



Inês Apolinário Castedo de Almeida

Licenciatura em Ciência de Engenharia do Ambiente

Avaliação e comparação do potencial solar e fotovoltaico em zonas urbanas.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente – Perfil de Gestão e Sistemas
Ambientais

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Calvão
Rodrigues, DCEA, FCT-UNL
Co-orientador: Doutora Evelina Brigitte Pires da Moura
Rodrigues, DCEA, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João António Muralha Ribeiro Farinha, FCT-UNL
Arguente: Prof. Doutora Maria Júlia Fonseca de Seixas, FCT-UNL
Vogais: Prof. Doutora Maria Teresa Calvão Rodrigues, FCT-UNL
Doutora Evelina Brigitte Pires da Moura Rodrigues, FCT-UNL

Avaliação e comparação do potencial solar e fotovoltaico em zonas urbanas.

Copyright © Inês Apolinário Castedo de Almeida, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

“Keep your face always toward the sunshine and shadows will fall behind you.”

— Walt Whitman

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, às minhas orientadoras de tese, a Professora Doutora Teresa Calvão e a Doutora Evelina Rodrigues, pelo apoio dado, pela disponibilidade para esclarecer dúvidas e pelos conhecimentos transmitidos ao longo da estruturação e desenvolvimento de todo o trabalho.

Agradeço à CGI Portugal por ter fornecido os modelos digitais de superfície das áreas em estudo, sem os quais esta dissertação não seria possível.

Aos meus amigos, colegas e familiares que sempre estiveram presentes e demonstraram preocupação com a tese, dando-me apoio e força para concluir esta etapa. A todos eles agradeço os momentos em que me ajudaram a desanuviar e a lembrar-me que eu era capaz.

Quero deixar ainda um agradecimento especial ao André pela presença constante em todos os momentos, pela motivação extra e por toda a paciência. Sem a sua presença, sem dúvida, que o trabalho pareceria ter o dobro do peso.

Por fim, agradeço às pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais, pelo carinho e conselhos que me deram não só ao longo de todo este processo, como durante toda a minha vida. Por todas as oportunidades que me proporcionaram e pelo apoio constante, um grande obrigado.

Resumo

Os recursos energéticos de origem fóssil são escassos em Portugal, sendo este um país muito dependente do exterior. Apesar desta realidade, o elevado potencial solar do país, quando comparado com outros países da Europa, é ainda subaproveitado. A aposta nas tecnologias solares permite, para além de aumentar a incorporação de fontes de energias renováveis no consumo bruto de energia elétrica, aumentar a segurança energética nacional e o crescimento económico do país. Nesta perspetiva, os sistemas fotovoltaicos distinguem-se das outras energias renováveis por apresentarem um potencial único de integração nas zonas urbanas, permitindo assim uma produção descentralizada da energia.

De modo a impulsionar o mercado solar em Portugal, é importante difundir a instalação de sistemas fotovoltaicos nas localizações mais adequadas. Assim, no presente estudo pretendeu-se calcular e comparar o potencial solar e fotovoltaico de duas zonas urbanas localizadas nos concelhos de Oeiras (zona Oeste) e Lisboa (zona Este), com recurso a sistemas de informação geográfica.

Os sistemas de informação geográfica são ferramentas adequadas para planear projetos de implementação de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas. O modelo solar utilizado foi o Solar Analyst, desenvolvido por Fu & Rich (2000). Os resultados obtidos permitiram avaliar a variação espacial da radiação solar nos telhados do edificado das zonas de estudo, tendo em conta o declive, orientação, variação temporal da radiação solar e efeito das sombras projetadas. O estudo contou ainda com as características específicas de cada área, tais como o edificado presente e a população residente.

Constatou-se que a área disponível para a implementação dos sistemas é um fator determinante no potencial fotovoltaico do edifício. Os edifícios não habitacionais (edifícios de serviço e públicos) foram os que apresentaram maior potencial de produção, por possuírem maiores áreas contíguas e por estarem sujeitos a menos sombreamentos.

Os resultados demonstraram que o potencial fotovoltaico da zona Oeste é de 10 963 MWh.ano⁻¹ com uma área adequada para a instalação de sistemas fotovoltaicos de 82 357 m². Na área Este o potencial fotovoltaico obtido foi de 8 136 MWh.ano⁻¹ para uma área ideal de 59 586 m². No final, constatou-se que a zona Oeste satisfaz 13% do consumo total anual de energia elétrica e a zona Este satisfaz 29%.

Palavras-chave: Potencial solar; Potencial fotovoltaico; Sistemas de informação geográfica; Radiação solar; Sistemas fotovoltaicos.

Abstract

Fossil fuel resources are scarce in Portugal, being a country very dependent on the outside. Despite this reality, the high solar potential of the country, when compared with other European countries, is still to be tapped. The investment in solar technologies allows, in addition to increasing the incorporation of renewable energy sources in gross electricity consumption, increase national energy security and economic growth of the country. In this perspective, photovoltaic systems distinguish from other renewables because they have a unique integration potential in urban areas, allowing decentralized production of energy.

In order to boost the solar market in Portugal, it is important to spread the installation of photovoltaic systems in the most suitable locations. Thus, the aim of the present study was to calculate and compare the solar potential and photovoltaic potential in two urban areas located in the municipalities of Oeiras (West zone) and Lisbon (East zone), using geographic information systems.

Geographic information systems are appropriate tools for planning implementation projects of photovoltaic systems in urban areas. The solar model used was Solar Analyst, developed by Fu & Rich (2000). The results obtained allowed to evaluate the spatial variation of solar radiation on the rooftops of the areas under study, taking into account the slope, aspect, temporal variation of solar radiation and the effects of shadows cast. The study also included the specific characteristics of each area, such as buildings and resident population.

It was found that the area available for the implementation of the systems is a key factor in the photovoltaic potential of the building, since the uninhabited buildings (like public and service buildings) were those with the greatest production potential, because they have larger contiguous areas and fewer shadows.

The results demonstrated that the photovoltaic potential of the West zone is 10 963 MWh/year with a suitable area for installation of photovoltaic systems of 82 357 m². In the East area, the photovoltaic potential obtained was 8 136 MWh/year for an ideal area of 59 586 m². In the end, it was found that the West zone meets 13% of the total annual consumption of electricity and the East zone meets 29%.

Keywords: Solar potential; Photovoltaic potential; Geographic information systems; Solar radiation; Photovoltaic systems.

Índice de matérias

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. Radiação solar.....	5
2.1. Variação temporal	7
2.2. Variação espacial.....	9
3. A energia solar em Portugal.....	13
3.1. Quadro energético atual	13
3.2. Legislação e políticas de apoio.....	14
3.3. Tecnologias solares em meios urbanos	18
4. Integração de sistemas de informação geográfica no planeamento urbano	23
4.1. Tecnologia LiDAR.....	23
4.2. Modelos solares.....	26
5. Metodologia	27
5.1. Caracterização das áreas de estudo	27
5.2. Determinação da radiação incidente nas áreas de estudo.....	29
5.3. Determinação da radiação incidente nos telhados.....	34
5.4. Seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos	35
5.5. Determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo.....	36
6. Resultados.....	39
6.1. Caracterização das áreas de estudo	39
6.1.1 Área Oeste.....	39
6.1.2 Área Este	48
6.2. Determinação da radiação incidente nas áreas de estudo.....	57
6.3. Determinação da radiação incidente nos telhados.....	58
6.4. Seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos	61
6.5. Determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo.....	66
7. Discussão de resultados	71
7.1. Características das áreas de estudo.....	71
7.2. Radiação incidente nas áreas de estudo.....	72
7.3. Radiação incidente nos telhados	76
7.4. Locais ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos	78
7.5. Potencial fotovoltaico das áreas de estudo.....	79

8. Conclusão.....	83
8.1. Síntese	83
8.2. Limitações do estudo e desenvolvimentos futuros.....	85
Referências bibliográficas	88
Legislação consultada	94
Anexo 1 – Caracterização das zonas de estudo.....	I
Anexo 2 – Resultados do Modelo Solar Analyst	III
Anexo 3 – Valores SolTerm.....	VII

Índice de figuras

Figura 2.1 - Influência do ângulo de incidência dos raios solares: a) ângulos de incidência e penetrações para as diferentes latitudes; b) influência da inclinação dos raios solares na área varrida (Peixoto, 1981).....	9
Figura 2.2 - Carta da distribuição da insolação média de Portugal em número de horas de sol por ano (horas/ano) (Peixoto, 1981).....	10
Figura 2.3 - Mapa da distribuição da radiação global média anual na Europa (GeoModel Solar, 2011).....	11
Figura 3.1 - Evolução da dependência energética em Portugal (adaptado de DGEG, 2013a)....	13
Figura 3.2 - Evolução do quadro legal de apoio ao desenvolvimento do mercado fotovoltaico.	17
Figura 3.3 - Soma anual da geração de eletricidade de um módulo fotovoltaico de 1kWp colocado horizontalmente (kWh/kWp) (Šúri <i>et al.</i> , 2007).....	20
Figura 4.1 - Múltiplos retornos a partir de um feixe laser de um sistema LiDAR (NOAA, 2012).....	25
Figura 5.1 - Exemplos de edifícios: a) Habitação unifamiliar; b) Habitação multifamiliar; c) Anexo; d) Edifício de serviço.....	28
Figura 5.2 - Metodologia para a caracterização das áreas de estudo.....	29
Figura 5.3 – a) <i>Viewshed</i> ; b) <i>Sunmap</i> ; c) <i>Skymap</i> ; d) Sobreposição do <i>viewshed</i> com o <i>sunmap</i> ; e) Sobreposição do <i>viewshed</i> com o <i>skymap</i> (Fu & Rich, 2000).	31
Figura 5.4 - Metodologia do cálculo de radiação solar incidente.....	34
Figura 5.5 - Metodologia de cálculo da radiação solar incidente nos telhados.....	35
Figura 5.6 - Metodologia para seleção dos melhores locais para implementação de sistemas fotovoltaicos.....	36
Figura 6.1 - Área de estudo Oeste (Bing Maps, 2010).....	39
Figura 6.2 - MDS da zona Oeste.....	40
Figura 6.3 - Evolução anual do consumo total de energia elétrica no concelho de Oeiras (adaptado de INE, 2011a).....	41
Figura 6.4 - Consumo de energia elétrica por sector no concelho de Oeiras (adaptado de INE, 2011a).....	42
Figura 6.5 - Percentagem de edifícios por tipologia na zona Oeste (adaptados de INE,2011b) .	42
Figura 6.6 – Mapa da distribuição de tipologia de edifícios na zona Oeste.....	43
Figura 6.7 – Número de edifícios por classes de ano de construção na zona Oeste (adaptado de INE, 2011b).....	44
Figura 6.8 - Número de edifícios por número de pisos na zona Oeste (adaptado de INE, 2011b).....	44
Figura 6.9 – Mapa da densidade populacional por subsecções da zona Oeste (adaptado de INE, 2011b).....	45
Figura 6.10 - Mapa de declives da zona Oeste.....	46
Figura 6.11 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de declive.....	46
Figura 6.12 - Mapa de orientações da zona Oeste.....	47
Figura 6.13 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de orientação.....	47
Figura 6.14 - Área de estudo Este (Bing Maps, 2010).....	48
Figura 6.15 - MDS da zona Este.....	49
Figura 6.16 - Evolução anual do consumo total de energia elétrica no concelho de Lisboa (adaptado de INE, 2011a).....	50
Figura 6.17 - Consumo de energia elétrica por sector no concelho de Lisboa (adaptado de INE, 2011a).....	51

Figura 6.18 – Percentagem de edifícios por tipologia na zona Este (adaptado de INE, 2011b) .	51
Figura 6.19 – Mapa da distribuição de tipologia de edifícios na zona Este	52
Figura 6.20 - Número de edifícios por classes de ano de construção na zona Este (adaptado de INE, 2011b).....	53
Figura 6.21 - Número de edifícios por número de pisos na zona Este (adaptado de INE, 2011b)	53
Figura 6.22 – Mapa da densidade populacional por subsecções estatística da zona Este (adaptado de INE, 2011b)	54
Figura 6.23 - Mapa de declives da zona Este	55
Figura 6.24 - Distribuição da área total da zona Este por classes de declive	55
Figura 6.25 - Mapa de orientações da zona Este.....	56
Figura 6.26 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de orientação.....	56
Figura 6.27 - Mapa da radiação global anual da zona Oeste.....	57
Figura 6.28 – Mapa da radiação global anual da zona Este	58
Figura 6.29 - Mapa da radiação global anual nos telhados dos edifícios da zona Oeste.....	59
Figura 6.30 - Mapa da radiação global anual nos telhados dos edifícios da zona Este	60
Figura 6.31 - Radiação global anual por percentagem de área de edifício nas duas zonas de estudo	61
Figura 6.32 - Radiação global anual por tipologia de edifício nas duas zonas de estudo	61
Figura 6.33 - Valores máximos de radiação global anual por declive nas duas zonas de estudo	62
Figura 6.34 - Valores máximos de radiação global anual por orientação	62
Figura 6.35 – Mapa da radiação global média anual nos edifícios ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos da zona Oeste	63
Figura 6.36 – Mapa da radiação global média anual nos edifícios ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos da zona Este	64
Figura 6.37 – Mapa das áreas adequadas e não adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos na zona Oeste.....	65
Figura 6.38 – Mapa das áreas adequadas e não adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos na zona Este.....	66
Figura 6.39 - Energia potencial produzida nas coberturas dos edifícios ideais da zona Oeste ...	67
Figura 6.40 - Energia potencial produzida nas coberturas dos edifícios ideais da zona Este	68
Figura 7.1 - Variação mensal da insolação nas estações de Sassoeiros e Tapada da Ajuda	72
Figura 7.2 - Comparação entre a radiação mensal máxima da zona Oeste e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Oeiras.....	74
Figura 7.3 - Comparação entre a radiação mensal máxima da zona Este e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Lisboa.....	74
Figura 7.4 - Comparação entre a radiação mensal média da zona Oeste e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Oeiras	75
Figura 7.5 - Comparação entre a radiação mensal média da zona Este e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Lisboa.....	75
Figura 7.6 - Duração máxima de radiação direta ao longo do ano nas duas zonas de estudo.....	76
Figura 7.7 - Radiação global anual incidente num edifício de serviço da zona Oeste	77
Figura 7.8 - Radiação global anual incidente nas coberturas com diferentes orientações	78

