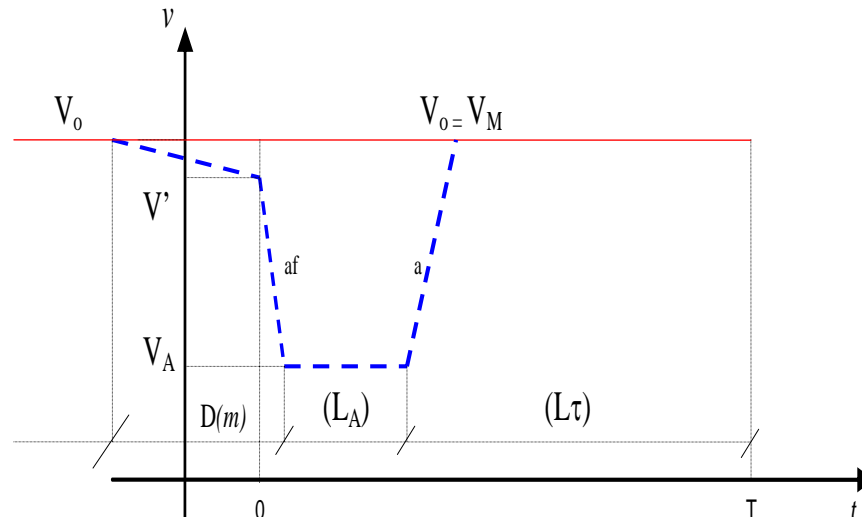




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Optimização da Afecção de Recursos à Produção de Serviços da CP Regional

CARLOS MANUEL TELES DE LEÃO MENDES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

(Documento Definitivo)

Orientador:

Doutor Gonçalo Xufre da Silva

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Doutor Nuno Alexandre Baltazar de Sousa Moreira

Doutor Gonçalo Xufre da Silva

Outubro de 2009

RESUMO

O investimento efectuado nas últimas décadas, em Portugal, nas infra-estruturas de transporte de longa duração, permitiu o desenvolvimento da rede rodoviária, quer em extensão quer em qualidade, enquanto pelo contrário, a Rede Ferroviária Nacional (RFN), entrou num processo contínuo de degradação, percebido pela redução das velocidades máximas permitidas e pelo elevado número e dispersão de limitações (reduções) de velocidade impostas na via-férrea.

Actualmente, um comboio ao circular na RFN, fica sujeito a variadíssimas reduções de velocidade, recorrendo obrigatoriamente à utilização do freio, com impacto na eficiência energética e na redução das velocidades comerciais. Estes factores, associados às baixas *performances* do material, nomeadamente o reduzido esforço acelerador, em particular no diesel, resulta no aumento dos tempos de percurso e na redução do conforto, factores que constituem, sem dúvida, as principais causas da perda de competitividade do sector ferroviário, tendo culminado na perda de 30% dos passageiros transportados, para o modo rodoviário, nas últimas duas décadas.

Constituiu o objectivo deste trabalho, criar um modelo dinâmico, que permita identificar os pontos críticos da RFN, medindo o impacto das reduções de velocidade nas circulações ferroviárias, em tempo perdido, em termos energéticos, ambientais e financeiros.

Os indicadores obtidos através da aplicação do modelo, são produzidos com auxílio do computador, identificando os pontos críticos da infra-estrutura e ordenando-os em função do impacto financeiro na oferta comercial da CP Regional. Este relatório, será efectuado com uma periodicidade concertada com a REFER e permitirá ao gestor da infra-estrutura, programar de forma objectiva as intervenções na RFN, eliminando os pontos críticos.

Contribui-se assim, para a melhoria da qualidade do serviço, para o aumento da competitividade e da sustentabilidade do sector ferroviário em Portugal.

Palavras Chave: Competitividade, Eficiência energética, Impacto financeiro, Limitação de velocidade, Melhoria da qualidade, Pontos críticos, Sustentabilidade, Velocidade comercial.

ABSTRACT

The investment done in Portugal, in the last twenty years, in long duration transport infrastructures, has allowed the development of roadway in length as well as in quality.

However, the railway network has started a cycle of continuous degradation, understood by the decrease of top velocity values and by several velocity limitations dispersed along the railway.

Nowadays, when a train runs in the Portuguese Railway Network, it is subjected to several velocity reductions, which makes the frequent use of the break mandatory. Since this situation occurs, it will have an impact in the energetic efficiency and in the decrease of the commercial velocity. These factors, associated to the performances of the units, for example the accelerator factor, particularly in diesel, results in the increase of the trips' duration and the decrease of the comfort, which are certainly the main causes of the decline in the capacity of the railway sector to compete with the road, having lost, in the last two decades, 30 % of the passengers in this kind of transport.

The purpose of this paperwork is to make a dynamic model which will permit identify the critical points of the railway network and measure the impact caused by the velocity reductions on the trains, on lost time, energetic efficiency, environmental and financial impact.

The indicators produced by the conceived model are to be reported in Excel tables and will be made to identify critical points of railway network, through a descendant order of the financial impact, in the commercial offer of CPRG. This report, will be made within a periodicity, accorded with the infrastructure manager, and will allow the program of an objective way of the intervention of PRN by eliminating the critical points, contributing to increase the competitiveness and sustainability of the railway sector in Portugal.

Keywords: Commercial velocity, Competitiveness, Critical points, Energetic efficiency, Financial impact, Quality improvement, Sustainability, Velocity reductions.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho, disponibilizando-se para a transmissão de conhecimentos e experiências que permitiram e incentivaram as ideias aqui expostas.

Gostaria, no entanto de apresentar alguns agradecimentos especiais.

Ao Sr. Eng.º José Carlos Lima, Director de Operações da CPRG, agradeço pela disponibilização de Bibliografia, pelo incentivo e apoio logístico que me permitiu disponibilizar algum tempo para a realização deste trabalho.

Ao Sr. Dr. Nuno Drago Cavaco, responsável pelo Controlo de Gestão da CPRG, pela colaboração dada na recolha de dados estatísticos e na utilização do Excel para construção da marcha tipo.

Ao Especialista Ferroviário Sr. Pedro Morgado, agradeço a contribuição preciosa dada na produção da plataforma informática, sem a qual não teria sido possível concluir este trabalho.

Ao Especialista Ferroviário Sr. Virgílio Aranha, agradeço a prestação dada diariamente no tratamento e organização da informação associada às Limitações de Velocidade.

À equipa das Operações da CPRG e colaboradores mais directos, agradeço a disponibilidade e a colaboração prestada, não podendo deixar de realçar a paciência que demonstraram para me aturarem nos meus momentos mais “stressados”.

À Maria José, pelo apoio dado na organização do trabalho.

Aos meus amigos e familiares, agradeço todo o apoio, paciência e compreensão demonstrada ao longo deste ano.

À Isabel, ao Nuno e ao Zé Pedro dedico este trabalho. Bem Hajam!

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
ÍNDICE	iv
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	vii
FICHAS UIC	ix
SITIOS ELECTRÓNICOS	x
LISTA DE SIGLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 – O TRANSPORTE FERROVIÁRIO	1
1.2 - MEDIDAS PARA REVITALIZAÇÃO DO CAMINHO-DE-FERRO	2
1.2.1- POLITICAS AMBIENTAIS	3
1.3 – OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	4
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
CAPÍTULO II	8
O SISTEMA FERROVIÁRIO PORTUGUÊS	8
2.1 – MODELO ORGANIZATIVO	9
2.2.1 - SINALIZAÇÃO	9
2.2.2 - CONTROLO AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE - CONVEL	10
2.2.3 - SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLO DA CIRCULAÇÃO	10
2.2.3.1 - CENTRO DE COMANDO DE OPERACIONAL	10
2.2.3.2 - RÁDIO SOLO COMBOIO	11
2.2.3.3 - SISTEMA DE COMANDO E CONTROLO ERMTS/ETCS	11
2.2.4 - GESTÃO OPERACIONAL DA INFRA-ESTRUTURA	11
2.2.4.1 - COMANDO DA CIRCULAÇÃO	11
2.2.5 – IMPACTO DOS INVESTIMENTOS EFECTUADOS NA RFN NAS ÚLTIMAS DÉCADAS	12
2.3 - CP REGIONAL	14
2.3.1. ACTIVIDADE	14
2.3.2 - ORÇAMENTOS DE EXPLORAÇÃO E DE INVESTIMENTOS	16
2.3.3 - DIRECÇÃO COMERCIAL	16
2.3.3.1 - GESTÕES DE LINHA	17
2.3.3 - DIRECÇÃO DE OPERAÇÕES	17
2.3.4.1 - CENTRO DE ACOMPANHAMENTO DE TRÁFEGO (CAT)	18
2.3.4.2 - PROGRAMAÇÃO DE MEIOS	18
2.3.4.3 - GESTÃO DE MEIOS	19
2.3.4.4 - PARQUE DE MATERIAL	19
2.3.4.5 - MONITORIZAÇÃO DO TRÁFEGO	20
2.3.4.5.1 - ÍNDICE DE PONTUALIDADE	21
2.3.4.5.2 - EFICIÊNCIA OPERACIONAL	21
2.3.4.5.3 - MARCHAS PROGRAMADAS E NÃO PROGRAMADAS	22
CAPÍTULO III	23
BASES DE CÁLCULO DA MARCHA TIPO DE UM COMBOIO	23

3.1 - INTRODUÇÃO	23
3.2 - CURVA DO ANDAMENTO DE UM COMBOIO	24
3.2.1 - VELOCIDADE FUNÇÃO DO PERCURSO:	24
3.3 - ELEMENTOS RELACIONADOS COM A VIA	25
3.3.1 - RESISTÊNCIA DEVIDO AO PERFIL LONGITUDINAL	25
3.3.2 – RESISTÊNCIA DEVIDO ÀS CURVAS	27
3.3.3 – PERFIL COMPENSADO	28
3.3.4 – LIMITE MÁXIMO DE VELOCIDADE DEVIDO À VIA	30
3.4 – ELEMENTOS RELACIONADOS COM O MATERIAL CIRCULANTE	30
3.4.1 – CARACTERÍSTICAS DOS ESFORÇOS DE TRACÇÃO ASSOCIADOS À MARCHA	30
3.4.1.1 – NOÇÃO DE ADERÊNCIA	30
3.4.1.2 – CONSTITUIÇÃO DA CURVA	32
3.4.1.3 – CURVA CARACTERÍSTICA DO ESFORÇO DE TRACÇÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE.	33
3.5 – EQUAÇÃO GERAL DO MOVIMENTO	36
3.5.1 – A RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	38
3.5.1.1 – PRINCÍPIOS PARA CONCEPÇÃO DAS EXPRESSÕES DA RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	40
3.5.1.1.1 – EXPRESSÕES DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES SUBURBANOS	41
3.5.1.1.2 – EXPRESSÕES DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO PARA AS AUTOMOTORAS DA CPRG	42
3.5.2 – INFLUÊNCIA DA MASSA INERCIAL NO ESFORÇO ACELERADOR	44
3.5.2.1 – COEFICIENTE DAS MASSAS ROTATIVAS - K	44
3.5.2.1.1 – COEFICIENTES DAS MASSAS ROTATIVAS PARA O MATERIAL DA CP REGIONAL	45
3.6 – CÁLCULO DA ACELERAÇÃO DE TRACÇÃO	46
3.7 – ACELERAÇÃO DE FRENAGEM	49
3.8 – TRAÇADO DA MARCHA-TIPO DE UM COMBOIO	54
3.8.1– MÉTODO ANALÍTICO	55
CAPÍTULO IV	57
CUSTO ASSOCIADO ÀS LIMITAÇÕES DE VELOCIDADE	57
4.1 - ENQUADRAMENTO	57
4.2- CALCULO DO ACRÉSCIMO DE ENERGIA ASSOCIADO A UM AFROUXAMENTO	59
4.2.1 – CÁLCULO DE LF.	60
4.2.2 – CONVERSÃO DE UNIDADES PARA OBTENÇÃO DO VALOR DA ENERGIA EM KWH	63
4.3 – AVALIAÇÃO DO VALOR DO ACRÉSCIMO DE ENERGIA	64
4.3.1 – 1º EXEMPLO: LINHA DO NORTE – SENTIDO DESCENDENTE ENTRE O PK 94 E O PK 90,75	64
4.3.2 – 2º EXEMPLO: LINHA DO NORTE - SENTIDO DESCENDENTE ENTRE PK 332,45 E PK 332,40	65
4.3.3 – RENDIMENTO DA TRACÇÃO ELÉCTRICA E DA TRACÇÃO TÉRMICA.	65
4.3.4 – VARIAÇÃO DO PARA UMA UTE 2240 COM LA CONSTANTE E VA VARIÁVEL	67
4.3.5 – VARIAÇÃO DO PARA UMA UTE 2240 COM VA CONSTANTE E LA VARIÁVEL	68
4.4- FACTOR DE CORRECÇÃO DEVIDO À MARCHA EM DERIVA	70
4.5 – SIMPLIFICAÇÃO DAS EXPRESSÕES	73
4.5.1 - FACTORES DE CORRECÇÃO	73
4.5.1.1 – LIMITAÇÕES DE VELOCIDADE (AFROUXAMENTOS)	73
4.5.1.1.1 – SÉRIE UTE 2240	73
4.5.1.1.2 – SÉRIE UTD 600	73

4.5.1.2 – PARAGENS	73
4.5.1.2.1 – SÉRIE UTE 2240	73
4.5.1.2.2 – SÉRIE UTD 600	73
4.6 – ESTRUTURA DE CUSTOS DE UMA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE	74
4.6.1 – CÁLCULO DO TEMPO EXTRA PRODUZIDO POR UMA LV	74
4.6.2 – CUSTO DA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL DURANTE O TEMPO DE DESACELERAÇÃO	74
4.6.3 - CUSTO DA TRIPULAÇÃO DO COMBOIO	75
4.6.4- CONVERSÃO DO CONSUMO EXTRA DE ENERGIA EM LITROS DE GASÓLEO	75
4.6.5 - CUSTO TOTAL DA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE – “AFROUXAMENTO”	76
4.6.5.1- CUSTO MÉDIO DA ENERGIA EXTRA CONSUMIDA NUMA LV - CI	76
4.6.5.2- CUSTO DA TRIPULAÇÃO DO COMBOIO E DO MATERIAL - CII	76
4.6.6 – CUSTO TOTAL RELATIVO A UMA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE (AFROUXAMENTO)	77
4.6.6.1 – MATERIAL ELÉCTRICO	77
4.6.6.2 – MATERIAL DIESEL	77
4.6.7 – CUSTO TOTAL RELATIVO A PARAGENS	77
4.6.7.1 – MATERIAL ELÉCTRICO	77
4.6.7.2 – MATERIAL DIESEL	77
 CAPÍTULO V	 78
OPTIMIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DA CP REGIONAL	78
5.1 – SISTEMA DE APOIO À DECISÃO	78
5.1.1 – BASE DE DADOS	78
5.1.2 - O INTERFACE	80
5.2 - ANÁLISE DOS INDICADORES	82
5.2.1 – VALORES MENSAIS	82
5.2.2 – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS	84
5.2.3 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DIÁRIO DAS LV 30 KM/H	85
5.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS	87
5.4 - A OPÇÃO CARRIL/ESTRADA	88
5.5 - A ELECTRIFICAÇÃO COMO SOLUÇÃO DE SUSTENTABILIDADE	88
5.4.1- ESFORÇO ACELERADOR, VELOCIDADE COMERCIAL E TEMPOS DE PERCURSO	92
5.4.1.1. A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NO CONSUMO	92
5.4.1.2 - CAPACIDADE DE ACELERAÇÃO E REDUÇÃO DOS TEMPOS DE PERCURSO	92
5.4.2 - PRESSUPOSTOS	96
5.4.2.1 - GERAIS	96
5.4.2.2 - CP REGIONAL	97
5.4.2.3 – CONCLUSÕES	97
 CAPÍTULO VI	 98
CONCLUSÕES	98
6.1 TRABALHOS A REALIZAR NO FUTURO	100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, Alberto García (2009), “Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diesel en el ferrocarril” – Anales de mecânica y electricidad, enero-febrero, 2009.
- ANDRÉ, José Maria C.S. (2008), “Transporte Interurbano em Portugal” - 2ª Edição, I.S.T. Press, Vol. I e II, Lisboa, Março de 2008.
- ARENILLAS, Justo; LOPEZ, J.L.Gomez (2007),”La Traccion en los Ferrocarrilles Españoles.La Traccion Diesel”- Edição Via Libré, FFE, 2007.
- BERNARD, M.,”La dynamic du movement des trains”- Division des études de traction electrique
- BOILEAU, Rober (1978),“Traction Électrique“ - Techniques de l’Ingénieur, Électrothechnique n° D810a, 1978.
- CABRITA, Carlos (1981), “A aderência nas unidades motoras em tracção ferroviária. Potência dos motores de tracção” – Revista Electricidade n°159, Janeiro de 1981, pp. 512-515.
- CASTRO, Francisco Almeida (1983), “Cadeia Produtiva e Fluxos Energéticos nos Transportes Terrestres”- Publicação n°22/83, CTAMFUTL, I.S.T., Lisboa, 1983.
- CASTRO, Francisco Almeida (1988a), “Energia e Transportes”- Curso Conservação da Energia nos Transportes, I.S.T., Lisboa, 1988.
- CASTRO, Francisco Almeida (1988b), “A Intensidade Energética nos Transportes Interiores”- Curso Conservação da Energia nos Transportes, I.S.T., Lisboa,1988.
- CONGRESSO NACIONAL DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO, 9, Lisboa, 2009 – “Integração e Competitividade de Transportes na Península Ibérica”: actas.
- CP: Comboios de Portugal, E.P.E., “Instrumentos Previsionais de Gestão”, 2009.
- CP: Caminhos de Ferro Portugueses, E.P.,” Engenharia e Tecnologia 2000-Visão CP ”, Julho 2001.
- FRANZ, Peter (2000), “O Transporte Ferroviário no sec.XXI”, in revista “Fer XXI”, 2000.
- GARREAU, Marcel (1965), “ La traction Électric” - Éditions Scientifiques Riber, Paris, 1965.

- GONÇALVES, Eduardo Ferrugento (1963), “A Potência de Transporte como Elemento Fundamental na Moderna Planificação Ferroviária” - Tese de Doutoramento apresentada ao I.S.T. da Universidade Técnica de Lisboa, 1963.
- GONÇALVES, Eduardo Ferrugento (1974), “Caminhos de Ferro”- Apontamentos da disciplina “Caminhos de Ferro”, Secção de folhas do I.S.T., Lisboa, 1974.
- GUEDES, Manuel Vaz (2005) “ Tracção eléctrica” – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- HENRIQUES, Nuno P. Ferreira (1991), “Simulação de sistemas de tracção eléctrica” - Dissertação de Mestrado, apresentada ao I.S.T. da Universidade Técnica de Lisboa, 1991.
- INE: Instituto Nacional de Estatística (2001) - Censos de 2001.
- JOLY, Roland (1991), “Dinâmica Ferroviária”- Curso de dinâmica ferroviária, CP, Lisboa, 1991.
- LOPEZ, J.L.Gomez (2006),”Diseño de la cadena de traccion diesel” - I jornadas de Eficiencia Energética en el Ferrocarriles (FFE), Madrid, 2006.
- MEAPAT: Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, “Portugal uma visão estratégica para vencer o século XXI” - Plano Nacional de desenvolvimento Económico e Social 2000-2006, Dezembro 1998.
- MOREIRA, Nuno Alexandre Baltazar Sousa (1999), “Um Sistema de Apoio à Decisão para a Elaboração de Programas de Exploração em Redes Ferroviárias” - Tese de Doutoramento apresentada ao I.S.T. da Universidade Técnica de Lisboa, 1999.
- NOUVION, F. ; BERNARD, M. (1961), “Connaissances nouvelles sur l’adhérence“ - Revue Générale des Chemins de Fer – Mars 1961.
- OECD : Organizacion For Economic Co-operation And Development (2000), “Rail Passanger Transport on National Networks”- Statistics, 2000.
- OLEA, F.J. Unamuno (2008), “Rendimentos de la Traccion Eléctrica”, 2008.
- PINA, Filipe Gomes (2006), “Vias de Ferro a Infra-estrutura Ferroviária Portuguesa” - Edição Refer, EP, Lisboa , Outubro de 2006.
- PROVOOST, Marc; COURTOIS, Christian (1998), “Traction électrique ferroviaire-Dynamique ferroviaire et sous-stations“ - Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique nº D 5501, Mai 1998.

- RIVES, Fernando; MENDEZ, Manuel; PUENTE, Manuel (1983), “Tratado de Explotation de Ferrocarriles-Planification”- Vol.I, Editorial Rueda, Madrid, 1983.
- REVUE GENERALE DÊS CHEMINS DE FER – 4, 1976.
- REVUE GENERALE DÊS CHEMINS DE FER – 1, 1982.
- TOLEDO,E [et al] (1987), - “Tracção Eléctrica”- Siemens S.A. São Paulo e Livraria Nobel S.A., Vol. I e II, São Paulo, 1987.

FICHAS UIC

- [UIC544-1] - UIC, ficha nº 544-1, “Freins - Performance de freinage”, 4ª edição UIC, Outubro de 2004.
- [UIC614] - UIC, ficha nº 614, “Définition de la puissance dès locomotives et automotrices eléctric”, 3ª edição UIC, Julho, 1990.
- [UIC615.0] - UIC, ficha nº 615-0, “Engins moteurs – Bogies et organes de roulement - Dispositions générales”, 2ª edição UIC, Janeiro, 2003.
- [UIC615-1] - UIC, ficha nº 615-1, “Engins moteurs – Bogies et organes de roulement - Dispositions générales applicable aux organes constitutifs”, 2ª edição UIC, Fevereiro, 2003.
- [UIC615-4] - UIC, ficha nº 615-4, ”Engins moteurs – Bogies et organes de roulement - Essais de résistance des structures de chassis”, 2ª edição UIC, Fevereiro, 2003.

SITIOS ELECTRÓNICOS

- www.apambiente.pt
- www.europa.int
- www.fe.up.pt
- www.google.pt
- www.ine.pt
- www.ist.utl.pt
- www.portugal.gov.pt
- www.povt.qren.pt
- www.railjournal.com
- www.renfe.es
- www.sncf.com
- www.techniques-ingenieur.fr

LISTA DE SIGLAS

a – Aceleração de tracção

a_f – Aceleração de frenagem

AP – Alfa Pendular

CAT – Centro de Acompanhamento de Tráfego da CP Regional

CCO – Centro de Comando Operacional

CK – Comboio quilómetro

CMM – Custo minuto do material

CMT – Custo minuto da tripulação do comboio

CP – Comboios de Portugal, EPE

CPRF – CP Frota

CPLC – Unidade de Negócios CP Longo Curso

CPRG – Unidade de Negócios CP Regional

CVL – Controlo automático de velocidade (Convel)

DR – Depósito de Revisão

DT – Depósito de Tracção

DW – Data Warehouse

EMEF – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário, S.A.

ERTMS – European Railway Train Management System

ETCS – European Train Control System

EU – União Europeia

GEE – Gases com efeito de estufa

GL – Gestão de Linha

GSM-R – Global System Mobile Railway

IC – Inter-Cidades

IMTT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I.P

INE – Instituto Nacional de Estatística

Ip – Índice de Pontualidade

Ir – Índice de Regularidade

IR – Inter-regional

LA – Extensão do afrouxamento

MC – Material Circulante

ODS – Operational Data Store

OE – Orçamento de Exploração

OI – Orçamento de Investimentos

OPRG – Operações da CP Regional

P/C° - Passageiros por comboio

PCT – Posto de Comando de Tráfego

P's – Passageiros

PK – Passageiros quilómetro

PN – Passagem de Nível

PRN – Portuguese Railway Network

REFER – Rede Ferroviária Nacional, EPE

RES – Regime de Exploração Simplificado

RFN – Rede Ferroviária Nacional

RG – Regional

RSC – Rádio Solo Comboio

SAD – Sistema de Apoio à Decisão

SMS – Serviço de Mensagens Curtas

SNCF – Société National des Chemins de fer

TkBr – Toneladas quilómetro brutas rebocadas

TGV – Train à grande vitesse

TVM – Tabela de Velocidades Máximas

UDD – Unidade Dupla Diesel

UIC – União Internacional dos Caminhos-de-ferro

UN – Unidade de Negócio

UTD – Unidade Tripla Diesel

UTE – Unidade Tripla Eléctrica

V_A – Velocidade do afrouxamento

V_C – Velocidade comercial

V_M – Velocidade máxima

V_0 – Velocidade de marcha do comboio

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 – Extensão da RFN e das congéneres europeias	9
2.2 – Actual modelo organizativo da CP REGIONAL	15
2.3 – Características do parque de material motor da CPRG	20
2.4 – Evolução do Índice de Pontualidade em 2009 face a 2008 e à meta traçada	21
2.5 – Marchas Programadas e Não Programadas	22
3.1 - Representação gráfica da variação do valor da velocidade ao longo de um percurso	24
3.2 – Resistência ao movimento devido à inclinação da via.	26
3.3 – Perfil compensado	28
3.4 – Valores do perfil compensado (a vermelho) no troço Porto SB/Porto C	29
3.5 – Curva de Tracção	34
3.6 – Curva de tracção conforme a tipologia do serviço executado	35
3.7 - Resistência ao avanço	43
3.8 – Variação da aceleração de tracção em função da velocidade e do gradiente da via (rampa) no valor da aceleração e da velocidade máxima – UTE 2240	48
3.9 – Influência das rampas ($i>0$) no valor da velocidade máxima –UDD 450	48
3.10 – Registo taquimétrico relativo à paragem da UTE 2242	50
3.11 – Registo taquimétrico relativo à paragem da UDD 462	51
3.12 – Espaço percorrido por uma UTE 2240 até parar, em função da velocidade e do tipo de freio	53
3.13 – O gráfico a) , exemplifica como se processa o cálculo da aceleração para uma dada velocidade instantânea. O gráfico b) , utiliza a integração feita em a) e exemplifica o modo de localização do veículo, para uma dada velocidade	55
3.14 – Exemplo de marcha tipo de um comboio regional, a circular entre as estações de Livração e Marco de Canavezes, na Linha do Douro, sentido ascendente	56
4.1 – Diagrama cinemático do movimento	60
4.2 – Acréscimo de energia em função da severidade da restrição da velocidade	67
4.3 – Acréscimo de energia em função da extensão do afrouxamento	69
4.4 – Efeito da marcha à deriva na abordagem a um afrouxamento	70
4.5 – Extensão percorrida em marcha à deriva na abordagem a uma Lv	71
5.1 – Resumo do relatório diário fornecido pela REFER	79
5.2 – Excerto do relatório já tratado para aplicação do algoritmo	79
5.3 – Esquema da relação entre Tabelas e Menu das consultas disponíveis	80

5.4 – Relatório obtido na consulta “Comboios afectados por afrouxamentos”	81
5.5 – Impacto financeiro e em tempo perdido das <i>Lv</i> por linha	84
5.6 – Evolução do número médio diário de <i>Lv</i> por linha, sentido e extensão	87
5.7 - Comparação do esforço acelerador das UTE 2240 com o das automotoras Diesel, para um perfil em patamar e alinhamento recto	93
5.8 – Variação da velocidade em função do perfil da via - UDD 450 vs UTE 2240	94
5.9 – Energia consumida – Tracção térmica vs Tracção eléctrica	94
5.10 – Efeito de uma rampa de 10 mm/m nos valores da aceleração	95

ÍNDICE DE TABELAS

2.1 – Evolução dos tempos médios de percurso nos principais eixos Regionais	13
3.1 - Parâmetros do material utilizados no cálculo da resistência ao avanço	42
3.2 – Expressões da resistência específica ao avanço para cada série de material	43
3.3 - Valores da aceleração em função da velocidade relativos à série UTE 2240	47
3.4 – Valores da frenagem de emergência e de serviço para o material de VL da CPRG	51
3.5 – Peso relativo do freio electrodinâmico face ao valor do freio conjugado em função da velocidade do comboio	52
4.1 – Acréscimo de energia em função da velocidade de Afrouxamento	67
4.2 - Valor da aceleração de frenagem em marcha à deriva, em patamar e velocidade inicial de 80 km/h, para as automotoras de via larga do parque da CPRG.	72
5.1 – Impacto médio mensal dos afrouxamentos na oferta da CPRG por Linha	82
5.2 – Valores médios diários, para o período Fevereiro-Outubro de 2009	85
5.3 – Impacto médio mensal das $L_v \leq 30$ km/h entre Fevereiro-Outubro de 2009	86
5.4 – Ranking das 20 L_v activas com maior impacto na oferta da CPRG, actualizado a 22-08-09	87

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – O TRANSPORTE FERROVIÁRIO

O Sector dos Transportes, para além de desempenhar um papel decisivo para a economia, contribui também, para a coesão e bem-estar social, ao assegurar a mobilidade das pessoas e bens, numa sociedade cada vez mais global.

Este sector tem sofrido diversas alterações nas últimas décadas, não só pela liberalização dos transportes rodoviários e ferroviários, como pela evolução tecnológica a que se tem assistido, quer ainda pelo grau de exigência de qualidade que a população em geral e os clientes em particular têm vindo a reclamar junto dos vários operadores de transporte.

Nos últimos dez anos, o montante de investimento realizado nos transportes públicos em Portugal (no conjunto da ferrovia e da JAE/IEP) superou os 17,4 mil milhões de euros, grande parte do qual de natureza infraestrutural de longa duração (Anexo I-1).

A indústria de transportes tem sofrido um aumento gradual do preço médio de produção, para o qual tem contribuído de forma notória, o aumento do custo dos combustíveis e do material.

O Transporte Ferroviário, constitui um segmento importante do Sistema de Transportes Europeu e Nacional, assumindo particular relevância como factor de inclusão social e de desenvolvimento socio-económico, através do serviço público que presta, ao assegurar a mobilidade das populações dentro do Território Nacional, para e entre os Centros Urbanos, com uma frequência adequada às necessidades quotidianas, mesmo em zonas periféricas, onde, por vezes, não existem modos de transporte alternativos, permitindo também a deslocação de Pessoas de Mobilidade Condicionada.

É um meio de transporte que se justifica, por apresentar importantes vantagens, com reflexo na intensidade energética (Castro, 1988a), nomeadamente:

- O rolamento roda-carril, gerador de insignificantes coeficientes de atrito;
- A constituição de comboios mais ou menos longos, dependendo praticamente da penetração do primeiro veículo;
- A coexistência de grandes massas com fracas resistências ao avanço, permitindo boa recuperação da energia cinética armazenada no arranque e descidas;

- O carácter programado (em via própria) permitindo a total eliminação de perturbações exógenas ao sistema.

Assim sendo, o Caminho-de-ferro não terá mais que jogar os seus trunfos naturais, para se constituir num poderoso instrumento de política energética na área dos transportes (Castro, 1988a).

No entanto há em Portugal, importantes factores adversos que limitam e mesmo impedem, a exploração plena destas vantagens, dos quais se destacam:

- Considerável número de restrições de velocidade bastante penalizantes, através da multiplicação de frenagens e acelerações;
- Extensos trajectos em via única, alguns deles suportando apreciáveis intensidades de tráfego, daqui resultando frequentes perturbações que afectam a pontualidade dos comboios, sem que o sistema de sinalização e comando existente, dado o seu obsolescência, consiga atenuar este grave constrangimento;
- Sinuosidade excessiva de muitos traçados, que conservam a sua geometria primitiva, com particular enfoque nas linhas onde seria fundamental praticar velocidades mais elevadas. Nestes eixos, estas obtêm-se à custa de desgastantes e incómodas sucessões de frenagens e acelerações, obtendo-se velocidades comerciais muito modestas.

Neste cenário, há que alertar o Operador, CP- Comboios de Portugal, EPE, o gestor da Rede Ferroviária Nacional - Refer, a entidade Reguladora – Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I.P. (IMTT) e a Tutela, para a **Qualidade Oferecida pela Infra-Estrutura Ferroviária Portuguesa**, que vem sendo reduzida paulatinamente, através de um processo de degradação continua, com reflexo na redução da capacidade da infra-estrutura, no aumento dos tempos de percurso, na diminuição do Índice de Pontualidade dos comboios, no aumento dos custos de produção e na insatisfação dos clientes; afectando de forma notória a **Sustentabilidade do Transporte Ferroviário**.

1.2 - MEDIDAS PARA REVITALIZAÇÃO DO CAMINHO-DE-FERRO

Apesar de todas as medidas que têm vindo a ser tomadas e do esforço das companhias em aplicar essas medidas, nos últimos anos, a quota de passageiros transportados na ferrovia continua em declínio. Na década 90, o número de passageiros-quilómetro baixou 32,3% na RFN (OECD, 2000), enquanto que a venda de automóveis ligeiros de passageiros teve um

incremento de 18% entre 1996-2000¹. Na EU-25 em 2004, o modo ferroviário transportou cerca de 5,8% da população² e actualmente em Portugal a quota de mercado representa cerca de 3% (INE, 2001).

Um dos factores que mais contribui para a ineficiência e baixos níveis de qualidade do modo ferroviário, é a falta de integração entre as redes dos vários estados, que se traduz na incapacidade de oferecer serviços internacionais com qualidade. A falta de integração é um problema histórico que foi herdado dos sistemas de segurança dos próprios países.

Para além das barreiras técnicas, que terão de ser ultrapassadas para integrar as várias redes, existem ainda, as questões financeiras associadas, onde a integração das várias sinalizações, assume o maior peso. A remoção dos obstáculos indicados é complexa, estrutural e envolve financiamentos avultados, razão pela qual, a vontade e a intervenção política, assumem um papel fundamental e sem as quais, não será possível reabilitar o transporte ferroviário.

A União Europeia (U.E.) definiu em Janeiro de 2002, o objectivo de construir o espaço Ferroviário Europeu, visando a reabilitação deste modo de transporte e a redução do congestionamento rodoviário. O desenvolvimento da Rede TEN-T Trans European Network Transport, que numa primeira fase foi restrita à alta velocidade, constitui o primeiro passo para a integração do transporte ferroviário na Europa.

Para que as diversas redes ferroviárias nacionais aproveitem os benefícios das medidas tomadas pela União Europeia é exigida uma nova postura no mercado, tornando-se comercialmente mais agressivas, mais produtivas e ganhando massa crítica de modo a diluírem os fortes investimentos necessários para uma operação fiável, segura e integrada.

1.2.1 - POLITICAS AMBIENTAIS

Nas últimas décadas, a União Europeia concentrou as suas políticas de transportes ambientais, sobretudo no investimento em redes transeuropeias de transportes, como em regulamentações dirigidas para o ambiente e para a segurança.

Na UE, o sector dos transportes é responsável por 28% das emissões de dióxido de carbono, o principal gás causador do efeito de estufa, sendo a maior parte dessa fatia (84%), resultante dos veículos rodoviários e 13% das aeronaves.

¹ Para o ano 2000 foram utilizadas Estatísticas dos Transportes e Comunicações – 2000, quadro III-3, p.58.

² Eurostat 2004

Referem-se algumas acções que a U.E considera de desenvolvimento prioritário para a preservação do ambiente no âmbito do sector dos transportes:

- Promoção da utilização dos transportes públicos em vez dos veículos particulares;
- Utilização de energias alternativas, com a substituição no transporte rodoviário até 2020, de 20% dos combustíveis clássicos por combustíveis de fontes renováveis;
- Adopção de medidas de restrição à circulação nos centros urbanos;
- Promoção da intermodalidade e da transferência modal.

