



Ana Esmeralda Martins Gonçalves

Mobilidade Sustentável: Permeabilidade Urbana  
à Bicicleta Elétrica e suas Vantagens  
Energéticas - Aplicação à Cidade de Coimbra

Setembro de 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

ENERGIA PARA A SUSTENTABILIDADE  
ENERGY FOR SUSTAINABILITY · EFS

# **Mobilidade Sustentável: Permeabilidade Urbana à Bicicleta Elétrica e suas Vantagens Energéticas – Aplicação à Cidade de Coimbra**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Energia para a Sustentabilidade

Autor

**Ana Esmeralda Martins Gonçalves**

Orientadores

**Professor João Manuel Coutinho Rodrigues**

**Professor Nuno Miguel Marques Sousa**

**Coimbra, Setembro, 2016**



*Recomeça...*  
*Se puderes,*  
*Sem angústia e sem pressa.*  
*E os passos que deres,*  
*Nesse caminho duro*  
*Do futuro,*  
*Dá-os em liberdade.*  
*Enquanto não alcances*  
*Não descanses.*  
*De nenhum fruto queiras só metade.*

Miguel Torga



## **AGRADECIMENTOS**

Um enorme agradecimento ao Professor João Manuel Coutinho Rodrigues, e ao Professor Nuno Miguel Marques Sousa pela orientação científica, pelo acolhimento e integração neste projeto desde o primeiro dia, por todos os conhecimentos que me transmitiram, pela disponibilidade, paciência, amizade e auxílio prestado em todas as fases deste projeto.

Agradeço também ao Professor Luís Miguel Alçada Almeida pelos conhecimentos transmitidos, pela sua disponibilidade, amizade e dedicação a este projeto.

Agradeço à minha família por tudo o que me ensinaram e ajudaram a ser quem sou, por todo o carinho e presença em todas as etapas importantes da minha vida e principalmente, agradeço por todo o sacrifício que fizeram para tornar isto possível.

Agradeço ao meu namorado, pelo apoio incondicional, ajuda, carinho e otimismo que sempre me transmitiu, pela motivação e força por não me ter deixado desistir para conseguir concretizar este sonho.

Por fim, agradeço aos meus amigos, em especial à Florbela, por tudo o que passamos e empreendemos, ao companheirismo, amizade, motivação, força e incentivo em todas as fases deste projeto.



## RESUMO

O aumento da população nas cidades levou os países e as organizações a questionarem-se sobre o futuro da qualidade de vida dos habitantes dos meios urbanos e sustentabilidade destes. Os impactes energéticos e ambientais associados à mobilidade - tanto coletiva como individual - exigem um novo equacionamento do problema, abrindo caminho a soluções que não estagnem, exclusiva ou maioritariamente, numa mobilidade baseada no automóvel particular. Há, pois, que operacionalizar o conceito de mobilidade sustentável, o qual terá necessariamente que ser conjugado com a acessibilidade a bens e serviços assente em modos de transporte energeticamente mais eficientes e amigos do ambiente.

Posto o acima, o objetivo desta dissertação foi estudar a adequabilidade e permeabilidade da cidade de Coimbra à bicicleta elétrica, utilizando a tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com recurso a informação digital georreferenciada e análise de redes urbanas de transporte. Em particular pretendeu-se avaliar se este modo de transporte permite a circulação pela cidade sem quaisquer limitações numa utilização diária intensiva.

Após a obtenção dos resultados, pode-se concluir que um *pedelec*, com uma bateria com capacidade máxima de 788 kJ (219 Wh), pode efetuar todos os circuitos do dia-a-dia de uma pessoa sob assistência, independentemente do grau de intensidade com que a pessoa usa este modo de transporte. No entanto, recomenda-se para quem utilizar este modo de transporte para um uso muito intensivo, deve optar por um *pedelec* com maior autonomia para que nunca perca assistência elétrica nas suas viagens pendulares diárias.

***Palavras-Chave:*** Mobilidade Sustentável, Bicicleta Elétrica, Energia, Cidade de Coimbra, SIG



## **ABSTRACT**

The population increase in the cities led the countries and organizations to question themselves about the future of the life's quality of the habitants at urban areas and sustainability of them. The energy and environmental impacts associated with the mobility – both individual and collective - require a new problem understanding, opening the way to solutions that don't stagnate, exclusively or mainly, a disabled based on private cars. There is, therefore, that operationalize the concept of sustainable mobility, which will necessarily have to be combined with the accessibility of goods and services based on modes of transport more energy efficiency and environmentally friendly.

The objective of this dissertation was studying the suitability and permeability of Coimbra to electric bike, using the Geographical Information Systems (GIS) technology, with recourse to digital information and georeferenced analysis of urban transport networks. In particular, it is intended to assess whether this mode of transport allows movement through the city without any limitations on intensive daily use.

After obtaining the results, we can conclude that a pedelec, with a battery of maximum capacity 788 kJ (219 Wh), can indeed cover all the daily cycling needs of a person, offering assistance regardless of the degree of intensity of use of this transport mode. However, this research also suggests that those using this mode of transport very intensively should choose a pedelec with greater autonomy, so that they do not run the risk of losing electrical assistance due to battery degradation.

***Keywords:*** *Sustainable Mobility, Electric Bicycle, Energy, City of Coimbra, GIS*



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	3
RESUMO .....	4
ABSTRACT .....	5
ÍNDICE .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABELAS.....	8
SIMBOLOGIA .....	9
ABREVIATURAS.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Enquadramento do Tema.....	11
1.2 Estrutura da Dissertação .....	13
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO .....	15
2.1 Considerações Gerais .....	15
2.2 Bicicleta elétrica e as suas vantagens energéticas .....	19
2.3 Acessibilidade Urbana da Cidade de Coimbra.....	21
3 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	24
3.1 Definição de um SIG e seu âmbito de aplicação.....	24
3.2 Aplicação do SIG .....	24
3.3 Software ArcGIS .....	26
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 Considerações Gerais .....	28
4.2 Programação da Rede.....	29
5 CASO DE ESTUDO – COIMBRA.....	34
5.1 Considerações Gerais .....	34
5.2 Viagens Pendulares – Áreas de Serviço (AS) .....	35
5.3 Circuitos Multipontos.....	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
6.1 Viagens Pendulares .....	40
6.2 Circuitos Multipontos.....	42
6.3 Discussão dos Resultados.....	47
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	48
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
9 ANEXOS.....	54
Anexo 1 – Viagens Pendulares – Áreas de Serviço.....	54
Anexo 2 – Circuitos Multipontos.....	58



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comparação dos tempos médios de circuito em vários modos de transporte (EC, 2000).	16
Figura 2: Representação gráfica em percentagem da relevância dos circuitos de bicicleta na Austrália, EUA, Canadá e na Europa (Pucher et. al., 2008).	17
Figura 3: Diferenças entre o <i>pedelec</i> e a e-bike referentes ao modo de propulsão.	20
Figura 4: Representação dos elementos de uma rede SIG (ITS, 2012).	25
Figura 5: Rede rodoviária e pedonal da cidade de Coimbra em SIG no Software ArcGIS.	27
Figura 6: B'TWIN BEBIKE 500	28
Figura 7: Área de Serviço ao Fórum de Coimbra no sentido “ <i>Towards Facilities</i> ”.	36
Figura 8: Área de Serviço ao Fórum de Coimbra no sentido “ <i>Away From Facilities</i> ”.	36
Figura 9: Exemplo de um circuito criado na rota tipo 10 na rede da cidade de Coimbra.	39
Figura 10: Energia máxima gasta em assistência, em kJ, para cada uma das áreas de serviço, em ambos os sentidos, <i>Towards Facilities</i> e <i>Away From Facilities</i> .	40
Figura 11: Somatório da energia total gasta, em kJ, em cada viagem pendular Ida-Volta.	41
Figura 12: Energia total gasta (kJ) nos diferentes circuitos gerados em cada rota.	42
Figura 13: Energia total gasta (kJ) em cada tipo de rota.	43
Figura 14: Dependência da energia total gasta (kJ) em cada rota com a distância (km).	44
Figura 15: Dependência da Energia total gasta (kJ) com o número de paragens de cada rota.	45
Figura 16: Dependência da Energia total gasta (kJ) com os tipos de rota.	46
Figura 17 : Área de Serviço aos Hospitais da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Away From Facilities</i> ” (Origem)	54
Figura 18: Área de Serviço aos Hospitais da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Towards Facilities</i> ” (Destino)	54
Figura 19: Área de Serviço ao Polo I da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Away From Facilities</i> ” (Origem)	55
Figura 20: Área de Serviço ao Polo I da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Towards Facilities</i> ” (Destino)	55
Figura 21: Área de Serviço ao Polo II da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Away From Facilities</i> ” (Origem)	56
Figura 22: Área de Serviço ao Polo II da Universidade de Coimbra no sentido “ <i>Towards Facilities</i> ” (Destino)	56
Figura 23: Área de Serviço à Zona Industrial de Eiras no sentido “ <i>Away From Facilities</i> ” (Origem)	57
Figura 24: Área de Serviço à Zona Industrial de Eiras no sentido “ <i>Towards Facilities</i> ” (Destino)	



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de impactos ambientais relativos a vários modos de transporte relativamente ao automóvel, com o mesmo número de passageiros/km em percentagem – 100% é a situação mais gravosa (EC, 2000).	15
Tabela 2 – Resumo da velocidade, aceleração e energia de um ciclista de acordo com o declive (%) (Parkin & Rotheram, 2010).	30
Tabela 3 – Resumo da distância percorrida (km) e energia máxima (kJ) de cada um dos circuitos multipontos realizados com o pedelec.	58



## SIMBOLOGIA

$a$  – Aceleração da bicicleta

$A$  – Área frontal do ciclista e da bicicleta

$C_D$  – Coeficiente aerodinâmico

$C_r$  – Coeficiente de resistência ao rolamento

$C_v$  – Velocidade da bicicleta

$C_w$  – Velocidade do vento

$DeclUpEffective$  – Declive médio a subir

$DeclDownEffective$  – Declive médio a descer

$E$  – Energia de assistência para transpor o arco

$g$  – Aceleração da gravidade

$l_{up}$  – Comprimento a subir

$LenUpEffective$  – Comprimento dos arcos ascendentes

$LenDownEffective$  – Comprimento dos arcos descendentes

$\Sigma m$  – Somatório da massa da bicicleta e do ciclista

$m_w$  – Massa efetiva rotacional das rodas

$P$  – Potência elétrica debitada

$s$  – Declive

$v$  – Velocidade de subida para o declive médio do arco

$w$  – Potência requerida pela bicicleta elétrica

$\eta_{mech}$  – Eficiência mecânica da bicicleta

$\rho$  – Densidade do ar



## **ABREVIATURAS**

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AS – Área de Serviço

ESRI – Environmental Systems Research Institute

*E<sub>TF</sub>* – Energia *To – From*

*E<sub>FT</sub>* – Energia *From – To*

*FT* – *From – To*

HUC – Hospitais da Universidade de Coimbra

NA – Network Analyst

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

*TF* – *To – From*



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do Tema

Vivemos tempos de grandes mudanças, as quais passam: pelo aumento da população humana e a consequente pressão sobre o meio ambiente; pelo desenvolvimento da ciência e da técnica, com a consequente capacidade de transformação do meio ambiente; pelo aumento da capacidade de mobilidade do ser humano, devido à construção de infraestruturas, vias e meios de comunicação entre os quais se destaca o sector dos transportes em geral e, em particular, os veículos automóveis. Os deslocamentos por automóvel constituem na atualidade uma fração relevante dos circuitos totais, o que levanta várias questões, tais como as relativas à energia, ocupação do espaço, poluição, segurança no tráfego viário, planeamento e ordenamento do território e do urbanismo e as alterações climáticas, estando estas relacionadas, nomeadamente, com as da energia e da poluição (Andrade, 2012).

É notória a concentração da população residente em cidades nos países europeus. Cerca de três quartos da população europeia reside em áreas urbanas (EEA, 2006), resultado dos processos de urbanização dos territórios, como modelo dominante de ocupação humana nos últimos séculos (Louro, 2011).

O elevado e desordenado crescimento urbano tem colocado uma pressão contínua sobre os recursos, as infraestruturas e os equipamentos, afetando, por vezes negativamente, os padrões de vivência das populações das cidades, produzindo um impacto profundo no ambiente global, quer em termos de consumo de recursos, quer em termos de geração de resíduos e poluição (Torres, Silva, Santos, & Mendes, 2013).

A adoção do conceito de sustentabilidade na definição do modelo e das estratégias a prosseguir no domínio dos transportes - e da mobilidade urbana em particular - é determinante pois, de outro modo, dificilmente poderíamos conceber qualquer futuro cuja condição de realização tivesse de passar desde logo pela redução drástica do que hoje consideramos um direito adquirido: a possibilidade de nos deslocarmos quando, onde e com quem quisermos (Nunes & Silva, 2003).

A mobilidade urbana, isto é, a facilidade com que as pessoas se podem deslocar para satisfazer todo o tipo de necessidades - das "obrigatórias" às opcionais - é hoje considerado um direito adquirido nas sociedades de matriz cultural ocidental.

O crescimento da mobilidade e da acessibilidade é um dos grandes desafios para a gestão do território; se, por um lado, as distâncias-tempo vêm diminuindo através dos melhores acessos e da utilização de meios de transporte mais rápidos, contribuindo positivamente para a qualidade de vida dos indivíduos, por outro, a impermeabilização dos solos ou a fragmentação das áreas naturais são efeitos negativos observados. O aumento da taxa de motorização individual e da dependência do automóvel para as deslocações pendulares promove as funções de circulação e estacionamento nas cidades em detrimento da existência de espaços públicos e de convívio (Louro, 2011).

O aumento continuado das emissões de gases com efeito de estufa associados ao sector dos transportes, os crescentes congestionamentos de tráfego - no tempo e no espaço - e a destruição ou desvalorização dos espaços públicos, com a consequente deterioração da qualidade do ambiente urbano, tomam cada vez mais evidente a insustentabilidade do modo como essa mobilidade se exerce na atualidade e apontam para a urgência de se encontrarem soluções que, sem porem em causa esse direito, o condicionem às suas consequências ambientais e económicas (Nunes & Silva, 2003).

Os Sistemas de Informação Geográfica, habitualmente designados por SIG, permitem o armazenamento e a representação de informação relativa a elementos com fortes características espaciais, georreferenciados, não só pelo ponto de vista da sua forma e localização (via imagens ou modelos geométricos como pontos, linhas poligonais, etc.), mas também por informação associada (em geral sob a forma de tabelas de atributos), a qual, além de tipificar os elementos, também apresenta outras suas características relevantes, ou suporta a manipulação da informação associada. A gestão de toda esta informação é normalmente garantida pela utilização de Sistemas de Gestão de Bases de Dados, em modo mono ou multiutilizador, maioritariamente baseados em modelos relacionais de representação com ou sem extensões espaciais. Permitem assim a gestão, a manipulação e a análise, etc., dessa informação, não só pela via "manual", interativa, através do uso de ferramentas *standart* ou criadas no quadro do próprio SIG, tornando-se sua parte integrante, ou pela via de programas específicos criados para os mais diversos propósitos. A tecnologia SIG tem-se tornado essencial aos estudos

desenvolvidos nos últimos tempos, em diferentes áreas, sendo, contudo particularmente relevante no que toca ao planeamento e gestão da cidade e do território (Gama, 2011).

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo da acessibilidade e possibilidade do uso de um transporte individual assistido eletricamente, em particular a bicicleta elétrica denominada por *pedelec*. Os *pedelecs* apresentam elevada autonomia energética, o que lhes permite percorrer estradas declivosas, particularidade verificada na cidade de Coimbra, o que a torna pouco suscetível ao uso da bicicleta comum como meio de transporte alternativo aos veículos motorizados. Esta elevada autonomia torna o *pedelec* altamente atrativo numa cidade como Coimbra, uma vez que permite reduzir quase totalmente os esforços necessários para ultrapassar os declives existentes na cidade.

Procurar-se-á saber, através da geração de circuitos urbanos típicos que reflitam um uso intensivo da bicicleta elétrica, se é possível a uma pessoa deslocar-se no seu dia-a-dia exclusivamente por este modo de transporte, sem incorrer em perda de assistência elétrica por falta de autonomia.

## **1.2 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

No presente capítulo, 1, é apresentado um enquadramento geral do tema, seguido da descrição dos objetivos do trabalho.

No capítulo seguinte, 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre alguns conceitos associados à utilização da bicicleta como um modo alternativo aos meios de transporte urbanos, como também sobre as suas vantagens e limitações. Está estruturado em três secções que remetem aos seguintes temas: considerações gerais; a bicicleta elétrica e as suas vantagens energéticas; a acessibilidade urbana da cidade de Coimbra.