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Eficiência de células e módulos fotovoltaicos (Adaptado de Max Fordham and Partners & Feilden Clegg Architects, 1999)	18
Tabela 5.1- Valores SolTerm de transmissividade e proporção difusa para o concelho de Lisboa	33
Tabela 5.2 - Valores SolTerm de transmissividade e proporção difusa para o concelho de Oeiras	33
Tabela 6.1 - Valores de insolação da estação de Sassoeiros/Oeiras (adaptado de INMG, 1991) 41	
Tabela 6.2 - Valores de insolação da estação de Tapada da Ajuda/Lisboa (adaptado de INMG, 1991)	50
Tabela 6.3 - Resultados da seleção dos melhores locais para instalação de sistemas fotovoltaicos nas duas zonas de estudo.....	64
Tabela 6.4 - Resultados da energia produzida nas duas zonas de estudo.....	67
Tabela 6.5 - Resultados do consumo de energia elétrica anual e produção potencial de energia fotovoltaica nas duas zonas de estudo.....	69
Tabela 6.6 - Emissão e redução de CO ₂ e nas duas zonas de estudo.....	69
Tabela 7.1 - Quantidade de edifícios totais, ideais e excluídos por zona de estudo e tipologia..	79
Tabela A1.1 - Características da zona Oeste e Este	I
Tabela A2.1 - Resultados mensais e totais para a radiação global na zona Oeste.....	III
Tabela A2.2 - Resultados mensais e totais para a radiação global na zona Este.....	III
Tabela A2.3 - Resultados mensais e totais para a radiação difusa na zona Oeste.....	IV
Tabela A2.4- Resultados mensais e totais para a radiação difusa na zona Este	IV
Tabela A2.5 - Resultados mensais e totais para a radiação direta na zona Oeste	V
Tabela A2.6 - Resultados mensais e totais para a radiação direta na zona Este.....	V
Tabela A2.7 - Resultados mensais e totais para a duração de radiação direta na zona Oeste	VI
Tabela A2.8 - Resultados mensais e totais para a duração de radiação direta na zona Este	VI
Tabela A3.1 – Valores SolTerm mensais e totais da radiação global na zona Oeste e Este	VII

Lista de acrónimos e unidades

3D – Três Dimensões

µm – Micrómetro

λ – Comprimento de onda

°C – Graus Celsius

BGRI – Base Geográfica de Referência da Informação

Btu - Unidade térmica Britânica

CO₂ – Dióxido de Carbono

FER – Fontes de Energia Renováveis

GPS – Global Positioning System

GW – Gigawatt

ID – Identidade

INE – Instituto Nacional de Estatística

IMU – Inertial Measurement Unit

K – Kelvin

km - Quilómetro

kW – Kilowatt

LiDAR – Light Detection And Ranging

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

m – Metro

mm - Milímetro

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MW – Megawatt

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PVGIS – Photovoltaic Geographic Information System

SEI – Sistema Elétrico Independente

SEP – Sistema Elétrico de Serviço Público

SIG – Sistema de Informação Geográfica

ton - Tonelada

TW – Terawatt

UE – União Europeia

W – Watt

Wh – Watt-hora

Wp – Watt-pico

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Cerca de 80% da população europeia reside, atualmente, nas cidades, levando a que 75% da procura total de energia tenha origem nas zonas urbanas e que estas sejam produtoras de 75% do total de emissões de CO₂ (Grauthoff *et al.*, 2012). Estima-se que, nos próximos 30 anos, o maior crescimento populacional ocorrerá em zonas urbanas nos países desenvolvidos levando a que, em 2050, sete pessoas em cada dez vivam em cidades (United Nations, 2012).

Este crescimento dos grandes aglomerados urbanos leva a sérios problemas de poluição e diminuição da qualidade de vida, tanto a nível local como regional, em consequência da produção e consumo de energia (Collares-Pereira, 1998). Assim, no mundo atual é essencial que haja uma maior aposta nas energias renováveis, de modo a contribuir para a diversificação e sustentabilidade do sector energético bem como para responder ao desafio criado pelas alterações climáticas. A investigação destas novas fontes de energia tem permitido o aumento da sua implementação no mercado, constituindo um motor de desenvolvimento económico, social e tecnológico (Ministério da Economia e da Inovação, 2007).

A nível local, um dos aspetos mais importantes na investigação de tecnologias de energias renováveis é a compreensão do potencial de cada tecnologia nas diferentes áreas geográficas. Este é influenciado por diversos fatores que podem afetar a produção de energia. A integração de energias renováveis no meio urbano é uma resposta aos desafios da segurança do abastecimento, permitindo a produção e consumo local, promovendo assim a descentralização de energia, e reduzindo as perdas na distribuição desta (Voivontas *et al.*, 1998).

Os sistemas solares destacam-se, entre outras tecnologias de energias renováveis, pelo seu potencial único de integração no meio urbano. Neste contexto, a energia solar pode dar um contributo relevante para a sustentabilidade das zonas urbanas, quando devidamente integrada no planeamento (Grauthoff *et al.*, 2012). De facto, a flexibilidade dos sistemas solares, tanto fotovoltaicos como térmicos, permite que esta tecnologia se funda no ambiente urbano através da sua integração nos edifícios. Sendo o edificado a base de implementação destes sistemas, as características das estruturas urbanas revelam-se de extrema importância para a aplicação das tecnologias solares (Max Fordham and Partners & Feilden Clegg Architects, 1999).

Assim, torna-se fundamental a disponibilização de informação adequada acerca do potencial solar de edifícios em cada comunidade, tanto para os planeadores urbanos como para a própria população residente. A avaliação de superfícies com recurso a deteção remota e processamento de dados com sistemas de informação geográfica (SIG) é uma das metodologias em desenvolvimento que permite a análise do potencial das zonas urbanas. Estas ferramentas

constituem um apoio fundamental à solução de problemas e tomada de decisões a nível do planeamento urbano (Pellegrino *et al.*, 2008; Voivontas *et al.*, 1998).

1.2. Objetivos

Nesta dissertação é apresentada uma metodologia para estimar a radiação solar incidente nas coberturas dos edifícios presentes em duas zonas de estudo. Pretende-se identificar as melhores localizações para a instalação de sistemas fotovoltaicos, bem como estimar o seu potencial. Assim, o estudo visa responder a três questões:

- I. Qual o potencial solar e fotovoltaico das zonas de estudo?
- II. Quais são os melhores locais para a implementação de sistemas fotovoltaicos?
- III. Quais as principais diferenças entre as zonas de estudo e que influências têm no potencial das áreas?

A resposta a estas questões pressupõe um estudo aprofundado acerca das duas áreas em análise. Assim, com recurso à utilização de SIG, pretende-se obter conhecimentos úteis acerca da caracterização das zonas de estudo, bem como do potencial das coberturas dos edifícios, com a motivação de promover o aproveitamento de energia solar no ambiente urbano.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por oito capítulos. O primeiro capítulo, referente à introdução, estabelece o enquadramento do tema bem como os objetivos que se pretendem alcançar e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é descrito o fenómeno da radiação solar focando, principalmente, na radiação que atinge a superfície terrestre e a sua variação tanto temporal como espacial.

No terceiro capítulo é descrito o quadro energético atual bem como, a legislação e políticas de apoio existentes, de modo a enquadrar a energia solar em Portugal, e as tecnologias existentes para seu aproveitamento.

No quarto capítulo é focada a integração de SIG no planeamento urbano, a utilização de dados LiDAR e os modelos solares existentes para estimar a energia solar incidente na superfície terrestre.

No quinto capítulo é descrita a metodologia que foi aplicada para a realização do estudo. Este encontra-se dividido em cinco partes que representam as etapas seguidas para o cumprimento dos objetivos propostos.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada etapa, diferenciando as duas áreas de estudo. Posteriormente, os resultados apresentados são então discutidos no sétimo capítulo.

No oitavo capítulo são apresentadas por fim as conclusões, identificadas as limitações do estudo e propostos desenvolvimentos futuros.

2. Radiação solar

O Sol é um enorme reator onde ocorre a fusão de núcleos de hidrogénio para a formação de hélio gerando, assim, energia a partir da sua massa (GREENPRO, 2004a). Esta estrela irradia para o espaço uma grande quantidade de energia com uma distribuição espectral semelhante à de um corpo negro à temperatura de 6 000 K. Propagando-se sob a forma de ondas eletromagnéticas, a uma velocidade de $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, a radiação demora cerca de 8 minutos a atingir a atmosfera terrestre (McVeigh, 1977; Peixoto, 1981).

Esta forma de propagação não requer um meio material de suporte, nem contato com o corpo radiante, assim a radiação pode deslocar-se no espaço desprovida de matéria. A energia é caracterizada pelo comprimento de onda cujo valor pode ir de centenas de metros até valores inferiores a 10^{-10} metros. Todavia, cerca de 99% da energia solar possui comprimentos de onda entre 0,150 e 4,0 micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), localizando-se na região do espectro que compreende o visível ($0,430 < \lambda < 0,760 \mu\text{m}$), bem como grande parte do infravermelho ($\lambda > 0,760 \mu\text{m}$) e do ultravioleta ($\lambda < 0,430 \mu\text{m}$) (Peixoto, 1981).

Todos os processos físicos e químicos que ocorrem na Terra, responsáveis pelas condições meteorológicas, circulações oceânicas, transformação da crosta terrestre e todos os fenómenos biológicos são, em última análise, o resultado da energia solar (Atlas do Ambiente, 1988). A radiação solar constitui uma fonte de energia limpa, abundante e inesgotável (à escala temporal humana) estando disponível em todo o planeta. Parte desta radiação pode ser captada e transformada em formas úteis de energia, tais como energia térmica e elétrica, com recurso a uma grande variedade de tecnologias (Hofierka & Šúri, 2002).

Para determinar a viabilidade técnica e económica da implementação de tecnologias de utilização da energia solar, num determinado local da superfície terrestre, é indispensável quantificar a radiação solar que incide nesse local. Para tal, é necessário ter em conta não só o total anual, como também a sua variação ao longo do ano. A quantidade de energia solar que atinge um determinado local é determinada, fundamentalmente, por três grupos de fatores:

1. A **geometria Sol-Terra** (declinação, latitude e altura solar);
2. A topografia do **terreno** (elevação, declive, orientação e ensombramento);
3. A **atenuação atmosférica** (difusão, absorção) por:
 - 1.1. **Gases** (moléculas da atmosfera, ozono, dióxido de carbono, vapor de água e oxigénio);
 - 1.2. **Partículas sólidas e líquidas** (aerossóis em suspensão na atmosfera);
 - 1.3. **Nuvens** (água condensada) (Hofierka & Šúri, 2002; Remund *et al.*, 2003).

A radiação solar incidente pode ser medida através de sensores instalados em estações meteorológicas terrestres e satélites meteorológicos, ou pode ainda ser estimada através de

modelos solares (Santos *et al.*, 2011). A irradiância representa a potência de radiação solar incidente numa superfície, por unidade de área, e é dada, segundo o Sistema Internacional de Unidades, em W.m^{-2} . Ao integrar a quantidade total de radiação solar que incide na superfície terrestre ao longo de um período de tempo obtém-se a irradiação, medida em Wh.m^{-2} (Quaschnig, 2003). A insolação é também uma medida da radiação solar incidente e representa o número de horas de sol descoberto acima do horizonte (Ferreira, 1948 em Atlas do Ambiente, 1987).

Por simplicidade, considera-se que a radiação emitida pelo Sol e a sua relação espacial com a Terra resulta numa quantidade de radiação solar que atinge o exterior da atmosfera terrestre, com um valor aproximadamente constante, sendo designada por constante solar. A constante solar representa a quantidade de energia solar por unidade de tempo recebida no topo da atmosfera, numa unidade de área orientada perpendicularmente à direção da propagação da radiação para a distância média Terra-Sol (Peixoto, 1981).

Este parâmetro tem uma importância fundamental em estudos sobre o balanço energético do planeta e modelos climáticos. Atualmente o valor aceite para a constante solar, determinado através de medições por satélite, é de $1\,361\text{ W.m}^{-2}$ (Kopp & Lean, 2011). No entanto, nem toda a radiação que atinge o topo da atmosfera chega à superfície terrestre, devido à interação com a atmosfera. Assim, apenas cerca de 70% da energia correspondente à constante solar atinge a superfície do planeta num dia de céu azul (aproximadamente $1\,000\text{ W.m}^{-2}$) (Collares-Pereira, 1998).

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar é refletida, absorvida e dispersada pelos gases atmosféricos, aerossóis e nuvens, chegando apenas uma fração desta radiação à superfície terrestre (GREENPRO, 2004a). De facto, verifica-se que a atmosfera condiciona a quantidade e qualidade de energia solar que atinge a Terra (Peixoto, 1981).

À radiação solar recebida na superfície da Terra que não tenha sofrido fenómenos de dispersão na atmosfera chama-se radiação solar direta. No entanto, parte da radiação solar interage com os constituintes atmosféricos, como foi referido, sendo então denominada a esta fração radiação solar difusa. A soma destas duas componentes corresponde à radiação global que é o parâmetro utilizado, na maioria das situações, para a avaliação do potencial de energia solar disponível num determinado local (Collares-Pereira, 1998).

Em condições de céu limpo a direção dos raios solares não sofre desvios significativos, ou seja, prevalece a componente direta. Quando o céu não se encontra sob estas condições, existindo nuvens ou maior nível de impurezas, a radiação solar é quase completamente difusa. Em Portugal, em termos anuais, a proporção de radiação difusa é cerca de 40% para 60% de radiação direta (GREENPRO, 2004a).

Em 2010, o consumo mundial de energia foi de 524 quatrilhões Btu, sendo que a previsão é que este consumo aumente 56% até 2040 (U.S. Energy Information Administration, 2013). Uma vez que a radiação solar que atinge a Terra corresponde a uma quantidade de energia de 1×10^{18} kWh/ano, atualmente seria necessário captar apenas 0,01% da radiação solar para satisfazer a procura energética mundial (GREENPRO, 2004a)

2.1. Variação temporal

Existem diversos fatores que condicionam fortemente a distribuição da radiação solar, tanto na orla exterior da atmosfera, como na superfície do globo terrestre. Nomeadamente, a forma quase esférica da Terra, o seu movimento de rotação, a inclinação do eixo de rotação sobre o plano da eclíptica e o movimento anual aparente da Terra (Peixoto, 1981).