Ao nível Nacional, destacam-se como medidas de referência no sector dos transportes:

- A expansão da rede do metro de Lisboa e a construção dos metros do Porto e Sul do Tejo, visando a potencial redução da circulação das viaturas particulares;
- Regulamento de gestão de energia no sector dos transportes;
- Reestruturação da oferta da CP no que concerne ao transporte de mercadorias.
- Aumento da eficiência energética no novo parque automóvel;

1.3 – OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

A ideia da realização do presente trabalho, foi concebida, partindo de uma análise crítica desenvolvida em torno de um estudo efectuado no final da década de 70 início da de 80, pelo Eng.º João Sousa Jardim, que pretendia valorizar o tempo gasto pelos comboios em função das limitações de velocidade (afrouxamentos) e das paragens forçadas na RFN.

Neste âmbito, conduzimos a nosso trabalho no universo da **“Dinâmica do transporte ferroviário”** e, sustentados na equação diferencial do movimento de um comboio, nas características técnicas intrínsecas do material e da infra-estrutura ferroviária, concebemos um modelo para cada uma das séries de material do parque da CP Regional. Este modelo, na sequência da frenagem forçada de um comboio, quando sujeito a uma **“limitação de velocidade”** (L_v), na Rede Ferroviária Nacional (RFN), possibilitará a medição da quantidade de **energia degradada** (Δkwh), resultante da variação da **energia cinética** e da variação do **trabalho** necessário efectuar, para que o comboio, após ultrapassar a zona de afrouxamento, acelere até atingir a velocidade máxima permitida, a mais restritiva, imposta pela via ou pelo material.

Para que o modelo concebido produza os resultados desejados, é obrigatório conhecer todas as L_v existentes na RFN e o seu período de actividade, informação fornecida diariamente

pela Refer. Será também necessário conhecer a velocidade de um dado comboio, em qualquer ponto da RFN, objectivo que será atingido, através da construção em ambiente Excel, de uma “*marcha tipo*” para cada tipo de comboio e material utilizado, nomeadamente Regional (RG) e Inter Regional (IR), em cada uma das linhas ferroviárias. De acordo com o conceito de **Sistema de Apoio à Decisão** (SAD), foram criadas rotinas em ambiente Access, que utilizam os modelos concebidos, no processamento dos dados obtidos, permitindo avaliar o impacto energético (*Kwh*), ambiental (*KgCO₂e*) das *Lv*.

No entanto, é também necessário medir o acréscimo de tempo (minutos) gasto em cada *Lv*, indicador que associado ao custo do material e das tripulações, permitirá calcular o **custo total da *Lv***, em função do comboio. Os resultados assim obtidos, dão-nos indicação dos ***pontos críticos*** existentes em cada uma das linhas-férreas da RFN.

Este trabalho, foi desenvolvido no universo da CP-Regional (CPRG), mas facilmente poderá ser alargado às restantes Unidades de Negócio de Passageiros e de Mercadorias, tendo como principal objectivo o ***desenvolvimento de um modelo dinâmico***, que permita actualizar diariamente, o *Ranking* dos pontos críticos activos na RFN, dando *feedback* ao gestor da infra-estrutura (REFER).

Este modelo, contribuirá para a produção de ***soluções auxiliares*** ao ***investimento*** estratégico, bem como, para a semi-estruturação da ***intervenção*** e da manutenção da **RFN**, que resulte na eliminação dos constrangimentos críticos, impostos às circulações ferroviárias. Pretende-se contribuir também, para melhorar a eficiência energética, reduzir os custos da produção, proteger o ambiente e otimizar a gestão dos recursos operacionais, para além de melhorar o Índice de Pontualidade (*Ip*) e as Velocidades Comerciais (*Vc*), vectores com grande impacto no número de passageiros transportados e simultaneamente medir o Impacto Financeiro, que constituirá um argumento fundamental, para viabilizar o investimento na infra-estrutura, condição necessária para gerar um impulso de melhoria no transporte ferroviário em Portugal.

Constitui um outro objectivo deste trabalho, produzir soluções que aumentem a sustentabilidade da exploração ferroviária, neste contexto, será efectuada a análise do impacto da electrificação de uma linha, nos custos de produção, nos tempos de percurso e na captação de novos clientes, tendo como base, a substituição do material diesel actualmente em actividade, por material eléctrico do parque de material da CP Regional.

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, com início na actual introdução e terminando com as conclusões extraídas do estudo e as recomendações daí resultantes.

A estrutura foi definida de modo a que, naturalmente, o leitor pudesse acompanhar o raciocínio desenvolvido, para atingir o resultado expresso no último capítulo.

Capítulo I - Introdução: neste capítulo foram referidos os objectivos e a estrutura da dissertação. Fez-se uma síntese da evolução da quota de mercado verificada no modo ferroviário nas últimas décadas. É enfatizado a falta de integração das redes europeias e as medidas comunitárias para criar condições de interoperabilidade. Por último é feita uma alusão às políticas ambientais, premissas que poderão impulsionar a utilização e desenvolvimento dos transportes públicos, nomeadamente o ferroviário.

Capítulo II - O Sistema Ferroviário Português: neste capítulo, começamos por nos referir ao modelo organizativo do sistema ferroviário Português e num segundo ponto de forma sucinta à infra-estrutura ferroviária. Foram identificados os principais projectos de modernização efectuados na RFN, nas últimas décadas, descrição seguida de uma análise à evolução dos tempos de percurso praticados nos principais eixos durante esse período de tempo, de modo a perceber o impacto do investimento realizado.

O terceiro ponto, identifica o modelo organizativo e detalha a estrutura produtiva da CP Regional (CPRG), Unidade de Negócios (UN) da CP e universo onde foi desenvolvido o presente trabalho. É dado destaque aos Indicadores de Gestão produzidos, que constituem o barómetro da qualidade do processo produtivo e são uma referência na identificação dos desvios ao programado, como são o I_p , os Comboios-quilómetro ($Ck's$), o consumo de energia e a fiabilidade do material.

Capítulo III - Bases de Cálculo da Marcha Tipo de um Comboio: neste sector, iniciámos o estudo em torno da Dinâmica do Transporte Ferroviário, identificando os princípios básicos, para o cálculo da marcha tipo de um comboio, destacando a influência do material e das condições oferecidas pela infra-estrutura.

É caracterizada a curva característica do esforço de tracção em função da velocidade e dada a noção de aderência, esforço máximo no arranque, regime contínuo e velocidade máxima.

Analisa-se com detalhe, a equação diferencial do movimento do comboio, dando particular relevo à resistência ao avanço, destacando o perfil aerodinâmico e os esforços a que um

comboio está sujeito no seu movimento sobre os carris. Foram igualmente desenvolvidas as bases teóricas e empíricas para concepção das expressões da resistência ao avanço, para os veículos automotores do serviço Regional.

Foi calculada a aceleração de tracção para cada uma das séries de material em função do esforço de tracção, desenvolveu-se o conceito de esforço acelerador e avaliou-se a influência da massa inercial. Foi desenvolvida a metodologia de cálculo do valor da aceleração de frenagem utilizando o freio de serviço, tendo como referência o valor da aceleração de frenagem utilizando o freio de emergência.

São apresentadas algumas noções teóricas complementares, para aplicação do método analítico, no traçado da marcha tipo de um comboio, que utilizámos na prática.

Capítulo IV - Custo associado às Limitações de Velocidade: Neste capítulo, foi definida a metodologia de concepção dos modelos, que nos permitiram quantificar, a energia degradada em função das características de cada limitação de velocidade, ou paragem, impostas na RFN. Foi definida a estrutura de custos, relativa às L_v , permitindo medir o impacto financeiro em cada linha.

Foi analisada a influência da condução (marcha à deriva) na redução da quantidade de energia perdida, associada à frenagem do comboio na aproximação a uma L_v , tendo sido definido um factor de correcção.

Capítulo V - Optimização dos Serviços da CPRG: Neste capítulo, é referido o conceito de SAD, sistema que estruturou o processo de recolha, organização, tratamento e processamento da informação relativa às L_v . Neste referencial, foi concebido uma interface em Access, utilizando os modelos produzidos e que, através de rotinas estabelecidas, permite identificar e organizar em função do impacto financeiro, os pontos críticos activos na RFN, informação que será divulgada junto da Refer, potenciando a sua eliminação.

Foi feita a análise comparativa das performances do material diesel e eléctrico, em função da velocidade e do perfil da via, que culminou com o estudo do impacto da electrificação da Linha do Oeste, eixo de intensidade de tráfego elevada, no âmbito Regional.

Capítulo VI - Conclusões: Neste capítulo analisamos os resultados obtidos e fazemos algumas recomendações para melhorar a qualidade e as condições de sustentabilidade, do transporte ferroviário em Portugal.

CAPÍTULO II

O SISTEMA FERROVIÁRIO PORTUGUÊS

2.1 – MODELO ORGANIZATIVO

O Sistema Ferroviário Português, assenta num modelo com três Entidades, nomeadamente, o Organismo Regulador, o Gestor da infra-estrutura e os Operadores de Transportes:

A Entidade reguladora do sector, Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I.P. – IMTT, foi criada pelo D.L. nº 147/2007, tendo assumido as atribuições de vários organismos extintos (entre eles o Instituto Nacional do Transporte Ferroviário – INTF) relacionados com actividades de transporte terrestre de passageiros, de mercadorias e outros complementares como veículos e infra-estruturas ferroviárias. Integra uma Unidade de Regulação Ferroviária, dotada de autonomia funcional e competências em matéria de regulação económica e técnica. O IMTT, tem como missão, regular, fiscalizar e exercer funções de coordenação e planeamento do sector dos transportes terrestres. É também responsável pela supervisão e regulamentação das actividades deste sector, competindo-lhe a promoção da segurança, da qualidade e dos direitos dos utilizadores dos serviços de transportes terrestres.

A Entidade gestora da infra-estrutura (Refer) foi criada pelo DL nº 104/97 e tem como missão, proporcionar ao mercado uma infra-estrutura de transporte competitiva, gerindo e desenvolvendo uma rede ferroviária eficiente e segura, no respeito ao meio ambiente.

Tem por objectivo principal a prestação de serviço público de gestão de infra-estrutura que integra a RFN, incidindo fundamentalmente nas actividades de gestão de capacidade, da gestão dos sistemas de regulação e segurança da circulação, de manutenção e preservação do património. Complementarmente, constitui também atribuição da Refer a construção, instalação, renovação e manutenção das infra-estruturas ferroviárias.

Ao nível da Operação, coexistem actualmente alguns operadores privados, designadamente a Fertagus no transporte de passageiros, a Takargo e a partir de Agosto de 2009 a CP-Carga, S.A. no transporte de mercadorias, com o Operador de Transporte Público (CP - Comboios de Portugal, E.P.E.).

A CP tem a função de garantir os serviços de transporte de passageiros e mercadorias, devendo promover a sua reorganização de modo a tornar-se numa empresa virada para o

mercado, com uma cultura orientada para o Cliente e amiga do ambiente, constituindo unidades de negócio (UN) organizadas em função dos diferentes segmentos de mercado onde actuam: CP-Porto, CP-Lisboa, CP- Longo Curso, CP-Regional.

2.2 - A INFRA-ESTRUTURA FERROVIÁRIA

A Rede Ferroviária Nacional (RFN), integra 23 Linhas e 7 Ramais numa extensão total de 2841,588 km de via, de que se destacam dois tipos de bitola, designadamente, 2649,788 km com bitola Ibérica (1668 mm), designada por via larga, dos quais 2234,27 km (78,6%) são de via única e ainda 191,8 km com bitola métrica (1000 mm), designada por via estreita.

Na RFN, encontram-se electrificados apenas 1460 km (51%), que se encontram equipados na totalidade com Convel e Rádio Solo Comboio (Anexo III-1).

Na figura 2.1, podemos observar a extensão da RFN comparativamente com as extensões das principais redes ferroviárias europeias.

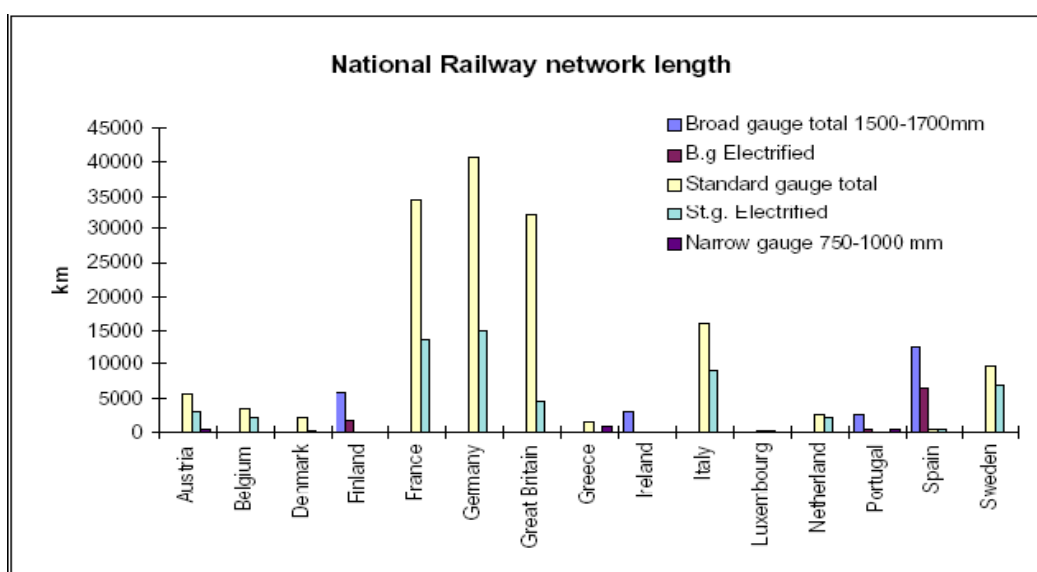


Figura 2.1 - Extensão da RFN e das congéneres europeias.

2.2.1 - SINALIZAÇÃO

Os sistemas de sinalização, têm como objectivo, garantir as condições necessárias para a segurança da movimentação de comboios ao longo da RFN, quer nas estações quer nos troços de plena via entre estações. Estas condições de segurança são implementadas através

de encravamentos, que estabelecem as condições a respeitar em relação aos elementos do terreno: Sinais, agulhas, equipamentos de detecção de comboios.

2.2.2 - CONTROLO AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE - CONVEL

Este sistema tem como objectivo impedir que a velocidade dos comboios, ultrapasse os valores impostos pelas condições de segurança. Tem uma componente fixa no terreno (balizas) instaladas no eixo da via, que recolhem a informação da sinalização lateral, das restrições de velocidade, distâncias e declives; e transmitem essa informação para uma componente embarcada a bordo das unidades motoras/automotoras, quando o móvel passa sobre as respectivas balizas (Pina, 2006).

As informações fixas residem nas balizas, enquanto que as informações de carácter variável, respeitantes aos aspectos dos sinais, são obtidas dos sinais luminosos de circulação e transmitidos às balizas por equipamentos chamados codificadores. Todas estas informações, são tratadas a bordo em conjunto com os dados próprios do comboio (velocidade máxima, velocidade real, aceleração de frenagem) e permitem a supervisão da marcha do comboio, informando o maquinista sobre as velocidades a cumprir, através da emissão de avisos ou comandando automaticamente a frenagem do comboio, quando a segurança o exija. O sistema CONVEL (CVL), equipa actualmente todas as linhas cujas instalações estão dotadas de sistemas de sinalização a relés e sinalização electrónica.

2.2.3 - SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLO DA CIRCULAÇÃO

2.2.3.1 - Centro de Comando de Operacional

Os Centros de Comando Operacionais (CCO) foram criados com o objectivo de otimizar a exploração da RFN, de modo a melhorar a performance da infra-estrutura, através da intervenção nos diversos sistemas de Gestão Operacional, concentrados nas suas instalações – Centros de Comando – onde se concentram todas as informações necessárias à gestão do tráfego, acumulando as funções operativas de: Comando de Tráfego Centralizado, Regulação, Supervisão da Circulação, Telecomando da Catenária, Sistema de Videovigilância, Função Infra-estrutura e Função Telecomunicações.

A extensão de rede controlada/comandada pelos CCO é respectivamente 664 km (23,4%) através do Centro de Comando de Contumil; 1350 km (47,5%) através do Centro de

Comando de Lisboa (Braço de Prata) e 828,4 km (29,5%) através do futuro Centro de Comando de Setúbal (Anexo III-3).

2.2.3.2 - Rádio Solo Comboio

O Rádio Solo Comboio (RSC), é um sistema analógico com capacidade de transmissão de dados de baixo débito, permitindo o envio/recepção de mensagens curtas e tem por objectivo assegurar as comunicações de fonia entre cada Posto de Comando de Circulação e os maquinistas, para efeitos de gestão da circulação e a recolha de informação do Convel.

2.2.3.3 – Sistema de Comando e Controlo ERMTS/ETCS

Este novo sistema irá substituir os actuais 13 sistemas de comando e controlo que coexistem na Europa, permitindo a interoperabilidade. Será suportado pelo GSM-R, novo sistema europeu de telecomunicações digitais, específico para aplicações ferroviárias. Este sistema irá garantir um espaçamento mínimo de 3 minutos entre comboios consecutivos.

2.2.4 - GESTÃO OPERACIONAL DA INFRA-ESTRUTURA

2.2.4.1 - Comando da Circulação

Coexistem actualmente quatro sistemas de exploração ferroviária: Cantonamento Telefónico, RES e Cantonamento Automático sem e com Bloco Orientável. Este último tem vindo a impor-se aos demais sistemas no contexto do sistema ferroviário convencional, uma vez que é o método de exploração mais evoluído, quer em termos de comando e controlo da circulação, quer ao nível da garantia da segurança (Pina, 2008).

Cantonamento – tem por objectivo garantir a segurança da circulação num troço de via, definido um espaçamento, delimitado por estações ou sinais (cantão), entre os quais só pode circular, em condições normais, um comboio.

Cantonamento Telefónico – A segurança da circulação num determinado cantão, é garantida através das comunicações telefónicas. Neste caso, o cantão é delimitado por duas estações e respectiva sinalização, que têm de estar obrigatoriamente guarnecidas por pessoal, que estabelecerá a autorização de circulação às composições. As estações podem não ser colaterais e as estações intermédias de paragem estando em eclipse (desguarnecidas) não poderão interferir na circulação.

RES – Regime de Exploração Simplificado, utiliza também as comunicações telefónicas. A autorização de circulação é dada pelo Chefe de Linha (localizado na sede da linha e só esta

estação necessita estar guarnecida) à tripulação do comboio (Chefe de Comboio), que recorrendo aos meios telefónicos instalados nas estações ou no material, recebe a autorização de avanço entre estas. Este sistema de exploração é utilizado nas vias estreitas e Ramal da Lousã, numa extensão de 316 km.

Cantonamento Automático sem Bloco Orientável – As linhas estão divididas em troços/cantões, que são obrigatoriamente antecidos por sinais que os protegem, dando indicações ao maquinista, de cantão livre ou condicionado, através de aspectos luminosos. Estes sinais são comandados pelo próprio comboio, que à sua passagem, activa de modo contínuo, indicando via livre ou condicionada aos cantões percorridos. Tem alguns condicionalismos na circulação em contra via, onde é necessário suspender o cantonamento automático e estabelecer o telefónico. Tem vindo a ser substituído pelo Cantonamento Automático com Bloco Orientável, encontrando-se em apenas 121,6 km da RFN.

Cantonamento Automático com Bloco Orientável – difere do anterior pela existência de sinalização automática de contra via, funcionalidade que começou a ser implementada nos anos 90, sendo instalado em primeiro lugar na Linha da Beira Alta, encontrando-se disseminado nos nossos dias por 1348,8 km; extensão que corresponde a 47,5% da RFN.

2.2.5 – IMPACTO DOS INVESTIMENTOS EFECTUADOS NA RFN NAS ÚLTIMAS DÉCADAS

Destacam-se dos projectos de modernização concretizados nos últimos 20 anos:

Linha do Minho (1988/2004): Electrificação da via, entre as estações de Campanhã e Nine, com instalação de novos sistemas de sinalização, exploração, comunicação e Convel (*CVL*), numa extensão de 39 km.

Linha do Douro (1992/2002): Electrificação da via entre Ermesinde e Caíde, instalação de novos sistemas de sinalização, exploração, comunicação e *CVL*, numa extensão de 38 km.

Eixo Ferroviário Norte-Sul na região de Lisboa (1994/2004): Quadruplicação da Linha de Cintura entre Campolide e o Terminal Técnico de Chelas e duplicação dos acessos à Ponte 25 de Abril e desta até Setúbal, numa extensão de 53 km, optimização do traçado entre as estações de Penalva e Setúbal.

Linha do Norte (1996/2011): Renovação da super estrutura de via e substituição integral da catenária. Optimização do traçado e quadruplicação da via entre Braço de Prata e Alverca (17 km), renovação dos sistemas de sinalização, telecomunicações e Convel, numa

extensão de 328 km, permitindo melhorar a velocidade máxima de circulação para valores entre 160 e 220 km/h e permitir cargas por eixo de 22,5 ton.

Ligação Lisboa-Algarve (1998/2004): Electrificação da via nas Linhas do Alentejo, Sul e Algarve, entre as estações de Pinhal Novo e Faro (260 km). Foi duplicado o traçado entre as estações de Ermidas-Sado e Torre Vã (30 km). Foram eliminadas 135 PN e instalaram-se novos sistemas de sinalização, exploração, comunicação, Convel e RSC.

Troço Pinhal Novo-Barreiro (2007/2008): Electrificação da via, entre as estações de Barreiro e Pinhal Novo, na Linha do Alentejo, numa extensão de 15,4 km.

Não obstante os elevados investimentos efectuados na infra-estrutura ferroviária, esta encontra-se num processo de degradação, com impacto na redução das velocidades máximas e comerciais, no incremento dos custos produtivos e na satisfação dos clientes, com maior expressão na rede não electrificada. Neste contexto, promovemos uma análise comparativa dos tempos de percurso efectuados pelos comboios Regionais (RG) e Inter-regionais (IR), nos principais eixos comerciais da CPRG, para o ano de 1996 e para os últimos quatro anos, cuja evolução poderá ser observada na Tabela 2.1.

Comboios IR's

Troço	Ano 1996	Ano 2004	Ano 2006	Ano 2007	Ano 2008
Porto C/Régua	2h09	1h52	1h46	1h45	1h50
Porto C/Valença	2h11 (a)	2h03	2h07	2h16	2h18
Porto C/V. Castelo	1h27 (a)	1h18	1h24	1h31	1h32
V. Castelo/Valença	44' (a)	41'	42'	42'	44'
Entrecampos/C. Rainha	1h57	1h42	-	1h51	1h54
Lisboa/Tomar	1h48	1h34	1h43	1h43	1h44

Comboios Regionais

Troço	Ano 1996	Ano 2004	Ano 2006	Ano 2007	Ano 2008
Porto C/Régua	2h29	2h05	1h59	2h00	2h09
Porto C/Valença	3h35	2h42	2h36	2h43	2h47
Porto C/V. Castelo	2h10	1h37	1h42	1h50	1h53
Nine/V. Castelo	1h03	1h01	56'	1h01	1h00
V. Castelo/Valença	1h17	1h11	1h02	59'	1h01
Coimbra B/Aveiro	50'	53'	53'	52'	52'
Coimbra B/F. Foz	1h12	59'	59'	57'	57'
Entroncamento/Coimbra B	1h31	1h37	1h37	1h41	1h47
Lisboa/Entroncamento	1h36	1h29	1h28	1h28	1h35
Lisboa/Tomar	2h09	2h01	2h00	1h54	2h07
Entrecampos/C. Rainha	2h16	2h22	2h16	2h18	2h22
Faro/V. Real	1h23	1h07	1h14	1h12	1h14
Faro/Lagos	2h12	1h35	1h44	1h41	1h42

(a) - Tempo de trajecto dos comboios Internacionais

Tabela 2.1 - Evolução dos tempos médios de percurso nos principais eixos Regionais.

Concluimos que os tempos de percurso praticados em 2004 face aos de 1996 melhoraram de uma forma geral, em resultado do investimento feito na infra-estrutura, nomeadamente a electrificação, que possibilitou a substituição do material Diesel por Eléctrico.

No entanto entre 2004 e 2008, os tempos de percurso aumentaram na maioria dos eixos, em resultado da degradação da infra-estrutura, aproximando-se e até ultrapassando os valores de 1996, particularmente no serviço IR, de que se destaca:

- **Incrementos do tempo de percurso no serviço IR, no período 2004-2008**

Linha do Minho: Relação Porto/Valença (12%) e na relação Porto/Viana (18%);

Linha do Oeste: Relação Entrecampos/C.Rainha (11%);

Linha do Norte: Relação Lisboa/Tomar (10%).

- **Incrementos do tempo de percurso no serviço RG, no período 2004-2008**

Linha do Minho: Relação Porto/Viana do Castelo (16%);

Linha do Norte: ENT/Coimbra B (10%), ENT/Lisboa (7%)

Linha do Algarve: Relações Faro/V.Real (10%) e Faro/Lagos (7%).

2.3. CP REGIONAL

2.3.1. ACTIVIDADE

O serviço regional confronta-se com duas realidades distintas, ou seja, se por um lado é possível verificar um conjunto de Linhas com uma procura aceitável, por outro lado, encontramos Linhas com muito baixa procura, mas que pelos recursos que absorvem, têm peso na conta de resultados da Unidade de Negócios. Para estas Linhas a CPRG tem procurado junto do Conselho de Administração da CP e promovido o contacto junto das Autarquias, de forma a alterar a oferta comercial, que permita uma melhor adequação dos recursos à procura existente e incrementar a taxa de cobertura da actividade.

Nas linhas onde não se perspectiva qualquer evolução positiva no tráfego – Linhas de reduzido tráfego – só a Contratualização do Serviço Público, poderá equilibrar o fraquíssimo coeficiente de cobertura dos Custos pelos Proveitos, caso os poderes políticos decidam pela continuação da sua exploração. Esta iniciativa é de extrema importância para esta unidade, uma vez que a maior parte dos comboios assegurados, são de carácter social.

A CPRG, desenvolve a sua actividade ao longo da RFN, alicerçada num modelo organizativo (Figura 2.3) sustentado por três pilares, nomeadamente o Apoio à Gestão, a Direcção Comercial e a Direcção de Operações.

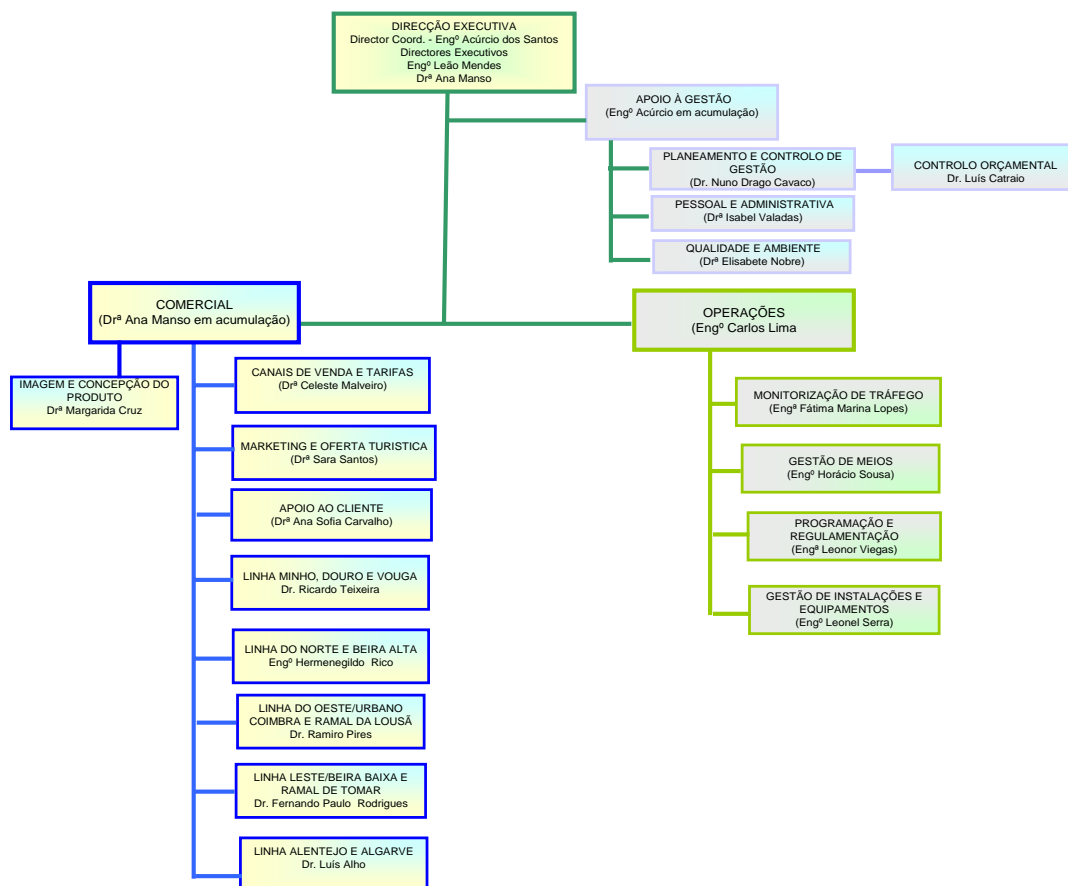


Figura 2.2 – Actual modelo organizativo da CP REGIONAL.

Destaca-se como actividade principal do Apoio à Gestão, o contributo para realização dos Orçamentos de Exploração e de Investimentos, bem como, a monitorização mensal dos Indicadores de Gestão, efectuada através da análise estatística e da realização de curvas de tendência, tendo como referência as metas orçamentadas e o histórico, trabalho fundamental para produção de ajudas à tomada de decisão da Direcção Executiva e para o “Controlo de Actividade” que é efectuada mensalmente a nível da alta direcção da Empresa e na reunião de equipa da Unidade de Negócios (U.N.).

O actual Plano de Transportes da CPRG, é composto por uma média diária de 430 comboios (ver Anexo III-4), cerca de 30% do total realizado pela CP. Os comboios estão organizados por famílias dentro de cada uma das Linhas Ferroviárias que compõem a RFN e são *totalmente realizados com material automotor, trabalho desenvolvido no período 2005-2008, que permitiu ajustar a capacidade das composições à procura e reduzir a sua*

massa, vectores fundamentais para melhorar o coeficiente de produtividade técnica (Pk/TkBr) e a eficiência energética, para além, da racionalização da cadeia produtiva.

Percorrem-se anualmente cerca de 12,8 Milhões de Comboio.km (CK's) programados, dos quais cerca de 5,9 Milhões (46%) com tracção eléctrica, para transportar cerca de 14 Milhões de Passageiros (P's). Para assegurar o processo produtivo, são necessários: 116 automotoras, 351 maquinistas, 264 Operadores de Revisão e Venda e cerca de 220 Operadores de Venda e Controlo, estes últimos asseguram a venda nas estações. Os custos operacionais associados a este plano, rondam os 90,6 milhões de euros por ano, para uma receita de cerca de 32 M€, a que corresponde uma taxa de cobertura na ordem dos 35%.

2.3.2. ORÇAMENTOS DE EXPLORAÇÃO E DE INVESTIMENTOS

O Orçamento de Investimentos da CPRG para 2009, representa 1% do O.I. total da CP, atingindo 1,9 M€. Destaca-se o investimento na aquisição de equipamentos comerciais, no âmbito da venda e da bilhética, perspectivando-se a modernização dos processos de venda em trânsito e a adaptação da venda ao projecto da bilhética sem contacto.

No Orçamento de Exploração, destaca-se o peso dos custos com o pessoal (37%), com o material (26%) e da utilização da infra-estrutura (18%). O custo da **Energia para Tracção** representa 8% do O.E. e em 2009, o custo previsto ascende a 7,3 M€, o que corresponde a uma redução do preço do gasóleo de 27% e a uma subida de 15% na energia eléctrica.

2.3.3. DIRECÇÃO COMERCIAL

A Direcção Comercial, através das Gestões de Linha (GL), desenvolve uma actividade descentralizada, sustentada por um modelo de gestão, que potencia a percepção e identificação das necessidades dos clientes, contribuindo para a definição do modelo da oferta, em cada zona do país, numa lógica de adequação aos padrões de mobilidade da região e coerente com a restante oferta de transportes, permitindo alcançar o crescimento de receitas e consequentemente melhorar a conta de resultados.

A CPRG, desenvolve uma estratégia de captação de clientes potenciais, adaptando os horários sempre que possível com o objectivo de melhorar a oferta, oferecendo mais comboios, ligações mais rápidas e promovendo a integração do serviço Regional no serviço de Longo Curso e Urbano, de modo a melhorar o conceito de rede de transporte ferroviário. Independentemente do horário, o modelo de oferta é constituído por dois produtos distintos:

- **Inter-regionais (IR):** Comboios rápidos que servem as principais estações em cada eixo;
 - **Regionais (R):** Comboios com paragem em todas as estações e apeadeiros, que potenciam o efeito de rede ao assegurar a ligação nos “Hubs” ao serviço Urbano e de Longo Curso;
- Parcerias de Negócio:** São estabelecidos protocolos com Autarquias, Entidades Públicas e Operadores Turísticos. Neste âmbito, são organizadas e comercializadas viagens especiais.

2.3.3.1 - Gestões de Linha

Existem cinco GL, que enquadram a actividade comercial desenvolvida nas estações, como a rede de vendas, nos 18 eixos onde operamos.

Numa óptica de gestão empresarial e de contratualização do serviço público, o modelo de gestão produzido, permite monitorizar a actividade através da produção de contas de resultados, permitindo conhecer a evolução do negócio em cada uma das linhas. As GL, enquadram todos os recursos humanos das estações, promovem o contacto com potenciais clientes e o acompanhamento dos comboios, procurando identificar oportunidades e propor soluções, que possibilitem melhorar a qualidade do serviço oferecido aos clientes.

Cada uma destas linhas, apresenta uma realidade específica, quer ao nível dos padrões de mobilidade intrínsecos à região, quer ao nível das condições de Exploração.

Nos eixos com maior intensidade de tráfego, são transversais as seguintes necessidades:

- Comboios mais rápidos e mais frequentes;
- Melhorar as acessibilidades e as condições de conforto nas estações;
- Assegurar a informação ao passageiro.

2.3.3 - DIRECÇÃO DE OPERAÇÕES

A Direcção de Operações, assegura a programação e gestão dos meios produtivos, de forma centralizada, nomeadamente o material e o pessoal operacional que representa 75% do quadro da CPRG, criando sinergias entre os vários núcleos operativos e potenciando economias de escala.

Promove a monitorização e acompanhamento do processo produtivo nas várias vertentes, como a gestão do tráfego associada às condições oferecidas pela infra-estrutura, a fiabilidade e disponibilidade do material e o índice de produtividade do pessoal, através da produção de indicadores e do seu tratamento estatístico em tabelas, gráficos e curvas de

tendência, que constituem o relatório da performance da exploração, de carácter mensal (ver Anexo III-5), cuja análise, permite identificar os desvios ao programado. Assegura o estudo de Horários, integrando a programação dos meios produtivos e assegura a revisão de documentos regulamentares e a gestão de contratos de fornecimento de serviços exteriores.

2.3.4.1 - Centro de Acompanhamento de Tráfego (CAT)

O CAT, labora 24 sobre 24 horas e coordena todo o processo produtivo que se desenvolve ao longo da RFN. Cumpre-lhe gerir eficientemente, os conflitos que surgem diariamente, quer por falha das condições de exploração da infra-estrutura, quer por indisponibilidade de meios (rotura ou avarias de material motor, falta de pessoal).

Deverá comunicar toda a informação relevante e garantir a fiabilidade da informação inserida nos Sistemas de Informação, normalmente através do sistema IP-Tráfego (SMS) ou pelos meios tradicionais: Telefone, Fax e correio electrónico. Entre o CAT e o comboio, existe comunicação telefónica, uma vez que todos os revisores têm telemóvel.

