulta num ligeiro aumento da energia consumida neste período de marcha.

Relativamente ao trabalho já desenvolvido, futuramente pode-se introduzir, na marcha de um comboio ao longo de um percurso entre duas paragens, o período de marcha em deriva, em que se anula o esforço de tração, o que irá permitir reduzir o consumo de energia em cerca de 30%, apenas à custa do aumento em aproximadamente 5% do tempo de percurso [20]. Deste modo, pode-se concluir que em linhas em que o tráfego ferroviário não seja muito intenso, pode-se introduzir o período de marcha em deriva.

No que diz respeito à simulação de tráfego, neste trabalho apenas se descreve, no capítulo 5, o funcionamento do programa da simulação de tráfego para o controlo das circulações que se movimentam simultaneamente numa rede ferroviária de modo a garantir a segurança na circulação ferroviária. Deste modo, num trabalho futuro pode-se desenvolver o programa referido e proceder posteriormente à sua aplicação num caso de estudo com vista a realizar a gestão do tráfego numa rede ferroviária. Pode-se igualmente procurar realizar a simulação de tráfego em tempo real, isto é, efetuar a simulação de tráfego dos comboios que circulam simultaneamente numa rede ferroviária ao mesmo tempo que se faz a simulação de marcha de cada destes comboios ao longo dos seus percursos, os quais podem ou não ter troços de linha ou entroncamentos em comum.

Por último, pode-se também realizar a simulação elétrica, em função das posições que os comboios ocupam numa linha ferroviária em cada instante de tempo, as quais se podem obter através da simulação de tráfego, o que revela ser bastante importante quer na conceção da rede de alimentação elétrica de novas linhas que se pretendam construir quer na exploração das linhas já existentes.

Relativamente às dificuldades sentidas ao longo do trabalho, verificou-se, na simulação de marcha, que para determinadas composições ferroviárias constituídas pelo utilizador e posteriormente validadas no que diz à carga máxima a rebocar, calculada de acordo com o esforço de tração dos veículos motores e com a resistência dos engates utilizados entre os veículos, pode acontecer que, em certas situações, o esforço de tração não seja suficiente para rebocar a carga, nomeadamente ao nível dos comboios de mercadorias. Este acontecimento deve-se ao facto da resistência à inclinação do perfil compensado poder apresentar valores superiores ao do esforço de tração do comboio, devido principalmente a rampas que podem existir na via com declive bastante acentuado. O valor desta resistência ao movimento é agravado no caso dos comboios de mercadorias pela maior massa que estes podem possuir. Desta forma, caso se verifique esta situação é necessário voltar a constituir o comboio a fim de se aumentar o esforço de tração ou reduzir a carga a rebocar.

Outra dificuldade verificada consistiu na determinação e correta distribuição do consumo de energia devido a cada uma das resistências ao movimento. Esta dificuldade deve-se à existência de rampas com declive negativo, o que constitui um problema quando se pretende quantificar separadamente o esforço de tração requerido para vencer, em particular, as resistências ao movimento e à aceleração.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Henriques, N., 1991, *Simulação de Sistemas de Tração Elétrica*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, IST, Lisboa.
- [2] Pires, C. L., Nabeta, S. I., Cardoso, J. R., jul./dez. 2008, *Exacta*, São Paulo, v. 6, n.2, p. 229-235.
- [3] Pires, C. L., Nabeta, S. I., Cardoso, J. R., jan., fev. e mar. 2005, *Simulação de composição ferroviária accionada por motores de indução e inversores de tensão*, Revista Controle e Automação, v. 16, n. 1, p. 1-6.
- [4] Lozano, J. A., Félez, J., Sanz, J. D., Mera, J. M., 2012, *Railway Traction, Reliability and Safety in Railway*, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), InTech, Obtido em set. 2013 de: <http://www.intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/railway-traction>
- [5] Andrews, H. I., 1986, *Railway Traction – The Principles of Mechanical and Electrical Railway Traction*, Amsterdam: Elsevier.
- [6] Garreau, M., 1965, *La Traction Életrique*, Paris: Éditions Scientifiques Riber.
- [7] Dover, A. T., 1963, *Electric Traction*, London: Sir Isaac Pitman & Sons Ltd.
- [8] Gago, M. D., jun. 2007, *Diseño de un Simulador de Tren*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- [9] Lindgreen, E., Sorenson, S. C., 28 feb. 2005, *Driving Resistance from Railroad Trains*, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby.
- [10] Yepes, O. M., Díez, A. E., *Aplicativo para el dimensionamento de un sistema de tracción eléctrico*, Proyecto de Grado de O. M. Yepes, Universidad Pontificia Boliviraiana, Medellín.
- [11] Toledo, E., Polloni, E., Martins, W., Martins, R., 1987, *Tracção Eléctrica*, v. I e II, São Paulo: São Paulo e Livraria Nobel S. A.
- [12] Dias, Nuno, 2005, *Simulação de Veículos Ferroviários de Tração Elétrica*, Trabalho Final de Curso, D. E. E. A./I. S. E. L., Lisboa.
- [13] Railectrica. (2013) *Tractive Effort*. Obtido em set. 2013 de: <http://www.railectrica.com/traction-mechanics/tractive-effort/>
- [14] Chen, C. S., Chuang, H. J., Chen, J. L., 1999, *Analysis of Dynamic Load Behavior for Electrified Mass Rapid Transit Systems*, IEEE, p. 992-998.

- [15] Rajput, R. K., 2006, *Utilisation of Electrical Power including Electrical Drives and Electric Traction*, New Delhi: Laxmi Publications Ltd.
- [16] Williams, L. H., 1985, *Advanced Passenger Train - A Promise Unfulfilled*, Shepperton: Ian Allan.
- [17] Hoath, A., dec. 2005, *Mathematics and Railway Signalling*, Hoath Enterprises Limited, Manchester.
- [18] Lee, C. K., autumn 1997, *The Minimum Headway of a Rail Transit Line*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, v. 2, n. 1, p 313-323.
- [19] Jochim, H., Lademann, F., 2008, *Planung von Bahnanlagen. Grundlagen - Planung – Berechnun*, Munchen: Hanser Verlag.
- [20] Chang, C. S., Sim, S. S., jan. 1997, *Optimising train movements through cost control using genetic algoritms*, IEE Proc. Electr. Power Appl., v. 144, n.1
- [21] Banerjee, S., 27 jan. 2012, *Basics of Railway Signalling*, ed. 5, Somnath Banerjee, Brisbane.
- [22] Larminie, J., 2003, *Electric Vehicle Technology Explained*, Oxford: Oxford Brookes University.
- [23] Morais, V., Vieira, C., Abril de 2006, *MATLAB 7&6 Curso Completo*, Lisboa: FCA.