



Avaliação experimental do desempenho de bicicletas e motociclos convencionais e elétricos em contexto urbano

Magno André Nunes Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Mário Manuel Gonçalves da Costa

Orientador: Doutora Patrícia de Carvalho Baptista

Co-orientador: Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogal: Professor Miguel Perez Neves Águas

Outubro 2013

Resumo

Uma das principais aplicações das bicicletas e de motociclos elétricos reside nos sistemas de partilha destes veículos em circuito urbano, pelo que o principal objetivo deste trabalho consistiu em analisar possíveis percursos de partilha de bicicletas e de motociclos na cidade de Lisboa, quantificando a energia despendida, tempos de realização dos percursos, perfil de condução e nas bicicletas, estimar o esforço humano. Neste trabalho, foram monitorizadas 3 bicicletas e 3 motociclos convencionais e elétricos, tendo sido desenvolvida metodologia para quantificar a potência necessária em cada instante de condução. No caso dos motociclos, esta metodologia foi denominada por MSP e no caso das bicicletas por BSP. Para as bicicletas, foi ainda desenvolvida uma metodologia que permite quantificar a energia despendida pelo ciclista associada à utilização das bicicletas. O padrão de utilização das bicicletas e motociclos elétricos e convencionais é semelhante nos modos negativos de BSP e MSP, mas difere nos modos positivos. Verificaram-se variações de 11,1% e -22,6% na velocidade média para a utilização de bicicletas e motociclos elétricos respetivamente, face à utilização das suas versões convencionais. Na análise dos possíveis percursos de partilha de veículos, a utilização duma bicicleta elétrica leva à redução da variação do ritmo cardíaco (-48,1%), bem como a uma redução no consumo total de energia (-11,1%) e no tempo de viagem (-9,5%), quando comparado com a convencional. No geral, a utilização de um motociclo elétrico permite a redução no consumo de energia (-58,5%) e o aumento no tempo de viagem (35,6%), quando comparado com o convencional.

Palavras-Chave:

Monitorização em estrada; bicicletas; motociclos; BSP; MSP; sinais fisiológicos.

Abstract

One of the main applications of electric bicycles and motorcycles is in sharing systems in urban environments. The main objective of this work was to quantify the energy consumption, time of travel, driving profile and, in the bicycles case, estimate the human effort of possible routes of bicycles and motorcycles sharing systems in Lisbon. In this study, 3 electric and conventional bicycles and 3 electric and conventional motorcycles were monitored, and a methodology was developed to quantify the power required in each driving second. In the case of motorcycles, this methodology was named MSP and, in the case of bicycles, BSP. Furthermore, for bicycles a methodology was developed to quantify the cyclist expended energy associated with the use of the bicycle, which was based on the measurement of heart rate. For the negative modes of MSP and BSP, conventional and electric motorcycles and bicycles demonstrated a similar pattern, but for positive modes their behavior differs. There are variations of 11.1% and -22.6% in average speed for use the electric bicycles and motorcycles respectively, compared to the conventional versions. In the analysis performed on the possible routes of sharing systems, the electric bicycle always allows a reduction in the variation of heart rate (-48.1%), in the overall energy consumption (-11.1%) and in the travel time (-9.5%) when compared with the conventional bicycle. In general, the use of an electric motorcycle allows a reduction in energy consumption (-58.5%) and an increase in travel time (35.6%) compared to the conventional motorcycle.

Key-Words:

On-road monitoring; bicycles; motorcycles; BSP; MSP; physiological signals.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de expressar a minha imensa gratidão às seguintes empresas: Prio.e; EMEL; Ecocritério e EDP Valor, pois sem as suas colaborações não teria sido possível a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os que participaram nas monitorizações para a recolha de dados deste trabalho, em especial ao Doutor Gonçalo Gonçalves, Jorge Alves e Ricardo Lopes.

Agradeço à minha orientadora, Doutora Patrícia de Carvalho Baptista, e ao meu Co-orientador, Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte, pelo seu incessável empenho e dedicação, pelo vasto conhecimento transmitido, pela constante motivação que me transmitiram e ideias sugeridas, pelas inúmeras revisões que efectuaram a este documento e sobretudo pela cumplicidade e pelo bom ambiente que proporcionaram.

Como não podia deixar de ser, agradeço aos meus familiares mais chegados nomeadamente à minha Mãe, Irmã, Padrasto e Cunhado pelo apoio constante e incondicional transmitido em todos os momentos da minha vida, pela compreensão e amor demonstrado ao longo desta importante etapa.

Não poderia deixar de agradecer a todos os meus amigos, de uma forma especial ao Renato Ribeiro, João Sargo, António Ramos e Joaquim Ornelas, por toda a amizade, companheirismo, solidariedade e espírito de entreatajuda que se estabeleceu entre nós, o que me permitiu ter a força necessária durante estes 5 anos de curso.

Por fim e não menos importante, agradeço ao meu Pai, que estará para sempre presente na minha memória!

Índice

Resumo.....	ii
Abstract	iii
Agradecimentos	iv
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Equações.....	x
Índice de Tabelas	xii
Lista de símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Contextualização de mobilidade elétrica	2
1.3 Utilização de bicicletas e de motociclos em contexto urbano.....	5
1.4 <i>State-of-art</i> relativo à monitorização em operação real de bicicletas e motociclos.....	7
1.5 <i>State-of-art</i> relativo à determinação do esforço humano durante o exercício físico	10
1.6 Objetivos	12
2 Metodologia.....	13
2.1 Definição de veículos e percursos monitorizados.....	13
2.2 Laboratório de monitorização em estrada	15
2.3 Recolha e processamento de dados	16
2.4 ADVISOR	17
2.5 Potência específica nos veículos de duas rodas	20
2.5.1 Potência específica nos motociclos (MSP)	23
2.5.2 Potência específica nas bicicletas (BSP).....	26
3 Resultados	30
3.1 Caracterização dinâmica dos veículos	30
3.1.1 Potência específica nos motociclos (MSP) resultados	30
3.1.2 Potência específica nas bicicletas (BSP) resultados	40
3.2 Dados fisiológicos	48
3.3 Aplicações a casos de estudo.....	54
3.3.1 Motociclos	54
3.3.2 Bicicletas	61
4 Conclusões e Indicações para um trabalho futuro.....	68
4.1 Conclusões.....	68
4.2 Indicações para um trabalho futuro	71
5 Referências bibliográficas	73
Anexo A – Tabelas com os valores dos gráficos	I
Anexo B – Aplicações específicas da BE2	V

Índice de Figuras

Figura 2.2-1 - BE1, ME1, BE2 e ME2 respectivamente com o ciclista/motociclista a transportar o laboratório	15
Figura 2.2-2 - BC com o ciclista transportando o laboratório e MC	15
Figura 2.2-3 - Equipamento utilizado	16
Figura 2.2-4 - Interface de aquisição de dados	16
Figura 2.4-1 - Imagem do layout do ADVISOR. Primeira janela: Escolha dos componentes do veículo, e inserção dos dados e valores nominais para cada componente	18
Figura 2.4-2 - Segunda janela do layout do ADVISOR: Inserção das propriedades da simulação	19
Figura 2.4-3 - Resultados de uma simulação	19
Figura 2.4-4 - Diagrama de blocos do Simulink/MATLAB que rege a simulação do ADVISOR (62)	20
Figura 2.5-1 - Diagrama de corpo livre de um motociclo	22
Figura 2.5-2 - Frequência cumulativa de todos os MSP, calculados a partir dos dados medidos em estrada, utilizando os motociclos elétricos (ME1 e ME2) e o motociclo convencional (MC)	24
Figura 2.5-3 - Frequência cumulativa de todos os BSP, calculados a partir dos dados medidos em estrada, utilizando as bicicletas elétricas (BE1 e BE2) e a bicicleta convencional (BC)	28
Figura 3.1-1 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para os dois tipos de motociclos	31
Figura 3.1-2 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o MC	32
Figura 3.1-3 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o ME1	33
Figura 3.1-4 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o ME2	33
Figura 3.1-5 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para os três motociclos	34
Figura 3.1-6 - Energia consumida por modo de MSP para o ME1	34
Figura 3.1-7 - Mapa de eficiência de um motor elétrico (77)	36
Figura 3.1-8 - Energia consumida por modo de MSP para o ME2	36
Figura 3.1-9 - Energia consumida por modo de MSP para o MC	38
Figura 3.1-10 - Variação da velocidade média com o declive da estrada	41
Figura 3.1-11 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para todas as bicicletas testadas	42
Figura 3.1-12 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BC	43
Figura 3.1-13 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE1	43
Figura 3.1-14 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE2	44
Figura 3.1-15 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE (BE1+BE2)	44
Figura 3.1-16 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BC e BE	45
Figura 3.1-17 - Energia consumida por modo de BSP para a BE1	45
Figura 3.1-18 - Energia consumida por modo de BSP para a BE2	46
Figura 3.1-19 - Energia consumida por modo de BSP para a BE	46

Figura 3.2-1 - Relação entre BSP e $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para o total das monitorizações	49
Figura 3.2-2 - Relação entre BSP e $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para o total a BE e BC	50
Figura 3.2-3 - Energia global que é despendida pelo ciclista em função do HR	51
Figura 3.2-4 - EE por modo de BSP para a BC e para a BE	52
Figura 3.2-5 - Total de energia consumida por km, para a BC e para BE	53
Figura 3.3-1 - Maxi scooter elétrica monitorizada nos casos de estudo, ME3	54
Figura 3.3-2- Distribuição temporal (%) MSP percurso do Saldanha para o ME3	56
Figura 3.3-3 - Distribuição temporal (%) de MSP percurso da Cidade Universitária para o ME3.....	57
Figura 3.3-4 - Distribuição temporal (%) MSP percurso do Saldanha para o MC	57
Figura 3.3-5 - Distribuição temporal (%) de MSP percurso da Cidade Universitária para o MC	58
Figura 3.3-6 - Estimativa da distribuição temporal de MSP para o ME2 no percurso do Saldanha, monitorizado com o MC	59
Figura 3.3-7 - Estimativa da distribuição temporal de MSP para o ME2 no percurso da Cidade Universitária, monitorizado com o MC	59
Figura 3.3-8 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Castelo	61
Figura 3.3-9 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Belém.....	62
Figura 3.3-10 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Saldanha.....	62
Figura 3.3-11 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso da Cidade Universitária	62
Figura 3.3-12 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso do Castelo.....	64
Figura 3.3-13 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso de Belém.....	65
Figura 3.3-14 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso do Saldanha.....	65
Figura 3.3-15 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso da Cidade Universitária	65
Figura B1 - Influência das mudanças mecânicas no consumo no modo Pedal	V
Figura B2 - Velocidade média da mesma viagem em três modos diferentes	VI
Figura B3 - Aceleração média da mesma viagem em três modos diferentes	VI
Figura B4 - Potência consumida por km na mesma viagem em três modos diferentes	VII
Figura B5 - Energia consumida por km na mesma viagem em três modos diferentes	VIII

Índice de Equações

Equação 2.5-1 - Equação do VSP para ligeiros	20
Equação 2.5-2 - Equação do VSP para pesados	20
Equação 2.5-3 - Dedução do MSP	22
Equação 2.5-4 - Equação do MSP reorganizada	23
Equação 2.5-5 - Equação genérica do MSP	23
Equação 2.5-6 - Equação do BSP	26
Equação 2.5-7 - Equação genérica do BSP	27
Equação 3.2-1 - EE em função do HR segundo a referência (58)	50
Equação 3.2-2 - EE em função do HR segundo a referência (56)	51
Equação 3.2-3 - EE em função do HR segundo a referência (57)	51
Equação 3.2-4 - EE em função do HR, equação média	51

Índice de Tabelas

Tabela 2.1-1 - Características dos veículos monitorizados	13
Tabela 2.1-2 - Caracterização dos percursos efetuados	13
Tabela 2.1-3 - Distribuição dos motociclos pelos diferentes percursos	14
Tabela 2.1-4 - Distribuição das bicicletas pelos diferentes percursos.....	14
Tabela 2.5-1 - Distribuição da VSP por modos	21
Tabela 2.5-2 - Valores encontrados nas seguintes referências (72), (73), (74).....	23
Tabela 2.5-3 - Valores usados para cada variável do MSP	23
Tabela 2.5-4 - Análise para o agrupamento do MSP em modos.....	25
Tabela 2.5-5 - Agrupamento da metodologia MSP em 17 modos.....	25
Tabela 2.5-6 - Valores encontrados na seguinte referência (70)	27
Tabela 2.5-7 - Valores usados para cada variável do BSP	27
Tabela 2.5-8 - Análise para o agrupamento do BSP em modos	29
Tabela 2.5-9 - Agrupamento da metodologia BSP em 11 modos	29
Tabela 3.1-1 - Estatística de viagem para os diversos percursos para MC, ME1 e ME2	30
Tabela 3.1-2 - Comparação entre o motociclo convencional os motociclos elétricos	31
Tabela 3.1-3 - Eficiência do ME1 nos modos de MSP positivos	35
Tabela 3.1-4 - Eficiência do ME2 nos modos de MSP positivos	37
Tabela 3.1-5 - Eficiência do MC nos modos de MSP positivos	38
Tabela 3.1-6 - Verificação dos perfis de consumo dos motociclos elétricos	39
Tabela 3.1-7 - Diferença entre o consumo real e o estimado do ME1 e ME2.....	39
Tabela 3.1-8 - Verificação do perfil de consumo do motociclo convencional.....	39
Tabela 3.1-9 - Diferença entre o consumo do ADVISOR e o estimado do MC.....	39
Tabela 3.1-10 - Estatística de viagem para os diversos percursos para BC e BE	40
Tabela 3.1-11 - Comparação entre a bicicleta convencional (utilizada como referência) e as bicicletas elétrica	40
Tabela 3.1-12 - Relação entre a velocidade e o declive para a BE e para a BC	41
Tabela 3.1-13 - Comparação entre a energia calculada pelo BSP e a fornecida pela bateria da BE.....	47
Tabela 3.1-14 - Verificação dos perfis de consumo das bicicletas elétricas	47
Tabela 3.1-15 - Diferença entre o consumo real e o estimado da BE1 e BE2.....	47
Tabela 3.2-1 - $\sum(\Delta HR)$ para a BC e para a BE	50
Tabela 3.3-1 - Características da maxi scooter elétrica monitorizada nos casos de estudo	55
Tabela 3.3-2 - Estatística de viagem para os percursos do caso de estudo realizados de MC e de ME3	55
Tabela 3.3-3 - Estatística de viagem para os casos de estudo com o ME3.....	56
Tabela 3.3-4 - Diferença entre a distribuição temporal de MSP do MC e do ME2.....	58
Tabela 3.3-5 - Estimativa da estatística de viagem para os casos de estudo com o ME2	60
Tabela 3.3-6 - Estatística de viagem para os percursos do caso de estudo realizados de BC	63

Tabela 3.3-7 - Diferença entre a distribuição temporal de BSP da BC e da BE	64
Tabela 3.3-8 - Estimativa da estatística de viagem para os casos de estudo com a BE	66
Tabela 3.3-9 - Resumo dos resultados para os casos de estudo	67
Tabela A1 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.1-1, Figura 3.1-2, Figura 3.1-3, Figura 3.1-4, Figura 3.1-9, Figura 3.1-6 e Figura 3.1-8.....	I
Tabela A2 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.3-4, Figura 3.3-5, Figura 3.3-2, Figura 3.3-3, Figura 3.3-6 e Figura 3.3-7	I
Tabela A3 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.1-11, Figura 3.1-12, Figura 3.1-13, Figura 3.1-14, Figura 3.1-15, Figura 3.1-17, Figura 3.1-18 e Figura 3.1-19.....	II
Tabela A4 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.2-1, Figura 3.2-2 e Figura 3.2-4	II
Tabela A5 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.3-8, Figura 3.3-9, Figura 3.3-10, Figura 3.3-11, Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15.....	III

Lista de símbolos

Siglas

BC – Bicicleta convencional

BE – Bicicleta elétrica genérica

BE1 – Bicicleta elétrica número um, cedida pela Prio.e

BE2 – Bicicleta elétrica número dois, cedida pela Ecocritério

BEV – Na literatura inglesa Battery Electric Vehicle, veículo elétrico a baterias

BPS – Na literatura inglesa Bike Power Saver, poupança de potência em bicicleta

BSP – Na literatura inglesa Bicycle Specific Power, potência específica nas bicicletas

CO₂ – Dióxido de carbono

CV – Na literatura inglesa Conventional Vehicle, veículo convencional

DLW – Na literatura inglesa Doubly Labelled Water, método para estimar o consumo de energia do corpo humano

EE – Na literatura inglesa Energy Expenditure, consumo de energia do corpo humano

EE_{BC} – Energy Expenditure para a bicicleta convencional

EE_{BE} – Energy Expenditure para a bicicleta elétrica

EU-27 – 27 Estados-Membros da União Europeia

EV – Na literatura inglesa Electric Vehicle, veículo elétrico

FPGA – Na literatura inglesa Field-Programmable Gate Array, controlador de um motociclo elétrico

GHG – Na literatura inglesa GreenHouse Gases, gases de efeito estufa

GPS – Na literatura inglesa Global Positioning System, sistema de posicionamento global

HEV – Na literatura inglesa Hybrid Electric Vehicles, tecnologia de veículos elétricas

HR – Na literatura inglesa Hear Rate, frequência cardíaca

MC – Motociclo convencional

ME – Motociclo elétrico genérico

ME1 – Motociclo elétrico número um, cedido pela EMEL

ME2 – Motociclo elétrico dois, cedido pela Ecocritério

ME3 – Motociclo elétrico três, cedido pela EPD Valor

MSP – Na literatura inglesa Motorcycle Specific Power, potência específica nos motociclos

P1 – Percurso número um

P2 – Percurso número dois

P3 – Percurso número três

P4 – Percurso número quatro

P5 – Percurso número cinco

P6 – Percurso número seis

PA – Na literatura inglesa Pedal Assist, tecnologia de bicicletas elétricas

PC – Na literatura inglesa Personal Computer, computador pessoal

PEV – Na literatura inglesa Personal Electric Vehicle, veículo elétrico pessoal
PHEV – Na literatura inglesa Plug-in Hybrid Electric Vehicles, tecnologia de veículos elétricas
POD – Na literatura inglesa Power On Demand, tecnologia de bicicletas elétricas
SO₂ – Dióxido de enxofre
TTW – Na literatura inglesa Tank-To-Wheel
USB – Na literatura inglesa Universal Serial Bus
VSP – Na literatura inglesa Vehicle Specific Power, potência específica nos veículos
WTW – Na literatura inglesa Well-To-Wheel

Símbolos alfabéticos

A – Área frontal do conjunto ciclista/motociclista e bicicleta/motociclo
a – Aceleração da bicicleta/motociclo
C – Coeficiente de resistência aerodinâmica
C_R – Coeficiente de rolamento
E_{U_BC} – Energia útil para a bicicleta convencional
E_{U_BE} – Energia útil para a bicicleta elétrica
g – Aceleração da gravidade
m – Massa do conjunto ciclista/motociclista e bicicleta/motociclo
v – Velocidade da bicicleta/motociclo
v_v – Velocidade do vento

Símbolos gregos

ε_H – Eficiência do corpo humano
ε_i – Fator de massa
ε_M – Eficiência do motor elétrico
θ – Inclinação da estrada
ρ_a – Densidade do ar ambiente

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O sector dos transportes tem enfrentado desafios crescentes em termos de consumo de energia, emissões e congestionamento. O sector mencionado, (o qual inclui transportes rodoviários, ferroviários, aviação internacional e doméstica e navegação doméstica) em 2011 foi responsável por 33% da energia final consumida, sendo que a componente rodoviária foi responsável por 81,7% desse consumo (1), de acordo com valores referentes aos 27 Estados-Membros da União Europeia (EU-27).

Em 2011 o sector dos transportes nos EU-27 teve a seu cargo 63,8% do consumo dos produtos derivados do petróleo, sendo a componente rodoviária responsável por 82,6% desse consumo (1). Em relação às emissões de gases de efeito estufa (GHG) - expressos em CO₂ equivalente - o sector dos transportes foi responsável em 2009 por 25% das emissões totais, pertencendo 71,7% dessas emissões ao sector rodoviário (2).

Torna-se importante realçar que tanto os valores do consumo de energia como das emissões dos GHG têm vindo a aumentar consecutivamente de ano para ano desde 1990, de acordo com dados da Comissão Europeia (2).

Em Portugal o contexto é um pouco mais preocupante, visto o sector dos transportes em 2011 ter sido responsável por cerca de 40% da energia final consumida no país, sendo que a componente rodoviária foi responsável por 82,3% desse consumo (1). Em 2011, o sector dos transportes consumiu 76,5% dos produtos derivados do petróleo, tendo a componente rodoviária contribuído com 81,9% desse consumo (1). Este sector foi ainda, responsável por 29,3% das emissões totais de GHG em Portugal no ano de 2009, sendo que 78,8% dessas emissões estiveram na responsabilidade do sector dos transportes rodoviários (2).

Ao longo dos últimos 20 anos, o crescimento do número de veículos *per capita*, também aumentou substancialmente. Nos EU-27, em 1991, existiam 334 automóveis de passageiros (categoria que abrange táxis e automóveis de passageiros com menos de 10 assentos) por 1000 habitantes. Em 2002 esse valor subiu para 440, e dados mais recentes apontam para 473 automóveis de passageiros por 1000 habitantes em 2009. Em Portugal, no ano de 1991, existiam 183 automóveis de passageiros por 1000 habitantes, em 2002 este número já era de 549, indicando um elevado aumento da taxa de motorização do país (2).

De forma a reduzir a energia consumida, bem como obter uma diminuição nas emissões dos GHG, a abordagem tradicional passa pela melhoria da eficiência dos veículos e pela introdução de tecnologias de veículos e combustíveis alternativos (3).

Em termos de tecnologias de veículos alternativos e fontes de energia alternativas, o uso de hidrogénio e eletricidade têm vindo a ser considerados como uma oportunidade para reduzir significativamente a quantidade de CO₂ emitido pelo sector dos transportes, além de que, poderá proporcionar o aumento da penetração das energias renováveis (4). A utilização de veículos a hidrogénio ou eléctricos introduz benefícios em sistemas urbanos, resultado da ausência de ruído e de emissões

loais. Contudo, estas tecnologias enfrentam ainda diversas dificuldades que as impedem de se estabelecer no mercado como uma verdadeira alternativa, nomeadamente a falta de infraestrutura de abastecimento e o custo mais elevado dos veículos. Além disso, mesmo que comecem a ser incorporadas no mercado, só conseguirão ter impacto a longo prazo, devido à baixa taxa renovação associada às frotas (5).

Esta abordagem direcionada para a alteração das tecnologias não será completamente bem-sucedida se não existir uma mudança no comportamento da população, de forma a tornar-se mais eficiente no modo como utiliza os diferentes tipos de transporte. As medidas essenciais para reduzir o impacto do sector dos transportes, principalmente em ambientes urbanos, passam por diminuir os gastos energéticos associados aos transportes, fornecer alternativas mais económicas, menos ruidosas e mais sustentáveis comparativamente às viagens diárias de carro.

Existem três modelos alternativos de transporte possíveis: os sistemas de transporte público (autocarro, comboio, metro, entre outros), sistemas de partilhas de veículos (aplicado a carros, motociclos e bicicletas) e modos de transporte alternativos tais como andar a pé, bicicleta privada, entre outros (6).

De acordo com o exposto, a promoção de cada uma destas alternativas requer o desenvolvimento de diversas políticas de transporte que incentivem a população a utilizá-las. Regra geral, em todas as cidades, encontra-se instituído algum tipo de sistema de transporte público, por outro lado o sistema de partilha de veículos e os meios de transporte alternativos são sistemas mais recentes e que necessitam ainda de ser promovidos (7). Nesse sentido, este trabalho pretende realçar a aplicabilidade da utilização urbana de bicicletas convencionais e elétricas, assim como de motociclos elétricos, ao nível energético e em termos de dinâmica, uma vez que se tratam de alternativas mais sustentáveis.

1.2 Contextualização de mobilidade elétrica

Após aproximadamente um século no qual os motores de combustão interna dominaram o sector dos transportes, começam a emergir tecnologias de veículos alternativas, sendo os híbridos gasolina-elétrico (HEV) os que mais se evidenciaram, seguidos pelos híbridos Plug-in (PHEVs) e finalmente os veículos elétricos a bateria (BEVs) (8). A adoção em larga escala deste tipo de veículos poderá trazer mudanças significativas para a sociedade, tanto a nível das tecnologias utilizadas para o transporte de pessoas e bens, assim como a possibilidade de reduzir a dependência para com o mercado petrolífero e, desta forma, diminuir o impacto ambiental causado pelos transportes.

Nos últimos anos, a mobilidade elétrica tem vindo a ganhar visibilidade com o seu surgimento no mercado de diversos veículos. Além do mais, alguns governos têm promovido medidas de incentivo à adoção destas tecnologias.

Mais detalhadamente, os veículos que incluem uma componente elétrica para a locomoção do veículo estão separados essencialmente em três grupos:

- Veículos híbridos (HEV, do inglês *Hybrid Electric Vehicles*), combinam o motor de combustão interna com um motor elétrico para atingir maior eficiência e, conseqüentemente, menor consumo de combustível comparativamente a veículos de porte similar equipados somente com motor de combustão interna (9). Alguns dos HEVs disponíveis no mercado incluem: Toyota Prius, Ford Escape Hybrid, Honda Civic Hybrid e Lexus RX450h.
- *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEVs), têm um motor de combustão interna, tal como os HEVs, mas possuem um conjunto de baterias de maior capacidade, capaz de propulsionar o veículo por distâncias entre 30 a 100 km (10). Além disso, as baterias dos PHEVs estão aptas para ser totalmente carregadas ligando uma ficha à rede elétrica. Os PHEVs são mais eficientes em modo totalmente elétrico, no entanto, têm ao seu dispor a possibilidade de usar combustíveis fósseis para viagens longas. Alguns exemplos de PHEVs atualmente no mercado são o Chevrolet Volt, Opel Ampera e Toyota Prius Plug-in Hybrid.
- BEVs (do inglês *Battery Electric Vehicle*), cuja propulsão advém exclusivamente de baterias elétricas recarregáveis. Estas baterias são geralmente de maior capacidades que as dos PHEVs e possuem autonomies de até 160 km quando completamente carregadas (9). Se a eletricidade utilizada no carregamento dos BEVs for de fontes renováveis, este modo de transporte terá 0% de emissões de GHG. Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV e Tesla Roadster são exemplos de BEVs (9).

No que concerne aos sistemas de carregamento do veículo, em Portugal, o condutor tem à sua disposição duas vias: conectar o veículo à rede elétrica através da sua casa; ou recorrer à rede de carregamento pública, rede Mobi.e (11), constituída por cerca de 1300 postos de carregamento públicos distribuídos por todo o país.

Em 2008, havia menos de 500 mil veículos híbridos vendidos em todo o mundo, sendo o mercado de híbridos *Plug-in* e veículos elétricos a bateria limitados às tecnologias existentes na época ou a veículos de alta qualidade fabricados por produtores especializados. Embora atualmente os EVs (do inglês *Electric Vehicle*) em toda a sua totalidade representem uma porção muito pequena do número total de veículos de passageiros, é amplamente esperado que os EVs experimentem um rápido crescimento nas próximas décadas (12). Em Portugal, as vendas de EVs atingiram o pico em 2011 com cerca de 200 unidades vendidas, tendo decaído desde então. Num estudo de 2009, a JP Morgan estimou que, até 2020, 11 milhões de veículos elétricos poderiam ser vendidos em todo o mundo, incluindo 6 milhões na América do Norte (13), o que significa que quase 20% do mercado norte-americano e 13% do mercado global de transportes poderá ser representado por EVs.

Em 2010, foram criadas normas básicas e infraestruturas, mas ainda é necessário completar regulamentos e preencher lacunas que afastam a garantia de um mercado forte, seguro e sustentável (12). Outra questão importante a ter em consideração é o desenvolvimento do equipamento de carregamento e o tempo necessário para recarregar as baterias do veículo elétrico, que dependem da capacidade total de energia que pode ser armazenada na bateria, e da potência disponível a partir do carregador da bateria (14).

O lançamento destas bases permitiu que a mobilidade elétrica também comece a se estender aos veículos de duas rodas, com principal prevalência no mercado asiático. Em 1995 o governo de Taiwan, em conjunto com as indústrias locais, desenvolveu protótipos de motocicletas elétricas (15). Nos dias de hoje, as motocicletas elétricas são consideradas uma tecnologia pouco poluente as quais possuem capacidades para substituir as tradicionais motocicletas que por sua vez usam combustíveis derivados do petróleo, sendo também consideradas como um nicho de mercado viável e uma indústria com potencial em diversos países (16), (17), (18).

Regra geral, a configuração do motociclo elétrico é constituída por dois subsistemas: o sistema de propulsão e o sistema de gestão de energia. O primeiro converte a energia elétrica em energia mecânica que propuliona o veículo; o segundo sistema é responsável pela coordenação entre a fonte de energia, as baterias, e a energia proveniente do sistema de travagem regenerativo. O sistema de gestão de energia e o de propulsão estão divididos em diversos componentes: unidade de fonte de energia, o módulo eletrónico de mudança de velocidades, o módulo de travagem regenerativa, um controlador em FPGA (*Field-Programmable Gate Array*), e o motor elétrico, que pode estar inserido na roda traseira (*hub motor*) ou no interior do motociclo, sendo o movimento transmitido a roda traseira através de uma correia de distribuição (19).

Os veículos elétricos pessoais (PEVs do inglês *Personal Electric Vehicle*) emergiram como uma nova categoria de dispositivos de transporte na década de 1990. Os PEVs são veículos que transportam um único passageiro em distâncias de viagem de 1 a 10 km e utilizam a eletricidade como fonte de energia motriz, estando as bicicletas elétricas incluídas nessa categoria de veículos. Os veículos elétricos pessoais oferecem vários benefícios aos consumidores e a toda a sociedade, incluindo menores custos de transporte, redução nos tempos de viagem, possibilidade de realizar maiores distâncias e menor impacto ambiental (20). Uma série de fatores, incluindo melhorias na tecnologia das baterias e dos motores, estão a contribuir para o surgimento de bicicletas elétricas com maior alcance e melhor desempenho. A bicicleta elétrica moderna, surgiu no Japão no início de 1980, onde o foco foi no sentido de tornar o ciclismo mais fácil para os idosos (21)

Ao examinar a tecnologia de bicicletas elétricas, é importante começar por distinguir entre dois tipos:

- Bicicletas PODs (*Power On Demand*), nas quais o motor funciona com o acelerador (*throttle*) podendo mesmo fornecer assistência sem qualquer ação do ciclista na pedaleira; e
- Bicicletas PAs (*Pedal Assist*), nas quais a assistência só é fornecida quando o ciclista pedala. Em alguns modelos existe a possibilidade do ciclista selecionar diversos níveis de assistência, existindo ainda modelos onde é possível desligar a assistência elétrica e tornando a bicicleta elétrica numa bicicleta convencional.

Estes dois tipos de bicicletas existem amplamente por todo o mundo, existindo ainda bicicletas que combinam estas duas tecnologias.