No terceiro capítulo é feita uma descrição sobre os sistemas de informação geográfica considerando a sua aplicação prática, como também as diversas ferramentas que estão associadas ao SIG.

No quarto capítulo é feita uma exposição detalhada da metodologia utilizada, e a programação da rede pedonal e ciclável da cidade de Coimbra, que está associada ao software ArcGIS.

No quinto capítulo, referente ao caso de estudo da cidade de Coimbra, são descritas as viagens pendulares – áreas de serviço e circuitos multipontos referentes à rede programada da cidade de Coimbra.

No sexto capítulo são expostos os resultados obtidos e respetiva discussão e, por último, no sétimo capítulo, são abordadas as conclusões sobre o tema apresentado nesta dissertação, bem como trabalhos futuros que possam vir a ser desenvolvidos.

## 2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Considerações Gerais

O uso da bicicleta como modo alternativo no transporte urbano constitui hoje em dia uma mais-valia para cidades e cidadãos. Com a crescente utilização do automóvel particular nas últimas décadas, muitos problemas associados a este modo de deslocação têm transformado as cidades num espaço pouco acolhedor e sem qualidade de vida. Problemas de poluição, energia, tráfego ou mesmo de saúde estão muito associados ao uso excessivo do automóvel, levantando graves problemas à população em geral e outros especificamente aos seus próprios utilizadores.

A União Europeia reconheceu oficialmente a importância do ciclismo como um modo prático de transporte urbano, criando benefícios nos domínios do ambiente, economia e saúde (ECMT, 2004). Na Europa, é importante o uso diário da bicicleta como meio de transporte e é igualmente importante referir que andar de bicicleta é tão comum para as mulheres como para os homens no norte da Europa (Pucher et al., 2008).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre os diversos modos de transporte, onde se verifica claramente os benefícios da utilização da bicicleta relativamente ao automóvel, num percurso idêntico com o mesmo número de passageiros/km, onde 100% corresponde à situação mais gravosa ou adversa para cada um desses itens (EC, 2000).

**Tabela 1 – Comparação de impactos ambientais relativos a vários modos de transporte relativamente ao automóvel, com o mesmo número de passageiros/km em percentagem – 100% é a situação mais gravosa (EC, 2000).**

[%]	Car	Car plus catalytic converter	Bus	Bicycle	Air Plane	Train
Space consumption	100	100	10	8	1	6
Primary energy consumption	100	100	30	0	405	34
CO <sub>2</sub>	100	100	29	0	420	30
Nitrogen oxides	100	15	9	0	290	4
Hydrocarbons	100	15	8	0	140	2
CO	100	15	2	0	93	1
Total atmospheric pollution	100	15	9	0	250	3
Risk of accidents	100	100	9	2	12	3

Conforme Wang (2008) e Woodcock et al. (2007), citados por EC (2000), a bicicleta é um modo de transporte que pode ser adotado na maioria das cidades. Combina a disponibilidade do automóvel com a sua alta eficiência, a baixa taxa de congestionamento (uma bicicleta é aproximadamente igual a 0.23 automóveis), os benefícios para a saúde e a brevidade de viagem para distâncias reduzidas.

Por exemplo, na Europa cerca de 30% e 50% das viagens efetuadas de automóvel abrangem distâncias superiores, de 3 km e 5 km respetivamente. Na figura 1 é feita uma comparação de tempos médios de circuito em vários modos de transporte, onde se pode verificar que, para distâncias até aproximadamente 5 km, a bicicleta suplanta o automóvel, podendo mesmo essa distância aumentar dependendo dos congestionamentos de circulação (EC, 2000).

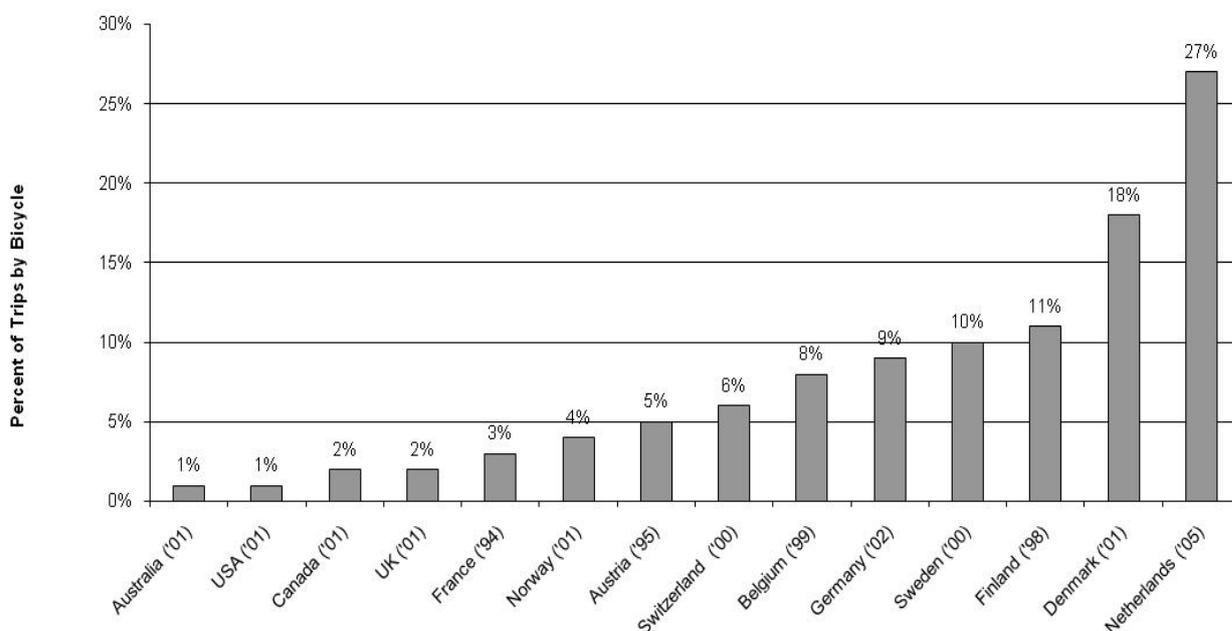


Figura 1: Comparação dos tempos médios de circuito em vários modos de transporte (EC, 2000).

De acordo com Lovelace et al (2011), citado por IEA (2012), outro aspeto de grande vantagem no uso da bicicleta, encontra-se na sua elevada eficiência energética. Com efeito, um ciclista, tendo em consideração a energia contida nos alimentos, gasta menos de 1/30 da energia gasta pelo automóvel. Este elevado consumo de energia por parte do automóvel contribui significativamente para os 61,5% do consumo mundial de petróleo de que o setor é responsável.

Atualmente o uso da bicicleta é dominado pela Holanda. Na figura 2 observa-se as grandes diferenças entre a Austrália, Estados Unidos, Canadá e os países europeus nos circuitos com

bicicletas, que variam desde um mínimo de apenas 1% dos circuitos totais, na Austrália e nos EUA, até 27% nos Países Baixos (Pucher et al., 2008).



**Figura 2: Representação gráfica em porcentagem da relevância dos circuitos de bicicleta na Austrália, EUA, Canadá e na Europa (Pucher et. al., 2008).**

A Conferência Europeia dos Ministros dos Transportes estima que o ciclismo per capita por dia varia de 2,5 km na Holanda para apenas 0,1 quilómetro na Espanha, Grécia e Portugal (Pucher et al., 2008). Os EUA também estão na extremidade baixa do espectro, com média de 0,1 km de ciclismo por pessoa por dia. Na Alemanha (0,9 km) e na Dinamarca (1,6 quilómetros) estão perto do topo, imediatamente a seguir à Holanda em distância percorrida por habitante. No que se refere a Portugal, muito há ainda a fazer, sendo evidente o atraso neste domínio.

Outro ponto importante na utilização da bicicleta são as vantagens obtidas a nível de tráfego em meio urbano. De facto, a bicicleta ocupa muito menos espaço físico que o automóvel e assim, o seu uso em larga escala pode melhorar drasticamente a fluidez de tráfego. Em cidades muito consolidadas, com centros urbanos muito compactos, como é o caso de Coimbra, a utilização da bicicleta pode ajudar a resolver problemas relativos ao congestionamento e estacionamento, que têm contribuído para a desertificação dos centros. Com o uso da bicicleta como modo de deslocação principal, estes locais podem tornar-se mais acessíveis o que teria forte impacto na sua revitalização.

Há, no entanto, que referir um conjunto de fatores que podem ser limitativos ao uso da bicicleta, tal como refere OCDE (2004):

- Segurança na via;
- Segurança pessoal e material – Roubos ou danos nas bicicletas; Medo de viajar à noite;
- Distância – Expansão urbana;
- Saúde – Inalação de poluentes emitidos por outros veículos;
- Estatuto Social – Viagens de bicicleta podem ser encaradas como atividades para crianças, ou socialmente inadequadas para aqueles que podem adquirir e usar o automóvel;
- Condições Atmosféricas – A chuva, bem como temperaturas extremas (elevadas ou muito baixas), podem funcionar como fatores limitativos ao uso da bicicleta. No entanto, é em alguns exemplos de cidades onde estas condições se verificam, como Oulu na Finlândia (com cerca de 120 mil habitantes situada perto do círculo polar ártico), que as viagens de bicicleta representam mais de 25% do total de viagens;
- Topografia – Zonas montanhosas e declivosas podem desencorajar os ciclistas.

No caso da Cidade de Coimbra, sendo esta o caso de estudo da dissertação, uns dos principais fatores limitativos é a topografia. Contudo, o facto de a população residente na cidade ser muito jovem, devido ao número elevado de estudantes, pode ser um fator bastante positivo que deve ser apreciado.

Com efeito, as cidades universitárias são geralmente muito recetivas a este tipo de mobilidade. Como exemplos temos a cidade de Muenster com 34% de deslocações de bicicleta - cidade com maior uso ciclável da Alemanha (Pucher, 1997) e a cidade de Cambridge em Inglaterra, com 27% de deslocações de bicicleta, apesar dos altos níveis de precipitação existentes (EC, 2000) ou Trondheim, onde 90% dos estudantes usam a bicicleta como principal modo de deslocação.

Para as pessoas com alguma limitação física, e que estariam impossibilitadas de pedalar todo o circuito numa bicicleta comum, a bicicleta elétrica cumpre uma função especial na mobilidade, sendo esta uma das suas maiores vantagens. Também em circuitos em que existe uma grande inclinação, em dias de muito calor, combinados eventualmente com profissões que exigem muito esforço físico, ir trabalhar com uma bicicleta comum poderia representar um cansaço insustentável e, dependendo da distância, estes são exemplos de situações em que a bicicleta elétrica seria a melhor solução devido à sua eficiência e autonomia. O facto de poder contar

com o auxílio elétrico e exigir menos tempo de esforço deixa as pessoas menos cansadas. Como este conceito é ainda muito recente, o custo destas bicicletas é ainda um entrave para que os potenciais utilizadores optem por este tipo de transporte.

## **2.2 Bicicleta elétrica e as suas vantagens energéticas**

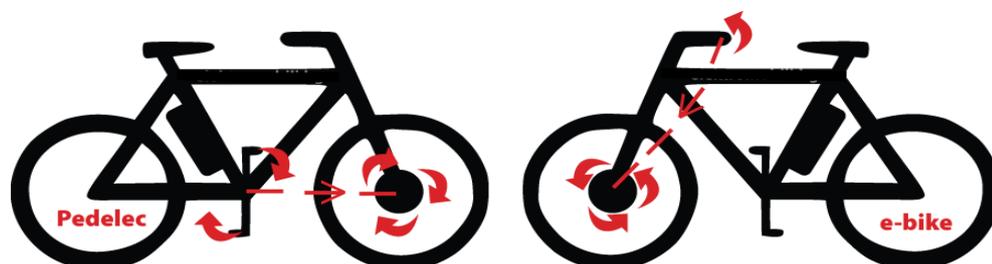
Nos últimos anos, a utilização da bicicleta elétrica aumentou consideravelmente em todo o mundo, tanto para transporte privado, como de mercadorias, com especial relevo na China, Estados Unidos e Europa.

No oeste e sul da Europa, as bicicletas elétricas não têm sido apenas utilizadas por pessoas idosas, mas também por jovens trabalhadores ciclistas e pais que levam os filhos à escola nestas bicicletas. Estes, de forma progressiva, vão reconhecendo a conveniência das bicicletas eletricamente assistidas (Timmermans et al., 2009). A maioria das bicicletas elétricas é fabricada na Alemanha e nos Países Baixos, ocupando Portugal a terceira posição no ranking dos países fabricantes (Muetze & Tan, 2007).

A bicicleta elétrica traz novas possibilidades em relação ao aumento do uso de bicicletas. Esta, ao contrário da bicicleta convencional, tem mais possibilidades de vencer declives, que é um forte inibidor do uso deste meio de transporte. É considerada uma inovação tecnológica potencialmente eficaz para reduzir os impactos de carbono, poluição do ar e do ruído dos meios de transporte com motor de combustão. Conforme Buwal (2004), Kairos (2010) e Pierce et al. (2013), referidos por Wolf & Seebauer (2014), inquéritos que foram realizados na Suíça, Áustria e Reino Unido indicam que as bicicletas elétricas podem reduzir o uso de energia no transporte, aumentando a sua preferência em relação aos automóveis convencionais movidos a motores de combustão interna. O utilizador da bicicleta acaba por definir os benefícios ambientais das bicicletas elétricas uma vez que é ele que decide a intensidade e o tipo de utilização quanto à frequência e dimensão das rotas tomadas (por exemplo, viagens para o trabalho ou lazer e pequenas ou grandes distâncias).

Existem atualmente na Europa, dois tipos de bicicleta elétrica – o *pedelec* e a e-bike. Os *pedelecs* são considerados, do ponto de vista da legislação em vigor (Diretiva Europeia 2002/24/CE), uma bicicleta comum ou um veículo não motorizado. Um veículo não-motorizado é definido da seguinte forma: "... um veículo não-motorizado é caracterizado por o auxílio de um motor elétrico com uma potência nominal de até 250W e velocidade máxima de 25 km/h... ". Apenas o *pedelec* satisfaz a descrição anterior uma vez que as e-bikes não

respeitam totalmente as limitações legais porque a sua assistência elétrica pode oferecer força de tração a velocidades superiores a 25 km/h (atingindo uma velocidade até 45 km/h) (Abagnale et al., 2015). A figura 3 representa as diferenças existentes em relação ao modo de propulsão entre o *pedelec* e a e-bike.



**Figura 3: Diferenças entre o *pedelec* e a e-bike referentes ao modo de propulsão.**

Outra classificação útil baseia-se no controlo da diferente assistência elétrica. Algumas bicicletas elétricas são caracterizadas pela avaliação do esforço do condutor, isto é, a força aplicada nos pedais. Neste tipo particular, a assistência elétrica do motor fornece apenas uma quota para a força de tração da bicicleta que é proporcional/complementar à parte do ciclista. A partilha entre a potência fornecida pelo utilizador e da potência do motor pode também ser controlada dependendo de diversos parâmetros de condução como, por exemplo, a velocidade e os níveis de assistência elétrica escolhidos pelo condutor: este enquadramento, mais sofisticado, permite uma adaptação ao ciclista e oferece um conforto melhor (Abagnale et al., 2015).

Um passo fundamental na conceção de uma bicicleta elétrica é a seleção das baterias, uma vez que é muito útil, quer para avaliar os seus custos, quer para recolher informações sobre a bateria de substituição. Os tipos mais utilizados são: níquel-hidreto metálico (NiMH), chumbo e baterias de lítio. Hoje em dia a bateria de chumbo é muito barata, mas apresenta a dificuldade de ser muito pesada. Por outro lado, as baterias de NiMH são significativamente mais caras do que as baterias de chumbo, mas, ao mesmo tempo, elas são as que se usam mais devido à sua maior densidade de energia, ou seja, a quantidade de energia disponível no sistema que é adquirida por intermédio de uma reação eletroquímica. As baterias de lítio apresentam a maior densidade de energia, portanto, estes tipos de baterias podem ser ligeiramente menores e mais leves do que as outras, com a mesma quantidade de energia disponível. Esse tipo de baterias é consideravelmente mais caro do que as baterias de chumbo, no entanto, o preço é comparável com as baterias de NiMH e por estas razões as baterias de lítio são na maioria adotadas em muitas bicicletas elétricas (Timmermans et al., 2009; Abagnale et al., 2015).