Por outro lado, providencia todos os meios necessários à execução de comboios não programados (especiais), bem como a desafecção e reocupação dos meios afectos aos comboios que vão ser suprimidos. Esta actividade é executada em colaboração com os órgãos do terreno, que são as Gestões de Linha e os Depósitos de Pessoal (Permanências).

2.3.4.2 - Programação de Meios

O processo de planeamento de comboios envolve três fases: o planeamento de canais horários, o planeamento da utilização do material e o planeamento da utilização de pessoal. A planificação do material, consiste em organizar as sequências de serviços “Rotações” que minimizem o número de automotoras a utilizar nas centenas de comboios que se realizam diariamente. O nome destes planos – Rotações – deriva dos ciclos que são criados e que fazem com que cada unidade venha a repetir os serviços já efectuados anteriormente, completando um ciclo (rotação). Esta rotatividade objectiva o equilíbrio dos percursos efectuados por cada unidade, respeitando determinadas restrições, como a autonomia e os postos de abastecimento no caso do material diesel, o plano de manutenção (a localização das oficinas), capacidade, horário e as condições da infra-estrutura. A elaboração de rotações é um trabalho complexo, efectuado por Especialistas.

O processo de planificação da utilização do pessoal, terá de atender à optimização da gestão dos recursos. É assegurado centralmente por especialistas e corresponde à concepção das Escalas, onde são designados os serviços que cada trabalhador deve executar. O problema de geração de escalas é complexo devido ao volume e dinâmica dos dados, tendo como referencial estrutural, o horário e a rotação do material.

2.3.4.3 - Gestão de Meios

Este órgão assegura a gestão das tripulações dos comboios e enquadra cerca de 700 pessoas, entre maquinistas, revisores e respectivas chefias intermédias. Estes recursos, encontram-se sedeados nos Depósitos (com mais população) e Postos, cuja localização é próxima das instalações oficinais (*EMEF*). Compete aos Depósitos de Tracção (*DT*), gerir o Material afecto, fazendo cumprir a rotação e a execução do programa de manutenção, numa relação diária com a Oficina e o CAT. Através das chefias intermédias (Permanentes de Tracção) apoiam os maquinistas e providenciam acções de socorro, na situação de avaria do material em plena via. Cabe igualmente aos Depósitos, gerir o pessoal de acordo com o planeado (escalas) a nível central e providenciar a afectação das tripulações aos comboios, contribuindo para optimizar a gestão dos recursos

2.3.4.4 - Parque de Material

A CP – Comboios de Portugal, E.P.E, tem hoje ao seu serviço, um parque de material modernizado, climatizado e com informação ao passageiro, situação que não se verifica na CPRG, que dispõe de um parque com uma idade média de 40 anos.

O parque de material da CPRG, é constituído por 109 automotoras de via larga e 13 automotoras diesel de via estreita (bitola métrica), distribuídas por várias séries referenciadas na figura 2.5. Parte desta frota foi modernizada, UTE 2240 (48 unidades), UDD 450 (19 unidades) e Allan 350 (19 unidade), a restante série UTD 600 (23 unidades) não foi modernizada e por isso, não possui condições de conforto adequadas às exigências do mercado. Apesar das intervenções a que foram sujeitas as séries modernizadas, o resultado prático, não teve o impacto que seria de esperar, apresentando baixos índices de fiabilidade e de disponibilidade, para além dos elevados custos de exploração. A gestão dos parques de material, é assegurada centralmente, por Inspectores de Tracção residentes no

CAT, com o apoio das Permanências integradas nos DT, que por sua vez, asseguram o interface com os Centros Oficiais, na entrega e recepção do material para a exploração.







Parque de Material Motor											
Características											
Material Automotor			Ano Entrada ao Serviço	Ano modernização	Velocidade Máxima km/h	Consumo Específico	Autonomia km	Linhas Circulação	Construtor	LUGARES SENTADOS	
Tipo	Série	Parque									
	UTE	2240	49	1977 (antigas 2100 e 2200)	2003 a 2005	120	6,68 kWh	-	L Norte L Sul R Tomar L B Baixa L B Alta Urb Coimbra	ALSTOM	264 + 2 PMR
	Allan	350	19	1954	2000 a 2004	100	1,1 l/km	630	L Leste R Cáceres R Lousã L Alentejo L Évora L B. Baixa L Oeste	SS CM	94
	UDD	450	19	1965	1999 a 2002	120	1,35 l/km	650	L Minho L Oeste R Lousã	SOREFAME	164
	UTD	600	23	1979 a 1989	-	120	2,35 l/km	630	L Douro L Algarve	SOREFAME	310
	UDD	9630	7	1991	-	90	1,15 l/km	400	L Vouga	SOREFAME / SAURER	109
	LRV	9500	6	1963 a 1969	1995 a 2000	84	0,45 l/km	400	L Tâmega L Corgo L Tua	VOLVO / CAMO	48

Figura 2.3 – Características do parque de material motor da CPRG.

2.3.4.5 - Monitorização do Tráfego

Este órgão enquadra o CAT e promove a recolha e o tratamento de dados, para produção de indicadores da eficiência operacional, por linha e família de comboios, nomeadamente: Ip e Ir, CK, Percursos, Marchas e Consumos específicos, entre outros.

A fonte principal é o DW (*Data Warehouse*), base de dados alimentada pela ODS (*Operational Data Store*) que por sua vez é alimentada pelos sistemas de regulação do tráfego da REFER (Sitra e Aramis). A análise produzida é organizada e inserida no relatório mensal “Performance da Exploração” (ver Anexo III-5), que permite monitorizar os desvios ao programado. Há no entanto que melhorar a identificação das causas, objectivo que pensamos atingir através dos modelos desenvolvidos neste trabalho, como:

- A medição do impacto das limitações de velocidade na factura energética e no Ip;
- A identificação de avarias sistemáticas do material, organizadas por parque, série, unidade motora, centro oficial e maquinista, que serão reportadas à EMEF para correcção;
- Introdução do indicador Pk / TkBr , que traduz a eficiência global do processo.

2.3.4.5.1 - Índice de Pontualidade

O Ip é o indicador de excelência para medir a qualidade do serviço e produzir alertas que estimulem a análise dos vários componentes do sistema produtivo, nomeadamente a infra-estrutura. A integração dos vários indicadores, com impacto no valor do Ip, será assegurada no âmbito deste trabalho, objectivando a identificação dos pontos críticos e a percepção das causas, que motivam a sua descida. Salienta-se a existência de valores de Ip inferiores a 80%, quando os valores aceitáveis estão acima dos 95%, indicando a debilidade do actual horário comercial da CP, face aos constrangimentos da infra-estrutura.

Em 2008 o Ip médio da CPRG foi de 87,8% enquanto que no período JAN a JUL de 2009, obtivemos um valor médio de 86,5%, tendo-se registado 88,1% no período homólogo de 2008. O Ip global no 1º Semestre de 2009 ficou sistematicamente abaixo da meta (88%), pouco ambiciosa, à excepção do mês de Abril (figura 2.6), com um Ip de 89,1% (Anexo III-5), dando indicação da redução do número de restrições de velocidade na RFN, em resultado de uma intervenção pesada efectuada pela Refer em Março, na linha do Norte, mostrando a influência decisiva da infra-estrutura na qualidade deste indicador.

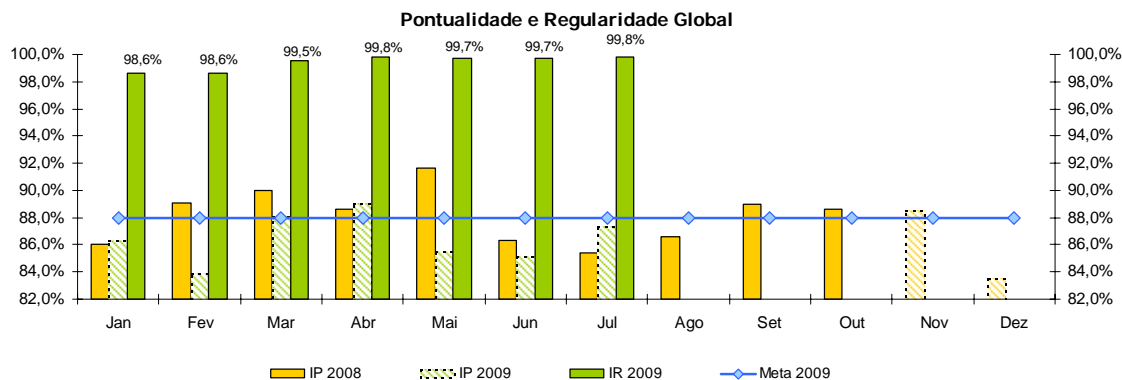


Figura 2.4 - Evolução do Índice de Pontualidade em 2009 face a 2008 e à meta traçada

2.3.4.5.2 - Eficiência Operacional

Atrasos – Os atrasos nas circulações provocam trabalho extraordinário e falta de repouso. Além do impacto directo causado por um atraso de um comboio existe o efeito de repercussão em todos os comboios que enlaçam nele.

Supressões – Associado a uma supressão, está uma descontinuidade nas Rotações do Material e/ou nas Escalas de Pessoal. Estas descontinuidades são anuladas com um

reposicionamento das automotoras e/ou das tripulações, ou seja, envolvem uma viagem (marcha) em vazio que obviamente tem custos adicionais. O Índice de Regularidade, reflecte a supressão de comboios. No 1º Semestre de 2009, os valores encontram-se normalmente acima de 99,5% (figura 2.6), indicando que é raro, suprimir comboios Regionais. Como exemplo, refere-se que em JUL/09 dos 13300 comboios planeados, foram suprimidos 20 na totalidade e 4 parcialmente (Anexo III-5).

2.3.4.5.3 - Marchas Programadas e Não Programadas

As marchas programadas são uma necessidade que não gera receita, contribuindo para o agravamento dos custos operacionais. Foi desenvolvido um trabalho notável na CPRG e hoje o volume de marchas é residual, face à dimensão do plano de transportes. No gráfico da figura 2.7, pode ser observada a evolução das marchas programadas e não programadas em 2008 e 2009. Os percursos programados, raramente ultrapassam os 10000 km/mês, enquanto que as marchas não programadas, têm sido reduzidas paulatinamente, não tendo actualmente expressão; a sua realização está associada às avarias do material, à supressão de comboios e a serviços especiais. Concluimos que este processo se encontra optimizado.

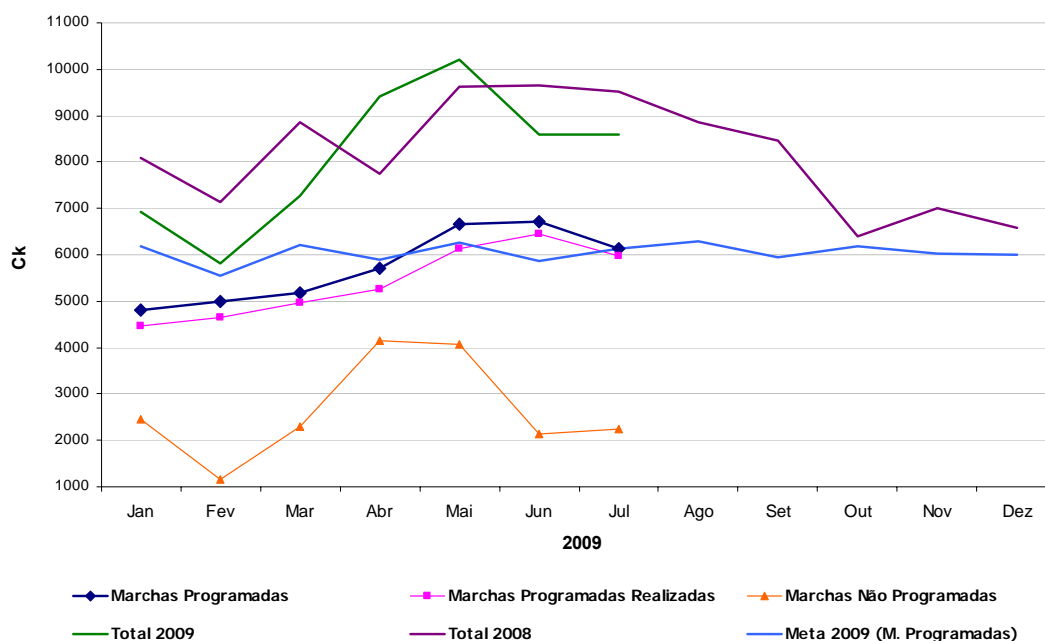


Figura 2.5 – Marchas Programadas e Não Programadas.

CAPÍTULO III

BASES DE CÁLCULO DA MARCHA TIPO DE UM COMBOIO

3.1 - INTRODUÇÃO

O estudo do movimento do comboio – sistema complexo de massas interligadas – pode ser feito por uma Mecânica do Transporte Ferroviário, que tal como a Mecânica clássica tem uma Dinâmica e uma Cinemática. Em Portugal esta metodologia foi aplicada por Ferrugento Gonçalves na sua tese de Doutoramento (Gonçalves, 1963) na sequência da apresentação em França por H.Parodi (1935), (Guedes, 2005).

O trabalho desenvolvido neste capítulo teve como base, para além da pesquisa na Internet, a recolha de informação na CP, nas empresas ferroviárias de referência e Universidades, nomeadamente: Direcção de Engenharia da CP, Refer, Caminhos-de-ferro Franceses (SNCF), IST, FEUP, Publicações Ferroviárias, Colegas e Colaboradores. Foi possível reunir, um conjunto de elementos fundamentais, relativos aos vários aspectos da marcha de um comboio, tratados pela *“Dinâmica do Transporte Ferroviário”*, dos quais destaco:

- Tracção Eléctrica Ferroviária - Dinâmica Ferroviária (Provoost e Courtois, 1998);
 - Metodologias associadas ao cálculo do traçado de uma marcha tipo de um comboio de acordo com as expressões e valores utilizados pelos Caminhos-de-ferro Franceses (SNCF);
 - Características do material, de acordo com as fichas técnicas de cada uma das séries de automotoras em serviço na CP Regional (Anexo III-1);
 - Curvas do esforço de tracção em função da velocidade³: $F_t(v)$, para cada uma das séries de material (Anexo III-2).
 - Fichas UIC (UIC544-1;614;615;623), relativas ao cálculo da frenagem de emergência e às curvas de tracção;
 - Recolha de dados taquimétricos provenientes do Convel e Fitas de registo, relativos a frenagens com o freio de serviço, em situações de limitação de velocidade e de paragem;
- O conjunto da informação recolhida, permitiu calcular para cada tipo de material, os vários parâmetros da equação geral do movimento de um comboio, nomeadamente: a resistência ao avanço, a massa inercial e o esforço acelerador. Foi igualmente possível, aferir o valor do esforço de frenagem do freio de serviço relativamente ao valor do de emergência.

³ Informação cedida pela Direcção de Engenharia da CP- FROTA e pelo Grupo Oficinal do Porto - EMEF

O conhecimento dos parâmetros referidos, associado ao do perfil compensado da via-férrea, são condições necessárias para que, em função do tipo de material, seja possível calcular o tempo e o espaço necessários, para que um dado comboio, atinja uma dada velocidade, em cada ponto da RFN, ou seja, construir a *marcha tipo de um comboio*.

3.2 - CURVA DO ANDAMENTO DE UM COMBOIO

A Dinâmica do Transporte Ferroviário, tem como objectivo principal, o relacionamento do movimento de cada comboio com o esforço motor necessário para o rebocar durante um certo intervalo de tempo ou com uma certa velocidade.

3.2.1 - VELOCIDADE FUNÇÃO DO PERCURSO: $v = f(e)$

Consideremos um dado comboio a efectuar um determinado percurso, podemos fazer a representação gráfica do desenvolvimento do valor da velocidade ao longo do percurso, o que nos permite ter uma noção mais exacta do andamento do veículo.

Tomemos o exemplo apresentado na figura 3.1:

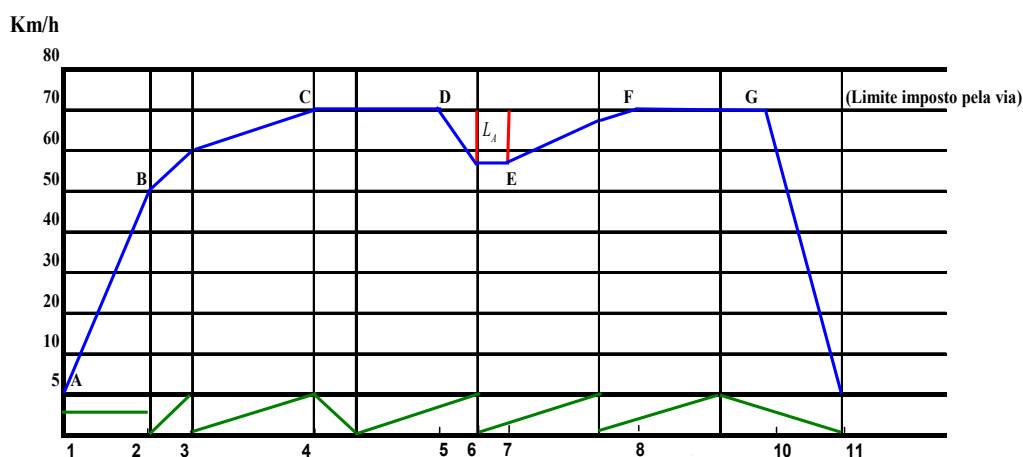


Figura 3.1 - Representação gráfica da variação do valor da velocidade ao longo de um percurso.

- Em A, a composição inicia o movimento em que a velocidade vai aumentando sucessivamente, dependendo o incremento, do tipo de característica de tracção utilizada;
- Em B, a composição encontra uma variação no perfil – correspondente a uma variação de resistência ao movimento – resultando um acréscimo de velocidade diferente;
- Em C, o veículo atinge uma velocidade que é o valor máximo permitido pela via;

- Em D, visto existir uma limitação de velocidade há necessidade de frear a composição;
- Em E, terminando a restrição de velocidade, a composição acelera atingindo de novo o valor da velocidade máxima em F;
- Em G, inicia-se a frenagem para a paragem.

Concluimos por conseguinte, que os elementos dependentes da Via e do Material, necessários para o conhecimento desta curva, se podem sintetizar do seguinte modo:

- **VIA:** - Resistência devido ao perfil longitudinal;
 - Resistência devido às curvas;
 - Limite máximo de velocidade imposto pela via.

- **MATERIAL CIRCULANTE**
 - Característica de tracção;
 - Resistências ao movimento em patamar e alinhamento recto;
 - Frenagem.

3.3 - ELEMENTOS RELACIONADOS COM A VIA

3.3.1 - RESISTÊNCIA DEVIDO AO PERFIL LONGITUDINAL

O traçado duma via, devido a imposições do terreno, apresenta troços em que o perfil varia, apresentando-se sob a forma de patamar, rampas e declives com diversos valores.

Nas redes ferroviárias, esses valores são expressos em mm/m ou ‰ (permilagem), atingindo valores cuja ordem de grandeza, raramente ultrapassa as duas dezenas de mm/m, característica igualmente verificada na RFN, valor considerado elevado para as características do comboio clássico, dado que:

- As potências instaladas no comboio são pequenas comparadas com a massa deslocada, não sendo possível rebocá-lo ao longo de um trainel de forte inclinação;
- O atrito entre a roda e o carril é baixo e limita severamente as forças de tracção;
- As forças de tracção são ainda limitadas pelo peso da unidade motora (peso aderente) que não será viável aumentar para além dos níveis actuais;

O facto de uma composição se deslocar numa rampa (Figura 3.2), implica o aparecimento duma resistência específica ao movimento, igual à componente do peso segundo a direcção do movimento. Assim, a resistência específica (r_e) de uma rampa será:

$$r_e = \frac{M.g.\text{sen}(\alpha).10^3}{M} = g.\text{sen}(\alpha).10^3 \quad (3.1)$$

Sendo, r_e a resistência ao movimento em N/ton e M o peso da composição em kg .

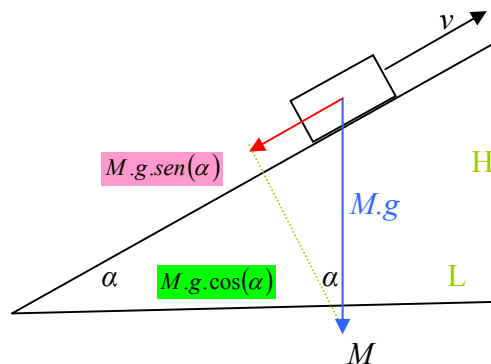


Figura 3.2 – Resistência ao movimento devido à inclinação da via.

Uma vez que em tracção por simples aderência⁴, a inclinação das rampas, regra geral, não ultrapassa, os 30 %⁵, o ângulo α toma valores inferiores a 2°, de modo que se pode considerar $\text{sen } \alpha = \text{tg } \alpha$. Na prática, esta aproximação considera-se válida para rampas até 100 %. Então:

$$\text{tg } \alpha \cong \text{sen } \alpha \cong \frac{H}{L} \therefore \text{tg } \alpha = i \quad (3.2)$$

$$r_e = \text{sen}(\alpha) \times 10^3 \Leftrightarrow r_e = i \quad (3.3)$$

Concluiu-se que uma rampa de valor i em mm/m corresponde a uma resistência específica ao movimento de r_e em Kg/ton .

Em tracção ferroviária, a resistência introduzida pelas rampas da via é importante relativamente à resistência em patamar, o que obriga a limitar a valores muito baixos as

⁴ Em tracção por cremalheira, a inclinação das rampas adoptadas é maior, podendo atingir valores da ordem dos 400 % (Toledo [et al], 1987).

⁵ Em Portugal a inclinação máxima das rampas é da ordem dos 25 % em via larga (Ramal da Lousã) e dos 35 % em via estreita (Linha do Corgo).

inclinações máximas admitidas, sob pena de serem requeridas potências de tracção muito elevadas, ou de as velocidades de circulação descerem a valores inadmissíveis (ver figura 5.8 e Anexo III-4).

3.3.2 – RESISTÊNCIA DEVIDO ÀS CURVAS

O facto de existirem curvas no traçado da via, vai originar uma resistência ao movimento dependendo essencialmente de dois factores:

- Do atrito entre os verdugos dos rodados e as faces laterais da cabeça do carril, na chamada “fila alta” durante a inscrição em cada curva;
- Do deslizamento das rodas sobre os carris visto os eixos dum “bogie” ou dum vagão de dois eixos ao inscreverem-se na curva permanecerem paralelos.

Esta resistência manifesta-se em função inversa do raio da curva r e depende ainda do espaçamento rígido entre rodados, da conicidade dos aros, da escala utilizada no assentamento da via, da bitola e da massa total do comboio, de que resulta a expressão utilizada pela SNCF (Garreau, 1965; Gonçalves, 1974):

$$R_C = \frac{K.M}{r} \quad (3.4)$$

Sendo R_C a resistência devido à curva em (Kg), r o raio da curva em (m), M a massa total do comboio (ton) e K o valor que depende dos parâmetros atrás referidos.

A semelhança das condições de inscrição em curva do material moderno, permite adoptar para todo o material um único valor de $K=800$, valor admitido pela SNCF (Boileau, 1978; Gonçalves, 1974), para as unidades referidas atrás. Por outro lado, a SNCF deduziu uma fórmula válida para valores médios e aproximados, que permite transformar uma curva de raio r numa rampa de inclinação i mm/m :

$$r_c = i = \frac{800}{r} \quad (3.5)$$

$$\therefore R_C = M.i \quad (3.6)$$

3.3.3 – PERFIL COMPENSADO

Das duas resistências ao movimento anteriormente referidas, dependentes da via, resulta o perfil compensado também designado por perfil corrigido. Esta noção, consiste em apresentar num único valor, a resistência ao movimento devido ao perfil e às curvas.

Na determinação do perfil compensado temos:

1 – Os elementos obtidos a partir do traçado da via, apresentam-se de forma análoga ao representado pelas linhas vermelha e azul-escuro da figura 3.2. A vermelha representa o perfil longitudinal da via, com indicação dos valores de rampas e declives em (‰), ao longo do percurso em (km). Como esse traçado, apresenta curvas de raios diferentes, há necessidade de representar essas curvas, representadas na linha azul-escuro, do “Perfil em Planta”.

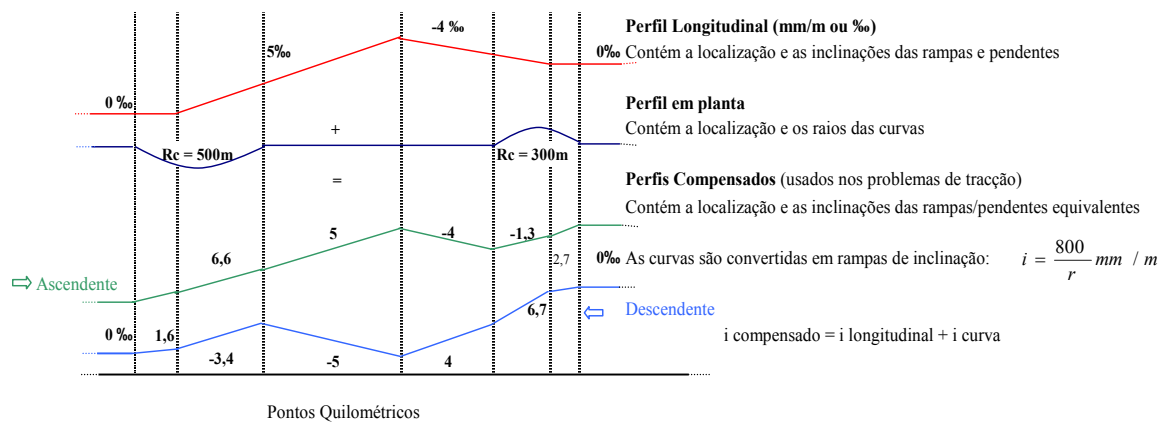


Figura 3.3 – Perfil compensado

2 – Tendo como referência o ponto anterior, para trechos onde existem curvas, podemos transformar o valor correspondente à resistência da curva em rampas, através da correlação (3.5) e adicionar o valor obtido, ao valor respectivo do perfil longitudinal. Obtemos assim, o perfil a “verde” no sentido ascendente e o perfil a “azul claro” no sentido descendente. Teremos por conseguinte:

$$i_{compensado} \text{ (mm/m)} = \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} i_{longitudinal} \text{ (mm/m)} + i_{curvas} \text{ (mm/m)} \quad (3.7)$$

Em que o perfil longitudinal ($i_{longitudinal}$) é positivo para rampas e negativo no caso das pendentes (declive) e o i_{curvas} , representa a resistência devido à curva.

3 – Para simplificação do perfil corrigido obtido, podemos utilizar valores médios, quando ao longo de um dado trecho (rampa, patamar ou pendente) se encontrem valores do perfil com pequenas variações (cerca de uma unidade).

Para simplificar a determinação do perfil corrigido, podemos no “*Perfil em Planta*”, considerar apenas uma curva, quando existem curvas do mesmo raio ou com diferenças de raios até 50 metros, muito próximas, ou separadas duma distância até 100 metros.

O valor médio do perfil compensado (média pesada) é dado por:

$$\dot{i}_{\text{compensado médio}} = \frac{r \times d}{d} \quad (3.8)$$

Representando r o perfil longitudinal e d as distâncias.

Para concluir este ponto, apresentamos na figura 3.4 (a vermelho) um exemplo prático do perfil compensado produzido e utilizado pela Refer na concepção de horários, dados que nos foram cedidos por essa empresa, para todas as linhas da RFN. As tabelas do perfil compensado, foram utilizadas para o cálculo das marchas tipo, para cada linha e tipo de material utilizado, conhecimento fundamental para medir a quantidade de energia degradada, quando o comboio é submetido a uma redução de velocidade imposta pela infraestrutura.

SectionID	Km1	Km2	Profile	Radius	Type	DOIni	DOEnd	PKIni	PKEnd	Comp Profile	NodeID	NodeName
1	0	2,618	0	0		0	0,28	2,618	2,338	0,0	9401008	PORTO-SB
1	0,28	2,338	0	300		0,28	0,287	2,338	2,331	2,7		
1	0,287	2,331	-5	300		0,287	0,438	2,331	2,18	-2,3		
1	0,438	2,18	-5	0		0,438	0,748	2,18	1,87	-5,0		
1	0,748	1,87	-5	600		0,748	0,877	1,87	1,741	-3,7		
1	0,877	1,741	0	600		0,877	0,88	1,741	1,738	1,3		
1	0,88	1,738	0	0		0,88	1,181	1,738	1,437	0,0		
1	1,181	1,437	12	0		1,181	1,22	1,437	1,398	12,0		
1	1,22	1,398	12	300		1,22	1,45	1,398	1,168	14,7		
1	1,45	1,168	12	0		1,45	1,608	1,168	1,01	12,0		
1	1,608	1,01	12	700		1,608	1,768	1,01	0,85	13,1		
1	1,768	0,85	12	1000		1,768	1,853	0,85	0,765	12,8		
1	1,853	0,765	11	1000		1,853	1,878	0,765	0,74	11,8		
1	1,878	0,74	11	0		1,878	2,153	0,74	0,465	11,0		
1	2,153	0,465	11	350		2,153	2,331	0,465	0,287	13,3		
1	2,331	0,287	0	350		2,331	2,383	0,287	0,235	2,3		
1	2,383	0,235	0	0		2,383	2,618	0,235	0	0,0		

Figura 3.4 – Valores do perfil compensado (a vermelho) no trecho Porto SB/Porto C.

3.3.4 – LIMITE MÁXIMO DE VELOCIDADE DEVIDO À VIA

Na figura 3.1 assinalámos que existe uma velocidade máxima permitida, que não depende do veículo, mas é imposta apenas pela via (*TVM*), limite esse, que é imposto pelas condições de construção e de conservação da superestrutura.

Note-se contudo, que o limite máximo de velocidade pode depender também do veículo, o que acontece devido ao valor do esforço acelerador e ao limite de potência de freio, isto nas pendentes acentuadas, em que a velocidade máxima é limitada pela frenagem.

3.4 – ELEMENTOS RELACIONADOS COM O MATERIAL CIRCULANTE

3.4.1 – CARACTERÍSTICAS DOS ESFORÇOS DE TRACÇÃO ASSOCIADOS À MARCHA

Da figura 3.1 deduz-se que, quando a composição inicia o movimento ou se desloca ao longo de um percurso, o veículo motor é solicitado, a desenvolver um determinado esforço de tracção, conforme o valor da resistência que encontra.

Eis pois, a necessidade de conhecermos as características dos esforços de tracção.

3.4.1.1 – Noção de aderência

Pode afirmar-se, que o fenómeno da aderência, representa o princípio físico que justifica a existência da tracção ferroviária de tipo convencional e condiciona, consequentemente, a utilização dos veículos motores. Da explicação física da aderência, sobressaem dois fenómenos que intervêm no caso:

- A inter penetração das rugosidades roda-carril;
- As ligações inter atómicas que resultam numa soldadura momentânea.

De forma resumida, apresentamos alguns princípios e definições relativos aos contactos roda-carril:

- A acção de um esforço de tracção, numa roda apoiada sobre um carril, traduz-se por um esforço aplicado na superfície de rolamento dessa roda, de tal modo, que a roda se movimenta a partir do seu apoio no carril: é este o conceito de **“aderência”**.
- Numa roda apoiada sobre um carril, com uma determinada carga vertical (relativa ao peso do comboio), as deformações elásticas dos materiais (roda-carril) fazem com que o contacto não se estabeleça num ponto ou sobre uma linha, mas numa área denominada superfície de Hertz, no interior da qual, as tensões crescem da periferia para o centro.
- Aplicando à roda um esforço tangencial de modo a evitar o deslocamento do seu eixo, as deformações elásticas, vão permitir uma ligeira rotação da roda, mesmo não existindo

deslocamento real entre as duas superfícies. Este fenómeno permanece durante o andamento da roda – em aceleração ou desaceleração – apesar da superfície de Hertz se renovar constantemente, progredindo ao longo do carril. As deformações elásticas dos materiais da roda e carril, provocam um afastamento entre o deslocamento do centro da roda e o percurso realmente efectuado. Diz-se neste caso que existe um pseudo-deslizamento. Para velocidades relativas entre roda e carril, superiores às correspondentes ao pseudo-deslizamento puro, perde-se a aderência uma vez que a resistência oferecida pelo carril diminui notavelmente e entra-se em **patinagem** (deslizamento do ponto de contacto da roda com o carril, no sentido contrário ao do movimento).

A partir do momento em que a aderência estática propriamente dita desaparece, a roda desliza sobre o carril surgindo um esforço de escorregamento “dinâmico” entre a roda-carril. **O coeficiente de aderência** depende do estado do carril, dependendo do seu estado de conservação, das curvas e das condições atmosféricas, mas sobretudo da velocidade, a experiência mostra que diminui logo que a velocidade aumenta.

Define-se coeficiente de aderência (α) como a razão entre o esforço máximo que pode ser aplicado e a carga vertical exercida pelas rodas motoras sobre o carril – **peso aderente**.

Pode variar desde 40% para carris bem secos, até 10% para carris gordurosos e poluídos.

$$\alpha = \frac{F_{\max.}}{P_a} \quad (3.9)$$

Onde F_{\max} é o esforço máximo e P_a é o peso total do veículo automotor exercido sobre os eixos motores, designado por peso aderente.

Após o contacto estático, inicia-se o contacto dinâmico, chamando-se coeficiente de escorregamento à razão entre o esforço tangencial e a carga vertical:

$$\mu = \frac{F_{r\max}}{P_a} \quad (3.10)$$

Em que $F_{r\max}$ representa o esforço tangencial de tracção.

Para que não haja patinagem é necessário que, $F_{r\max} \leq \mu.P_a$.

Deste modo, para uma automotora tripla eléctrica_UTE 2240 com 165,6 toneladas em carga

normal, teremos: $P_a = \frac{P_t}{n} = \frac{165,6}{12} = 13,8 \text{ ton};$

Em que P_t representa o peso total em carga e n o número total de rodados.

É a aderência dos veículos que condiciona a sua possibilidade de arranque e, no caso de comboios, também a capacidade de reboque por parte dos veículos motores.

O valor da aderência é definido por curvas (*Curtis-Kniffler e UIC*) que nos dão o valor do coeficiente de aderência em função da velocidade.

Estas curvas variam conforme o tipo de veículo motor e de acordo com o estado das duas superfícies de contacto roda-carril.

3.4.1.2 – Constituição da curva $F_r(v)$

Para que um comboio de massa M com uma resistência total ao avanço R , disponha de uma aceleração a , numa linha de perfil i , os motores de tracção deverão desenvolver nos respectivos rodados (e nomeadamente nas superfícies de rolamento das rodas) uma força motriz (Provoost e Courtois, 1998) total F_r que vença a resistência de rolamento, a força de inércia correspondente à aceleração pretendida e à resistência aerodinâmica. O valor de F_r poderá ser calculado a partir da equação fundamental da dinâmica:

$$F_r - R - M.g.\text{sen } \alpha = K.M.a \quad (3.11)$$

Para um dado valor de velocidade instantânea, em que:

- F_r (KN), representa o esforço total de tracção, produzido na superfície de rolamento das rodas de uma unidade motora, com todos os motores em serviço;
- R , representa a **resistência total ao avanço** do comboio em patamar e alinhamento recto. Resulta do produto entre a massa total do comboio (tara + carga) e a resistência específica, que para comboios clássicos, se exprime em função da velocidade por um polinómio do 2º grau, do tipo: $A+BV+CV^2$;
- $M.g.\text{sen } \alpha$, representa a componente da gravidade i (mm/m), sendo: M a massa total do comboio (ton) e $g.\text{sen } \alpha$ o esforço resistente em rampa e acelerador numa pendente, em que g representa a aceleração da gravidade;

- K , representa o coeficiente de inércia das massas rotativas. É um coeficiente sem dimensão, ligeiramente superior a 1, que majora a massa do comboio, afim de considerar as diversas massas em rotação, que possuem o seu próprio momento de inércia, como por exemplo os veios, as transmissões e os rotores dos motores.
- O termo $K.M$, igual a M' , representa a massa fictícia do comboio.