Nas bicicletas elétricas a assistência é fornecida por um motor elétrico (*hub motor*) que pode estar na roda dianteira ou traseira, ou por um motor elétrico que se encontra na pedaleira da bicicleta. Alguns modelos com *hub motor* possuem sistemas de regeneração durante as travagens ou nas descidas. Os componentes das bicicletas elétricas podem ser divididos em quatro grupos principais: as peças comuns à bicicleta convencional, o motor elétrico, os componentes eletrónicos e as baterias. Todos estes componentes têm sido alvo de vários desenvolvimentos. Pode existir ainda, um sensor de binário incorporado na pedaleira, que é utilizado para detetar quando o ciclista necessita de maior ou menor assistência (22).

No entanto, todas estas tecnologias apresentam custos de aquisição mais elevados comparativamente às bicicletas convencionais, dificultando assim a adesão massiva a esta tecnologia. As bicicletas elétricas, em média, têm um custo 1500 euros superior ao da bicicleta convencional regular, que por sua vez têm um custo médio de 240 euros (23), (24), (25). Uma opção menos onerosa implica a compra de um *kit* aplicável numa bicicleta convencional e que a torna numa bicicleta elétrica. Os *kits* custam, em média, 780 euros.

1.3 Utilização de bicicletas e de motociclos em contexto urbano

A utilização de bicicletas e de motociclos permite que as pessoas se movimentem em zonas urbanas de forma mais rápida e por distâncias mais longas, do que conseguiriam realizar a pé. Em muitos países em desenvolvimento, nomeadamente na Ásia, os veículos de duas rodas são primordialmente escolhidos para a mobilidade individual.

Em várias cidades Europeias e Americanas, a implementação de infraestruturas para bicicletas tem vindo a aumentar, nomeadamente com os sistemas de partilha de bicicletas e com a construção de ciclovias (26). Adotar a bicicleta ou o motociclo como meio de transporte em ambientes urbanos é muito vantajoso uma vez que permite aos utilizadores deslocarem-se a velocidades mais elevadas em curtas distâncias, além de que o uso da bicicleta inclui ausência de emissões e acarreta ainda benefícios para a saúde (27).

Um número crescente de cidades tem vindo a integrar as bicicletas na mobilidade quotidiana dos seus cidadãos em ambientes urbanos. Desta forma, alguns países apresentam uma parcela significativa de viagens realizadas usando bicicletas, como é o caso da Holanda (26%), Dinamarca (18%) e Alemanha (10%) (28). Na cidade de Amsterdão, 38% de todas as viagens, em 2008, foram feitas utilizando bicicletas, com 50% dos moradores de Amsterdão a andar de bicicleta diariamente e 85% a usá-las pelo menos uma vez por semana (29).

A promoção da utilização da bicicleta e do motociclo na mobilidade urbana exige o desenvolvimento de políticas e infraestruturas específicas que abranjam a viagem a todos os níveis, seja durante a viagem propriamente dita (promoção de trajetos com pouco tráfego e construção de ciclovias, no caso das bicicletas), parques de estacionamento adequados para bicicletas e motociclos (oferta de

locais seguros), e facilidade na movimentação ao redor da cidade (através da integração das bicicletas e dos motocicletos com os sistemas de transportes públicos).

Existem mais de 500 sistemas de partilha de bicicletas (*bike sharing*) em todo o mundo, dos quais 40 utilizam bicicletas elétricas (30), em que a zona de maior concentração situa-se na Europa, constituindo cerca de 78% do número total de sistemas (26). Em média, cada sistema de partilha tem duas bicicletas por 1000 habitantes e cada bicicleta é utilizada, em média, em sete viagens de 2 km por dia (26).

Embora o uso de bicicletas convencionais em contexto urbano tenha sido promovido com significativo sucesso em várias cidades, nomeadamente em Paris e Londres (31), (32), existem ainda vários problemas que têm de ser enfrentados de forma a atingir o uso generalizado. Alguns dos principais problemas identificados quanto ao uso quotidiano de bicicletas convencionais para o transporte urbano são: a dificuldade de viajar distâncias muito longas, dificuldade em superar zonas de declive acentuado, a possibilidade de chegar a um destino, como por exemplo o trabalho, com sudação intensa ou cansaço físico (33), exposição a climas frios ou quentes demais, entre outros. Contrariando este panorama, países do Norte da Europa apesar dos seus climas frios têm demonstrado taxas significativamente elevadas no uso de bicicletas e em cidades com topografias árduas, como é o caso de Lisboa, começaram a promover o uso de bicicletas através da criação de ciclovias e do estudo da possibilidade da inclusão de sistemas de partilha de bicicletas (34), (35).

Atendendo às considerações anteriores, parte dos problemas referidos podem ser superados através da utilização de bicicletas elétricas (33). De forma geral, é esperado que a utilização de bicicletas elétricas possa ajudar a reduzir o esforço humano necessário para a realização de determinadas viagens, bem como reduzir o tempo de viagem. Porém, esta tecnologia terá um custo mais elevado, devido ao sistema elétrico e ao consumo de energia elétrica que daí advém. Outra possibilidade para a resolução dos problemas apresentados no parágrafo anterior é a introdução de motocicletos elétricos, que solucionam os mesmos problemas que a bicicleta elétrica, embora com custo de aquisição mais elevado e com um maior consumo de energia. Apesar disso, esse consumo será mais baixo que o apresentado por um motociclo convencional, sendo que o motociclo elétrico tem ainda a vantagem da ausência de ruído e de emissões locais.

Uma das principais aplicações das bicicletas elétricas é em sistemas de partilha de bicicletas, estando vários sistemas a ser implantados em todo o mundo, estes sistemas também poderão incorporar a partilha de motocicletos elétricos. O sistema de partilha "*The Callabike system*", em Aquisgrano, na Alemanha, foi recentemente implantado, possuindo 15 bicicletas, todas elétricas (36). A cidade de Kitakyushu, no Japão também apresenta um sistema de partilha completamente elétrico, com 116 bicicletas (37). Cidades como St. Etienne e Poitiers na França possuem sistemas mistos de partilha, com bicicletas convencionais e elétricas, com uma proporção de 15% e 26% entre bicicletas elétricas e convencional respetivamente para cada uma dessas cidades (38), (39).

1.4 **State-of-art relativo à monitorização em operação real de bicicletas e motociclos**

Apesar das grandes expectativas em relação às bicicletas e motociclos elétricos, têm sido feitos poucos estudos no sentido de compreender e quantificar os benefícios reais destes dois meios de transporte em ambiente urbano. Estudos anteriores abordam essencialmente os seguintes aspetos: o desenvolvimento da bicicleta/motociclo elétrico, a interação humana com a bicicleta/motociclo e respetivos sistemas de *bike/motorcycle-sharing* e impactos ambientais.

Relativamente ao desenvolvimento da bicicleta/motociclo elétrico, verificam-se as seguintes áreas de análise:

- Melhoria na eficiência do sistema transmissão e do sistema travagem regenerativa em motociclos elétricos, tendo-se concluído que a utilização de supercondensadores e de sistemas de travagem regenerativa poderá aumentar a autonomia do veículo em 20% (19);
- Desenvolvimento de baterias para motociclos e bicicletas elétricas (40). Os autores defendem que o crescimento na procura dos motociclos e bicicletas elétricas é, em grande parte, devido às melhorias efetuadas nas baterias de chumbo e ao surgimento das baterias de lítio. As baterias de chumbo têm em média um valor de energia específica de 34 Wh/kg, por sua vez baterias de lítio apresentam uma energia específica média de 106 Wh/kg. No entanto, os autores afirmam que, devido ao seu custo elevado, é improvável que as baterias de lítio venham a substituir por completo as baterias de chumbo;

No que concerne à interação entre o indivíduo e a bicicleta/motociclo, inclui-se questões como a aceitação dos sistemas de partilha de bicicletas e de motociclos, interação entre utilizadores de ciclovias e o seu desenho, interação entre ciclistas e automobilistas, perfis de utilização de bicicletas elétricas e impactos ao nível humano:

- Análise das características dos utilizadores e da aceitação das bicicletas e motociclos elétricos na China (41). Os autores referem que nas diferentes cidades da China não existe unanimidade quanto aos benefícios do uso destas tecnologias elétricas. Algumas cidades têm estas tecnologias como uma alternativa viável e de baixo custo quando comparado com outros meios de mobilidade, enquanto que outras cidades são mais céticas quanto a estas tecnologias elétricas, devido aos possíveis impactos ambientais, interferência com o trânsito e por questões de segurança. Outro estudo efetuado nos Estados Unidos da América (33) conclui que a maioria das pessoas que possuem uma bicicleta elétrica a utiliza para substituir a utilização da bicicleta convencional ou até mesmo do carro, mas estas não são vistas com substitutas para a utilização de motos ou motociclos. O potencial conflito entre utilizadores de bicicletas elétricas e convencionais é uma preocupação, visto que as diferenças de velocidade durante o ciclismo podem representar um problema;
- Questões de segurança na interação entre a circulação automóvel e a circulação de bicicletas. No estudo desenvolvido por Wenga et al. (42), os autores apresentam uma série de fatores de conversão, que possibilitam converter a circulação de bicicletas em “unidades” de tráfego

automóvel, permitindo assim coordenar mais facilmente a circulação automóvel com a circulação de bicicletas e dessa forma aumentar a segurança dos utilizadores em questão.

- No que diz respeito à utilização da bicicleta, num estudo de Bai (43) conclui-se que, durante o tempo de análise, mais de 10% dos ciclistas de bicicletas elétricas apresentaram comportamento de risco ao atravessar cruzamentos, 1,42 superior aos ciclistas com bicicleta convencional. Passar um sinal vermelho é a infração mais comum cometida pelas ciclistas. As situações de incidentes entre automóveis e bicicletas, onde o automobilista é o culpado, acontecem 2,5 vezes mais com bicicletas elétricas quando comparado com bicicletas convencionais. Os incidentes entre automóveis e bicicletas, onde o ciclista é culpado, acontecem 2 vezes mais com bicicletas elétricas quando comparado com bicicletas convencionais;
- Diversas análises sobre partilha de bicicletas (*bike sharing*) (26), (44), (45). Em suma, estes três estudos concluem que a chave para o sucesso dos programas de partilha de bicicletas é a localização das estações de bicicletas, a sua relação com a procura, a relação com o sistema de transporte público e a forma como a rede está estruturada (distribuição dos postos na área urbana);
- Comparação entre os tempos de viagem, em circuito urbano, quando esta é realizada de bicicleta elétrica ou de bicicleta convencional, e definição das diferentes estratégias de utilização de assistência elétrica numa bicicleta elétrica (46). Os autores afirmam que no circuito de estudo a utilização de uma bicicleta elétrica fez com que a velocidade média aumentasse cerca de 16% em relação à atingida com a bicicleta convencional. A primeira estratégia de utilização da bicicleta elétrica consiste em utilizar um grande nível de assistência elétrica em declives positivos e uma assistência mais baixa em declives neutros e ainda mais baixa para declives negativos. Na segunda estratégia, o ciclista utiliza mais assistência elétrica nos declives positivos, a assistência decresce nos declives negativos, e atingindo os valores mais baixos nas zonas planas. Por fim, a terceira estratégia de utilização consiste em utilizar sempre um nível de assistência elevado independentemente do declive;
- Quantificação da velocidade e caracterização da aceleração em relação ao perfil da estrada e outros fatores que influenciam uma viagem, a fim de fornecer dados para planejar, projetar e avaliar ciclovias (47), através de monitorizações experimentais com bicicletas convencionais. Os autores deste estudo afirmam que, no grupo de ciclistas estudados, o sexo do ciclista não influencia nas velocidades atingidas, sendo que o fator que mais influencia na velocidade é o declive da estrada. Em circuito plano a média de velocidades atingida foi de 21,6 km/h. Os ciclistas menos experientes atingiram velocidades inferiores a média, mas é expectável que com o aumento da experiência venham a aproximar-se dessa velocidade média;
- Avaliação biomecânica de como o ser humano aplica força ao pedalar numa bicicleta convencional. Shan (48) analisa um novo sistema, denominado BPS (*Bike Power Saver*),

o qual tem como objetivo alterar o ângulo de aplicação da força no pedal e assim rentabilizar a força aplicada. Neste estudo o autor concluiu que o novo sistema não altera significativamente o movimento do quadril nem do joelho, mas faz variar o movimento do tornozelo e que esta variação provoca instabilidade no mesmo. Essa instabilidade exige mais esforço por parte do ciclista e, conseqüentemente, faz com que este atinja a fadiga mais rapidamente. Noutro trabalho foram estudadas formas de rentabilizar a força aplicada no pedal através das mudanças mecânicas da bicicleta (49), os autores concluem que um sistema com poucas mudanças pode ter uma performance equivalente a um sistema de engrenagens com várias mudanças. É esperado que a redução do número de mudanças, sem perda de eficiência fisiológica, torne o sistema de mudanças mais fácil de utilizar;

- Quantificação do esforço humano durante a atividade do ciclismo, utilizando uma fórmula que engloba variáveis como velocidade, aceleração, eficiência mecânica da bicicleta, entre outras (50). Parkin afirma que o declive da estrada influencia a energia despendida pelo ciclista, bem como o número de paragens. Uma simples paragem num cruzamento pode levar a um aumento de 10% na energia consumida;

A avaliação dos impactos energéticos também foi alvo de estudos, nomeadamente, a comparação com outros meios de transporte:

- Comparação de consumos e de emissões entre motociclos elétricos, convencionais e veículos no Reino Unido (51). Neste estudo, os autores afirmam que um motociclo elétrico tem um consumo: TTW* (*Tank-To-Wheel*) de 0,10 kWh/km; WTW** (*Well-To-Wheel*) de 0,45 MJ/km, e que o total de emissões de GHG é de 49 gGHG/km. Os autores referem ainda que o motociclo elétrico utiliza 6,1 vezes menos energia e emite 5,9 vezes menos GHG por quilómetro do que o veículo mais vendido no Reino Unido em 2008. O motociclo elétrico necessita de 2,9 vezes menos energia e emite 2,7 vezes menos GHG por quilómetro do que um motociclo convencional de porte semelhante;
- Estimativa dos impactos ambientais comparando o ciclo de vida das bicicletas elétricas com o ciclo de vida de outros meios de transporte (autocarros) na China (52). Este estudo afirma que a bicicleta elétrica tem emissões mais elevadas de SO₂ (devido à queima de carvão para produção de eletricidade) quando comparada com um autocarro. No entanto, as emissões de outros poluentes são mais baixas na bicicleta elétrica. As emissões de poluentes por parte da bicicleta elétrica estão fortemente relacionadas com o *mix* de energia elétrica utilizado no seu carregamento. As emissões associadas ao processo de produção de baterias, reciclagem e fim-de-vida das mesmas também são uma preocupação;

Os resultados apresentados nestes estudos são influenciados por diversas variáveis, tais como a experiência dos ciclistas/motociclista, a estrada, o tráfego e a existência ou não de ciclovias, ou seja,

* TTW (*Tank-To-Wheel*) – Energia consumida pelo veículo durante a circulação em estrada.

** WTW (*Well-To-Wheel*) – Total da energia consumida pelo veículo, desde a extração/produção do combustível até a circulação em estrada.

diferem com a metodologia utilizada. Uma vez que este trabalho realça a utilização citadina de bicicletas convencionais e elétricas, assim como de motociclos elétricos na cidade de Lisboa e a sua possível implementação em sistemas de partilha na mesma cidade, é importante desenvolver metodologias de monitorização que se adaptem a diferentes regiões da cidade para se abranger todas as situações de viagens e que abranjam grande parte das vertentes em estudo nesta área, nomeadamente a interação humana com a bicicleta/motociclo e respetivos impactos ambientais.

1.5 State-of-art relativo à determinação do esforço humano durante o exercício físico

Uma questão importante que se prende com a utilização regular de bicicletas como meio de transporte é a quantificação do esforço ou da energia que o ciclista terá que despende para completar um determinado percurso. Uma outra questão que se levanta é se realmente uma bicicleta elétrica fará diminuir o esforço ou energia despendida pelo ciclista quando comparado com uma bicicleta convencional. No entanto, não foi encontrado nenhum estudo que abordasse diretamente nenhuma destas questões. Nesse sentido, alguns trabalhos que se debruçam sobre a quantificação e técnicas de medição da energia humana despendida incluem:

- Comparação entre a ventilação e a frequência cardíaca como indicador de consumo de oxigénio durante o exercício com diferentes intensidades (53). Através da monitorização de indivíduos realizando diferentes tarefas (tais como andar, andar transportando uma certa carga e trabalho intermitente), concluiu-se que as leituras da ventilação são mais apropriadas do que a frequência cardíaca para determinar o consumo de oxigénio;
- Comparação entre a monitorização da frequência cardíaca e um calorímetro indireto, de forma a avaliar o consumo de energia (54). Na determinação do consumo de energia, para tarefas do dia-a-dia, os dois métodos apresentam valores muito semelhantes, 8,6 kcal/dia. No entanto, os autores defendem que o método que utiliza a frequência cardíaca para a determinação da energia consumida nas tarefas diárias ainda necessita de melhoramentos.
- Estimativa precisa do consumo de energia através da frequência cardíaca sem calibração individual em laboratório (55). Utilizando métodos laboratoriais convencionais de calibração de frequência cardíaca ($FLEX_{IND}$, $FLEX_{ALL}$), a energia consumida, durante os exercícios com bicicleta ergonómica, pode ser estimada com uma precisão razoável. Os autores afirmam que a metodologia RR_{EST} , onde não é necessário calibração individual da frequência cardíaca, é uma forma precisa e prática para estimar o consumo de energia.
- Comparação entre duas estimativas da energia consumida, a obtida através da monitorização da frequência cardíaca, e a obtida por um sistema portátil de bobine eletromagnética (56). Os autores deste trabalho concluíram que, para a determinação da energia consumida, o sistema portátil de bobine eletromagnética é mais preciso do que utilizar a frequência cardíaca para esse

efeito. Os autores referem ainda que seria interessante utilizar em conjunto a frequência cardíaca e a ventilação na determinação da energia consumida;

- Diversas técnicas para determinar a energia consumida, com particular detalhe, a técnica *Doubly Labelled Water* (DLW) (57). Neste estudo, os métodos utilizados para determinar o consumo de energia dependem de fatores como, o número de indivíduos monitorizados e o período de monitorização. Os autores referem ainda que é possível, em estudos com poucos participantes e com um curto período de análise, determinar com uma precisão razoável a energia consumida se for utilizado o método de calorímetro indireto. Para estudos com duração de 3 a 4 dias é preferível utilizar o método de DLW.
- Previsão da energia consumida, durante exercício submáximo (ou seja o indivíduo nunca será testado no máximo das suas capacidades), utilizando leituras da frequência cardíaca (58). Através de testes efetuados a 115 indivíduos, em bicicletas ergonómicas e em passadeiras de corrida, os autores estabeleceram uma equação para determinar a energia consumida por um indivíduo durante o exercício, que inclui as seguintes variáveis: frequência cardíaca, idade, sexo e peso. Os autores afirmam que é possível determinar, com boa precisão, a energia consumida apenas utilizando a frequência cardíaca, idade, sexo e peso, e sem necessitar de calibração individual.

Tendo em consideração alguns resultados destes estudos apresentados será possível estabelecer uma ligação entre a energia consumida durante a atividade do ciclismo, utilizando uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional.

1.6 Objetivos

Tendo em conta o enquadramento apresentado anteriormente e a revisão bibliográfica efetuada, surge a necessidade de realizar o presente estudo sendo que os objetivos específicos propostos para este trabalho consistiram em:

- Efetuar a **caracterização da performance dinâmica e energética em estrada** (utilização normal) de diferentes bicicletas e motociclos, com foco em tecnologias elétricas;
- **Comparar os tipos de motociclos e bicicletas** monitorizadas (elétricas e convencionais), nomeadamente de forma a conhecer os diferentes perfis de condução e de consumo em cada uma delas, bem como os ganhos de tempo e de consumo na realização de um percurso; e
- Inferir as vantagens da utilização de uma bicicleta elétrica em relação a uma convencional, nomeadamente ao nível do **esforço humano**.

A elaboração das atividades anteriores possibilitará a aplicação de metodologias desenvolvidas nestes trabalho a casos de estudo específicos, escolhidos de forma a cobrir possíveis **percursos de partilha de bicicletas e de motociclos** na cidade de Lisboa. Estes trajetos serão realizados com diferentes abordagens, incluindo motociclo convencional, bicicleta convencional e motociclo elétrico de potência elevada. Tal possibilitará atingir o principal objetivo deste trabalho, isto é, para estes possíveis percursos de partilha de bicicletas e de motociclos na cidade de Lisboa, quantificar a energia despendida (através de uma análise *Tank-To-Wheel*), tempos de realização dos percursos, perfil de condução e no caso da bicicleta ficar a conhecer o esforço humano.

2 Metodologia

2.1 Definição de veículos e percursos monitorizados

O desenvolvimento deste estudo iniciou-se com a seleção dos veículos a monitorizar, sendo que as especificações técnicas dos mesmos são apresentadas na Tabela 2.1-1. Foram também definidos os percursos a monitorizar, apresentados na Tabela 2.1-2.

Tabela 2.1-1 - Características dos veículos monitorizados

Veículo	Tipo	Marca e modelo	Potência máxima (W)	Bateria (kWh)	Tipo de bateria	Mudanças mecânicas/elétricas	Peso do veículo (kg)
MC	Motociclo Convencional	kreidler Street 125dd	6700	---	---	5/---	150
ME1	Motociclo Elétrico	GUEWER ZWD505	2000	1,68	Chumbo	---/---	80
ME2	Motociclo Elétrico	Ekoway TL6000	6000	2,88	Lítio	---/---	160
BC	Bicicleta Convencional	Órbita Alumínio	---	---	---	21/---	15
BE1	Bicicleta Elétrica	QWIC Trend2	250	0,36	Lítio	7/6	26
BE2	Bicicleta Elétrica	Ekoway L1	250	0,36	Lítio	6/---	23

Tabela 2.1-2 - Caracterização dos percursos efetuados

	Percurso	Tipo	Distância (km)	Declive médio positivo (rad)	Declive médio negativo (rad)
Motociclos	P1	Misto	17,10	0,028	-0,024
	P2	Misto	9,81	0,033	-0,033
	P3	Plano	9,40	0,022	-0,026
	P4	Inclinado	6,43	0,059	-0,048
Bicicletas	P5	Misto	8,54	0,037	-0,029
	P6	Misto	5,66	0,020	-0,017

No que diz respeito aos motociclos elétricos foram selecionadas duas alternativas, uma *scooter* normal, de baixa potência, fornecida pela EMEL (ME1) e uma *maxi scooter* fornecida pela Ecocritério (ME2), com características distintas nomeadamente potência mais elevada, como descrito na Tabela 2.1-1.

Relativamente às bicicletas foram selecionados dois modelos: uma *pedal assist* com diversos níveis de assistência elétrica e que foi fornecida pela Prio.E (BE1), e uma bicicleta que pode ser utilizada como *power on demand* ou como *pedal assist*, ou ainda como uma mistura destes dois tipos. Esta

segunda bicicleta foi fornecida pela Ecocritério (BE2). As diferenças entre estes dois conceitos de bicicletas elétricas estão descritas no capítulo 1.2.

De forma a ter um termo de comparação com a tecnologia convencional, foram igualmente monitorizadas como referência um motociclo convencional (MC) e uma bicicleta convencional (BC), com as características apresentadas na Tabela 2.1-1.

Relativamente aos percursos monitorizados, foram escolhidos seis trajetos, de forma a abranger diferentes tipos de circuitos em contexto urbano, cobrindo uma vasta gama de condições de operação. Os percursos P1 e P2 consistiram em tipos de viagens mistas, constituídos por zonas com declives, positivos e negativos, e zonas planas. Por sua vez, o percurso P3 representou uma viagem realizada predominantemente em declive nulo. O percurso P4 foi fortemente constituído por zonas de declives acentuados, negativos e positivos. Estes quatro percursos foram realizados com motociclos em zonas com grande afluência de trânsito.

Os últimos dois percursos (P5 e P6) foram percorridos de bicicleta, sendo os ciclistas pessoas saudáveis e atléticas, do sexo masculino e com idades entre os 24 e 30 anos. O percurso P5 simulou uma viagem quotidiana em zona com muito trânsito (por exemplo, uma ida para o trabalho ou para a faculdade), enquanto o percurso P6 representou uma viagem de lazer com pouca afluência de trânsito. As principais características dos percursos encontram-se sumarizadas na Tabela 2.1-2.

Os diferentes veículos foram monitorizados várias vezes nos diversos percursos, conforme definido na Tabela 2.1-3 e Tabela 2.1-4. A distância total percorrida em cada um dos percursos variou entre 6,43 e 34,20 km para os motociclos e 5,66 e 42,70 km para as bicicletas monitorizadas, perfazendo um total de 113,7 km de monitorização nas bicicletas e 102,6 km nos motociclos.

Tabela 2.1-3 - Distribuição dos motociclos pelos diferentes percursos

Percurso	P1		P2		P3		P4	
Motociclo	ME2	MC	ME1	MC	ME1	MC	ME1	MC
Número de viagens	2	1	1	1	1	1	1	1
Distância total percorrida (km)	34,20	17,10	9,81	9,81	9,40	9,40	6,43	6,43

Tabela 2.1-4 - Distribuição das bicicletas pelos diferentes percursos

Percurso	P5		P6	
Bicicleta	BE1	BC	BE2	BC
Número de viagens	5	5	4	1
Distância total percorrida (km)	42,70	42,70	22,64	5,66

2.2 Laboratório de monitorização em estrada

Todas as viagens foram monitorizadas através do laboratório de monitorização de tecnologias alternativas do IDMEC-IST, constituído por diversos equipamentos devidamente organizados dentro de uma mochila. Na totalidade pesava cerca de 8 kg e pode ser facilmente transportado por um ciclista ou motociclista, como se verifica na Figura 2.2-1 e na Figura 2.2-2.



Figura 2.2-1 - BE1, ME1, BE2 e ME2 respetivamente com o ciclista/motociclista a transportar o laboratório



Figura 2.2-2 - BC com o ciclista transportando o laboratório e MC

Este laboratório foi desenvolvido pela DTEA - Transportes Energia e Ambiente, grupo de investigação do IDMEC-IST (26), sendo esquematicamente representado na Figura 2.2-3. O laboratório incorpora os seguintes equipamentos:

- GPS (*Garmin GPS map 76CSx*), que indica o perfil dinâmico da viagem (coordenadas de latitude e longitude, altitude em metros e velocidade em km/h);
- Pinça amperimétrica (*Fluke i1010*) transportada no exterior da mochila para efetuar a leitura dos fluxos de corrente do sistema propulsor;
- Sonda de leitura de voltagem e respetivo divisor de tensão para obter valores na gama 0-10 V;
- Sensores de sinais fisiológicos *bioPLUXresearch by PLUX Wireless Biosignals*, permitem a leitura da frequência cardíaca, da intensidade de respiração e acelerómetro triaxial;

- Acelerômetro triaxial *Corrsys Datron* dedicado;
- Placa USB NI USB 6210 para aquisição de dados das sondas de corrente e tensão e sinais do acelerômetro;
- Computador portátil com *solid-state disk*, que registra a cada segundo todos os dados fornecidos pelos equipamentos referidos anteriormente, conforme a interface de comunicação apresentada na Figura 2.2-4.



Figura 2.2-3 - Equipamento utilizado



Figura 2.2-4 - Interface de aquisição de dados

2.3 Recolha e processamento de dados

Em todos os veículos foi utilizado o GPS, permitindo obter informação sobre a velocidade, localização e altitude. A leitura de altitude provém de um altímetro barométrico integrado no GPS, de forma a minimizar erros na leitura da altitude devido a flutuações de pressão, o GPS foi colocado no

interior da mochila. Para garantir que o GPS não perdesse o sinal, foi colocada uma antena no exterior da mochila.

Nos motocicletos elétricos e bicicletas elétricas, a pinça amperimétrica foi utilizada à saída da bateria de forma a obter a leitura da corrente. Além disso, sempre que possível foram instaladas sondas nos terminais da bateria para obtenção da leitura da tensão. O sinal proveniente das sondas foi dividido num circuito elétrico, uma vez que a placa de aquisição utilizada, *National Instruments NI USB 6210*, apenas permite realizar leituras de sinais entre 0 – 10 V.

Todos estes sinais foram registados a cada segundo (a 1 Hz) por um PC, usando um programa desenvolvido em LabView, versão NI LabView 2009, possibilitando sincronizar todos os dados recolhidos pelos diversos equipamentos. O computador utilizado possuía um disco de estado sólido (*solid-state disk PC*), de forma a evitar eventuais perdas de informação, provocado pelas movimentações dentro da mochila e ao longo do percurso.

A leitura da velocidade através do GPS foi utilizada para calcular a distância percorrida durante a viagem, a aceleração e o declive da estrada. O declive foi obtido utilizando três pontos consecutivos distanciados de 50 metros entre si, estabelecendo com estes pontos uma equação polinomial de segundo grau. A partir da derivada do polinómio em cada ponto de estudo, obteve-se o declive da estrada em radianos, tendo este algoritmo sido implementado em MATLAB, versão R2010a.

Utilizando as leituras da pinça amperimétrica e as leituras da voltagem, sempre que possível, foi calculada a potência requerida pelo motor a cada instante. Nos casos em que não foi possível obter as leituras da voltagem, recorreu-se a catálogos de baterias (59) para obter a queda de tensão com a descarga das baterias. Integrando estes dados ao longo da viagem, obteve-se o total de energia consumida em cada viagem.

Foram igualmente recolhidos nos ensaios realizados com as bicicletas convencionais e elétricas os sinais fisiológicos (ritmo cardíaco e intensidade de respiração) dos ciclistas. Para tal foram utilizados os sensores da *bioPLUXresearch by PLUX Wireless Biosignals* e recolhidos estes dados com uma frequência de 200 Hz em *software* próprio do fabricante. Após um pré-tratamento dos dados pela PLUX, estes dados foram integrados e sincronizados, segundo a segundo, com restantes dados adquiridos através do *software* LabView. Devido à existência de algum ruído nas leituras da intensidade de respiração não foi possível realizar a análise da mesma.

2.4 ADVISOR

Visto não estar disponível o equipamento ou metodologia adequados para medir o consumo de combustível em estrada do motociclo convencional foi necessário recorrer ao *software* ADVISOR, versão de 2002, de forma a obter uma estimativa desse consumo. O *software* ADVISOR (*ADvanced Vehicle SimulatOR*) (60), foi desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory*, e consiste num conjunto de modelos e dados com o objetivo de proceder a simulações de veículos sob a plataforma MATLAB e

Simulink. Possibilita simular veículos convencionais, híbridos e elétricos, fornecendo estimativas de consumo de combustível e emissão de poluentes locais.

Cada componente do veículo (conversor de energia/motor, armazenamento de energia/bateria, transmissão, roda/eixo, entre outros) é definido individualmente, estando associado a um ficheiro que é composto essencialmente por código que contém as características, capacidades, limitações e mapas de comportamento consoante o componente (de binário, velocidade de rotação do motor, eficiência, entre outros). Estes ficheiros são lidos e utilizados durante a simulação. Desta forma, é necessário adequar com rigor as características do veículo em causa de forma a obter resultados coerentes na simulação. Para simular os percursos efetuados em condições reais de operação, são necessários como *input* do ADVISOR dois ficheiros de código: um contém a informação sobre o declive do percurso a cada instante e o outro a velocidade a cada instante. Podem ser simulados apenas ciclos de velocidade, nos quais o ficheiro do declive é dispensável. Os modelos existentes no ADVISOR são na sua maioria empíricos e baseiam-se na extrapolação de resultados e dados laboratoriais. Em seguida estão representadas as três janelas principais do *layout* do ADVISOR, na Figura 2.4-1 encontra-se representada a janela onde se inserem os dados do veículo, tais como as características físicas do veículo, as baterias, o motor, a transmissão, entre outros.