A Terra gira à volta do Sol numa trajetória elíptica de pequena excentricidade, levando um ano a completar uma órbita. O eixo de rotação da Terra tem uma inclinação constante de $23^{\circ} 27'$ em relação ao plano da órbita à volta do Sol. Devido a esta inclinação constante a orientação do nosso planeta em relação ao Sol muda continuamente e, como consequência, o ângulo de incidência dos raios solares varia à medida que a Terra orbita em torno do Sol. Assim, os raios solares não atingem sempre a linha do Equador de forma direta. O paralelo exato que recebe os raios solares de forma mais direta varia conforme o planeta gira em torno do Sol, ora estando a norte do Equador, ora a sul (McVeigh, 1977).

Existem quatro dias com especial significado na variação anual dos raios solares em relação à Terra, são estes os equinócios e os solstícios. Os solstícios correspondem aos dois pontos da órbita em que o efeito da inclinação do eixo da Terra é máximo, já nos equinócios esse efeito é mínimo. No dia 21 ou 22 de dezembro, os raios solares incidem perpendicularmente à latitude de $23^{\circ}27'S$ (Trópico de Capricórnio). Este é o solstício de verão para o hemisfério sul. A 21 ou 22 de junho, os raios incidem perpendicularmente à latitude de $23^{\circ}27'N$ (Trópico de Câncer). Este é o solstício de verão para o hemisfério norte. Entre os solstícios ocorrem os equinócios (dias e noites de igual duração, correspondendo exatamente a doze horas em qualquer ponto da Terra), durante os quais os raios verticais do Sol atingem o equador (McVeigh, 1977). No hemisfério norte o equinócio da primavera ocorre a 21 ou 22 de março e o de outono a 22 ou 23 de setembro (Peixoto, 1981).

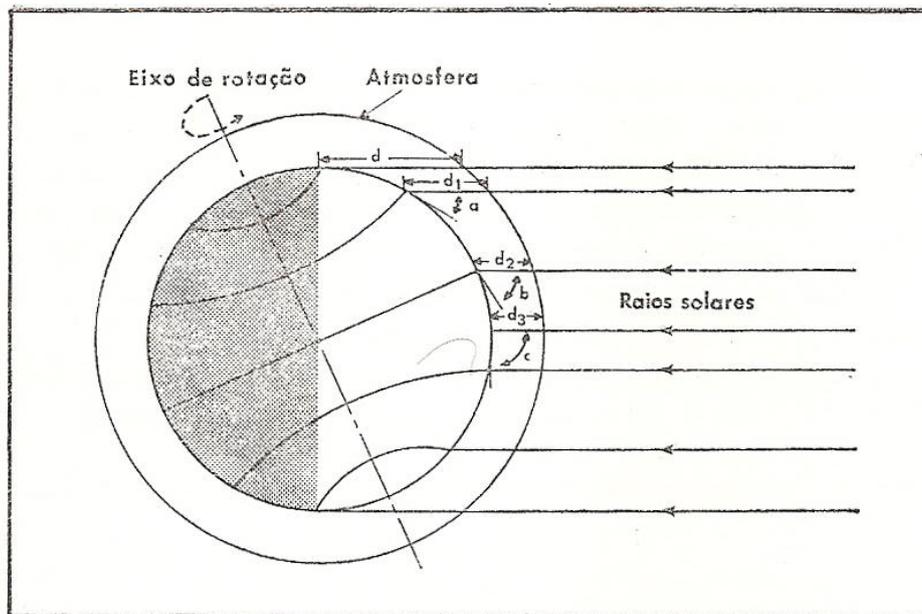
Portugal, localizado no hemisfério norte, recebe menor quantidade de radiação solar no solstício de inverno. Nesta altura, o sol nasce relativamente próximo da orientação sudeste e põe-se relativamente próximo da orientação sudoeste, enquanto que no solstício de verão, este astro nasce relativamente próximo da orientação nordeste e põe-se relativamente próximo da orientação noroeste. Nesta época do ano, a altura do Sol apresenta os valores mais elevados de

todo o ano, além disso, os dias têm maior duração, aumentando o tempo de exposição aos raios solares (Gonçalves & Graça, 2004).

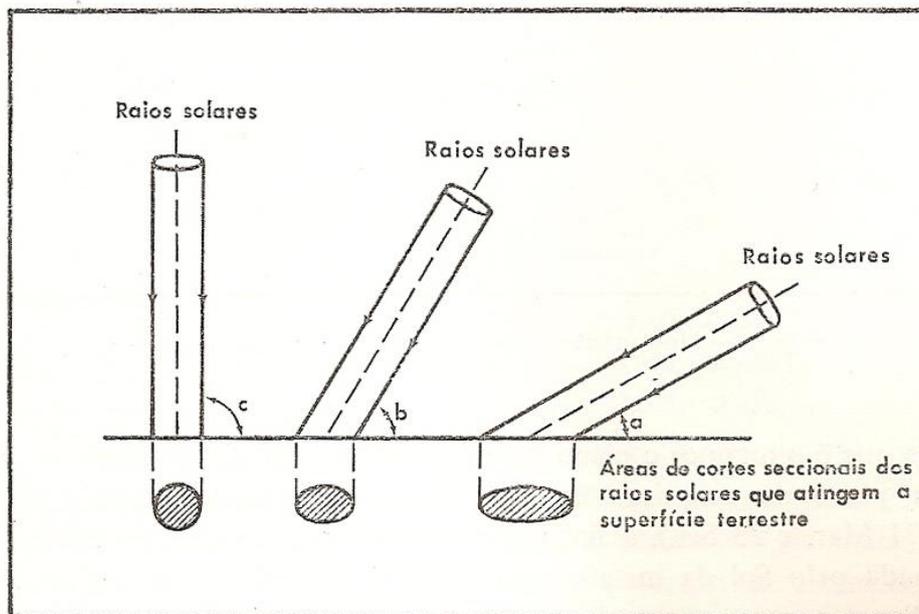
Quando a posição dos raios solares é perpendicular em relação à superfície da Terra, a radiação solar toma o percurso mais curto através da atmosfera. Caso o ângulo de incidência solar seja mais baixo, o percurso torna-se mais longo. Existe, assim, menor irradiação pois, há uma maior absorção e difusão da radiação solar pelos constituintes da atmosfera. Numa área que se estende perpendicularmente em relação aos raios solares, a irradiação será sempre maior do que numa área horizontal das mesmas dimensões (GREENPRO, 2004a).

A variação do ângulo de incidência dos raios solares, ao longo do ano, é mais acentuada nas latitudes elevadas do que no equador (McVeigh, 1977). Durante o dia o ângulo de incidência varia, sendo nulo ao nascer e ao pôr-do-Sol e máximo ao meio-dia local. No entanto, a irradiância num ponto depende também do tempo durante o qual o Sol se encontra acima do horizonte nesse ponto, isto é, da insolação astronômica (Peixoto, 1981).

A figura 2.1 explicita esta influência da inclinação dos raios solares. Na imagem a) encontram-se representados os ângulos de incidência a , b e c , bem como as penetrações d_1 , d_2 e d_3 para as diferentes latitudes. Na imagem b) é apresentada a influência da inclinação dos raios solares na área varrida na superfície do globo (Peixoto, 1981).



(a)



(b)

Figura 2.1 - Influência do ângulo de incidência dos raios solares: a) ângulos de incidência e penetrações para as diferentes latitudes; b) influência da inclinação dos raios solares na área varrida (Peixoto, 1981).

2.2. Variação espacial

A quantidade de radiação solar que atinge um determinado local do planeta depende muito da sua latitude, pois este fator define a maneira como os raios solares atingem a superfície terrestre. À medida que aumenta a latitude aumenta também a obliquidade dos raios solares, aumentando consequentemente a espessura da atmosfera atravessada e a superfície aquecida. Desta forma, a radiação solar recebida por unidade de superfície diminui, o que explica a diminuição da temperatura com a latitude (Peixoto, 1981).

A uma escala menor (nível local), a topografia é o principal fator de variação da radiação incidente num determinado ponto da Terra. De facto, a elevação, a inclinação da superfície (declive e orientação) e as sombras criam diversos gradientes locais de irradiância (Fu & Rich, 2000).

A figura 2.2 representa a distribuição da insolação média em Portugal continental. Os valores máximos de insolação ocorrem na região de Lisboa (Estoril) e na península de Setúbal, na raia Alentejana e no litoral do Algarve com mais de 3 000 horas de sol/ano e os mínimos na região do Minho, com menos de 1 800 horas de sol/ano (Atlas do Ambiente, 1987).



Figura 2.2 - Carta da distribuição da insolação média de Portugal em número de horas de sol por ano (horas/ano) (Peixoto, 1981)

No geral, a radiação aumenta de norte para sul, devido à influência da latitude na altura do Sol, e do litoral para o interior, devido à diminuição da nebulosidade. No caso de Lisboa e da

península de Setúbal, verifica-se valores de insolação elevados devido à diminuição da nebulosidade nessas regiões e ao facto de serem locais com exposição a sul (Ramos & Ventura, 1998).

Em Portugal, a abundância do recurso solar é excelente, em comparação com a de outros países da União Europeia (UE). Por forma a se ter uma noção deste facto, pode-se comparar os valores acima apresentados da insolação no território nacional continental, com os de um país do centro da UE, como por exemplo a Alemanha, que apresenta em média valores de insolação entre 1 200 e 1 700 horas de sol por ano (Collares-Pereira, 1998).

Na figura 2.3 é apresentado o mapa da distribuição da radiação global média anual na Europa. Constata-se que Portugal possui, de facto, um elevado potencial solar em comparação com os restantes países.

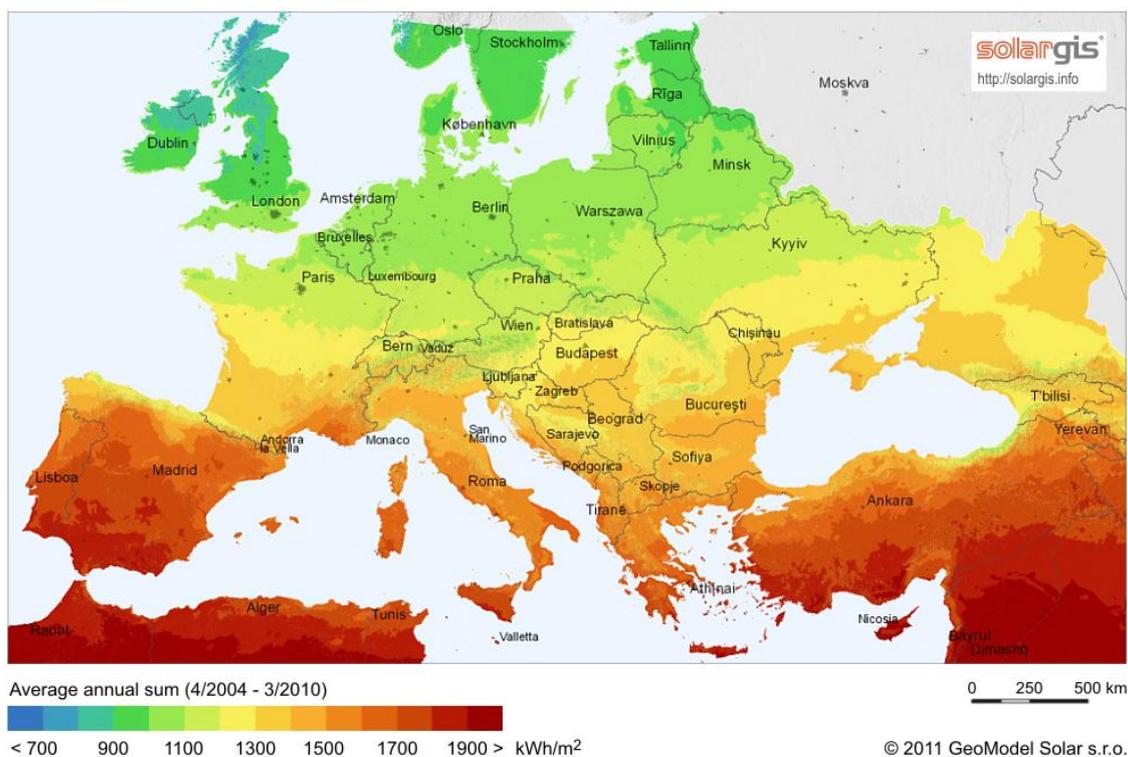


Figura 2.3 - Mapa da distribuição da radiação global média anual na Europa (GeoModel Solar, 2011)

O valor médio diário de potência da radiação solar global em Lisboa, num plano inclinado e virado a sul é 414 W.m^{-2} . Este valor tem em conta o ângulo de incidência da radiação solar direta sobre o plano horizontal e o tempo e percentagem de obscurecimento devido à presença de nuvens (Collares-Pereira, 1998).

Um dos fatores essenciais que determina o desempenho do sistema fotovoltaico é a energia solar que chega à superfície da Terra. Embora a quantidade total deste recurso energético seja superior às necessidades humanas, a sua exploração é determinada pelo conhecimento da sua

variabilidade espacial e temporal. O estudo da disponibilidade da energia solar pode melhorar a compreensão do potencial fotovoltaico para o futuro da energia e contribuir, assim, para a criação de políticas eficazes (Šúri *et al.*, 2007).

3. A energia solar em Portugal

Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar, como já foi referido. Contudo este recurso tem sido muito subaproveitado, contrastando com a tendência de expansão que se observa na maior parte dos outros países europeus. A engenharia e empresas portuguesas possuem, neste âmbito, um amplo campo de atividade para produção de conhecimento e riqueza que não pode ser ignorado pela atual política energética (Collares-Pereira, 2012).

3.1. Quadro energético atual

Os recursos energéticos de origem fóssil são escassos em Portugal, sendo até ao presente um país muito dependente do exterior. Esta dependência permaneceu elevada em 2012, sendo de 79,8%, situação que, em conjunto com o aumento progressivo da globalidade dos preços da energia, gera consequências negativas para a economia nacional (DGEG, 2013a).