A vida útil das baterias utilizadas nas bicicletas elétricas é geralmente definida pelo número de ciclos de descarga inteiros. Para as baterias de chumbo esta vida é de cerca de 200 ciclos. O tempo de vida das de lítio e NiMH é de cerca de 600/800 ciclos de descarga completos. Apesar do tempo de vida ser expresso em número de ciclos, as baterias são também caracterizadas por uma duração limitada em termos de tempo absoluto. Em geral, depois de cerca de cinco anos, a capacidade de energia disponível reduz sensivelmente para 80% da capacidade original (Timmermans et al., 2009; Abagnale et al., 2015).

A bicicleta elétrica é consideravelmente mais pesada do que uma bicicleta comum, por causa da bateria, e é mais difícil de pedalar quando a bateria está desligada. A sua eficiência energética em termos de energia/km é melhor do que a de qualquer outro meio de transporte ou mesmo caminhar; apenas a bicicleta tradicional apresenta melhores rendimentos. Logo é ambientalmente superior aos outros meios de transportes (Dave, 2010; Wieczorek, 2009). A bicicleta elétrica é mais rápida, permitindo viagens mais longas, em circuitos montanhosos, e é uma alternativa para as pessoas que, por várias razões, são avessas a andar de bicicleta. Em comparação aos transportes coletivos, oferece velocidades de viagem competitivas. Claramente, tem o potencial em algumas circunstâncias, especialmente em deslocações urbanas, para substituir muitos automóveis e transportes coletivos, em benefício do meio ambiente e da saúde pública (Fyhri & Fearnley, 2015).

### **2.3 Acessibilidade Urbana da Cidade de Coimbra**

Geurs e Van Wee (2004) identificam quatro perspetivas básicas para medir a acessibilidade, que se focam numa ou mais componentes:

- Indicadores de acessibilidade para infraestruturas;
- Indicadores de acessibilidade com base na localização;
- Indicadores de acessibilidade baseados na pessoa;
- Indicadores de acessibilidade com base na utilidade.

Os indicadores de acessibilidade baseados na localização representam o foco essencial deste trabalho. Estes são utilizados no planeamento urbano, em estudos geográficos e em outros estudos de acessibilidade, e descrevem o nível de acessibilidade como, por exemplo, “o número de empregos a menos de 30 minutos de viagem do local de origem”. Os mais complexos incorporam restrições de capacidade das atividades disponíveis, incluindo os efeitos da

concorrência. Estes indicadores podem ser divididos em quatro grupos: os indicadores de distância, contorno, potência e fatores de equilíbrio (Geurs e Van Wee, 2004).

Os indicadores de distância são importantes, uma vez que a população, em geral, prefere caminhos mais curtos, tendo como objetivo minimizar a distância percorrida. Desta forma, para uma gestão sustentável dos equipamentos, bens e serviços, interessa conhecer as distâncias médias que as pessoas deviam percorrer para satisfazer as suas necessidades, como também a importância atribuída por cada pessoa aos diversos bens e serviços de uma cidade. A distância máxima que os cidadãos estão dispostos a percorrer de bicicleta em deslocamentos pendulares é aproximadamente 15 km (FHWA, 2005).

Quando se analisam mais de dois destinos são utilizados os indicadores de contorno, uma vez que contornam o número de oportunidades que podem ser alcançadas a menos de um dado período de tempo de viagem, distância ou custo fixo. A principal vantagem deste indicador, é a sua fácil interpretação sem ter implícitas suposições sobre as percepções pessoais em relação ao uso do solo ou transporte (Geurs e Van Wee, 2004).

Os indicadores de potência são conhecidos por indicadores baseados no modelo gravitacional, pois têm como objetivo estimar a acessibilidade das oportunidades da zona x para as outras n zonas, sendo que menores oportunidades e/ou oportunidades mais distantes, levam a uma diminuição de influência, e avaliam o efeito combinado entre o transporte e o uso do solo (Geurs e Van Wee, 2004).

Por último e não menos importante, os fatores de equilíbrio são úteis para analisar a acessibilidade de oportunidades que ocorrem tanto no local de origem como de destino, como por exemplo, a acessibilidade para o local de trabalho. Tem como principal vantagem, a menor quantidade de dados necessários para sua operacionalização e a capacidade de avaliar em conjunto os efeitos de uso do solo e do sistema de transportes. As principais desvantagens estão associadas à dificuldade de interpretação dos resultados, à sensibilidade, à definição dos pontos de estudo, à não captação dos efeitos de competição entre meios de transporte e atividades e à ambiguidade na magnitude dos resultados (Geurs e Van Wee, 2004).

Os movimentos pendulares assumem uma importância estratégica no quadro de formulação das políticas públicas de ordenamento do território e de desenvolvimento urbano e regional. Desta forma de mobilidade, resultante da deslocamento diária das pessoas por motivos laborais ou

escolares, advêm impactes mais ou menos profundos na gestão de redes e sistemas de transportes, nos mercados de trabalho e de habitação, nas respostas sociais a definir, na qualidade ambiental dos territórios e, até mesmo, na gestão das infraestruturas de águas e resíduos, influenciando assim a configuração dos territórios, as relações e dinâmicas espaciais e até mesmo a qualidade de vida das populações (CCDRC, 2013).

As principais necessidades individuais de uma pessoa deverão estar a uma reduzida distância, tais como, áreas verdes, paragens de autocarro urbano. Dentro de um raio de 400 metros de distância da habitação deverão encontrar-se os parques infantis, escolas primárias, cafés e lojas locais. Para outros equipamentos, infraestruturas e serviços é tolerada uma maior distância máxima, de 1000 metros, tais como as estações de comboio, parques verdes, centros de saúde e escolas secundárias, bem como os centros de lazer, grandes espaços verdes, equipamentos culturais, grandes centros comerciais ou o hospital. Quando a distância destes a casa é bastante maior, corresponde a uma procura menos frequente dos bens e serviços (Barton, 2000).

## **3 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)**

### **3.1 Definição de um SIG e seu âmbito de aplicação**

Um SIG é um sistema de informação que permite a integração de informação alfanumérica com a sua localização espacial. Tal sistema permite a recolha, armazenamento, atualização, gestão, análise e exibição de dados espaciais (Ribeiro, 2013). Possibilita também a visualização destes dados sob a forma de mapas, bem como, quanto à informação associada, à deteção de relações, padrões, tendências e a sua apresentação sob a forma de gráficos e relatórios (ESRI, 1990).

Os SIG assistiram a uma grande evolução nas últimas décadas, revelando-se ultimamente uma ferramenta tecnológica muito poderosa e promissora no melhoramento, não só da organização e funcionamento de organismos responsáveis pelo planeamento e gestão de infraestruturas, mas também em estudos de dispersão geográfica ou de organização e utilização do espaço urbano (Cunha, 2011).

As últimas décadas assistiram a um aumento significativo da utilização desta tecnologia para análise urbana, infraestruturas, uso do solo e problemas ambientais. De facto, estima-se que aproximadamente 80% de toda a informação possa ser associada a um local, tendo com isso associada informação geográfica, nem que esta se limite à sua referenciação em termos de coordenadas geográficas (Ferreira, 2010).

A tecnologia SIG tornou-se essencial a estudos de acessibilidade, sendo sistematicamente usada no planeamento e gestão da cidade e do território. Os SIG representam atualmente um importante instrumento de análise, de gestão espacial de objetos georreferenciados e de representação espacial.

### **3.2 Aplicação do SIG**

O SIG funciona geralmente acoplado a uma base de dados com informação geográfica, separando a informação em diferentes camadas e possibilitando, através do cruzamento de dados, obter novas informações. Na figura 4 estão representados os três elementos de objetos espaciais que são pontos, linhas e polígonos (áreas). O SIG usa coordenadas para representar estes três elementos geográficos. A combinação destas três primitivas espaciais é capaz de

representar qualquer entidade geográfica à qual se associa normalmente uma categoria de objeto.

Os pontos localizam uma categoria específica de objeto, como por exemplo edifícios, caixas de correio, poços, árvores individuais, para a qual apenas a localização é relevante não sendo importante, no âmbito do projeto em causa, nem a forma, nem a área associada. Os pontos são localizados através de sistemas de coordenadas *standard*. As linhas podem representar, por exemplo, estradas ou rios, ou outra categoria de objeto para a qual a forma e localização sejam relevantes, mas não a área ocupada. Caso seja uma representação mais rigorosa (por exemplo um projeto de uma rede de estradas) em que as secções dos troços a implantar sejam relevantes, as linhas podem não ser suficientes tendo que o desenho passar a ser suportado por polígonos (por definição são fechados em SIG). A espessura da linha (e outras formas de simbologia como cores e padrões) pode basear-se no tipo de estrada e têm uma única dimensão representada por pontos ligados a arcos.

Os polígonos definem áreas e são representados por um conjunto fechado de linhas que definem uma zona específica, sendo a primitiva geométrica com mais precisão ao permitir representar, além de todas as categorias de objeto já referidas, aquelas em que é relevante, como também o espaço geográfico ocupado (as outras duas primitivas atrás referidas representam uma área conceptualmente nula).

Os ambientes SIG dispõem de ferramentas (*tools*) para operações básicas de tratamento, manipulação e representação de dados geográficos, mas é frequentemente necessário estender-se estas funcionalidades, desenvolvendo ferramentas analíticas adicionais, destinadas a lidar com problemas específicos. Será esse o caso neste trabalho.

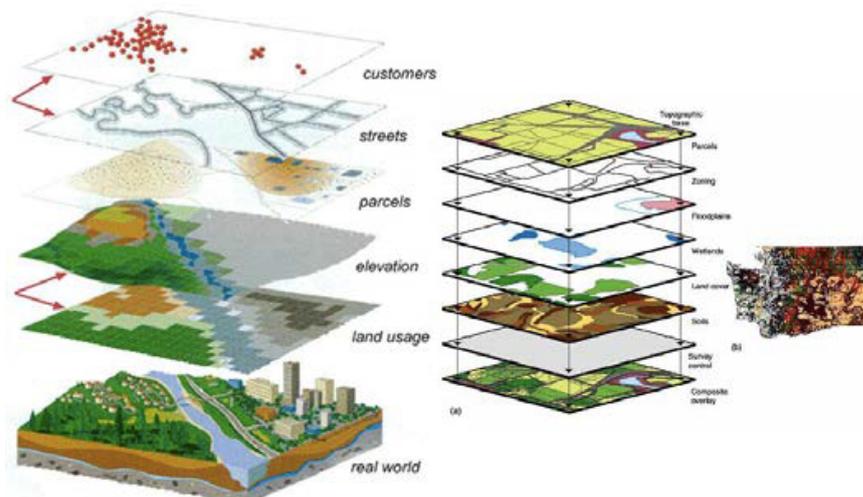


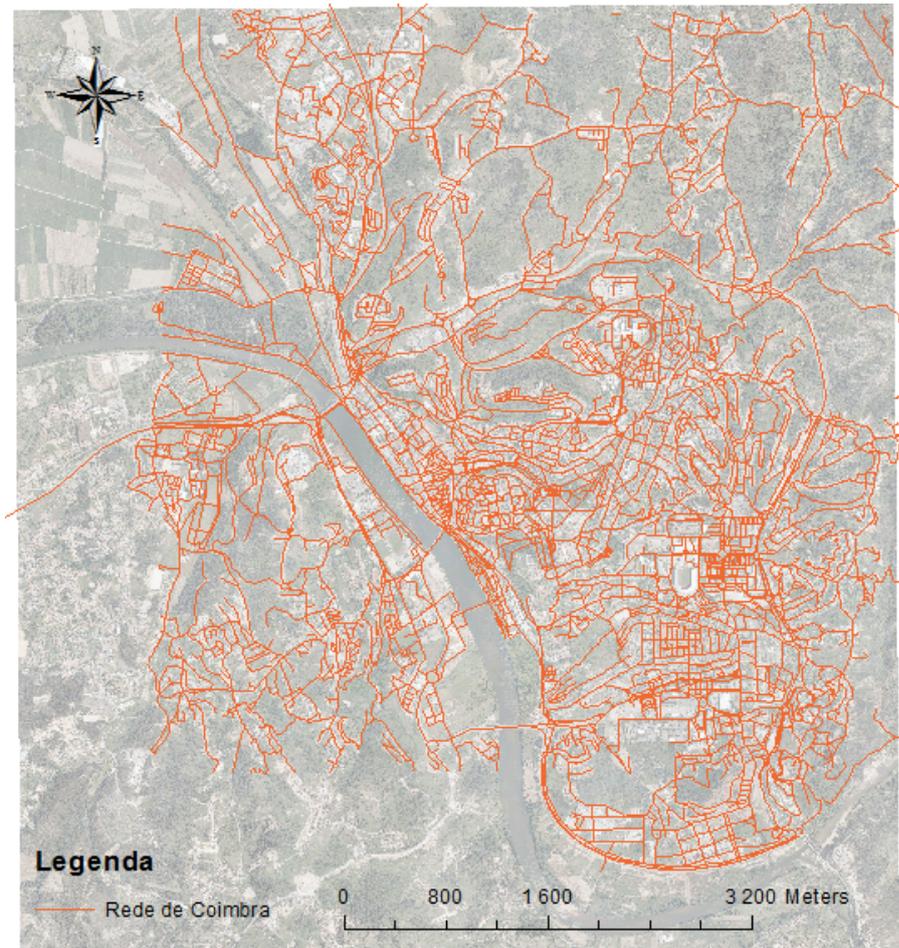
Figura 4: Representação dos elementos de uma rede SIG (ITS, 2012).

### 3.3 Software ArcGIS

Para o desenvolvimento desta dissertação foi utilizado o ambiente SIG *ESRI ArcGIS*. Este possui duas interfaces essenciais: o *ArcCatalog*, que fundamentalmente funciona como catalogador dos dados geográficos contidos no computador e vários outros locais, organizando-os, e permitindo procurar, visualizar e adicionar dados ao segundo interface essencial, o *ArcMap*. O *ArcMap* é uma interface gráfica, que permite apresentar a informação geográfica através de mapas interativos. Desta forma é possível visualizar, explorar, manipular e analisar toda a informação geográfica de uma forma interativa.

As ferramentas *ArcGIS Spatial Statistics*, *Proximity Analysis* e *Network Analysis*, auxiliam na medição da impedância na rede viária, permitindo calcular diferentes indicadores de distância (linear, tempo, energia, etc) em linha reta ou restringida a uma rede (por exemplo os caminhos mais curtos). As funções de visualização espacial podem ser utilizadas para facilitar a apresentação e interpretação dos resultados da análise da acessibilidade. O SIG permite ainda flexibilidade na calibração dos indicadores de acessibilidade, através da variação dos valores dos parâmetros e da incorporação de diferentes conjuntos de dados (Liu & Zhu, 2004).

O *Network Analyst* (NA) permite ainda a modelação e análise de redes, ajudando a desenvolver modelos dinâmicos e realistas ajustados à realidade, incluindo restrições arco a arco e outros parâmetros, tais como os limites de velocidade, os condicionamentos de altura e as condições de tráfego a diferentes horas do dia. O NA permite por exemplo, a criação de caminhos mais curtos entre dois pontos numa rede de transportes (*Closest Facility*), o conjunto de caminhos mais curtos que conectam um conjunto de localizações (*Route*) e o estabelecimento de todos os locais que estão a menos de um dado período de tempo, a determinada velocidade, distâncias ou custo de viagens (*Service Area*).



**Figura 5: Rede rodoviária e pedonal da cidade de Coimbra em SIG no Software ArcGIS.**

A figura 5 representa uma visualização da rede rodoviária e pedonal da cidade de Coimbra em ambiente *ArcGIS*. O SIG pode também ser usado para definir origens e destinos como pontos ou zonas e relacioná-los com dados sobre as suas características socioeconómicas.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Considerações Gerais

A bicicleta elétrica foi desenvolvida para auxiliar ciclistas a transpor declives elevados, e assim possibilitar a circulação em cidades declivosas. Sendo Coimbra uma cidade altamente declivosa e, conseqüentemente pouco atrativa para viagens de bicicleta, pretende-se saber se este tipo de bicicleta consegue vencer as barreiras topográficas, ou seja, saber se a cidade é, ou não plenamente circulável recorrendo apenas a este modo de transporte. Tal facto permitiria ao seu utilizador transitar em Coimbra como se de uma cidade plana se tratasse, eliminando assim os enormes esforços físicos necessários para vencer declives.

É através da assistência motriz que uma bicicleta elétrica consegue superar esses declives, o que implica gastos de energia. Assim, numa primeira fase procurar-se-á estimar, arco-a-arco, os gastos de energia necessários à circulação na rede viária de Coimbra, quando esta é feita sob assistência elétrica. Numa segunda fase estudar-se-á até que ponto a capacidade de bateria de uma bicicleta elétrica permite comportar estes gastos de energia. Se os gastos originarem porventura um dreno muito intenso da capacidade da bateria, a bicicleta elétrica poderá ter o seu raio de ação limitado. É precisamente o objetivo desta tese, averiguar qual é esse raio de ação e se ele é ou não limitativo do uso da bicicleta elétrica de um modo pleno.