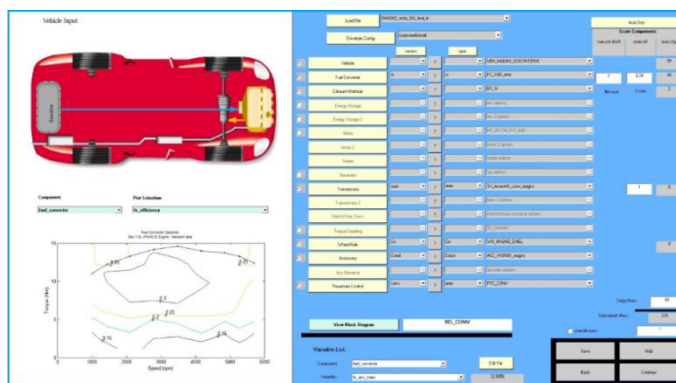


Figura 2.4-1 - Imagem do *layout* do ADVISOR. Primeira janela: Escolha dos componentes do veículo, e inserção dos dados e valores nominais para cada componente

A Figura 2.4-2 é referente ao percurso onde se quer simular o veículo, aqui é possível observar graficamente o ciclo de velocidades escolhido bem como os valores de algumas das suas propriedades (velocidade máxima e média, duração da viagem, distância, declive, entre outras). Nesta janela existe a possibilidade de alterar as propriedades atmosféricas ambientais, e a hipótese de efetuar testes de declive e testes de aceleração.

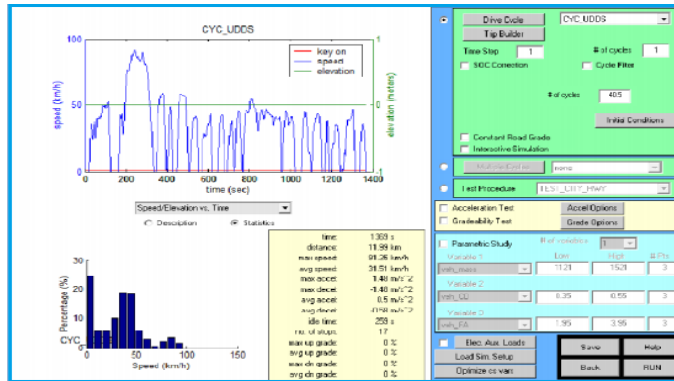


Figura 2.4-2 - Segunda janela do *layout* do ADVISOR: Inserção das propriedades da simulação

Os resultados obtidos (Figura 2.4-3) incluem os valores de consumo e emissões de escape, permitindo inclusive observar os resultados gráficos do comportamento do veículo e de alguns dos seus componentes principais.

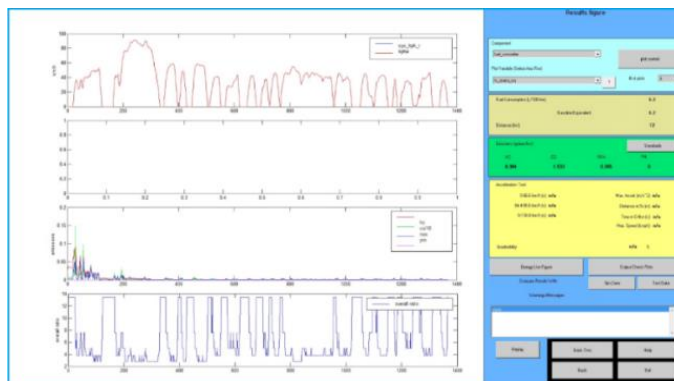


Figura 2.4-3 - Resultados de uma simulação

Como ferramenta de análise iterativa, o ADVISOR utiliza os requisitos de velocidade e de declive do percurso como variáveis de entrada para definir binários, velocidade e potência dos vários componentes do veículo. É uma abordagem feita “de trás para frente” (*backward-facing simulation*), onde a informação escoa no sentido da roda para o sistema de propulsão. Os componentes medem as variáveis de entrada, mas apenas fornecem a velocidade ou binário (ou potência) que conseguem disponibilizar face às condições de funcionamento do componente imediatamente anterior, ou seja, o *output* é dependente do *input*. Nenhum componente requererá mais potência do que conseguirá utilizar. Toda a simulação é resumida numa arquitetura de diagramas de blocos (Simulink) que reúne os ficheiros, as equações e os modelos de cada componente (Figura 2.4-4). Contrariamente a este funcionamento “de trás para frente”, existe também o reverso, aplicado noutros *softwares* comerciais (por exemplo, PSAT (61)). Neste caso, numa simulação, é incluído um modelo de comportamento humano que procura modelar os comandos de aceleração e travagem durante o percurso. Os dados originados por este

método de simulação ocorrem no sentido contrário, iniciando-se no controlo e circulando em direção à roda e percurso.

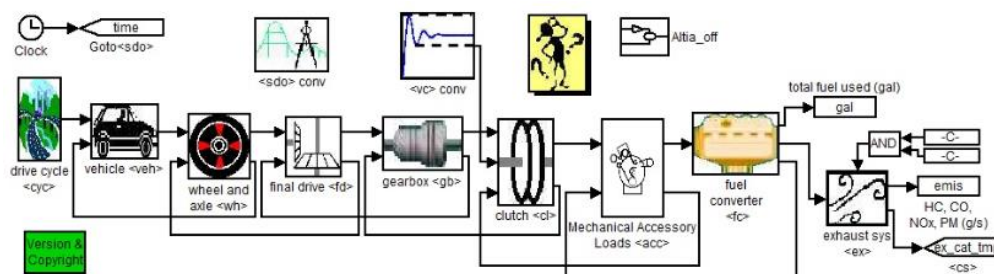


Figura 2.4-4 - Diagrama de blocos do Simulink/MATLAB que rege a simulação do ADVISOR (62)

Como o ADVISOR funciona sob a plataforma de MATLAB, a sua precisão de cálculo e obtenção de resultados será a mesma que em funcionamento do MATLAB. O *software* foi validado por várias entidades, entre as quais estão presentes a SAE *International (Society of Automotive Engineers)*, NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), DOE (*Department of Energy*), ANL (*Argonne National Laboratory*), em que alguns dos relatórios correspondentes podem ser verificados na bibliografia, (63), (64), (60), (65), (66).

2.5 Potência específica nos veículos de duas rodas

Determinar a potência que é requerida por um veículo em estrada, de um modo padronizado, e traduzir isso em energia pode ser uma tarefa difícil. O VSP (*Vehicle Specific Power*) é uma metodologia que fornece uma estimativa da potência por unidade de massa requerida por um veículo em estrada, com base na dinâmica do veículo (velocidade e aceleração) e topografia da estrada. Esta metodologia segue um modelo *road-load* e é tradicionalmente aplicada a veículos ligeiros e pesados (67), (68), (69), conforme as equações seguintes.

Equação 2.5-1 - Equação do VSP para ligeiros

$$VSP = v \cdot [1,1 \cdot a + 9,81 \cdot \text{sen}(\theta) + 0,132] + 0,000302 \cdot v^3$$

Equação 2.5-2 - Equação do VSP para pesados

$$VSP = v \cdot [a + 9,81 \cdot \text{sen}(\theta) + 0,092] + 0,00021 \cdot v^3$$

Este método tem em consideração a resistência aerodinâmica e de rolamento bem como a topografia da estrada e, combinando estes fatores com a velocidade e aceleração, é possível estimar a potência por unidade de massa necessária a cada instante de uma viagem.

O VSP permite uma análise dos dados recolhidos em condições reais de operação dos veículos e encontra-se adequadamente dividido em 14 modos. Na Tabela 2.5-1 estão representadas os vários modos de VSP existentes (67), (68).

Tabela 2.5-1 - Distribuição da VSP por modos

Modo	VSP	Definição	Modo	VSP	Definição
1		$VSP < -2$	2		$-2 \leq VSP < 0$
3		$0 \leq VSP < 1$	4		$1 \leq VSP < 4$
5		$4 \leq VSP < 7$	6		$7 \leq VSP < 10$
7		$10 \leq VSP < 13$	8		$13 \leq VSP < 16$
9		$16 \leq VSP < 19$	10		$19 \leq VSP < 23$
11		$23 \leq VSP < 28$	12		$28 \leq VSP < 33$
13		$33 \leq VSP < 39$	14		$VSP \geq 39$

No caso dos veículos, os modos são definidos usando essencialmente duas regras:

- 1) Idealmente cada modo deve ter uma média de emissões significativamente diferente dos outros;
- 2) Um único modo não deve ter o domínio total das emissões estimadas para uma determinada viagem, portanto foi definido que nenhum modo deve representar mais de 10% das emissões totais.

Toda a dedução física por detrás da metodologia VSP é universal e pode ser aplicada a outros modos de transporte, tais como bicicletas e motociclos. Usando os coeficientes de aerodinâmica e de rolamento adequados, foi definido o BSP (*Bicycle Specific Power*) e o MSP (*Motorcycle Specific Power*) de um modo genérico. A dedução que se segue é igual para o BSP e para o MSP diferindo somente nos respetivos coeficientes. Desta forma, de seguida é apresentada a demonstração do MSP.

Durante uma viagem existem diversas forças a atuar sobre um corpo que devem ser consideradas nesta análise: resistência do ar (*drag*); resistência de rolamento das rodas; e a força da gravidade, que não é perpendicular à velocidade se estiver a subir ou a descer. A soma destas forças deve ser zero se o corpo se deslocar a velocidade constante. Por outro lado, se o corpo está a ser acelerado o somatório das forças deve ser igual à sua massa multiplicada pela respetiva aceleração. Recorrendo ao diagrama de corpo livre de um motociclo, esquematizado na Figura 2.5-1, consegue-se facilmente deduzir a Equação 2.5-3, de acordo com o trabalho de Jimenez-Palacios (68).

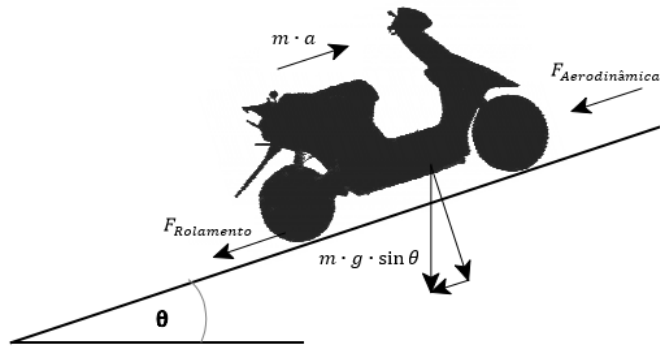


Figura 2.5-1 - Diagrama de corpo livre de um motociclo

Equação 2.5-3 - Dedução do MSP

$$\text{MSP} = \frac{\text{Potência}}{\text{Massa}} = \frac{\frac{d}{dt}(E_{\text{Cinética}} + E_{\text{Potencial}}) + F_{\text{Rolamento}} \cdot v + F_{\text{Aerodinâmica}} \cdot v}{m}$$

$$\text{MSP} = \frac{\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot (1 + \varepsilon_i) \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h \right) + C_R \cdot m \cdot g \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A (v + v_v)^2 \cdot v}{m}$$

$$\text{MSP} = v \cdot a \cdot (1 + \varepsilon_i) + g \cdot \text{sen}(\theta) \cdot v + g \cdot C_R \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{A}{m} \cdot (v + v_v)^2 \cdot v$$

Onde:

- v – Velocidade da bicicleta/motociclo (m/s);
- a – Aceleração da bicicleta/motociclo (m/s²);
- ε_i – Fator de massa, que inclui a massa de translação equivalente dos componentes em rotação (rodas, engrenagens e eixos) no sistema de tração;
- g – Aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
- θ – Inclinação da estrada (radianos);
- C_R – Coeficiente de rolamento;
- C_D – Coeficiente de resistência aerodinâmica;
- ρ_a – Densidade do ar ambiente (1,2 kg/m³);
- A – Área frontal do conjunto ciclista/motociclista e bicicleta/motociclo (m²);
- m – Massa do conjunto ciclista/motociclista e bicicleta/motociclo;
- v_v – Velocidade do vento (aqui tomada como 0 m/s);

2.5.1 Potência específica nos motociclos (MSP)

Reorganizando os termos da Equação 2.5-3 obteve-se a Equação 2.5-4. O Fator de Massa (ϵ_i) adotado, que representa a massa de translação equivalente dos componentes em rotação (rodas, engrenagens e eixos) no sistema de tração, foi de 0,01 (ou seja 1% do total da massa do motociclo), de acordo com o trabalho de Wilson (70), pois este valor deverá ser semelhante ao de uma bicicleta. Assumiu-se ainda que uma pessoa *standard* pesa cerca de 70 kg (71).

Equação 2.5-4 - Equação do MSP reorganizada

$$\text{MSP} = v \cdot [a \cdot (1 + \epsilon_i) + g \cdot \text{sen}(\theta) + g \cdot C_R] + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{A}{m} \cdot v^3$$

De forma a definir a metodologia do MSP foi necessário conhecer os vários valores dos coeficientes da Equação 2.5-4 para diferentes motociclos (Tabela 2.5-2) e a partir da média desses valores definir os coeficientes que melhor caracterizam a generalidade dos motociclos (Tabela 2.5-3).

Tabela 2.5-2 - Valores encontrados nas seguintes referências (72), (73), (74)

Coeficientes	Motociclo elétrico	Motociclo convencional	Motociclo elétrico	Motociclo convencional
A (m ²)	0,60	0,75	0,60	0,60
Cd	0,70	0,60	0,90	0,75
Cr	0,015	0,018	0,014	0,010
m motociclo (kg)	180	170	115	110

Tabela 2.5-3 - Valores usados para cada variável do MSP

Variáveis	Valores usados	Variáveis	Valores usados
ϵ	0,01	A (m ²)	0,65
g (m/s ²)	9,81	m motociclo (kg)	140
Cr	0,014	m pessoa (kg)	70
Cd	0,75	ρ_a (kg/m ³)	1,2

Substituindo as variáveis da Equação 2.5-4 pelos valores da Tabela 2.5-3 obtém-se a Equação 2.5-5, que define a equação genérica do MSP baseada em coeficientes típicos.

Equação 2.5-5 - Equação genérica do MSP

$$\text{MSP} = v \cdot [1,01 \cdot a + 9,81 \cdot \text{sen}(\theta) + 0,137] + 0,00139 \cdot v^3$$

Utilizando os dados recolhidos nos testes em estrada e aplicando a metodologia desenvolvida foi possível obter o MSP a cada segundo de todas as viagens, de acordo com a velocidade, aceleração e

declive. O passo seguinte consistiu em agrupar em modos os diferentes pontos das viagens, tal como no caso dos veículos. No entanto, no presente trabalho o conjunto de regras de agrupamento dos dados foram diferentes das aplicadas aos veículos visto tratarem-se de motocicletas elétricas, que não têm qualquer tipo de emissões diretas.

As regras aqui utilizadas para agrupar os diversos MSP em modos foram as seguintes:

- 1) Agrupar os MSP com valor semelhante (em W/kg);
- 2) Cada modo de MSP deve estar representado por mais de 1% do tempo total das viagens, o que significa que se deve dar representatividade a cada modo, sendo complementar com a regra abaixo;
- 3) Tem de existir o número de modos suficientes de tal forma que a percentagem de tempo na totalidade dos modos não fique quase toda concentrada num número muito limitado de modos.

A frequência cumulativa do MSP, de mais de 5 horas de dados recolhidos com o MC, ME1 e ME2, pode ser vista na Figura 2.5-2. Cerca de 80% dos dados recolhidos estão entre o MSP -3,23 W/kg e 9,75 W/kg. O valor mais elevado de MSP foi de 30,69 W/kg que corresponde a cerca de 7 kW, o que é coerente com a potência do motociclo convencional. O valor mais baixo de MSP foi de -33,62 W/kg, o que condiz com uma travagem severa.

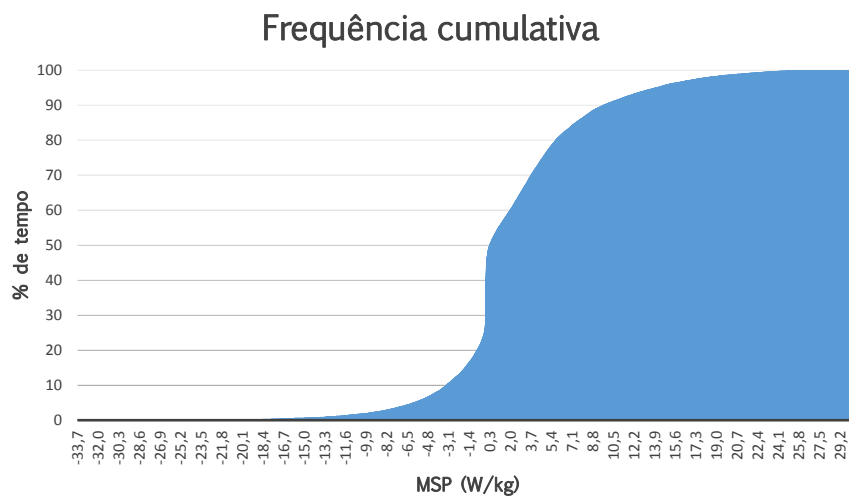


Figura 2.5-2 - Frequência cumulativa de todos os MSP, calculados a partir dos dados medidos em estrada, utilizando os motociclos elétricos (ME1 e ME2) e o motociclo convencional (MC)

Com o auxílio do gráfico representado Figura 2.5-2, conseguiu-se observar que os valores de MSP acima de 21,63 W/kg só são atingidos 1% do tempo total das viagens, tal como os valores abaixo de -12,48 W/kg, com isto pode-se afirmar que estes pontos correspondem a condições pontuais de condução.

Como primeiro critério para agrupar o MSP em modos escolheram-se os valores -12 W/kg e 21 W/kg como valores limites iniciais, visto que os valores acima e abaixo destes já representam mais de 1% do tempo respetivamente, assim estabelecem-se o modo MSP maior de 21 W/kg e o menor de -12 W/kg. Com os limites escolhidos, o passo seguinte consistiu na escolha do intervalo (*step*). Como primeira opção escolheu-se um intervalo de $0,2$ entre os modos de MSP, mas, tal como é possível verificar na Tabela 2.5-4, a opção 1 não cumpre a regra número 2 estabelecida para a divisão do MSP em modos. Na Tabela 2.5-4 observa-se que as opções 2, 3 e 4 também não cumprem a regra número 2. Assim, de forma a conseguir atingir os 100% de modos com mais de 1% do tempo de representação, foi necessário alterar os limites de acordo com a opção 5 onde são cumpridas as três regras estabelecidas anteriormente. Nesta última iteração, o limite máximo e mínimo foram ajustados. Numa tentativa de reduzir o número de modos, foi considerada a opção 6 mas esta violava a regra número três.

Tabela 2.5-4 - Análise para o agrupamento do MSP em modos

Opção	Limites (W/kg)	Step	Numero de modos	Numero de modos com mais de 1%	% dos modos com mais de 1%	Numero de modos com mais de 5%	% dos modos com mais de 5%
1	-12 a 21	0,2	168	33	19,6%	3	1,8%
2	-12 a 21	0,5	69	29	42,0%	3	4,3%
3	-12 a 21	1,0	36	23	63,9%	7	19,4%
4	-12 a 20	2,0	19	17	89,5%	7	36,8%
5	-10 a 18	2,0	17	17	100,0%	7	41,2%
6	-9 a 18	3,0	12	12	100,0%	6	50,0%

Tabela 2.5-5 - Agrupamento da metodologia MSP em 17 modos

Modo MSP	Definição	Modo MSP	Definição
< -10	$MSP < -10$	6	$4 < MSP \leq 6$
-10	$-10 \leq MSP < -8$	8	$6 < MSP \leq 8$
-8	$-8 \leq MSP < -6$	10	$8 < MSP \leq 10$
-6	$-6 \leq MSP < -4$	12	$10 < MSP \leq 12$
-4	$-4 \leq MSP < -2$	14	$12 < MSP \leq 14$
-2	$-2 \leq MSP < 0$	16	$14 < MSP \leq 16$
0	$MSP = 0$	18	$16 < MSP \leq 18$
2	$0 < MSP \leq 2$	> 18	$MSP > 18$
4	$2 < MSP \leq 4$		

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2.5-5 foram escolhidos 17 modos com intervalos de 2 W/kg entre -10 W/kg a 18 W/kg, onde dois dos dezassete modos cobrem as condições extremas (modo <-10 W/kg e modo >18 W/kg).

Como já foi referido anteriormente, os percursos monitorizados foram seleccionados por apresentarem vários tipos de condições de condução (subida, descida, plano) o que permitiu analisar um considerável número de potências exigidas. É importante notar que o agrupamento do MSP em modos não é dependente do tipo de motociclo nem do tipo de viagem que é realizada. Com este agrupamento pode-se comparar diferentes motociclos com potências semelhantes, independentemente das condições de condução. Com esta abordagem não é necessário realizar exatamente o mesmo percurso para se poder comparar tecnologias, para isso basta utilizar os dados medidos em estrada. Esta abordagem está de acordo com outros estudos já realizados e que foram úteis no desenvolvimento deste trabalho (75), (76), (67), (68).

2.5.2 Potência específica nas bicicletas (BSP)

A análise efetuada para a potência específica nas bicicletas é em tudo semelhante à efetuada para os motociclos. Adaptando a Equação 2.5-4 ao caso as bicicletas obteve-se a Equação 2.5-6. Tal como no caso dos motociclos o Fator de Massa (ϵ_i), que representa a massa de translação equivalente dos componentes em rotação (rodas, engrenagens e eixos) no sistema de tração, adotada foi de 0,01 (ou seja 1% da massa total da bicicleta), utilizando-se um valor de referência (70), assumindo também que uma pessoa *standard* pesa cerca de 70 kg (71).

Equação 2.5-6 - Equação do BSP

$$BSP = v \cdot [a \cdot (1 + \epsilon_i) + g \cdot \text{sen}(\theta) + g \cdot C_R] + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{A}{m} \cdot v^3$$

Para definir a metodologia BSP foi necessário definir os vários valores dos coeficientes da Equação 2.5-6 para diferentes bicicletas (Tabela 2.5-6) e a partir desses valores encontrar os coeficientes que melhor caracterizam a generalidade das bicicletas utilizadas no dia-a-dia. Assume-se que na sua grande maioria as bicicletas usadas no dia-a-dia, assentam nas bicicletas de passeio, como tal, os coeficientes adotados são os deste tipo de bicicletas. De forma a englobar as bicicletas elétricas nesta análise, na Tabela 2.5-7 foi necessário assumir uma massa mais elevada que a encontrada para as bicicletas de passeio, visto que as bicicletas elétricas são um pouco mais pesadas, sendo que as restantes variáveis permanecem inalteradas.

Tabela 2.5-6 - Valores encontrados na seguinte referência (70)

Coeficientes	Bicicleta de passeio	Bicicleta desportiva	Bicicleta de competição em estrada	Bicicleta de montanha
A (m ²)	0,50	0,40	0,33	0,57
Cd	1,20	1,00	0,13	0,70
Cr	0,008	0,005	0,003	0,006
m bicicleta (kg)	15	11	9	13

Tabela 2.5-7 - Valores usados para cada variável do BSP

Variáveis	Valores usados	Variáveis	Valores usados
ϵ	0,01	A (m ²)	0,50
g (m/s ²)	9,81	m bicicleta (kg)	18
Cr	0,008	m pessoa (kg)	70
Cd	1,2	ρ_a (kg/m ³)	1,2

Substituindo as variáveis da Equação 2.5-6 pelos valores presentes na Tabela 2.5-7 obteve-se a Equação 2.5-7 que define a equação genérica do BSP baseada em coeficientes típicos.

Equação 2.5-7 - Equação genérica do BSP

$$\text{BSP} = v \cdot [1,01 \cdot a + 9,81 \cdot \text{sen}(\theta) + 0,078] + 0,0041 \cdot v^3$$

Com as medições recolhidas nas monitorizações e aplicando a metodologia desenvolvida foi possível obter o BSP a cada segundo de todas as viagens. Tal como no caso dos motociclos, o passo seguinte consistiu em agrupar em modos os diferentes pontos das viagens. Não existem emissões diretas associadas às bicicletas, pelo que as regras definidas para os veículos não foram tidas em consideração. Neste caso, as regras utilizadas para agrupar os diversos BSP em modos foram as seguintes:

- 1) Agrupar os BSP com valor semelhante (em W/kg);
- 2) Cada modo de BSP deve estar representado por mais de 1% tempo do total das viagens, o que significa que se deve dar representatividade a cada modo, sendo complementar com a regra abaixo;
- 3) Tem de existir o número de modos suficientes de tal forma que a percentagem de tempo na totalidade dos modos não fique quase toda concentrada num número muito limitado de modos.

Ao contrário do que acontece nos veículos e nos motociclos, não é fácil saber a potência por unidade de massa que um humano consegue produzir.

Um estudo sobre *design* de bicicletas (47) realizado a 16 ciclistas experientes conclui que nenhuma das variáveis pessoais (idade, índice de massa corporal, experiência em ciclismo, utilização regular de bicicletas, o tipo de bicicleta e a sua manutenção, quantidade e forma da bagagem)

influenciaram a velocidade ou a aceleração em diferentes condições de topografia. Tendo em conta o estudo anteriormente referido, a potência por unidade de massa (BSP) calculada pela Equação 2.5-7 assume-se independente das características humanas, para um utilizador típico. O mesmo estudo mostra que, em superfícies planas, a velocidade média atingida por um ciclista é de 6,01 m/s, diminuindo em 0,40 m/s para uma subida com inclinação de 1% e aumentado em 0,24 m/s numa descida com 1% de declive negativo. Assim, de acordo com o estudo, numa subida um ciclista pode desenvolver cerca de 200 W, podendo chegar a atingir um máximo de 260 W.

De acordo com Wilson (70), a potência típica para uma pessoa, que não seja atleta de ciclismo, é cerca de 75 W e pode ir até 200-250 W para uma pessoa saudável e atlética do sexo masculino, enquanto que numa corrida de ciclismo com duração entre 20 minutos a 1 hora os atletas conseguem desenvolver 350-400 W.

A frequência cumulativa do BSP, de mais de 10 horas de dados recolhidos com a BC, BE1 e BE2, está representada na Figura 2.5-3. Aproximadamente 80% dos dados recolhidos estão entre o BSP - 0,86 W/kg e 2,72 W/kg, em que este último valor corresponde a aproximadamente 240 W o que está de acordo com o que foi encontrado na literatura referida anteriormente. O valor mais elevado de BSP foi de 7,45 W/kg, que corresponde à bicicleta elétrica que possibilita um nível mais elevado de potência. O valor mais baixo de BSP foi de -14,46 W/kg o que corresponde a uma travagem severa.

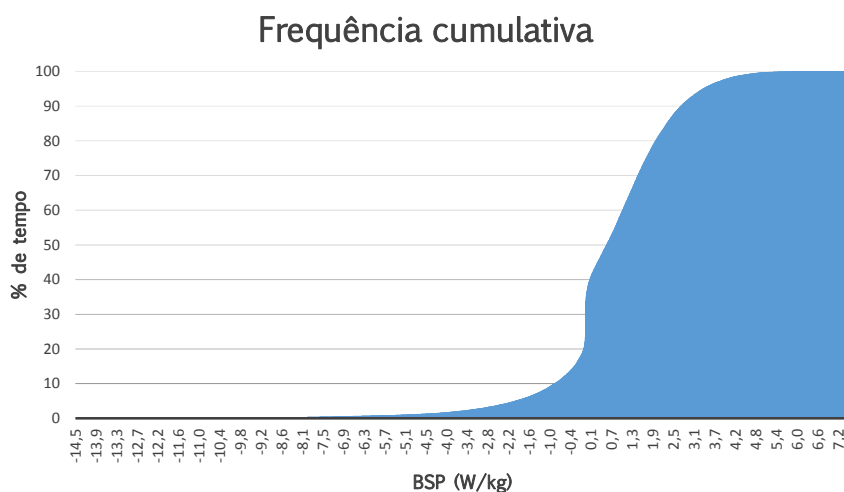


Figura 2.5-3 - Frequência cumulativa de todos os BSP, calculados a partir dos dados medidos em estrada, utilizando as bicicletas elétricas (BE1 e BE2) e a bicicleta convencional (BC)

Recorrendo ao gráfico representado na Figura 2.5-3 observa-se que os valores de BSP acima de 4,84 W/kg só são atingidos 1% do tempo total das viagens, tal como os valores abaixo de -4,58 W/kg, com isto é possível afirmar que estes pontos correspondem a condições pontuais de condução.

Seguindo o raciocínio utilizado para os motociclos, o primeiro passo para agrupar o BSP em modos consiste em escolher os valores limite iniciais, -5 W/kg e 5 W/kg, visto que os valores abaixo e

acima destes já representam cerca de 1% do tempo. Com os limites escolhidos, o passo seguinte consistiu na escolha do intervalo (*step*). Como primeira opção escolheu-se um intervalo de 0,1 W/kg entre os modos de BSP mas, tal como é possível verificar na Tabela 2.5-8, a opção 1 não cumpre a regra número 2 estabelecida para a divisão do BSP em modos. Na Tabela 2.5-8 observa-se ainda que as opções 2, 3 e 4 também não cumprem a regra número 2. De forma a conseguir atingir os 100% em modo com mais de 1% do tempo de representação, foi necessário alterar os limites obtendo assim a opção 5 onde são cumpridas as três regras estabelecidas anteriormente.

Tabela 2.5-8 - Análise para o agrupamento do BSP em modos

Opção	Limites (W/kg)	Step	Numero de modos	Numero de modos com mais de 1%	% dos modos com mais de 1%	Numero de modos com mais de 5%	% dos modos com mais de 5%
1	-5 a 5	0,1	103	33	32,0%	3	2,9%
2	-5 a 5	0,2	53	25	47,2%	3	5,7%
3	-5 a 5	0,5	23	15	65,2%	7	30,4%
4	-5 a 5	1,0	13	10	76,9%	6	46,2%
5	-4 a 4	1,0	11	11	100,0%	6	54,5%

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2.5-9 foram escolhidos 11 modos com intervalos de 1 W/kg de -4 W/kg a 4 W/kg e dois desses onze modos cobrem as condições extremas (modo <-4 W/kg e modo >4 W/kg).