Entre 2005 e 2010 registou-se um decréscimo da taxa de dependência energética, como evidencia a figura 3.1, que poderá dever-se às políticas criadas de promoção e apoio ao uso de energias renováveis na produção de eletricidade, bem como à diminuição do uso de combustíveis fósseis, devido à crise e elevados preços do petróleo (Araújo & Coelho, 2013). No entanto, a partir de 2011, verifica-se um aumento da dependência energética em Portugal devido à redução da produção hidroelétrica, o que provocou o aumento do consumo de carvão na produção de energia elétrica, e o aumento do saldo importador de energia elétrica (DGEG, 2013a).

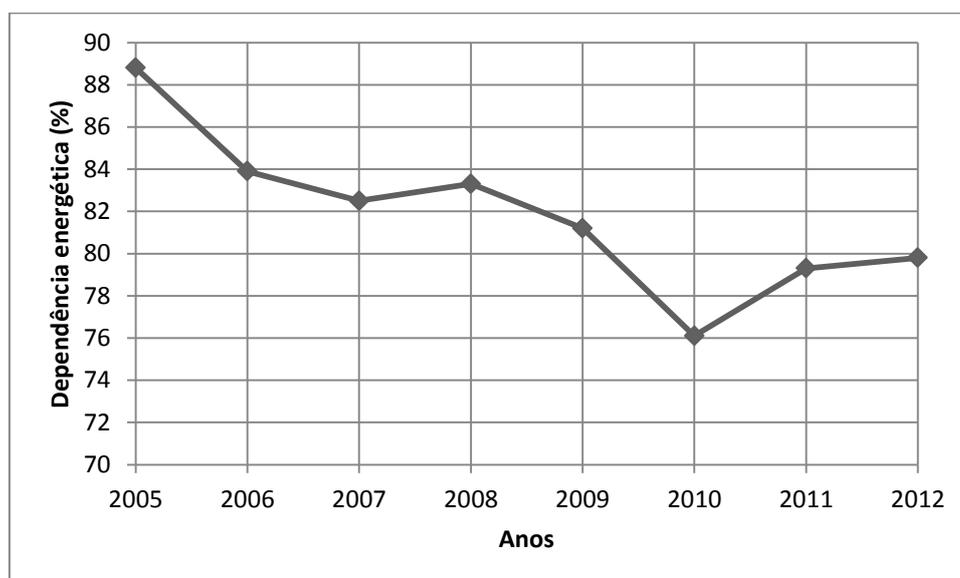


Figura 3.1 - Evolução da dependência energética em Portugal (adaptado de DGEG, 2013a)

Apesar da elevada dependência energética, existe um potencial nacional considerável para as energias renováveis, com destaque para a energia solar, hídrica, eólica e da biomassa. Em 2011,

Portugal foi o terceiro país da UE15 com maior incorporação de energias renováveis. No final de 2012, Portugal continental tinha 10 583 MW de capacidade instalada para produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis (FER), o que representa uma incorporação de FER no consumo bruto de energia elétrica de 45,6% (DGEG, 2013b).

A energia hídrica e eólica representaram 32,5% e 50,5%, respetivamente, do total da produção de energia renovável, em 2012. Tendo em conta o elevado potencial da energia fotovoltaica no contexto nacional, constata-se um grande subaproveitamento desta FER pois, em 2012, o seu contributo foi de apenas 1,8%, sendo que a potência instalada de fotovoltaica era de 225,5 MW (DGEG, 2013b). Várias são as razões apontadas para o fraco desenvolvimento da energia solar em Portugal, nomeadamente a insuficiência e inadequação das medidas de incentivo, a falta de formação profissional para instaladores dos sistemas solares e a falta de informação junto dos potenciais utilizadores (Jesus *et al.*, 2005).

Apesar da elevada incidência de radiação solar em Portugal, o crescimento do mercado fotovoltaico tem sido muito lento (Jäger-Waldau, 2012). De modo a impulsionar este mercado, é importante difundir a instalação de sistemas fotovoltaicos nas áreas urbanas e rurais nas localizações mais adequadas bem como otimizar a determinação do potencial das zonas de estudo. Tal, permitirá planear adequadamente projetos de implementação de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas (Pellegriño *et al.*, 2008).

3.2. Legislação e políticas de apoio

Foi só a partir da década de 60 que se verificou um aumento significativo do uso do petróleo em Portugal pois, antes do crescimento industrial nacional, o carvão era a principal fonte de energia juntamente com a hidroeletricidade (Lains, 1994). A partir de 1973, o primeiro choque petrolífero e o aumento exponencial do preço do petróleo levam a que haja uma preocupação política acerca do problema da dependência externa de combustíveis fósseis (Araújo & Coelho, 2013).

Em 1974, ocorre a mudança do regime político o que provoca um aumento do consumo de energia no país, uma vez que se regista um crescimento demográfico expressivo devido ao regresso de população das ex-colónias. Assim, começou a emergir uma maior consciência da necessidade estratégica de assegurar o acesso às fontes de energia e em 1984 é aprovado o Plano Energético Nacional que fomenta a análise e debate acerca da situação energética do país (Araújo & Coelho, 2013).

Em 1988, o Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de maio estabeleceu, pela primeira vez, normas relativas à atividade de produção de energia elétrica por pessoas singulares ou coletivas de direito público ou privado. Este decreto foi revisto em 2001 no Decreto-Lei n.º 339-C/2001 de 29 de dezembro que introduziu alterações ao estabelecimento de uma remuneração diferenciada,

por tecnologia e regime de exploração e atribuiu destaque às tecnologias emergentes, como a energia solar fotovoltaica.

O setor da energia solar, térmico e fotovoltaico, contribui determinadamente para a descentralização da energia e permite o aumento da integração das energias renováveis no país. Os principais instrumentos para a promoção de energia solar em Portugal têm sido os mecanismos de apoio à adoção de sistemas, sendo distintos para os setores solar fotovoltaico e solar térmico (APISOLAR, 2011).

No setor solar fotovoltaico os mecanismos de apoio são, essencialmente, a existência de uma tarifa bonificada para a produção de eletricidade a partir de energia solar, de incentivos fiscais e de um enquadramento regulamentar, processual e técnico. A tarifa bonificada aplica-se a três regimes: produtor independente, microprodução (particulares) e miniprodução (empresas) (APISOLAR, 2011).

Em setembro de 2001, o Ministério da Economia lançou o Programa E4 - Eficiência Energética e Energias Endógenas, com o objetivo de alcançar a meta estipulada pela União Europeia para a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis. O Programa E4 reúne um conjunto de medidas para melhorar a eficiência energética e o aproveitamento das energias renováveis em Portugal (GREENPRO, 2004b).

Simultaneamente, em 2001 surge ainda o Decreto-Lei n.º312/2001 de 10 de dezembro que estabelece as disposições aplicáveis à gestão da capacidade de receção de energia elétrica nas redes do Sistema Elétrico de Serviço Público (SEP), por forma a permitir a receção e entrega de energia elétrica proveniente dos novos centros electroprodutores do Sistema Elétrico Independente (SEI).

Assim, de modo a adaptar a legislação para acolhimento de novas soluções de produção de energia descentralizada, surge em 2002 o Decreto-Lei n.º68/2002 de 25 de março que regula a atividade de produção de energia elétrica em baixa tensão destinada predominantemente a consumo próprio e estabelece o regime dos direitos e dos deveres dos produtores-consumidores.

Em 2005, o Decreto-Lei n.º 339-C/2001 de 29 de dezembro é revisto no Decreto-Lei n.º 33-A/2005 de 16 de fevereiro que modifica o sistema de tarifas *feed-in*, estabelecendo um novo método de cálculo que tem em conta a tecnologia, os aspetos ambientais, e a taxa de inflação através do índice de preços ao consumidor. Uns anos mais tarde, o Decreto-Lei n.º 225/2007 de 31 de maio altera o Decreto-Lei n.º 33-A/2005 de 16 de fevereiro e procede à concretização de um conjunto de medidas ligadas às energias renováveis previstas na Estratégia Nacional para a Energia. São assim introduzidas novas tarifas e simplificados procedimentos de licenciamento. A energia fotovoltaica passa a beneficiar da tarifa *feed-in* mais elevada.

Como nos outros países da UE, Portugal aplica as tarifas *feed-in* como instrumento central de suporte às FER, estas consistem em incentivos baseados no preço de produção de eletricidade a partir de FER. Nos sistemas *feed-in* existem tarifas pré-definidas (preço por unidade produzida e introduzida na rede) para diferentes fontes de energia, sendo muito usados para encorajar os consumidores a produzir energia renovável (Wolfsegger *et al.*, 2008).

Em 2007, surge o Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de novembro que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade por intermédio de unidades de microprodução, concretizando as medidas da Estratégia Nacional para a Energia. Posteriormente, este mesmo decreto foi alterado no Decreto-Lei n.º 118-A/2010 de 25 de outubro que cria condições para produzir mais eletricidade em baixa tensão, de forma mais simples, mais transparente e em condições mais favoráveis.

Em 2010, é aprovada a Estratégia Nacional para a Energia 2020 na Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de abril, que define uma estratégia para a competitividade, crescimento e independência energética do país através da aposta nas energias renováveis e da promoção integrada da eficiência energética. Esta fixa um objetivo de 1 500 MW de potência instalada em 2020 para a energia solar.

Posteriormente, o Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de março estabelece o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade por unidades de miniprodução. Mais recentemente, o Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de fevereiro veio alterar ambos os regimes jurídicos da microprodução e miniprodução. Na figura 3.2 apresenta-se o resumo da evolução do quadro legal de apoio ao desenvolvimento do mercado fotovoltaico.

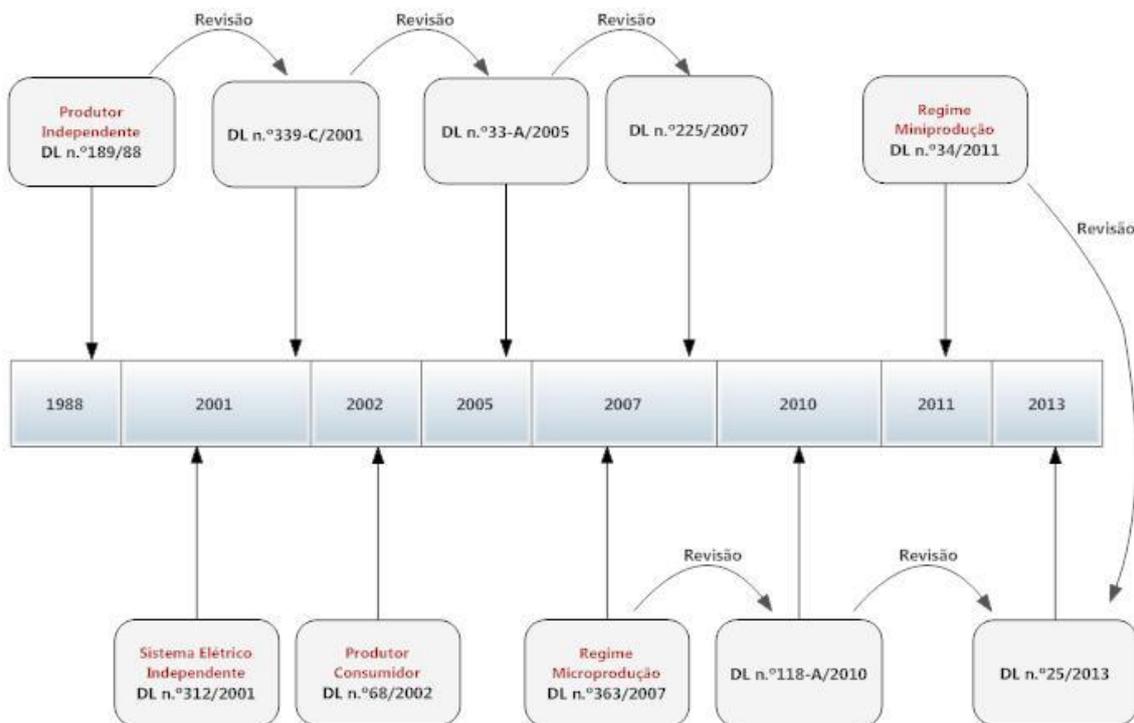


Figura 3.2 - Evolução do quadro legal de apoio ao desenvolvimento do mercado fotovoltaico.

Atualmente, não existem incentivos diretos ao investimento no mercado solar térmico residencial. Logo, a promoção desta tecnologia é realizada através de incentivos indiretos regulamentares e pela via da obrigatoriedade, tais como: promoção através da obrigatoriedade imposta no regime de microprodução e a obrigatoriedade de instalação de sistemas solares para aquecimento de águas sanitárias em edifícios residenciais novos, no âmbito do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar (APISOLAR, 2011).

Na sequência da publicação do Programa E4 surgiu o Programa Água Quente Solar para Portugal promovido pela Direção Geral de Geologia e Energia e com o apoio de várias entidades, para promover o recurso a coletores solares para aquecimento de água, nos sectores residencial, serviços e indústria. Esta iniciativa foi o primeiro passo para melhorar a perceção pública relativamente a esta tecnologia (APISOLAR, 2011)

No dia 28 de fevereiro de 2013, foram aprovados o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) na Resolução do Conselho de Ministros n.º20/2013 de 10 de abril. Segundo a ADENE (2013) “o principal objetivo da revisão do PNAEE é o de projetar novas ações e metas para 2016, integrando as preocupações relativas à redução de energia primária para o horizonte de 2020, constantes da diretiva comunitária relativa à eficiência energética”. Quanto ao PNAER, este plano aposta novamente nas FER e incide em âmbitos muito abrangentes, tais como a poupança energética das famílias ou as alterações climáticas.

Em 2011, o mercado fotovoltaico na Europa mais que duplicou a capacidade instalada relativamente ao ano anterior, enquanto que o mercado solar térmico registou uma potência instalada a valores pouco acima de 2007. Para se aproximar da média europeia *per capita*, Portugal terá de acompanhar o crescimento do sector fotovoltaico. Relativamente ao sector solar térmico, na ausência de incentivos, este mercado irá tendencialmente sofrer um abrandamento no aumento da capacidade instalada (APISOLAR, 2011)

3.3. Tecnologias solares em meios urbanos

Existem duas categorias de tecnologia em meios urbanos que convertem a radiação solar em formas úteis de energia: os sistemas solares fotovoltaicos, que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, e os sistemas solares térmicos, que aproveitam a energia solar para o aquecimento de água (Herzog *et al.*, 2001).