O valor do esforço de tracção e respectiva curva, pode igualmente ser calculado através do binário motor C_m , produzido pelos motores, pela relação (Provoost e Courtois, 1998):

$$C_m (KN.m) = \frac{F (KN) \times r (m)}{N \cdot \rho \cdot \eta} \quad (3.12)$$

Sendo N o número de motores de tracção, ρ a relação de transmissão (desmultiplicação) entre a roda e o motor, η o rendimento da transmissão entre a roda e o motor de tracção ($\eta = 0,98$) e r o raio da roda (cerca de 0,5 m).

O binário motor em conjunto com outros parâmetros, tais como, o esforço necessário no arranque, o tempo gasto no arranque, o esforço em regime contínuo (ver figura 3.5), a velocidade no regime contínuo e a velocidade máxima, constituem a base de dimensionamento do motor da unidade motora, assim como o seu conversor de alimentação, no caso da tracção eléctrica.

Por fim, salienta-se que a **potência na roda** (P_r) da unidade motora, se pode exprimir pela seguinte fórmula prática da SNCF (Provoost e Courtois, 1998):

$$P_r (kw) = \frac{1}{3,6} \cdot F_r (KN) \cdot V (km/h) \quad (3.13)$$

Que nos permite determinar o **rendimento global da unidade motora** (razão entre a potência na roda e a potência absorvida no pantógrafo).

3.4.1.3 – Curva característica do esforço de tracção em função da velocidade.

Numa dada unidade motora, os motores deverão desenvolver um esforço de tracção, sobre as rodas que terá de ser superior aos esforços resistentes presentes, de forma que o comboio arranque e aumente de velocidade. Estas performances são representadas em curvas que designamos de esforço de tracção/velocidade do motor. A figura 3.5, representa uma curva de tracção característica de uma unidade motora, constituída por:

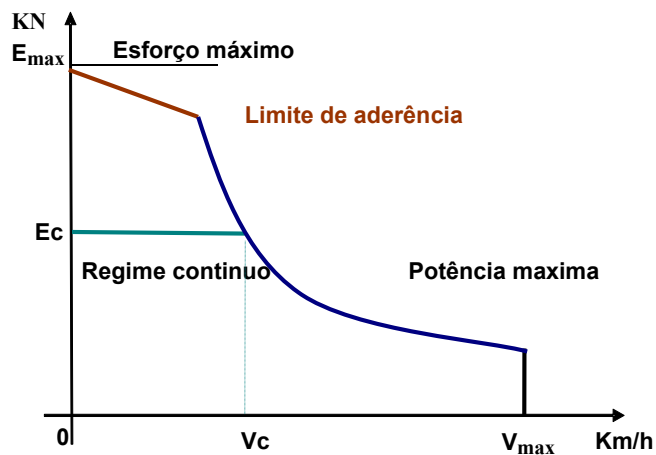


Figura 3.5 – Curva de Tracção.

Traço vermelho – linha de aderência

Traço azul – curva definida pelo construtor

Traço preto – velocidade máxima

O esforço de tracção (F) é expresso em KN ou $daN = kg$ visto que $1 Kg = 9,8 N \approx 1 daN$.

Salienta-se que, com os equipamentos que dispomos nos nossos dias, poderemos construir curvas bem mais sofisticadas, para corresponder às mais variadas exigências da exploração.

- ***Esforço no máximo arranque (E_{max})***

É obtido através de um esforço máximo do motor, transmitido às rodas, que terá de ser superior ao coeficiente A da resistência ao avanço (representa o atrito roda carril) adicionado à resistência devida ao gradiente da via, uma vez que a velocidade é nula.

- ***Arranque***

É necessário arrancar de forma rápida, com valores elevados do esforço de tracção; constituindo o período do arranque a que chamamos “regime de sobrecarga de curta duração” e será a capacidade de sobrecarga do motor diesel ou do equipamento eléctrico, que vai condicionar o esforço máximo de tracção realizável no arranque.

- ***Regime contínuo***

É o ponto do equipamento que é definido em função das condições de exploração do veículo. Podemos defini-lo como um ponto de funcionamento, que o motor pode suportar por tempo prolongado, sem que o aquecimento ultrapasse o limite admitido pela classe de isolamento, no caso dos motores de tracção eléctricos. É portanto o regime em que o motor trabalhará na maioria do tempo. Por exemplo, para uma composição do tipo TGV, o regime contínuo define-se na vizinhança da velocidade máxima, no entanto para uma automotora

normal, é definido para cerca de 60 km/h. Este ponto é de importância extrema para o dimensionamento térmico dos motores de tracção.

▪ **Velocidade máxima**

O seu valor, assim como, os ensaios de sobre velocidade a 120%, impostos pelas normas dos motores de tracção, condicionam a construção mecânica do rotor do motor, após o que, é escolhida judiciosamente a relação de desmultiplicação rotor/roda e o diâmetro das rodas.

Não pretendendo apontar a diversidade de curvas características para cada tipo de material motor existente, é no entanto de salientar as condições necessárias para a sua definição:

- Cargas em arranque e a rebocar em linha.
- Horários para as diferentes categorias de comboios (passageiros, mercadorias, etc.) tendo em conta:
 - A potência máxima tecnicamente realizável no peso previsto;
 - A capacidade de sobrecarga dos motores, transformadores e rectificadores;
 - Taxa de redução do campo, possível para os motores.

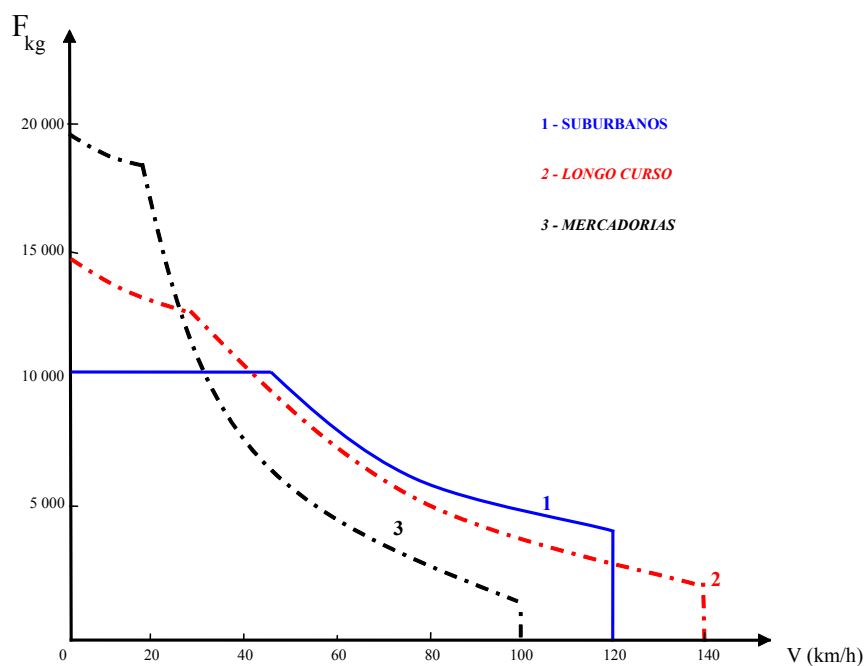


Figura 3.6 – Curva de tracção conforme a tipologia do serviço executado.

Com base nestes elementos, define-se a curva característica dum veículo motor. Como exemplo refere-se a seguir a figura 3.6, que enfatiza o traçado da curva de tracção, conforme o tipo de serviço a prestar.

Curva 1 – característica de esforços de tracção de veículos motores utilizados no serviço suburbano em que as suas características essenciais são:

- Arranques rápidos por conseguinte com uma aceleração inicial elevada;
- Aceleração inicial constante até velocidades na ordem dos 40 km/h (exp.UTE2240);
- Velocidade máxima entre os 120 e 140 km/h dada a distância curta entre paragens.

Curva 2 – Características de esforços de tracção tipo nos veículos motores utilizados no longo curso sendo de salientar:

- Esforços elevados no período de arranque;
- Velocidades máximas mais elevadas que a curva 1.

Note-se que o objectivo nestas curvas de tracção, é atingirem-se velocidades máximas em que o valor seja o mais elevado possível (em Portugal 180 km/h nos IC e 220 km/h no AP).

Curva 3 – Características tipo para serviço de mercadorias definida por:

- Esforços de tracção elevados;
- Velocidade máxima menor que em qualquer das curvas 1 e 2.

Neste caso, o objectivo com estes veículos motores, será o de rebocar as maiores cargas possíveis, daí pretenderem-se os maiores esforços possíveis.

As curvas do *esforço de tracção/velocidade* fornecidas pelos construtores, para cada uma das séries de material do parque da CP-Regional, podem ser observadas no Anexo III-2.

3.5 – EQUAÇÃO GERAL DO MOVIMENTO

Do ponto de vista teórico, o movimento de cada elemento de um comboio, obedece às leis gerais da Mecânica, mas a natural complexidade do sistema, impede na realidade de tratar por esta via de um modo completo e com rigor absoluto (Henriques, 1991).

No campo ferroviário, o que importa fundamentalmente é o movimento principal do comboio, no seu conjunto ao longo da linha, para efeitos de determinação dos vários parâmetros inerentes ao seu movimento, como sejam os tempos de percurso ou as

velocidades de marcha. O comboio pode então ser assemelhado a um ponto, geralmente o seu centro de gravidade, que se desloca ao longo de uma trajectória definida pelo eixo da via-férrea, por efeito das acções exteriores que se exercem sobre ele.

A deslocação de qualquer veículo, exige que lhe seja aplicado um “esforço de tracção” adequado, seja por reboque seja por mecanismo de propulsão integrado.

Em termos gerais, o esforço de tracção F relaciona-se com a massa M do móvel e com a velocidade instantânea V pela expressão clássica (Castro, 1988a):

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2 + R \cdot M \cdot g \cdot |1 + \operatorname{sen} \alpha| + M \frac{dV}{dt} \quad (3.14)$$

Em que ρ é a densidade do ar, S a área frontal projectada do móvel, C_x o coeficiente de penetração (aerodinâmico), $\operatorname{Sen} \alpha$ a inclinação do trainel e R o coeficiente de atrito de rolamento.

No caso de um comboio, considerando a lei fundamental da dinâmica $F(v) = M \cdot a$ e as resistências ao movimento a que fica sujeito, bem como, a correcção do valor da sua massa, após aplicação do coeficiente das massas rotativas, chegamos à equação diferencial que rege o movimento do comboio:

$$M' \cdot \frac{dv}{dt} = F(v) - \sum R \Leftrightarrow F(v) = M' \cdot a + \sum R \quad (3.15)$$

Em que $F(v)$ representa o esforço de tracção desenvolvido pela unidade motora em função da velocidade; M' a massa inercial, ligeiramente superior a M , devido à influência das massas rotativas; $\sum R$ o somatório das resistências ao movimento (resistência ao avanço e ao perfil da via).

A partir da 2ª Lei de Newton e do que foi referido no ponto 3.4.1.2 deste capítulo, simplificámos a equação de movimento numa composição, tendo obtido:

$$F_r = R + M \cdot i + \frac{M'}{g} \cdot a \cdot 10^3 \quad (3.16)$$

Onde F_r representa o esforço de tracção nas rodas (kg); R a resistência total ao movimento da automotora em patamar e alinhamento recto (kg); M a massa da automotora em carga normal (ton); i o valor do perfil compensado (Kg/ton); M' o coeficiente de inércia das

massas rotativas da automotora (ton): $M' = K.M$; g a aceleração da gravidade (m/s^2) e a , a aceleração da composição (m/s^2).

Considerando a curva de tracção $F_r(v)$, deduz-se da expressão (3.16) o **esforço acelerador**, necessário para o comboio iniciar o seu movimento e aumentar de velocidade. É igual ao esforço de tracção disponível menos a resistência ao avanço:

$$F - (R + M.i) = \frac{M'}{g} \cdot a \cdot 10^3 \Leftrightarrow a_{(inst.)} = \frac{g[F - (R + M.i)]}{M' \cdot 10^3} \quad (3.17)$$

3.5.1 – A RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

A resistência ao avanço é o resultado de um conjunto de resistências de natureza diversa que, em recta e patamar, se opõem ao movimento dos veículos. Usualmente, essas resistências, que não obedecem propriamente às leis de variação em função da velocidade, são separadas em duas categorias. Tem-se, por um lado, a resistência mecânica, devido ao rolamento (contacto roda carril) e a todos os atritos mecânicos que se manifestam no interior dos veículos e, por outro lado, a resistência oferecida pelo ar ao seu movimento.

O rolamento das rodas sobre os carris, e o atrito dos veios nas chumaceiras ou nas caixas de rolamento, originam uma resistência que é praticamente independente da velocidade, mas que é função da qualidade da via férrea (alinhamento, nivelamento, juntas e rigidez) e de determinadas características do material circulante (disposição e número de eixos, peso por eixo, tipos de chumaceiras ou caixas de rolamento). Uma vez definidas essas características, o valor dessa resistência pode considerar-se praticamente constante.

A resistência aerodinâmica depende da área, forma e comprimento do veículo. Resulta da pressão do ar sobre a superfície frontal do primeiro veículo, do atrito do ar ao longo das paredes (superfície molhada), da depressão que se exerce sobre a traseira do comboio, dos turbilhões de ar que surgem entre os veículos da composição e das imperfeições aerodinâmicas dos veículos. A resistência aerodinâmica será pois largamente afectada pela geometria externa das composições, sendo predominante a parte relativa à pressão frontal.

No arranque, para velocidades baixas, a resistência do rolamento e os atritos nas chumaceiras não são comparativamente desprezáveis e, por isso, a resistência dos comboios clássicos, exprime-se por um polinómio completo de segundo grau, mesmo em patamar. A resistência de rolamento pode ser importante no momento do arranque, principalmente se o

comboio esteve estacionado durante muito tempo. Depois com o movimento, as resistências nas caixas de lubrificação tendem a diminuir e a parcela dominante da resistência ao avanço, é a que depende das forças aerodinâmicas, quadráticas na velocidade. Na indicação da resistência dos comboios, é habitual usarem-se ajustamentos empíricos que, para representarem as forças de arranque, o andamento a velocidade baixa e a resistência em curva (devido ao atrito do verdugo contra a face interna do carril da fila alta), incluem termos de ordem zero e unitária. Para não preverem uma resistência exagerada a velocidades médias, diminuem o coeficiente do termo do segundo grau em relação ao que resultaria do cálculo da resistência aerodinâmica (André, 2008).

Compreende-se assim, que as expressões empíricas com a forma de polinómios completos do segundo grau, são próprias para estimar condições de exploração dos comboios convencionais.

No capítulo XII, ponto 12.1, páginas 252 a 254 (André, 2008), é apresentada a evolução de um conjunto de expressões empíricas (dimensionais) que traduzem a resistência ao movimento, numa base comparável. A apresentação tem início na expressão $R = 1,3W + 29N + 0,0045.Wv + 0,0005.Av^2$, deduzida por Davis em 1926 e revista por Tuthill em 1948 e termina com a expressão $R = 1,38 + 0,0064V + 0,0002V^2$, para composições com vagões de mercadorias, usada pela SNCF a partir dos anos 60.

As fórmulas, não contemplam a resistência ao perfil compensado (rampa, pendentos, curvas), nem a força de inércia devido à aceleração, porque estas parcelas se podem calcular sem recorrer a expressões empíricas e não dependem do tipo de material circulante, apenas da massa, do perfil da via-férrea e da aceleração.

Uma das conclusões que podemos retirar da análise efectuada às correlações empíricas, é que a resistência aerodinâmica, assume um peso relevante no valor da resistência para velocidades superiores a 100 km/h (ver figura 3.7). Nesta conformidade, as fórmulas empíricas devem ser utilizadas com cuidado, porque a velocidade relativa à atmosfera é diferente da velocidade absoluta, devido à influência das condições climatéricas⁶.

⁶ A pressão a humidade e o frio tornam o ar mais denso e, portanto agravam a resistência. Ao nível do mar, a massa volúmica do ar varia entre 0,9 e 1,3 Kg/m³. Concluímos que este factor só por si, origina incertezas na ordem de $\pm 15\%$ na força de resistência.

3.5.1.1 – Princípios para concepção das expressões da resistência ao movimento

O valor da resistência ao avanço e, a determinação dos coeficientes que compõem a expressão, é dado por fórmulas de base experimental, obtidas geralmente a partir de ensaios sobre um modelo em túnel aerodinâmico e confirmadas, posteriormente, por ensaios práticos em linha, como o lançamento em deriva das unidades em causa, medindo as desacelerações (em patamar) ou as acelerações (em pendente) assim obtidas.

Na ausência de dados relativos às condições correntes de Portugal, tomaremos os resultados publicados pela SNCF com base na investigação preparatória ao lançamento do TGV na linha Paris-Lyon (Revue Générale des Chemins de Fer – nº 4 de 1976 e nº 1 de 1982).

A expressão que mais rigorosamente exprime a influência dos factores em jogo, tem a forma de um polinómio completo do segundo grau, em que A , B e C , representam coeficientes numéricos dependentes do material e da via-férrea, sendo V a velocidade do comboio em km/h, obtendo-se para a resistência específica a seguinte equação (André, 2008; Castro, 1983; Garreau, 1965; Toledo et al, 1987; Boileau, 1978; Rives, 1983):

$$R_e = A + BV + CV^2 \quad (3.18)$$

Em que, A é independente da velocidade e proporcional à massa total do comboio. O seu valor tem sido reduzido em função da evolução do material (utilização de bogies em vez de caixas de eixos) e da via (utilização de barra longa soldada eliminando as juntas). Representa os atritos nos patamares e as resistências ao rolamento das rodas sobre os carris, em que estas últimas resultam das perdas, que acompanham as deformações elásticas dos metais em contacto. O valor de A é função da massa total do comboio (M toneladas) e da carga média por eixo e da forma e tipo da superfície, introduzindo um coeficiente λ representativo dos factores qualitativos e morfológicos referidos.

Segundo Davis (1926), este valor seria dado por: $0,65 + \frac{13,2}{m}$, em que m (carga por eixo) é superior a 4,5 ton. De acordo com a experiência da SNCF, A é dado por:

$$\lambda \sqrt{\frac{10}{P_a}} \text{ sendo que } \lambda \text{ varia de } 1,3 \text{ a } 1,5 \text{ e em que } (P_a) \text{ representa o peso aderente.}$$

Considerando o avançado estado de degradação da via na RFN, o valor do atrito roda carril aumenta, pelo que, iremos considerar para o cálculo de A :

$$1,5 \sqrt{\frac{10}{P_a}} \quad (3.19)$$

BV – Representa os esforços de atrito dos verdugos das rodas sobre as faces laterais da cabeça do carril, as perdas por histerese mecânica e por amortecimento resultante das oscilações verticais e laterais do veículo (movimento de lacete na linguagem dinâmica de veículos), dependendo da velocidade do veículo e reflectindo a estabilidade da marcha do comboio (índice de conforto) e a qualidade do caminho de rolamento (via).

O parâmetro **B** pode considerar-se proporcional à massa **M** da composição, exprimindo-se por: **B = b.M**

Os valores práticos de **b**, sofreram também alguma evolução no decorrer do tempo, desde a fórmula clássica de Barbier (1896) que considerava $b = 0,0245$ até ao nível hoje considerado normal de **0,01 Kg /ton**, que tomaremos para o valor de **B**. Este valor depende muito da via e da concepção do material circulante.

CV² - Este termo é atribuído à resistência do ar, varia com o quadrado da velocidade e o coeficiente aerodinâmico **C** não é influenciado pela massa **M** da composição. Na prática pode admitir-se: $C = K_1.S + K_2.p.L$ (Castro, 1983). As resistências ao movimento dos comboios têm variações sazonais: o frio aumenta a resistência nas caixas de eixos e a densidade do ar e, por conseguinte, os termos **A e CV²**.

3.5.1.1.1 – Expressões da resistência ao avanço para veículos automotores suburbanos

As fórmulas seguintes são utilizadas para os traçados das marchas em situação climática média. Sendo **R_e** a resistência específica em *kg/ton*, **P_a** o peso por eixo em toneladas e **M** a massa do veículo automotor em carga normal (*ton*).

I – Automotoras eléctricas e diesel

Na sequência do estudo efectuado, a fórmula que utilizamos para os veículos automotores da CP Regional foi:

$$R_e = 1,5 \sqrt{\frac{10}{P_a}} + 0,01 V + \frac{C}{M} V^2 \quad (3.20)$$

C – é determinado para cada tipo (série) de automotora, através da seguinte equação:

$$C = K_1.S + K_2.p.L \quad (3.21)$$

Em que, K_1 é o coeficiente global de forma global das extremidades do comboio (frente + traseira). Determinações experimentais recentes apontam para $K_1 = 20.10^{-4}$ nas composições clássicas (locomotivas e carruagens ou automotoras), podendo descer para metade no caso do TGV; K_2 é o parâmetro que define a rugosidade da superfície molhada (tectos e laterais). Considera-se 22.10^{-6} a 24.10^{-6} para carruagens e **27.10^{-6} a 33.10^{-6} para unidades múltiplas** (automotoras) e $19,5.10^{-6}$ para composições TGV; p representa o perímetro parcial medido de carril a carril em metros (*perímetro molhado*); L o comprimento total da composição (m) e S a projecção da superfície frontal perpendicularmente ao sentido de movimento (m^2).

3.5.1.1.2 – Expressões da resistência ao avanço para as automotoras da CPRG

A Tabela 4.3, reúne um conjunto de valores⁷ relativos aos vários parâmetros das fórmulas (3.20) e (3.21), cuja aplicação nos permitiu obter as expressões da Resistência específica ao avanço, indicadas na Tabela 3.2, para cada série de material, que constituem o parque de material de via larga da CP-Regional. Salienta-se que V , representa a velocidade instantânea do comboio, em km/h.

Séries de Automotoras em serviço na CP Regional	S Superfície Frontal m^2	p Perímetro entre Carris (m)	M Massa em carga normal (ton.)	n Nº de eixos	m Peso por eixo (kg/ton)	L Comp. (m)	K^8 Coeficiente das Massas Rotativas	M' (ton.)
UTE 2240	13,8	11,764	165,6	12	13,80	70,5	1,06	175,5
ALLAN 350	12,7	11,370	64,6	4	16,15	23,6	1,10	71,0
UDD 450	12,0	10,270	113,5	8	14,18	50,5	1,05	119,1
UTD 600	9,3	9,036	171,7	12	14,31	80,0	1,05	180,2

Tabela 3.1 – Parâmetros do material utilizados no cálculo da resistência ao avanço.

A **Resistência Total**, obtém-se através do produto entre R_e e o valor da massa total do comboio:

⁷ Retirados das fichas técnicas do material _ Anexo III-1.

⁸ De acordo com o cálculo efectuado nas secções 4.5.2.1 e 4.5.2.1.1, páginas 55 a 57.

$$R_{(kg)} = M \cdot R_e \quad (3.22)$$

Series de Automotoras	Resistência específica ao avanço: R_e (kg/ton)
UTE 2240	$R_e = 1,27 + 0,01V + 0,00033V^2$ (3.23)
ALLAN 350	$R_e = 1,18 + 0,01V + 0,00055V^2$ (3.24)
UDD 450	$R_e = 1,26 + 0,01V + 0,00037V^2$ (3.25)
UTD 600	$R_e = 1,25 + 0,01V + 0,00024V^2$ (3.26)

Tabela 3.2 – Expressões da resistência específica ao avanço por série de material.

O gráfico da figura 3.7 mostra a variação da resistência ao avanço e das suas componentes em função da velocidade, para uma UTE 2240. Salienta-se a par da baixa resistência específica, a importância da massa da composição no valor da resistência total, peso incrementado em função do gradiente da via, enquanto que o perfil aerodinâmico terá maior expressão para velocidades superiores a 100 Km/h; características que distinguem os transportes ferroviários dos competidores directos.

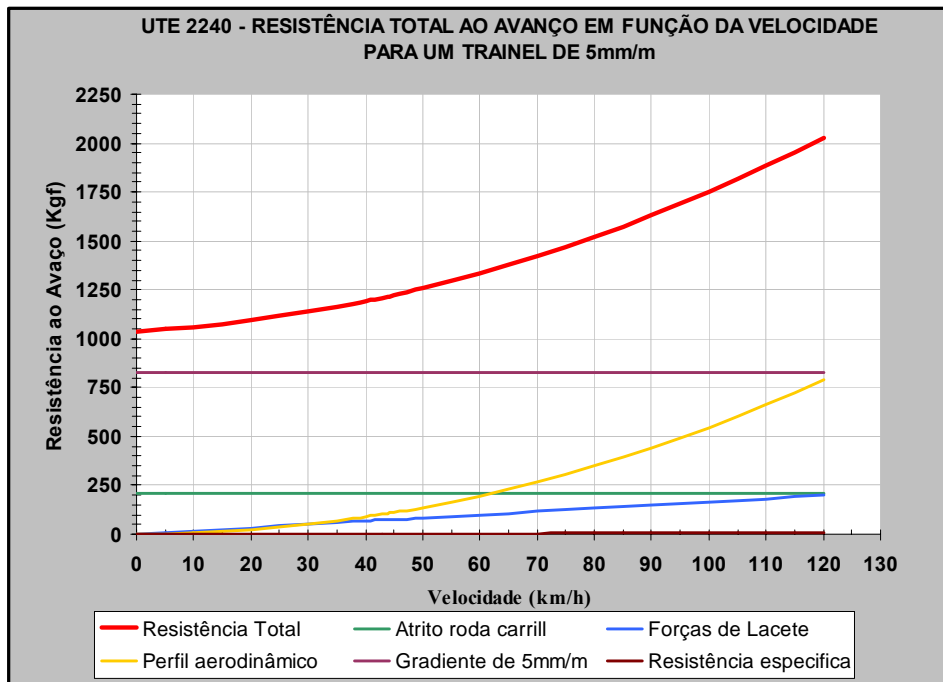


Figura 3.7 - Resistência ao avanço.

O esforço necessário para vencer a resistência ao avanço em velocidade estabilizada é geralmente muito baixo relativamente à massa deslocada, performance que depende da marcha horária do comboio, mas fundamentalmente da infra-estrutura.

3.5.2 – INFLUÊNCIA DA MASSA INÉRCIAL NO ESFORÇO ACELERADOR

De acordo com a equação fundamental da dinâmica, para acelerar um veículo (composição) de massa M , com uma aceleração a , será necessário desenvolver um esforço: $F_{(v)} = M \cdot a$

No entanto, devido à existência de massas em rotação, será necessário majorar M , visto existir um momento de inércia. O momento de inércia I das massas em rotação é devido:

- Ao número de eixos, aos motores de tracção e às transmissões.

A equação fundamental da dinâmica tomará então a forma:

$$F = K.M.a \quad (3.27)$$

Onde K representa o coeficiente de majoração tendo em conta o momento de inércia das massas em rotação.

Vamos utilizar M' (Massa Inercial), ligeiramente superior à massa M do comboio, tendo em conta a influência da inércia das peças animadas de movimento relativo, impacto reflectido através do coeficiente das massas rotativas K , sendo:

$$M' = K.M \quad (3.28)$$

3.5.2.1 – Coeficiente das massas rotativas - K

O coeficiente das massas rotativas é de difícil cálculo, pois implica o conhecimento da geometria e da massa de todos os órgãos rotativos. Além disso, é preciso considerar que a velocidade de rotação de cada massa rotativa, com excepção dos rodados, não depende linearmente da velocidade do veículo. Esta não linearidade introduz uma complexidade acrescida que dificulta a modelação do sistema, por isso, o valor adoptado para o coeficiente, pode ser mais representativo quando estimado em função das características relativas do que quando calculado.

No cálculo do valor de K para um novo tipo de material circulante, constituem referências, a Ficha UIC 544-1 e os valores já calculados para outras séries de material, utilizados pela CP nos cálculos do peso-freio. No anexo F.2 de (UIC, 544-1), é feita uma referência ao coeficiente das massas rotativas, indicando que na ausência de um valor exacto, devem ser

usados valores que variam entre 1,15 para locomotivas até 1,04 para carruagens (valores habitualmente utilizados).

Para composições vulgares, admite-se como coeficiente de inércia o valor de 1,06. Este valor, encontra-se geralmente implícito num certo número de métodos dos traçados de horários. Significa, tomando o valor de 1,06 que, para acelerar uma massa de 1 ton., com uma aceleração de 1 cm/s^2 ($0,01 \text{ m/s}^2$) o **esforço acelerador** necessário será:

$$\frac{M}{g} \times a \times K = \frac{1000}{9,81} \times 0,01 \times 1,06 = 1,08 \text{ kg/ton} \quad (3.29)$$

Considera-se vulgarmente numa primeira aproximação com um erro de 8 % que:

1 cm/s^2 de aceleração exige 1 Kgf/ton de esforço ou seja a resistência correspondente a uma rampa de 1 ‰.

$$1 \text{ cm/s}^2 \cong 1 \text{ kg/ton} = 1 \text{ ‰}$$

3.5.2.1.1 – Coeficientes das massas rotativas para o material da CP Regional

- **ALLAN 350** (Unidade Simples Diesel)

O valor de **1,10** utilizado nesta série de automotoras, foi também indicado pela SAB-WABCO, empresa especializada em sistemas de freio e que fez o cálculo do freio pneumático aplicado na modernização destes veículos. Este valor é relativamente elevado porque a Allan tem muitas massas rotativas: quatro veios de transmissão e quatro motores de tracção, aproximando-se de uma locomotiva dado que todos os seus rodados são motores, para uma massa de 64,6 ton (em carga normal), justificando-se assim o elevado valor do coeficiente **K**;

- **UDD 450** (Unidade Dupla Diesel)

O valor de **K** para as UDD 450 é de **1,05** e justifica-se porque estas automotoras são constituídas por dois veículos, sendo um motor e o outro equivalente a uma carruagem. Os órgãos rotativos destacados são: duas caixas de transmissão, dois veios de transmissão e dois rodados motores, número que constitui 50% dos rodados do veículo motor, para uma

massa total de 113,5 ton. (em carga normal). A média dos coeficientes dos dois veículos perfaz o valor adoptado de $K=1,05$.

- **UTD 600** (Unidade Dupla Diesel)

Para esta série de material temos um $K=1,05$ porque estas automotoras são constituídas por três veículos, dos quais dois motores (os das extremidades) e o intermédio reboque (equivalente a uma carruagem), com uma massa total de 171,7 ton. (em carga normal). Por cada veículo motor, existem dois veios de transmissão e dois rodados motores, sendo um dos rodados movido através do outro o que aumenta a componente rotativa, no entanto a massa deste veículo também é maior, mantendo-se por isso um valor de K igual ao das UDD 450. Refere-se como exemplo adicional, que está em curso um projecto na CP, que consiste em retirar o veículo intermédio, ficando apenas os dois veículos motorizados (na forma UDD), com a redução inerente da massa para cerca de 130 ton (em carga normal), nesta versão, o valor de K sobe para $1,06$ uma vez que o peso das massas rotativas, aumenta relativamente à massa do veículo.

- **UTE 2240** (Unidades Triplas Eléctricas)

Para esta série de material o valor de K é igual a $1,06$. Este valor explica-se pelo facto de estas unidades automotoras com uma massa de 165,6 ton. (em carga normal), terem quatro motores de tracção todos localizados no veículo intermédio, fica assim com um veículo que, pelo facto de possuir todos os rodados motores, se aproxima de uma locomotiva (como no caso da Allan onde $K=1,10$) e dois veículos sem motores, que se aproximam das carruagens ($K=1,04$).

3.6 – CÁLCULO DA ACELERAÇÃO DE TRACÇÃO

Depois do cálculo das expressões da “*Resistência ao avanço*”, reunidas na Tabela 3.2, podemos passar ao cálculo da aceleração de tracção (a), a partir do esforço de tracção em função da velocidade (Anexos III-3). O cálculo analítico foi executado, através da equação (3.16) de movimento de uma composição, para $i = 0$, uma vez que a influência do perfil (rampas e declives), será objecto de cálculo e tabelas específicas (Anexos III-4).

Considerando que o cálculo se repete para as quatro séries de material, optámos por inserir no texto, apenas valores referentes à *Série UTE 2240* na Tabela 3.3, que circulam em toda

a RFN eletrificada. Esta tabela, inclui o valor da resistência total ao avanço e dos espaços e respectivos tempos necessários, para atingir uma dada velocidade, dados obtidos através das equações, (3.30) e (3.31). A informação relativa às séries diesel integra o Anexo III-5.

$$\Delta_t = \frac{\Delta v}{a_m} = \frac{v_2 - v_1}{a_m} \quad (3.30)$$

$$\Delta_e = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_m} \quad (3.31)$$

F (kg)	V (m/s)	V (Km/h)	R (kg)	Esforço Acelerador	a (m/s²)	T (s)	e (m)
11100	0	0	210,31	10889,69	0,600	0	0
11100	1,38	5	219,96	10880,04	0,600	2,30	1,587
11100	2,77	10	232,34	10867,66	0,600	4,62	6,394
11100	4,16	15	247,45	10852,55	0,600	6,93	14,421
11100	5,55	20	265,29	10834,71	0,600	9,25	25,669
11100	6,94	25	285,87	10814,13	0,600	11,57	40,136
11100	8,33	30	309,18	10790,82	0,600	13,88	57,824
11100	9,72	35	335,22	10764,78	0,600	16,20	78,732
11100	11,11	40	363,99	10736,01	0,600	18,52	102,860
11100	11,94	43	382,56	10717,44	0,600	19,90	118,803
10700	12,5	45	395,49	10304,51	0,575	20,85	130,451
9700	13,88	50	429,73	9270,27	0,520	23,37	163,697
8800	15,27	55	466,70	8333,30	0,465	26,20	204,833
8100	16,66	60	506,40	7593,60	0,424	29,32	254,757
7500	18,05	65	548,84	6951,16	0,388	32,75	314,174
7000	19,44	70	594,01	6405,99	0,357	36,48	384,122
6500	20,83	75	641,91	5858,09	0,327	40,54	465,957
6000	22,22	80	692,54	5307,46	0,296	45,00	562,008
5700	23,61	85	745,90	4954,10	0,276	49,87	673,378
5300	25	90	802,00	4498,00	0,251	55,14	801,590
4700	26,38	95	860,83	3839,17	0,214	61,08	954,073
4200	27,77	100	922,39	3277,61	0,183	68,08	1143,666
3750	29,16	105	986,69	2763,31	0,154	76,33	1378,481
3300	30,55	110	1053,71	2246,29	0,125	86,29	1675,961
2800	31,94	115	1123,47	1676,53	0,094	98,99	2072,587
2400	33,33	120	1195,96	1204,04	0,067	116,25	2636,098

Tabela 3.3 – Valores da aceleração em função da velocidade relativos à série UTE 2240.

Com os dados obtidos, construímos o gráfico da figura 3.8, onde podemos observar a variação da aceleração de tracção em função da velocidade e das rampas ($i > 0$). Por exemplo para uma rampa de 15 mm/m a velocidade máxima atingida é 105 km/h.