Tabela 2.5-9 - Agrupamento da metodologia BSP em 11 modos

Modo BSP	Definição	Modo BSP	Definição
< -4	BSP < -4	1	0 < BSP ≤ 1
-4	-4 ≤ BSP < -3	2	1 < BSP ≤ 2
-3	-3 ≤ BSP < -2	3	2 < BSP ≤ 3
-2	-2 ≤ BSP < -1	4	3 < BSP ≤ 4
-1	-1 ≤ BSP < -0	> 4	BSP > 4
0	BSP = 0		

Tal como para os motociclos, os percursos monitorizados foram escolhidos por incluírem vários tipos de condições de condução (subida, descida, plano) o que permitiu analisar um considerável número de potências exigidas. Novamente, é importante realçar que o agrupamento do BSP em modos é independente do tipo de bicicleta utilizada e do tipo de viagem que é realizada. Este agrupamento em modos permite comparar diferentes bicicletas, elétricas e convencionais, sem ter de aludir às condições de condução e do percurso. Esta abordagem está de acordo com outros estudos já realizados e serviram de referência ao desenvolvimento deste trabalho (75), (76), (67), (68).

3 Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados do estudo desenvolvido. De salientar que são apresentados diversos gráficos onde estão representadas barras de erros, baseado na metodologia aplicada para veículos (68), (67). Tal como em estudos semelhantes para veículos, os resultados apresentam barras de erro com um intervalo de confiança de 95%, de acordo com as respetivas distribuições (68), (67). No Anexo A são apresentados os valores de todos dos gráficos presentes nesta secção.

3.1 Caracterização dinâmica dos veículos

Para a análise deste subcapítulo utilizaram-se mais de 15 horas de dados recolhidos através do sistema de GPS, pinça amperimétrica e sondas de leitura de tensão.

3.1.1 Potência específica nos motociclos (MSP) resultados

Na Tabela 3.1-1 estão resumidas as principais características e estatísticas dos 4 percursos percorridos. As variáveis seguintes foram obtidas através dos dados do GPS: distância do percurso, tempo para a realização do percurso, o declive médio positivo e negativo, a velocidade média e máxima.

Tabela 3.1-1 - Estatística de viagem para os diversos percursos para MC, ME1 e ME2

Percurso	P1		P2		P3		P4	
Veículo	ME2	MC	ME1	MC	ME1	MC	ME1	MC
Número de vezes	2	1	1	1	1	1	1	1
Distância do percurso (km)	17,10	17,10	9,81	9,81	9,40	9,40	6,43	6,43
Tempo para a realização do percurso (segundos)	1959	1445	2293	1927	2431	1787	1526	1140
Declive médio positivo (rad)	0,028	0,028	0,033	0,033	0,022	0,022	0,059	0,059
Declive médio negativo (rad)	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,05	-0,048
Velocidade média (km/h)	31,4	42,6	15,4	18,3	13,9	18,9	15,2	20,3
Velocidade máxima (km/h)	90,5	94,0	47,2	59,0	41,5	53,0	50,5	56,8
Consumo (kWh)	1,03	2,78*	0,52	2,18*	0,46	2,12*	0,46	1,33*
Consumo (Wh/km)	60,43	162,81*	52,75	222,22*	48,59	225,44*	71,86	206,69*

No que diz respeito ao consumo elétrico dos motociclos, calculou-se o consumo do ME2 utilizando as leituras da corrente e tensão fornecida pela bateria a cada segundo. Com estes dados, calculou-se a potência fornecida pela bateria em Watt, obtendo-se facilmente a energia consumida ao longo da viagem,

30
* O consumo do MC foi convertido de litros de gasolina para kWh e de l/100km para Wh/km ($PCI_{Gasolina}=31,76 \text{ MJ/l}$) de forma a possibilitar uma comparação direta entre os consumos dos motociclos elétricos e o motociclo convencional.

cujo resultado se encontra representado na Tabela 3.1-1. No caso do ME1 não foi possível aceder aos terminais da bateria. Como tal, não se conseguiu obter as leituras da tensão, recorreu-se a catálogos de baterias (59) de forma a obter a queda de tensão com a descarga da bateria. Utilizou-se esta estimativa da tensão e as leituras da corrente à saída da bateria para estimar a potência consumida e, por conseguinte, a energia consumida a cada segundo.

Como já foi referido anteriormente, devido à indisponibilidade laboratorial ou de metodologia adequados para medir o consumo de combustível do motociclo convencional foi necessário recorrer ao *software* ADVISOR para obter uma estimativa deste consumo. Através do ADVISOR obteve-se uma média de consumo de 2,3 l/100km, o que está de acordo com Bishopa et al. (51). Como tal, este consumo foi convertido para Wh de forma a possibilitar uma comparação direta entre os consumos dos motociclos elétricos e o motociclo convencional.

Na Tabela 3.1-2 encontra-se a comparação entre o MC e o ME1 e entre o MC e o ME2, observando-se que, em média, um percurso realizado com o ME1 irá demorar mais 28,8% do tempo a ser concluído do que se fosse realizado com o MC. Apesar disso, a utilização do ME1 possibilita uma redução de 74,5% na energia consumida. Uma viagem feita com o ME2 leva mais 35,6% do tempo para ser concluída do que se fosse feita com um MC, mas conduz a uma redução de 62,9% na energia consumida na sua utilização.

Tabela 3.1-2 - Comparação entre o motociclo convencional os motociclos elétricos

Veículo	ME1	ME2
Tempo extra (%)	28,8	35,6
Redução no consumo (%)	74,5	62,8

Após a separação do MSP em modos (Tabela 2.5-5), o passo seguinte consistiu em distribuir as mais de 5 horas de dados pelos diferentes modos de MSP, ficando-se assim com a percentagem de tempo de viagem em cada modo, Figura 3.1-1.

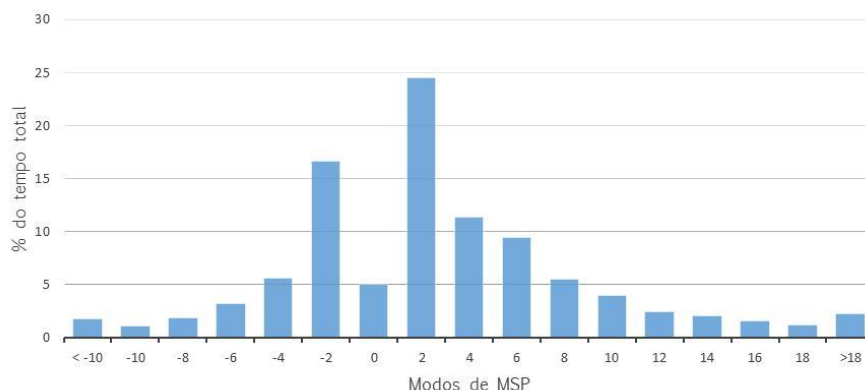


Figura 3.1-1 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para os dois tipos de motociclos

Na Figura 3.1-1, os modos positivos, que correspondem a 65% do tempo, representam as situações onde é exigida potência ao motor. Cerca de 45% do tempo de condução é despendido nos modos 2, 4 e 6 o que corresponde a uma potência inferior a 1300 W. Aproximadamente 5% do tempo de viagem é em modo 0, o que coincide com situações em que o motociclo está parado. Aproximadamente 30% do tempo é despendido em modos de MSP negativos, o que indica que se está numa situação de travagem ou de desaceleração.

Desagregando os dados adquiridos pelos diferentes motociclos, obteve-se a distribuição temporal (em percentagem) pelos diferentes modos de MSP para os diferentes motociclos elétricos e para o motociclo convencional. Analisando a Figura 3.1-2, Figura 3.1-3 e Figura 3.1-4 observa-se que para MSP negativos os três motociclos apresentam perfis semelhantes.

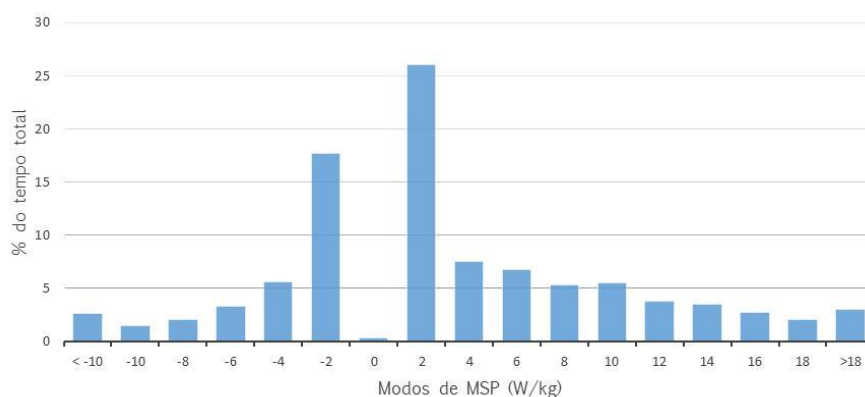


Figura 3.1-2 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o MC

Na Figura 3.1-2 pode se observar que, no motociclo convencional, grande parte do tempo é despendido no modo 2, ou seja, potências inferiores a 500 W, e no modo -2, correspondente a travagens ou desacelerações suaves. Observa-se ainda que para o motociclo convencional atingiu-se o modo >18, o que, atendendo à massa deste motociclo, corresponde a potências superiores a 4100 W, sendo este valor coerente com a potência que o motociclo convencional analisado possui (aproximadamente 6700 W).

Analisando a Figura 3.1-3, observa-se que cerca de 54% do tempo de monitorização do ME1 foi despendido nos modos 2, 4 e 6, correspondendo neste motociclo a potências inferiores a 1000 W. Como já foi referido na Tabela 2.1-1, a potência do ME1 é de 2000 W, o que explica a inexistência de tempo para os modos superiores ao modo 12. Cerca de 0,17% do tempo é despendido no modo 12, o que corresponde a potências de aproximadamente 1900 W.

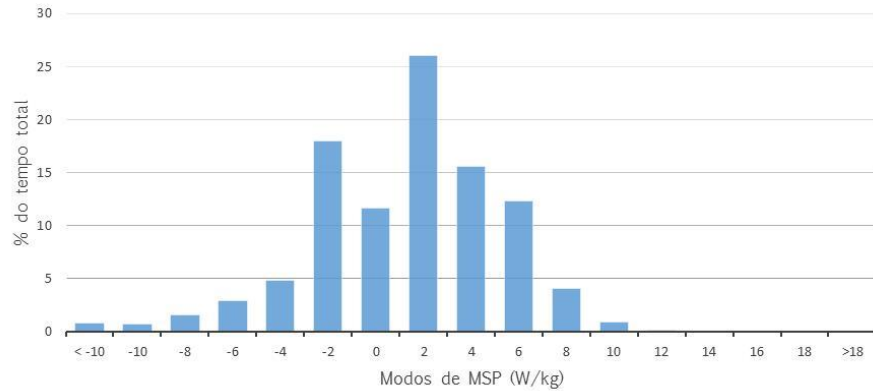


Figura 3.1-3 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o ME1

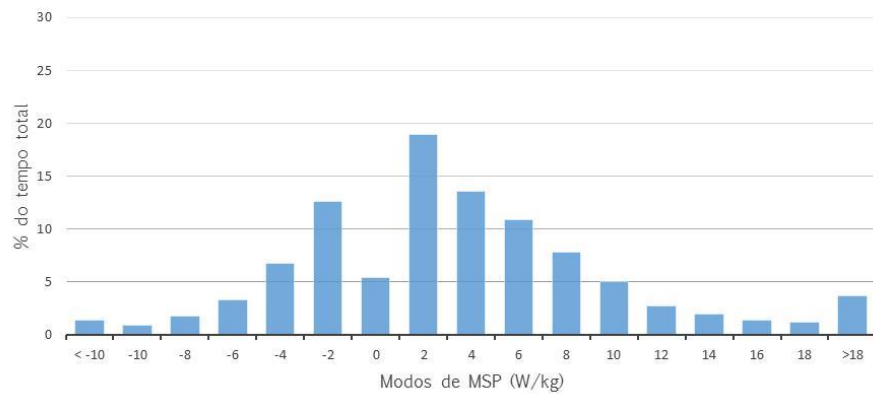


Figura 3.1-4 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para o ME2

Na Figura 3.1-4 observa-se que, aproximadamente 51% do tempo de estudo, o ME2 se encontra nos modos 2, 4 e 6, o que para este motociclo equivale a potências inferiores a 1500 W. Também é possível observar que o ME2 atingiu o modo >18, que para este motociclo corresponde a potências superiores a 4300 W, o que é coerente com o facto do ME2 ter uma potência de 6000 W.

Na Figura 3.1-5 estão representadas as distribuições temporais para os três motociclos. Como já foi referido anteriormente, para modos negativos os três motociclos têm um perfil semelhante. Também é possível observar que o modo 2 é claramente o modo com maior percentagem de tempo total para os três motociclos. Ainda em relação à Figura 3.1-5, é importante realçar que se optou por não representar uma curva típica do ME, que seria a soma da curva do ME1 com a do ME2, devido ao facto destes dois motociclos terem potências demasiado distintas, como verificado na Tabela 2.1-1.

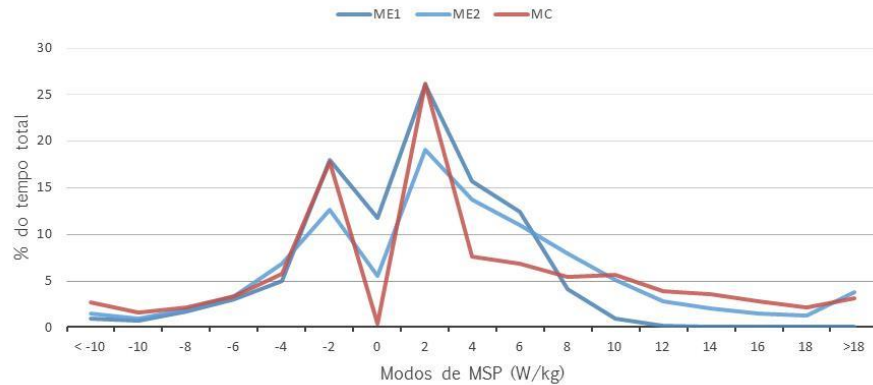


Figura 3.1-5 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para os três motociclos

Como referido anteriormente, no caso do ME1 utilizaram-se as leituras da corrente e as estimativas do valor de tensão para obter a energia fornecida pela bateria a cada segundo. O passo seguinte consistiu em agrupar a energia consumida pelos diversos modos de MSP e assim obter um perfil de energia consumida para o ME1, Figura 3.1-6.

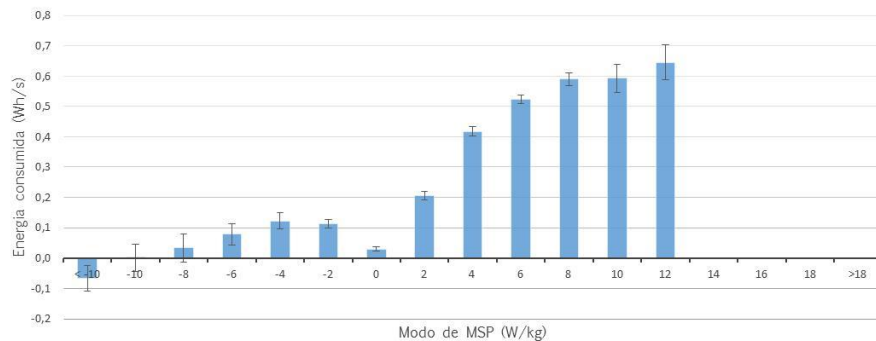


Figura 3.1-6 - Energia consumida por modo de MSP para o ME1

Existem vários aspetos que devem ser realçados na Figura 3.1-6. O primeiro é a evidência de no modo <-10 existirem níveis de energia por segundo negativos. Isto justifica-se pelo facto deste motociclo ter um sistema de regeneração de energia quando está numa situação de travagem severa. A regeneração ocorre na roda onde está instalado o motor (roda traseira), sendo de realçar que nem todas as travagens são efetuadas com o travão traseiro, o que faz com que não ocorra regeneração em todas as travagens, principalmente nas que o travão frontal é o único a entrar em ação. No modo 0, que corresponde a situações de paragem, existe um consumo de 108,1 W, associado aos auxiliares, tal como luzes. No modo -10 existe um consumo de 4,4 W significando que, neste modo, também existe alguma regeneração, porém não sendo suficiente para superar o consumo dos auxiliares.

Entre o modo -8 e o modo -2 observa-se que existe um consumo energético significativo, associado a esses modos, o que não deveria ocorrer. Esta situação é exposta sempre que o motociclista

inicia uma subida e mantém o acelerador na mesma posição, ou seja, embora o MSP seja negativo (apesar do declive e velocidade positiva, a aceleração negativa por vezes origina MSP negativos) o consumo de energia é elevado. Quando é feita a média para obter o consumo por modo de MSP, os valores referidos anteriormente (correspondentes a consumo de energia elevado) influenciam fortemente a média final de consumo nos modos de MSP em questão.

Outro aspeto importante é o de não existir energia por segundo associada aos modos superiores a 12, pois como já foi referido anteriormente o ME1 tem uma potência de 2000 W, o que aproximadamente equivale a 12 W/kg. Assim, o ME1 está limitado aos modos de MSP entre <-10 e 12.

Na Tabela 3.1-3 está representada a eficiência do ME1 em cada um dos modos de MSP, só estando representados os valores entre o modo 2 e o modo 12, pois são apenas estes os modos em que é exigida potência ao motor do ME1. Como é possível observar na Tabela 3.1-3 a eficiência do ME1 aumenta com o aumento do modo de MSP.

Tabela 3.1-3 - Eficiência do ME1 nos modos de MSP positivos

Modo de MSP (W/kg)	2	4	6	8	10	12
Energia calculada pelo MSP (Wh/s)	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53
Energia fornecida pela bateria (Wh/s)	0,21	0,42	0,52	0,59	0,59	0,65
Eficiência da ME1 (%)	43,18	42,52	50,96	60,21	74,88	82,65

Considerando que para o ME1 o binário utilizado é sempre muito elevado e aproximadamente constante ao longo da viagem, o que se deve à baixa potência deste motociclo, tal obriga o motociclista a conduzi-la quase sempre na posição mais extrema do acelerador. Desta forma, a eficiência do motor vai variar unicamente com a velocidade a que o motociclo se desloca, que é diretamente proporcional a velocidade de rotação do motor elétrico, tal como se pode observar na Figura 3.1-7.

Analisando a Figura 3.1-7 e assumindo o binário constante para o ME1, pela razão já referida, observa-se que a eficiência do motor elétrico irá aumentar com a velocidade de rotação. Sabendo que a velocidade de rotação é mais elevada para modos de MSP mais elevado, é esperado que a eficiência do ME1 aumente com o aumento dos modos de MSP.

No entanto, o valor de máxima e mínima eficiência presentes na Tabela 3.1-3 são inferiores aos encontrados na Figura 3.1-7, essencialmente pelo facto de se estar a utilizar a energia fornecida pela bateria e não a energia que entra unicamente no motor para calcular a eficiência, sendo assim é natural que os valores obtidos para a eficiência global sejam inferiores à do mapa de motor.

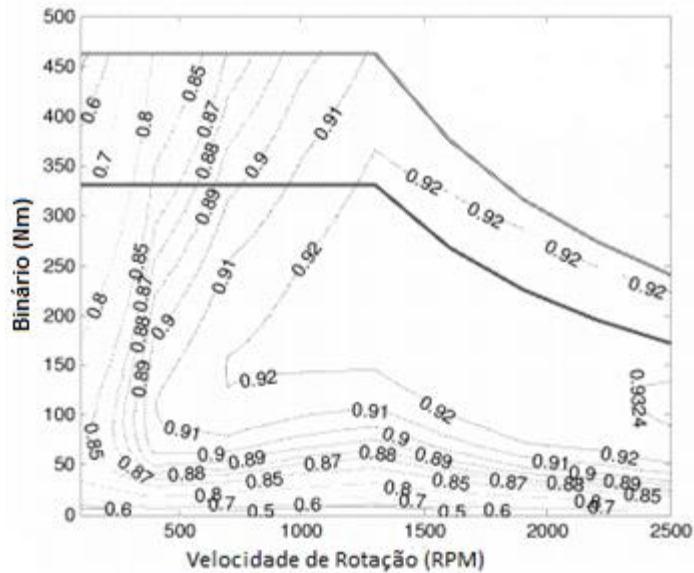


Figura 3.1-7 - Mapa de eficiência de um motor elétrico (77)

Para a obtenção do perfil de energia consumida do ME2 utilizaram-se as leituras da corrente e da tensão, realizadas durante a monitorização deste motociclo. Também no caso deste motociclo elétrico é possível verificar (Figura 3.1-8) a existência de níveis negativos de energia, neste caso no modo -8, -10 e <-10. Estes valores são negativos porque este motociclo possui um sistema de regeneração de energia, em que a mesma acontece durante as travagens ou desacelerações severas. A regeneração ocorre na roda onde está instalado o motor (roda traseira), é de realçar que nem todas as travagens são efetuadas com o travão traseiro, o que faz com que não ocorra regeneração em todas as travagens, principalmente nas que o travão frontal é o único a entrar em ação. No modo 0, que corresponde a situações de paragem, existe um consumo de 146,2 W, que está associado aos auxiliares tal como luzes.

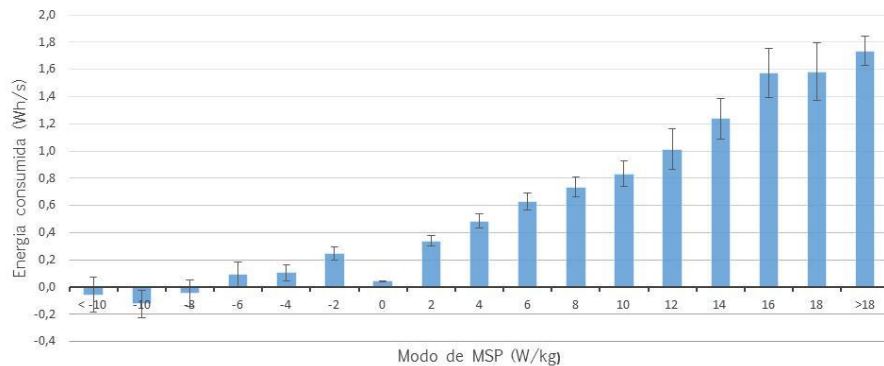


Figura 3.1-8 - Energia consumida por modo de MSP para o ME2

Entre o modo -6 e o modo -2 observa-se que existe um consumo significativo de energia, associado a esses modos, o que não deveria ocorrer. Isto acontece devido a situações onde o motociclista inicia uma subida e mantém o acelerador na mesma posição, ou seja, embora o MSP seja negativo (resultante de declive e velocidade positiva e aceleração negativa) o consumo de energia é elevado. Assim, quando é feita a média para obter o consumo por modo de MSP, os valores referidos anteriormente (consumo de energia é elevado) influenciam fortemente a média final de consumo por modo de MSP.

Como seria de esperar para o ME2, observa-se que em todos os modos de MSP existe um consumo de energia associado, uma vez que esta tem uma potência de 6000 W, o que permite atingir valores de MSP correspondente ao modo >18 W/kg.

Tabela 3.1-4 - Eficiência do ME2 nos modos de MSP positivos

Modo de MSP (W/kg)	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Energia calculada pelo MSP (Wh/s)	0,14	0,29	0,43	0,58	0,72	0,87	1,01	1,16	1,30
Energia fornecida pela bateria (Wh/s)	0,34	0,48	0,63	0,73	0,83	1,01	1,24	1,57	1,58
Eficiência da ME2 (%)	42,73	59,72	68,94	78,67	86,84	85,70	81,76	73,61	82,25

Na Tabela 3.1-4 está representada a eficiência do ME2 em cada um dos modos de MSP. Encontram-se apenas representados os valores entre o modo 2 e o modo 18 pois são apenas estes os modos em que é exigida potência ao motor do ME2. Existe ainda o modo >18, mas que, atendendo a que se trata de um intervalo aberto, não é possível calcular uma eficiência para este modo. Como é possível observar a eficiência do ME2 aumenta do modo 2 até ao modo 10, sendo que depois há um decréscimo na eficiência até ao modo 16, e no modo 18 volta a acontecer um aumento de eficiência.

No ME2 a eficiência não é crescente com o aumento dos modos de MSP, devendo-se ao facto deste motociclo não ter o mesmo modo de funcionamento do ME1, (binário aproximadamente constante), havendo assim variações de binário, de velocidade de rotação e consequentemente oscilações de eficiência ao longo dos modos de MSP. Os valores de máxima e mínima eficiência, presentes na Tabela 3.1-4, são inferiores aos encontrados na Figura 3.1-7, devido ao facto de se estar a utilizar a energia fornecida pela bateria e não a energia que entra unicamente no motor para calcular a eficiência, pelo que é natural que os valores obtidos para a eficiência sejam inferiores.

Pelos motivos já referidos, no caso do MC não foi possível realizar as medições do consumo durante as monitorizações. Recorreu-se ao ADVISOR para a construção do perfil de energia consumida, conforme a Figura 3.1-9. Como seria de esperar no caso do motociclo convencional, não existem modos com níveis de energia negativos como se observa nos motociclos elétricos. Para o motociclo convencional, previsivelmente, existe uma energia consumida associada a todos os modos de MSP, visto que esta tem uma potência de 6700 W, o que permite atingir o modo >18 W/kg. Salienta-se que os valores

de energia associados a cada modo MSP no motociclo convencional são cerca de três vezes superiores aos obtidos no ME2, o que está de acordo com estudo de Bishopa et al. (51).

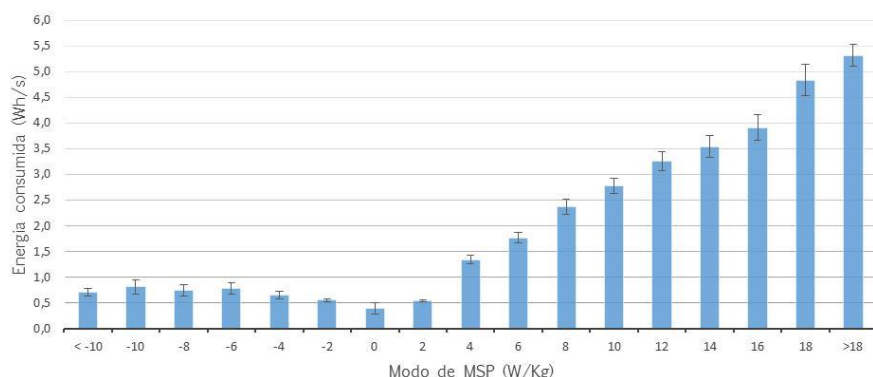


Figura 3.1-9 - Energia consumida por modo de MSP para o MC

Na Tabela 3.1-5 está representada a eficiência do MC em cada um dos modos de MSP, entre os modos 2 e 18 pois são apenas estes os modos em que é exigida potência ao motor do MC. Existe ainda o modo >18, mas que, sendo um intervalo aberto, não permite calcular uma eficiência para este modo. Como é possível observar, a eficiência média do MC é de 23,1%, o que corresponde a um valor habitual para a eficiência de um veículo com um motor *spark ignition* (78).

Tabela 3.1-5 - Eficiência do MC nos modos de MSP positivos

Modo de MSP (W/kg)	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Energia calculada pelo MSP (Wh/s)	0,13	0,26	0,38	0,51	0,64	0,77	0,89	1,02	1,15
Energia fornecida pela bateria (Wh/s)	0,53	1,34	1,77	2,37	2,78	3,26	3,54	3,91	4,84
Eficiência da MC (%)	23,91	19,07	21,70	21,54	23,01	23,51	25,25	26,14	23,77

De forma a verificar a viabilidade dos perfis de energia consumida obtidos para cada um dos motociclos elétricos, multiplicou-se a distribuição temporal de MSP de cada um dos percursos, pelo perfil de energia consumida do motociclo associado a esse percurso. Efetuando o somatório da energia consumida em cada um dos modos, obtém-se um consumo estimado, representado na Tabela 3.1-6. Nesta tabela também é apresentado o somatório da energia consumida a cada segundo, que foi medida em estrada nos diferentes percursos e que foi denominado por consumo real.

Tabela 3.1-6 - Verificação dos perfis de consumo dos motociclos elétricos

Motociclo	Percurso	Consumo estimado (Wh)	Consumo real (Wh)	Diferença (%)
ME1	P2	559,7	517,4	8,19
ME1	P3	463,4	456,6	1,49
ME1	P4	413,0	462,2	-10,64
ME2	P1	1028,9	1035,1	-0,59
ME2	P1	1038,2	1032,1	0,59

Através dos valores apresentados na Tabela 3.1-7 é possível concluir que os perfis de consumo apresentados na Figura 3.1-6 e Figura 3.1-8 são representativos para a realização de estimativas de consumo para motociclos do tipo ME1 e ME2, respetivamente, ambos com desvios médios absolutos inferiores a 10%.

Tabela 3.1-7 - Diferença entre o consumo real e o estimado do ME1 e ME2

Motociclo	Média direta da diferença (%)	Média absoluta da diferença (%)
ME1	-0,32	6,77
ME2	0,00	0,59

Para verificar a viabilidade do perfil de energia consumida obtido para o motociclo convencional procedeu-se da mesma forma que nos motociclos elétricos, diferindo apenas no consumo real, que neste caso é o consumo obtido através do ADVISOR, que por si só já é uma estimativa. Estes resultados são apresentados na Tabela 3.1-8.

Tabela 3.1-8 - Verificação do perfil de consumo do motociclo convencional

Motociclo	Percurso	Consumo estimado (Wh)	Consumo do ADVISOR (Wh)	Diferença (%)
MC	P1	2700,7	2784,5	-3,01
MC	P2	2161,0	2179,5	-0,85
MC	P3	2258,2	2118,4	6,60
MC	P4	1456,6	1329,3	9,57

Com os valores apresentados na Tabela 3.1-9 conclui-se que o perfil de consumo apresentado na Figura 3.1-9 é aceitável para a realização de estimativas de consumo para motociclos do tipo MC.

Tabela 3.1-9 - Diferença entre o consumo do ADVISOR e o estimado do MC

Motociclo	Média direta da diferença (%)	Média absoluta da diferença (%)
MC	3,08	5,01

3.1.2 Potência específica nas bicicletas (BSP) resultados

Tal como para o caso dos motociclos, nas bicicletas iniciou-se a análise pelo estudo da estatística de viagem de cada um dos percursos. Na Tabela 3.1-10 estão resumidos os resultados da estatística de cada viagem. As variáveis seguintes foram obtidas através dos dados do GPS: distância do percurso, tempo para a realização do percurso, o declive médio positivo e negativo, a velocidade média e máxima. Utilizando as leituras de corrente e de tensão fornecida pela bateria a cada segundo, calculou-se o consumo da BE1 e BE2. Com estas duas leituras determinou-se a potência fornecida pela bateria em Watt e, tendo a potência consumida, obteve-se facilmente a energia consumida, resultado que se encontra representado na Tabela 3.1-10. É de realçar que a BE2 foi analisada nos três modos de utilização possíveis, o modo *power on demand* (denominado aqui por modo *Throttle*), o modo *pedal assist* (denominado aqui por modo *Pedal*), e ainda como uma mistura destes dois tipos de tecnologias (denominado aqui por modo *Misto*). No Anexo B é apresentada uma análise mais aprofundada a esta bicicleta e aos diferentes modos de utilização do apoio elétrico da mesma.