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de componentes que permitem a transformação da energia solar em energia elétrica. As partes fundamentais destes sistemas são as células solares, o componente básico do sistema que capta a luz solar, os módulos fotovoltaicos, que reúnem um grande número de células, e os inversores usados para converter a corrente contínua, produzida pelas células fotovoltaicas, em corrente alterna (Wolfsegger *et al.*, 2008).

As células solares são constituídas por materiais semicondutores, que absorvem a luz, como o silício, o arsenieto de gálio, teluriato de cádmio ou disseleniuto de cobre e índio. O silício é o segundo material mais abundante na Terra. Atualmente, 95% de todas as células solares do mundo são de silício, podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. (GREENPRO, 2004a; Wolfsegger *et al.*, 2008).

O rendimento de uma célula solar é medido em termos da sua eficiência para transformar a energia solar em energia elétrica, definindo-se como o quociente entre a potência da radiação que incide na superfície da célula fotovoltaica e a potência elétrica disponível aos seus terminais. Uma célula típica tem uma eficiência de 15%, ou seja, apenas 1/6 da radiação incidente é convertida em eletricidade (Brito & Silva, 2006). Na tabela 3.1 são apresentados os valores de eficiência nas tecnologias mais utilizadas no fabrico de células fotovoltaicas.

Tabela 3.1 - Eficiência de células e módulos fotovoltaicos (Adaptado de Max Fordham and Partners & Feilden Clegg Architects, 1999)

Tecnologia	Eficiência da célula fotovoltaica (%)	Eficiência do módulo fotovoltaico (%)
Silício monocristalino	13 - 17	12 - 15
Silício policristalino	12 - 15	11 - 14
Silício amorfo	5	4,5 - 4,9

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas ligados à rede e em sistemas autónomos. Os sistemas ligados à rede permitem que qualquer excesso de energia produzido possa ser vendido. Assim, um dos aspetos mais importantes destes sistemas tem sido a sua interligação à rede pública elétrica, permitindo o desenvolvimento de um sistema *feed-in* onde os produtores privados podem produzir e introduzir a eletricidade na rede pública vendendo-a (Wolfsegger *et al.*, 2008). Apesar de mundialmente grande parte dos sistemas fotovoltaicos se encontrarem ligados à rede (European Commission, 2009), em Portugal 90% dos sistemas existentes são autónomos (Watt, 2001).

No caso dos sistemas autónomos o aproveitamento da energia solar precisa de ser ajustado à procura energética. É indispensável possuir um sistema de armazenamento (baterias), bem como um regulador de carga adequado que faça a gestão do processo de carga, pois, geralmente, a energia produzida não corresponde à procura pontual de energia do consumidor (GREENPRO, 2004a).

É possível analisar o potencial fotovoltaico do país em função da geração de eletricidade proveniente dos sistemas fotovoltaicos. Geralmente utiliza-se o Watt pico (Wp) que representa a potência dos módulos fotovoltaicos em condições padrão de teste, ou seja, quando a irradiância incidente corresponde a $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e a temperatura dos módulos é de 25°C . Deste modo, a geração de eletricidade dos sistemas fotovoltaicos pode ser apresentada em quilowatt hora gerados por quilowatt pico (kWh/kWp) (Šúri *et al.*, 2007).

Segundo Šúri *et al.* (2007), o maior potencial de geração de eletricidade solar no continente europeu encontra-se em Portugal e noutros países da Região do Mediterrâneo, nomeadamente na República de Malta, no Chipre, na maior parte da Espanha, na Itália e Croácia, no sul da França e na Córsega, na Grécia e no sul da Turquia. Nestes locais, numa zona urbana, um módulo fotovoltaico típico de silício cristalino, colocado horizontalmente, pode gerar anualmente entre 1 100 e 1 330 kWh/kWp, como se pode observar na figura 3.3.

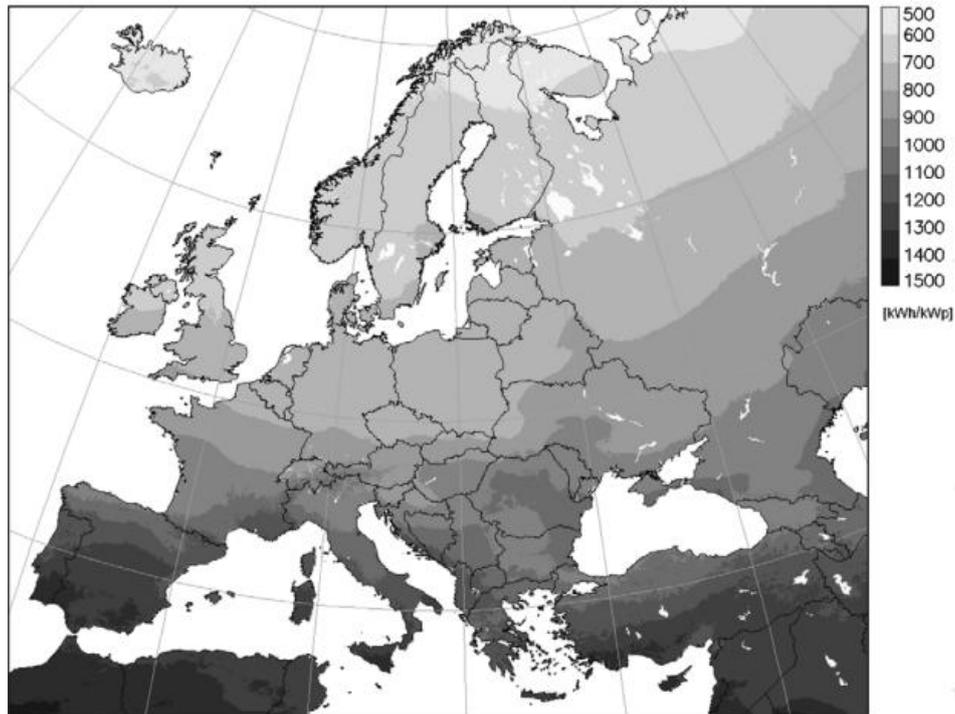


Figura 3.3 - Soma anual da geração de eletricidade de um módulo fotovoltaico de 1kWp colocado horizontalmente (kWh/kWp) (Šúri *et al.*, 2007)

Os parâmetros orientação e inclinação de um painel fotovoltaico são muito importantes porque visam maximizar os níveis de produção elétrica (Brito *et al.*, 2012). Em Portugal, para coletores estacionários a captação máxima de radiação solar ocorre com a orientação a sul e inclinação do coletor igual ao valor da latitude do local menos 4 a 5 graus (Carvalho, 1985 in Collares-Pereira, 1998). Assim, é possível obter um valor de irradiação quinze por cento superior do que no caso de um coletor horizontal (GREENPRO, 2004a).

Na inclinação ideal, é possível aumentar a produção anual de eletricidade em áreas urbanas de 9% a 26%, podendo atingir valores até 1 510 kWh/kWp em Portugal. Para sistemas fotovoltaicos montados verticalmente há uma diminuição da produção anual de eletricidade em cerca de 33 a 42% em Portugal (Šúri *et al.*, 2007).

A um nível local, é também importante ter em conta as sombras que possam diminuir o rendimento dos sistemas fotovoltaicos. Por exemplo, as sombras provocadas por árvores que se encontrem perto dos sistemas podem levar a perdas de energia dependendo de diversos fatores, tais como: a altura da árvore, o diâmetro e altura da copa e a localização da árvore (Dereli *et al.*, 2013). Assim, de modo a otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos é importante recorrer a um planeamento prévio, com a ajuda de SIG e tecnologia LIDAR, para localizar árvores, edifícios ou outros fatores que possam provocar sombras que interfiram com os sistemas (Nguyen & Pearce, 2012)

As vantagens dos sistemas fotovoltaicos são várias, nomeadamente:

- A fonte de energia é vasta, acessível e inesgotável à escala humana;
- Os equipamentos têm, geralmente, uma vida útil elevada (na ordem dos 25 anos);
- Não provocam emissões atmosféricas, nem geram resíduos radioativos durante o uso;
- Podem ser uma fonte de produção de eletricidade descentralizada;
- Aumentam a segurança energética nacional;
- Permitem o crescimento económico do país;
- Os gastos associados à manutenção são reduzidos (Branker & Pearce, 2010; Luque & Hegedus, 2011; Olz, *et al.*, 2007; Wong, 2009).

Relativamente às desvantagens, as principais prendem-se com:

- O elevado custo inicial de instalação;
- A reduzida eficiência de conversão;
- A falta de formas de armazenamento de energia economicamente eficientes;
- A existência de variações na produção de energia consoante as condições atmosféricas;
- Emissão de poluentes atmosféricos e produção de resíduos sólidos durante a fase de produção e construção dos módulos fotovoltaicos (Kaygusuz, 2009; Luque & Hegedus, 2011).

Apesar do custo da eletricidade produzida num sistema fotovoltaico ser ainda superior à maioria das outras tecnologias de energias renováveis, este custo tem vindo a diminuir progressivamente. O potencial de redução de custo, combinado com a simplicidade, versatilidade, fiabilidade e baixo impacto ambiental dos sistemas fotovoltaicos, poderá levar a que esta tecnologia se torne uma importante fonte de energia ao longo dos próximos 20 a 30 anos (Herzog *et al.*, 2001).

Fazendo uma breve análise aos sistemas solares térmicos, estes podem ser divididos em sistemas ativos (captam e armazenam a energia) e passivos (não requerem equipamentos pois encontram-se incorporados na estrutura construtiva do edifício). No caso dos sistemas solares térmicos ativos, a luz solar é transformada em calor aproveitável numa placa metálica que se comporta como um corpo negro – a placa absorvedora. O calor é então absorvido por um fluido de transferência térmica, que se encontra dentro de um sistema de tubos, e transportado até ao depósito de água quente. Deste modo, a água encontra-se disponível num depósito acumulador, podendo ser utilizada em períodos em que não existe sol (GREENPRO, 2004b).

Estes sistemas podem fornecer água quente a uma vasta gama de necessidades, nomeadamente águas quentes sanitárias e aquecimento de piscinas. Em 2011, a indústria dos sistemas térmicos solares na Europa cresceu 3,9% em relação a 2006, sendo a capacidade total instalada de 26,3 GW (ESTIF, 2012). O *design*, custos e rendimento destes sistemas estão constantemente a

serem melhorados, de modo a garantir um ótimo aproveitamento da energia solar (ESTIF, 2013).

A sustentabilidade, a maturidade, a disponibilidade de recursos e tecnologia, a fiabilidade e os baixos custos de manutenção são algumas das vantagens dos sistemas solares térmicos. Relativamente às desvantagens destes sistemas, a principal é mais uma vez o elevado investimento inicial que se apresenta como o maior entrave ao desenvolvimento desta tecnologia (Earthscan, 2010).

Em comparação com as diversas tecnologias de energias renováveis disponíveis, os sistemas solares têm um potencial único de se integrarem no ambiente urbano. É possível transformar as cidades em “fábricas” descentralizadas de produção de energia, instalando painéis solares (fotovoltaicos e térmicos) em edifícios e estruturas urbanas. Para tal, é importante a definição e implementação de ações estratégicas que permitam mobilizar o potencial solar dos edifícios existentes (Amado & Poggi, 2012; POLIS, 2010).

Existe por isso uma necessidade crescente de desenvolver metodologias que permitam a identificação do potencial solar existente nas coberturas dos edifícios, reduzindo a necessidade de avaliações individuais nas áreas de instalação. A construção de um mapa do potencial fotovoltaico de determinada região pode levar a um aumento da instalação do número de painéis fotovoltaicos nas coberturas dos telhados, uma vez que é facilitado o processo de decisão, tornando-o mais simples e rápido (Kodysh *et al.*, 2013).

4. Integração de sistemas de informação geográfica no planeamento urbano

Os decisores políticos e autoridades administrativas devem ter um plano para o uso correto dos territórios sob a sua influência política, de modo a poder enfrentar as necessidades existentes e futuras. Esta tarefa poderia ser facilitada caso fossem usadas ferramentas tecnologicamente avançadas, fiáveis e práticas para examinar e avaliar um elevado número de fatores ambientais e sociais que podem afetar as suas decisões. Esta avaliação pode ser conseguida através da utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) (Pellegrino *et al.*, 2008).

Os SIG são ferramentas informáticas que permitem aos utilizadores realizar análises espaciais, através de representações digitais de uma área geográfica combinadas com outras informações geograficamente referenciadas existentes na mesma área (Wyatt & Ralphs, 2003). Uma das principais características dos SIG é a capacidade de realizar análise espacial, permitindo assim responder a perguntas específicas sobre as áreas em estudo (Pellegrino *et al.*, 2008). Os SIG fornecem assim ferramentas para obter e manipular informação, de modo a providenciar aos decisores um conjunto amplo, e o mais claro possível, de informações para executar as melhores escolhas possíveis (Caiaffa, 2005).

Os principais componentes de um SIG são: uma interface de utilizador, para que haja interação do utilizador com o *software*; módulos para a criação e gestão de bases de dados, para lidar com os bancos de dados relacionados com os objetos geográficos; módulos para a gestão (criação, edição e troca) e análise dos dados geográficos e objetos; e por fim, ferramentas para a visualização de dados geográficos e bancos de dados relacionados (Pellegrino *et al.*, 2008)

De acordo com Hofierka e Šúri (2002) os SIG permitem estimar a radiação solar de uma forma barata, rápida, custo-eficaz e precisa. O uso destes sistemas pode ajudar na criação de planos adequados para a intervenção no ambiente urbano, nomeadamente no que respeita à integração de sistemas solares nos edifícios. É possível, assim, tornar mais precisa a estimativa do potencial de energia solar disponível e identificar os fatores que possam condicionar a implementação dos sistemas (Amado & Poggi, 2012; Pellegrino *et al.*, 2008).

Existem sistemas que integram a utilização de SIG para estimar o potencial de uma área. Como por exemplo, o *Photovoltaic Geographic Information System* (PVGIS) que fornece informação acerca da radiação solar, permitindo calcular o desempenho de sistemas fotovoltaicos, para a Europa e regiões vizinhas (Šúri, *et al.*, 2005). Existem ainda outros sistemas, nomeadamente o SolarGIS que consiste numa base de dados de alta resolução da radiação solar e temperatura do ar disponível para a Europa, África, Ásia e Brasil (Šúri, *et al.*, 2011).