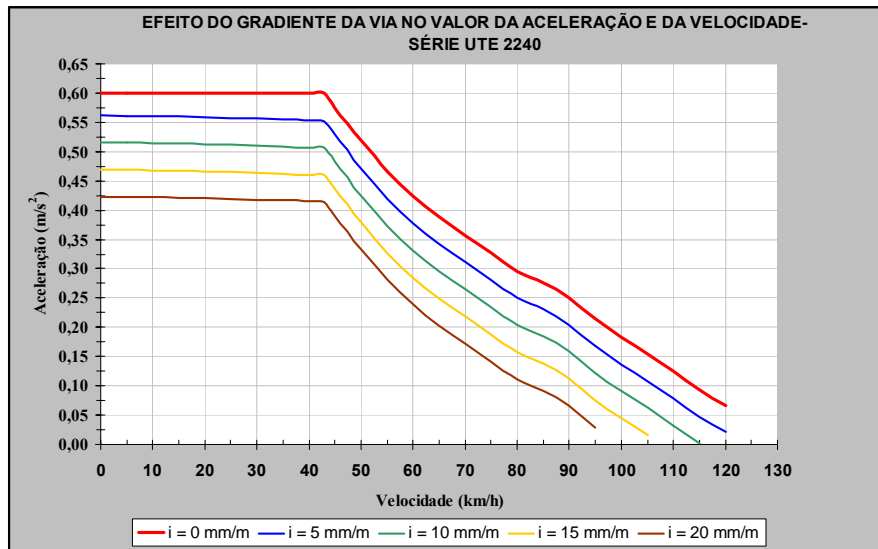


Figura 3.8 – Variação da aceleração de tracção em função da velocidade e do gradiente da via (rampas) no valor da aceleração e da velocidade máxima – UTE 2240.

As rampas, devido à limitação de potência dos motores diesel, imposta pelos conversores de binário, provocam a queda literal do esforço acelerador e das velocidades máximas, evolução que podemos observar na figura 3.9 para a série UDD 450.

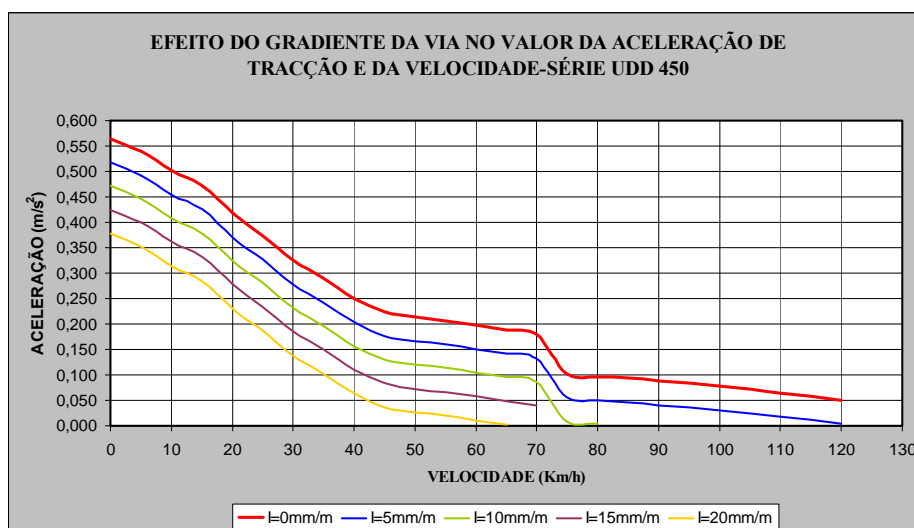


Figura 3.9 – Influência das rampas ($i > 0$) no valor da velocidade máxima – UDD 450.

Para esta série de material, devido à limitação imposta pela da caixa de transmissão (Nico) a velocidade máxima para um trainel de 15 mm/m (perfil frequente na RFN) é de apenas 70 km/h, situação em que as Allan 350 e as UTD 600 não ultrapassam os 65 km/h (Ver Anexo III-5) e por conseguinte menos 35 a 40 km/h comparativamente às UTE 2240.

3.7 – ACELERAÇÃO DE FRENAGEM

Neste ponto não se desenvolve a teoria da frenagem, apresentada em qualquer tratado de caminhos-de-ferro. Referiremos tendo em vista o traçado da marcha-tipo, que durante a frenagem dum composição, o freio embora aplicado de forma faseada, imprime-lhe uma desaceleração constante. Os valores vulgarmente utilizados situam-se entre *0,5 a 0,8 m/s²* conseguindo-se hoje em composições suburbanas valores ligeiramente superiores de 1 m/s². Na operação de frenagem, utiliza-se o freio de serviço (o freio de emergência só é utilizado em situações extremas), exclusivamente pneumático para todas as séries diesel.

Nas automotoras eléctricas, UTE 2240, existe um freio conjugado, que combina a utilização de um freio electrodinâmico com um freio pneumático. Neste modo de frenagem, é dada prioridade ao freio electrodinâmico dos bogies motores (nos bogies não motorizados apenas existe freio pneumático), controlo efectuado por um equipamento denominado “*μMICEF*”. Se o pedido de freio efectuado pelo maquinista através do manípulo de Tracção/Frenagem, ultrapassar a capacidade do freio electrodinâmico, o esforço de frenagem remanescente será produzido pelo freio pneumático, mas só nesta situação ou por avaria do freio electrodinâmico. A desaceleração do comboio, conseguida pela acção do freio electrodinâmico, é obtida através da resistência ao movimento, produzida pela utilização dos motores de tracção como geradores, utilizando a energia cinética do comboio. Grande parte desta energia é aproveitada, no entanto o processo de recuperação de energia, tem uma eficiência baixa e algumas restrições práticas importantes. Normalmente, é preciso transformar a corrente em tensão e frequência, antes de a injectar na catenária; a potência energética fornecida à catenária numa travagem é muito grande e a dissipação por efeito de Joule consome uma fatia significativa da energia disponível na travagem, ou seja, 1/3 auto consumida pelos órgãos auxiliares (A.C., iluminação, compressores, etc.) e da remanescente, 1/3 é perdida devido às perdas nos órgãos auxiliares e no transporte pela catenária, a restante é devolvida à catenária, podendo ser consumida

por outros veículos ou devolvida à EDP. Na prática, normalmente não se consegue reaproveitar por devolução à catenária, mais de 30% da energia cinética (André, 2008).

Promovemos ainda a recolha aleatória e a análise, de alguns registos taquimétricos do *Convel*, sistema que equipa todas as séries de material, de forma a perceber, quais os valores da aceleração de frenagem, praticados em serviço. A recolha dos registos ficou a cargo da Área de Segurança Ferroviária da CP e integram o Anexo III-6. Incidiram sobre situações de frenagem para paragem e para *afrouxar*, utilizando tracção eléctrica e diesel. Esta estratégia possibilitou medir o espaço percorrido pelo comboio com frenagem de serviço e posteriormente relativizá-lo com o espaço percorrido em frenagem de emergência. A figura 3.10 representa a frenagem da UTE 2242 para parar na Azambuja na Linha do Norte e a figura 3.11 a frenagem da UDD 462 para parar em Famalicão na Linha do Minho.

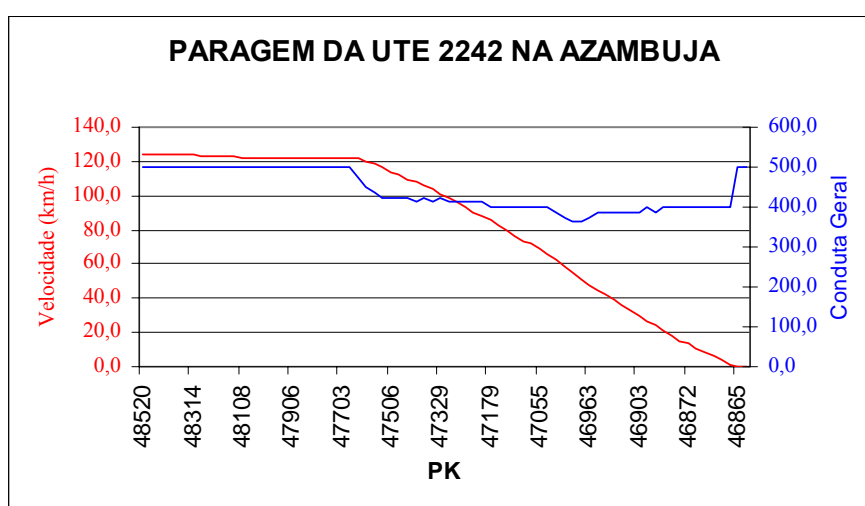


Figura 3.10 – Registo taquimétrico relativo à paragem da UTE 2242.

Após análise da situação reportada no gráfico, concluímos que a UTE 2242 em comboio 4406, quando circulava a 120 km/h, num perfil de via de 0,3 mm/m (portanto em patamar), percorreu 770m até parar na estação da Azambuja, na sequência da aplicação do freio de serviço. Esta distância leva-nos a concluir que a frenagem de serviço, representa cerca de 70% da frenagem de emergência (ver figura 3.12), valor assumido no cálculo do valor das acelerações de frenagem para as séries de material da CPRG (Anexos III-7).

Na situação que envolve a paragem da UDD 462, na estação de Famalicão, quando circulava a cerca de 98 km/h, era previsível que a automotora parasse em cerca de 650m,

para um valor de frenagem de serviço equivalente a 70% da de emergência (Anexos III-7), mas como este exemplo decorreu num sector da via com um perfil de -13 mm/m (pendente), causa da automotora ter percorrido até parar 738m, após ter iniciado a frenagem, dando indicações que a frenagem de serviço, vale 70% da de emergência.

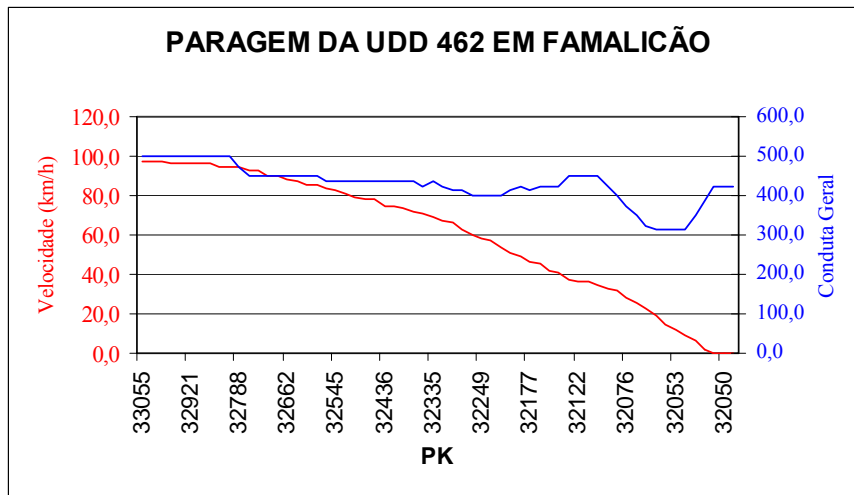


Figura 3.11 – Registo taquimétrico relativo à paragem da UDD 462.

Embora na prática, a frenagem seja efectuada por patamares, a desaceleração é feita de modo contínuo, pelo que, iremos considerar um valor médio, para a aceleração de frenagem. *Da análise efectuada aos gráficos representativos de situações práticas, podemos validar como valor da frenagem de serviço, 70% do valor da frenagem de emergência, para cada uma das séries de material de via larga, que constituem o parque de material da CPRG, valores que passamos a representar na Tabela 3.4..*

Séries de Automotoras	Frenagem Emergência (m/s^2)	Frenagem de serviço (m/s^2)
UTE 2240	1,1	0,77
ALLAN 350	0,81	0,56
UDD 450	0,94	0,65
UTD 600	0,71	0,50

Tabela 3.4 – Valores das frenagens de emergência e de serviço relativas às automotoras de via larga do parque de material da CPRG.

Tendo como referência o valor da frenagem de serviço das UTE 2240, foi construída a Tabela 3.5, objectivando aferir a percentagem do freio electrodinâmico face ao valor total da aceleração de frenagem (freio conjugado), em função da velocidade do comboio.

A percentagem de freio electrodinâmico utilizado, corresponde ao potencial de energia recuperada, da qual, apenas 2/3 são aproveitados (auto consumo e devolução à catenária).

Numa primeira análise à Tabela 3.5, iremos avaliar a percentagem média de freio electrodinâmico aplicado na frenagem de serviço e por conseguinte a percentagem média de energia recuperada. Então para o intervalo de velocidade compreendido entre os 120 e 60 km/h, delta que engloba uma parte significativa das situações reais:

$$\% \text{ Energia recuperada (120/60)} = 28,24 \%$$

F (kgf)	V (km/h)	Freio conjugado a (m/s²)	Freio Dinâmico a_d (m/s²)	% Energia aproveitada	T (s)	e (m)
5000	120	0,77	0,2124	0,1838	0	0
5285	115	0,77	0,2323	0,2011	1,81	61,42
5580	110	0,77	0,2527	0,2187	3,61	120,33
5893	105	0,77	0,2739	0,2371	5,42	176,74
6473	100	0,77	0,3099	0,2683	7,22	230,63
6982	95	0,77	0,3418	0,2959	9,03	282,02
7500	90	0,77	0,374	0,3238	10,82	330,53
7500	85	0,77	0,374	0,3238	12,62	376,92
7500	80	0,77	0,374	0,3238	14,43	420,79
7500	75	0,77	0,374	0,3238	16,23	462,16
7500	70	0,77	0,374	0,3238	18,04	501,01
7500	65	0,77	0,374	0,3238	19,84	537,36
7500	60	0,77	0,374	0,3238	21,65	571,20
7500	55	0,77	0,374	0,3238	23,45	602,53
7500	50	0,77	0,374	0,3238	25,26	631,35
7500	45	0,77	0,374	0,3238	27,05	657,46
7500	40	0,77	0,374	0,3238	28,86	681,28
7500	35	0,77	0,374	0,3238	30,66	702,56
7500	30	0,77	0,374	0,3238	32,47	721,39
7500	25	0,77	0,374	0,3238	34,27	737,68
7500	20	0,77	0,374	0,3238	36,08	751,47
7500	15	0,77	0,374	0,3238	37,88	762,74
7500	10	0,77	0,374	0,3238	39,69	771,50
0	0	0,77	0,187	0,1619	43,29	786,45

Tabela 3.5 – Peso relativo do freio electrodinâmico face ao valor do freio conjugado em função da velocidade do comboio.

Se alargarmos o intervalo até aos 10 km/h, valor a partir do qual o freio electrodinâmico deixa de actuar e a frenagem é totalmente pneumática, obtemos:

$$\% \text{ Energia recuperada (120/10)} = 30,04 \%$$

Dando sequência ao raciocínio apresentado e através de uma média ponderada chegamos a 0,29 (29%) como sendo factor representativo da energia recuperada. Assim, iremos utilizar **0,71 como factor de correcção, no modelo de cálculo de ΔW_R , apenas para comboios feitos com UTE's 2240, ou seja, para a RFN electrificada.**

Os valores da energia aproveitada, são consolidados através dos dados recolhidos do *SAP*, onde para o período de um ano, se registou o valor médio tomado por unidade de 6,7 Kwh para um valor médio de energia devolvida à catenária de 1,68 Kwh ver Anexo III-8.

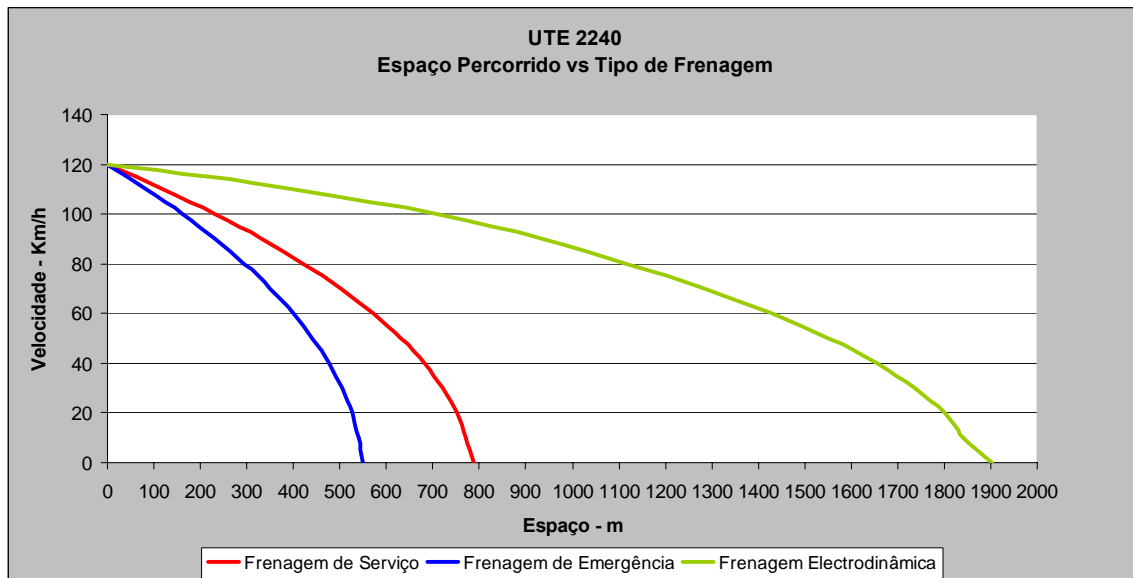


Figura 3.12 – Espaço percorrido por uma UTE 2240 até parar, em função da velocidade e do tipo de freio.

Este valor representa cerca de 25% da energia tomada, sendo a remanescente consumida pelos órgãos auxiliares.

O gráfico da figura 3.12, compara o espaço percorrido por uma UTE 2240 (em carga normal) até parar, utilizando a frenagem de serviço (786,5 m), com o espaço percorrido utilizando a frenagem de emergência (550,5m). Por outro lado, permite observar como se

comportaria a UTE se só fosse aplicada a frenagem electrodinâmica. As curvas relativas às restantes séries, constituem os (Anexos III-7).

3.8 – TRAÇADO DA MARCHA-TIPO DE UM COMBOIO

O estudo da dinâmica do transporte ferroviário baseia-se nos diferentes métodos, gráficos ou numéricos (computacionais), para integração da equação diferencial que rege o movimento do comboio. A marcha do comboio, tanto a ordinária como a extraordinária, fica representada por uma curva $e(t)$.

Para a execução de um plano de exploração de uma via-férrea, os *gráficos de horário* são uma ferramenta acessível e hoje tratada em computador. A marcha de cada comboio é representada pelo número da circulação, ímpares nas ascendentes e par nas descendentes.

Neste ponto, pretendemos fazer referência à metodologia que permite fazer o traçado da curva da velocidade em função do percurso, obtendo também os tempos gastos. Faremos referência ao método analítico, uma vez que, relativamente ao gráfico, é mais compreensível. Para estabelecer uma marcha-tipo é necessário definir:

- Cargas máximas permitidas;
- Lei de paragens;
- Resistências ao avanço da composição que constitui o comboio,
- Coeficientes de inércia das massas rotativas do material do comboio;
- Limites de velocidade para a linha;
- Velocidade máxima do material;
- Desacelerações;

Neste capítulo aprendemos a calcular o valor da aceleração, a . Como:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2e}{dt^2} \quad (3.32)$$

Conclui-se que qualquer dos métodos, analítico, gráfico ou mecânico, consiste em determinar:

$$v = \int a.dt \quad (3.33)$$

$$e = \int v.dt \quad (3.34)$$

3.8.1- MÉTODO ANALÍTICO

Este método sendo o mais primitivo, é o que hoje se utiliza nos computadores. O cálculo baseia-se em tomar um passo de integração Δv calculando a aceleração a_m num dado troço, permitindo:

- Obter V_2 a partir dum V_1 inicial:

$$v_2 = v_1 + a_m \cdot \Delta t \quad (3.35)$$

- Obter Δt correspondendo ao Δv considerado:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a_m} = \frac{v_2 - v_1}{a_m} \quad (3.36)$$

- Espaço percorrido Δe :

$$\Delta e = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \cdot \Delta t = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{v_2 - v_1}{a_m} \right) \Leftrightarrow \Delta e = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_m} \quad (3.37)$$

Graficamente significa:

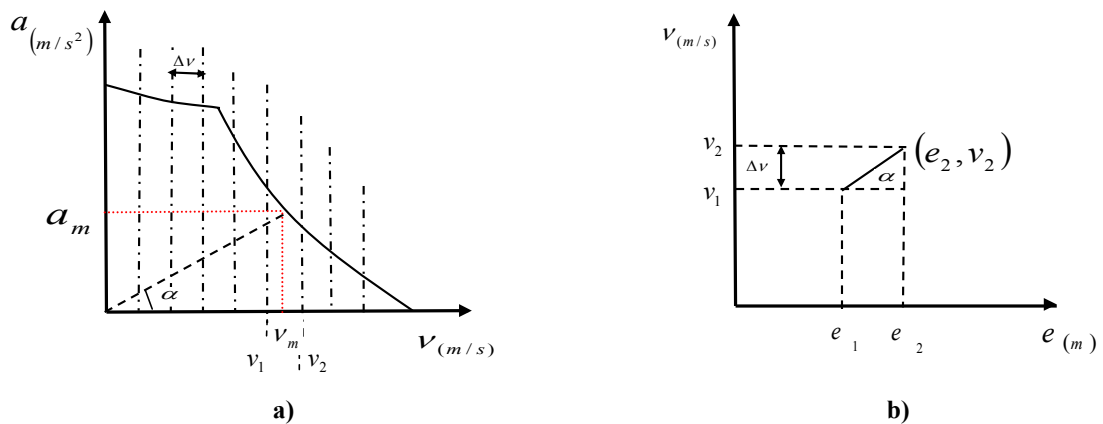


Figura 3.13 – O gráfico **a)**, exemplifica como se processa o cálculo da aceleração para uma dada velocidade instantânea. O gráfico **b)**, utiliza a integração feita em **a)**, exemplifica o modo de localização do veículo, para uma dada velocidade.

Analiticamente, no plano $v = f(e)$ os pontos são obtidos atendendo:

- $\Delta v = a_m \cdot \Delta t$ e uma vez que $\Delta e = v_m \cdot \Delta t$, obtemos:

$$\Delta v = \frac{a_m}{v_m} \cdot \Delta e \quad (3.38)$$

Como $\frac{a}{v} = \text{tg } \alpha$ \therefore No plano $v = f(e)$ podemos definir o ponto (e_2, v_2) .

Com a teoria desenvolvida neste capítulo e as tabelas desenvolvidas para este efeito (Anexo III-5), foi concebida uma marcha tipo, que se exemplifica na figura 3.14 (ver Anexo III-9) para cada uma das linhas da RFN, com suporte nas expressões (3.16), (3.30) e (3.31), nas características do material utilizado, no sentido, na lei de paragens do comboio e no perfil compensado. ***Torna-se assim possível, conhecer a velocidade de qualquer comboio em qualquer ponto da RFN, elemento fundamental para prosseguirmos o nosso estudo.***

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
SectionID	Km1	Km2	Profile	Radius	Type	DOIni	DOEnd	PKIni	PKEnd	Comp Profile	NodeID	NodeName	TVM	Extensão	a (m/s ²)	V _{inicial} (m/s)	V _{final} (m/s)	V _{final} (km/h)	T (s)
6	46,893	55,323	0	0	2	46,893	46,893	55,323	55,323		9408474	LIVRAÇÃO	60	0	0	0	0	0	0
6	46,949	55,379	-0,1	0	1	46,949	46,969	55,379	55,399	-0,1			60	0,02	0,59363	0	4,8725	18	8,20935
6	46,969	55,399	-0,1	250	1	46,969	47,115	55,399	55,545	3,1			60	0,146	0,41981	4,8725	12,097	44	17,2078
6	47,115	55,545	-15,2	250	0	47,115	47,149	55,545	55,579	-1,2			60	0,034	0,36104	12,097	13,046	47	2,70459
6	47,149	55,579	-15,2	0	1	47,149	47,289	55,579	55,719	-15,2			60	0,14	0,34815	13,046	16,361	59	9,52161
6	47,289	55,719	-15,2	394	1	47,289	47,305	55,719	55,735	-13,17			90	0,016	0,28891	16,361	16,641	60	0,96964
6	47,305	55,735	-13,9	394	0	47,305	47,397	55,735	55,827	-11,87			90	0,092	0,27135	16,641	18,079	65	5,29953
6	47,397	55,827	-15,7	394	0	47,397	47,612	55,827	56,042	-13,67			90	0,215	0,27281	18,079	21,075	76	10,9822
6	47,612	56,042	-14,9	394	0	47,612	47,653	56,042	56,083	-12,87			90	0,041	0,23447	21,075	21,526	77	1,92481
6	47,653	56,083	-14,9	407	1	47,653	47,737	56,083	56,167	-12,93			90	0,084	0,23248	21,526	22,415	81	3,82324
6	47,737	56,167	-12,3	407	0	47,737	47,822	56,167	56,252	-10,33			90	0,085	0,1998	22,415	23,161	83	3,73005
6	47,822	56,252	-13,1	407	0	47,822	47,979	56,252	56,409	-11,13			90	0,157	0,20674	23,161	24,522	88	6,58522
6	47,979	56,409	-11,5	407	0	47,979	48,077	56,409	56,507	-9,53			90	0,098	0,18277	24,522	25	90	3,95784
6	48,077	56,507	-12,6	407	0	48,077	48,167	56,507	56,597	-10,63			90	0,09	0,18782	25	25	90	3,6
6	48,167	56,597	-12,6	0	1	48,167	48,269	56,597	56,699	-12,6			90	0,102	0,20623	25	25	90	4,08
6	48,269	56,699	-12,6	485	1	48,269	48,429	56,699	56,859	-10,95			90	0,16	0,19081	25	25	90	6,4
6	48,429	56,859	-11,2	485	0	48,429	48,557	56,859	56,987	-9,55			90	0,128	0,17772	25	25	90	5,12
6	48,557	56,987	0	485	0	48,557	48,729	56,987	57,159	1,65			90	0,172	0,07303	25	25	90	6,88
6	48,729	57,159	0	0	1	48,729	49,149	57,159	57,579	0			90	0,42	0,08846	25	25	90	16,8
6	49,149	57,579	0	760	1	49,149	49,195	57,579	57,625	1,05			90	0,046	0,07864	25	25	90	1,84
6	49,195	57,625	11,4	760	0	49,195	49,335	57,625	57,765	12,45			90	0,14	-0,0279	25	24,843	89	5,61762
6	49,335	57,765	11,3	760	0	49,335	49,444	57,765	57,874	12,35			90	0,109	-0,0244	24,843	24,736	89	4,397
6	49,444	57,874	12,6	760	0	49,444	49,549	57,874	57,979	13,65			60	0,105	-0,0365	24,736	16,667	60	5,07213
6	49,549	57,979	12,6	0	1	49,549	49,623	57,979	58,053	12,6			60	0,074	0,04262	16,667	16,667	60	4,44
6	49,623	58,053	11,4	0	0	49,623	49,749	58,053	58,179	11,4			60	0,126	0,05384	16,667	16,667	60	7,56
6	49,749	58,179	11,4	271	1	49,749	49,889	58,179	58,319	14,35			60	0,14	0,02627	16,667	16,667	60	8,4
6	49,889	58,319	12,2	271	0	49,889	50,107	58,319	58,537	15,15			60	0,218	0,01879	16,667	16,667	60	13,08
6	50,107	58,537	13,1	271	0	50,107	50,21	58,537	58,64	16,05			60	0,103	0,01038	16,667	16,667	60	6,18
6	50,21	58,64	11,3	271	0	50,21	50,257	58,64	58,687	14,25			60	0,047	0,0272	16,667	16,667	60	2,82
6	50,257	58,687	12,4	271	0	50,257	50,299	58,687	58,729	15,35			60	0,042	0,01692	16,667	16,667	60	2,52
6	50,299	58,729	12,4	0	1	50,299	50,339	58,729	58,769	12,4			60	0,04	0,04449	16,667	16,667	60	2,4
6	50,339	58,769	12,4	379	1	50,339	50,615	58,769	59,045	14,51			80	0,276	0,02477	16,667	17,072	61	16,3611

Figura 3.14 – Exemplo de marcha tipo de um comboio regional, a circular entre as estações de Livração e Marco de Canavezes, na Linha do Douro, sentido ascendente.

CAPÍTULO IV

CUSTO ASSOCIADO ÀS LIMITAÇÕES DE VELOCIDADE

4.1 - ENQUADRAMENTO

Como iremos ver ao longo desta secção, devido à elevada massa de um comboio, **cada afrouxamento a que um comboio fica sujeito tem um custo elevado**, não só por efeito da **dissipação de energia (Diesel/eléctrica)**, mas também pelo **desgaste do Material Circulante**, bem como, pelo **custo extra com o Pessoal**.

No nosso estudo, considerámos entrar os seguintes custos associados a cada afrouxamento de um determinado comboio:

- Custo do **diesel/energia eléctrica** gastos nos processos de travagem e posterior recuperação da velocidade;
- Custo da **manutenção e da amortização do material circulante** envolvido, inerente ao desgaste sofrido no tempo extra provocado pelo afrouxamento;
- Custo do **Pessoal do Comboio** durante esse mesmo tempo.

O cálculo do **consumo extra** provocado por um afrouxamento, na marcha de um comboio, é efectuado em função do comboio em causa e de características associadas ao próprio afrouxamento. O consumo é também função da velocidade de marcha de que o comboio vinha animado (V_0) e da velocidade imposta pela limitação de velocidade (V_A) (vulgo afrouxamento) e posterior recuperação para a velocidade máxima permitida em cada situação (V_M), finda a extensão do afrouxamento (ver secção 3.2.1 e figura 3.1).

Temos então que ter em conta, num caso de afrouxamento, as seguintes **fases**:

- Desaceleração da velocidade de marcha até à velocidade reduzida imposta na zona de afrouxamento;

- Passagem, à velocidade reduzida, na extensão de afrouxamento;
- Aceleração, após a zona de afrouxamento, para recuperação da velocidade de marcha inicial (na maioria das situações) ou para atingir a velocidade possível, permitida pela infra-estrutura ou pelo material (a que for mais restritiva), tendo também em consideração a lei de paragens.

As variáveis que nos permitem caracterizar o custo implicado por um determinado *afrouxamento* são:

- A velocidade de marcha do comboio (V_o);
- A velocidade imposta durante o afrouxamento (V_A);
- A massa total do comboio em carga normal (M);
- A extensão do afrouxamento (L_A) expressa em metros;
- A velocidade máxima permitida (V_M) para tentar a recuperação;
- A aceleração de frenagem (a_f);
- A aceleração de tracção (a);

Tendo em consideração, o elevado número de afrouxamentos existentes na RFN e as centenas de comboios envolvidos, bem como, as características específicas da linha e do material circulante; implementamos em computador um simulador que permite efectuar o cálculo dos custos associados, a cada caso, valores que serão detalhados por linha, sentido e comboio.

Na secção seguinte efectuamos a demonstração das expressões numéricas que permitem a implementação do simulador, que é utilizado nas secções seguintes, para cada série de material.

Os valores das acelerações a utilizar em cada uma das situações, serão:

Os valores calculados no capítulo III, respectivamente nas secções 3.6 e 3.7 (ver respectivos Anexos). Considerámos ainda, que a recuperação do tempo perdido em função da restrição de velocidade, é realizada à velocidade máxima permitida para a circulação, V_M ; e designámos por L_r , o percurso necessário efectuar a esta velocidade, para recuperar o tempo perdido no afrouxamento. Caso as características intrínsecas à infra-estrutura e ao material, não permitam esta situação, então o comboio perde tempo face ao programado,

com reflexo no índice de pontualidade, caso o tempo acumulado, exceda a margem de regularidade.

4.2- CÁLCULO DO ACRÉSCIMO DE ENERGIA ASSOCIADO A UM AFROUXAMENTO.

De acordo com a equação geral do movimento, (equações 3.13 a 3.16), a deslocação de qualquer veículo, exige que lhe seja aplicado um esforço de tracção - F , relacionado com a massa M do móvel e com a velocidade instantânea. Na prática os sistemas de transporte desenvolvem-se em circuito fechado, ou seja, em regra, todos os veículos acabam por regressar ao ponto de partida, premissa considerada no cálculo do fluxo energético, associado a uma situação de “afrouxamento” que consiste num objectivo deste trabalho. Assim sendo, a energia total absorvida na propulsão por um dado sistema é dado por (Castro, 1988a):

$$W = \oint F . dx = \oint \left[M . R_e + Mg . sen \alpha + \frac{M'}{g} . \frac{dV}{dt} . 10^3 \right] . dx \quad (4.1)$$

Já que as variações de energia cinética (termo $\frac{dV}{dt}$) e potencial (termo em $sen\alpha$) se anulam num integral cíclico (Castro, 1988a), ficando apenas os termos que respondem pela energia dissipada temos:

$$W = \oint [M . \bar{R}] dx \quad (4.2)$$

De acordo com esta perspectiva, torna-se necessário sublinhar que \bar{R} , terá de incluir as resistências da frenagem, quando aplicada e, ainda, as fricções parasitas que emergem do perfil do traçado percorrido.

De acordo com o demonstrado no Capítulo III, a expressão da resistência ao avanço, para qualquer série de material do parque da CPRG, é do tipo:

$$R_e = A + B.v + C.v^2$$

O acréscimo de energia consumida (nas rodas), que corresponde à energia que o afrouxamento obriga a dissipar suplementarmente, é, à parte constantes dimensionais:

$$\Delta W_R \cong \frac{1}{\eta} \left\{ \begin{array}{l} \text{(Energia dissipada na travagem de } V_0 \text{ para } V_A) + \\ \text{(Energia para vencer a resist\^encia ao avan\c{c}o : } V_M \text{ em vez de } V_0) \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Em que η , representa o rendimento dos equipamentos, abrangendo tamb\^em no caso do material de trac\c{c}o el\^etrica, as perdas de carga entre a central geradora e o contador da automotora. De acordo com (4.2), obtemos:

- Para $v_0 = cte$:

$$W_{v_0=cte} = M (A + B.v_0 + C.v_0^2) L_\Gamma \quad (4.4)$$

- Para $v_M = cte$:

$$W_{v_M=cte} = F.d = M(A + B.v_M + C.v_M^2) L_\Gamma \quad (4.5)$$

Ent\^ao ΔW , \^e dado por:

$$\Delta W = [B.(v_M - v_0) + C.(V_M^2 - V_0^2)] L_\Gamma . M \quad (4.6)$$

O fluxo energ\^etico, resultante do afrouxamento, \^e dado ent\^ao por:

$$\Delta W_R \cong \frac{1}{2} M' (V_0^2 - V_A^2) + M [B.(v_M - v_0) + C.(V_M^2 - V_0^2)] L_\Gamma \quad (4.7)$$

Onde M' representa a massa total do comboio, corrigida devido \^a in\^ercia das massas rotativas.

4.2.1 – C\^ALCULO DE L_Γ .

O diagrama cinem\^atico, que resulta do movimento do comboio, quando submetido a um afrouxamento, est\^a representado na figura 4.1:

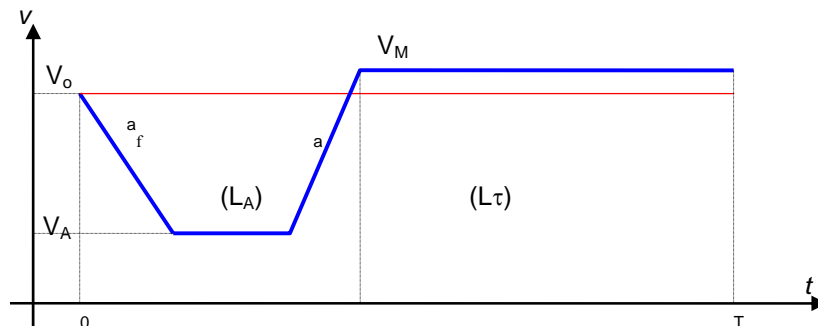


Figura 4.1 – Diagrama cinemático do movimento.