Tabela 3.1-10 - Estatística de viagem para os diversos percursos para BC e BE

Percurso	P5		P6			
	BE1	BC	BE2-Modo pedal	BE2-Modo <i>throttle</i>	BE2-Modo misto	BC
Número de viagens	5	5	2	1	1	1
Distância do percurso (km)	8,54	8,54	5,66	5,66	5,66	5,66
Tempo para a realização do percurso (segundos)	2830	2953	975	983	834	1049
Declive médio positivo (rad)	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02
Declive médio negativo (rad)	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
Velocidade média (km/h)	10,9	10,4	20,9	20,7	24,4	19,4
Velocidade máxima (km/h)	39,1	40,9	33,1	38,3	40,2	38,3
Consumo elétrico (Wh)	81,23	-	32,56	84,90	51,98	-
Consumo elétrico (Wh/km)	9,51	-	5,75	15,00	9,18	-

Tabela 3.1-11 - Comparação entre a bicicleta convencional (utilizada como referência) e as bicicletas elétrica

Veículo	BE1	BE2-Modo Pedal	BE2-Modo <i>Throttle</i>	BE2-Modo Misto	BE2-Média dos três modos	BE-Média da B1 e BE2
Redução de Tempo (%)	4,2	7,0	6,3	20,5	11,3	9,5

Analisando a Tabela 3.1-10 e a Tabela 3.1-11 em conjunto observa-se que uma viagem realizada com a BE1 demora menos 4,2% do tempo do que se for realizada com a BC. Também é possível observar que uma viagem com a BE2 em média pode demorar menos 11,3% do tempo quando

comparada com a BC. De um modo geral, com uma BE obtém-se uma redução média de 9,5% no tempo necessário para concluir um percurso.

É de realçar que a BE2 em modo Pedal apresenta o menor consumo elétrico, no entanto a redução de tempo é apenas de 7,0%. O cenário menos vantajoso é o da BE2 em modo *Throttle*, onde o ganho de tempo é somente de 6,3% e apresenta um consumo elétrico mais elevado (160,7%) que o modo Pedal. No modo de condução Misto, a BE2 apresenta uma redução de 20,5% no tempo e consome mais 59,6% de energia quando comparado com o modo Pedal. Observa-se ainda que a BE1 consome mais 65,4% que a BE2 em modo Pedal, mas só tem um ganho de tempo de 4,2% em relação a bicicleta convencional.

Através da Figura 3.1-10, observa-se que existe uma tendência clara, nos declives positivos, para a velocidade média ser mais elevada para bicicleta elétrica quando comparada com a bicicleta convencional. Tal resultado faz todo o sentido, uma vez que na bicicleta elétrica existe a assistência do motor elétrico.

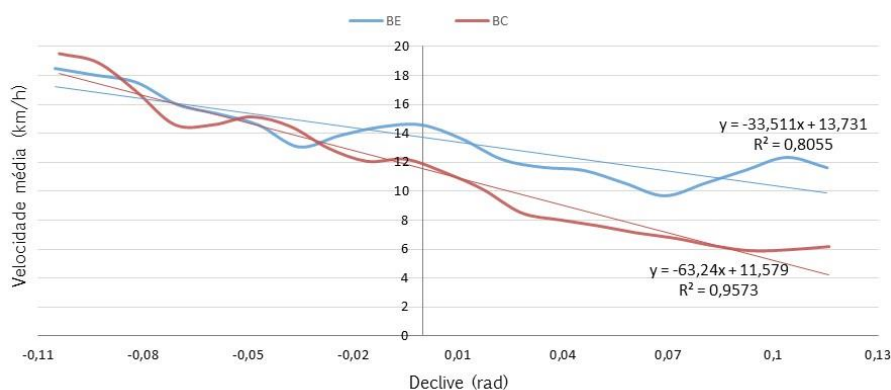


Figura 3.1-10 - Variação da velocidade média com o declive da estrada

É possível verificar através Tabela 3.1-12 que para declives positivos a velocidade média da BC é 37,2% inferior a da BE, para declives nulos a velocidade média da BC é apenas 15,7% inferior a da BE e para declives negativos a diferença de velocidades médias é muito pequena, sendo a velocidade média da BC só 2,3% inferior a da BE. O gráfico da Figura 3.1-10 e a Tabela 3.1-12 vêm assim confirmar os valores apresentados na Tabela 3.1-11.

Tabela 3.1-12 - Relação entre a velocidade e o declive para a BE e para a BC

Declive	Velocidade média (km/h)		
	Positivo	Neutro	Negativo
BE	11,4	13,7	15,7
BC	7,2	11,6	15,4

Depois da separação do BSP em modos (Tabela 2.5-9), a fase seguinte consistiu em distribuir as mais de 10 horas de dados (correspondentes a mais de 36000 segundos de informação em condições reais de operação), recolhidos com as bicicletas elétricas e com a bicicleta convencional, pelos diferentes modos de BSP, ficando-se assim com a percentagem de tempo em cada modo, de acordo com a Figura 3.1-11.

Na Figura 3.1-11 os modos positivos, que correspondem a 68,5% do tempo, representam os modos onde é exigido esforço humano, no caso da bicicleta convencional, e onde é exigido esforço humano e potência do motor, no caso da bicicleta elétrica. Cerca de 48% do tempo de condução é despendido nos modos 1 e 2 o que corresponde a uma potência inferior a 160 W. Aproximadamente 7,5% do tempo de viagem é em modo 0, o que coincide com situações onde o ciclista está parado. Aproximadamente 24% do tempo é despendido em modos de BSP negativos, o que indica que se está numa situação de travagem ou de desaceleração.

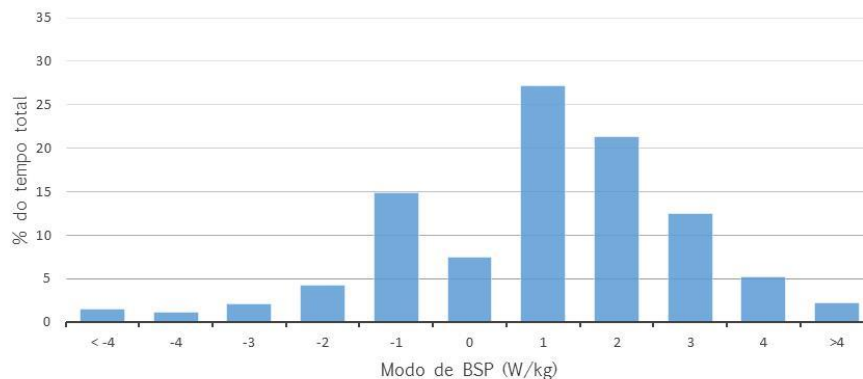


Figura 3.1-11 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para todas as bicicletas testadas

Os dados adquiridos com as diferentes bicicletas foram desagregados, obtendo-se a distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para as diferentes bicicletas elétricas e convencional. Analisando a Figura 3.1-12, Figura 3.1-13 e Figura 3.1-14 observa-se que para os modos de BSP negativos as três bicicletas apresentam perfis semelhantes.

Na Figura 3.1-12 observa-se que na BC grande parte do tempo de viagem, cerca de 58% do tempo, é despendido no modo 1 e 2, representando potências inferiores a 160 W, o que está de acordo com o referido anteriormente (70). Como seria de esperar, na BC o modo de BSP >4 representa apenas 0,6% do tempo, sendo que este modo representa potências superiores a 310 W. Tal justifica-se por estes níveis de potência serem difíceis de atingir por ciclistas não profissionais.

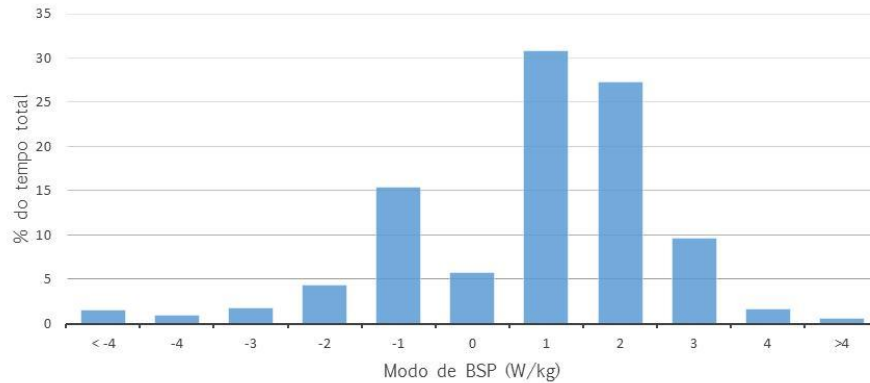


Figura 3.1-12 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BC

Na Figura 3.1-13 observa-se que o perfil dos modos de BSP positivos da BE1 é bastante diferente do encontrado para a BC. É de realçar que o modo >4 representa 3,7% do tempo de viagem, valor superior ao atingido na BC para o mesmo modo. Este facto é justificado por, neste tipo de bicicleta, o ciclista ter o auxílio do motor elétrico, o que faz com que este consiga por diversas vezes atingir zonas de modo >4 (potências superiores a 310 W). Observa-se ainda que existiu uma diminuição na percentagem de tempo do modo 1 e 2, em detrimento de um aumento no modo 4 e >4, quando comparado com a BC.

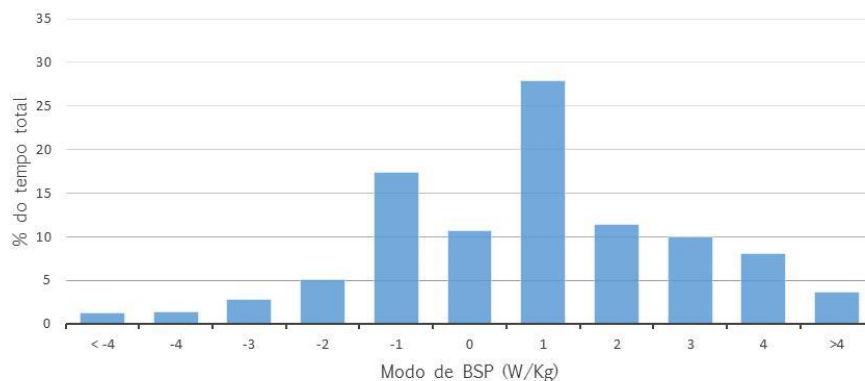


Figura 3.1-13 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE1

Como primeiro ponto de análise da Figura 3.1-14 destaca-se o facto de que com BE2 também ter sido possível obter uma percentagem de tempo no modo >4 superior à obtida com a BC, sendo 3,3% do tempo de viagem despendido no modo >4, e a razão que justifica este valor é a mesma que foi apresentada para o caso da BE1. Os modos 2 e 3 representam aproximadamente 54% do tempo de viagem, o que significa que durante esse período de tempo foram atingidas potências entre 160 a 235 W, o que mais uma vez é justificável pelo auxílio do motor elétrico.

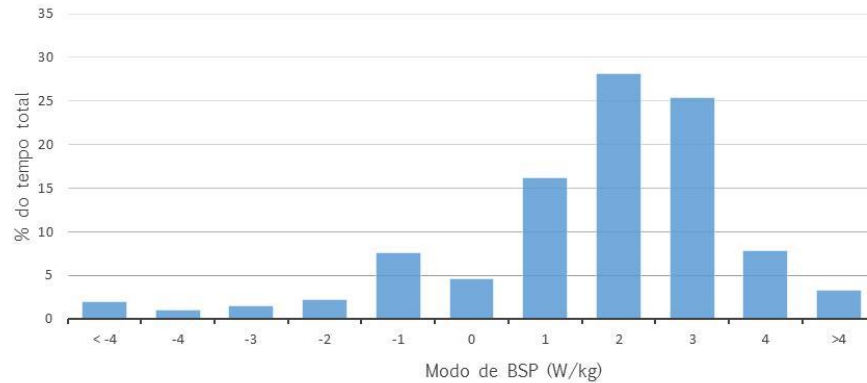


Figura 3.1-14 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE2

É de realçar que a diferença entre os perfis das BE1 e BE2 devem-se essencialmente ao tipo de percurso em que foram ensaiadas, o percurso P6 (associado à BE2) permitiu atingir uma velocidade média mais elevada e consequentemente BSP mais elevados.

Uma vez que as duas bicicletas elétricas (BE1 e BE2) têm a mesma potência decidiu-se agrupar os dados destas duas bicicletas numa só, ficando-se assim com a BE (BE1 + BE2). A Figura 3.1-15 representa o perfil da BE, sendo esta distribuição uma generalização para as bicicletas elétricas.

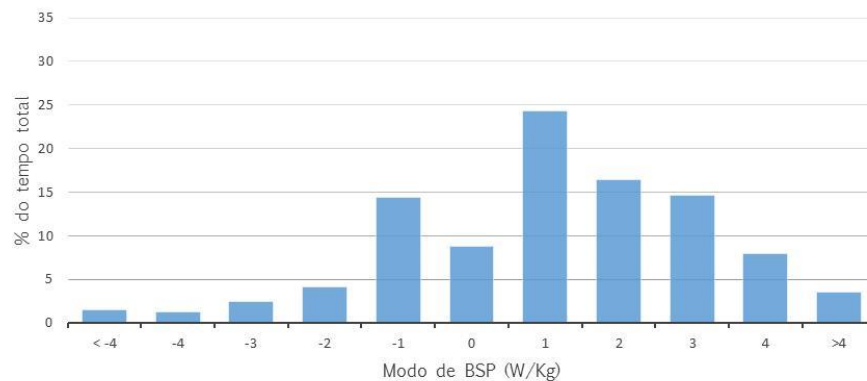


Figura 3.1-15 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BE (BE1+BE2)

Na Figura 3.1-16 estão representadas as distribuições temporais (%) para a BC e BE. Observa-se facilmente que o perfil temporal para modos de BSP negativos é muito semelhante para as duas bicicletas, sendo que em relação ao modo 0 também não existem diferenças consideráveis. A grande diferença reside nos modos de BSP positivos, onde na BC existe uma predominância clara do modo 1 e 2 (potências inferiores a 160 W) e uma representação muito fraca para os modos 4 e >4. Além disso, na BE a distribuição é mais uniforme, sendo os modos 1, 2 e 3 os que possuem maior representatividade temporal (potências inferiores a 235 W), ainda assim os modos 4 e >4 conseguem ter uma representação

significativa. Este aumento na percentagem de tempo em modos mais elevados para a BE só é possível devido ao auxílio do motor elétrico.

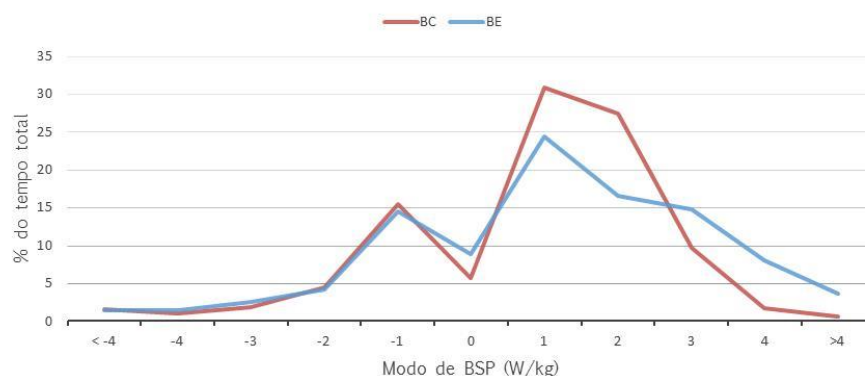


Figura 3.1-16 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP para a BC e BE

Como referido anteriormente, no caso da BE1 e BE2 utilizaram-se as leituras da corrente e da tensão, realizadas durante as monitorizações, para obter a energia fornecida pela bateria a cada segundo. O passo seguinte consistiu em agrupar, pelos diversos modos BSP, a energia consumida (em Wh/s) e assim obter um perfil de energia consumida para a BE1 (Figura 3.1-17) e para a BE2 (Figura 3.1-18).

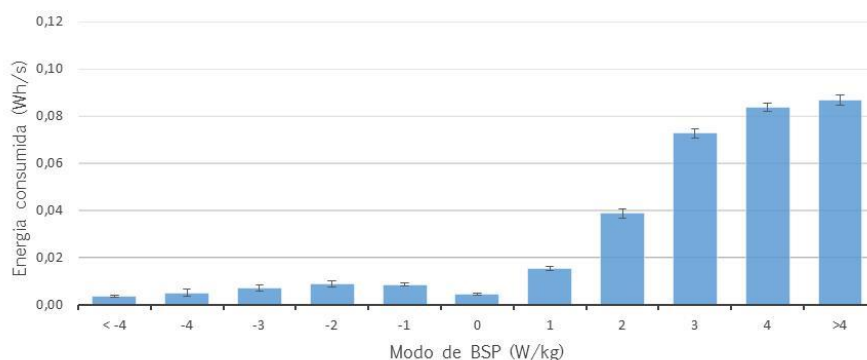


Figura 3.1-17 - Energia consumida por modo de BSP para a BE1

Ao contrário do que se verificou para os motociclos, nas bicicletas não existem modos com valores negativos de energia, o que é coerente uma vez que as bicicletas elétricas monitorizadas não possuíam um sistema de regeneração de energia.

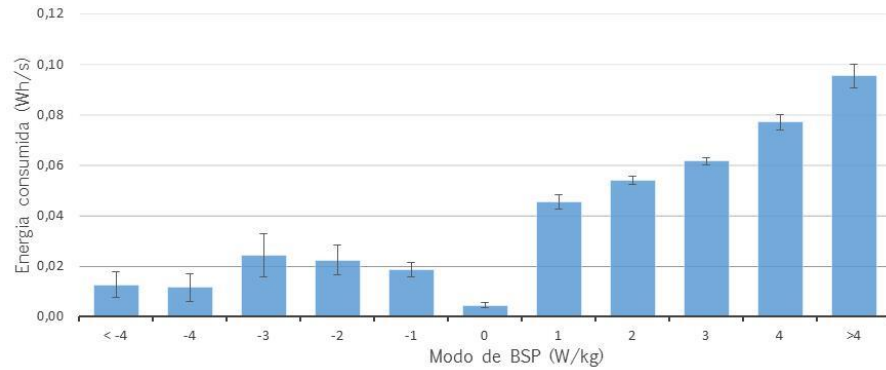


Figura 3.1-18 - Energia consumida por modo de BSP para a BE2

De forma a generalizar o perfil de consumo para as bicicletas elétricas agruparam-se os dados da BE1 e BE2 obtendo assim o perfil de consumo da BE, que se encontra representado na Figura 3.1-19.

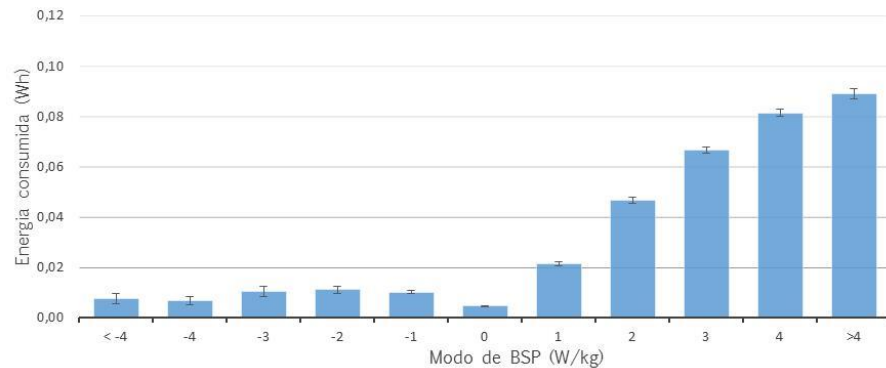


Figura 3.1-19 - Energia consumida por modo de BSP para a BE

Na Tabela 3.1-13 está representada a energia calculada através do BSP e a energia fornecida pela bateria da bicicleta elétrica. Apenas se encontram representados os valores entre o modo 1 e o modo 4 pois são estes os modos em que é exigida potência ao motor da bicicleta elétrica. Existe ainda o modo >4, mas devido a ser um intervalo aberto não é possível estabelecer uma relação entre os dois valores de energia apresentados.

Observando os valores da Tabela 3.1-13, pode parecer que a bicicleta elétrica tem uma eficiência superior a 90%, e em alguns dos modos de BSP ter mesmo eficiências superiores a 100%. Visto que este tipo de bicicletas se caracterizam por um sistema híbrido, composto pelo motor elétrico e pelo esforço humano, é necessário contabilizar a energia proveniente das duas fontes deste sistema, para se tirar conclusões sobre a sua eficiência.

Tabela 3.1-13 - Comparação entre a energia calculada pelo BSP e a fornecida pela bateria da BE

Modo de BSP (W/kg)	1	2	3	4
Energia calculada pelo BSP (Wh/s)	0,022	0,043	0,065	0,087
Energia fornecida pela bateria (Wh/s)	0,021	0,047	0,067	0,081

De forma a verificar a viabilidade dos perfis de energia consumida obtidos para cada uma das bicicletas elétricas, multiplicou-se a distribuição temporal de BSP de cada um dos percursos pelo perfil de energia consumida da bicicleta elétrica associada a esse percurso, e fez-se o somatório da energia consumida em cada um dos modos, obtendo-se um consumo estimado, representado na Tabela 3.1-14. Nesta tabela também é apresentado o somatório da energia consumida a cada segundo, que foi medida em estrada nos diferentes percursos e que foi denominado por consumo real.

Tabela 3.1-14 - Verificação dos perfis de consumo das bicicletas elétricas

Bicicleta	Percurso	Consumo estimado (Wh)	Consumo real (Wh)	Diferença (%)
BE1	P5	82,9	82,7	0,34
BE1	P5	83,2	70,4	18,24
BE1	P5	87,0	93,9	-7,28
BE1	P5	77,5	78,1	-0,76
BE1	P5	75,4	78,1	-3,48
BE2	P6	132,3	122,4	8,05
BE2	P6	178,3	188,1	-5,24

Através dos valores apresentados na Tabela 3.1-15, é possível concluir que os perfis de consumo apresentados na Figura 3.1-17 e Figura 3.1-18 são aceitáveis para a realização de estimativas de consumo para bicicletas do tipo BE1 e BE2, respetivamente. Para estimar o consumo da generalidade das bicicletas elétricas deve ser utilizado o perfil apresentado na Figura 3.1-19, tal como será apresentado mais adiante neste estudo.

É de realçar que os maiores desvios observados na Tabela 3.1-14 prendem-se com o modo de utilização da bicicleta elétrica, ou seja, modos de utilização fora da média, ou porque utilizam demasiada assistência elétrica, ou porque utilizam muito pouca assistência elétrica.

Tabela 3.1-15 - Diferença entre o consumo real e o estimado da BE1 e BE2

Bicicleta	Média direta da diferença (%)	Média absoluta da diferença (%)
BE1	1,41	6,02
BE2	1,41	6,64

3.2 Dados fisiológicos

Como referido anteriormente, nas monitorizações de bicicletas utilizou-se equipamento para a aquisição de sinais fisiológicos onde se registou a frequência cardíaca, aqui denominada por HR que provem da designação inglesa *Heart Rate*.

Neste estudo pretendeu-se verificar uma relação entre o HR e a dinâmica da viagem, ou seja, observar o que acontece ao HR quando um ciclista aumenta/diminui a velocidade a que se desloca, ou quando este está numa situação de subida/descida. Para obter essa informação procurou-se uma relação entre o HR e o BSP, visto o BSP ser a conjugação da velocidade, aceleração e declive numa só variável. Uma vez que os valores da frequência cardíaca diferem de pessoa para pessoa, é muito difícil encontrar uma relação direta entre o HR o BSP, pelo que se decidiu analisar a sua variação, ou seja, o diferencial do HR, $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ e não o valor absoluto do HR em si mesmo.

Após as monitorizações, os dados do HR foram enviados para a empresa PLUX, que realizou a primeira análise dos dados, que consistiu na passagem do sinal adquirido em bruto, sinal analógico recolhido a 200 Hz, para valores de frequência cardíaca correspondentes a uma amostragem segundo a segundo. Depois dessa fase, os dados do HR já com esse primeiro tratamento foram reprocessados devido à presença de algum ruído. Nesse processamento compactou-se os dados que foram registados de segundo a segundo (HR/s) em conjuntos de 60 segundos, ficando-se assim com HR/min, o que possibilitou eliminar grande parte do ruído existente. Uma vez que o BSP é definido para cada segundo da viagem e com o objetivo de se estabelecer uma relação para cada segundo de viagem, foi necessário realizar a descompactação dos dados do HR/min, isto é, passar os conjuntos de 60 segundos para registos de segundo a segundo. Com estes registos de segundo a segundo (HR/s), já com a ausência de ruído, calculou-se o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para cada segundo de viagem.

O tempo de estudo dos sinais fisiológicos é um pouco superior a 8 horas, menor que as mais de 10 horas de monitorização, devendo-se ao facto de existirem viagens ou partes de viagens em que o ruído se sobrepôs aos sinais fisiológicos, partes essas que não foram incluídas nesta análise.

Na Figura 3.2-1 encontra-se uma relação clara entre o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ e o BSP, utilizando dados referentes a bicicletas convencionais e elétricas. Para o modo 0, que corresponde à condição em que o ciclista se encontra parado, constata-se que nesta situação o ciclista sofre uma redução no seu HR, logo o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ é negativo. Também se observa que, para modos de BSP positivos, o HR aumenta, pois estes são modos onde é requerida mais potência, logo é requerido esforço humano. Isso é observado neste gráfico, onde para modos de BSP positivos o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ também é positivo e de forma crescente de modo para modo.

O modo >4 também deveria ter um $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ superior ao do modo 4, mas isso não se verifica devido ao facto do modo >4 ter uma percentagem de tempo associada de apenas 3,6% do tempo total, o que faz com que a sua amostra de valores de $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ seja reduzida em relação aos outros modos, originando que o

valor de $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ deste modo não se encontra totalmente bem estabelecido. Para modos de BSP negativos observa-se uma diminuição no HR, como se verifica na Figura 3.2-1.

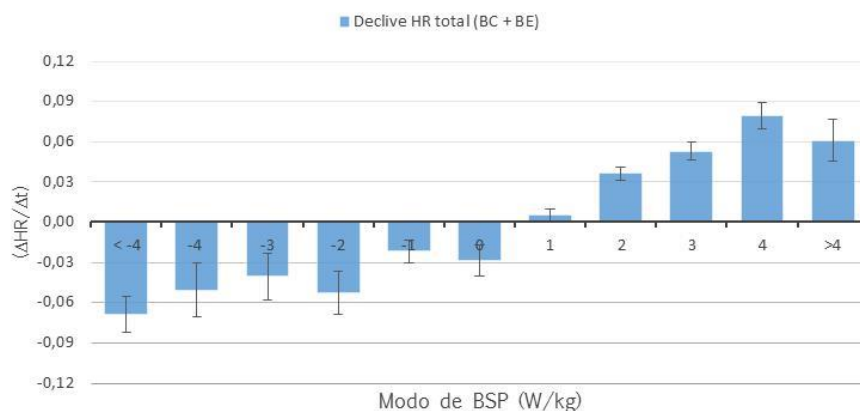


Figura 3.2-1 - Relação entre BSP e $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para o total das monitorizações

Além disso, desagregaram-se os dados da Figura 3.2-1, de forma a observar o que ocorre ao $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ no caso da bicicleta elétrica e no caso da bicicleta convencional. De forma a ter uma amostra alargada de dados, para as bicicletas elétricas reuniram-se os dados da BE1 e BE2 numa única bicicleta designada BE, ficando-se com cerca de 4 horas de dados tanto para a BE como para a BC.

Na Figura 3.2-2 está representada a relação entre o BSP e o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para a bicicleta elétrica e para a bicicleta convencional. Observa-se neste gráfico que, para os modos de BSP positivos, os valores de $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ em cada modo são sempre menores para a bicicleta elétrica. Esta avaliação faz todo o sentido, uma vez que na bicicleta elétrica parte da energia fornecida às rodas advém do motor elétrico fazendo com que o esforço humano seja menor, e por sua vez, o HR não tenha variações tão acentuadas como as ocorridas numa bicicleta convencional. Como seria de espera para os modos de BSP negativos, as duas bicicletas proporcionam a recuperação do HR, ou seja, $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ negativo.

De forma a obter o aumento típico do HR no fim de uma viagem, ou seja o $\sum(\Delta HR)$ ao fim de uma viagem, multiplicou-se a distribuição temporal (%) típica de BSP para a BC e para a BE, Figura 3.1-12 e Figura 3.1-15 respetivamente, pelo $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ da BC e da BE em cada modo de BSP, e fez-se o somatório dessas multiplicações de forma a obter o $\sum(\Delta HR)$ para as distribuições típicas de BSP da BE e da BC.

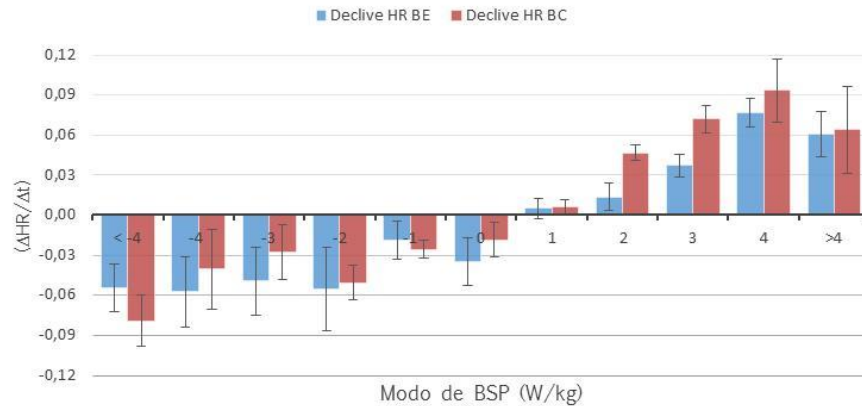


Figura 3.2-2 - Relação entre BSP e $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ para o total a BE e BC

Na Tabela 3.2-1 estão representados os $\sum(\Delta HR)$ para a BC e BE, observando-se que o aumento do HR é 56,9% menor para a BE. Tal facto significa, que a utilização da BE leva a uma redução das variações de HR em cerca de 56,9%, comparativamente à utilização de uma BC.

Tabela 3.2-1 - $\sum(\Delta HR)$ para a BC e para a BE

Bicicleta	$\sum(\Delta HR)$
BE	0,59
BC	1,37

Um outro parâmetro de interesse para este estudo é a energia global que é despendida pelo ciclista, e que doravante será designado por EE (proveniente do termo inglês *Energy Expenditure*). De acordo com estudos anteriores é possível determinar, através do HR, com uma aproximação razoável, a energia que o corpo humano consome durante a atividade física (58), (56), (57).

Na revisão bibliográfica efetuada encontraram-se três artigos onde são apresentadas estimativas da EE em função do HR:

Equação 3.2-1 - EE em função do HR segundo a referência (58)

$$EE = \text{género} \times (-55,0969 + 0,6309 \times HR + 0,1988 \times \text{peso} + 0,2017 \times \text{idade}) + (1 - \text{género}) \times (-20,4022 + 0,4472 \times HR - 0,1263 \times \text{peso} + 0,074 \times \text{idade})$$

Onde:

- EE – *Energy Expenditure* (kJ/min);
- HR – *Heart Rate* (BPM);
- Género = 1 para homens e género = 0 para mulheres;
- Peso (kg).

No presente trabalho todos os ciclistas eram do sexo masculino (género=1), com uma média de idades de 28 anos e pesando em média 70 kg.