4.1. Tecnologia LiDAR

Atualmente, a disponibilidade de informações 3D sobre as cidades oferece a possibilidade de analisar o tecido urbano de uma forma inovadora. Apesar de os dados LiDAR (*Light Detection*

And Ranging) permitirem derivar informações precisas sobre o *layout* das cidades, ainda poucas aplicações foram implementadas no sentido de processar esses dados para a análise ambiental dos meios urbanos. O crescente interesse na quantificação de indicadores baseados em energia ao nível das cidades, demonstra a utilidade da integração de imagens 3D na análise dos meios urbanos, a fim de fornecer aplicações úteis para o planeamento (Carneiro *et al.*, 2008).

O LiDAR é uma técnica ótica de deteção remota que usa luz laser para recolher informações da superfície da terra, produzindo medições x, y, z precisas (Ackermann, 1999; ESRI, 2012). Nesta tecnologia um sensor emite energia para uma determinada superfície, medindo a radiação que é refletida dos objetos presentes adquirindo assim informação sobre as suas características (localização, altura). Um sistema LiDAR é geralmente composto por um *scanner laser*, um GPS (sistema de posicionamento), uma unidade de medição inercial IMU (sistema de orientação) e uma unidade de controlo, onde se encontra um computador e um suporte de armazenamento digital (Gonçalves & Gonçalves-Seco, 2007; Shan & Sampath, 2005).

Existem dois tipos de tecnologias de deteção remota que se diferenciam pela fonte de energia usada para detetar o objeto, são estes os sistemas passivos e os sistemas ativos. Os sistemas passivos detetam a radiação que é refletida ou emitida pelo objeto a analisar, ou seja, não possuem uma fonte artificial de radiação. Por sua vez, os sistemas ativos contêm uma fonte de radiação que incide sobre o objeto a analisar, tais como os sistemas LiDAR. Esta característica é vantajosa pois permite obter dados durante a noite quando o ar é geralmente mais limpo, devido à diminuição da poluição atmosférica provocada pelo trânsito (NOAA, 2012).

Os feixes de luz emitidos pelos sistemas LiDAR são refletidos pelos objetos que se encontram na superfície, tais como a vegetação e os edifícios. É possível que ocorram vários retornos tal como é apresentado na figura 4.1 ou seja, a energia incidente pode ser refletida diversas vezes ao encontrar determinados objetos penetráveis (e.g. árvores). Assim, cada retorno encontra-se associado a uma cota. O primeiro retorno corresponde ao ponto mais alto da área de estudo, como por exemplo o topo de uma árvore, e os retornos seguintes correspondem às cotas subsequentes. O primeiro retorno pode também representar a superfície terrestre ou um objeto não penetrável pelo laser (e.g. edifícios) (ESRI, 2012).

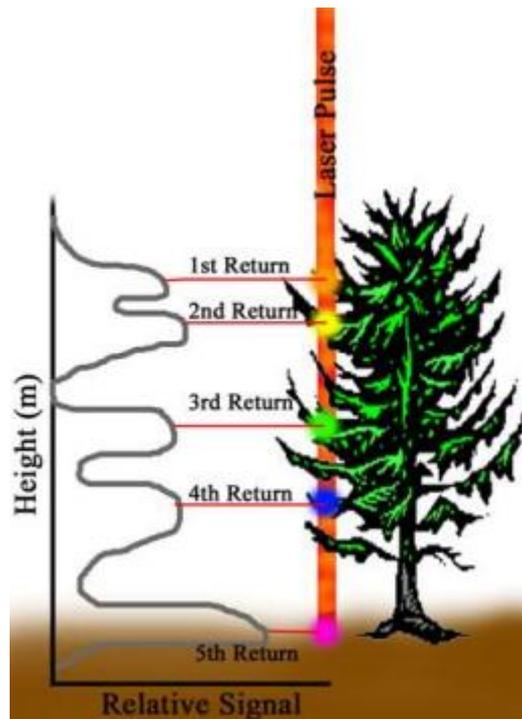


Figura 4.1 - Múltiplos retornos a partir de um feixe laser de um sistema LiDAR (NOAA, 2012)

Um conjunto de dados LiDAR consiste, tipicamente, numa nuvem irregular de pontos, onde cada um destes pontos possui as coordenadas x , y , z , um ID único e a intensidade do sinal recebido (Gonçalves & Gonçalves-Seco, 2007). Dependendo das características da superfície, do comprimento de onda da luz laser e do ângulo de incidência, a intensidade de luz refletida irá variar. Após o levantamento de dados LiDAR, os pontos são então processados e transformados em coordenadas x , y , z , através da análise do tempo de alcance do laser, o ângulo de leitura, a posição GPS e a informação IMU (ESRI, 2012).

Segundo Gonçalves e Gonçalves-Seco (2007) “do ponto de vista do utilizador, esta tecnologia fornece, relativamente às técnicas fotogramétricas tradicionais, tempos de aquisição mais curtos, precisão e densidade de pontos relativamente mais elevada”. Além destas vantagens, a tecnologia LiDAR é também menos dependente do clima e da altura do dia do que as técnicas fotogramétricas (Baltsavias, 1999).

A tecnologia LiDAR permite a criação de modelos de elevação digital. Estes podem ser denominados como Modelos Digitais de Superfície (MDS) ou Modelos Digitais de Terreno (MDT). Os MDS representam a elevação da superfície do terreno incluindo os objetos presentes na paisagem (*e.g.* edifícios, árvores), e os MDT representam a altimetria do terreno não incluindo as estruturas (Priestnall *et al.*, 2000).

A utilização de modelos digitais de elevação produzidos a partir de dados LiDAR para estimar o potencial solar nos telhados dos edifícios tem sido aplicada em diversos estudos (Agugiaro *et al.*, 2012; Agugiaro *et al.*, 2011; Carneiro *et al.*, 2008; Kassner *et al.*, 2008; Nguyen *et al.*, 2012;

Santos *et al.*, 2011) de modo a obter a elevação dos edifícios, bem como dos elementos presentes na área. Esta informação é muito útil na análise do potencial solar no edificado de áreas de estudo (Kassner *et al.*, 2008).

Em Portugal, um estudo realizado por Santos *et al.* (2011) permitiu avaliar a área de telhados disponível para a instalação de sistemas fotovoltaicos numa área localizada na zona de Lisboa, tendo por base a utilização de dados de planimetria (cartografia municipal) e altimetria (MDS derivado de dados LiDAR). Ao manipular dados LiDAR num SIG é possível analisar os telhados dos edifícios tendo em conta diversas características, tais como o seu declive, orientação e zonas com sombra. Assim, através da utilização de um modelo solar foi possível identificar o potencial solar da zona.

4.2. Modelos solares

Os modelos solares são baseados em equações empíricas que permitem estimar a radiação solar em grandes regiões tendo em conta a inclinação da superfície, orientação e sombras. Assim, a junção destes modelos com os SIG aumenta a capacidade de desenvolver cenários e analisar a área de estudo tendo em atenção diversos dados ambientais e socioeconómicos (Šúri *et al.*, 2005).

Um dos primeiros modelos solares baseado em SIG foi o SolarFlux desenvolvido para Arc/Info GIS (Dubayah & Rich, 1995). Diversos outros modelos têm sido desenvolvidos, nas últimas décadas, para diferentes escalas e objetivos, tais como o modelo Solei (Mészáros *et al.*, 2002), o Solar Analyst (Fu & Rich, 2000), o SRAD (Mckenney, 1999) e o r.sun (Hofierka & Šúri, 2002). Existem vários modelos solares disponíveis na literatura que variam, principalmente, nos *inputs* e, conseqüentemente, no *output*, permitindo estimar a radiação solar de uma forma rápida, custo-eficaz e precisa (Dubayah & Rich, 1995; Santos *et al.*, 2011).

Estimar o potencial solar nas coberturas dos edifícios através de modelos solares não é um processo simples pois, apesar da radiação solar que chega ao topo da atmosfera ser relativamente constante, a que atinge a cobertura dos telhados é muito variável. Existem diversos fatores responsáveis por esta variação, tais como as variações sazonais da radiação, as sombras criadas por edifícios ou árvores adjacentes, as características do edifício (orientação, declive e área de cobertura), a meteorologia e outras considerações atmosféricas (Kodysh *et al.*, 2013).

5. Metodologia

A identificação de telhados apropriados para a instalação de sistemas fotovoltaicos requer a modelação de duas variáveis: o estudo da radiação incidente na área de estudo e a identificação dos locais ótimos para a instalação dos sistemas (Santos *et al.*, 2011). Deste modo, foram consideradas cinco etapas para o estudo proposto:

- 1) Caracterização das áreas de estudo;
- 2) Determinação da radiação incidente nas áreas de estudo;
- 3) Determinação da radiação incidente nos telhados;
- 4) Seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos;
- 5) Determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo.

De seguida, apresenta-se a metodologia aplicada por fases, onde cada passo descrito foi aplicado a cada área de estudo.

5.1. Caracterização das áreas de estudo

Numa primeira fase, pretendeu-se efetuar a caracterização das áreas, de modo a obter-se os conhecimentos necessários para a realização do estudo, acerca do edificado, terreno, população e consumos energéticos. Esta informação foi obtida através de diversos métodos que permitissem adquirir um maior rigor na avaliação e diferenciação das áreas de estudo.

Primeiramente foram analisados os dados da Base Geográfica de Referenciação da Informação (BGRI) dos respetivos concelhos onde se encontram inseridas as zonas de estudo, com o objetivo de obter informação relevante sobre a população residente e as características dos edifícios (número de pisos, ano de construção e tipo de alojamento).

A BGRI, construída pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em estreita colaboração com outras entidades, é uma infraestrutura cartográfica de referenciação de informação que permite planificar e controlar a recolha de dados referenciando geograficamente a informação estatística dos Censos. A partir da sua unidade elementar, a subsecção estatística, é possível, por agregação, construir qualquer representação de nível hierárquico superior correspondendo à divisão administrativa existente (freguesia, concelho e distrito) ou a outra definida pelo utilizador (Geirinhas, 2001).

Assim, os dados provenientes da BGRI com os Censos de 2011 permitiram estimar a população afeta às zonas de estudo. Para tal, foi extraída a população das subsecções estatísticas que se encontravam totalmente inseridas nas áreas de estudo e estimada a população das subsecções apenas parcialmente inseridas, com base na densidade populacional, área total da subsecção e área parcial inserida na zona de estudo.

Deve ser notado que a BGRI contém apenas informação sobre o edificado destinado à habitação não contabilizando outros edifícios, tais como edifícios públicos ou de comércio/serviços. Assim, foi necessário efetuar diversas visitas técnicas ao terreno a fim de realizar o levantamento funcional da tipologia dos edifícios, bem como de outras características relevantes para uma melhor caracterização (proximidade de árvores, edifícios ou outras características que provoquem sombreamento nas coberturas).

Juntamente com a planimetria das duas áreas foi possível obter a contabilização total dos edifícios inseridos nas zonas de estudo. Para a classificação foram identificadas habitações unifamiliares (figura 5.1 a), habitações multifamiliares (figura 5.1 b) e todos os edifícios presentes que não são destinados ao uso habitacional, tais como anexos (figura 5.1 c), edifícios de comércio/serviços (figura 5.1 d), edifícios públicos e edifícios de património.



Figura 5.1 - Exemplos de edifícios: a) Habitação unifamiliar; b) Habitação multifamiliar; c) Anexo; d) Edifício de comércio/serviços

Com base nos Censos de 2011 foi retirado do sítio do INE as informações relativas ao consumo energético dos concelhos em estudo, tais como o consumo de energia elétrica por sector, a evolução do consumo de energia elétrica desde 2001 e o consumo de energia elétrica por habitante.

Por fim foram criados os mapas de declive e orientação, com base no MDS proveniente de imagens LiDAR de cada zona de estudo, no ArcGIS 10.1 por forma a obter informações relevantes sobre o terreno para posterior seleção dos melhores locais destinados à instalação de sistemas solares. A figura 5.2 representa o esquema metodológico adotado neste passo.

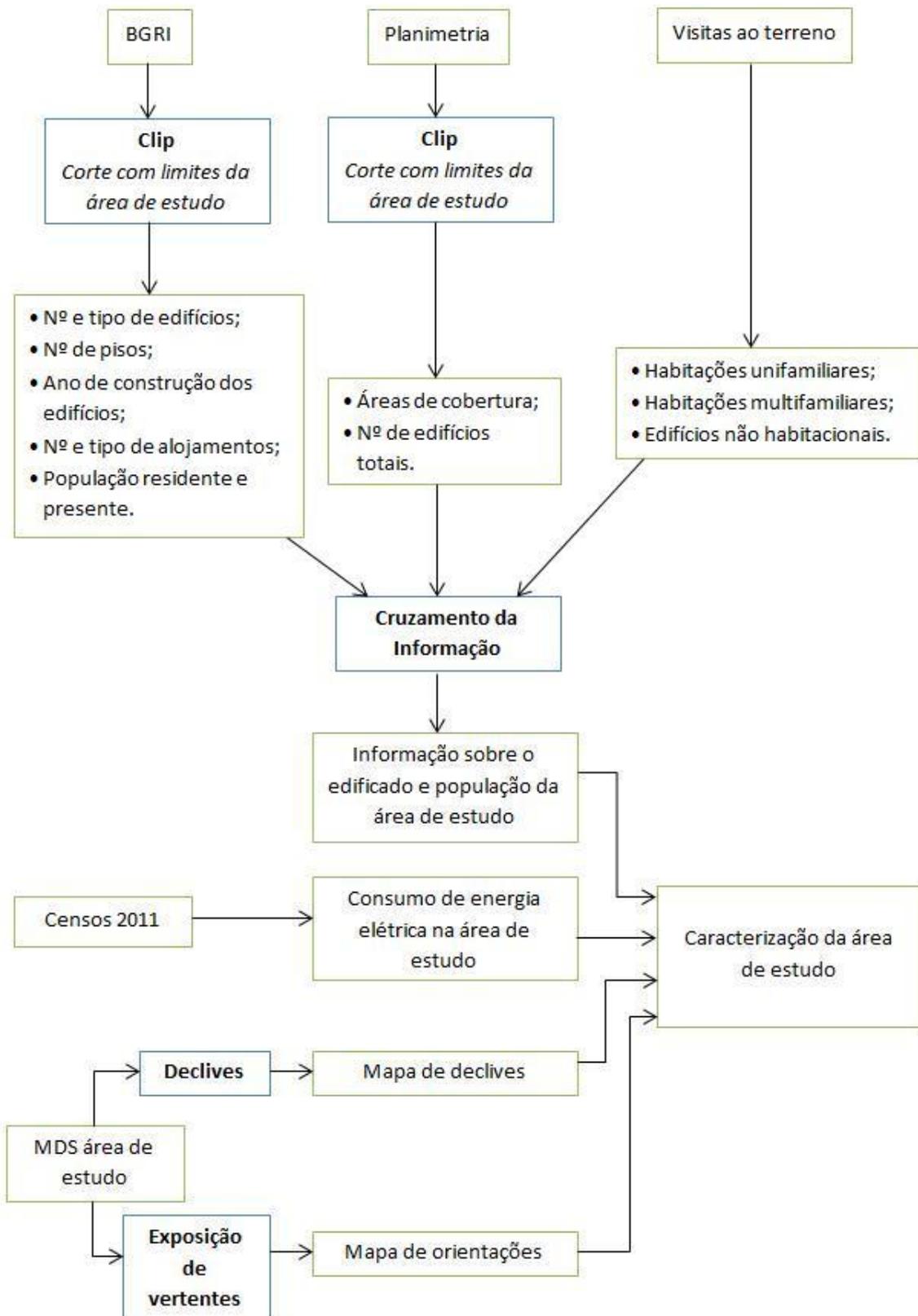


Figura 5.2 - Metodologia para a caracterização das áreas de estudo

5.2. Determinação da radiação incidente nas áreas de estudo

Para o cálculo da radiação solar incidente nas áreas de estudo recorreu-se ao modelo Solar Analyst. O Solar Analyst, desenvolvido como uma extensão do ArcToolbox para o ArcGIS (Fu

& Rich, 2000), calcula a irradiação (Wh.m^{-2}) tendo em conta os efeitos atmosféricos, a latitude e posição topográfica da área de estudo, declive, orientação, variação temporal da radiação solar e efeito das sombras projetadas (Santos *et al.*, 2011).