A partir das fórmulas (3.31) e (3.30) e aplicando-as ao diagrama da figura 4.1, obtemos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_0^2 - V_A^2}{2a_f} + L_A + \frac{V_M^2 - V_A^2}{2a} + L_\Gamma = V_0 T \\ \frac{V_0 - V_A}{a_f} + \frac{L_A}{V_A} + \frac{V_M - V_A}{a} + \frac{L_\Gamma}{V_M} = T \end{array} \right. \quad (4.8)$$

A 1ª equação traduz os espaços percorridos: a primeira parcela representa a *distância de travagem* para passar de V_0 até V_A , a segunda, a *extensão do afrouxamento* percorrido à velocidade constante V_A , a terceira a *distância para alcançar a velocidade máxima permitida*, V_M , necessária para recuperar o tempo perdido e finalmente a quarta, a *extensão percorrida à velocidade constante* V_M para recuperar o tempo perdido. Note-se que o resultado, no que respeita ao andamento do comboio, deverá ser equivalente a ter percorrido todo esse espaço, durante esse mesmo tempo T , mas à velocidade V_0 .

A 2ª equação, é a *equação dos tempos*: tempo de travagem, tempo de percurso da extensão de afrouxamento, tempo para alcançar a velocidade máxima permitida e tempo de recuperação do atraso a essa mesma velocidade, cuja soma será o tempo total, T .

Através da simplificação do sistema obtemos (ver resolução no Anexo IV-1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{-\frac{a}{a_f} V_0^2 - \frac{a+a_f}{a_f} V_A^2 + \frac{2a+2a_f}{a_f} V_A V_0 + V_M^2 - 2V_M V_0}{2a} = \frac{L_A(V_0 - V_A)}{V_A} + \frac{L_\Gamma(V_0 - V_M)}{V_M} \\ \text{_____} \end{array} \right.$$

$$\text{Fazendo, } \frac{V_M}{V_0} = \varphi \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{2a} \left[V_0^2 (\varphi^2 - 2\varphi) - \frac{a}{a_f} V_0^2 - \frac{a+a_f}{a_f} V_A^2 + \frac{2a+2a_f}{a_f} V_A V_0 \right] = L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} + L_\Gamma \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right)$$

$$L_\Gamma \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) = \frac{1}{2a} \left[V_0^2 (2\varphi - \varphi^2) + \frac{a}{a_f} V_0^2 + \frac{a+a_f}{a_f} V_A^2 - \frac{2a+2a_f}{a_f} V_A V_0 \right] + L_A \left(\frac{V_0 - V_A}{V_A} \right)$$

Então,

$$L_\Gamma \cong \frac{\varphi}{\varphi - 1} \left[\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} + \frac{a+a_f}{2a \cdot a_f} V_A^2 - \frac{a+a_f}{a \cdot a_f} V_A V_0 + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right] \quad (4.10)$$

Tratando-se de uma paragem durante o tempo $T_{Parag.}$, em vez de um afrouxamento, teremos $V_A=L_A=0$. Como $L_A/V_A=T_{Parag.}$, então, a expressão (4.10) simplifica-se para:

$$L_\Gamma \cong \frac{\varphi}{\varphi - 1} \left[\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} + T_{Parag.} \cdot V_0 \right] \quad (4.11)$$

Substituindo a expressão de L_Γ na equação do acréscimo de consumo (nas rodas), teremos assim, para o “**Afrouxamento**”:

$$\Delta W_R \cong \frac{1}{2} M' (V_o^2 - V_A^2) + M [B \cdot (v_M - v_o) + C \cdot (V_M^2 - V_o^2)] L_\Gamma \Leftrightarrow \quad (4.12)$$

$$\Delta W_R \cong \frac{1}{2} M' (V_o^2 - V_A^2) + M [B V_o \varphi + C V_o^2 (\varphi + 1) \varphi] \left[\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} + \frac{a+a_f}{2a \cdot a_f} V_A^2 - \frac{a+a_f}{a \cdot a_f} V_A V_0 + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right] \quad (4.13)$$

No caso de uma Paragem, teremos pois:

$$\Delta W_R \cong \frac{1}{2} M V_0^2 + M \varphi [B V_0 + C V_0^2 (\varphi + 1)] \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} + T_{Parag.} V_0 \right) \quad (4.14)$$

Este acréscimo de energia resultante do afrouxamento (ou paragem), exprime-se em **joules**, (Watt×segundo), admitindo que a massa (M), se exprime em **kg**, as velocidades em **m/s**, as acelerações em **m/s²**, o tempo, T_A em **segundos** e a extensão do afrouxamento, L_A em **metros**.

4.2.2 – CONVERSÃO DE UNIDADES PARA OBTENÇÃO DO VALOR DA ENERGIA EM KWH

Neste ponto vamos introduzir as *constantes dimensionais* e exprimir o acréscimo de energia ΔW_R , em **Kwh**, considerando as outras grandezas nas suas unidades habituais, isto é, **M'** e **M** em **toneladas**, V_0 e V_A em **km/h**, os factores de conversão de unidades serão:

$$\text{Massa: } 1 \text{ Tonelada} = 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{Velocidade: } 1 \text{ km/h} = 10^3 \text{ m}/3600 \text{ s} \cong 0,27778 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidade}^2: 1 \text{ (km/h)}^2 = (10^3 \text{ m})^2 / (3600 \text{ seg})^2 = 0,077 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\text{Energia} \quad \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \times \text{seg} = 10^{-3} \text{ Kw} \times (1/3600) \cdot \text{h} = 2,7778 \times 10^{-7} \text{ Kwh} \\ 1 \text{ Kwh} = 3.600.000 = 36 \times 10^5 \text{ joule} \end{array} \right.$$

A constante **B** exprime-se em $(\text{Kg/ton}) \times (\text{kw/h})^{-1}$ e a constante **C** exprime-se em $(\text{Kg/ton}) \times (\text{Kw/h})^{-2}$, sendo **1 Kg = 9,8Newton**.

Assim, teremos ainda os seguintes factores de conversão:

- Série UTE 2240 ($M'=1,06$):

$$1^{\text{a}} \text{ Parcela: } \frac{1}{2} \times (1,06 \times 10^3) \times \left(\frac{10^3 \times 10^3}{3600 \times 3600} \right) \times \frac{1}{3600000} = 1,136 \times 10^{-5}$$

- Série ALLAN 350 ($M'=1,10$):

$$1^{\text{a}} \text{ Parcela: } \frac{1}{2} \times (1,10 \times 10^3) \times \left(\frac{10^3 \times 10^3}{3600 \times 3600} \right) \times \frac{1}{3600000} = 1,1788 \times 10^{-5}$$

- Séries UDD 450 e UTD 600 ($M'=1,05$):

$$1^{\text{a}} \text{ Parcela: } \frac{1}{2} \times (1,05 \times 10^3) \times \left(\frac{10^3 \times 10^3}{3600 \times 3600} \right) \times \frac{1}{3600000} = 1,1252 \times 10^{-5}$$

Para qualquer série de material:

$$1^{\circ} \text{ Factor da } 2^{\text{a}} \text{ parcela: } 10^3 \times \left(\frac{10^3}{3600} \right) \times \left(\frac{9,8}{10^3} \times \frac{3600}{10^3} \right) \times \frac{1}{3600000} = 2,722 \times 10^{-6}$$

$$2^{\circ} \text{ Factor da } 2^{\text{a}} \text{ parcela: } 10^3 \times \left(\frac{10^3 \times 10^3}{3600 \times 3600} \right) \times \left(\frac{9,8}{10^3} \times \frac{3600 \times 3600}{10^3 \times 10^3} \right) \times \frac{1}{3600000} = 2,722 \times 10^{-6}$$

Aplicando-os na fórmula do *Afrouxamento, para as UTE 2240*, teremos em *Kwh*:

$$\Delta W_R \cong M \left\{ 1,136 \times 10^{-5} (V_0^2 - V_A^2) + [2,722 \times 10^{-6} \varphi (BV_0 + CV_0^2 (\varphi + 1))] \left[0,077 \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} + \frac{a+a_f}{2a.a_f} V_A^2 - \frac{a+a_f}{a.a_f} V_A V_0 \right) + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right] \right\} \quad (4.15)$$

e, na fórmula da *Paragem*, em que $V_A = 0$:

$$\Delta W_R \cong M \left\{ 1,136 \times 10^{-5} V_0^2 + [2,722 \times 10^{-6} \varphi (BV_0 + CV_0^2 (\varphi + 1))] \left[0,077 \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{2a_f} \right) + 0,278 T_{Parag} \cdot V_0 \right] \right\} \quad (4.16)$$

4.3 – AVALIAÇÃO DO VALOR DO ACRÉSCIMO DE ENERGIA

Vamos utilizar alguns exemplos reais da rede electrificada, onde circulam as UTE 2240, nomeadamente na Linha do Norte e particularizar um pouco estas expressões.

4.3.1 – 1º Exemplo: Linha do Norte – Sentido Descendente entre o Pk 94 e o Pk 90,75

- Comboio formado por uma UTE 2240;
- Massa em carga normal: $M = 165,6$ toneladas;
- Extensão do Afrouxamento: $L_A = 3247$ metros;
- Velocidade inicial (quando inicia a frenagem): $V_0 = 120$ km/h;
- Limitação de velocidade imposta pelo afrouxamento: $V_A = 80$ km/h;
- Velocidade máxima que a UTE 2240 atinge em função do perfil da via e da lei de paragens: $V_M = 100$ km/h;
- Velocidade máxima permitida pela via-férrea (TVM): $V_{Mvia} = 140$ km/h;
- $B = 0,01$ (Kg/ton). (Kw/h)⁻¹ e $C = 0,00033$ (Kg/ton). (Kw/h)⁻²
- $\varphi = \frac{V_M}{V_0} = 0,84$
- $a_f = 0,77$ m/s² (Valor retirado da Tabela 3.4)
- $a = \frac{\Delta V}{\Delta T} = 0,240$ m/s² (Valores de ΔV e ΔT , retirados da Tabela 3.3)

Factor correctivo devido à frenagem dinâmica (energia devolvida à catenária) = 0,71 (aplicado apenas à primeira parcela).

O acréscimo de energia, em Kwh, será dado por:

$$\Delta W_R \cong M \left[0,71 \times 1,136 \cdot 10^{-5} (V_0^2 - V_A^2) + (2,2864 \times 10^{-8} V_0 + 1,3883 \times 10^{-9} V_0^2) \left(0,2063 V_0^2 + 0,2104 V_A^2 - 0,4208 V_A V_0 + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right) \right]$$

$$\Delta W_R \cong 17,84 \text{ Kwh}$$

4.3.2 – 2º Exemplo: Linha do Norte - Sentido Descendente entre Pk 332,45 e Pk 332,40

Mantendo o tipo de material, mas agora para uma limitação de velocidade $V_A = 30 \text{ km/h}$ e

uma extensão do afrouxamento $L_A = 50 \text{ metros}$, $V_M = 100 \text{ km/h}$, $\varphi = 0,84$ e $a = \frac{\Delta V}{\Delta T} =$

$0,244 \text{ m/s}^2$, enquanto que os restantes valores se mantiveram constantes face ao 1º exemplo, então:

$$\Delta W_{R2} \cong M \left[0,71 \times 1,136 \cdot 10^{-5} (V_0^2 - V_A^2) + (2,2864 \times 10^{-8} V_0 + 1,3883 \times 10^{-9} V_0^2) \left(0,2037 V_0^2 + 0,2077 V_A^2 - 0,4159 V_A V_0 + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right) \right]$$

$$\Delta W_{R2} \cong 24,65 \text{ Kwh}$$

Para termos uma ideia do impacto da massa do comboio no valor da energia gasta, exemplificamos para o caso do comboio ser realizado com três UTE 2240, o que se verifica nas horas de ponta, então: $\Delta W_{R2} = 3 \times 24,65 = 73,95 \text{ kw.h}$

Concluimos que o valor da restrição de velocidade, associada ao afrouxamento, constitui um factor com grande impacto na ordem de grandeza do consumo acrescido de energia, relativamente à extensão do afrouxamento. Assim e comparando com o ΔW_R do 1º exemplo, vem:

$$\Delta W_{R2} \cong 1,38 \Delta W_{R1}$$

4.3.3 – RENDIMENTO DA TRACÇÃO ELÉCTRICA E DA TRACÇÃO TÉRMICA.

A tracção eléctrica não tem necessariamente um rendimento energético global superior à térmica, atendendo aos rendimentos das centrais clássicas, deduzidos das perdas de distribuição e transporte.

No âmbito deste trabalho, abordamos as perdas existentes no transporte e transformação da energia eléctrica, desde a central geradora até ao comboio. Ou seja, para uma tensão de

alimentação da catenária em corrente alterna (c.a.) monofásica a 25 KV-50 Hz, as perdas totalizam 5,86 % (Alvarez, 2009).

Por outro lado, à que considerar o rendimento dos equipamentos das UTE 2240, nomeadamente, o transformador (94,3%), conversor (97%), motores de tracção assíncronos trifásicos (95%), redutor (98%), cujo produto dá o rendimento total na ordem dos 85% (Olea, 2008).

Assim, o rendimento global da tracção eléctrica, com UTE's 2240, desde a roda até à central geradora, será de 80%:

$$\eta = 0,9414 \times 0,943 \times 0,97 \times 0,95 \times 0,98 \cong 0,80$$

Para a tracção diesel, embora com perdas de transporte residuais, as perdas no veículo são elevadas. Adoptamos para o motor, um rendimento igual a 41%⁹, ao qual teremos de adicionar as perdas relativas aos órgãos de transmissão de binário propulsor entre os motores – eléctricos ou térmicos – e os eixos tractores (Castro, 1983), como:

- O gerador e motores de tracção no caso da tracção Diesel-eléctrico, com um rendimento aproximado de 80%; os conversores de binário hidráulicos com um rendimento entre 80 a 90% para uma gama elevada de velocidades e os redutores com um rendimento de 98%, para o diesel hidráulico (André, 2008; Arenillas, 2007).

Então, o rendimento da cadeia de tracção, será dado pelo produto dos rendimentos dos vários órgãos que a compõem, para cada uma das séries de material:

ALLAN 350, tracção Diesel-eléctrico: $\eta = 0,41 \times 0,80 \cong 0,33$

UDD 450, tracção Diesel-hidraulico: $\eta = 0,41 \times 0,83 \times 0,98 = 0,3334 \cong 0,33$

UTD 600, tracção Diesel-hidraulico: $\eta = 0,41 \times 0,85 \times 0,98 \times 0,98 = 0,3347 \cong 0,33$

Pelo que consideraremos para a tracção diesel, um rendimento global de 33%, valor referido para o rendimento médio da cadeia de tracção dos comboios actuais (Arenillas e López, 2007).

⁹ EEA-European Environment Agency, Corinair, 1996. O rendimento médio dos Diesel ferroviários é de 41%: Jorgensen, Morten W.; Sorenson, Spencer C., 1997, p. 92, tabela 10.14).

4.3.4 – VARIAÇÃO DO ΔW_R PARA UMA UTE 2240 COM L_A CONSTANTE E V_A VARIÁVEL.

M (MASSA DO COMBOIO)	L_A M	V_0 KM/H	V_M KM/H	V_A KM/H	1ª PARCELA	2ª PARCELA	ACRÉSCIMO DE ENERGIA ΔW_R (KWH)
165,6	1000	120	120	100	5,877	1,713	7,59
165,6	1000	120	120	90	8,414	3,050	11,464
165,6	1000	120	120	80	10,685	4,702	15,387
165,6	1000	120	120	70	12,688	6,710	19,398
165,6	1000	120	120	60	14,425	9,173	23,598
165,6	1000	120	120	50	15,894	12,280	28,174
165,6	1000	120	120	40	17,096	16,419	33,515
165,6	1000	120	120	30	18,031	22,584	40,615
165,6	1000	120	120	20	18,699	33,684	52,383
165,6	1000	120	120	10	19,100	64,189	83,289

Tabela 4.1 – Acréscimo de energia em função da velocidade de Afrouxamento

A variação da energia associada à restrição da velocidade, imposta pelo afrouxamento, poderá ser observada a partir do gráfico da figura 4.2.

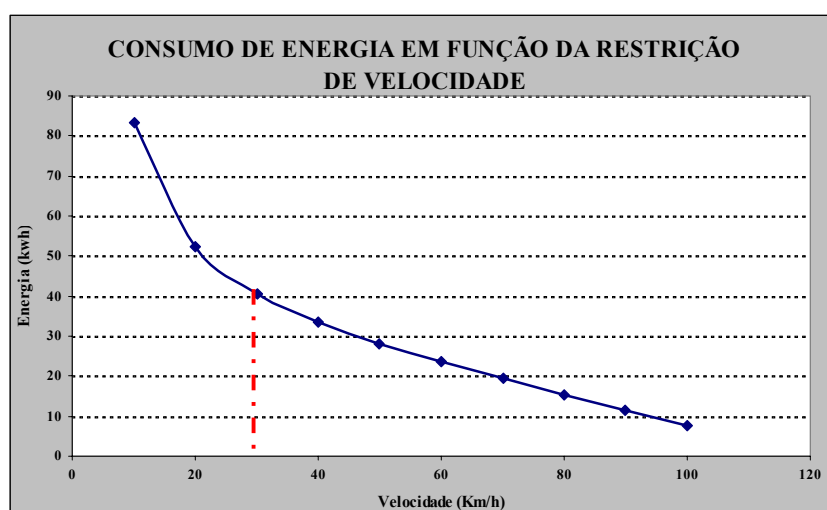


Figura 4.2 – Acréscimo de energia em função da severidade da restrição da velocidade.

O valor da degradação de energia evolui de forma praticamente linear até aos 30km/h, velocidade a partir da qual, este valor sobe exponencialmente, dando-nos indicação sobre a provável localização dos pontos críticos, que poderão estar em maioria neste intervalo de velocidades. É visível o peso energético das baixas velocidades nos afrouxamentos: ao circular-se a 50 km/h, em vez de a 40 km/h, ganha-se 16 % de energia; ***mas ao fazê-lo a 20 km/h, em vez de 10 km/h, esse ganho sobe para 37%***.

Vamos transportar o exemplo anterior, para o cenário real da linha do Norte, onde a intensidade de tráfego é elevada e considerar um eixo percorrido diariamente por 20 comboios regionais efectuados com UTE's 2240 (3312 toneladas), valor comum na linha do Norte. O facto de se autorizar a circulação a 60 km/h em vez de apenas a 30Km/h, para o custo médio do Kwh para a tracção, igual a 0,056 € (*preço médio de 2009 para a CP*) e um rendimento global de 0,8 corresponde a um ganho anual de:

$$\frac{1}{0,80} \times (40,615 - 23,598) \times \left(\frac{3312}{165,6} \right) \times 365 \times 0,056 = \mathbf{8695,68 \text{ €/Ano}}$$

Ou, admitindo que a tracção é diesel, com um rendimento global de 33% e que 1litro de gasóleo equivale a 10,2 Kwh (Alvarez, 2009), valores estes, que associados ao custo médio do litro de gasóleo de 0,48 €/litro (*preço médio de 2009 para a CP*), faria passar esse ganho anual para:

$$\frac{1}{0,33} \times \frac{(40,615 - 23,598)}{10,2} \times \left(\frac{3312}{165,6} \right) \times 365 \times 0,48 = \mathbf{17\ 746,3 \text{ €/Ano}}$$

isto é, cerca de **2 vezes mais**.

4.3.5 – VARIACÃO DO ΔW_R PARA UMA UTE 2240 COM V_A CONSTANTE E L_A VARIÁVEL.

Vamos considerar $V_A = 60$ km/h e L_A variável de 0 até 5000 metros.

$$\begin{aligned} \Delta W_R &\cong 1656 \left[0,71 \times 1,136 \times 10^{-5} (120^2 - 60^2) + 2,9128 \times 10^{-5} \left(0,2505 \times (120^2 + 60^2) - 0,5010 \times 120 \times 60 + L_A \frac{120 - 60}{60} \right) \right] \\ &= 14,42 + 4,35 + 0,0048236 L_A = \mathbf{18,77 + 0,0048236 L_A} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Trata-se pois, de uma variação linear com a extensão do afrouxamento, L_A :

L_A (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000
ΔW_R (KWh)	18,77	23,59	28,42	33,24	38,06	42,89

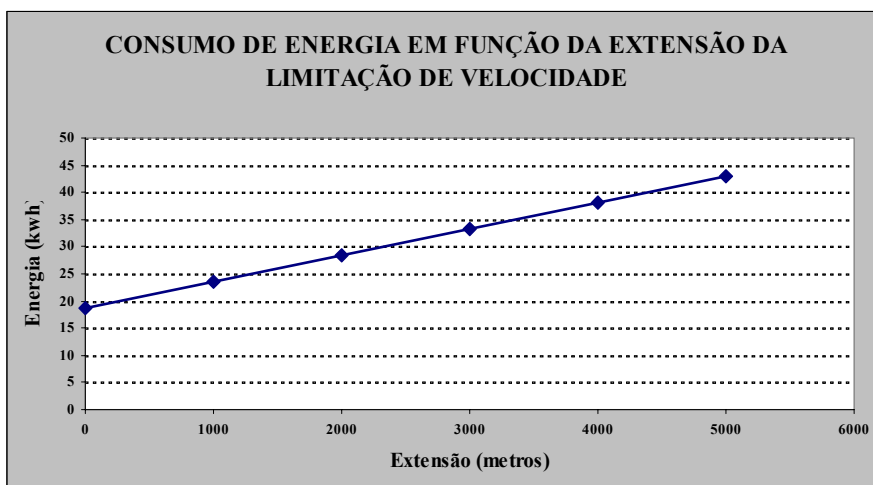


Figura 4.3 – Acréscimo de energia em função da extensão do afrouxamento.

Retomando o exemplo anterior para as 3312 toneladas/dia, supondo que a velocidade do afrouxamento é constante e igual a 60 km/h, durante os mesmos 365 dias no ano, então por cada 10 metros que se aumentar a extensão do afrouxamento, teremos um encargo anual resultante de:

$$\frac{1}{0,80} \times 0,0048236 \times 10 \times \left(\frac{3312}{165,6} \right) \times 365 \times 0,056 = \mathbf{24,65 \text{ Euros/Ano}}$$

Ou, admitindo que a tracção é diesel e que 1 litro de gasóleo é equivalente a 10,2 Kwh, para o custo médio do litro de gasóleo igual a 0,48 €/litro, o encargo anual seria:

$$\frac{1}{0,33} \times \frac{0,0048236}{10,2} \times 10 \times \left(\frac{3312}{165,6} \right) \times 365 \times 0,48 = \mathbf{50,21 \text{ Euros/Ano}}$$

isto é, cerca de **2 vezes mais**.

Da análise destes exemplos, **ressalta a importância das velocidades impostas pelos afrouxamentos, factor que associado à utilização de material de tracção diesel, resulta num consumo energético duas vezes maior.**

As velocidades dos afrouxamentos, devem ser judiciosamente escolhidas, a fim de evitar reduções excessivas de velocidade, com os inerentes suplementos de consumo energético.

4.4- FACTOR DE CORRECÇÃO DEVIDO À MARCHA EM DERIVA

É de notar que a expressão final do acréscimo de energia a que chegámos, para o caso de um afrouxamento, é constituída por duas parcelas:

- Uma devida à perda/recuperação da velocidade;
- Outra relativa à perda/recuperação do tempo.

No que se refere à segunda parcela, salienta-se que a recuperação de tempo, é difícil de conseguir na prática. Embora a marcha horária dos comboios IR e RG, seja concebida com uma margem de regularidade de **6%**, no entanto, devido às características do material e às condições intrínsecas da infra-estrutura, como o actual estado de conservação, a margem de regularidade programada é literalmente consumida. *Podemos afirmar, que após ser percorrida a extensão da L_v , a condução é feita em marcha “tensa”, isto é, procurando o máximo aproveitamento da capacidade de tracção disponível, à velocidade máxima permitida pela via, factor a considerar no cálculo do ΔWr .*

Também, no que se refere à primeira parcela, relativa à variação da energia cinética em função da redução de velocidade, podemos não atingir os valores obtidos, pela aplicação directa da fórmula teórica. A condução pode ser feita em regime de “força cortada”, ou seja, de marcha à deriva (deslocação pela simples inércia adquirida), durante algumas centenas de metros na aproximação à zona da restrição “afrouxamento”, pelo que, o comboio inicia a frenagem com uma velocidade V' inferior a V_0 (ver figura 4.4), minimizando a duração e intensidade da frenagem.

Por exemplo, se o maquinista à distância de D metros antes do afrouxamento, cortar a força, vai desacelerando sem aplicar o freio, conforme exemplificado no diagrama e por conseguinte, a energia degradada na frenagem, para atingir a velocidade V_A será menor.

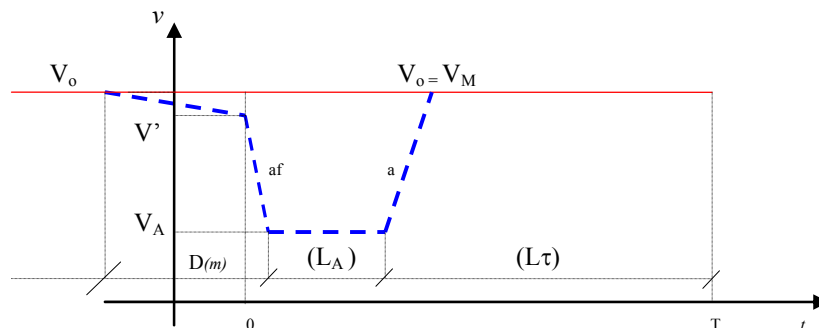


Figura 4.4 – Efeito da marcha à deriva na abordagem a um afrouxamento.

Refere-se como sendo um caso normal, o de um comboio que circula a $V_0 = 80$ km/h e numa distância média, $D = 300$ m, corta a força e entra em regime de marcha à deriva, durante a frenagem em modo faseado, afim de reduzir a velocidade para $V_A = 30$ km/h. Através da equação do movimento de uma composição (3.16), podemos calcular o valor da aceleração de frenagem para uma UTE 2240, em regime de marcha à deriva, para um perfil de linha em patamar, ou seja:

$$F = MR_e + Mi + \frac{M'}{g} \times a \times 10^3 \Leftrightarrow 0 = 165,6 \cdot (1,27 + 0,01V + 0,00033V^2) + \frac{175,5}{9,8} \times a \times 10^3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow a = -0,0386 \text{ m/s}^2$$

Como exemplo prático, foi recolhido aleatoriamente um registo do sistema Convel, relativo ao comboio 4415 de 30-01-09, inserido na figura 4.5, onde podemos observar que o maquinista efectuou uma frenagem suave em patamar, passando de um velocidade de 120 km/h para cerca de 20 km/h, percorrendo cerca de 2000 m dos quais cerca de 300m, em marcha à deriva, dos quais 44 m a 80 km/h e 265 m a cerca de 60 km/h.

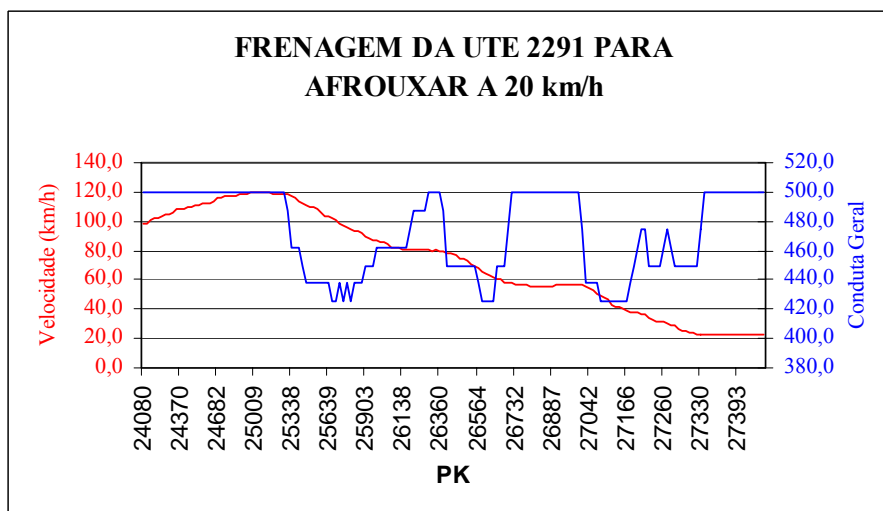


Figura 4.5 – Extensão percorrida em marcha à deriva na abordagem a uma Lv.

Num perfil em patamar para $V_0 = 80$ km/h, um comboio constituído por uma UTE 2240, demora cerca de 13,5 segundos a percorrer 300 m, em regime de marcha à deriva, ΔT durante o qual, a aceleração de frenagem actuante, é igual a $0,0386 \text{ m/s}^2$, fazendo baixar o valor da velocidade do comboio para cerca de 78,1 km/h. Chegamos assim, a um factor

correctivo de 0,0396 a aplicar à primeira parcela da expressão que traduz o consumo extra de energia. Na Tabela 4.2 apresentamos os valores da aceleração de frenagem em marcha à deriva para as mesmas condições do exemplo, para as restantes séries de material:

Séries de Automotoras	Resistência específica ao avanço: R_e (kg/ton)	M (ton)	M' (ton)	a (m/s ²)	Factor Correctivo
UTE 2240	$R_e = 1,27 + 0,01V + 0,00033V^2$	165,6	175,5	-0,0386	0,039
ALLAN 350	$R_e = 1,18 + 0,01V + 0,00055V^2$	64,6	71,0	-0,0490	0,050
UDD 450	$R_e = 1,26 + 0,01V + 0,00037V^2$	113,5	119,1	-0,0413	0,042
UTD 600	$R_e = 1,25 + 0,01V + 0,00024V^2$	171,7	180,2	-0,0334	0,034

Tabela 4.2 – Valor da aceleração de frenagem em marcha à deriva, em patamar e velocidade inicial de 80 km/h, para as automotoras de via larga do parque da CPRG.

No entanto, o delta relativo à diferença entre a velocidade inicial do comboio V_0 e a velocidade imposta no afrouxamento Va , pode ter múltiplos valores, pelo que, foi efectuada uma análise exaustiva (constituí o Anexo IV-2), para que pudéssemos medir o peso da marcha à deriva. Neste contexto, definimos como premissas, que não é realizada marcha à deriva para $\Delta V \leq 10Km/h$ e que o tempo utilizado na deriva, não excede os 15 segundos.

Neste referencial concluímos, que na maioria das relações, o peso da marcha à deriva é inferior a 10%.

Em conclusão, com base nas considerações de carácter prático feitas atrás, em relação à primeira parcela da expressão, poderemos considerar que há uma redução de cerca de 10% relativamente à energia gasta na frenagem, pelo que, parece ser ajustado **aplicar à parcela relativa à variação da energia cinética, um factor correctivo da ordem dos 0,90.**

No futuro, será concebido um modelo de condução, a adoptar pelos maquinistas, objectivando o aproveitamento da inércia adquirida pelo comboio, na abordagem às Lv e nas paragens, em conjugação com o material e o perfil da via.

4.5 – SIMPLIFICAÇÃO DAS EXPRESSÕES

A simplificação das expressões pressupõe a introdução e associação de todas as constantes em cada uma das parcelas, tarefa a desenvolver para cada uma das séries de material.

Optámos por indicar apenas as expressões simplificadas relativas às UTE 2240 (série eléctrica) e às UTD 600 (série diesel), enquanto que as restantes, se encontram inseridas no Anexo IV-3 (afrouxamentos) e Anexo IV- 4 (paragens).

4.5.1 - FACTORES DE CORRECÇÃO

Os factores de correcção, a aplicar à primeira parcela da expressão, serão:

- **0,71** _ Relativo à energia recuperada por aplicação do freio dinâmico (apenas aplicável em Material de Tracção Eléctrica_ UTE 2240);
- **0,90** _ Devido ao regime de marcha à deriva (para todas as séries de material).

4.5.1.1 – Limitações de Velocidade (Afrouxamentos)

4.5.1.1.1 – Série UTE 2240

$$\Delta W_R \cong 1,202 \times 10^{-3} (V_0^2 - V_A^2) + [4,507 \times 10^{-6} V_0 \cdot \varphi + 1,487 \times 10^{-7} V_0^2 (\varphi + 1) \varphi] \times \left(0,077 \times \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{1,54} + \frac{a + 0,77}{1,54a} V_A^2 - \frac{a + 0,77}{0,77a} V_A V_0 \right) + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right) \quad (4.18)$$

4.5.1.1.2 – Série UTD 600

$$\Delta W_R \cong 1,739 \times 10^{-3} (V_0^2 - V_A^2) + [4,674 \times 10^{-6} V_0 \cdot \varphi + 1,122 \times 10^{-7} V_0^2 (\varphi + 1) \varphi] \times \left(0,077 \times \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + V_0^2 + \frac{a + 0,5}{a} V_A^2 - \frac{a + 0,50}{0,5a} V_A V_0 \right) + L_A \frac{V_0 - V_A}{V_A} \right) \quad (4.19)$$

4.5.1.2 – Paragens

4.5.1.2.1 – Série UTE 2240

$$\Delta W_R \cong 1,202 \times 10^{-3} V_0^2 + [4,507 \times 10^{-6} V_0 \cdot \varphi + 1,487 \times 10^{-7} V_0^2 (\varphi + 1) \varphi] \times \left[0,077 \times \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + \frac{V_0^2}{1,54} \right) + 0,278 \cdot T_{Parag} \cdot V_0 \right] \quad (4.20)$$

4.5.1.2.2 – Série UTD 600

$$\Delta W_R \cong 1,739 \times 10^{-3} V_0^2 + [4,674 \times 10^{-6} V_0 \cdot \varphi + 1,122 \times 10^{-7} V_0^2 (\varphi + 1) \varphi] \times \left[0,077 \times \left(\frac{V_0^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2a} + V_0^2 \right) + 0,278 \cdot T_{Parag} \cdot V_0 \right] \quad (4.21)$$

4.6 – ESTRUTURA DE CUSTOS DE UMA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE

4.6.1 – CÁLCULO DO TEMPO EXTRA PRODUZIDO POR UMA L_v

O acréscimo de tempo gasto numa L_v é dado pela seguinte expressão:

$$T_{af} = \frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} + \frac{L_A \times (V_0 - V_A) \times 60}{1000 \times V_0 \times V_A} + \frac{0,278(V_0 - V_A)}{60 \times a} \text{ (min)} \quad (4.22)$$

Sendo as velocidades referidas em km/h, a extensão do afrouxamento L_A em metros e as acelerações em m/s^2 .

No caso de uma **Paragem** durante o tempo T_A , utilizamos a expressão (4.22), à qual será adicionado o tempo de paragem, mas nesse caso, $V_A = 0$ e $L_A = 0$.

4.6.2 – CUSTO DA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL DURANTE O TEMPO DE DESACELERAÇÃO

A utilização do Material Circulante, que constitui a composição do comboio, durante o tempo extra, resultante do afrouxamento (ou paragem), reflecte-se:

- No maior desgaste do material;
- No seu custo de manutenção;
- Na amortização do mesmo material, não coberta por trabalho útil desse mesmo material circulante.

No caso do **desgaste do material**, considera-se que ele se dá no **tempo de desaceleração**, ou seja, na passagem de V_0 para V_A , então o tempo é dado por:

$$T = \frac{V_0 - V_A}{a_f} \quad (4.23)$$

Então teremos, o tempo de desgaste em minutos, dado por:

$$T(\text{min}) = \frac{(V_0 - V_A) \text{ Km/h}}{a \text{ m/seg}^2} \times \frac{1000 \text{ m/Km}}{3600 \text{ seg/h}} \times \frac{1 \text{ min/seg}}{60} = \frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} \text{ min} \quad (4.24)$$

Sendo as velocidades expressas em km/h e a aceleração em m/seg^2 . E a_f , representa a aceleração de frenagem.