Equação 3.2-2 - EE em função do HR segundo a referência (56)

$$EE = 0,103 \times HR - 4,795$$

Onde:

- EE – *Energy Expenditure* (kcal/min);
- HR – *Heart Rate* (BPM);

Equação 3.2-3 - EE em função do HR segundo a referência (57)

$$EE = 0,0056 \times HR^2 - 0,6908 \times HR + 26,532$$

Onde:

- EE – *Energy Expenditure* (kJ/min);
- HR – *Heart Rate* (BPM);

De forma a obter o valor de EE em Wh/s, fizeram-se as devidas conversões das equações anteriores - Equação 3.2-1, Equação 3.2-2 e Equação 3.2-3 - de modo a facilitar a comparação entre a energia elétrica consumida pelo motor elétrico e a energia global despendida pelo ciclista. A partir dessas equações, já em Wh/s, foi possível obter uma representação do valor médio (média ponto a ponto) destas três equações (Equação 3.2-4). No gráfico da Figura 3.2-3 estão representadas as equações referidas.

Equação 3.2-4 - EE em função do HR, equação média

$$EE = (9 \times 10^{-6}) \times HR^2 + 0,0006 \times HR - 0,0449$$

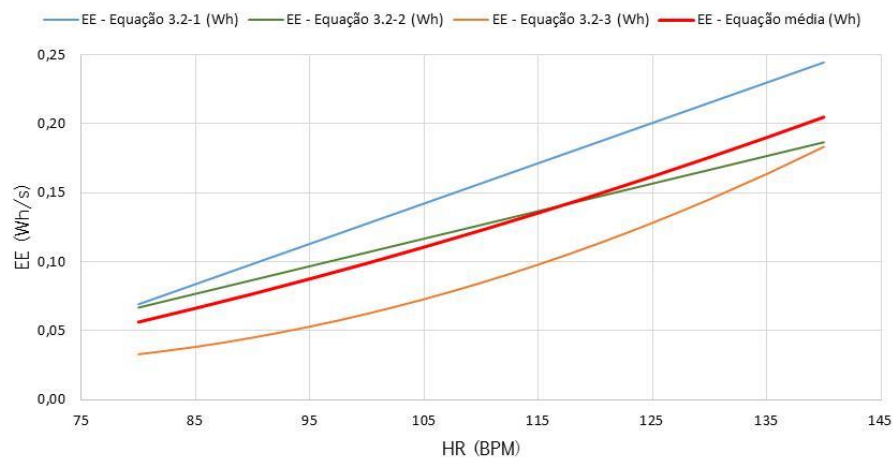


Figura 3.2-3 - Energia global que é despendida pelo ciclista em função do HR

Nas restantes análises efetuadas neste trabalho utilizou-se sempre a Equação 3.2-4 de forma a obter os valores de EE em função do HR.

Utilizando as cerca de 8 horas de dados dos sinais fisiológicos (4 horas com a bicicleta convencional e outras 4 horas com a bicicleta elétrica) e recorrendo a Equação 3.2-4, calculou-se o valor de EE (Wh/s) para cada segundo de viagem. Realça-se que nesta análise os valores de entrada foram o HR a cada segundo de viagem e não o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ da análise anterior. O passo seguinte consistiu em agrupar os valores de EE por modo de BSP e fazer a média desses valores para cada modo, obtendo-se os perfis de EE (Wh/s) apresentados na Figura 3.2-4, a azul para a bicicleta elétrica e a vermelho para a bicicleta convencional.

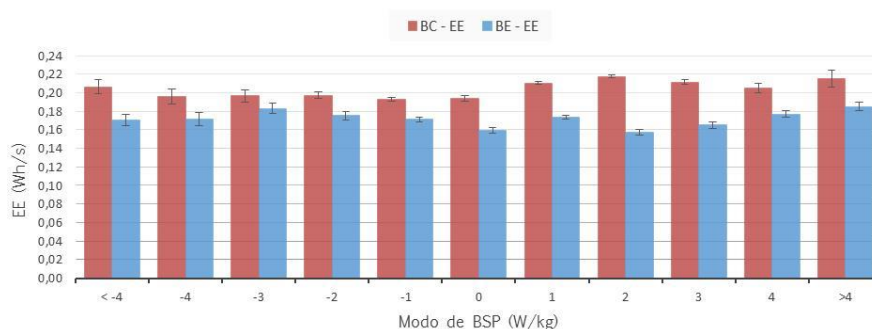


Figura 3.2-4 - EE por modo de BSP para a BC e para a BE

Multiplicaram-se os perfis de EE (Wh/s) apresentados na Figura 3.2-4 pela distribuição temporal de BSP, em segundos, de cada percurso, para as respetivas bicicletas, ficando-se assim com o EE (Wh) total em cada um dos modos de BSP. Somaram-se ainda os EE (Wh) de todos os modos de BSP, de forma a obter assim o EE (Wh) estimado para cada um dos percursos. Somaram-se os valores de EE (Wh) de todos os percursos e dividiram-se pelo total de quilómetros percorridos, ficando-se assim com o valor médio de EE em Wh/km para a bicicleta convencional e para a bicicleta elétrica.

De forma a determinar a energia total consumida por quilómetro pela bicicleta elétrica, isto é, a soma da energia global que é despendida pelo ciclista (Wh/km) com a energia elétrica consumida (Wh/km), procedeu-se à estimativa do consumo elétrico. A estimativa do consumo elétrico foi realizada da mesma forma que a estimativa do EE (Wh/km), com a diferença de o perfil de consumo utilizado ser o da Figura 3.1-19 e não o da Figura 3.2-4.

Na Figura 3.2-5 pode se observar a estimativa da energia total que é consumida por quilómetro, tanto para a bicicleta convencional como para a bicicleta elétrica. Com a bicicleta convencional o total de energia consumida por quilómetro é cerca de 69,8 Wh/km, sendo que neste tipo de bicicleta apenas existe EE. No caso da bicicleta elétrica o EE por quilómetro é 27,5% inferior ao obtido com a bicicleta convencional, ou seja, o valor de EE é de 50,6 Wh/km, e o total de energia consumida por quilómetro,

conjunto de EE mais o consumo elétrico (9,2 Wh/km), é de 59,8 Wh/km. O consumo total de energia por quilómetro obtido para a bicicleta elétrica é 14,3% inferior ao obtido para a bicicleta convencional.

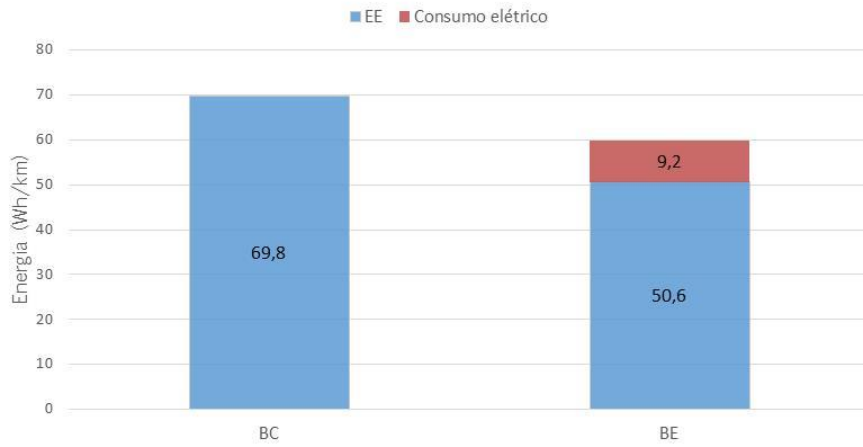


Figura 3.2-5 - Total de energia consumida por km, para a BC e para BE

Como é possível observar na Figura 3.2-4 não se conseguiu obter uma relação clara entre o EE e os modos de BSP, no entanto observa-se que de um modo geral os valores de EE em cada modo de BSP são sempre mais elevados para a BC. Isto é corroborado com os valores apresentados na Figura 3.2-5, mostrando que na análise global as diferenças no valor de EE entre a BC e a BE são bastante evidentes.

3.3 Aplicações a casos de estudo

Nesta secção, a metodologia anteriormente desenvolvida e validada foi aplicada a percursos específicos, com o objetivo de perspetivar possíveis aplicações no futuro em sistemas de partilha tanto de bicicletas como de motociclos, na cidade de Lisboa. Desta forma, foram percorridos quatro percursos de bicicleta convencional e dois de motociclo convencional. Foi ainda ensaiado um motociclo elétrico de potência elevada, ME3, cedido pela EDP Valor, nos mesmos dois percursos que o motociclo convencional. Nesta análise, foi estudada a possibilidade de realizar os mesmos percursos utilizando bicicletas e motociclos elétricos e são quantificados os respetivos impactos energéticos, dinâmicos e fisiológicos.

3.3.1 Motociclos

Os percursos realizados foram escolhidos de forma a cobrir possíveis percursos de partilha de motociclos na cidade de Lisboa (34). No que toca aos dois percursos escolhidos, foram efetuados com um motociclo convencional e são percursos de cariz quotidiano: o designado por Saldanha representa a ligação entre dois pólos empresariais, o Rossio e o Saldanha; e, por fim, o percurso com a designação de Cidade Universitária que consiste num circuito de ligação entre dois pólos universitários, entre o Instituto Superior Técnico e a Faculdade de Ciências, com passagem pela Cidade Universitária, sendo que estes percursos foram realizados nos dois sentidos, contabilizado assim uma viagem. Os dois percursos realizados com o motociclo convencional foram também realizados com um motociclo elétrico, ME3. Na Tabela 3.3-1 são apresentadas as características deste motociclo e na Figura 3.3-1 está ilustrado o motociclo ensaiado.



Figura 3.3-1 - Maxi scooter elétrica monitorizada nos casos de estudo, ME3

Tabela 3.3-1 - Características da *maxi scooter* elétrica monitorizada nos casos de estudo

Veículo	Tipo	Marca e modelo	Potência máxima (W)	Bateria (kWh)	Tipo de bateria	Mudanças mecânicas/elétricas	Peso do veículo (kg)
ME3	Motociclo Elétrica	Vectrix VX1 Li+	20200	5,4	Lítio	---/---	208

Na Tabela 3.3-2 estão resumidos os resultados da estatística das duas viagens para os dois motocicletos. As variáveis apresentadas na tabela foram obtidas da mesma forma que as apresentadas na Tabela 3.1-1. Uma vez que não foi possível aceder aos componentes elétricos do ME3, de forma a realizar leituras de corrente e de voltagem, a quantificação da energia consumida por quilómetro para este motociclo foi realizada através de uma estimativa. Dividiu-se a energia consumida no carregamento do motociclo, após o ensaio, pelo número de quilómetros efetuados durante a monitorização.

Tabela 3.3-2 - Estatística de viagem para os percursos do caso de estudo realizados de MC e de ME3

Percurso	Saldanha	Cidade Universitária	Saldanha	Cidade Universitária
Motociclo	MC	MC	ME3	ME3
Distância percorrida (km)	5,99	6,99	5,99	6,99
Declive médio positivo (rad)	0,025	0,020	0,025	0,020
Declive médio negativo (rad)	-0,023	-0,016	-0,023	-0,016
Tempo para a realização do percurso (segundos)	954	1112	981	679
Velocidade média (km/h)	22,6	22,6	22,1	35,3
Velocidade máxima (km/h)	68,0	73,3	73,0	89,0
Energia consumida (Wh/km)	235,14	185,52	202,86	202,86

Na Tabela 3.3-2 é possível verificar que o ME3 demorou mais 2,8% do tempo para completar o percurso do Saldanha e consumiu menos 13,7% de energia por quilómetro quando comparada com o MC. Segundo os dados obtidos na monitorização do percurso da Cidade Universitária, o ME3 demora menos 38,9% do tempo para completar o percurso quando comparado com o MC. Esta grande diferença pode se dever a uma maior afluência de trânsito aquando da monitorização do MC. Ainda em relação ao percurso da Cidade Universitária, o ME3 consome mais 9,3% de energia por quilómetro quando comparada com o MC, o que não seria de esperar, no entanto é que realçar que o consumo do ME3 foi obtido através de uma estimativa muito grosseira.

Tabela 3.3-3 - Estatística de viagem para os casos de estudo com o ME3

Percurso	Saldanha	Cidade Universitária
Motociclo	ME3	ME3
Capacidade da bateria (kWh)	5,4	5,4
Energia consumida (Wh/km)	202,86	202,86
Distância percorrida (km)	5,99	6,99
Autonomia (km)	26,6	26,6
Autonomia (nº de viagens)	4	3
Consumo (%) em relação a MC	-13,7	9,3

Na Tabela 3.3-3 observa-se que o ME3 tem autonomia para realizar 4 vezes o percurso do Saldanha (nos dois sentidos), tendo que efetuar um carregamento após a quarta viagem. No caso do percurso da Cidade Universitária, o ME3 tem autonomia para realizar o percurso 3 vezes (nos dois sentidos) sem efetuar qualquer carregamento.

Para cada um dos percursos realizou-se a distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP para os dois motocicletas, ficando-se assim com Figura 3.3-2, Figura 3.3-3, Figura 3.3-4 e Figura 3.3-5. Como era de esperar, devido à elevada potência do ME3, as duas distribuições temporais (%) pelos diferentes modos de MSP para este motociclo (Figura 3.3-2 e Figura 3.3-3) apresentam uma percentagem significativa de tempo em modo de MSP >18, o que neste caso corresponde a potências superiores a 5000 W, o que está de acordo com a sua potência máxima de 20200 W.

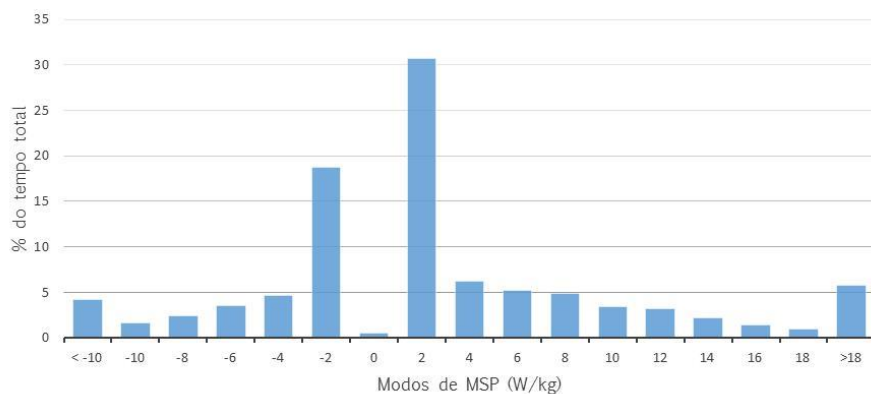


Figura 3.3-2- Distribuição temporal (%) MSP percurso do Saldanha para o ME3

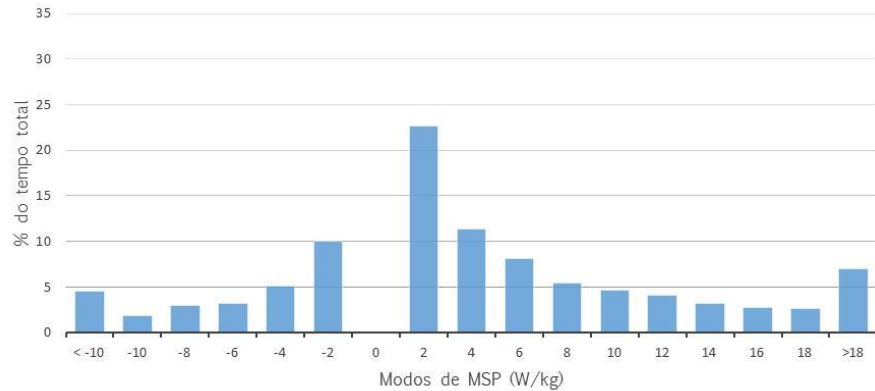


Figura 3.3-3 - Distribuição temporal (%) de MSP percurso da Cidade Universitária para o ME3

De forma a estimar os tempos de conclusão dos percursos e os consumos energéticos, caso estes percursos de estudo fossem realizados com o ME2, utilizaram-se as distribuições temporais de MSP do MC, Figura 3.3-4 e Figura 3.3-5, e os resultados apresentados anteriormente neste trabalho, para proceder a realização desta análise.

Nesta secção utilizaram-se apenas os dados/resultados do ME2 para efetuar a análise seguinte. O ME1 não foi incluído nessa análise, uma vez que tem uma potência muito inferior a do MC e assim não ser possível efetuar as relações/aproximações pretendidas nesta secção. Como se pode observar na Figura 3.1-2 e na Figura 3.1-4, as distribuições temporais (%) pelos diferentes modos de MSP são diferentes para estes dois motociclos (MC e ME2), logo nestes dois percursos de estudo as distribuições temporais (%) pelos diferentes modos de MSP também deverão ser diferentes para os dois motociclos.

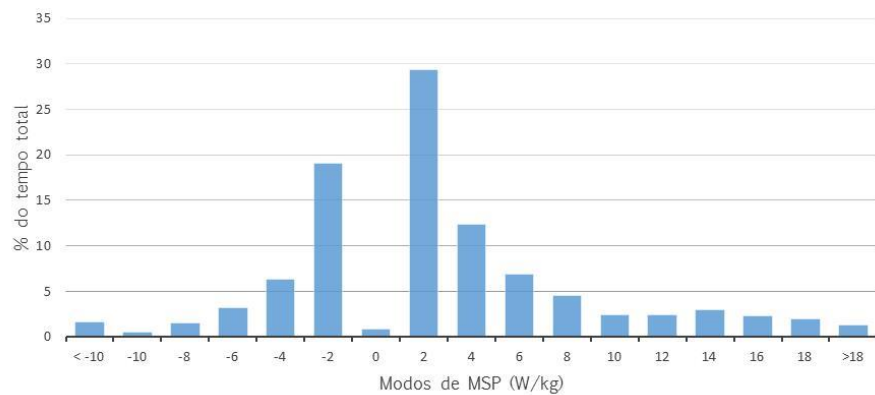


Figura 3.3-4 - Distribuição temporal (%) MSP percurso do Saldanha para o MC

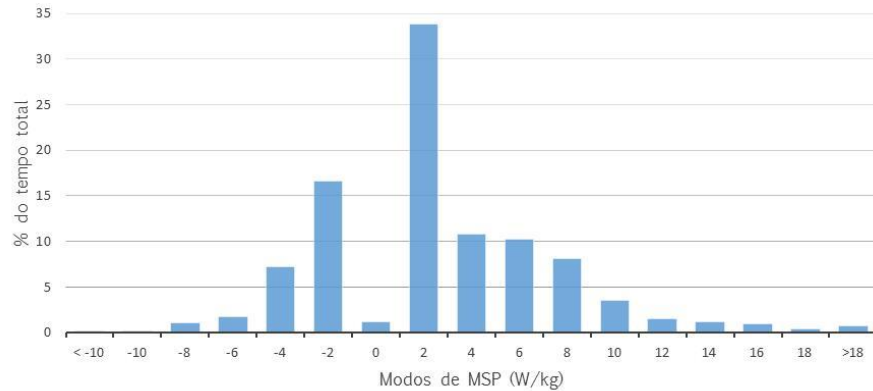


Figura 3.3-5 - Distribuição temporal (%) de MSP percurso da Cidade Universitária para o MC

Atendendo ao que foi referido no parágrafo anterior, procedeu-se à realização da estimativa da distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de MSP, nos dois percursos em estudo para o ME2. Essa estimativa foi realizada a partir das distribuições temporais de MSP do MC, em cada um dos percursos em estudo (Figura 3.3-4 e Figura 3.3-5).

De forma a se efetuar essa estimativa utilizaram-se as distribuições temporais de MSP presentes na Figura 3.1-2 para o MC e a da Figura 3.1-4 para o ME2, com o objectivo de efetuar uma correção ao perfil MSP do MC e estimar um perfil adequado à utilização do ME2. As diferenças temporais (%) entre os respetivos modos de MSP estão representadas na Tabela 3.3-4.

Utilizando as distribuições temporais de MSP da Figura 3.3-4 e Figura 3.3-5 em conjunto com as diferenças presentes na Tabela 3.3-4 estimaram-se as distribuições temporais de MSP para o ME2 nos percursos em estudo, sendo que estas são apresentadas na Figura 3.3-6 e Figura 3.3-7. Nestas figuras são também apresentadas as distribuições originais obtidas com o MC.

Tabela 3.3-4 - Diferença entre a distribuição temporal de MSP do MC e do ME2

Modo de MSP	< -10	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	>18
% de tempo_MC	2,7	1,5	2,1	3,3	5,7	17,7	0,3	26,1	7,5	6,8	5,4	5,6	3,9	3,5	2,7	2,1	3,0
% de tempo_ME2	1,4	0,9	1,8	3,4	6,8	12,6	5,5	19,0	13,6	10,9	7,9	5,0	2,7	2,0	1,4	1,3	3,7
Diferença	-1,3	-0,6	-0,2	0,0	1,1	-5,1	5,1	-7,1	6,1	4,1	2,5	-0,5	-1,1	-1,5	-1,3	-0,9	0,7

Na obtenção destas estimativas foi necessário ter em atenção que nenhum dos modos poderia ter uma percentagem de tempo negativa, visto isto ser uma impossibilidade física e que as percentagens da totalidade dos modos deveriam somar 100%. Para não existirem modos com percentagem de tempo negativo, no percurso do Saldanha realizou-se uma correção no modo -10 deste percurso, onde se assumiu o valor zero para esse modo e se fez uma correção no modo -8 de forma a obter os 100% de

tempo na totalidade dos modos. No percurso da Cidade Universitária também foi necessário executar algumas correções, como a efetuada no percurso do Saldanha, de forma a cumprir o que foi dito neste parágrafo.

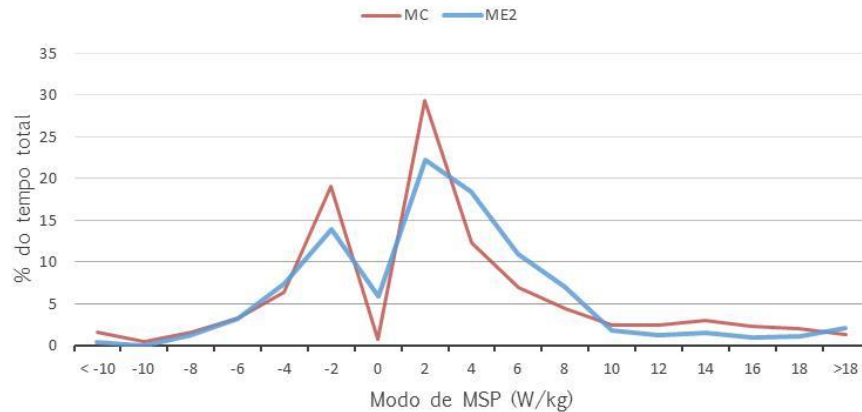


Figura 3.3-6 - Estimativa da distribuição temporal de MSP para o ME2 no percurso do Saldanha, monitorizado com o MC

Na Figura 3.3-6 e Figura 3.3-7 observa-se que, para os modos de MSP negativos inferiores a -4, os perfis para o ME2 e para o MC são muito semelhantes. Os modos -2 e 2 para o ME2 têm uma percentagem de tempo inferior a observada no MC, no entanto o modo 0, 4 e 8 têm percentagens de tempo mais elevadas no ME2. Observa-se ainda que os modos de maior potência, ou seja, modos superiores ao modo 10, têm uma maior representação em percentagem de tempo para o MC quando comparado com o ME2.

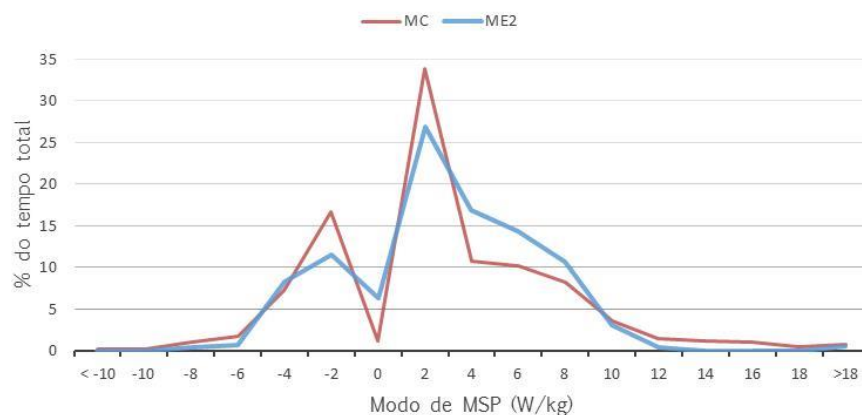


Figura 3.3-7 - Estimativa da distribuição temporal de MSP para o ME2 no percurso da Cidade Universitária, monitorizado com o MC

Utilizaram-se os dados recolhidos nas monitorizações do ME2 e do MC para comparar o tempo que se demorou a concluir um percurso realizado de ME2 com o tempo que se demorou a realizar o mesmo percurso com um MC. Conclui-se que com o ME2 existe um acréscimo de tempo de cerca de 35,6% (Tabela 3.1-2). Através deste resultado estimou-se o tempo que seria necessário para realizar cada um dos percursos em estudo com o ME2, obtendo-se assim o tempo estimado que é apresentado na Tabela 3.3-5.

Tabela 3.3-5 - Estimativa da estatística de viagem para os casos de estudo com o ME2

Percurso	Saldanha	Cidade Universitária
Motociclo	ME2	ME2
Tempo estimado (segundos)	1294	1508
Velocidade média estimada (km/h)	16,7	16,7
Capacidade da bateria (kWh)	2,88	2,88
Energia consumida (Wh/km)	96,94	77,66
Distância percorrida (km)	5,99	6,99
Autonomia (km)	29,7	37,1
Autonomia (nº de viagens)	4	5
Redução no consumo (%) em relação a MC	58,8	58,1

Na Tabela 3.3-5 são apresentados os resultados para o caso dos percursos em estudo serem realizados com o ME2 e com distribuição temporal de MSP diferente da obtida no MC. A velocidade média apresentada nesta tabela foi estimada através da estimativa do tempo apresentada nos parágrafos anteriores. O consumo de energia elétrica foi obtido utilizando o perfil de consumo da Figura 3.1-8 e os perfis de MSP estimados para cada percurso (Figura 3.3-6 e Figura 3.3-7).

Na Tabela 3.3-5 é possível observar a autonomia em km, a autonomia em número de viagens possíveis de realizar em cada percursos antes de se ter que efetuar novo carregamento à ME2. Segundo a Tabela 3.1-2 a redução (%) de consumo esperada para uma viagem realizada com o ME2, quando comparado com o MC, é de 62,9%. As reduções de consumo obtidas na Tabela 3.3-5 estão de acordo com o valor apresentado anteriormente (Tabela 3.1-2), tendo os valores apresentados na Tabela 3.3-5 diferenças inferiores a 7,6% quando comparados com o apresentado na Tabela 3.1-2. Isto indica que, apesar de todas as estimativas que foram necessárias realizar nesta análise, os resultados obtidos continuam a ser coerentes.

Como seria expectável, se as viagens dos casos de estudo fossem realizadas com um motociclo elétrico, de potência semelhante ao ME2, iria obter-se um consumo cerca de 2,5 vezes inferior ao obtido com um motociclo convencional de potência semelhante. No entanto, não será possível concluir o percurso tão rapidamente como se consegue com um motociclo convencional, uma vez que concluir o percurso com o motociclo elétrico teria um acréscimo de 35,6% de tempo.

Para o percurso da Cidade Universitária o motociclo elétrico terá de ser carregada em ciclos de 5 viagens, e para o percurso do Saldanha os carregamentos ocorrerão em ciclos de 4 viagens, sendo contabilizada uma viagem quando o percurso é realizado nos dois sentidos.

3.3.2 Bicicletas

Tal com no caso dos motociclos os percursos realizados para os casos de estudo foram escolhidos de forma a cobrir possíveis percursos de partilha de bicicletas na cidade de Lisboa (34). Os dois primeiros são percursos de cariz turístico: o percurso designado por Castelo, que consiste numa viagem nos arredores do Castelo de São Jorge; e o percurso com a designação de Belém, que foi composto por uma viagem de ida e regresso entre a ponte 25 de Abril e a Torre de Belém. Os outros dois percursos são de cariz quotidiano: o designado por Saldanha representa a ligação entre dois pólos empresárias, o Rossio e o Saldanha; e, por fim, o percurso com a designação de Cidade Universitária que consiste num circuito de ligação entre dois pólos universitários, o Instituto Superior Técnico e a Faculdade de Ciências, com passagem pela Cidade Universitária, sendo que estes percursos foram realizados nos dois sentidos. Todas as viagens foram efetuadas com uma bicicleta convencional. Para cada percurso realizou-se a distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP, obtendo-se Figura 3.3-8, Figura 3.3-9, Figura 3.3-10 e Figura 3.3-11.

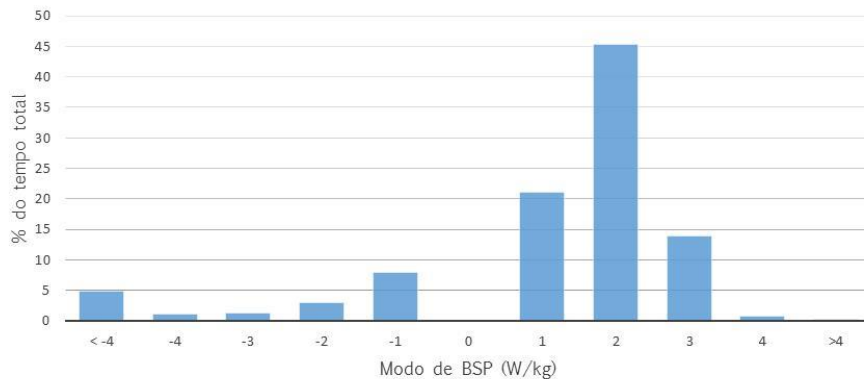


Figura 3.3-8 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Castelo

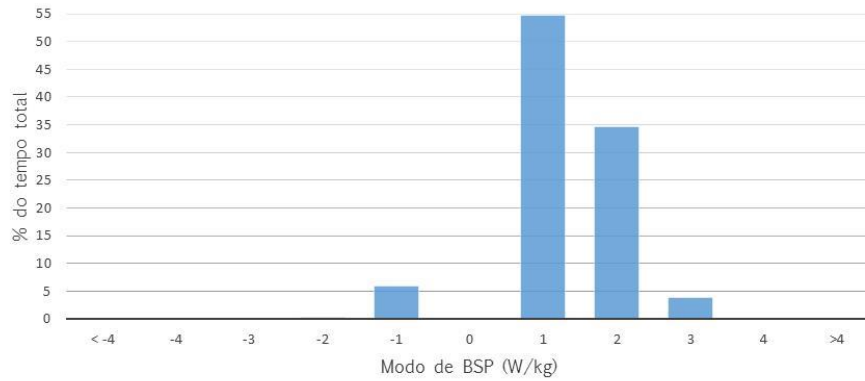


Figura 3.3-9 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Belém

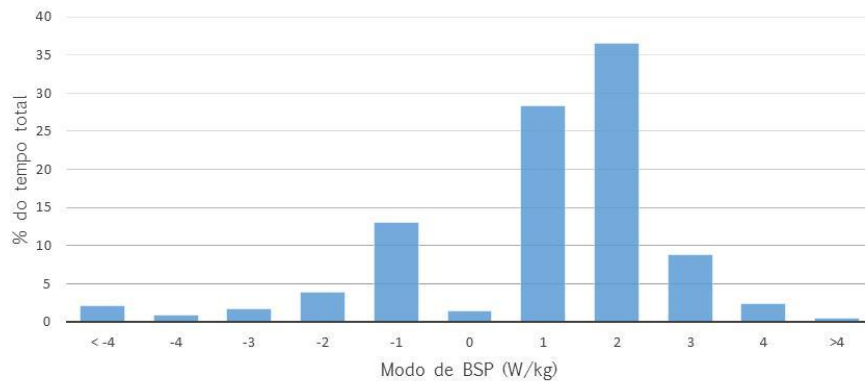


Figura 3.3-10 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso do Saldanha

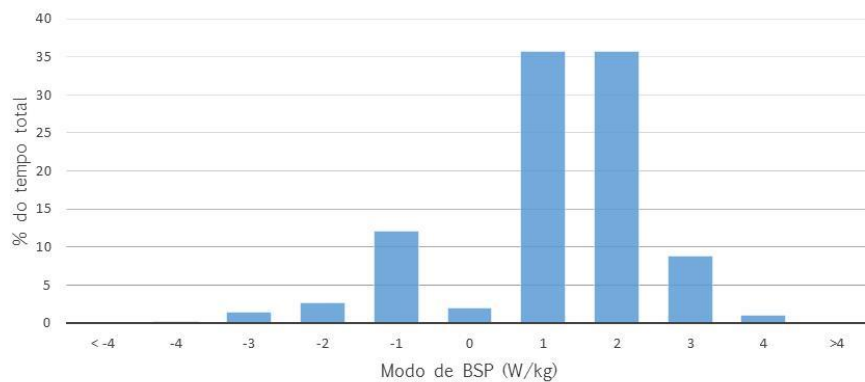


Figura 3.3-11 - Distribuição temporal (%) pelos diferentes modos de BSP percurso da Cidade Universitária

Na Tabela 3.3-6 estão resumidos os resultados estatísticos de cada viagem. As variáveis apresentadas na tabela foram obtidas da mesma forma que as apresentadas na Tabela 3.1-10, com a exceção do $\sum(\Delta HR)$ e do EE (Wh). Multiplicou-se a distribuição temporal (%) dos diferentes modos de BSP, de cada percurso, pela relação entre o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ e cada modo de BSP, para a BC (Figura 3.2-2).