### A bicicleta em estudo

Este estudo vai-se focar na mais elementar das bicicletas elétricas – o *pedelec*. Como dito no capítulo anterior estes veículos estão limitados a 250 W de potência nominal do seu motor elétrico. Se um conseguir transitar plenamente pela cidade, então qualquer bicicleta elétrica de maior potência também o conseguirá. O *pedelec* de menor capacidade de bateria do mercado português tem 219 Wh (788 kJ) de capacidade de armazenamento elétrico. Este valor, 788 kJ será, pois, a bitola para averiguar os limites deste modo de transporte.



**Figura 6: B'TWIN BEBIKE 500**  
**Potência Nominal de 250 W e Capacidade de bateria de 219 Wh.**

## 4.2 Programação da Rede

A programação da rede começou com a obtenção da informação geográfica respeitante a esta que já estava disponível de um projeto anterior. Cada arco da rede encontra-se seccionado em parte ascendente e descendente, vista no sentido de circulação dito “*From-To*” (FT), e contem campos previamente calculados, com as designações *DeclUpEffective*, *DeclDownEffective*, *LenUpEffective*, *LenDownEffective*, que correspondem, respetivamente, ao declive médio a subir, ao declive médio a descer e ao comprimento das partes ascendente e descendente.

A primeira tarefa será então saber quais destes arcos podem ser transitados por um *pedelec*. De acordo com os dados dos fabricantes, estes reivindicam que um *pedelec* conseguirá subir declives até um máximo de 10%, pelo que se marcaram restritos “*Restricted*” todos os arcos com declive a subir maior que 10%. A descer marcaram-se como restritos todos os arcos com declive superior a 12%, uma vez que as dificuldades de travagem exigem normalmente desmonte do ciclista. Estas restrições foram aplicadas no sentido FT. No sentido “*To-From*” (TF), ou seja, quando o *pedelec* transita o arco no sentido inverso, “subir” e “descer” trocam significados e restringiram-se arcos com declive *up* maior que 12 e declive *down* maior que 10. Um arco pode assim estar restrito no sentido FT, TF, ambos ou nenhum. Estas restrições significam simplesmente que, nos cálculos a efetuar pelo NA, este não considerará circulações em sentidos restritos.

A segunda tarefa será para os arcos não restritos calcular qual a energia necessária para os transitar quando é solicitada assistência. Note-se, em primeiro lugar, que os *pedelecs* não regeneram energia, pelo que qualquer energia gasta nas subidas não será repostada nas baterias durante as descidas. É sabido (AASHTO, 1999) que os ciclistas são insensíveis a declives até 2-3%. Assim, considerar-se-á apenas assistência em caso de declives médios iguais ou superiores a 3%. Irá considera-se também que um ciclista ao encontrar um declive de 3% ou maior, tentará prosseguir viagem à mesma velocidade que teria a 3% de declive. Em Parkin & Rotheram (2010) encontram-se estatísticas para velocidades médias de um ciclista sem assistência para vários declives. A tabela 2 resume estes resultados.

**Tabela 2 – Resumo da velocidade, aceleração e energia de um ciclista de acordo com o declive (%) (Parkin & Rotheram, 2010).**

Gradient (%)	Mean	Speed	Eighty-fifth		Mean acceleration	Power at mean speed	Power during acceleration	Time to final speed	Mean Speed with 16 kph tail wind (kph)
	(m/s)	(kph)	percentile (m/s)	Speed (kph)					
-7	7.68	27.6	8.05	29.0	0.380	-251	-32	20.2	
-6	7.44	26.8	7.77	28.0	0.359	-183	-6	20.8	
-5	7.20	25.9	7.49	27.0	0.337	-119	19	21.3	
-4	6.96	25.1	7.22	26.0	0.316	-58	42	22.0	
-3	6.72	24.2	6.94	25.0	0.295	0	64	22.8	
-2	6.49	23.3	6.66	24.0	0.274	54	84	23.7	37.3
-1	6.25	22.5	6.38	23.0	0.252	104	103	24.8	34.5
0	6.01	21.6	6.11	22.0	0.231	151	120	26.0	31.7
1	5.61	20.2	5.75	20.7	0.220	183	133	25.6	28.3
2	5.21	18.8	5.40	19.4	0.208	211	143	25.0	24.9
3	4.81	17.3	5.04	18.2	0.197	232	151	24.5	
4	4.41	15.9	4.69	16.9	0.185	248	155	23.8	
5	4.01	14.4	4.33	15.6	0.174	259	157	23.1	
6	3.61	13.0	3.98	14.3	0.162	263	156	22.3	
7	3.21	11.6	3.63	13.1	0.151	261	151	21.3	

Note, the power calculations assume:

1 Air resistance based on a frontal area of 0.616 m<sup>2</sup>, a drag coefficient of 1.2 and a density of air of 1.226 kg/m<sup>3</sup>.

2 Inertia and potential energy changes based on a total mass of ride a bicycle of 95 kg and an effective rotational mass of the wheels of 0.95 kg.

3 A rolling resistance coefficient of 0.008 and a mechanical efficiency of the bicycle of 95%.

4 No head or tail wind.

De acordo com a tabela considera-se que, para declives iguais ou superiores a 3%, o ciclista tentará fazer o seu circuito a uma velocidade de 4,81 m/s (17,3 km/h). Esta tabela assume um conjunto pessoa mais bicicleta (não elétrica) de 95 kg (valor considerado nos estudos de Parkin & Rotheram (2010)), valor a que somaremos 11 kg, que é o peso médio dos dispositivos de assistência motor mais bateria, que resultará num peso combinado de 106 kg. Devido a este peso suplementar o ciclista necessitará de um ligeiro acréscimo de potência para circular em declive por comparação com o indicado na tabela. A potência extra foi recalculada de acordo com a metodologia de Parkin & Rotheram (2010):

$$w = \frac{C_v}{\eta_{\text{mech}}} \left\{ \Sigma m g \left[ C_r + \frac{s}{100} + \frac{a}{g} \left( 1 + \frac{m_w}{\Sigma m} \right) \right] + \frac{1}{2} C_D A \rho (C_v + C_w)^2 \right\} \quad (1)$$

Onde,

- $w$  é a potência requerida pela bicicleta elétrica (W),
- $C_v$  a velocidade da bicicleta (m/s),
- $\eta_{\text{mech}}$  a eficiência mecânica da bicicleta (%),
- $\Sigma m$  o somatório da massa da bicicleta e do ciclista (Kg),
- $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),
- $C_r$  o coeficiente de resistência ao rolamento,
- $s$  o declive (%),
- $a$  aceleração da bicicleta (m/s<sup>2</sup>),

- $m_w$  a massa efetiva rotacional das rodas (Kg),
- $C_D$  o coeficiente de resistência aerodinâmica,
- $A$  a área frontal do ciclista e da bicicleta ( $m^2$ ),
- $\rho$  a densidade do ar/ massa específica ( $Kg/m^3$ ),
- $C_w$  a velocidade do vento (m/s) – assumindo como nula.

Por exemplo, substituindo  $\Sigma m = 106$  kg (80 kg ciclista + 26 kg *pedelec*) e os restantes parâmetros iguais aos de Parkin obtém-se uma potência motriz humana no plano de 155,57 W.

De seguida, para calcular o esforço combinado humano + assistência, far-se-ão três outras suposições: a primeira é que sempre que houver assistência, o ciclista fornecerá cumulativamente uma potência mecânica igual à que forneceria no plano, nomeadamente 155,57 W. Isto transmitirá a mesma sensação, em termos de esforço despendido, de estar a circular no plano. A segunda é que o rendimento combinado do motor elétrico e engrenagens mecânicas é de 80%. O motor elétrico debitará até um máximo de 250 W nominais, que se transformaram em 200 W passados às rodas. Por fim, a terceira suposição é que esta potência útil de 0 a 200 W está disponível a pedido do ciclista, de forma gradual. Esta última suposição é realista porque na prática (como se viu na secção anterior) os *pedelecs* têm diferentes graus de assistência elétrica, respondendo em consonância com a força exercida sobre os pedais.

Tendo em conta as considerações do último parágrafo, e usando novamente a fórmula (1), tem-se, para 3% de declive e uma velocidade constante de 4,81 m/s (17,3 km/h, como na tabela de Parkin & Rotheram), que o *pedelec* necessitará de 252,82 W (c.f. cálculos abaixo), dos quais 155,57 W serão providenciados pelo ciclista e 97,25 W fornecidos pelo motor elétrico.

$$w = \frac{4,81}{0,95} \left( 106 \times 9,81 \left( 0,008 + \frac{3}{100} \right) + \frac{1}{2} \times 1,2 \times 0,616 \times 1,226 \times 4,81^2 \right)$$

$$w = 252,82$$

Prosseguindo para declives mais elevados, a repetição destes cálculos diz que é possível circular a 4,81 m/s até 5% de declive, sendo que este último valor satura a assistência do motor elétrico que estará a debitar no seu valor nominal de 250 W (200 W nas rodas).

Ao acentuar-se o declive para valores entre 6 e 10%, a velocidade de subida irá reduzir-se para aquela que é possível, para uma potência máxima nas rodas de 355,57 W (155,57 W do ciclista no plano + 200 W de assistência). Por exemplo, para um declive de 10%, um cálculo elementar baseado na fórmula de Parkin e Rotherham diz-nos que a velocidade de subida possível é de 2,92 m/s (10,50 km/h).

Com a potência elétrica debitada à bateria, velocidade sob assistência e comprimento da subida pode-se obter a energia drenada da bateria para cada arco da rede viária através da seguinte fórmula de física elementar:

$$E = P \frac{l_{up}}{v}$$

Onde  $E$  é a energia de assistência para transpor o arco,  $P$  a potência elétrica debitada,  $l_{up}$  o comprimento a subir, e  $v$  a velocidade de subida para o declive médio do arco.

Todas estas grandezas foram calculadas de forma automática através da ferramenta *Field Calculator* do *ArcGIS* com recurso a scripts *Python*, fornecidos pelos orientadores.

Os cálculos foram efetuados tanto nos sentidos FT como TF, originando nas tabelas associadas da rede viária, campos com valores de Energia TF ( $E_{TF}$ ) e Energia FT ( $E_{FT}$ ), que serão utilizados posteriormente nos cálculos. Para declives entre 0 e 2% esta energia é 0.

O último passo na programação da rede foi a consideração de assistência elétrica no arranque após uma paragem. Estas paragens poderão acontecer sempre que o ciclista tenha de mudar de direção num cruzamento (*turns*). Quando assim for, considera-se que o subsequente arranque será assistido pelo motor elétrico.

Para modelar a energia de arranque considera-se que esse arranque é feito em plano e que o motor elétrico assistirá o ciclista em potência máxima até que este atinja a velocidade de cruzeiro em plano (6,01 m/s = 21,6 km/h). A esta potência, junta-se a potência humana em arranque da tabela de Parkin e Rotherham, 120 W. Para uma potência combinada de 320 W, a energia cinética de conjunto bicicleta + ciclista à velocidade de 6,01 m/s (1908 J) é atingida ao fim de 5,96 s, a que correspondem 1863,3 J drenados da bateria (1490,6 J passados às rodas).

Esta situação de *turns* é aplicável a casos de cruzamentos ou entroncamentos com viragem à esquerda ou em frente, uma vez que estes requerem quase sempre paragem. Nas viragens à direita considerou-se 900 J, representando uma probabilidade de cerca 50% de paragem.

Com a consideração dos detalhes descritos conclui-se a programação da rede e procede-se à geração e análise de resultados.

## 5 CASO DE ESTUDO – COIMBRA

### 5.1 Considerações Gerais

Programada a rede, irar-se-á averiguar nesta secção, se para uma cidade de tamanho médio como Coimbra, um *pedelec* é de facto uma alternativa viável a modos de transporte motorizados com mais potência e menos eficientes, como exemplo, veículos motorizados (automóvel, autocarros e motorizadas). Para tal há que saber se uma pessoa consegue realizar a sua vida normal usando apenas este modo de transporte. Procura-se responder a esta questão colocando e respondendo a duas hipóteses principais.

Em primeiro lugar, terá um *pedelec* capacidade de bateria suficiente para permitir uma viagem casa – trabalho – casa, independentemente da localização do seu trabalho ou da sua casa? Esta questão será respondida, em ArcGIS, recorrendo a Áreas de Serviço (AS) com respeito a energia, representando a necessidade mais básica de transporte de um habitante da cidade.

Em segundo lugar, será a capacidade da bateria do *pedelec* suficiente para múltiplas viagens incluindo não só o trabalho, mas também outras localizações normais do dia-a-dia de um habitante, começando e terminando na sua residência, considerando esta como o único ponto de carga do *pedelec*? Esta questão é impossível de responder por completo, uma vez que há demasiadas combinações de circuitos diários com múltiplas paragens. Como tal, irão ser seleccionadas apenas algumas destas combinações, de forma aleatória de entre os circuitos maiores, calculando-se a distância e energia necessária e posteriormente, comparar esta energia com a capacidade da bateria. Esta amostragem consistirá, como veremos, de 72 circuitos, uma dimensão suficientemente grande para que os resultados obtidos sejam estatisticamente relevantes.

Sendo o caso de estudo referente à cidade de Coimbra, teremos de localizar não só os pontos atratores das viagens pendulares (maiores empregadores), como também, os vários locais de paragem referentes aos circuitos da segunda questão acima colocada. Assim, escolheu-se, como pontos atratores/ paragens, serviços nas seguintes categorias: Acessos Primários de Saúde (centros de saúde e hospitais), Farmácias, Câmara Municipal, Correios, Loja de Cidadão, Forças de Segurança, Juntas de Freguesia, Equipamentos Escolares (Primária e Infantil, Básico, Secundário e Superior), Equipamentos Desportivos, Lares e Associações Sociais, Igrejas,

Associações Culturais e Desportivas, Centros Comerciais, Entretenimento, Padarias e Pastelarias, Mercearias e Restaurantes.

## 5.2 Viagens Pendulares – Áreas de Serviço (AS)

Para verificar se em Coimbra é ou não possível realizar viagens pendulares casa-trabalho-casa utilizando exclusivamente um *pedelec*, recorreu-se à técnica das áreas de serviço. Uma AS é uma área poligonal cujo interior cobre as localizações que se podem atingir pela rede viária, a partir de uma fonte (atractor) e utilizando um dado modo de transporte, até um máximo de  $x$  unidades de impedância. Cada área de serviço está então associada a uma fonte de um serviço. Neste caso de estudo esse serviço é um empregador.

O *ArcGIS* através da ferramenta NA permite a geração destas áreas (Menu NA → *New Service Area* → *Create Network Location*, escolhendo manualmente um ponto atractor na zona de estudo para obter a área de serviço a esse ponto). Foram criadas AS nos dois sentidos de circuito, casa-trabalho (*Towards Facilities*) e trabalho-casa (*Away From Facilities*). Para a geração dos polígonos representadores das áreas de serviço foi escolhida como impedância a energia com intervalos (*Default Breaks*), 100 kJ, 200 kJ, 300 kJ e 400 kJ. O intervalo entre 300 kJ e 400 kJ é o intervalo crítico, uma vez que para viagens de ida-volta, todas as localizações se encontrarem neste *break* poderão não conseguir atingir o atractor e regressar ainda com assistência eléctrica, uma vez que, recordando, a capacidade máxima da bateria é de 788 kJ. Para efeitos de visualização, usou-se um *buffer* de recorte (*Trim Polygons*) de 50 m, valor de compromisso entre a visibilidade gráfica e a visualização de eventuais desconexões entre as AS geradas.

Exposta a técnica de obtenção de AS no *ArcGIS*, foram então calculadas as áreas de serviço aos cinco maiores empregadores de Coimbra, nomeadamente:

**Área de Serviço 1:** Hospitais da Universidade de Coimbra

**Área de Serviço 2:** Pólo I da Universidade de Coimbra

**Área de Serviço 3:** Pólo II da Universidade de Coimbra

**Área de Serviço 4:** Fórum Coimbra

**Área de Serviço 5:** Zona Industrial de Eiras

Nas figuras 7 e 8 estão representadas, a título de exemplo, as áreas de serviço obtidas ao Fórum de Coimbra, nos sentidos “*Towards Facilities*” e “*Away From Facilities*”, respetivamente.