Entrando com o **custo unitário relativo ao minuto do material**, valor que inclui os custos fixos do material (Anexo IV-5), nomeadamente **amortização, anualização de reparações profundas e custos financeiros resultantes do investimento**, tendo sempre em conta o tipo de material utilizado, calculamos o custo do material por minuto (**CMM**). Teremos, então:

$$Custo_{extra-material} = CMM \times \frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} \quad (4.25)$$

4.6.3 - CUSTO DA TRIPULAÇÃO DO COMBOIO

Para efeitos de contabilização do **custo extra com a Tripulação do Comboio** durante o tempo extra resultante da limitação de velocidade (ou Paragem), considera-se:

- a) No caso de **Afrouxamento**, durante a extensão L_A , deverá ser considerado o acréscimo de tempo T_{af} , incluindo assim também, o tempo gasto na desaceleração e aceleração após sair da zona de restrição de velocidade.
- b) No caso da **Paragem**, acrescentaremos ao T_{af} , o tempo total de paragem T_A em minutos.

Quanto ao custo do **minuto**, teremos em conta o custo médio diário por **tipo de Categoria Profissional** (ver Anexo IV-5):

- i) **Condução** (maquinistas) – em todos os comboios
- ii) **Revisão** (revisores) – apenas em comboios de passageiros e neste caso 1 revisor, na maioria das circulações. Este número pode subir para 2 ou 3 consoante se trate de comboios (em múltipla) formados por duas ou três automotoras.

4.6.4- CONVERSÃO DO CONSUMO EXTRA DE ENERGIA EM LITROS DE GASÓLEO

Conforme dedução efectuada no sector 4.3.4, **1 Kwh é equivalente a 0,098 litros de gasóleo**, (ou seja 1 litro de gasóleo equivalente a 10,2 Kwh), podemos:

- Calcular o **custo médio de 1 litro de gasóleo (equivalente)**, tendo em conta que para o ano de 2009, o custo médio anual do gasóleo para tracção foi de 0,48 €/litro e o custo médio do Kwh para tracção foi de 0,056 €. Assim:

$$\text{Custo médio equivalente do gasóleo} = \frac{0,056 \times 10,2 + 0,48}{2} = 0,5256 \text{ €/litro} \quad (4.26)$$

No cálculo do **custo** do consumo extra de energia que analisámos atrás, para podermos aplicar este **custo médio equivalente do gasóleo/litro**, será necessário converter a litros de gasóleo o consumo extra em Kwh, o que se consegue através do **factor de conversão 0,098** que resulta, como já vimos atrás, da equivalência **1 Kwh = 0,098 litros de gasóleo**

4.6.5 - CUSTO TOTAL DA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE – “AFROUXAMENTO”

Para o cálculo do custo total, tivemos em conta a análise efectuada no ponto 4.3.3, assim:

- Rendimento da UTE 2240, desde o contador da subestação até à roda (0,80): $\frac{1}{\eta} = \frac{1}{0,8}$.

- Rendimento roda-motor dos equipamentos das automotoras diesel (0,33): $\frac{1}{\eta} = \frac{1}{0,33}$.

4.6.5.1- Custo Médio da Energia Extra consumida numa L_v - C_I

Cálculo efectuada para o *custo médio C_M do Kwh ou do gasóleo em 2009 para a CP.*

$$C_{I_e} = \frac{1}{\eta} \times \Delta W_R \times C_{Mkw} \text{ (E.Eléctrica)} \quad (4.27)$$

$$C_{I_d} = \frac{1}{\eta} \times \Delta W_R \times 0,098 \times C_{MEG} \text{ (Diesel)} \quad (4.28)$$

4.6.5.2- Custo da tripulação do Comboio e do Material - C_{II}

$$C_{II} = \left[\frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} + \frac{L_A \times (V_0 - V_A) \times 60}{1000 \times V_0 \times V_A} + \frac{0,278(V_M - V_A)}{60 \times a} \right] \times (CMT + CMM) \quad (4.29)$$

Sendo: **CMT** – Custo do Minuto da Tripulação do Comboio.

CMM – Custo do Minuto do Material por série.

4.6.6 – CUSTO TOTAL RELATIVO A UMA LIMITAÇÃO DE VELOCIDADE (afrouxamento)

4.6.6.1 – Material Eléctrico

$$C_{TPME} = \left[0,07 \times \Delta W_R \right] + \left[\frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} + \frac{L_A \times (V_0 - V_A) \times 60}{1000 \times V_0 \times V_A} + \frac{0,278(V_M - V_A)}{60 \times a} \right] \times (CMT + CMM) \quad (4.30)$$

4.6.6.2 – Material Diesel

$$C_{TPME} = \left[0,1561 \times \Delta W_R \right] + \left[\frac{0,278(V_0 - V_A)}{a_f \times 60} + \frac{L_A \times (V_0 - V_A) \times 60}{1000 \times V_0 \times V_A} + \frac{0,278(V_M - V_A)}{60 \times a} \right] \times (CMT + CMM) \quad (4.31)$$

4.6.7 – CUSTO TOTAL RELATIVO A PARAGENS

4.6.7.1 – Material Eléctrico

$$C_{TPME} = \left[\frac{1}{\eta} \times \Delta W_R \times C_{Mkw} \right] + \left[\frac{0,278.V_0}{a_f \times 60} + T_{Parag.} + \frac{0,278.V_M}{60 \times a} \right] \times (CMT + CMM) \quad (4.32)$$

4.6.7.2 – Material Diesel

$$C_{TPMD} = \left[\frac{1}{\eta} \times \Delta W_R \times 0,098 \times C_{MEG} \right] + \left[\frac{0,278.V_0}{a_f \times 60} + T_{Parag.} + \frac{0,278.V_M}{60 \times a} \right] \times (CMT + CMM) \quad (4.33)$$

CAPÍTULO V

OPTIMIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DA CP REGIONAL

5.1 – SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

É nosso objectivo construir um Sistema de Apoio à Decisão (*SAD*), capaz de identificar os pontos críticos em actividade na RFN e que efectivamente dê apoio a uma tarefa não estruturada como a que está em estudo, ou seja, a intervenção direccionada da Refer para eliminação dos pontos críticos da infra-estrutura, tornando-a numa tarefa semi-estruturada. O sistema foi assim orientado, para a produção da informação necessária à tomada de decisão, fornecendo uma avaliação do impacto da eliminação de cada ponto crítico.

A estrutura típica da *SAD*, assenta em três elementos básicos (Moreira, 1999):

- **Base de Dados**, onde se encontra registada toda a informação necessária de forma estruturada e sem redundâncias;
- **Base de Modelos**, composta por um conjunto de modelos diversos que podem ser aplicados a diferentes níveis do processo, por iniciativa do agente de decisão com os dados por si seleccionados. Os modelos que compõem a base de modelos, foram concebidos no capítulo IV e os restantes encontram-se reunidos no anexo IV-2.
- **O Interface**, composto por um conjunto de rotinas que apresentam a informação ao utilizador de forma gráfica ou tabular, e capazes de interagir com o agente de decisão.

A *SAD* por si só não é capaz de resolver os problemas, pelo que, a estes três elementos há que juntar o utilizador, e é da conjugação destes quatro elementos que resultará o apoio efectivo à tomada de decisão. Para essa conjugação ser possível é necessário que as ligações entre os diferentes elementos existam de uma forma clara e fluida (Moreira, 1999).

5.1.1 – BASE DE DADOS

As Limitações de Velocidade (*Lv*) activas na RFN, constituem bases de dados que integram ficheiros actualizados diariamente pela REFER. Na figura 5.1 observamos alguma da informação disponível nesses ficheiros.

Linha	Via	Inicio	Fim	Extensao	ValorLV	TVM_Max	Data_Inicio
Linha da Beira Baixa	Asc.	9,229	9,451	0,222	30	100	2009-01-27 08:01:30
Linha da Beira Baixa	Asc.	21,01	21,228	0,218	30	80	2009-01-27 08:01:51
Linha da Beira Baixa	Asc.	29,463	29,743	0,28	30	80	
Linha da Beira Baixa	Asc.	31,6	31,9	0,3	30	80	2009-01-27 09:31:20
Linha da Beira Baixa	Asc.	47,3	47,7	0,399	30	80	2006-11-05 23:24:10
Linha da Beira Baixa	Asc.	51,5	51,55	0,05	30	80	2008-11-28 13:28:03
Linha da Beira Baixa	Asc.	52,85	52,9	0,05	10	80	2009-01-16 18:18:14
Linha da Beira Baixa	Asc.	57,08	57,12	0,04	60	80	2009-01-27 14:01:41
Linha da Beira Baixa	Asc.	68,38	68,42	0,039	60	80	2007-08-01 09:12:12

Figura 5.1 – Resumo do relatório diário fornecido pela REFER.

Este ficheiro, refere a localização por linha e sentido, bem como, as características das Lv, nomeadamente a extensão, o valor da restrição de velocidade e o período de actividade previsto. É tratado diariamente pela equipa das Operações da CPRG, encontrando-se na figura 5.2 alguma da informação disponível após o processamento, processo, em que são acrescentadas, as colunas relativas aos valores de $V_0, V_M, Fi (V_M/ V_0)$, *Serviço e Série*, preenchidas com os dados das marchas horárias produzidas no âmbito deste trabalho, para cada uma das Linhas, (Anexo III-9).

Data	Linha	Via	Inicio	Fim	La	Va	Vo	Vm	Fi	Serv.	Serie	TVM Max	Data Inicio
31-01-2009	Linha da Beira Alta	A	140,7	141	0,300	60	90	90	1	R	2240	90	2008-09-19
31-01-2009	Linha da Beira Alta	D	140,7	141	0,300	60	90	80	0,888889	R	2240	90	2008-09-19
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	47,3	47,7	0,399	30	80	80	1	R	2240	80	2006-11-05
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	51,5	51,55	0,050	30	80	80	1	R	2240	80	2008-11-28
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	52,85	52,9	0,050	10	80	80	1	R	2240	80	2009-01-16
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	57,08	57,12	0,040	60				R	2240	80	2009-01-27
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	68,38	68,42	0,039	60	80	80	1	R	2240	80	2007-08-01
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	108,47	108,78	0,310	80				R	350	110	2008-06-27
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	114	114,1	0,100	30	45	70	1,555556	R	350	110	2009-01-21
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	114	114,1	0,100	30	55	95	1,727273	R	2240	110	2009-01-21
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	127,4	127,98	0,581	80				R	350	90	2007-09-04
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	129	129,1	0,101	80	100	0	0	R	350	120	2008-12-23
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	A	129	129,1	0,101	80	120	0	0	R	2240	120	2008-12-23
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	D	47,3	47,7	0,399	30	80	80	1	R	2240	80	2006-11-05
31-01-2009	Linha da Beira Baixa	D	51,5	51,55	0,050	30	80	80	1	R	2240	80	2008-11-28

Figura 5.2 – Excerto do relatório já tratado para aplicação do modelo.

Em resultado deste processo, as Lv são actualizadas e agrupadas em relatórios produzidos diariamente, para toda a RFN, que passam posteriormente a integrar uma tabela em ambiente “Access”, onde permanecem agrupados por dia de calendário.

Ainda em ambiente Access, foram criadas mais duas tabelas, uma que integra todos os comboios programados (cerca de 430 dia) *RG e IR*, caracterizados pelo número e percursos efectuados; outra com os valores das acelerações e respectivos tempos e espaços

necessários ao incremento da velocidade, que nos permite calcular a aceleração de tracção “ $\Delta v / \Delta t$ ” (Anexos III-3 a III-5) para qualquer troço da RFN e tipo de material.

5.1.2 - O INTERFACE

Um dos produtos finais do presente trabalho, consistiu na produção de uma aplicação na CPRG, que relaciona diferentes tabelas, com dados relativos à infra-estrutura, ao material, aos comboios programados e aos diferentes modelos produzidos para cada uma das séries de material do parque da CPRG (Anexo IV-2); permitindo através de um conjunto de consultas em Access (ver figura 5.3), manipular os dados inseridos nessas bases de dados. O Manual do Utilizador, pode ser consultado no Anexo V-1.

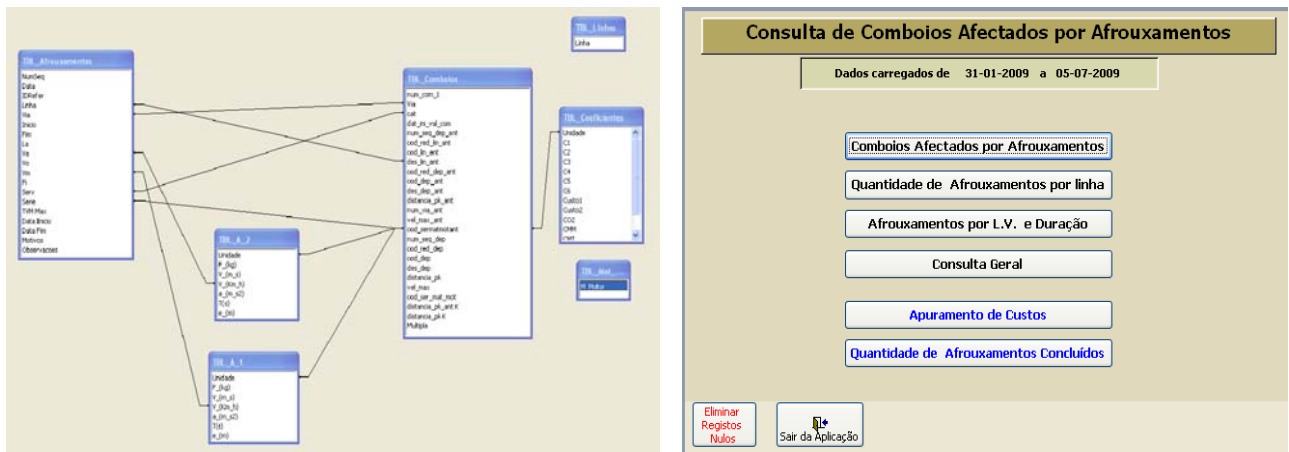


Figura 5.3 – Esquema da relação entre Tabelas e Menu das consultas disponíveis.

Estas rotinas, permitem produzir por linha, sentido, comboio e período de tempo, os seguintes indicadores:

- **Eficiência Energética:** Acréscimo de energia (*Kwh*) e custo (€) por afrouxamento;
- **Impacto Ambiental:** Emissões GEE (*KgCO₂e*) e respectivo custo (€);
- **Impacto no Índice de Pontualidade:** Tempo perdido em cada afrouxamento;
- **Impacto Financeiro:** Custo total incluindo o custo das tripulações e do material;

A figura 5.4, apresenta um exemplo do “**Relatório**” produzido, em resultado da aplicação dos modelos, através da consulta “*Comboios afectados por afrouxamentos*”, efectuada para a Linha do Norte, sentido ascendente (A), para o dia 12-03-09, da qual destacamos:

- 225 ocorrências resultantes da circulação de 70 comboios RG;
- O acréscimo do consumo de energia, totalizando 2 426,14 Kwh com o custo de 169,83 €;
- A emissão de 1140,28 KgCO₂e;
- 229,96 minutos gastos em consequência destes constrangimentos;
- Custo total de 375,27€.


Data	Linha	Nº Comb.	Via	PK Início	PK Fim	La	Vo	Va	Vm	Total Kwh	Custo €	KgCO2 e	Custo CO2e	Tempo (min)	C.Total Afx
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	96,5	100,8	4295	120	100	120	19,169686	1,3419 €	9,009752	0,1351 €	1,309714	2,5323 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	75,03	75,35	318	80	60	100	6,771695	0,4740 €	3,182697	0,0477 €	0,541883	1,2188 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	101,88	104,2	2317	120	100	120	15,353355	1,0747 €	7,216077	0,1082 €	1,309516	2,0911 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	70,45	73,35	2912	120	80	100	29,960302	2,0972 €	14,081342	0,2112 €	1,397349	3,2887 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	104,2	105,1	900	120	80	110	24,046938	1,6833 €	11,302061	0,1695 €	1,544935	2,6994 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	83,6	84,6	998	100	60	80	18,058301	1,2641 €	8,487401	0,1273 €	0,960233	2,0572 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	90,1	90,7	600	100	80	120	9,211841	0,6448 €	4,329565	0,0649 €	0,907420	1,8758 €
12-03-2009	Linha do Norte	931	A	73,35	73,45	100	80	30	60	13,095323	0,9167 €	6,154802	0,0923 €	0,815636	1,5182 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	101,88	104,2	2317	120	100	120	15,353355	1,0747 €	7,216077	0,1082 €	1,309516	2,0911 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	90,1	90,7	600	100	80	120	9,211841	0,6448 €	4,329565	0,0649 €	0,907420	1,8758 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	73,35	73,45	100	80	30	60	13,095323	0,9167 €	6,154802	0,0923 €	0,815636	1,5182 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	83,6	84,6	998	100	60	80	18,058301	1,2641 €	8,487401	0,1273 €	0,960233	2,0572 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	70,45	73,35	2912	120	80	100	29,960302	2,0972 €	14,081342	0,2112 €	1,397349	3,2887 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	75,03	75,35	318	80	60	100	6,771695	0,4740 €	3,182697	0,0477 €	0,541883	1,2188 €
12-03-2009	Linha do Norte	933	A	96,5	100,8	4295	120	100	120	19,169686	1,3419 €	9,009752	0,1351 €	1,309714	2,5323 €
Fechar consulta		Nº de Ocorrências		Total Kwh		CustoTotal Kwh		Total KgCO2 e		Total Custo CO2e		Tempo Perdido		C.Total Afx.tos	
		225		2.426,14		169,830 €		1.140,28		17,104 €		229,96		375,272 €	

Figura 5.4 – Relatório obtido na consulta “*Comboios afectados por afrouxamentos*”.

Os dados obtidos através destas consultas, são exportados para Excel, onde através de tabelas dinâmicas, são submetidos a uma análise estatística, que nos permitirá identificar os *pontos críticos* da RFN, utilizando os seguintes critérios base:

- Análise macro _ Mensal;
- Análise dos valores médios _ Diários;
- Peso das restrições de velocidade $\leq 30\text{km} / h$ em relação aos valores totais;

- Análise do relatório produzido pela consulta “*Apuramento de Custos*” que nos indica as *Lv* e a estrutura de custos associados, num dado intervalo de tempo;
- Ordenação dos dados em função do impacto financeiro de cada *Lv*;
- Identificação dos Pontos Críticos em actividade, organizados em função do impacto financeiro, detalhando:
 - Energia Degradada;
 - O tempo perdido por comboio em minutos;
 - O custo total diário;

5.2 - ANÁLISE DOS INDICADORES

5.2.1 – VALORES MENSIS

Os indicadores produzidos, foram organizados por *linha e sentido da marcha*, para um horizonte temporal mensal (estas tabelas podem ser consultadas no Anexo V-2), critério de selecção que possibilitou a avaliação macro do impacto das restrições de velocidade, para o período FEV-OUT/09, cujos dados integram a Tabela 5.1. Esta análise será cruzada com o *Ip*, para cada linha da RFN e em casos justificados será feita uma análise por comboio.

Valores Médios Mensais Relativos ao Período Fevereiro-Outubro de 2009

Linha	Nº Médio Mensal de Lv por sentido	Extensão Total Média Mensal das Lv (km)	Duração média mensal dos Afr. (Dias)	Nº Médio Mensal por sentido Lv ≤ 30 km/h	Média Mensal de Energia Degradada (kwh)	Custo Médio Mensal da Energia (€)	Emissão Média Mensal de GEE (kgCO2e)	Tempo Médio Mensal Perdido	Custo Médio Mensal das Lv (€)
Alentejo	149,44	62,607	106,05	20	8833,67	822,78	4151,82	1989,13	2242,34
Algarve	34,78	52,869	94,43	20	8948,89	1386,28	4205,98	1311,40	3387,07
B.Alta	77,28	34,088	211,27	1	5258,28	373,64	2471,39	548,19	808,75
B.Baixa	183,50	65,984	400,14	94	17094,46	1611,00	12145,50	2350,44	3836,29
Douro	296,44	239,699	573,37	152	42581,98	6817,10	20013,53	7597,23	15078,28
Leste/Cáceres	21,83	9,880	63,91	16	494,69	79,98	232,50	203,34	245,51
Minho	113,56	55,060	59,73	65	17735,56	2876,85	8401,71	4771,20	6676,15
Norte(A)	213,50	437,788	34,99	41	73971,37	5178,00	34877,65	6956,70	12844,08
Norte(D)	162,28	391,000	19,08	53	79470,04	5562,90	37350,92	6578,02	13104,24
Oeste	105,67	56,822	135,04	33	10211,00	1680,35	4799,17	2768,12	3845,59
Sul	272,94	186,926	100,08	44	11513,83	805,97	5411,50	1228,09	1971,15
R.Alfarelos	43,67	21,504	177,96	31	15781,51	1110,96	7417,36	1348,03	3089,55
R.Lousã	92,61	12,687	139,86	78	6848,85	1101,31	3218,96	2412,22	2945,45
Total	1767,5	1626,9141	162,76	648	298744,101	29407,11	144697,994	40062,11	70074,45

Tabela 5.1 – Impacto médio mensal dos afrouxamentos na oferta da CPRG por Linha.

Para a oferta comercial da CPRG, cerca de 13300 comboios/mês, registou-se um valor médio mensal de 1767 restrições de velocidade, em que 648 (36,7 %) são $L_v \leq 30 \text{ km/h}$.

Coexistem diariamente na RFN, em cada sentido, cerca de 90 “*afrouxamentos*”, dos quais cerca de 70, com uma extensão total na ordem dos 50 km, encontram-se activos na via larga (2649,788 km) e são inferiores a 120 km/h, universo que constituiu a base do nosso trabalho. As vias estreitas, não foram alvo de estudo, pela reduzida extensão activa (cerca de 100 km) e pelos baixos valores da TVM praticados (*inferior a 50 km/h*). Neste âmbito, salienta-se o peso das L_v nas Linhas do Norte (21,3 %), Douro (16,8 %) e Sul (15,4 %).

Relativamente ao período de actividade das L_v , o valor médio encontra-se nos 162 dias, podendo no entanto ser efémero, com duração de horas ou 1 a 3 dias, ou subsistirem durante vários anos, como por exemplo nas linhas do Douro e Beira Baixa, facto que justifica, os valores médios elevados observados.

O valor médio da energia perdida por mês, totaliza **298 744 Kwh** (144 698 KgCO₂e) dos quais 13,8 % relativos à linha do Douro e 50 % relativo à linha do Norte (A e D), representando a energia perdida, cerca de 2,5% e 8,4 % respectivamente, do total da energia necessária à concretização do plano produtivo mensal dessas linhas.

O tempo médio mensal perdido, **40 062 minutos**, teve maior impacto nas linhas do Douro (19%), Norte-A (17,4%), Norte-B (16,4%) e Minho (11,9%), totalizando estes eixos 64,7%. O custo médio mensal é de **70 074 €** (inclui a energia degradada, as emissões de GEE e a valorização do tempo perdido: material e tripulações), montante que se reparte com maior expressão pela linha do Douro (21,5%) e pela linha do Norte (37%). A primeira representa o paradigma de uma linha não electrificada com uma intensidade elevada de tráfego no conceito regional, a segunda enquanto principal eixo da RFN, é de capital importância para a eficiência do processo produtivo ferroviário e por conseguinte, onde a degradação da infra-estrutura tem um efeito devastador no actual modelo de oferta comercial da CP, nomeadamente no conceito de rede e no índice de pontualidade.

Num segundo plano, aparecem as linhas do Minho, Oeste e Algarve, representando em conjunto com o Douro e Norte, cerca de 78% do impacto total (ver figura 5.5), pelo que, podemos concluir tratar-se do conjunto representativo das linhas com maior impacto na eficiência energética, dando a perceber a importância dos eixos não electrificados na RFN,

considerados pelo gestor da infra-estrutura como sendo de menor importância, facto traduzido pelo insuficiente investimento nelas realizado.

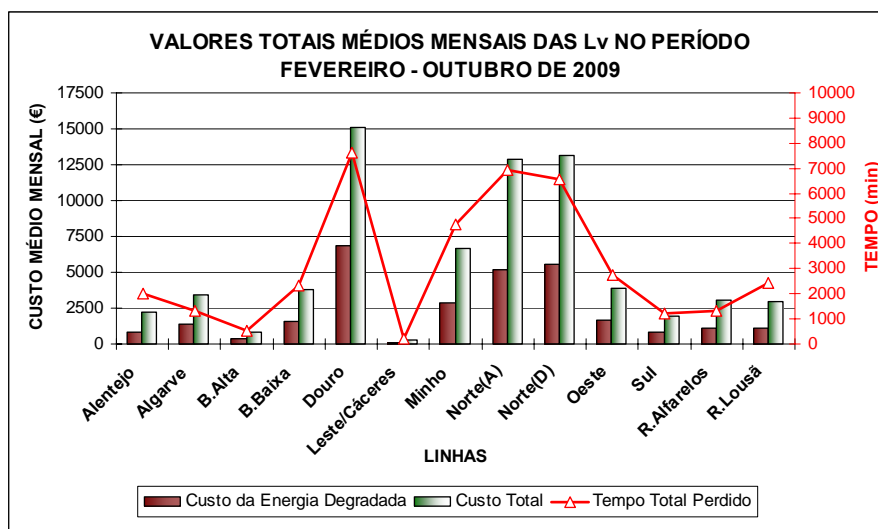


Figura 5.5 – Impacto financeiro e em tempo perdido das *Lv* por linha.

Estes valores, representam cerca de um dia do tempo e da energia necessários à produção da CPRG (3% do valor mensal), onde se percorre uma média diária de 34046 km (16186 em tracção eléctrica e 17860 em tracção diesel) e se gastam cerca de 28900 minutos para efectuar os 430 comboios diários.

No ponto 4.3.4 do Capítulo IV, concluímos que a degradação de energia, apresenta uma variação linear para $Lv > 30 \text{ km/h}$ e que para $Lv \leq 30 \text{ Km/h}$, a degradação de energia apresenta uma evolução exponencial (figura 4.2). Este facto, justificou a selecção dos dados relativos às *Lv* mais restritivas, que integram a Tabela 5.1., salientando-se que representam cerca de 36,7% do valor total.

No entanto, há outros factores a considerar, como a lei de paragens do comboio e a velocidade máxima permitida na via-férrea (TVM), qualquer destas premissas, constitui um factor estruturante na selecção dos pontos críticos.

5.2.2 – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS

Concluído o estudo mensal, percebemos que será necessário efectuar uma análise mais fina, de modo a perceber o impacto de cada afrouxamento, em função da localização, extensão, restrição de velocidade e tipo de material, pelo que, procederemos a uma análise diária.

O gráfico da figura 5.6, apresenta a evolução por linha, do número médio diário de Lv na RFN. As variações do valor médio, no período analisado, situam-se no intervalo 120-160¹⁰ (cerca de 70 por sentido), excepto em Abril, onde se assinala uma redução, em resultado de uma intervenção efectuada pela Refer na Linha do Norte, em Março. A Tabela 5.2 exemplifica o estudo realizado, enquanto que as tabelas mensais integraram o Anexo V-2.

Valores Médios Diários no Período Fevereiro-Outubro de 2009

Linha	Nº Médio Diário Lv por sentido	Extensão Média Diária Percorrida Lv (km)	Tempo Total Perdido Média/Dia (min)	Energia Perdida Média/Dia (kwh)	Custo Médio Diário da Energia (€)	Custo Diário KgCO ₂ e	Custo Total Médio Diário (Lv) (€)
Alentejo	5,48	2,068	66,44	293,03	27,34	2,14	74,54
Algarve	1,26	1,740	43,86	297,37	46,07	2,18	112,00
B.Alta	2,60	1,119	18,17	172,23	12,24	1,20	25,17
B.Baixa	6,41	2,186	78,57	567,61	53,38	4,02	127,06
Douro	10,52	7,832	250,87	1392,88	223,09	10,74	493,04
Leste/Cáceres	0,42	0,328	6,76	16,28	2,63	0,11	8,08
Minho	3,93	1,817	158,96	587,70	95,35	4,12	221,08
Norte(A)	14,10	14,412	229,54	2440,96	170,87	16,78	423,32
Norte(D)	10,78	12,914	220,52	2627,98	183,96	17,40	432,72
Oeste	3,71	1,875	92,69	338,59	55,76	2,32	127,24
Sul	8,69	6,126	40,55	376,78	26,37	2,55	64,49
R.Alfarelos	2,14	0,704	44,69	520,41	36,63	3,59	101,87
R.Lousã	3,38	0,424	80,61	230,25	37,01	1,62	98,98
Total	73,42	53,545	1332,24	9862,06	970,71	68,76	2309,59

Tabela 5.2 – Valores médios diários, para o período Fevereiro-Outubro de 2009.

Os valores médios diários relativos ao período em análise, confirmam a análise macro efectuada no ponto anterior. Salienta-se o facto de a linha do Sul apresentar um elevado número de Lv, sem reflexo significativo nos custos, resultado que se explica pelo facto de apenas circularem neste eixo 4 comboios regionais por dia, no entanto terá certamente expressão na oferta da CP Longo Curso, justificando o alargamento do modelo às outras Unidades.

5.2.3 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DIÁRIO DAS LV ≤ 30 KM/H

Na sequência do estudo realizado, observamos a forte possibilidade do peso das Lv ≤ 30 km/h ser elevado relativamente ao valor do custo total e por conseguinte, é importante

¹⁰ Como o estudo se desenvolveu no universo da CP Regional, apenas foram consideradas as Lv <120 km/h.

avaliá-lo em cada eixo. A tabela 5.3, exemplifica como foi organizada a informação recolhida. O número destas restrições representa cerca de 36,7% e o impacto nos custos é da ordem dos 50%, face ao total resultante das *Lv*.

Da análise produzida, concluímos que o peso destas *Lv* tem maior expressão na rede não electrificada, nomeadamente nos eixos com maior intensidade de tráfego, como são o Minho, Douro, Algarve e o Ramal da Lousã, onde a parcela relativa ao custo total, atinge valores na ordem dos 70%, em consequência do custo do diesel e da impossibilidade de recuperar energia cinética nas frenagens, confirmando a necessidade de eliminar com maior celeridade este tipo de restrições de velocidade, dando prioridade aos eixos referidos, uma vez que, na rede electrificada, raramente se ultrapassam os 50%.

Valores Médios $Lv \leq 30$ km/h - Período Fevereiro-Outubro de 2009

Linha	Nº Médio Mensal por sentido $Lv \leq 30$	% do total	Extensão Média Mensal $Lv \leq 30$ (km)	% do total	Energia Perdida Mês $Lv \leq 30$ (kwh)	% do total	Custo Médio Mensal da Energia Perdida $Lv \leq 30$ (€)	Tempo Perdido Mês $Lv \leq 30$ (min)	Custo Total Médio Mensal $Lv \leq 30$	% do total
Alentejo	20	13,6	5,521	8,8	2006,31	22,7	224,73	432,42	557,60	24,9
Algarve	20	58,0	37,971	71,8	6408,56	71,6	1120,43	741,74	2303,56	68,0
B.Alta	1	1,7	0,511	1,5	127,73	2,4	8,94	10,10	18,92	2,3
B.Baixa	94	51,0	44,456	67,4	12966,05	75,8	967,83	1308,07	2359,16	61,5
Douro	152	51,1	53,712	22,4	27845,34	65,4	4423,80	4702,64	9927,09	65,8
Leste/Cáceres	16	71,2	7,882	79,8	457,13	92,4	72,57	180,44	226,18	92,1
Minho	65	57,6	25,636	46,6	12052,65	68,0	1936,50	2837,39	4718,72	70,7
Norte(A)	41	19,3	13,318	3,0	17752,29	24,0	1341,75	1787,23	2660,07	20,7
Norte(D)	53	32,8	37,085	9,5	25045,52	31,5	1849,29	2368,13	4206,67	32,1
Oeste	33	31,3	7,646	13,5	4993,06	48,9	715,52	883,46	1909,83	49,7
Sul	44	16,0	17,110	9,2	2230,56	19,4	243,19	324,88	376,42	19,1
R.Alfarelos	31	71,0	12,589	58,5	15146,98	96,0	950,27	1165,44	2973,24	96,2
R.Lousã	78	83,7	9,672	76,2	6496,40	94,9	1195,79	2245,07	2742,87	93,1
Total	648	36,6	273,11	16,8	133528,58	44,7	15050,62	18987,01	34980,31	49,9

Tabela 5.3 – Impacto médio mensal das $Lv \leq 30$ km/h entre Fevereiro-Outubro de 2009.

No gráfico da figura 5.6, observamos a evolução média diária, do número de *Lv* impostas às circulações ferroviárias, por sentido e extensão, destacando-se o peso das $Lv \leq 30$ km/h, em cada uma das linhas onde a CPRG opera.

Há no entanto que perceber qual a localização e o período de actividade dos afrouxamentos mais restritivos.

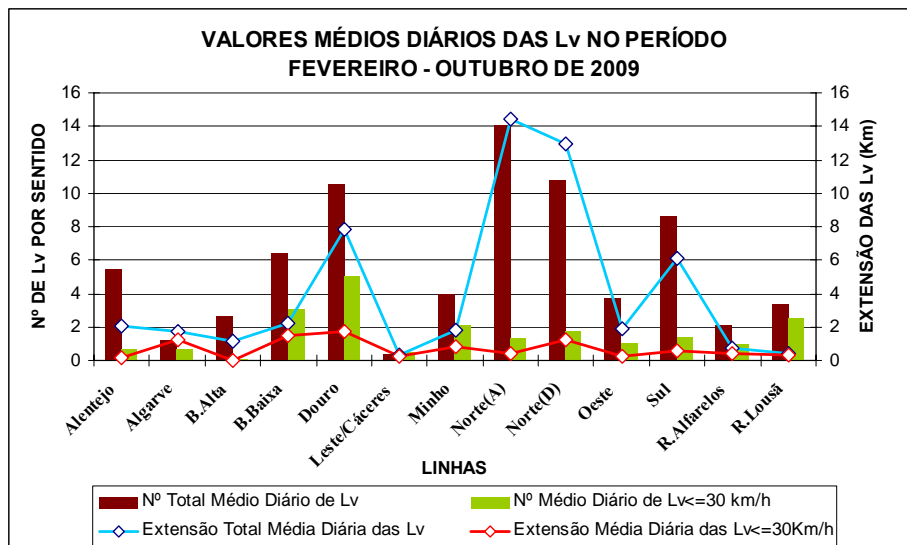


Figura 5.6 – Evolução do número médio diário de Lv por linha, sentido e extensão.

5.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS

Na terceira fase da análise estatística, faremos o cruzamento de todos os dados produzidos, para que possamos identificar os pontos críticos em cada uma das linhas.