Somaram-se os ΔHR de todos os modos de BSP de cada um dos percursos e obteve-se o $\sum(\Delta HR)$ para cada percurso, este valor está apresentado na Tabela 3.3-6. Multiplicou-se o perfil de EE (Wh/s) apresentado na Figura 3.2-4 para a BC, pela distribuição temporal de BSP de cada um dos percursos de estudo, ficando-se assim com o EE (Wh) em cada um dos modos de BSP. Somaram-se os EE (Wh) de todos os modos de BSP e obteve-se assim o EE (Wh) estimado para cada um dos percursos em estudo, conforme a Tabela 3.3-6.

Tabela 3.3-6 - Estatística de viagem para os percursos do caso de estudo realizados de BC

Percurso	Castelo	Belém	Saldanha	Cidade Universitária
Bicicleta	BC	BC	BC	BC
Distância percorrida (km)	4,06	8,02	4,74	6,36
Declive médio positivo (rad)	0,049	0,007	0,039	0,010
Declive médio negativo (rad)	-0,051	-0,006	-0,025	-0,009
Tempo para a realização do percurso (segundos)	1214	1673	1403	1512
Velocidade média (km/h)	12,1	17,3	12,2	15,2
Velocidade máxima (km/h)	45,4	22,4	37,6	27,8
$\sum(\Delta HR)$	2,46	2,03	1,93	2,03
EE (Wh)	257,12	355,06	294,57	318,11

Com as distribuições temporais de BSP, presentes na Figura 3.3-8, Figura 3.3-9, Figura 3.3-10 e Figura 3.3-11, e com os resultados apresentados ao longo deste trabalho, procedeu-se à realização de uma análise semelhante à efetuada para os motociclos, onde se ajustou o perfil BSP das monitorizações efetuadas com BC para uma estimativa de um perfil correspondente a uma BE. Como se pode observar na Figura 3.1-12 e na Figura 3.1-15, as distribuições temporais (%) pelos diferentes modos de BSP são diferentes para estes dois tipos de bicicletas, logo nestes quatro percursos de estudo as distribuições temporais (%) pelos diferentes modos de BSP também deverão ser diferentes para as duas bicicletas.

Atendendo ao referido no parágrafo anterior, a análise realizada consistiu em estimar, a partir das distribuições temporais de BSP da bicicleta convencional, em cada um dos percursos em estudo quais seriam as distribuições temporais se os percursos fossem realizados de bicicleta elétrica.

De forma a efetuar essa estimativa, utilizaram-se as distribuições temporal de BSP presentes na Figura 3.1-12 para a bicicleta convencional e a da Figura 3.1-15 para a bicicleta elétrica para estimar as diferenças temporais (%) entre os respetivos modos de BSP, na Tabela 3.3-7 estão representadas essas diferenças entre cada modo de BSP.

Tabela 3.3-7 - Diferença entre a distribuição temporal de BSP da BC e da BE

Modo de BSP	< -4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	>4
% de tempo_BC	1,59	0,98	1,80	4,41	15,40	5,73	30,83	27,33	9,66	1,65	0,61
% de tempo_BE	1,47	1,34	2,48	4,19	14,44	8,85	24,39	16,48	14,72	8,04	3,59
Diferença	-0,12	0,37	0,68	-0,22	-0,96	3,12	-6,44	-10,85	5,06	6,39	2,98

Utilizando as distribuições temporais de BSP da Figura 3.3-8, Figura 3.3-9, Figura 3.3-10 e Figura 3.3-11 em conjunto com as diferenças presentes na Tabela 3.3-7 estimaram-se as distribuições temporais de BSP para a BE nos percursos em estudo, sendo que estas são apresentadas na Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15. Nestas figuras são também apresentadas as distribuições originais obtidas com a BC.

Na obtenção destas estimativas foi necessário ter em atenção que nenhum dos modos poderia ter uma percentagem de tempo negativa, visto isto ser uma impossibilidade física, e que as percentagens da totalidade dos modos deveriam somar 100%. Para não existirem modos com percentagem de tempo negativo, situação que apenas ocorreu no percurso de Belém, realizou-se uma correção no modo <-4 deste percurso, onde se assumiu o valor zero para esse modo e se fez uma correção no modo -4 de forma a obter os 100% de tempo na totalidade dos modos.

Na Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15 observa-se que para os modos de BSP negativos os perfis para a bicicleta elétrica e para a bicicleta convencional são muito semelhantes. As percentagens de tempo nos modos 1 e 2 para a bicicleta elétrica são inferiores as da bicicleta convencional. No entanto, as percentagens de tempo nos modo 3, 4 e >4 são mais elevados na bicicleta elétrica, ou seja, os modos de potência mais elevada são atingidos um maior número de vezes na bicicleta elétrica.

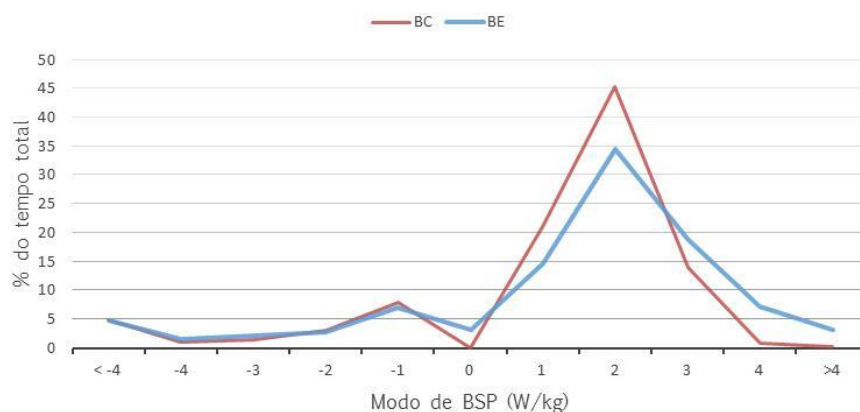


Figura 3.3-12 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso do Castelo

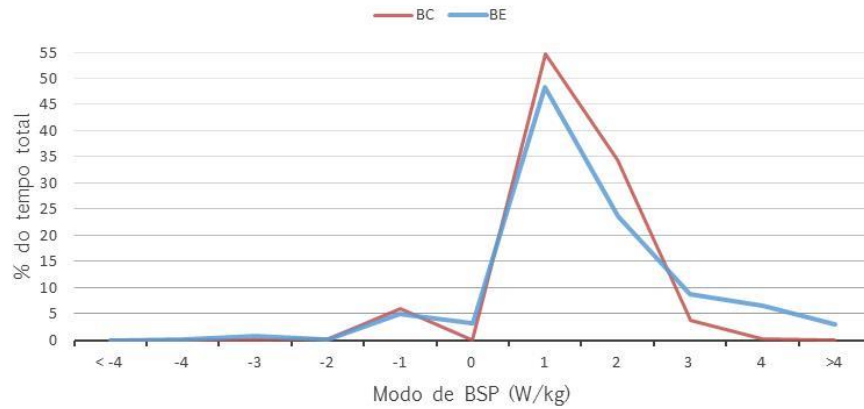


Figura 3.3-13 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso de Belém

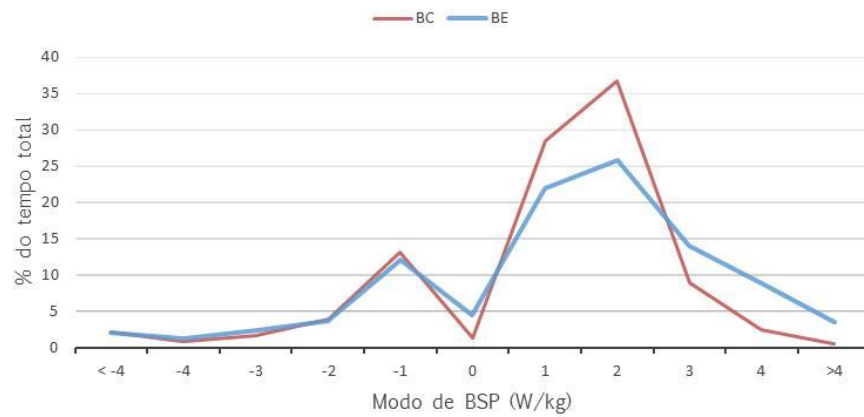


Figura 3.3-14 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso do Saldanha

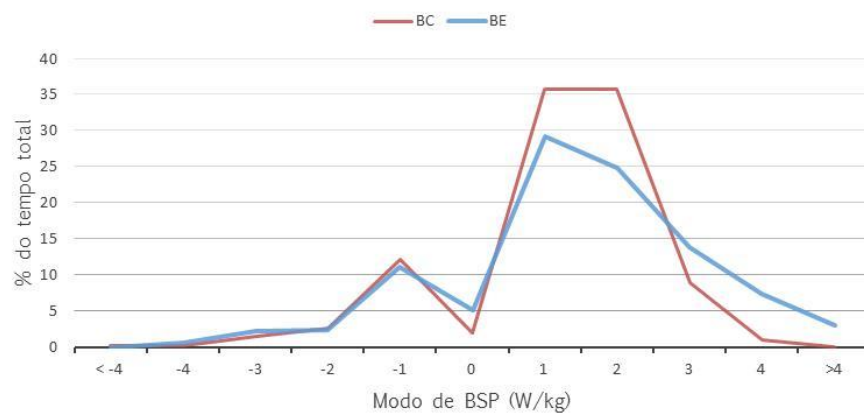


Figura 3.3-15 - Estimativa da distribuição temporal de BSP para a BE no percurso da Cidade Universitária

Utilizaram-se os dados recolhidos em todas as monitorizações das bicicletas elétricas e da bicicleta convencional para comparar o tempo que se demorou a concluir um percurso realizado de

bicicleta elétrica com o tempo que se demorou a realizar o mesmo percurso com uma bicicleta convencional. Conclui-se que com uma bicicleta elétrica a redução de tempo é de cerca 9,5% (Tabela 3.1-11). Através deste resultado estimou-se o tempo que seria necessário para realizar cada um dos percursos em estudo com a bicicleta elétrica.

Na Tabela 3.3-8 são apresentados os resultados para o caso dos percursos em estudo serem realizados com uma bicicleta elétrica e com distribuição temporal de BSP diferente da obtida na bicicleta convencional. A velocidade média apresentada nesta tabela foi determinada através da estimativa do tempo apresentada nos parágrafos anteriores.

Nesta secção conjugou-se os dados da BE1 e da BE2 numa BE e utilizou-se o perfil de consumo presente na Figura 3.1-19. O consumo de energia elétrica foi obtido utilizando o perfil de consumo da Figura 3.1-19, e os perfis de BSP estimados para cada percurso (Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15). O ΔHR médio foi obtido multiplicando a relação entre o $\left(\frac{\Delta HR}{\Delta t}\right)$ e o BSP para a bicicleta elétrica (Figura 3.2-2), pelo o perfil de BSP estimados para cada percurso (Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15).

Tabela 3.3-8 - Estimativa da estatística de viagem para os casos de estudo com a BE

Percurso	Castelo	Belém	Saldanha	Cidade Universitária
Bicicleta	BE	BE	BE	BE
Tempo estimado (segundos)	1099	1514	1270	1368
Velocidade média estimada (km/h)	13,3	19,1	13,4	16,7
Capacidade da bateria (Wh)	360	360	360	360
Energia elétrica consumida (Wh)	46,68	54,79	49,12	51,69
EE (Wh)	183,51	256,88	214,33	230,91
Total de energia consumida (Wh)	230,19	311,67	263,45	282,59
Redução no total de energia (%) em relação a BC	10,47	12,22	10,56	11,16
Distância percorrida (km)	4,06	8,02	4,74	6,36
Autonomia (km)	31,3	52,7	34,7	44,3
Autonomia (nº de viagens)	7	6	7	6
$\Sigma(\Delta HR)$	1,10	1,28	0,94	1,05
Redução no ΔHR (%) em relação a BC	55,16	37,00	51,45	48,59

O valor de EE foi obtido multiplicando os perfil de EE (Wh/s) apresentado na Figura 3.2-4 para a BE, pela distribuição temporal de BSP estimados para cada percurso (Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15), ficando-se assim, em cada um dos percursos de estudo, com o EE (Wh) total em cada um dos modos de BSP. Somando os EE (Wh) de todos os modos de BSP obtém-se assim o EE (Wh) estimado para cada um dos percursos em estudo, sumarizados na Tabela 3.3-8.

Para o percurso da Cidade Universitária e de Belém, a bicicleta elétrica terá de ser carregada em ciclos de 6 viagens, nos percursos do Saldanha e do Castelo os carregamentos ocorrerão em ciclos de 7

viagens, sendo contabilizada uma viagem quando o percurso é realizado nos dois sentidos, com a exceção do percurso do Castelo onde o circuito é giratório.

Como seria expectável, no caso das viagens dos casos de estudo serem realizadas com uma bicicleta elétrica, iria obter-se em média uma redução de 48% no $\Sigma(\Delta HR)$ quando comparado com o valor médio obtido para a bicicleta convencional. Também existe a vantagem de se conseguir concluir o percurso em menos tempo, cerca de menos 9,5% do tempo obtido com uma bicicleta convencional.

No entanto, a bicicleta elétrica tem a desvantagem de ter um consumo elétrico associado, o que não se verifica na bicicleta convencional, embora o consumo total de energia associado a bicicleta elétrica (EE (Wh) mais consumo de energia elétrica) seja menor que o consumo de EE associado a bicicleta convencional, como se pode observar na Tabela 3.3-8. Em média a redução no total de energia consumida em relação a bicicleta convencional é de 11,1%.

Tabela 3.3-9 - Resumo dos resultados para os casos de estudo

Percurso	Saldanha			Cidade Universitária			Castelo	Belém
	ME2	ME3	BE	ME2	ME3	BE	BE	BE
Tempo (%) de viagem em relação a MC/BC	35,6	2,8	-9,5	35,6	-38,9	-9,5	-9,5	-9,5
Consumo de energia (%) em relação a MC/BC	-58,8	-13,7	-10,6	-58,1	9,3	-11,2	-10,5	-12,2
Redução no ΔHR (%) em relação a BC	---	---	-51,5	---	---	-48,6	-55,2	-37,0
Autonomia (nº de viagens)	4	4	7	5	3	6	7	6

Na análise efetuada nesta secção observa-se que com a utilização de uma BE existe sempre uma redução no ritmo cardíaco, bem como uma redução no consumo total de energia e no tempo de viagem, quando comparado com a BC (Tabela 3.3-9). Observa-se que, no geral, a utilização de um motociclo elétrico leva a uma redução no consumo de energia e um aumento no tempo de viagem, quando comparado com o MC (Tabela 3.3-9).

4 Conclusões e Indicações para um trabalho futuro

4.1 Conclusões

Num contexto em que o sector dos transportes apresenta uma elevada dependência energética, a promoção de modos de transporte alternativos é essencial. Desta forma, as bicicletas e os motociclos são uma alternativa de mobilidade para ambientes urbanos, os quais permitem que as pessoas percorram elevadas distâncias, com maior velocidade e com menor esforço do que conseguiriam realizar a pé, e com baixos impactos. O uso de bicicletas e de motociclos elétricos tem surgido como uma possibilidade de transporte mais eficiente. Uma das principais aplicações das bicicletas e de motociclos elétricos é em sistemas de partilha destes veículos em circuito urbano, como tal o principal objetivo deste trabalho é analisar possíveis percursos de partilha de bicicletas e de motociclos na cidade de Lisboa, quantificando a energia despendida, tempos de realização dos percursos, perfil de condução e, no caso da bicicleta, estimar o esforço humano.

De forma a atingir o objetivo principal deste trabalho foram monitorizados um motociclo convencional e dois motociclos elétricos em condições reais de utilização, sendo a recolha de dados de dinâmica e, quando aplicável, de consumo elétrico, efetuada ao longo de cerca de 100 km. Com os dados recolhidos foi desenvolvida uma metodologia para quantificar a potência necessária a cada segundo de um ciclo de condução, sendo esta metodologia denominada por MSP. Esta fornece uma estimativa da potência por unidade de massa requerida a cada instante de uma viagem por um motociclo em estrada, com base na dinâmica (velocidade e aceleração), topografia da estrada e resistência aerodinâmica e de rolamento associadas.

Na distribuição genérica de MSP observa-se que modos positivos - representam as situações onde é exigida potência ao motor - correspondem a 65% do tempo total de monitorização. Cerca de 45% do tempo de condução é despendido nos modos 2, 4 e 6 o que corresponde a uma potência inferior a 1300 W. Aproximadamente 5% do tempo de viagem é em modo 0, o que coincide com situações em que o motociclo está parado. Aproximadamente 30% do tempo é despendido em modos de MSP negativos, o que indica que se está numa situação de travagem ou de desaceleração. Analisando a distribuição de MSP dos três motociclos, observa-se que nos modos negativos estes têm um perfil semelhante. Também é possível observar que o modo 2 é claramente o modo com maior percentagem de tempo total para os três motociclos. Em média, um percurso realizado com o ME1 irá demorar mais 28,8% do tempo a ser concluído do que se fosse realizado com o MC. Apesar disso, possibilita uma redução de 74,5% na energia consumida comparativamente à utilização do MC. Uma viagem feita com o ME2 leva mais 35,6% do tempo para ser concluída do que se fosse feita com um MC, mas conduz a uma redução de 62,9% na energia consumida na sua utilização. A aplicação da metodologia MSP na estimativa de consumos originou erros inferiores a: 10,6% para o ME1; 0,6% para o ME2; e 9,6% para o MC. Neste trabalho conclui-se que o ME1 tem uma eficiência que varia entre 43,2% e 82,7%, enquanto a eficiência do ME2 oscila entre 42,7% e 86,8%. Em oposição a estes valores está a eficiência do MC, tendo uma eficiência mínima de 19,1% e máxima de 26,1%.

Novamente de modo a alcançar o objetivo principal deste trabalho, também foram monitorizadas, em condições reais de utilização, duas bicicletas elétricas e uma convencional. A recolha de dados foi efetuada por seis ciclistas, que utilizaram a bicicleta elétrica bem como a convencional, sendo que no total foram percorridos cerca de 110 km. Tal como nos motociclos, com os dados recolhidos foi desenvolvida uma metodologia para quantificar a potência necessária de forma a superar um ciclo de condução, denominada BSP. Tal como no caso do MSP, este método tem em consideração a resistência aerodinâmica e de rolamento bem como a topografia da estrada e, combinando estes fatores com a velocidade e aceleração, é possível estimar a potência por unidade de massa necessária a cada instante de uma viagem.

Os modos de BSP positivos, na bicicleta convencional, representam os modos nos quais é apenas exigido esforço humano e, no caso da bicicleta eléctrica, requerem tanto esforço humano como potência do motor. Estes modos correspondem a 68,5% do tempo total. Cerca de 48% do tempo de condução é despendido nos modos 1 e 2 o que corresponde a uma potência inferior a 160 W. Aproximadamente 7,5% do tempo de viagem é em modo 0, o que coincide com situações onde o ciclista está parado. Aproximadamente 24% do tempo é despendido em modos de BSP negativos, o que indica que se está numa situação de travagem ou de desaceleração. Comparando a distribuição de BSP da bicicleta convencional com o da eléctrica, é possível verificar que com a bicicleta eléctrica atingem-se modos de BSP mais elevados, ou seja, potências mais elevadas. Analisando a distribuição de BSP da BE e das BC observa-se facilmente que o perfil temporal para modos de BSP negativos é muito semelhante para as duas bicicletas, sendo que em relação ao modo 0 também não existem diferenças consideráveis. A grande diferença reside nos modos de BSP positivos, onde na BC existe uma predominância clara do modo 1 e 2 (potências inferiores a 160 W) e uma representação muito fraca para os modos 4 e >4. Além disso, na BE a distribuição é mais uniforme, sendo os modos 1, 2 e 3 os que possuem maior representatividade temporal (potências inferiores a 235 W), ainda assim os modos 4 e >4 conseguem ter uma representação significativa. Este aumento na percentagem de tempo em modos associados a potências mais elevadas, para a BE, só é possível devido ao auxílio do motor eléctrico.

Em média, um percurso realizado com a BE irá demorar menos 9,5% do tempo a ser concluído do que se fosse realizado com a BC. Verifica-se que para declives positivos a velocidade média da BC é 37,2% inferior à da BE, para declives nulos a velocidade média da BC é apenas 15,7% inferior à da BE e para declives negativos a diferença de velocidades médias é muito pequena, sendo a velocidade média da BC apenas 2,3% inferior à da BE. A aplicação da metodologia BSP na estimativa de consumo eléctrico conduz a erros médios de 6,6% para a BE.

Na análise das bicicletas eléctricas e convencional foi ainda estudada a influência que estas têm na frequência cardíaca. Concluiu-se que quando se está a utilizar uma bicicleta eléctrica, numa viagem típica, é esperada uma redução de 56,9% na variação do HR. Esta redução acontece porque nos modos de BSP positivos, onde é exigida potência, o motor eléctrico auxilia o ciclista. Foi também desenvolvida uma metodologia, baseada no HR, para quantificar a energia despendida pelo ciclista, denominada por EE. Os

resultados mostram que o valor de EE para uma bicicleta convencional é aproximadamente de 69,8 Wh/km e que para a bicicleta elétrica é aproximadamente de 50,6 Wh/km (27,5% inferior ao da bicicleta convencional). À bicicleta elétrica ainda está associado um consumo elétrico de 9,2 Wh/km, somando este valor com o de EE, resulta um valor total de energia consumida de 59,8 Wh/km. Assim, o total de energia consumida por quilómetro pela bicicleta elétrica é 14,3% inferior ao valor de energia associado à bicicleta convencional.

A aplicação das metodologias desenvolvidas e a monitorização de potenciais circuitos de partilha de bicicletas e motociclos com veículos convencionais (pois são os veículos mais comuns de se obter no mercado), possibilitou a extrapolação dos resultados para as tecnologias elétricas, permitindo assim atingir os objetivos principais deste trabalho.

No caso dos motociclos, verifica-se que no circuito do Saldanha o ME3 tem autonomia para realizar 4 vezes o circuito, consumindo menos 13,7% energia por quilómetro e demorando mais 2,8% do tempo que o MC. No que diz respeito ao circuito da Cidade Universitária, o ME3 tem autonomia para realizar 3 vezes o circuito, consumindo mais 9,3% energia por quilómetro e demorando menos 38,9% do tempo que o MC. Utilizando os dados recolhidos com o MC nos dois percursos específicos, estudou-se a possibilidade de estes serem realizados pelo ME2. Conclui-se que com o ME2 há um acréscimo de tempo de cerca 35,6%. Verifica-se que no circuito do Saldanha o ME2 tem autonomia para realizar 4 vezes o circuito, consumindo menos 58,8% energia por quilómetro que o MC. No que diz respeito ao circuito da Cidade Universitária, o ME2 tem autonomia para realizar 5 vezes o circuito, consumindo menos 58,1% energia por quilómetro que o MC. Como seria expectável, se as viagens dos casos de estudo fossem realizadas com um motociclo elétrico, de potência semelhante ao ME2, iria obter-se um consumo cerca de 2,5 vezes inferior ao obtido com um motociclo convencional de potência semelhante. No entanto, não será possível concluir o percurso tão rapidamente como se consegue com um motociclo convencional, uma vez que concluir o percurso com o motociclo elétrico teria um acréscimo de 35,6% de tempo.

Utilizando os dados recolhidos com a BC, em percursos específicos, estudou-se a possibilidade destes serem realizados com uma BE. Conclui-se que um percurso realizado com a BE tem um decréscimo de tempo de cerca de 9,5%. Nesta análise verifica-se que para o percurso da Cidade Universitária e de Belém, a BE terá de ser carregada em ciclos de 6 viagens enquanto nos percursos do Saldanha e do Castelo os carregamentos ocorrerão em ciclos de 7 viagens. Em média a redução no total de energia consumida na bicicleta elétrica (energia elétrica mais EE) em relação a bicicleta convencional é de 11,1%. Como seria expectável, no caso das viagens dos casos de estudo serem realizadas com uma BE, iria obter-se em média uma redução de 48,1% no $\sum(\Delta HR)$ quando comparado com o valor médio obtido para a BC.

Desta forma, a realização deste trabalho permitiu o desenvolvimento de metodologias inovadoras de análise de dinâmica, consumo de energia e dados fisiológicos aplicados a bicicletas e motociclos convencionais e elétricos, com interesse ao nível da quantificação de impactos deste tipo de meios de

transporte em ambiente urbano, nomeadamente em possíveis aplicações em sistemas de partilha de bicicletas e motociclos.

4.2 Indicações para um trabalho futuro

Para desenvolvimentos futuros, existem vários aspetos que poderão enriquecer e completar este trabalho. Um aspeto importante a desenvolver no futuro prende-se com a monitorização de motociclos com potências mais elevadas, a fim de verificar que influência estes terão na distribuição dos modos de MSP, ou se seria necessário aumentar o número de modos a considerar e a respetiva gama de MSP que origina cada modo.

A monitorização de mais tipos de bicicletas e motociclos também seria uma mais-valia, pois permitiria solidificar os resultados aqui presentes, através de mais representatividade em todos os modos de MSP e de BSP considerados.

Seria também enriquecedor analisar sistemas de adaptação de bicicletas convencionais a elétricas e realizar a comparação com bicicletas puramente elétricas de origem e com as convencionais.

A utilização de um sensor dedicado (na roda) para medir a velocidade, para complementar os valores de velocidade obtidos através do GPS, deverá ser o próximo passo no desenvolvimento do laboratório utilizado.

Além disso, a análise mais profunda dos sinais fisiológicos, nas monitorizações das bicicletas, nomeadamente na estimativa da energia humana deverá ser efetuada. Por sua vez, o estudo da utilização em conjunto da frequência cardíaca com a frequência respiratória para a obtenção da estimativa da energia humana deverá ser efetivado. Poderá ser tentada a implementação de outros modos de monitorização que permitam estimar com mais rigor a energia despendida.

Por fim, de modo a complementar este trabalho poderá ser realizado um estudo de análise do ciclo de vida das bicicletas e motociclos convencionais e elétricos. Bem como a análise do ciclo de vida da energia elétrica consumida, da gasolina consumida e da alimentação do ciclista.

5 Referências bibliográficas

1. **EUROSTAT.** *Energy balance sheets 2010-2011.* Luxemburgo : European Union, 2013.
2. **European Commission .** *EU Transport in figures - Statistical pocketbook .* Luxemburgo : European Union, 2012.
3. **International Energy Agency.** *Energy Technology Perspectives, Scenarios and Strategies to 2050.* França : OECD/IEA, 2010.
4. **Pina, A.; Ioakimidis, C.; Ferrão P.** *Introduction of electric vehicles in an island as a driver to increase renewable energy penetration.* Singapura : IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies 2008, 2008.
5. **Baptista, P.; Silva, C.; Farias, T.** *Energy and environmental impacts of alternative pathways for the Portuguese road transportation sector.* s.l. : Journal of Energy Policy, 51, pp. 802-815, 2012.
6. **Wang, R.** *Autos, transit and bicycles: Comparing the costs in large Chinese cities.* s.l. : Transport Policy, 18, pp. 139-146, 2011.
7. **Shaheen, A.; Cohen, P.** *Worldwide Carsharing Growth: An International Comparison.* s.l. : Institute of Transportation Studies (UCD), UC Davis, 2008.
8. **Steenhof, A.; McInnis C.** *A comparison of alternative technologies to decarbonize Canada's passenger transportation sector.* s.l. : Technological Forecasting and Social Change 75 (8), pp 1260–1278, 2008.
9. **Egbue, O.; Long, S.** *Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer.* s.l. : Energy Policy 48, pp 717–729, 2012.
10. **Sovacool, K.; Hirsh, F.** *Beyond batteries: an examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition.* s.l. : Energy Policy 37 (3), pp 1095-1103, 2009.
11. *Mobi.e Mobilidade Eléctrica.* [Online] [Citação: 03 de 07 de 2013.] <http://www.mobie.pt/o-carregamento>.
12. **Brown, S.; Pyke, D.; Steenhof, P.** *Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market.* s.l. : Energy Policy 38, pp 3797–3806, 2010.
13. **Morgan, J.** *JP Morgan Article.* s.l. : Automotive News, 2009.
14. **Lozano, J.; Montero, M.; Martínez, M.; Cadaval, E.** *Electric vehicle battery charger for smart grids.* s.l. : Electric Power Systems Research 90. pp 18– 29, 2012.
15. **Liu, T.; Lin, M.; Pan, S.** *Design and development of a zero-emission scooter for Taiwan.* s.l. : Journal of Power Sources 59, pp 185–187, 1996.
16. **Colella, G.** *Market prospects, design features, and performance of a fuel cell-powered scooter.* s.l. : Journal of Power Sources 86, pp 255–260, 2000.
17. **Tso, C.; Chang, Y.** *A viable niche market-fuel cell scooters in Taiwan.* s.l. : International Journal of Hydrogen Energy 28, pp 757–762, 2003.