Os modelos solares podem englobar dois métodos: em pontos e em área. O método em pontos calcula a irradiação para um local específico, com base na orientação da superfície e o céu visível. São altamente precisos para um determinado local no entanto, não é possível aplicar este método para construir um modelo específico para as várias localizações de uma grande área. No caso do método em área, é possível calcular a irradiação para uma grande área, tendo em conta não só a orientação da superfície mas também as sombras originadas pelo MDS (Fu & Rich, 2000). O Solar Analyst possui ambos os métodos, assim para o objetivo proposto foi usado o método em área. Os *inputs* foram o MDS, a latitude da área de estudo, o *sky size*, a proporção difusa e a transmissividade.

Como o Solar Analyst foi concebido para escalas locais, é aceitável usar apenas um valor de latitude para todo o MDS. No entanto, para regiões maiores, é necessário dividir a área de estudo em zonas com diferentes latitudes (Fu & Rich, 2000).

O valor predefinido do *sky size* é 200, o que representa a resolução do *viewshed*, *sky map* e *sun map*, usados nos cálculos de radiação. Aumentar o *sky size* aumenta a precisão dos cálculos, no entanto também aumenta o tempo de cálculo (ESRI, 2011). O algoritmo usado no Solar Analyst denomina-se *Hemispherical Viewshed Algorithm*. Este permite calcular rapidamente a irradiação solar com base em três componentes representadas no *sky size*:

- O *viewshed*, calculado para cada célula do MDS, representa a distribuição angular da visibilidade do céu versus a sua obstrução;
- O *sunmap* que consiste numa representação raster da quantidade de radiação solar, proveniente de cada direção do céu, que depende da posição do Sol e que varia ao longo do ano;
- O *skymap* representa, além da radiação direta, a radiação difusa, proveniente de qualquer direção do céu. São mapas raster construídos dividindo todo o céu numa série de sectores definidos pelas divisões do zénite e azimute (Fu & Rich, 2000).

Através da sobreposição do *skymap*, *sunmap* e *viewshed* é possível calcular a radiação solar direta, difusa e global da área de estudo. Para o cálculo da radiação solar direta, o *viewshed* e o *sunmap* são sobrepostos, permitindo obter o valor de radiação para cada sector do *sunmap* que não se encontra obstruído. No caso da radiação solar difusa, é necessário sobrepor o *viewshed* com o *skymap* (Fu & Rich, 2000). A figura 5.3 ilustra o modelo seguido.

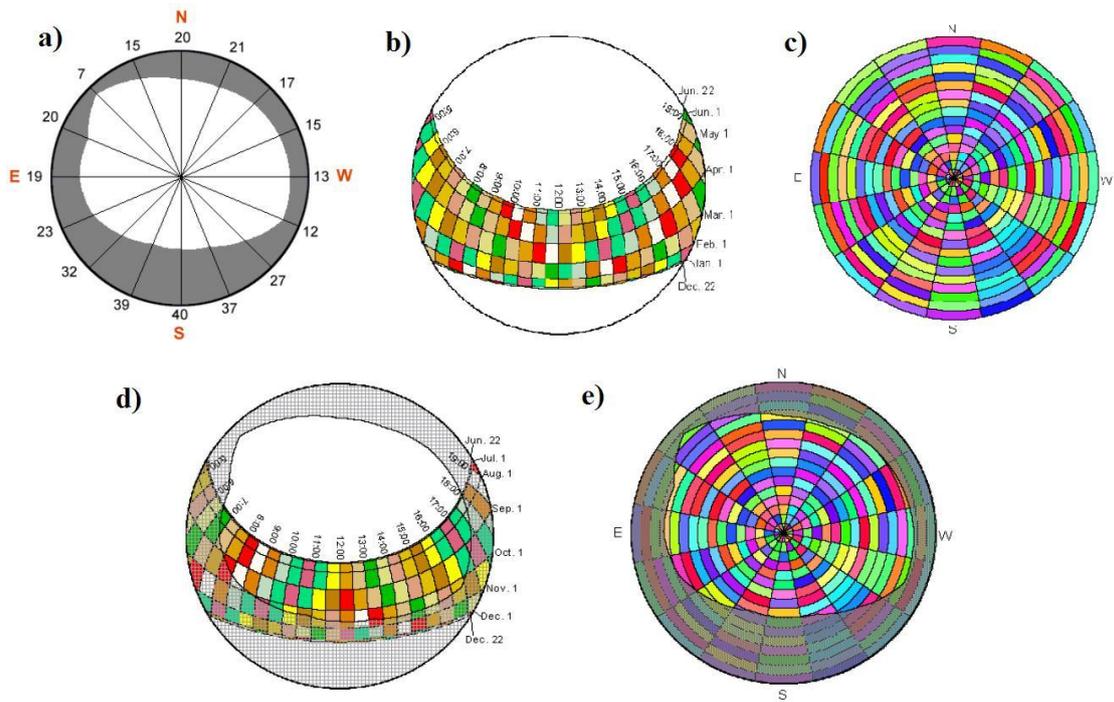


Figura 5.3 – a) Viewshed; b) Sunmap; c) Skymap; d) Sobreposição do viewshed com o sunmap; e) Sobreposição do viewshed com o skymap (Fu & Rich, 2000).

A radiação solar direta ($Dir_{\theta,\alpha}$) dos sectores do *sunmap*, com o centróide em ângulo de zénite θ e ângulo azimute α , é calculada através da seguinte equação:

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{const} \times \tau^{m(\theta)} \times SunDur_{\theta,\alpha} \times SunGap_{\theta,\alpha} \times \cos(AngIn_{\theta,\alpha})$$

Em que:

S_{const} – É a constante solar, ou seja, o fluxo de radiação solar no limite exterior da atmosfera terrestre para a distância média entre a Terra e o Sol;

τ – Transmissividade da atmosfera para o caminho mais curto;

$m(\theta)$ – Comprimento do caminho relativo ótico

$SunDur_{\theta,\alpha}$ – Duração do tempo representado pelo sector do céu;

$SunGap_{\theta,\alpha}$ – Fração de abertura para o sector do *sunmap*;

$AngIn_{\theta,\alpha}$ - Ângulo de incidência entre o centróide do sector do céu e o eixo normal da superfície.

A radiação solar direta total (Dir_{tot}) é, então, o somatório da irradiação direta de todos os sectores do *sunmap*:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha}$$

Para cada sector do céu, a irradiação solar difusa no seu centróide ($Dif_{\theta,\alpha}$) é calculada e corrigida pela fração de abertura e ângulo de incidência, através da seguinte equação:

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} \times P_{dif} \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times \cos(AngIn_{\theta,\alpha})$$

Em que:

R_{glb} – É a radiação global normal;

P_{dif} – Proporção do fluxo de radiação normal que é difusa (Proporção Difusa);

Dur – Intervalo de tempo para análise;

$SkyGap_{\theta,\alpha}$ – Fração de abertura para cada sector do céu;

$AngIn_{\theta,\alpha}$ - Ângulo de incidência entre o centróide do sector do céu e a superfície interceptada.

Assim, a irradiação solar difusa total (Dif_{tot}) é o somatório da irradiação difusa de todos os sectores do *skymap*:

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{\theta,\alpha}$$

Por fim, o cálculo da irradiação solar global ($Global_{tot}$) é dado pelo somatório da radiação direta e difusa de todos os sectores:

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}$$

A radiação solar refletida contribui com apenas uma pequena fração na radiação solar global, exceto para locais rodeados por superfícies refletoras. Deste modo, a radiação solar refletida não é incluída na metodologia descrita (Huang & Fu, 2009).

Deve ser notado que a quantidade nuvens, precipitação, poeiras e outras condições atmosféricas reduzem consideravelmente a quantidade de radiação solar direta e difusa incidente na cobertura dos telhados. Uma vez que estes fatores estão constantemente a mudar, foram usados valores de transmissividade e proporção de radiação difusa médios mensais para as zonas de estudo, de modo a considerar estas atenuações no modelo e a aumentar a fiabilidade dos resultados (Kodysh *et al.*, 2013).

A transmissividade da atmosfera, parâmetro variável entre 0 e 1, corresponde à fração de radiação solar que atinge a superfície terrestre. Os valores típicos são 0,6 ou 0,7 para condições de céu muito limpo e 0,5 para condições normais de céu limpo. A proporção difusa tem uma relação inversa com a transmissividade. Este parâmetro corresponde à fração de fluxo de radiação global normal que é difusa e varia entre 0 e 1. O valor 0,2 corresponde a condições de céu muito limpo e 0,3 a condições normais de céu limpo (ESRI, 2011).

Os valores de transmissividade e proporção difusa utilizados para cada mês são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2. Estes valores médios, referentes ao período de 1961 a 1990, foram retirados do programa SolTerm 5.1.4 para os concelhos de Lisboa e Oeiras. O programa SolTerm 5.1.4, desenvolvido e distribuído pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia

(LNEG), é um programa que possibilita a análise de desempenho de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos. Associado a este programa encontra-se um banco de 308 anos meteorológicos de referência, um para cada concelho, apropriados para a simulação de sistemas solares em Portugal (Aguiar & Coelho, 2012).

Tabela 5.1- Valores SolTerm de transmissividade e proporção difusa para o concelho de Lisboa

Mês	Transmissividade	Proporção Difusa
Janeiro	0,45	0,45
Fevereiro	0,48	0,46
Março	0,47	0,42
Abril	0,51	0,41
Mai	0,54	0,37
Junho	0,56	0,35
Julho	0,61	0,33
Agosto	0,63	0,32
Setembro	0,55	0,36
Outubro	0,51	0,42
Novembro	0,49	0,43
Dezembro	0,48	0,45

Tabela 5.2 - Valores SolTerm de transmissividade e proporção difusa para o concelho de Oeiras

Mês	Transmissividade	Proporção Difusa
Janeiro	0,45	0,47
Fevereiro	0,48	0,43
Março	0,47	0,41
Abril	0,51	0,39
Mai	0,54	0,36
Junho	0,55	0,37
Julho	0,60	0,33
Agosto	0,61	0,33
Setembro	0,55	0,38
Outubro	0,51	0,40
Novembro	0,49	0,44
Dezembro	0,48	0,45

O Solar Analyst tem diversas vantagens, nomeadamente a sua versatilidade no *output*, que permite obter a radiação direta e sua duração, assim como a radiação difusa e global. Outras

vantagens são ainda a simplicidade dos *inputs*, a flexibilidade e a precisão e rapidez dos cálculos do modelo (Fu & Rich, 2000).

Assim, para cada uma das áreas de estudo foi aplicada a metodologia para cada mês do ano com diferentes valores de transmissividade e proporção difusa, de modo a obter uma melhor descrição da irradiação local. Como resultado, foram obtidos os seguintes mapas para cada mês por área de estudo:

- Mapa da radiação global (Wh.m^{-2});
- Mapa da radiação direta (Wh.m^{-2});
- Mapa da radiação difusa (Wh.m^{-2});
- Mapa da duração da radiação direta (horas).

No final foram somados os mapas da radiação global de cada mês, por forma a obter-se um mapa anual da radiação global dos locais. A metodologia aplicada encontra-se representada na figura 5.4.