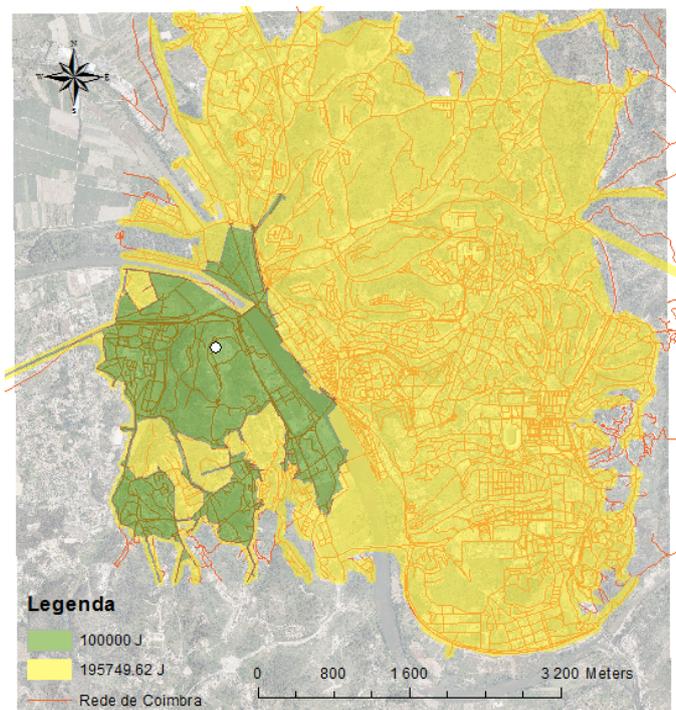


Figura 8: Área de Serviço ao Fórum de Coimbra no sentido “*Towards Facilities*”.

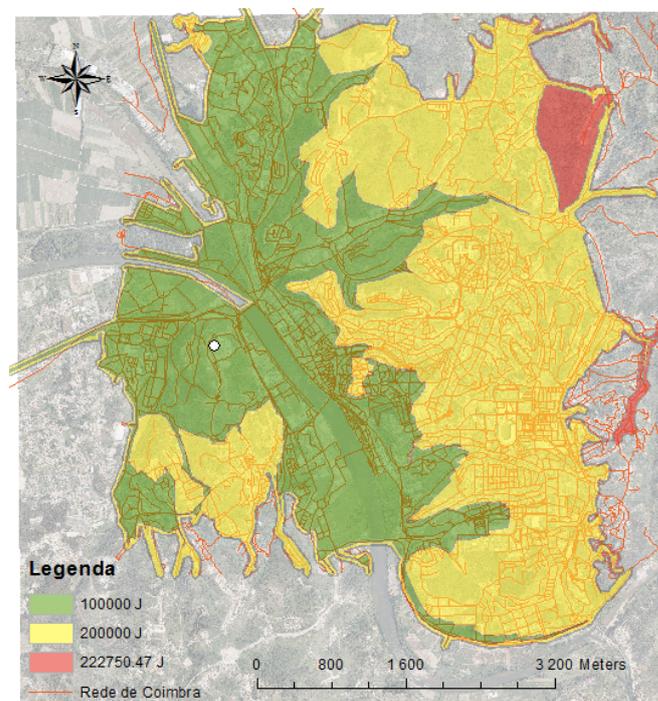


Figura 7: Área de Serviço ao Fórum de Coimbra no sentido “*Away From Facilities*”.

O código de cores é o seguinte: a verde temos a AS de 0 a 100 kJ, a amarelo 100 a 200 kJ e a vermelho 200 a 300 kJ. P.ex. os moradores numa zona que esteja a amarelo tanto na AS *Towards Facilities* como na *Away From Facilities* gastará, no máximo, 200 kJ de assistência elétrica para cada lado, perfazendo um total entre 200 e 400 kJ, ainda longe da capacidade máxima da bateria, que é 788 kJ.

Como se pode ver, a zona de estudo não contém, para esta AS, o *break* 300 a 400 kJ, pelo que, nenhum morador desta área está em risco de perder assistência na sua viagem pendular. Este resultado, inexistência do *break* 300 a 400 kJ, acontece também para as outras quatro áreas de serviço calculadas e será revisto em mais detalhe no capítulo seis. Isto significa que, à partida, o ciclista poderá realizar a sua viagem pendular ao emprego sem chegar sequer perto do limite da capacidade da bateria.

Note-se também que a questão da permeabilidade da cidade ao *pedelec*, no sentido em que permeabilidade significa aqui a possibilidade de transitar entre dois quaisquer pontos usando esse modo de transporte, se encontra também respondida: toda a área de estudo é permeável ao

*pedelec*, exceto algumas zonas altamente declivosas no Tovim, Chão do Bispo e zona sul de Santa Clara.

### 5.3 Circuitos Multipontos

Os resultados preliminares da secção anterior são bastante animadores quanto à capacidade do *pedelec* em percorrer a cidade de Coimbra. Veremos agora se esta tendência se mantém para situações de uso mais intensivo, nomeadamente, circuitos multiponto. Estes circuitos pretendem, como dito anteriormente, representar um dia atarefado de um habitante da cidade de Coimbra com múltiplas paragens e passagens por locais atratores do dia-a-dia.

O NA permite gerar e analisar estes circuitos nas suas vertentes de energia e distância. Para criar um tal circuito escolhemos no NA *New Route* → *Create Network Location* → escolher manualmente os pontos de paragem (*stops*) no mapa → *Solve*. A impedância escolhida não foi a energia, mas sim a distância, uma vez que, na prática, as pessoas, intuitivamente, não tentam minimizar a energia gasta no circuito pelo *pedelec*, minimizam sim a distância percorrida. O circuito será assim definido pela distância mais curta encontrada pelo *software* e os cálculos acumularão, além desta distância, a energia de assistência requerida para o circuito em causa. Note-se que a energia acumulada na análise de cada circuito não interfere no cálculo do circuito. Assim, é possível determinar o circuito pela distância e averiguar se a energia total gasta está dentro dos limites de autonomia. Na eventualidade de ocorrerem erros de localização dos pontos de paragem, o que acontece quando o ajuste à rede (*Snapping*) é feito para um arco restrito, é necessário deslocar manualmente esse ponto para perto de um arco que seja transitável, de forma a que o circuito seja corrigido.

Para a obtenção de resultados foram considerados diferentes tipos de rotas com os diversos equipamentos, bens e serviços existentes na cidade de Coimbra. Estas foram escolhidas de forma aleatória, mas tendo sempre em consideração um circuito habitual de uma pessoa, atendendo às necessidades quotidianas.

**Rota Tipo 1:** Casa – Equipamento escolar – Local de trabalho – mercearia – Casa;

**Rota Tipo 2:** Casa – Acesso primário de saúde – mercearia – Padaria/Pastelaria – Casa;

**Rota Tipo 3:** Casa – Correios – Local de trabalho - Padaria/Pastelaria – Casa;

**Rota Tipo 4:** Casa – Local de trabalho – Restaurante – Centro comercial – Casa;

**Rota Tipo 5:** Casa – Farmácia – Local de trabalho – Equipamento escolar – mercearia – Padaria/Pastelaria – Casa;

**Rota Tipo 6:** Casa – Equipamento escolar – Correios – mercearia – Junta de freguesia – Equipamento escolar - Padaria/Pastelaria – Casa;

**Rota Tipo 7:** Casa – Equipamento escolar – Local de Trabalho – Equipamento desportivo – Equipamento escolar – mercearia – Casa;

**Rota Tipo 8:** Casa – Igreja – Associação cultural e desportiva – Lar e associação social – Padaria/Pastelaria – Casa;

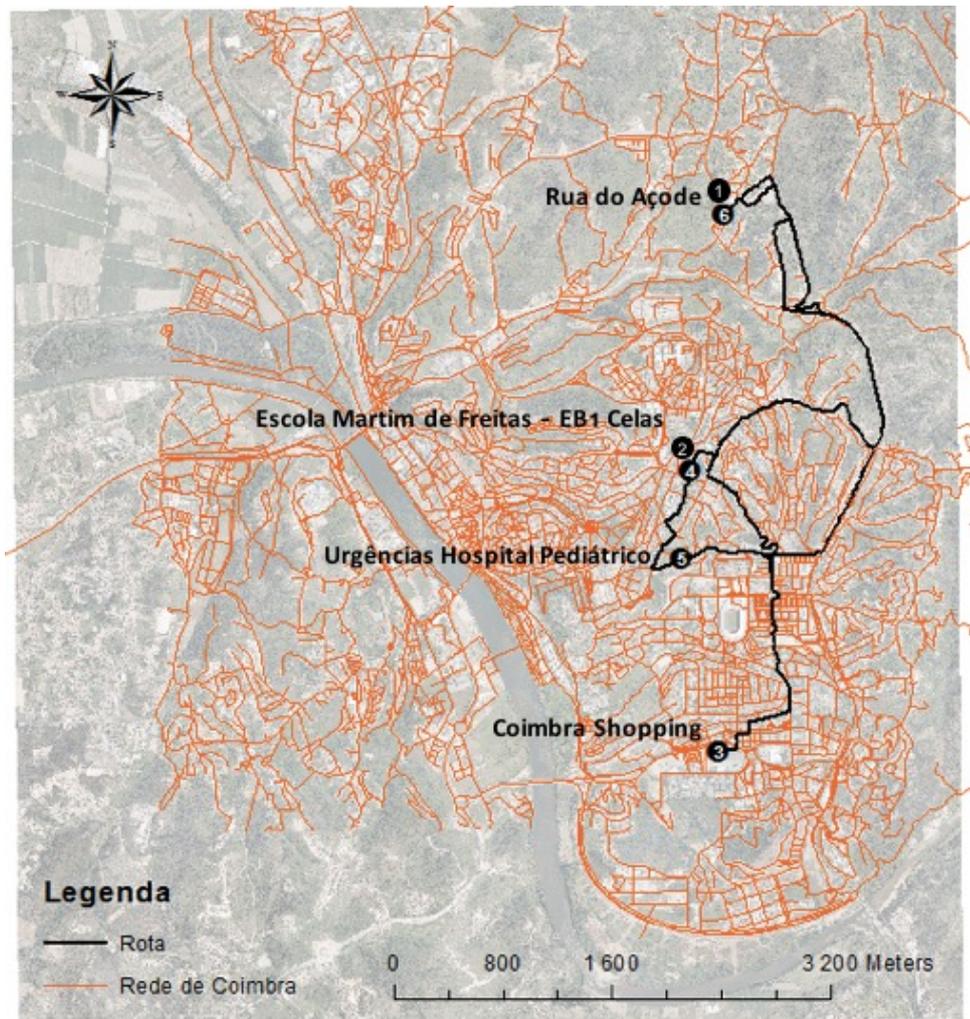
**Rota Tipo 9:** Casa – Equipamento escolar – Loja do Cidadão - Entretenimento – Parque – Casa;

**Rota Tipo 10:** Casa – Equipamento escolar – Local de trabalho – Equipamento escolar – Acesso primário de saúde – Casa;

**Rota Tipo 11:** Casa – Equipamento escolar – Local de trabalho – Associação cultural e desportiva – Equipamento desportivo – Equipamento escolar – Centro comercial – Casa;

**Rota Tipo 12:** Casa – Acesso primário de saúde – Farmácia – Força de segurança – Correios – mercearia – Casa;

Em cada tipo de rota geraram-se 6 exemplos diferentes, perfazendo, no total, 72 circuitos a serem analisados. A figura 9 representa um exemplo de circuito criado na rota tipo 10 na rede da cidade de Coimbra.



**Figura 9: Exemplo de um circuito criado na rota tipo 10 na rede da cidade de Coimbra.**

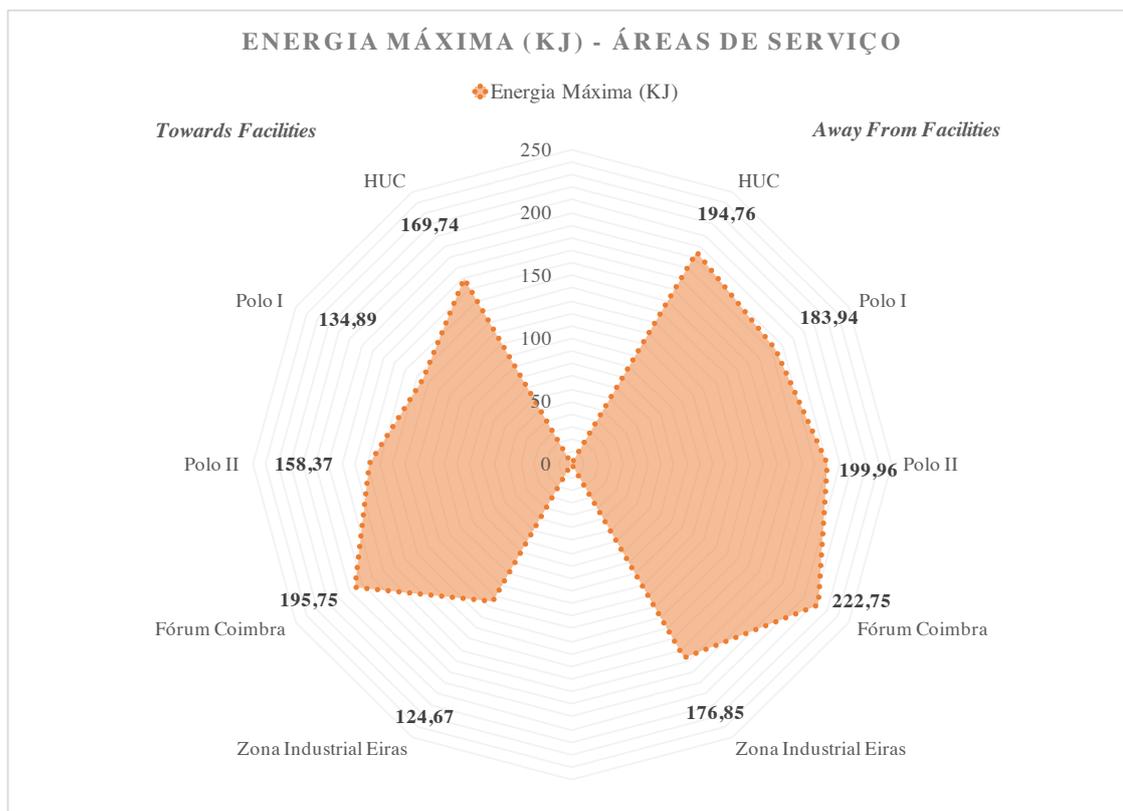
Este circuito corresponde a uma rota de tipo 10, Casa (Rua do Açode) → Equipamento escolar (Escola Martim Freitas) → Local de trabalho (Coimbra Shopping) → Equipamento escolar (Escola Martim Freitas) → Acesso Primário ( Maternidade Dr. Daniel Matos) → Casa (Rua do Açode). Este circuito percorreu uma distância de 18,5 km e requer sensivelmente 643,1 kJ de assistência elétrica, o que significa que está abaixo do limite máximo da capacidade da bateria.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção listam-se os resultados obtidos e procede-se a análise energética dos mesmos juntamente com estatísticas que complementam esta análise.

### 6.1 Viagens Pendulares

A figura 10 representa a energia máxima gasta em assistência, em kJ, para cada uma das áreas de serviço geradas, na secção 5.2, em ambos os sentidos, *Towards* e *Away*.



**Figura 10:** Energia máxima gasta em assistência, em kJ, para cada uma das áreas de serviço, em ambos os sentidos, *Towards Facilities* e *Away From Facilities*.

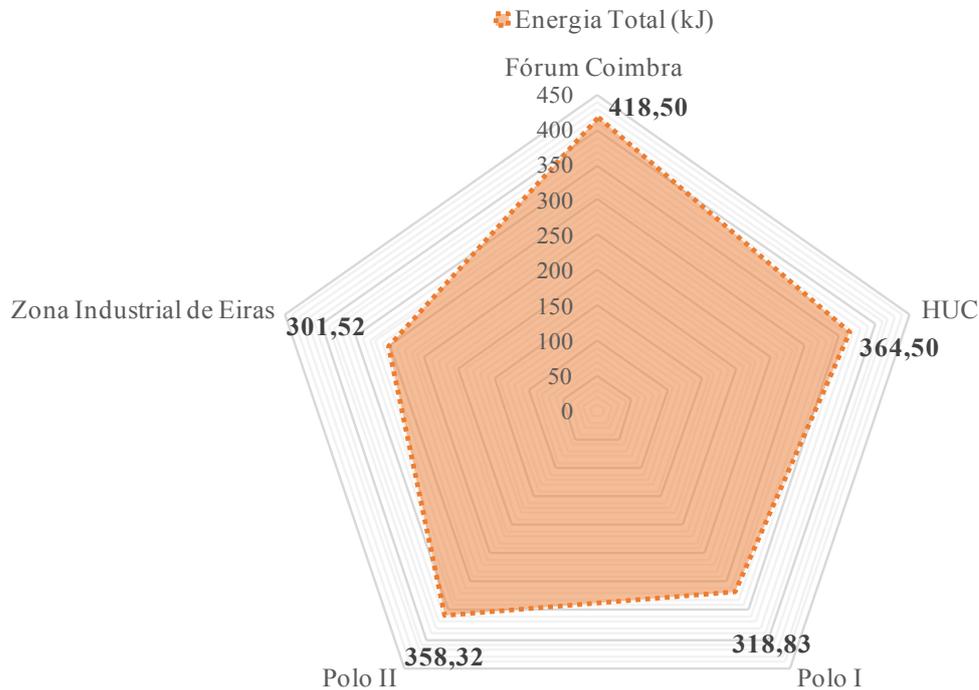
Como se vê, o valor máximo de assistência necessária para acesso/regresso a um local de trabalho está bem longe do máximo da capacidade do *pedelec* em estudo.