18. **Choua, J.; Hsiao, S.** *An anthropometric measurement for developing an electric scooter.* s.l. : International Journal of Industrial Ergonomics 35, pp 1047–1063, 2005.
19. **Yang, Y.; Liu, J.; Hu, T.** *An energy management system for a directly-driven electric scooter.* s.l. : Energy Conversion and Management 52, pp 621-629, 2011.
20. **Ulrich, K.** *Estimating the technology frontier for personal electric vehicles.* s.l. : Transportation Research Part C 13, pp 448–462, 2005.
21. **Parker, A.** *Green products to help move the world beyond oil: power assisted bicycles.* s.l. : Proceedings of Solar 99, 37th Annual Conference of the Australia and New Zealand Solar Energy Society, Deakin University, Geelong, 1999.
22. **Rose, G.** *E-bikes and urban transportation: emerging issues and unresolved questions.* s.l. : Transportation 39, pp 81–96, 2012.
23. **ECOCRITÉRIO.** [Online] [Citação: 27 de Junho de 2013.] http://www.ecocriterio.pt/Catalogo_bicicletas.pdf.
24. **Prio.e - become electric!** [Online] [Citação: 27 de Junho de 2013.] <http://www.prio.e.com/pt/produtos/italjet>.
25. **Sport Zone.** [Online] [Citação: 27 de Junho de 2013.] <http://www.sportzone.pt/ProductList.aspx?oid=5|25&c=205&l=0>.
26. **Baptista, P.** *Chapter 11: On-road monitoring of electric bicycles and its use in bike-sharing systems, Grid Electrified Vehicles: Performance, Design, and Environmental Impacts.* s.l. : Nova Science Publishers, 2013.
27. **Lindsay, G.; Macmillan, A.; Woodward, A.** *Moving urban trips from cars to bicycles: impact on health and emissions.* s.l. : Australian and New Zealand Journal of Public Health, 35, 2011.
28. **Buehler, R.; Pucher, J.** *Walking and Cycling in Western Europe and the United States - Trends, Policies, and Lessons.* s.l. : TR News May-June 2012: Transportation: Implementing the Benefits, 2012.
29. **Gardner, G.** *Power to the Pedals.* s.l. : World Watch Magazine, 23 (4), 2010.
30. **Baptista, P; Duarte, G; Mendes, M; Rolim, C; Farias, T.** *Scenarios for electric bicycle use: from on-road monitoring to possible impacts of large introduction.* São Miguel Island, Azores (Portugal) : NECTAR Conference on Dynamics of Global and Local Networks, 2013.
31. **Barclays Cycle Hire.** *Barclays Cycle Hire - Bikesharing in London.* 2012.
32. **Lathia, N.; Ahmed, S.; Capra, L.** *Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users.* s.l. : Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 22, pp. 88-102.
33. **Dill, J.; Rose, G.** *E-bikes and Transportation Policy: Insights from Early Adopters.* s.l. : 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2012.
34. **Galp Energia .** *Ciclovias e percursos pedonais.* 2012.

35. **Martinez, L.; Caetano, L.; Eiró, T.; Cruz, F.** *An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon.* Paris : 15th Edition of the Euro Working Group on Transportation, 2012.
36. **Callabike .** *Callabike bike sharing system.* 2012.
37. **The Bike-sharing Blog.** *Japanese Bike-share is Electric.* 2011.
38. **Cap'Vélo.** *Se déplacer à vélo en Grand Poitiers - Bikesharing scheme in Saint-Etienne.* 2012.
39. **VéliVert .** *VéliVert - Bikesharing scheme in Saint-Etienne.* 2012.
40. **Weinert, J.; Burke, A.; Wei, X.** *Lead-acid and lithium-ion batteries for the Chinese electric bike market and implications on future technology advancement.* s.l. : Journal of Power Sources 172, pp 938–945, 2007.
41. **Cherry, C.; Cervero, R.** *Use characteristics and mode choice behavior of electric bike users in China.* s.l. : Transport Policy, 14, pp 247-257, 2007.
42. **Wanga, D.; Feng, T.; Liang, C.** *Research on bicycle conversion factors.* s.l. : Transportation Research Part A 42, pp 1129–1139, 2008.
43. **Bai, L.; Liu, P.; Chen, Y.; Zhang, X.; Wang, W.** *Comparative analysis of the safety effects of electric bikes at signalized intersections.* s.l. : Transportation Research Part D 20, pp 48–54, 2013.
44. **Vogela, P.; Greisera, T.; Mattfelda, D.** *Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns.* s.l. : Procedia Social and Behavioral Sciences 20, pp 514–523, 2011.
45. **Palomares, J.; Gutiérrez, J.; Latorre, M.** *Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach.* s.l. : Applied Geography 35, pp 235-246, 2012.
46. **Baptista, P.; Pina, A.; Duarte, G.; Rolim, C.; Pereira, G.; Silva, C.; Farias, T.** *On road evaluation of electric and conventional bicycles for.* s.l. : Transport Policy, 2013.
47. **Parkin, J.; Rotheram, J.** *Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for usein.* 2010. p. 7.
48. **Shan, G.** *Biomechanical evaluation of bike power saver.* s.l. : Applied Ergonomics 39, pp 37–45, 2008.
49. **Cho, C.; Yun, M.; Yoon, C.; Lee, M.** *An ergonomic study on the optimal gear ratio for a multi-speed bicycle.* s.l. : International Journal of Industrial Ergonomics, pp 95-100, 1999.
50. **Parkin J.** *The importance of human effort in planning networks.* s.l. : NECTAR Workshop Abstract.
51. **Bishopa, J.; Doucetteb, R.; Robinsonc, D.; Millsc, B.; McCullochb, M.** *Investigating the technical, economic and environmental performance of electric vehicles in the real-world: A case study using electric scooters.* s.l. : Journal of Power Sources 196, pp 10094–10104, 2011.
52. **Cherry, C.; Weinert, J.; Xinmiao, Y.** *Comparative environmental impacts of electric bikes in China.* s.l. : Transportation Research Part D, 14, pp. 281–290, 2009.
53. **Gastinger, S.; Sorel, A.; Nicolas, G.; Gratas-Delamarche, A.; Prioux, J.** *A comparison between ventilation and heart rate as indicator of oxygen uptake during different intensities of exercise.* s.l. : Journal of Sports Science and Medicine, pp 110-118, 2010.

54. **Yu, Z.; Völgyi, E.; Wang, R.; Ember, A.; Wiklund, P.; Alén M.; Tylavsky, F.; Cheng, S.** *Comparison of heart rate monitoring with indirect calorimetry for energy expenditure evaluation.* s.l. : Journal of Sport and Health Science, pp 178-183, 2012.
55. **Pulkkinen, A.; Saalasti, S.; Rusko, H.** *Energy expenditure can be accurately estimated from HR without individual laboratory calibration.* Nashville, Tennessee , USA : 52nd Annual Meeting of the American College of Sports Medicine, 2005.
56. **Gastinger, S; Nicolas, G; Sorel, A; Sefati, H; Prioux, J.** *Energy Expenditure Estimate by Heart-Rate Monitor and a Portable Electromagnetic-Coil System.* s.l. : International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, pp 117 -130, 2012.
57. **Ainslie, P; Reilly, T; Westerterp, K.** *Estimating Human Energy Expenditure, A Review of Techniques with Particular Reference to Doubly Labelled Water.* s.l. : Sports Med, pp 683-698, 2003.
58. **Keytel, L; Goedeck, J; Noakes, T; Hiiloskorpi, H; Laukkanen, R; Van Der Merwe, L; Lambert, E.** *Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise.* s.l. : Journal of Sports Sciences, pp 289 – 297, 2005.
59. *House Of Batteries.* [Online] 04 de Abril de 2013. <http://www.houseofbatteries.com/standard-batteries-c-66-l-en.html>.
60. **Wipke, K.; Cuddy, M.; Burch, S.** *ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach.* s.l. : NREL, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
61. **Sharer, P.** *Powertrain Systems Analysis Toolkit (PSAT).* s.l. : Argonne National Laboratory, 2007.
62. Engineering Tools for Designing and Modeling the Built Environment. *Big Ladder Softwar.* [Online] [Citação: 14 de 08 de 2013.] http://bigladdersoftware.com/advisor/docs/advisor_ch3_4.html.
63. **Senger, R.; Merkle, M.; Nelson D.** *Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle.* s.l. : SAE International (Society of Automotive Engineers) , 1998.
64. **Brooker, A.; Haraldsson, K.; Hendricks, T.; Johnson, V.; Kelly, K.; Kramer, B.; Markel, T.; O’Keefe, M.; Sprik, S.; Wipke, K.; Zolot, M.** *ADVISOR Documentation. Big ladder software.* [Online] NREL, National Renewable Energy Laboratory. [Citação: 11 de 06 de 2013.] http://bigladdersoftware.com/advisor/docs/advisor_doc.html.
65. **Plotkin, S.; Santini, D.; Vyas, A.; Anderson, J.; Wang, M.; He, J.** *Hybrid Electric Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results.* s.l. : ANL, Argonne National Laboratory , 2001.
66. **Wipke, K.; Cuddy, M.; Bharathan, D.; Burch, S.; Johnson, V.; Markel, A.; Sprik, S.** *Advisor 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis.* s.l. : NREL, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
67. **Koupal, J.; Hart, C.; Brzezinski, D.; Giannelli, R.; Bailey, C.** *Draft Emission Analysis Plan for MOVES GHG.* s.l. : U.S. Environmental Protection Agency, 2002.

68. **Palacios, J.** *Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing*. s.l. : Massachusetts Institute of Technology, 1999.
69. **Duarte, G.; Gonçalves, G.; Farias, T.** *Vehicle monitoring for driver training in bus companies – Application in two case studies in Portugal*. s.l. : Transportation Research Part D: Transport and Environment, pp 103-109, 2013.
70. **Wilson, D.** *Bicycling Science*. Massachusetts : s.n., 2004.
71. **Special Eurobarometer.** *Health and food*. s.l. : European Commission, 2006.
72. **Lin, B.** *Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban Asia*. Princeton University : s.n., 1999.
73. **Cossalter, V.** *Motorcycle Dynamics*. 2006.
74. **Davis, J.; Danusis, A.** *Electric Scooter - Project Proposal*. 2008.
75. **Frey, H.; Unal, A.; Chen, J.; Li, S.** *Modelling Mobile Source Emissions Based Upon In-Use and Second-by-Second Data: Development of Conceptual Approaches for EPA's New MOVES Model*. 2003.
76. **NCSU - North Carolina State University.** *Methodology for Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System*. s.l. : Prepared by North Carolina State University for U. S. Environmental Protection Agency, 2002.
77. **Odvárka, E.; Mebarki, A.; Gerada, D.; Brown, N.; Ondrusek, C.** *ELECTRIC MOTOR-GENERATOR*. s.l. : Engineering MECHANICS, Vol. 16, pp 131-139, 2009.
78. **Lopes, J.** *Motores de combustão interna, uma abordagem termodinâmica*. s.l. : Secção de Folhas aeist, 2003.

Anexo A – Tabelas com os valores dos gráficos

Tabela A1 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.1-1, Figura 3.1-2, Figura 3.1-3, Figura 3.1-4, Figura 3.1-9, Figura 3.1-6 e Figura 3.1-8

Modos de MSP (W/kg)		< -10	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	>18
Geral	% do tempo total	1,83	1,14	1,89	3,23	5,68	16,67	5,04	24,48	11,42	9,47	5,53	4,00	2,46	2,07	1,59	1,27	2,25
MC	% do tempo total	2,69	1,53	2,08	3,34	5,67	17,73	0,34	26,07	7,53	6,82	5,36	5,57	3,86	3,51	2,73	2,13	3,05
ME1	% do tempo total	0,86	0,72	1,65	2,99	4,90	17,98	11,69	26,02	15,59	12,38	4,11	0,95	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
ME2	% do tempo total	1,42	0,89	1,83	3,35	6,78	12,64	5,47	19,00	13,62	10,90	7,89	5,04	2,75	1,98	1,45	1,25	3,74
MC	Energia consumida (Wh/s)	0,70±0,08	0,81±0,14	0,75±0,11	0,78±0,11	0,64±0,07	0,55±0,03	0,39±0,11	0,53±0,02	1,34±0,09	1,77±0,10	2,37±0,15	2,78±0,15	3,26±0,19	3,54±0,21	3,91±0,25	4,84±0,31	5,32±0,21
ME1	Energia consumida (Wh/s)	-0,70±0,04	0,00±0,05	0,03±0,05	0,08±0,03	0,12±0,03	0,11±0,01	0,03±0,01	0,21±0,01	0,42±0,02	0,52±0,01	0,59±0,02	0,59±0,05	0,65±0,06	---	---	---	---
ME2	Energia consumida (Wh/s)	-0,06±0,13	-0,12±0,10	-0,04±0,10	0,09±0,09	0,10±0,06	0,24±0,05	0,04±0,00	0,34±0,04	0,48±0,05	0,63±0,06	0,73±0,07	0,83±0,09	1,01±0,15	1,24±0,15	1,57±0,18	1,58±0,21	1,73±0,11

Tabela A2 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.3-4, Figura 3.3-5, Figura 3.3-2, Figura 3.3-3, Figura 3.3-6 e Figura 3.3-7

	Modos de MSP (W/kg)	< -10	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	>18
MC-Saldanha	% do tempo total	1,68	0,52	1,57	3,25	6,39	19,08	0,84	29,35	12,37	6,92	4,51	2,41	2,41	3,04	2,31	1,99	1,36
MC-Cidade Universitária	% do tempo total	0,18	0,18	1,08	1,71	7,19	16,64	1,26	33,90	10,79	10,25	8,18	3,60	1,53	1,26	0,99	0,45	0,81
ME3-Saldanha	% do tempo total	4,18	1,63	2,45	3,57	4,69	18,76	0,51	30,68	6,22	5,20	4,89	3,47	3,26	2,24	1,43	1,02	5,81
ME3-Cidade Universitária	% do tempo total	4,57	1,91	2,95	3,24	5,15	10,01	0,00	22,68	11,34	8,10	5,45	4,71	4,12	3,24	2,80	2,65	7,07
ME2-Saldanha	% do tempo total	0,41	0,00	1,21	3,27	7,50	13,99	5,98	22,28	18,46	10,99	7,03	1,88	1,30	1,51	1,02	1,12	2,05
ME2-Cidade Universitária	% do tempo total	0,00	0,00	0,37	0,64	8,30	11,55	6,40	26,83	16,88	14,33	10,71	3,07	0,42	0,00	0,00	0,00	0,51

Tabela A3 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.1-11, Figura 3.1-12, Figura 3.1-13, Figura 3.1-14, Figura 3.1-15, Figura 3.1-17, Figura 3.1-18 e Figura 3.1-19

	Modos de BSP (W/kg)	< -4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	>4
Geral	% do tempo total	1,52	1,18	2,18	4,29	14,87	7,46	27,26	21,31	12,47	5,19	2,27
BC	% do tempo total	1,59	0,98	1,80	4,41	15,40	5,73	30,83	27,33	9,66	1,65	0,61
BE1	% do tempo total	1,25	1,45	2,88	5,05	17,43	10,71	27,96	11,41	10,05	8,11	3,71
BE2	% do tempo total	1,96	1,10	1,56	2,22	7,60	4,60	16,21	28,12	25,43	7,88	3,32
BE	% do tempo total	1,47	1,34	2,48	4,19	14,44	8,85	24,39	16,48	14,72	8,04	3,59
BE1	Energia consumida (Wh/s)	0,004±0,000	0,005±0,001	0,007±0,001	0,009±0,001	0,009±0,001	0,005±0,000	0,015±0,001	0,039±0,002	0,073±0,002	0,083±0,002	0,087±0,002
BE2	Energia consumida (Wh/s)	0,013±0,005	0,011±0,005	0,024±0,009	0,022±0,006	0,019±0,003	0,004±0,001	0,046±0,003	0,054±0,002	0,062±0,002	0,077±0,003	0,095±0,005
BE	Energia consumida (Wh/s)	0,007±0,002	0,007±0,002	0,010±0,002	0,011±0,001	0,010±0,001	0,005±0,000	0,021±0,001	0,047±0,001	0,067±0,001	0,081±0,002	0,089±0,002

Tabela A4 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.2-1, Figura 3.2-2 e Figura 3.2-4

	Modos de BSP (W/kg)	< -4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	>4
Geral	($\Delta HR/\Delta t$)	-0,069±0,014	-0,051±0,020	-0,041±0,017	-0,053±0,016	-0,022±0,008	-0,029±0,012	0,005±0,004	0,036±0,005	0,053±0,007	0,079±0,010	0,060±0,015
BE	($\Delta HR/\Delta t$)	-0,055±0,018	-0,058±0,026	-0,050±0,026	-0,056±0,031	-0,019±0,014	-0,036±0,018	0,005±0,008	0,013±0,010	0,037±0,009	0,076±0,010	0,060±0,017
BC	($\Delta HR/\Delta t$)	-0,080±0,019	-0,041±0,030	-0,028±0,020	-0,051±0,013	-0,026±0,007	-0,019±0,013	0,006±0,005	0,046±0,006	0,072±0,010	0,093±0,024	0,063±0,033
BE	EE (Wh)	0,171±0,006	0,172±0,007	0,184±0,006	0,176±0,005	0,172±0,003	0,160±0,003	0,174±0,001	0,158±0,003	0,166±0,003	0,177±0,004	0,185±0,004
BC	EE (Wh)	0,207±0,008	0,196±0,008	0,197±0,007	0,198±0,004	0,194±0,002	0,194±0,003	0,211±0,001	0,218±0,002	0,212±0,002	0,206±0,005	0,216±0,009

Tabela A5 - Respetivamente em cada linha da tabela estão representados os valores associados aos gráficos presentes na Figura 3.3-8, Figura 3.3-9, Figura 3.3-10, Figura 3.3-11, Figura 3.3-12, Figura 3.3-13, Figura 3.3-14 e Figura 3.3-15

	Modos de BSP (W/kg)	< -4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	>4
BC-Castelo	% do tempo total	4,94	1,15	1,40	3,05	7,99	0,00	21,17	45,30	13,92	0,82	0,25
BC-Belém	% do tempo total	0,00	0,00	0,06	0,36	6,04	0,06	54,81	34,61	3,89	0,18	0,00
BC-Saldanha	% do tempo total	2,14	0,86	1,71	3,99	13,04	1,43	28,37	36,56	8,91	2,42	0,57
BC-Cidade Universitária	% do tempo total	0,13	0,20	1,52	2,65	12,10	2,05	35,71	35,71	8,86	0,99	0,07
BE-Castelo	% do tempo total	4,82	1,52	2,08	2,83	7,03	3,12	14,73	34,45	18,98	7,21	3,23
BE-Belém	% do tempo total	0,00	0,25	0,74	0,14	5,08	3,18	48,37	23,76	8,94	6,57	2,98
BE-Saldanha	% do tempo total	2,02	1,22	2,39	3,77	12,09	4,55	21,93	25,71	13,97	8,81	3,55
BE-Cidade Universitária	% do tempo total	0,01	0,57	2,20	2,43	11,15	5,17	29,27	24,86	13,92	7,38	3,05

Anexo B – Aplicações específicas da BE2

Devido às suas especificações técnicas, foi realizado um estudo mais aprofundado à BE2, em que se analisou a influência das mudanças mecânicas no consumo de energia elétrica, bem como as vantagens e desvantagens dos três modos de condução de que esta bicicleta dispunha. De seguida são descritos os três modos de utilização possíveis: o modo *power on demand* (denominado aqui por modo *Throttle*); o modo *pedal assist* (denominado aqui por modo Pedal); e ainda como uma mistura destes dois tipos de tecnologias (denominado aqui por modo Misto).

Na Figura B1 está representada a energia que é consumida no modo Pedal em cada uma das mudanças mecânicas, ao longo de uma distância de aproximadamente 80 metros. As medições, realizadas para cada uma das mudanças mecânicas, foram efetuadas todas da mesma forma, ou seja, no início de cada medição o ciclista encontrava-se parado e já com a respetiva mudança selecionada e pedalava com essa mudança fixa durante 80 m.

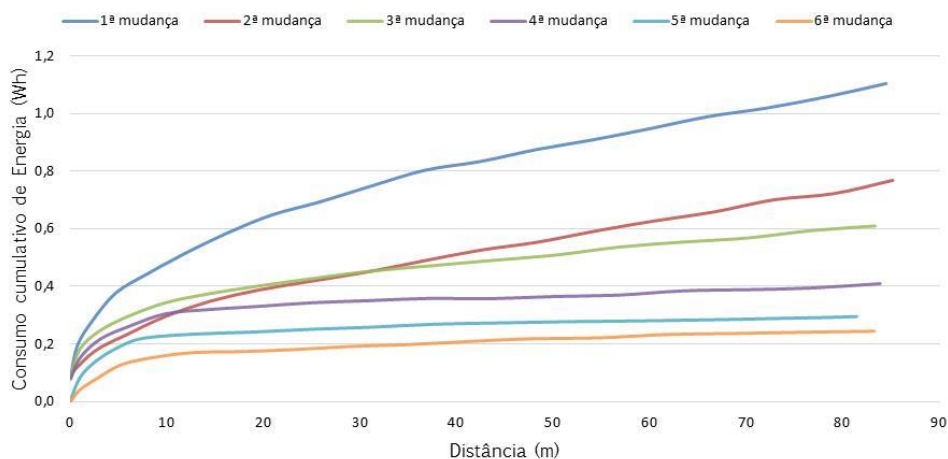


Figura B1 - Influência das mudanças mecânicas no consumo no modo Pedal

Facilmente se observa que o nível de assistência elétrica decresce no sentido do aumento das mudanças mecânicas, isto é, da 1ª para a 6ª mudança. Significando que o consumo deste tipo de bicicleta é fortemente influenciado pelo tipo de condução que o ciclista realiza.

Na Figura B1 observa-se que são nos 10 metros iniciais onde existe um consumo mais acentuado, o que leva a crer que o número de paragens durante uma viagem irá ter uma grande influência na energia consumida e conseqüentemente na autonomia da bicicleta elétrica.

A análise seguinte consistiu em estudar os três modos de condução (Pedal, *Throttle*, Misto) desta bicicleta elétrica. Através da Figura B2 verifica-se que o modo *Throttle* é o que possui velocidade média mais baixa (cerca de 20,7 km/h), em modo Pedal existe um aumento de 6,9% na velocidade média e no modo Misto esse aumento é de 17,9%.

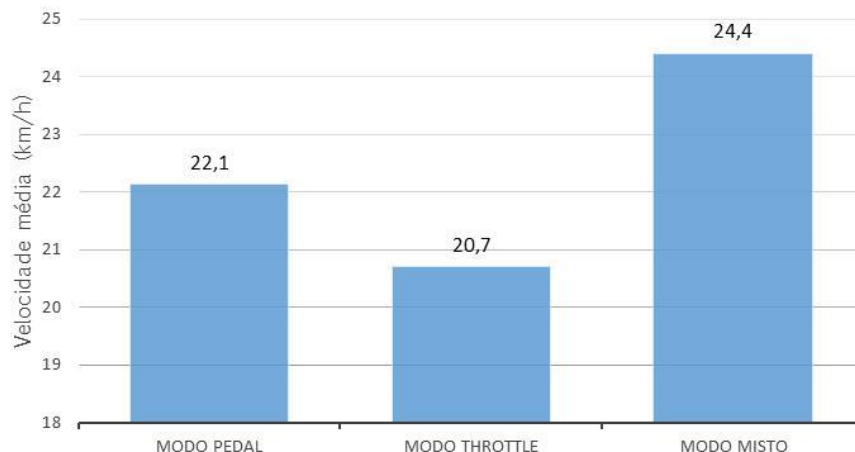


Figura B2 - Velocidade média da mesma viagem em três modos diferentes

Com o auxílio da Figura B3, observa-se que as acelerações médias positiva e negativa são menores em modo Pedal ($0,10 \text{ m/s}^2$ e $-0,11 \text{ m/s}^2$). O modo *Throttle* apresenta uma aceleração média positiva e negativa 19,4% e 25,9% respectivamente, mais elevadas que as obtidas no modo Pedal. No modo Misto encontram-se as acelerações mais elevadas, que comparativamente com o modo Pedal, obtendo-se uma aceleração positiva 36,9% superior e uma aceleração negativa 24,1% superior.

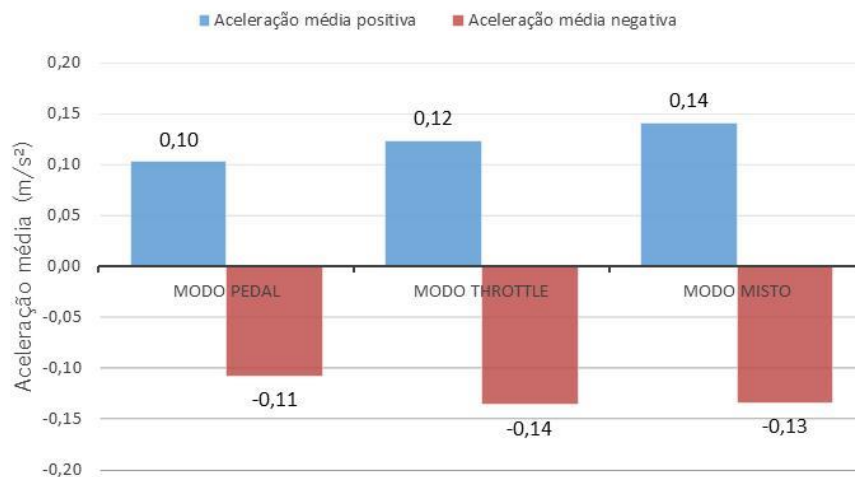


Figura B3 - Aceleração média da mesma viagem em três modos diferentes

Na Figura B4 são representados duas quantificações distintas de potência. A azul está representada a potência elétrica consumida que corresponde à potência fornecida pela bateria. De realçar que esta não é a potência transmitida para as rodas, pois existe uma eficiência associada que faz com que a potência transmitida às rodas seja inferior à potência elétrica consumida. Com a cor vermelha é apresentada a potência requerida, que é a potência obtida através da multiplicação do BSP (W/kg) pelo

peso do ciclista e da bicicleta (kg), ficando-se assim com uma potência média requerida pela dinâmica da viagem.

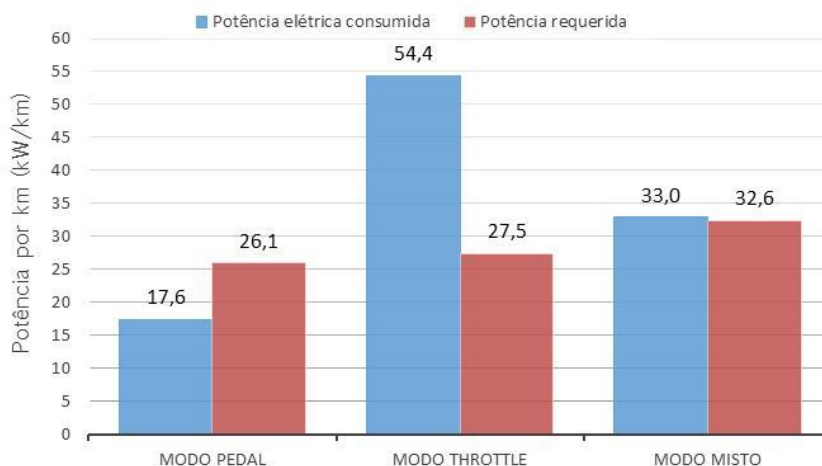


Figura B4 - Potência consumida por km na mesma viagem em três modos diferentes

As três potências requeridas representadas a vermelho na Figura B4 foram obtidas no mesmo percurso. A explicação para estas não serem exatamente iguais reside no facto de, nestes três modos de condução, se atingirem velocidades e acelerações médias diferentes para cada modo considerado e, como tal, isso faz com que a distribuição de BSP (W/kg) seja diferente em cada um dos modos analisados. Observa-se ainda que no modo Pedal e no modo *Throttle*, as potências requeridas são muito semelhantes, o que se deve ao facto de as suas velocidades e acelerações médias se balancearem, como se pode observar na Figura B2 e Figura B3. Seguindo o raciocínio anterior, torna-se evidente que o modo Misto é o modo de condução onde existe uma potência requerida mais elevada, uma vez que é este o modo onde existe maior velocidade média e onde existem acelerações médias mais elevadas.

Analisando a Figura B4, observa-se que em modo Pedal a potência elétrica consumida é inferior à potência requerida. Isto significa que a potência restante terá de ser fornecida através do esforço humano. Este será o modo onde se obtém maior autonomia. Ainda assim é de realçar que a autonomia deste modo está diretamente relacionada com o tipo de condução que o ciclista realiza (ou seja, quais as mudanças mecânicas utilizadas durante a viagem e o número de paragens que realiza), o que pode ser observado na Figura B1. O modo *Throttle* é o modo onde se obtém menor autonomia, por outro lado não é exigido qualquer esforço humano.

Por fim, o modo Misto permite atingir a velocidade média mais elevada, sendo a velocidade média 10,3% superior à obtida no modo Pedal. No entanto, o modo Misto apresenta um consumo 87,9% superior ao modo Pedal, o que reduz significativamente o nível de autonomia do modo de condução em questão. Examinando a Figura B4, observa-se que no modo Misto a potência requerida e a potência elétrica consumida têm valores idênticos, sendo esta última um pouco superior. Esta observação pode levar ao erro de se concluir que não seria necessário esforço humano para a realização do percurso. No entanto,

como já foi referido, existe uma eficiência associada a potência elétrica consumida, o que faz com que apenas parte desta potência elétrica seja efetivamente transmitida para as rodas da bicicleta, logo terá de existir um esforço humano associado ao modo Misto, que será inferior ao necessário no modo Pedal.

Através da Figura B5 e sabendo que a BE2 possui uma bateria com uma capacidade de 360 Wh, conclui-se que em modo Pedal obtém-se uma autonomia de aproximadamente 73,8 km. Esta autonomia decrece 67,8% quando é utilizado o modo *Throttle* e 46,8% quando o ciclista opta pelo modo Misto.

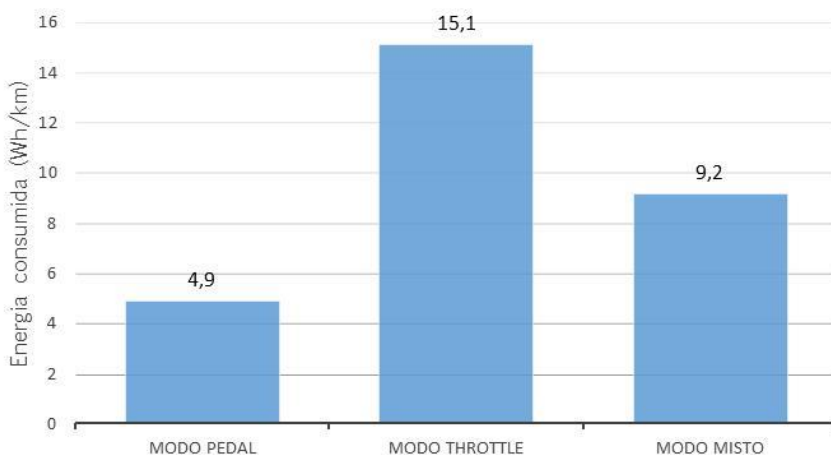


Figura B5 - Energia consumida por km na mesma viagem em três modos diferentes