LINHA	Pkinicio	Pkfim	Ext. (m)	V ₀	V _a	V _M	Data de Início da Lv	Sentido	Consumo diário de energia resultante da Lv(Kwh)	Custo Diário da Energia(€)	Total de minutos perdidos/dia	Min.comboio por dia		Custo total diário (€)	Custo total mensal (€)
												R	IR		
Douro	99,618	100,344	725	80	30	80	22-07-2009	A/D	402,04	66,89 €	64,14	2,04/1,84	2,04/1,84	154,20 €	4.625,96 €
Norte	77,18	83,2	6014	120	80	120	20-08-2009	D	950,81	66,56 €	50,85	1,82	1,82	138,82 €	4.164,58 €
Norte	77,1	77,18	80	120	30	120	11-08-2009	D	917,91	64,25 €	67,27	2,40	2,40	122,63 €	3.678,84 €
Douro	95,95	96,1	149	80	30	80	26-06-2009	A/D	346,40	54,19 €	63,92	1,84/2,04	1,84/2,04	121,37 €	3.641,15 €
R. Alfaielos	216,8	217	200	100	10	100	01-02-2009	A/D	477,83	33,45 €	40,86	1,75/0,80	-	95,30 €	2.859,07 €
Norte	79,528	82,87	3338	120	60	120	22-08-2009	A	623,74	43,66 €	32,40	1,34	2,11	88,36 €	2.650,68 €
Norte	75,35	77,1	1768	120	60	60	15-08-2009	D	586,77	41,07 €	18,38	0,66	0,66	71,75 €	2.152,55 €
Minho	76,21	76,36	150	80	30	90	22-08-2009	A/D	132,50	20,73 €	40,40	0,97/0,86	2,05/1,94	69,41 €	2.082,41 €
Norte	83,2	84,9	1697	120	60	120	16-07-2009	D	255,12	17,86 €	22,47	0,70	2,11	68,17 €	2.045,05 €
Norte	205,5	205,6	100	115	80	120	12-07-2009	D	323,31	22,63 €	47,64	1,59	1,59	60,17 €	1.805,14 €
Minho	55,85	55,95	100	100	60	100	22-07-2009	A/D	155,21	24,28 €	44,86	0,24/2,64	0,48/2,64	58,34 €	1.750,08 €
Douro	116,18	116,23	50	80	30	80	10-04-2008	A/D	115,80	35,08 €	21,64	1,23	2,04	56,03 €	1.681,04 €
Douro	115,32	115,37	50	80	10	80	06-03-2009	A/D	153,10	23,95 €	24,06	2,19	2,19	52,18 €	1.565,42 €
Douro	124,5	124,7	200	80	40	80	28-03-2001	A/D	106,09	32,13 €	20,92	1,90	1,90	51,44 €	1.543,21 €
Norte	70,45	73,35	2912	120	80	60	03-07-2009	A	345,75	24,20 €	14,42	0,63	0,63	43,81 €	1.314,26 €
Douro	97,486	98,28	794	80	60	80	07-08-2009	A/D	103,72	16,22 €	24,74	0,65	1,30	41,88 €	1.256,40 €
Norte	88,15	88,9	749	120	100	120	28-03-2009	D	243,05	17,01 €	36,66	1,31	1,31	41,61 €	1.248,25 €
Minho	127,1	127,69	589	100	80	100	21-07-2009	A/D	102,68	16,06 €	41,53	1,49/2,02	1,98/2,02	40,13 €	1.203,83 €
Norte	73,35	73,45	100	60	30	100	16-04-2009	D	123,95	8,68 €	17,34	0,49	0,49	37,87 €	1.136,03 €
Norte	84,6	85,1	500	100	80	120	29-03-2009	A	139,30	9,75 €	20,87	0,91	0,91	37,76 €	1.132,81 €

Tabela 5.4 – Ranking das 20 Lv activas com maior impacto na oferta da CPRG, actualizado a 22-08-09.

Através da consulta “*Apuramento de Custos*” (ver Anexo V-1), obtemos um relatório que exportamos para Excel, ambiente onde os dados serão organizados em função do custo total, permitindo identificar as *Lv* mais críticas em actividade na RFN, que se exemplifica na Tabela 5.4, construindo desta forma, a lista final dos pontos críticos (Anexo V-4), que será enviada à Refer e debatida em reuniões periódicas com a CP, permitindo ao gestor da infra-estrutura, programar e produzir uma solução de intervenção na RFN, que minimize o impacto financeiro e melhore a qualidade do serviço prestado aos clientes.

5.4 - A OPÇÃO CARRIL/ESTRADA

O atrito do rolamento da roda de aço sobre o carril, é cerca de quatro vezes menor que o ocorrente na combinação pneu-estrada (Castro, 1988a), pelo que, a opção parece óbvia.

No entanto, esta vantagem nem sempre é verificada na prática, existem mesmo muitos casos em que se verifica o contrário. A primeira explicação surgirá quando se compararem as massas dos veículos rodo e ferroviários, estes últimos significativamente mais pesados.

Acresce ainda, que a unidade elementar do transporte ferroviário, o comboio, dificilmente se ajusta às flutuações do tráfego, caindo em clara inferioridade quando a taxa de ocupação não atinja determinados mínimos; tal acontece com mais frequência nas circulações em contra-corrente, mesmo no tráfego urbano e suburbano de passageiros.

Assim sendo, os operadores ferroviários não poderão descurar a massa dos veículos que adquirirem, procurando concertar a capacidade oferecida e a procura real.

Nos eixos de reduzida procura, o modo rodoviário deverá constituir uma alternativa, mais favorável sob o ponto de vista energético e permitindo uma exploração mais flexível.

5.5 - A ELECTRIFICAÇÃO COMO SOLUÇÃO DE SUSTENTABILIDADE

Actualmente, na exploração ferroviária, são utilizados dois tipos de tracção, a diesel e a eléctrica. Em termos de consumo de energia primária a tracção eléctrica consome menos 25% de energia primária do que a diesel (Alvarez, 2009). Mas o consumo de energia primária, deixou de ser o indicador mais relevante. Actualmente o mais importante é a contribuição para o esgotamento das fontes de combustíveis fósseis e as emissões de gases com efeito de estufa.

O baixo preço do carburante diesel, retira na prática o interesse e a justificação económica em termos empresariais de todo e qualquer projecto de electrificação, designadamente ao nível da RFN. No entanto, embora a tracção eléctrica obrigue a avultados investimentos, necessários à construção de instalações fixas muito caras (como as subestações) ao longo da linha e obrigue à manutenção frequente da catenária e toda a infra-estrutura de alimentação de energia eléctrica, os custos do investimento, podem ter retorno de várias maneiras, considerando as vantagens dos motores eléctricos face aos diesel, ou seja:

- O custo do Kwh eléctrico é mais barato, porque está sujeito a menos impostos e beneficia de economias de escala, o que se traduz numa vantagem económica decisiva, que coloca a energia eléctrica em vantagem face ao gásóleo utilizado directamente;
- A termoelectricidade não depende forçosamente do petróleo, apresentando-se para já o carvão e a via nuclear como alternativas igualmente válidas, enquanto que a poluição associada à sua produção é mais controlada e longe dos núcleos urbanos. Em Portugal a via hidráulica não esgotou ainda as suas potencialidades;
- As unidades de tracção eléctrica, dispõem de uma autonomia energética ilimitada, enquanto que os veículos de tracção diesel, necessitam de se deslocar frequentemente para reabastecer. Este facto, associado aos maiores tempos de conservação dos motores diesel, implica a utilização de um menor número de unidades motoras eléctricas, para cumprir uma dada rotação de material;
- Em termos de energia primária, a tracção eléctrica consome grande parte de energia renovável, enquanto a diesel consome maioritariamente energia não renovável, especialmente dos derivados do petróleo;
- Outra vantagem, reside na possibilidade de recuperar e transformar a energia cinética da travagem em energia eléctrica, que pode ser aproveitada pelo próprio comboio (órgãos auxiliares) ou devolvida à catenária onde é consumida por outros comboios ou devolvida à rede pública, após transformar a corrente em tensão e frequência, sem sacrificar o tempo de tracção nem o aumento da potência instalada. A possibilidade de utilizar um freio eléctrico regenerativo, permite a redução em cerca de 17 a 36% da energia consumida e conseqüente redução das emissões de GEE.

Na tracção diesel, é já possível aproveitar parte da energia dissipada na frenagem, que poderá ser aproveitada em baterias ou devolvida à rede quando haja catenária. Foi

estimado que o rendimento total equivalente de um veículo Diesel-eléctrico, poderá deste modo, passar de 33% para cerca de 37% (López, 2006);

- Sempre que um comboio de tracção eléctrica se imobiliza, o consumo energético é praticamente nulo, ao paço que nos veículos de tracção diesel, os motores permanecem em funcionamento ao “ralenti”. Daqui resulta um maior número de horas de funcionamento dos motores diesel, dando origem a um maior consumo energético e maiores custos de manutenção.
- A tracção eléctrica, apresenta um menor índice de poluição química (menos emissões de CO₂) e sonora, problema com algum peso, em particular em zonas urbanizadas e de tráfego mais intenso.

As vantagens da tracção eléctrica, não são contudo apenas de ordem energética e ecológica, no domínio operacional a tracção eléctrica apresenta igualmente indiscutíveis vantagens face à tracção diesel:

- Em igualdade de potência instalada, as unidades tractoras diesel são mais caras e pesadas (menor potência mássica) do que as eléctricas (Gonçalves, 1974). A tracção eléctrica dispõe de um superior aproveitamento da aderência, menores custos de manutenção e conservação, maior vida útil e são mais fiáveis (Rives, 1983);
- Têm ciclos de manutenção mais dilatados, são menos complexas do ponto de vista mecânico e dispensam a caixa de velocidades (limitadora da potência). Têm capacidade de sobrecarga por períodos curtos, o que não acontece no modo diesel, que necessita de uma utilização moderada da sua potência nominal, sob o risco de aumentarem os custos de exploração. Este facto, é bastante importante em linhas de traçado sinuoso e com rampas, o que torna a tracção eléctrica a solução adequada à exploração (ver figura 5.8);
- A tracção eléctrica possibilita maiores valores de aceleração e consequentemente maiores velocidades comerciais, permitindo melhorar a capacidade do tráfego e a pontualidade do serviço prestado. Por outro lado, permite otimizar as técnicas de condução dos comboios, o que leva ao estabelecimento de marchas com um menor dispêndio de energia.

Qualquer que seja o método de propulsão utilizada, haverá que estar atento às oscilações de rendimento resultantes do regime de trabalho imposto, nomeadamente as flutuações de

carga e os arranques frequentes. Deste último factor, resultam importantes perdas: na tracção eléctrica pelo efeito ohmico inerente ao desenvolvimento de fortes binários e baixas velocidades; na tracção térmica, as perdas por escorregamento nas transmissões (embraiagens ou conversores) mais as perdas mecânicas geradas aos elevados regimes rotativos, que a multiplicação de binário motor obriga a praticar em todos os arranques.

Da comparação dos dois modos de tracção, concluímos que a tracção eléctrica é mais vantajosa no que diz respeito aos encargos de investimento e às despesas de energia e de conservação dos veículos motores. A tracção diesel é mais favorável do ponto de vista dos encargos do investimento e das despesas de conservação das instalações fixas de alimentação de energia. Quando às despesas de condução são praticamente idênticas. Deve portanto concluir-se que será o volume de tráfego a constituir o critério essencial de escolha de um ou de outro modo de tracção.

Evidentemente que, para um tráfego de fraca intensidade a tracção diesel é mais vantajosa. Acima de um certo nível de tráfego, a tracção eléctrica passa a ser mais económica no seu conjunto. O referido nível varia de caso para caso e constitui o chamado “limiar de electrificação” da linha em questão e poderá resultar da seguinte inequação (Henriques, 1991):

$$I > \frac{C_g \cdot i}{T} + C_m \cdot i + g \quad (5.1)$$

Em que, I representa a receita total por tonelada quilómetro bruta rebocada ($TkBr$) por ano; T a intensidade de tráfego por ano, C_g o capital investido nas instalações fixas de tracção; C_m o capital investido em material circulante por $TkBr$ e por ano; i a taxa de amortização dos capitais investidos e g as despesas totais de exploração por $TkBr$ e por ano.

Contudo, existem variações anuais de tráfego, novos investimentos em material circulante, variações nas tarifas energéticas, aumentos salariais, entre outros que poderão anualmente acarretar grandes alterações nos custos totais. Por esse motivo, será o custo total «actualizado» que deverá servir de comparação entre os tipos de tracção possíveis.

Nos últimos anos as decisões acerca dos programas de electrificação, não se têm cingido apenas aos resultados financeiros das empresas, sendo igualmente considerado o conjunto total do sistema de transportes, pois o cálculo de rentabilidade empresarial cada vez se considera menos adequado à causa dos problemas energéticos mundiais e, às consequências

sobre os custos e rentabilidade a nível do país. Por esse motivo, um critério importante para a eleição da electrificação é também a possibilidade de utilizar todos os recursos energéticos primários do país.

5.4.1. ESFORÇO ACELERADOR, VELOCIDADE COMERCIAL E TEMPOS DE PERCURSO

5.4.1.1. A influência da velocidade no consumo

A resistência ao avanço de um veículo, representa-se classicamente pela equação (Castro, 1988a):

$$R = \frac{1}{2} \rho . S . C_x . V^2 + R . Mg + Mg . \text{sen} \alpha + M \frac{dv}{dt} \quad (5.2)$$

Em que os termos do 2º membro representam sucessivamente, a resistência aerodinâmica, o atrito ao rolamento, as rampas e a inércia.

É assim evidenciado que a velocidade influi no consumo, quer por si própria (termo em V^2) quer através das suas oscilações (termo em $\frac{dv}{dt}$).

O primeiro factor terá maior expressão para velocidades superiores a 100 km/h, sendo mitigado pelas limitações de velocidade impostas e pelos perfis aerodinâmicos dos veículos (influência moderada através de S – área frontal projectada do comboio e C_x - factor de penetração), em túnel esta resistência é sensivelmente acrescida.

O segundo factor, a aceleração, é importante na medida em que, dela resultem frenagens mais ou menos intensas, seja para executar um esquema de paragens frequentes, típico dos percursos urbanos (acelerações repetidas), seja ainda para respeitar limites de velocidade impostos pela via, dando a perceber como podem ser penalizantes neste domínio, as restrições de velocidade - “*afrouxamentos*”.

5.4.1.2. Capacidade de aceleração e redução dos tempos de percurso

O número elevado de paragens, actualmente existente no serviço regional, associado à baixa capacidade de aceleração, característica do material diesel do parque da CPRG, são factores de peso, para a queda das velocidades comerciais na RFN não electrificada, ficando muito aquém da velocidade máxima (ver figura 5.9) e incrementando os tempos de percurso, de que resulta, a perda de competitividade face ao modo rodoviário.

Através da figura 5.7, podemos observar as curvas da aceleração em função da velocidade, para um perfil de linha em patamar, onde se constata que existe uma diferença substancial na sua forma evolutiva, podendo ser identificados dois tipos, um relativo à tracção eléctrica (*curva vermelha*) e outro à tracção diesel (*curvas restantes*).

É fácil perceber que a performance da tracção eléctrica (UTE 2240) é muito superior à da térmica, uma vez que dispõe de uma capacidade de aceleração, francamente superior, para qualquer intervalo de velocidades, diferença mais notória no arranque e para velocidades até 50 km/h. Nas UTE's, através da electrónica de potência, é possível manter o valor do Binário Motor constante, até velocidades na ordem dos 45 km/h, permitindo manter a aceleração com valor constante igual a 0,60 m/s².

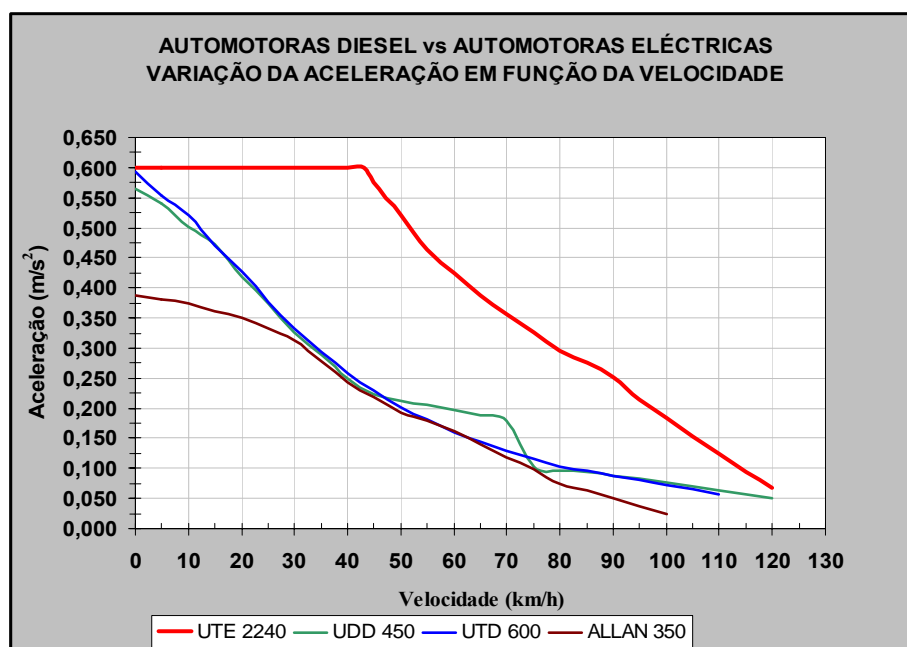


Figura 5.7 - Comparação do esforço acelerador das UTE 2240 com o das automotoras diesel, para um perfil em patamar e alinhamento recto.

Na prática, traduz-se na capacidade do veículo atingir a velocidade máxima programada, num menor espaço/tempo (ver figura 5.8), factor que multiplicado pelo número total de paragens, representa uma redução efectiva dos tempos de percurso.

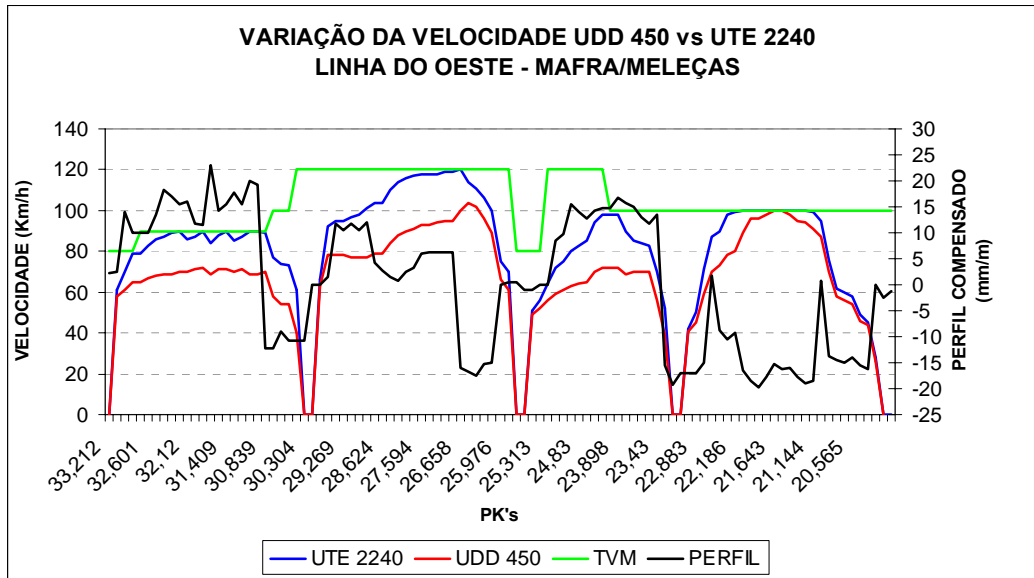


Figura 5.8 – Variação da velocidade em função do perfil da via - UDD 450 vs UTE 2240.

Permite igualmente atingir a TVM e circular durante mais tempo numa velocidade estabilizada, aproveitando a inércia atingida pelo comboio, praticando a deriva, o que se traduz numa redução dos consumos específicos e conseqüente melhoria da eficiência energética (ver figura 5.9).

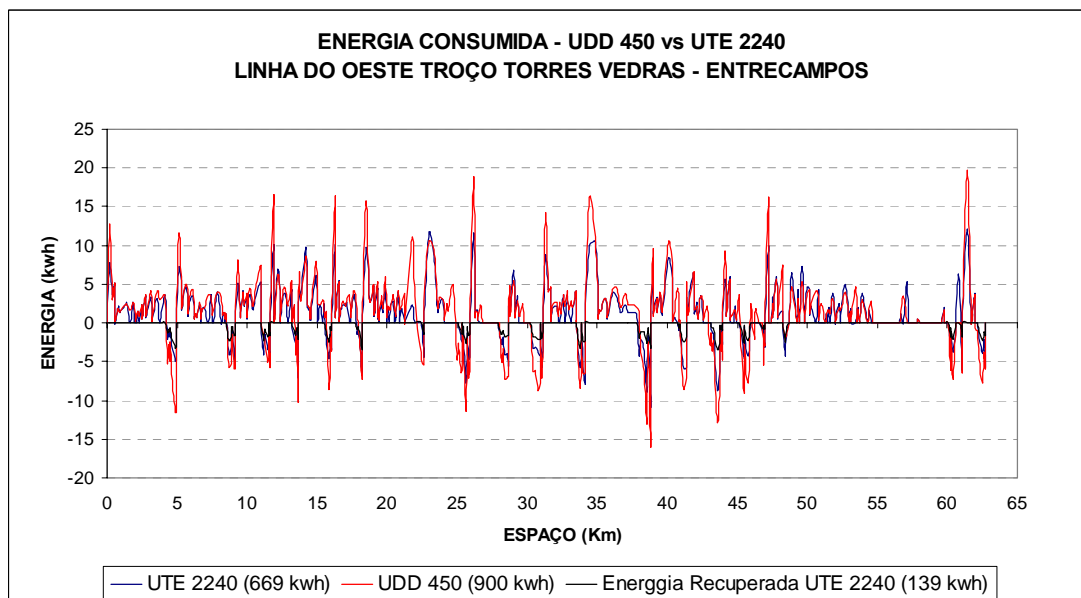


Figura 5.9 – Energia consumida – Tracção térmica vs Tracção eléctrica.

Por exemplo, em patamar para atingir a velocidade de 45 km/h, com tracção diesel em que a capacidade de aceleração é baixa, na ordem dos $0,22 \text{ m/s}^2$ (Figura 5.7), são necessários cerca de 34 segundos, enquanto que em tracção eléctrica são apenas necessários 20,7 segundos, portanto menos 39%. Se transferirmos o nosso referencial para um gradiente de 10mm/m, no modo diesel os valores da aceleração baixam para $0,13 \text{ m/s}^2$ (Figura 5.10), devido essencialmente à curva de potência dos motores, uma vez que os restantes factores são transversais, como o atrito roda /carril e as limitações de tracção, neste exemplo, os tempos evoluirão para 47 e 24,5 segundos respectivamente, que se traduz numa redução de 48%, traduzindo a vantagem da tracção eléctrica face à térmica, bem como, a importância da capacidade de aceleração na redução dos tempos de percurso e na minimização do impacto dos ciclos de frenagem/aceleração impostos pelos “afrouxamentos”, principalmente em linhas com gradientes elevados, como são as do Douro, Minho e Oeste. A figura 5.10 dá-nos indicação do impacto do gradiente da via, parâmetro responsável pelo incremento (proporcional à massa do veículo) da resistência ao avanço, na evolução do esforço acelerador em função da velocidade e na limitação do valor da velocidade máxima (aceleração nula), que no Diesel, se centraliza nos 70 km/h, enquanto na tracção eléctrica, é superior a 105 km/h, minimizando o impacto do perfil da via.

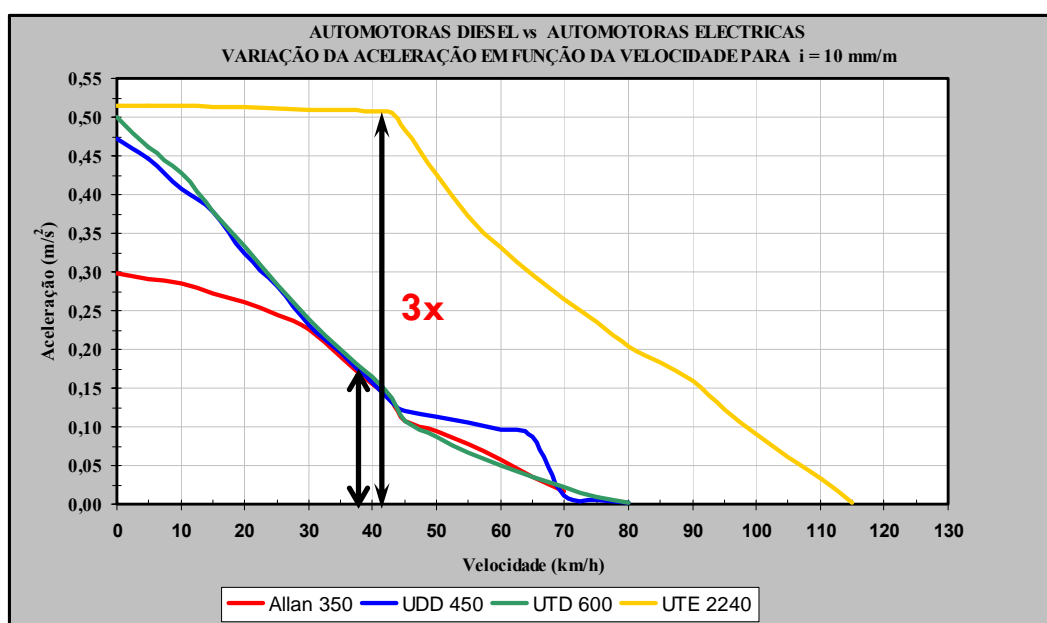


Figura 5.10 - Efeito de uma rampa de 10 mm/m na aceleração e no esforço acelerador.

A substituição do material diesel, que integra o actual parque da CPRG, por material eléctrico, nomeadamente as UTE 2240, permitiria reduzir substancialmente os tempos de percurso, na ordem dos 20% (ver Anexo V-5). A redução de tempo, aumentará em função do número de paragens efectuadas, uma vez que as automotoras diesel, são lentas e dispõem de acelerações residuais baixas e uma menor eficiência de frenagem, traduzida pela necessidade de mais espaço para parar e consequente necessidade de iniciarem a frenagem mais cedo face à tracção eléctrica.

No entanto, estas automotoras circulam nos eixos não electrificados, com intensidade de tráfego elevada e paragens frequentes, como são as linhas do Minho, Douro, Oeste e Algarve, condicionando a melhoria das velocidades comerciais e a consequente redução dos tempos de viagem.

A capacidade de aceleração, é um factor fundamental para melhorar os tempos de percurso. ***Aumentar a aceleração, significa reduzir os tempos de viagem sem aumentar a velocidade e portanto, com o mesmo consumo, por que este depende da velocidade e é praticamente independente da aceleração.***

Torna-se portanto pertinente, efectuar um último estudo que permite medir o impacto da electrificação de uma linha, com intensidade de tráfego elevada, no âmbito regional, através da substituição da tracção diesel (UDD 450) por tracção eléctrica (UTE 2240), reflectindo esta alteração estrutural nos custos operacionais, nomeadamente nos custos de manutenção, na factura energética, na redução dos tempos de viagem e impacto na captação de novos passageiros, vectores com reflexo na sustentabilidade de exploração. Neste referencial, iremos desenvolver um estudo simplificado para a Linha do Oeste, que servirá de referência para as restantes linhas.

5.4.2 - PRESSUPOSTOS

5.4.2.1 - Gerais

- O investimento é suportado pelo Orçamento Geral do Estado, pelo que, o estudo se reporta ao balanço dos custos operacionais.
- A análise foi realizada a preços constantes (sem considerar taxa de inflação) e tendo por cenário base o orçamento aprovado na CP, para a linha do Oeste em 2009, com tracção diesel (UDD 450).

- Consideramos que a taxa de utilização a pagar, terá um valor unitário igual ao mais elevado praticado actualmente na rede electrificada.

5.4.2.2 - CP Regional

No cenário da exploração com linha electrificada, consideraram-se as seguintes premissas:

- Manutenção da oferta actual.
- Custos unitários de 2009, das UTE's 2240 (consumos, renda/km e disponibilidade).
- Taxa de Uso com tracção eléctrica de 1,59 €/Ck.
- Consideramos que, com a redução do tempo de percurso e o maior conforto do Material Circulante (MC), é legítimo pensar que haverá um aumento do número de passageiros por comboio (P/C°), de acordo com a seguinte projecção:

2012 - 20% (14 P/C°); 2013 - 15% (12 P/C°); 2014 - 10% (9 P/C°); 2015 - 5% (5 P/C°)

5.4.2.3 - Conclusões

- A CP Regional pode reduzir, em cerca de 1.150.000 €/ano, os seus custos operacionais, (energia para tracção, renda MC e taxa de uso), (ver Anexo V-6).
- Com o aumento esperado na procura, os proveitos operacionais, da CP Regional, poderiam aumentar em cerca de 900 mil euros /ano, (ver Anexo V-6).
- A taxa de cobertura da linha do Oeste poderá passar, dos actuais 20%, para cerca de 37%, com os impactos considerados nos proveitos e nos custos.
- Não foram considerados impactos não financeiros directos (externalidades), nomeadamente os impactos ambientais, os impactos no congestionamento das vias rodoviárias e os impactos sociais e económicos para a região Oeste.

Apesar da simplicidade do estudo efectuado, podemos afirmar, que a electrificação reduzirá significativamente os custos de exploração da CP Regional (ver Anexo V-7). Também nos proveitos, a redução dos tempos de percurso, especialmente nas viagens entre os principais centros urbanos da região e destes para Lisboa, aliado ao maior conforto do material eléctrico da CP Regional (actual ou futuro) terão impactos positivos, uma vez que trarão mais pessoas para o transporte ferroviário.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A Rede Ferroviária Nacional, tem um traçado concebido no final do século XIX início do século XX, apresentando-se em muitos troços, desadequada à exploração ferroviária, considerando a grande distância das estações aos centros urbanos, o perfil e a velocidade máxima permitida, bem como, os baixos valores das velocidades comerciais praticados, que se afastam cada vez mais das velocidades máximas, constrangimentos que fazem do comboio um modo de transporte pouco competitivo, não constituindo uma alternativa ao modo rodoviário e que tem vindo a perder deste modo, uma significativa quota de mercado.

Na sequência da investigação e das análises efectuadas no âmbito deste trabalho, concluímos que a RFN se encontra num processo de degradação continua, percebida pelo elevado número de limitações de velocidade diárias (*afrouxamentos*), obrigando a ciclos frequentes de frenagem/aceleração, responsáveis por um consumo acrescido de energia que para a CP Regional, representa *3,41 MWh* por ano e que nos leva a questionar, se a Rede Ferroviária Nacional é capaz de desempenhar o seu papel fundamental, como instrumento de política energética. Estas restrições têm um custo anual de *1 Milhão de Euros* e são igualmente responsáveis pela perda anual de *7912 horas*, que corresponde à perda média diária de *3,04 minutos* por comboio; degradação a que os clientes são cada vez mais sensíveis, percebida pela continuada diminuição de passageiros.

Para melhorar as condições de sustentabilidade do sector ferroviário em Portugal, torna-se obrigatória a eliminação dos pontos críticos da infra-estrutura, medida que permitirá dar importantes saltos de capacidade, pelo que, a sua eliminação deverá constituir um objectivo prioritário do gestor da infra-estrutura. Muitas vezes, trabalhos relativamente modestos, permitirão uma maior utilização efectiva de capacidades potencialmente existentes.

No âmbito deste trabalho, foi produzido um modelo dinâmico, que permite identificar os pontos críticos da RFN, ordenando-os em função do impacto financeiro produzido, constituindo um ranking dos “afrouxamentos” efectuado com base na energia perdida e na valorização do tempo perdido. Pretende-se que esta informação integre um relatório mensal para o gestor da infra-estrutura, permitindo à Refer, programar a intervenção, que conduza à eliminação paulatina das Limitações de Velocidade, contribuindo decisivamente para

melhorar a eficiência energética, as velocidades comerciais, o conforto das viagens e o cadenciamento dos horários, repondo a utilidade social da RFN.

Além do que foi exposto anteriormente, a rede secundária e grande parte da rede complementar (Minho, Douro, Oeste e o Algarve), não se encontra electrificada, obrigando à *operação* com tracção diesel, frota com uma idade média na ordem dos 40 anos, que oferece más condições de conforto, apresenta baixos índices de fiabilidade e ciclos de manutenção que obrigam à imobilização frequente e prolongada das automotoras, reduzindo o índice de disponibilidade; factores que oneram substancialmente os custos de produção, quer pelo elevado custo da sua reparação/manutenção, quer pela menor eficiência energética, face à tracção eléctrica.

Realça-se também, a baixa performance das séries diesel (UTD 600, UDD 450 e ALLAN 350), motivada pelos baixos valores da aceleração que, devido à curva de potência dos motores, cai rapidamente nas rampas ou com o incremento da velocidade, apresentando valores residuais (*inferiores a 0,2 m/s²*), para velocidades acima dos 60 km/h. Esta limitação do esforço acelerador, contribui de forma relevante, para o aumento dos tempos de percurso, factor muito valorizado pelos clientes e desaconselha a utilização deste material, para operar em serviços com um elevado número de paragens, como é o caso do serviço Regional, reprovando a decisão de modernização efectuada nas últimas décadas nas séries UDD 450 e ALLAN 350, em que se consumiram recursos financeiros que possibilitariam a renovação da frota diesel, condição necessária para a criação de condições de sustentabilidade do transporte ferroviário nos eixos não electrificados.

Concluimos que do ponto de vista da eficiência energética e, da rapidez da viagem, convém aumentar o mais possível a aceleração/desaceleração dos comboios, facto que constitui mais um argumento para a tomada de decisão urgente, de substituir a actual frota diesel da CPRG por material de tracção eléctrica, sendo prioritária a conclusão da electrificação da rede principal numa extensão de cerca de 140 km. Numa segunda fase e de modo faseado, esta estratégia deverá ser alargada a alguns troços da rede secundária, nomeadamente o Tunes/Lagos (45,3 km), Faro/Vila Real de S. António (56 km) e Torres Vedras/Louriçal (127,7 km), numa extensão total de 229 km.

Para além da maximização dos coeficientes médios de ocupação, assumem particular relevância, as acções que visem minimizar a massa estrutural dos comboios, parâmetro que

nunca deverá ser descurado no processo de aquisição de veículos, tendo também em atenção a capacidade oferecida e a procura real. Convém adequar as características técnicas dos veículos (peso, dimensões, motor, transmissão), bem como, o estilo de condução ao tipo de exploração. Enquanto que, nas zonas de baixa densidade demográfica, o autocarro pode e deve, constituir uma solução mais favorável sob o ponto de vista energético, isto além da maior flexibilidade de exploração que proporciona.

É de capital importância que o IMTT, assuma as funções de regulador do Sector e promova a revisão da Regulamentação, ajustando-a às condições de exploração actuais. Destaca-se o Regulamento 21/05, que estabelece as regras do relacionamento entre os Operadores e a Refer enquanto gestor da infra-estrutura. Este regulamento, deverá ser revisto numa óptica de tornar os processos transparentes e de colocar os Operadores no mesmo nível de responsabilidade da Refer, assumindo o IMTT o papel de árbitro, cenário em que deverá urgentemente ser implementada a monitorização do desempenho e definidos níveis de serviço, elegendo como principais indicadores, o Índice de Pontualidade e a Velocidade Comercial, que servirão de referencial para aferir os valores a pagar à Refer, pela utilização da infra-estrutura, introduzindo assim, uma dinâmica de melhoria continua.

6.1 TRABALHOS A REALIZAR NO FUTURO

- Alargamento do modelo aos comboios de Longo Curso (Alfas e Inter-Cidades), aos de mercadorias e por último aos urbanos do Porto e de Lisboa.
- Produção de uma ferramenta informática, que permita identificar as avarias por parque, série e centro oficial, dando indicação da tipologia das avarias frequentes, que serão reportadas à EMEF para correcção e simultaneamente medir a eficácia da intervenção; associando a cada registo o maquinista envolvido, permitindo identificar eventuais necessidades de formação.
- Construção de um modelo de condução eficiente para utilização dos maquinistas em função da linha.
- Construção de uma matriz origem/destino, para adequação da lei de paragens de cada família de comboios à procura actual.
- Simulador de marcha para adequação do material à exploração.
- Impacto da electrificação da rede convencional.