Se se somar as energias máximas *Towards* e *Away* para as áreas de serviço a cada empregador obtém-se a figura 10 que representa o pior cenário para as viagens pendulares no *pedelec*.

O maior destes valores, 418 kJ está ainda bem longe da capacidade da bateria e este valor pode nem sequer ser atingido, porque o valor máximo *Towards* pode não corresponder à mesma habitação que o *Away*.

---

## ENERGIA TOTAL (KJ) DE VIAGENS PENDULARES IDA-VOLTA



---

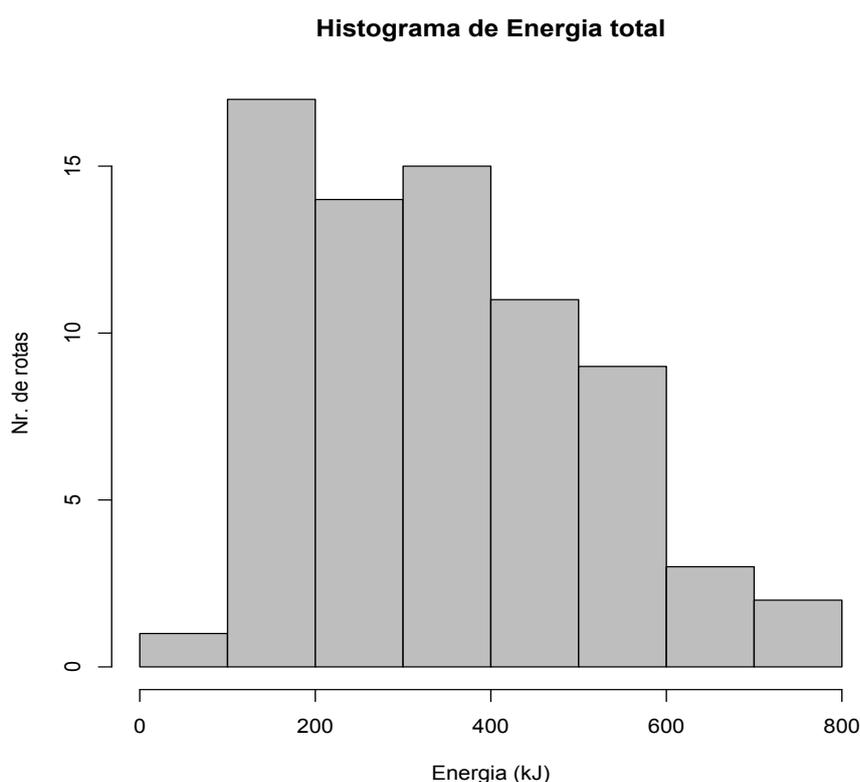
Figura 11: Somatório da energia total gasta, em kJ, em cada viagem pendular Ida-Volta.

Conclui-se assim que qualquer pessoa que mora na área de estudo pode recorrer ao *pedelec* como modo de transporte para as suas viagens casa-trabalho-casa. Esta conclusão responde à primeira das duas grandes questões deste estudo com um claro *sim*, *é possível que o principal circuito diário de uma pessoa na cidade de Coimbra, sem carga intermédia seja plenamente satisfeito por um pedelec*.

## 6.2 Circuitos Multipontos

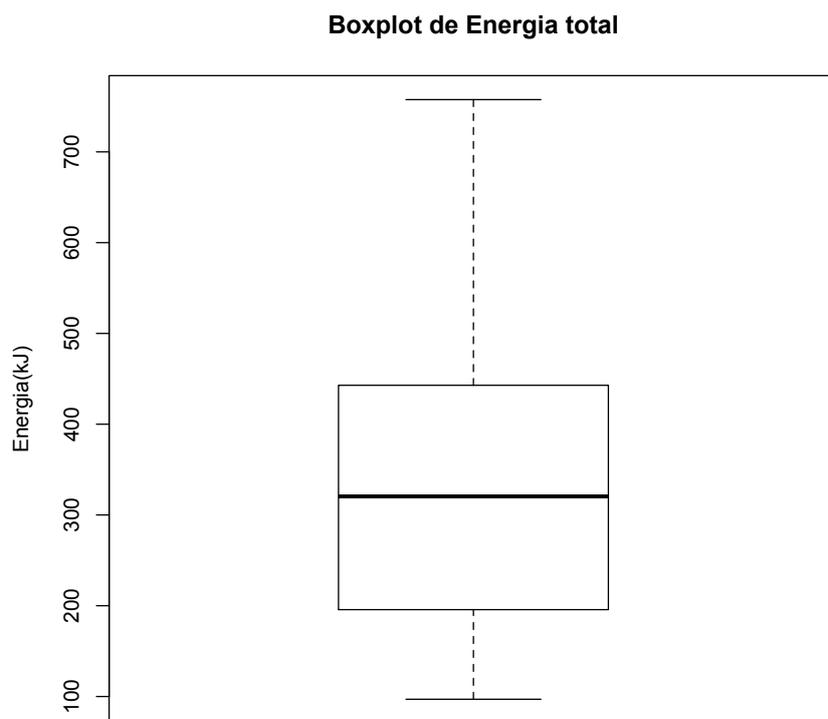
Em resposta à segunda grande questão sobre se é possível o *pedelec* satisfazer as necessidades de um ciclista que faça um uso mais intensivo deste modo de transporte, começar-se-á por analisar a distribuição estatística da energia necessária para os 72 circuitos diários calculados.

A figura 12 apresenta a distribuição de energia total gasta em kJ nos diferentes cenários gerados para cada tipo de rota com o *pedelec*, na secção 5.3.



**Figura 12: Energia total gasta (kJ) nos diferentes circuitos gerados em cada rota.**

O *boxplot* que representa a figura 12, correspondente ao histograma acima está representado na figura 13.



**Figura 13: Energia total gasta (kJ) em cada tipo de rota.**

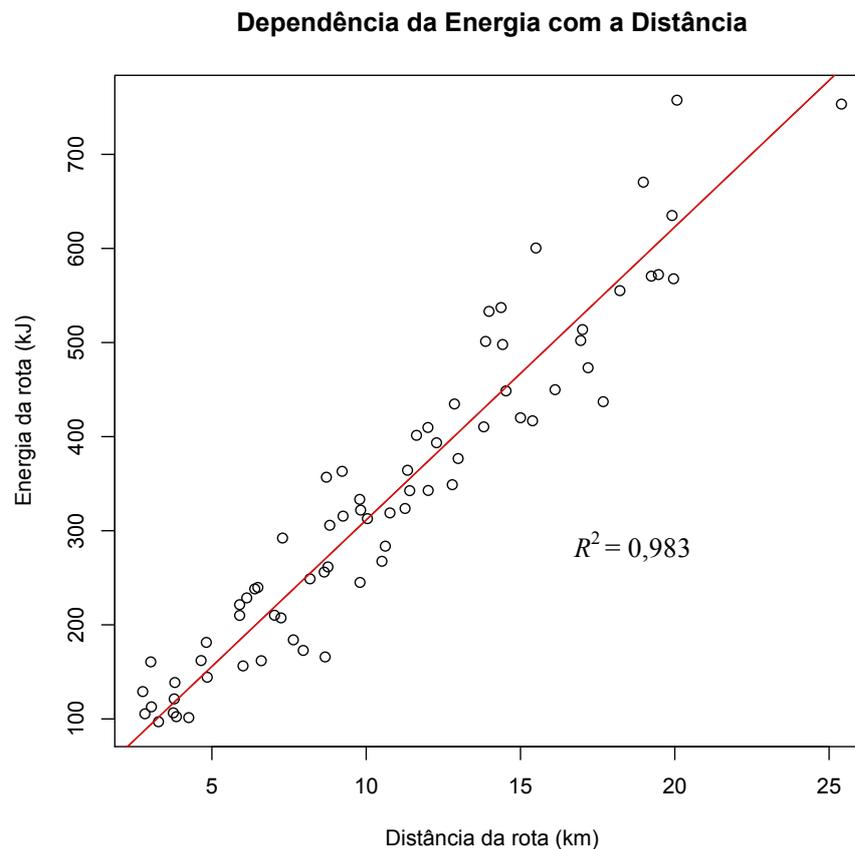
Passemos de seguida à análise desses resultados. Em primeiro lugar apenas 5 circuitos estão acima dos 600 kJ, e o máximo obtido, 758 kJ, é ainda assim inferior à capacidade máxima da bateria do *pedelec*. Estes circuitos junto ao limite são, como se irá ver, relativamente raros (7% do total), mas mesmo para estes, o *pedelec* em estudo pode, apesar da sua capacidade de bateria limitada, responder às exigências sobre esta. Saliente-se também que mais de metade dos circuitos efetuados, respetivamente, 47 de 72 (65%), requerem menos de metade da capacidade da bateria.

A conclusão é, portanto, que mesmo para dias atarefados e de uso intensivo é sempre possível recorrer ao *pedelec* para circular numa cidade de média dimensão declivosa, como é Coimbra.

Apresenta-se de seguida e a título complementar três análises estatísticas que podem ajudar a caracterizar e compreender os perfis destes circuitos.

Em primeiro lugar realizou-se uma análise de regressão linear entre a distância percorrida em cada circuito e a energia de assistência necessária para o mesmo. É de esperar que uma relação linear pronunciada entre estas duas variáveis. No entanto, se por ventura a dispersão em torno da reta de regressão, isso poderá ser indicador de uma concentração de zonas declivosas muito

pronunciadas em locais geograficamente pequenos. O diagrama de dispersão e a reta de regressão obtida estão representados na figura 14.



**Figura 14: Dependência da energia total gasta (kJ) em cada rota com a distância (km).**

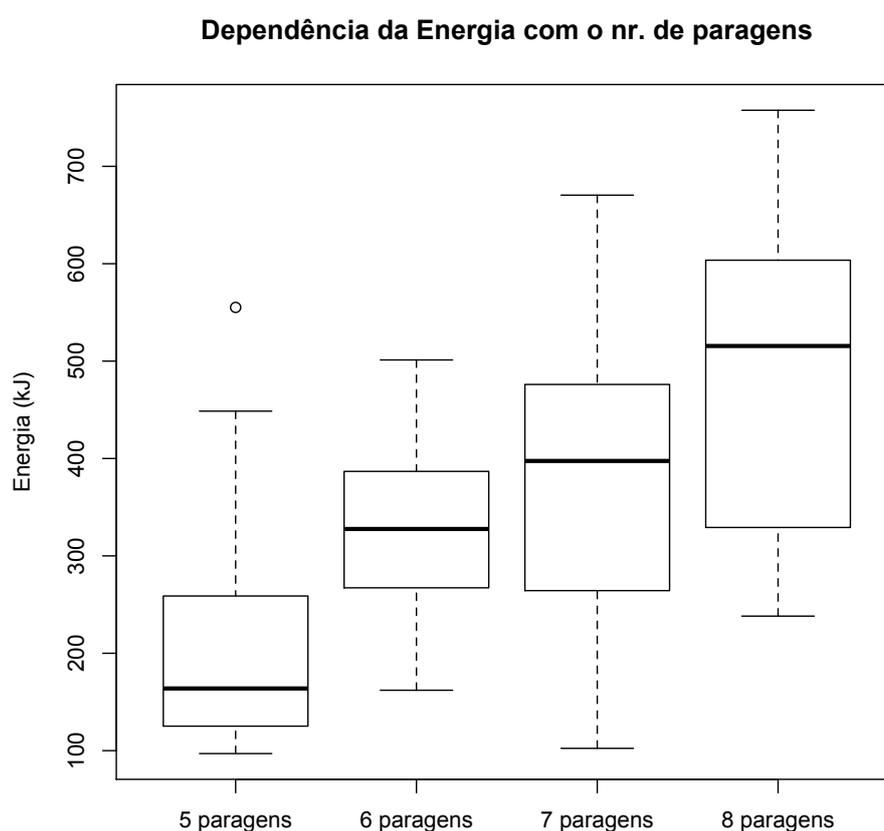
O modelo de regressão linear corrido foi  $Y = aX + 0$ . A interceção é zero, uma vez que se sabe previamente que quando a distância é zero a energia gasta também é zero.

Como se vê, os resultados exibem a esperada forte concordância linear entre as duas variáveis e um bom ajuste do modelo à realidade ( $R^2 = 0,983$ ). O erro-padrão de cerca de 50 kJ, o que pode ser interpretado de uma forma lata como cerca de 70% das vezes um circuito necessita de mais ou menos 50 kJ do que o estatisticamente esperado (7% da capacidade máxima da bateria). A dispersão entre energia e distância é, pois, ligeira, significando um espalhamento relativamente uniforme dos acidentes de terreno pela área de estudo e conseqüentemente dificuldade dos ciclistas em evitar o recurso à assistência elétrica. Esta baixa dispersão significa também que minimizar a distância originará resultados semelhantes ao que se obteriam minimizando a energia.

Por último, far-se-á notar que os resultados desta análise de regressão dizem respeito ao contexto de uso intensivo com múltiplas paragens. Naturalmente, pessoas que vivem em zonas de planalto, que existem em Coimbra, com serviços perto de sua casa, eventualmente, poderão dispensar um *pedelec* e usar uma bicicleta normal. É o caso, por exemplo, das pessoas que vivem e trabalham na Zona da Solum.

Em segundo lugar estudou-se a dependência da energia com o número de paragens dos circuitos. É de esperar que quanto mais paragens maior será a necessidade de assistência.

Na figura 15 abaixo tem-se um resumo descritivo dos resultados.

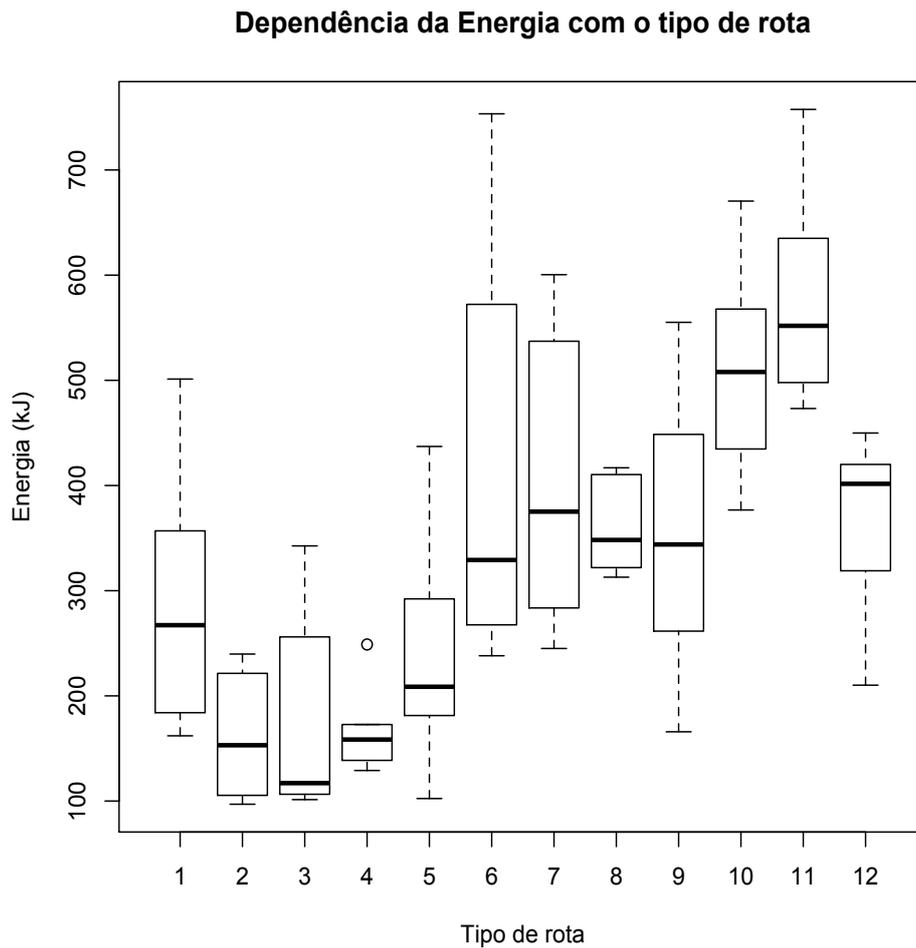


**Figura 15: Dependência da Energia total gasta (kJ) com o número de paragens de cada rota.**

Constata-se efetivamente que a energia média requerida aumenta com o número de paragens, mas que para sete e oito paragens a energia chega perto do máximo da bateria. Para circuitos com menos paragens (cinco e seis), quer isto dizer nas situações mais comuns (p.ex. casa – escola – trabalho – escola – casa), serão possíveis de realizar sem qualquer risco de perda de assistência.

Estatisticamente, uma análise de variância (ANOVA) confirma a dependência no número de paragens ( $p$ -value  $\approx 0$ ), com diferenças significativas entre cinco e seis paragens, entre cinco e sete ( $p$ -value  $\approx 0$ ) e sete e oito paragens ( $p$ -value  $\approx 8\%$ ).

Numa última análise, na figura 16 analisou-se a dependência da Energia total gasta, em kJ, com os diferentes tipos de circuitos gerados na rede da cidade de Coimbra. Novamente, uma ANOVA confirma a existência de diferenças estaticamente significativas consoante o tipo de circuito.



**Figura 16: Dependência da Energia total gasta (kJ) com os tipos de rota.**

Não é fácil de identificar características comuns aos tipos de circuitos (definidos na secção 5.3) mais exigentes (6, 10 e 11), no entanto, podemos verificar uma característica comum a estes circuitos, que é a visita dupla a equipamentos escolares.

### 6.3 Discussão dos Resultados

A análise apresentada nas duas secções anteriores permite-nos concluir que para o *pedelec* focado neste estudo, com uma bateria com capacidade máxima de 788 kJ (219 Wh), é efetivamente possível efetuar todos os circuitos sob assistência, independentemente do grau de intensidade com que o ciclista usa este modo de transporte. De facto, tanto para circuitos pendulares, que são os mais comuns no dia-a-dia de uma pessoa, como num uso multiponto sistemático e intensivo, nunca o ciclista esgota a capacidade de assistência da bateria.

No entanto, o cenário não é na prática, tão favorável como este estudo sugere. A verdade é que, à medida que o *pedelec* é usado e os quilómetros percorridos se acumulam, a bateria irá perdendo a sua capacidade máxima, condicionando o seu uso em situações mais intensivas. É sabido que no fim de alguns anos de utilização, mesmo as baterias mais modernas, evidenciam perdas de capacidade máxima que chegam aos 50%. Quando isto acontecer, um ciclista *hardcore* notará sem dúvida perdas de assistência no final do seu trajeto diário. Por outro lado, há que referir que 219 Wh é tipicamente uma capacidade baixa para um *pedelec*, existindo atualmente no mercado *pedelecs* com baterias com capacidades máximas de cerca de 400 Wh. Mesmo que a capacidade de bateria de um *pedelec* deste calibre reduza para metade ao longo dos anos, será sempre possível continuar a realizar circuitos pendulares e multiponto intensivos com este *pedelec*. E futuramente, estarão disponíveis no mercado *pedelecs* com capacidades superiores a 400 Wh.

Baseando-nos nos resultados da análise deste estudo, pode-se fazer a seguinte recomendação a uma pessoa que queira passar a deslocar-se de *pedelec* em Coimbra:

- Se o *pedelec* se destinar essencialmente a circuitos pendulares, pode optar por qualquer modelo, mesmo os de baixa autonomia.
- Se o *pedelec* se destinar a um uso diário muito intensivo recomenda-se um modelo de maior autonomia.

Estas recomendações possibilitarão uma escolha financeira e tecnicamente racional para o uso sustentado por largos anos.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação abordou-se o tema das bicicletas elétricas – *o pedelec*, de forma a estudar a permeabilidade da cidade de Coimbra perante este modo ativo de transporte eletricamente assistido. Através da tecnologia SIG e *software ESRI ArcGIS*, geraram-se circuitos multiponto e viagens pendulares ou áreas de serviço, de forma a aferir se seria possível uma pessoa deslocar-se no seu dia-a-dia exclusivamente por este modo de transporte sem incorrer em perda de assistência elétrica por falta de autonomia.

O SIG desenvolvido foi composto por diversos elementos com características e geometrias bastante diferentes, permitindo a construção de um modelo completo e realista, mas ao mesmo tempo bastante complexo. Ao longo desta dissertação observou-se que o SIG é uma ferramenta tecnológica de extrema utilidade, uma vez que o estudo de caso é um exemplo da aplicabilidade da sua tecnologia e da metodologia de análise integrada no *software ArcGIS*. Através das ferramentas do NA, foram gerados no total 72 circuitos multipontos e 5 áreas de serviço em pontos atratores da cidade de Coimbra (os maiores empregadores).

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que um *pedelec*, com uma bateria com capacidade máxima de 219 Wh (788 kJ), pode efetuar quaisquer circuitos do dia-a-dia de uma pessoa sob assistência, independentemente do grau de intensidade com que a pessoa usa este modo de transporte. No entanto, recomenda-se para quem o utilizar de forma muito intensiva, deve optar por um *pedelec* com maior autonomia para não perder assistência elétrica nas suas viagens pendulares diárias.

Um dos fatores inibitórios para o uso de bicicletas em cidades como Coimbra, é o declive. Todavia, através deste estudo, é possível afirmar que este deixará de ser um obstáculo para a população, pois, utilizando bicicletas elétricas com uma autonomia de 219 Wh ou superior, uma pessoa pode deslocar-se no seu dia-a-dia, realizando os seus circuitos diários, através deste modo de transporte, sem incorrer em perda de assistência elétrica, num raio de 15 km num circuito com subidas e descidas.

No entanto, é necessário destacar-se outro fator para uso limitado das bicicletas – a segurança da via e das pessoas. Esta, atualmente não é assegurada, uma vez que as condições das pistas para ciclistas, ciclovias, são muito escassas e medíocres. É importante que os políticos

responsáveis pelas políticas energéticas e de mobilidade sustentável, melhorem as condições de utilização deste modo de transporte, criando vias cicláveis. Estas trazem benefícios ao nível da redução do tráfego motorizado e aumento da qualidade de vida, que é altamente apreciado pela população de muitas cidades. A promoção e implementação de novas medidas e tecnologias inovadoras pode ter uma importante influência nos padrões de mobilidade dos cidadãos nas cidades modernas.

Esta dissertação permite fomentar o desenvolvimento de futuros estudos sobre a utilização de dados SIG na geração de circuitos multipontos e áreas de serviço sobre outra perspectiva, nomeadamente, utilizar impedâncias de tempo e verificação do custo energético acumulado de cada um deles. Poder-se-ia proceder também à comparação da energia total gasta pelo *pedelec* com custos energéticos e temporais associados ao uso do automóvel, ou qualquer veículo motorizado com maior potência, como também, a comparação com os investimentos iniciais e os diversos custos de manutenção e construir indicadores globais de rentabilidade associados a diferentes meios de transporte.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, (1999). “AASHTO Guide for the Development of Bicycle Facilities”, ISBN: 1-56051-102-8 (1999).
- Abagnale, C., Cardone, M., Iodice, P., Strano, S., Terzo, M., & Vorraro, G. (2015). Power requirements and environmental impact of a case study based on real-life applications. *Environmental Impact Assessment Review*, 53, 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.02.003>
- Andrade, P. (2012). O Direito, o Ambiente e a Mobilidade Sustentável: Aspectos Jurídicos da Mobilidade em Bicicleta. Retrieved from <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/23313>.
- Barton, H. (ed.) (2000) Sustainable Communities: the potential for eco-neighborhoods. Londres: Earthscan.
- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDRC), (2013). Movimentos Pendulares no futuro modelo de organização territorial da região centro de Portugal. 25.
- Cunha, J. R. (2011). Avaliação do Desempenho de Infraestruturas Pedonais em Meio Urbano com Técnicas de Análise de Multicritério. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialidade em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- Dave, S., 2010. Life Cycle Assessment of Transportation Options for Commuters. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston.
- Diretiva Europeia 2002/24/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Março de 2002, relativa à homologação dos veículos a motor de duas ou três rodas.
- Portaria nº 809/90 de 10 de Setembro. “Diário da República nº 209/90 - I Série”. Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação, da Saúde e do Ambiente e Recursos Naturais. Lisboa.



EEA (2006) Urban Sprawl in Europe – The Ignored Challenge. EEA

European Commission (EC), (2000). “Cycling: the way ahead for towns and cities”. Directorate-General for the Environment.

European Conference of the Ministers of Transport (ECMT). *National Policies to Promote Cycling*. Paris, France: Organization for Economic Cooperation and Development, 2004.

ESRI (1990). “Understanding GIS – The Arc/Info Method”. Environmental Systems Research Institute, Inc. United States of America.

Federal Highway Administration (FHWA), (2005). “FHWA Course on Bicycle and Pedestrian Transportation”, Instructor’s Version, U.S. Department of Transportation.

Ferreira, M. R. (2010). Avaliação Multi-Atributo de Atravessamentos Pedonais em Redes Viárias Urbanas. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialidade em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.

Fyhri, A., & Fearnley, N. (2015). Effects of e-bikes on bicycle use and mode share. *Transportation Research Part D*, 36, 45–52. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.005>.

Gama, M. A. (2011). Acessibilidade em Meio Urbano - Abordagem Espacial com Análise de Áreas de Influência e Trajetos em Redes, e Aplicação a um Caso de Estudo. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialidade em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.

Geurs, K.T., Wee, B. (2004) “Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions”. *Journal of Transport Geography* 12, pp. 127-140.

IEA - Key World Energy Statistics, International Energy Agency (2012);

ITS, N. L. &. (2012). Introduction to *ArcGIS*. NYO Libraries & ITS, (212), 1–9.



- Liu, S., & Zhu, X. (2004). Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, doi: 31, 105-124.
- Louro, A. (2011). O Uso do Tempo associado à Mobilidade das famílias como elemento diferenciador na configuração de uma Comunidade Sustentável. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Lisboa.
- Nunes, F., & Silva, D. A. (2003). Políticas Urbanas para uma Mobilidade Sustentável. *GeoINova*, 87 – 102.
- Muetze, A., & Tan, Y. C. (2007). Electric bicycles - A performance evaluation. *IEEE Industry Applications Magazine*, July-Aug, (8), 617. Retrieved from [www.iee.org/ias](http://www.iee.org/ias)
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE), (2004). “National Policies to Promote Cycling” European Conference of the Ministers of Transport, Paris.
- Parkin, J & Rotheram, J (2010) - “Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal.” *Transport Policy*, Vol. 17, 335-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.03.001>
- Pucher, J. 1997. ‘Bicycling Boom in Germany: A Revival Engineered by Public Policy.’ *Transportation Quarterly* 51, 4: 21-46
- Pucher, J., Buehler, R., Grabar, H., Buck, D., Borecki, N., Chung, P., Rawls, B. (2008). Cycling for Everyone: Lessons from Europe. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 436(October 2007), 265–279. <http://doi.org/10.3141/2387-13>
- Ribeiro, N. A. (2013). Estudo da Adequação de Áreas Urbanas aos Modos Suaves de Transporte - utilização de Tecnologia SIG em Aplicação à Cidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialidade em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.



- Timmermans, J.M., Matheys, J., Lataire, P., Mierlo, J.V., Cappelle, J., 2009. A comparative study of 12 electrically assisted bicycles. *World Electr. Veh. J.*
- Torres, M., Silva, L. T., Santos, L., & Mendes, J. F. G. (2013). Saúde e bem-estar em meio urbano: das políticas à prática. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, 31(1), 95–107. <http://doi.org/10.1016/j.rpsp.2013.04.001>
- Wieczorek, W. F., & Delmerico, A. M. (2009). Geographic information systems. *WIREs Computational Statistics*, 1(September/October), 167–186. <http://doi.org/10.1002/wics.021>
- Wolf, A., & Seebauer, S. (2014). Technology adoption of electric bicycles: A survey among early adopters. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 196–211. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.007>.



## 9 ANEXOS

### Anexo 1 – Viagens Pendulares – Áreas de Serviço

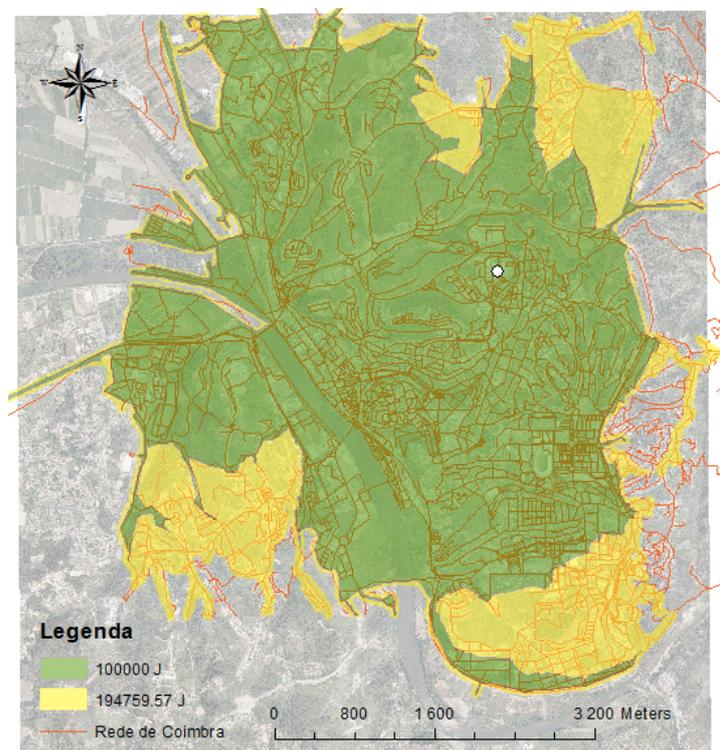


Figura 17 : Área de Serviço aos Hospitais da Universidade de Coimbra no sentido "Away From Facilities" (Origem)

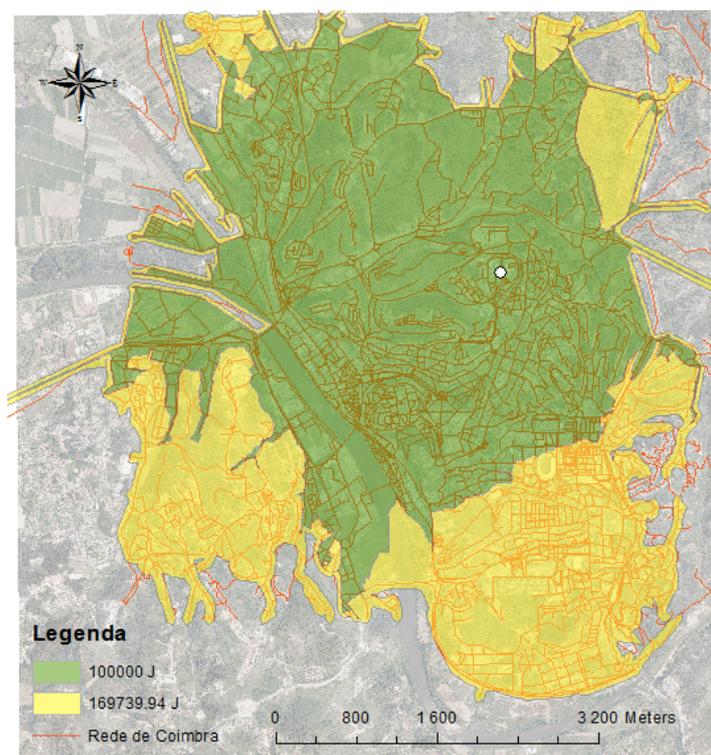
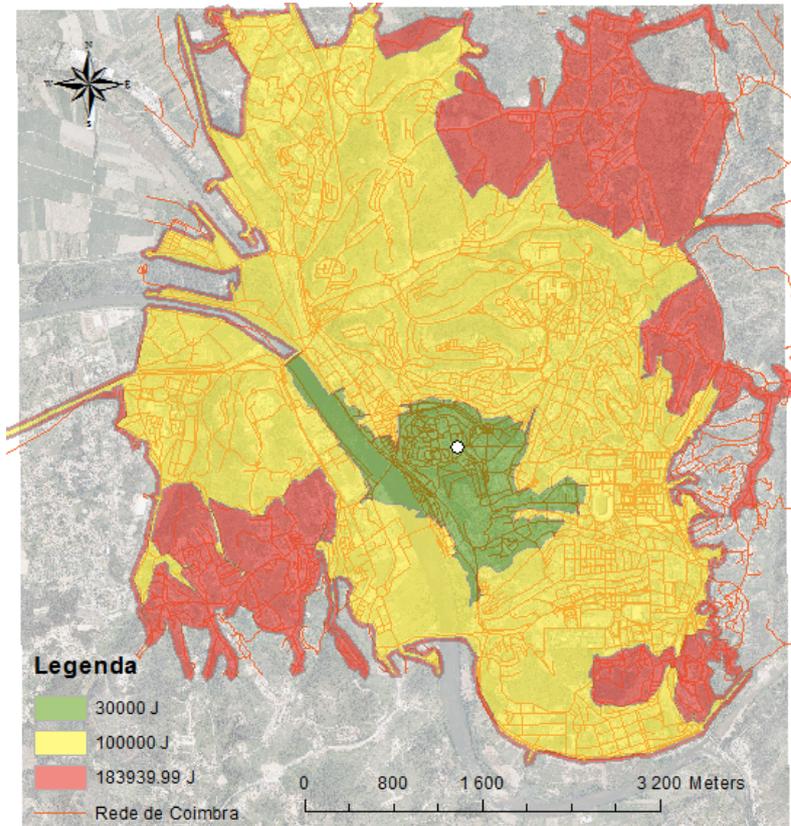
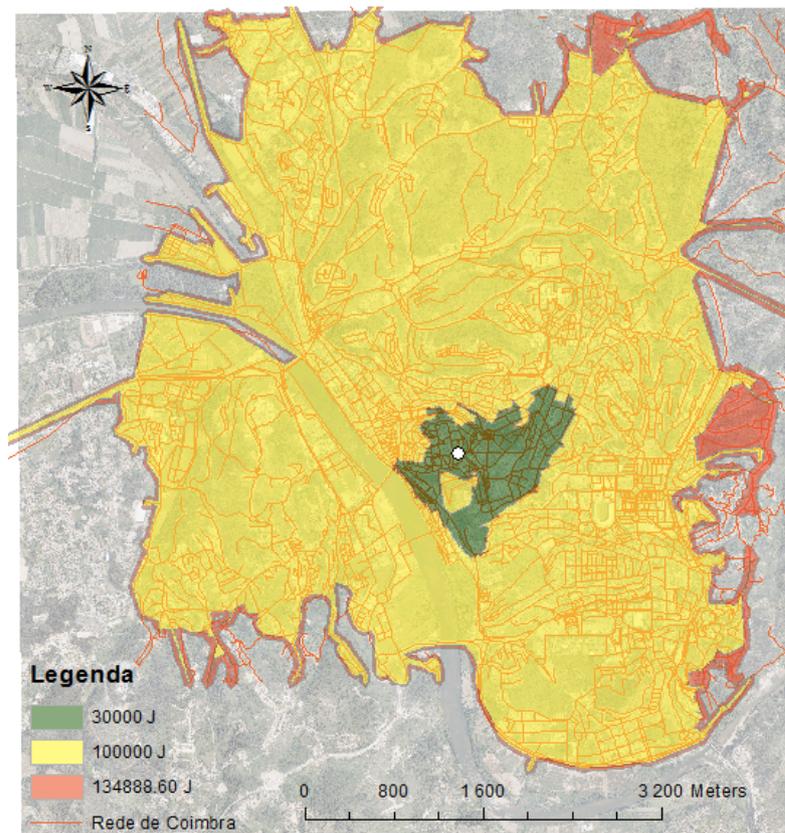


Figura 18: Área de Serviço aos Hospitais da Universidade de Coimbra no sentido "Towards Facilities" (Destino)



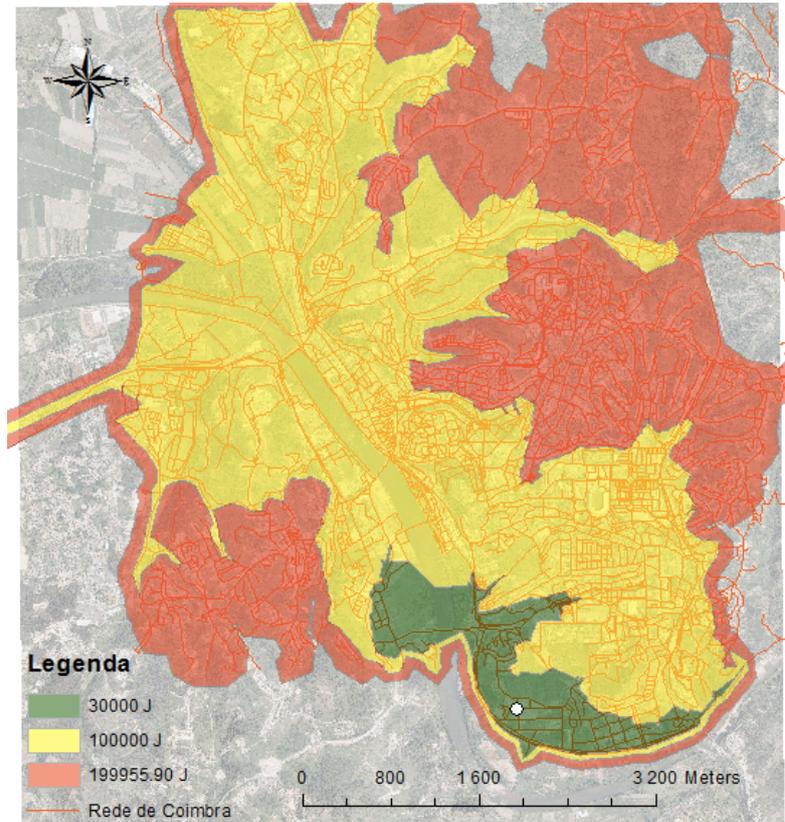


**Figura 19: Área de Serviço ao Polo I da Universidade de Coimbra no sentido “Away From Facilities” (Origem)**

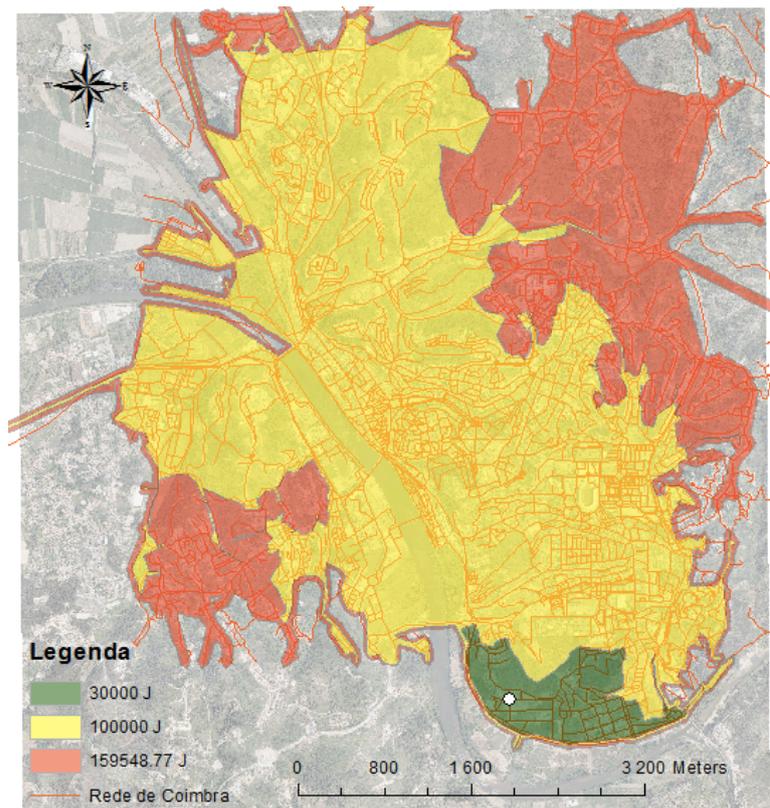


**Figura 20: Área de Serviço ao Polo I da Universidade de Coimbra no sentido “Towards Facilities” (Destino)**



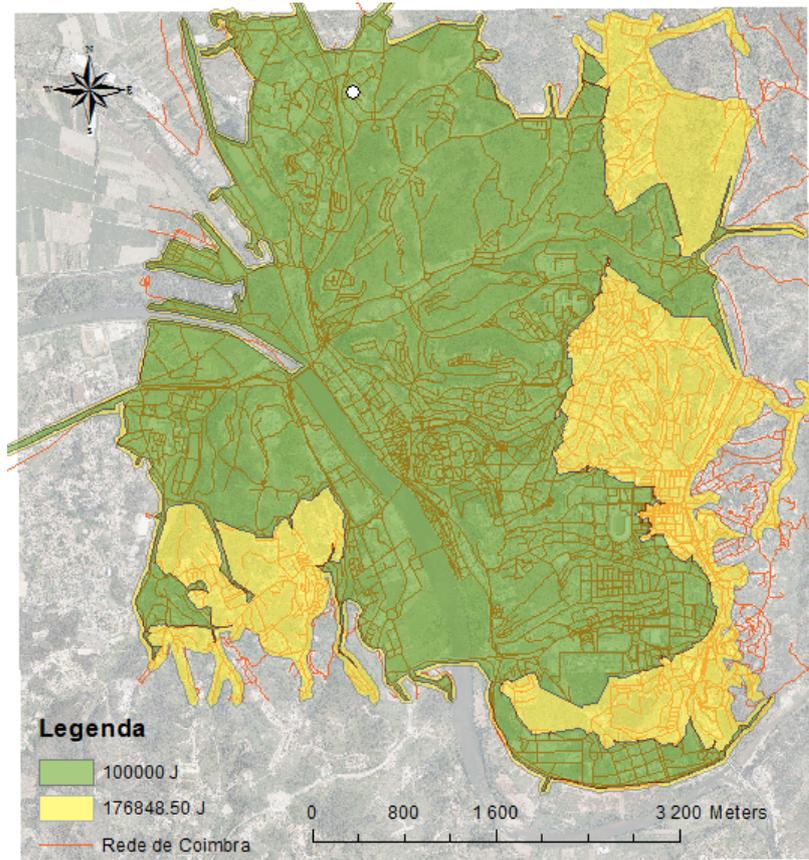


**Figura 21: Área de Serviço ao Polo II da Universidade de Coimbra no sentido “Away From Facilities” (Origem)**

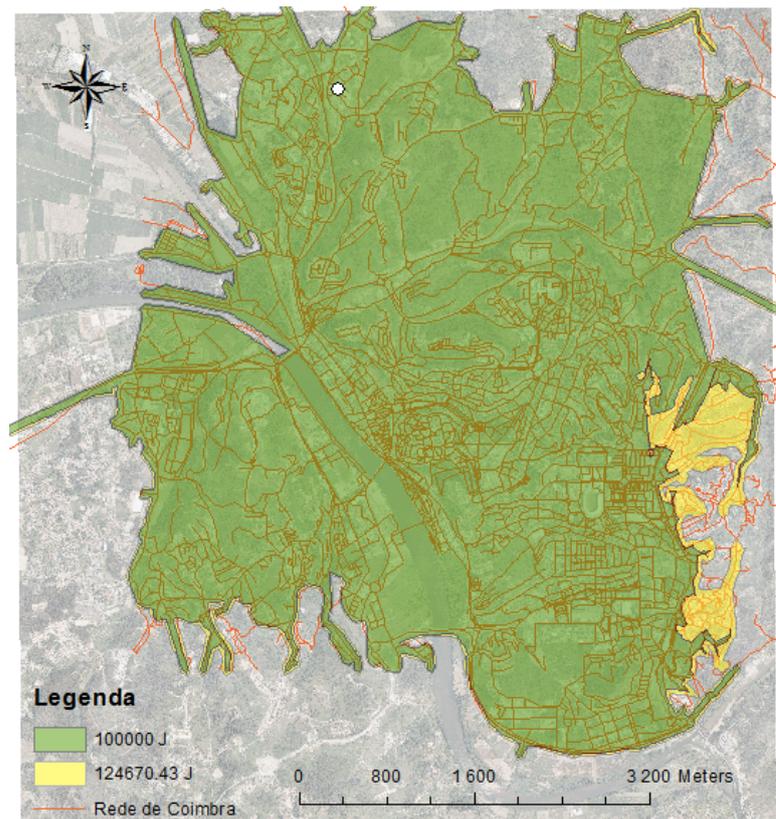


**Figura 22: Área de Serviço ao Polo II da Universidade de Coimbra no sentido “Towards Facilities” (Destino)**





**Figura 23: Área de Serviço à Zona Industrial de Eiras no sentido “Away From Facilities” (Origem)**



**Figura 24: Área de Serviço à Zona Industrial de Eiras no sentido “Towards Facilities” (Destino)**



## Anexo 2 – Circuitos Multipontos

Tabela 3 – Resumo da distância percorrida (km) e energia máxima (kJ) de cada um dos circuitos multipontos realizados com o pedelec.

<b>Rotas</b>	<b>Distância Percorrida (km)</b>	<b>Energia Máxima (kJ)</b>
<b>Rota 1</b>	13,87	501,19
<b>Rota 2</b>	8,71	356,89
<b>Rota 3</b>	4,65	162,03
<b>Rota 4</b>	8,82	305,80
<b>Rota 5</b>	6,13	228,61
<b>Rota 6</b>	7,64	184,01
<b>Rota 7</b>	4,85	144,27
<b>Rota 8</b>	6,60	161,85
<b>Rota 9</b>	2,83	105,42
<b>Rota 10</b>	6,49	239,75
<b>Rota 11</b>	3,27	96,99
<b>Rota 12</b>	5,90	221,41
<b>Rota 13</b>	4,25	101,37
<b>Rota 14</b>	3,04	112,82
<b>Rota 15</b>	3,78	121,26
<b>Rota 16</b>	3,75	106,46
<b>Rota 17</b>	11,41	342,59
<b>Rota 18</b>	8,64	256,06
<b>Rota 19</b>	2,76	129,05
<b>Rota 20</b>	3,02	160,61
<b>Rota 21</b>	8,18	248,87
<b>Rota 22</b>	3,80	138,67
<b>Rota 23</b>	6,01	156,32
<b>Rota 24</b>	7,96	172,79
<b>Rota 25</b>	4,82	181,31
<b>Rota 26</b>	3,85	102,38
<b>Rota 27</b>	7,24	207,36
<b>Rota 28</b>	7,29	292,22
<b>Rota 29</b>	5,90	209,98
<b>Rota 30</b>	17,68	437,14
<b>Rota 31</b>	6,39	238,15
<b>Rota 32</b>	19,47	572,23
<b>Rota 33</b>	10,51	267,52



<b>Rotas</b>	<b>Distância Percorrida (km)</b>	<b>Energia Máxima (kJ)</b>
<b>Rota 34</b>	9,25	315,52
<b>Rota 35</b>	12,01	342,80
<b>Rota 36</b>	25,40	753,39
<b>Rota 37</b>	9,80	245,06
<b>Rota 38</b>	12,79	348,93
<b>Rota 39</b>	10,62	283,59
<b>Rota 40</b>	14,37	537,17
<b>Rota 41</b>	15,50	600,45
<b>Rota 42</b>	11,63	401,41
<b>Rota 43</b>	9,82	321,93
<b>Rota 44</b>	13,81	410,40
<b>Rota 45</b>	9,79	333,31
<b>Rota 46</b>	10,04	312,85
<b>Rota 47</b>	15,39	416,84
<b>Rota 48</b>	9,22	363,12
<b>Rota 49</b>	8,76	261,54
<b>Rota 50</b>	14,53	448,61
<b>Rota 51</b>	8,67	165,86
<b>Rota 52</b>	11,26	323,65
<b>Rota 53</b>	11,34	364,26
<b>Rota 54</b>	18,22	555,14
<b>Rota 55</b>	19,96	567,75
<b>Rota 56</b>	16,95	502,15
<b>Rota 57</b>	18,52	643,06
<b>Rota 58</b>	12,98	376,73
<b>Rota 59</b>	17,01	513,75
<b>Rota 60</b>	12,86	434,72
<b>Rota 61</b>	19,91	635,00
<b>Rota 62</b>	17,19	473,19
<b>Rota 63</b>	19,24	570,56
<b>Rota 64</b>	14,42	497,88
<b>Rota 65</b>	20,07	757,57
<b>Rota 66</b>	13,98	533,13
<b>Rota 67</b>	10,77	318,93
<b>Rota 68</b>	16,12	449,90
<b>Rota 69</b>	7,03	210,17
<b>Rota 70</b>	12,28	393,51
<b>Rota 71</b>	15,00	420,05
<b>Rota 72</b>	12,00	409,72