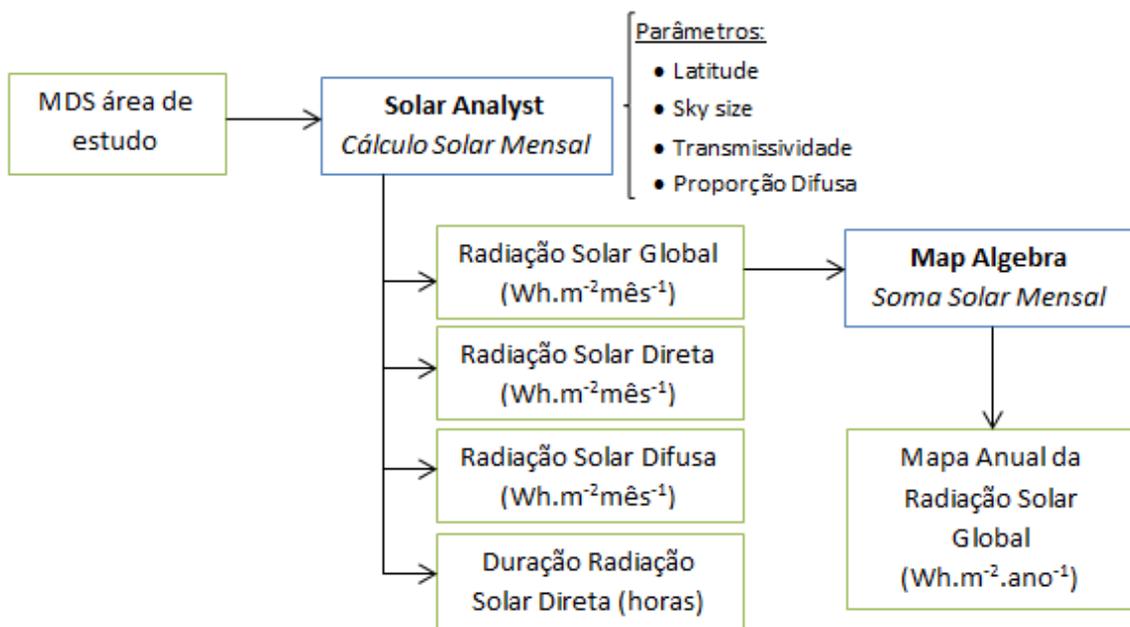


Figura 5.4 - Metodologia do cálculo de radiação solar incidente

5.3. Determinação da radiação incidente nos telhados

Após o cálculo da radiação solar global anual para cada zona de estudo foi necessário obter a radiação nos telhados através da metodologia representada na figura 5.5. No processo de identificação dos telhados realizou-se um corte do mapa anual do potencial solar com os polígonos dos edifícios por área de estudo. Foi assim obtido o mapa da radiação global anual nos telhados de cada área de estudo.



Figura 5.5 - Metodologia de cálculo da radiação solar incidente nos telhados

Os polígonos obtidos, retirados da planimetria no primeiro passo, representam a delimitação da cobertura dos edifícios. Estes incluem todos os edifícios unifamiliares e multifamiliares, bem como edifícios não habitacionais, tais como escolas, escritórios, comércio, bombeiros, anexos, etc. Deve ser notado que os polígonos não incluem objetos que possam interferir com a instalação de sistemas solares na cobertura dos edifícios, tais como chaminés e sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado.

5.4. Seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos

Seguidamente procedeu-se à seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas solares. Para tal, foi necessário analisar os dados obtidos anteriormente de modo a confirmar quais os locais com as características mais adequadas.

Primeiramente foi estudado o comportamento da radiação global anual nos telhados de cada zona de estudo. Para tal, recorreu-se à ferramenta Zonal Statistics do ArcGIS 10.1, obtendo-se informação acerca dos declives e orientações correspondentes à maior incidência de radiação solar, bem como a quantidade de radiação média global anual incidente nos edifícios. Com a informação obtida foi possível ficar a conhecer os melhores declives e orientações para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Após a aplicação de um valor mínimo de radiação global anual nos edifícios, excluiu-se os edifícios que não cumpriam o requisito, bem como aqueles que possuíam uma área demasiado pequena para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Foram assim obtidos os edifícios mais adequados para a implementação dos sistemas.

Por fim, obtiveram-se as áreas ideais nos edifícios escolhidos, através da exclusão dos locais com os declives e orientações menos adequados previamente estudados. A figura 5.6 representa a metodologia aplicada.

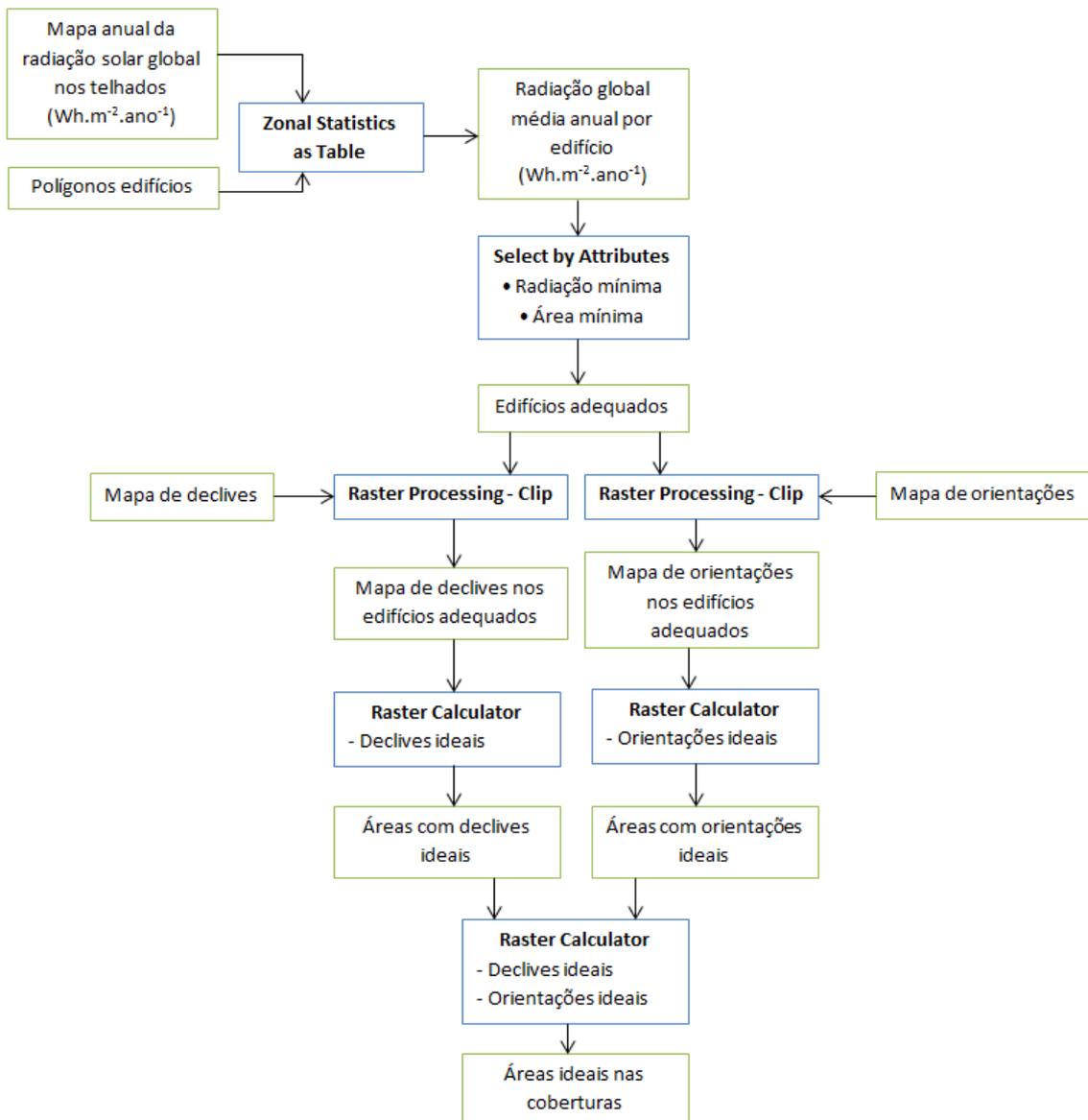


Figura 5.6 - Metodologia para seleção dos melhores locais para implementação de sistemas fotovoltaicos

5.5. Determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo

O último passo consistiu na determinação do potencial fotovoltaico das zonas de estudo, através da aplicação da seguinte fórmula (Hofierka & Kaňuk, 2009):

$$E_p = A \times I \times \eta \times PR$$

Em que,

E_p – corresponde à energia potencial produzida (Wh.ano⁻¹);

A – corresponde à área disponível para a instalação do sistema fotovoltaico (m²);

I – diz respeito à irradiação global anual média no edifício (Wh.m⁻².ano⁻¹);

η_M – corresponde à eficiência típica de uma célula fotovoltaica, que se assume ser 15% (Brito & Silva, 2006);

PR – representa a eficiência típica de um sistema fotovoltaico (*performance ratio* em inglês), que depende fundamentalmente das perdas térmicas e perdas em linha, cujo valor se assume ser 75% (Šúri et al., 2007).

Foi ainda calculada a percentagem de consumo anual de energia elétrica satisfeita, tendo em conta o número de pessoas residentes nas zonas de estudo. Por fim, foi feita uma análise ao potencial de percentagem de redução de CO₂ com a instalação de sistemas fotovoltaicos nos locais selecionados.

O cálculo da contabilização da intensidade carbónica por emissão de gases com efeito de estufa foi feito com base na Portaria n.º 63/2008 de 21 de janeiro que estabelece o valor 0,47 kg CO₂/kWh como fator de emissão associado ao consumo de eletricidade em território nacional.

6. Resultados

6.1. Caracterização das áreas de estudo

6.1.1 Área Oeste

A primeira área de estudo ($38^{\circ} 43' 0''$ N, $9^{\circ} 14' 0''$ W), apresentada na figura 6.1, com $2,20 \text{ km}^2$ ($1,32 \times 1,67 \text{ km}$), pertence ao concelho de Oeiras e abrange as antigas freguesias de Linda-a-Velha (a norte), Cruz Quebrada-Dafundo (a sudoeste) e Algés (a sudeste) que, após a Reorganização Administrativa Territorial Autárquica, foram agregadas numa só freguesia designada por Algés.



Figura 6.1 - Área de estudo Oeste (Fonte: Bing Maps, 2010)

Esta área, integrada em 165 subsecções estatísticas, inclui diversos edifícios com variados tamanhos, formas e funções, sendo uma localidade muito heterogénea que revela dificuldades no ordenamento do território, refletindo-se na desorganização da malha urbana. Inclui parte da Mata do Estádio Nacional, composta por uma grande quantidade de árvores, sendo este local o mais arborizado. Nas visitas técnicas ao local identificaram-se algumas árvores nas zonas de habitação que pudessem provocar sombreamento nas coberturas mas, no geral, a maioria dos edifícios possui uma altura superior à vegetação, não havendo obstrução à incidência de radiação solar.

A figura 6.2 representa o MDS da área de estudo, obtido a partir de dados LiDAR, que descreve a superfície do terreno, incluindo as estruturas presentes. A data de aquisição dos dados foi em junho de 2006, sendo a sua resolução de 1m e sistema de coordenadas Datum 73. O valor de elevação varia entre -1,25 m e 121,83 m, sendo o valor médio 58,86 m.

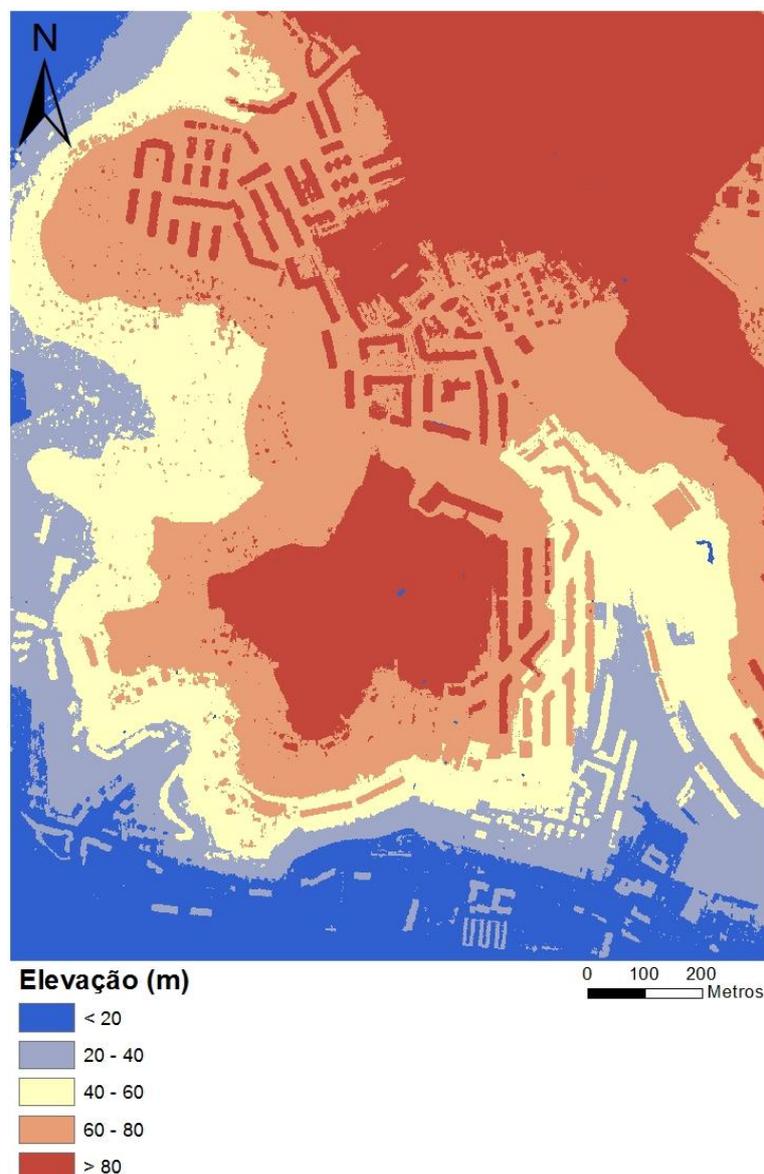


Figura 6.2 - MDS da zona Oeste

Relativamente ao clima na área de estudo, Oeiras caracteriza-se por um clima temperado mediterrânico, apresentando uma temperatura média anual de 16,0 °C e uma precipitação anual de 664,8 mm (Gabinete do Desenvolvimento Municipal, 2009). Na tabela 6.1 são apresentados os dados de insolação para a estação meteorológica de Sassoeiros, localizada no concelho de Oeiras.

Tabela 6.1 - Valores de insolação da estação de Sassoeiros/Oeiras (adaptado de INMG, 1991)

Mês	Insolação Total (h)
Janeiro	123,8
Fevereiro	145,5
Março	180,3
Abril	236,3
Maio	305,9
Junho	309,7
Julho	351,0
Agosto	318,1
Setembro	240,4
Outubro	205,6
Novembro	153,1
Dezembro	79,3
Total	2 649,0

Em 2011, o consumo de energia elétrica total, no concelho de Oeiras, foi de 765 164,46 MWh, tendo diminuído em relação ao ano anterior em cerca de 6% (figura 6.3). O sector doméstico foi responsável por 30% deste consumo (figura 6.4), sendo o consumo doméstico de energia elétrica por habitante de 1 336,90 kWh/hab/ano. O consumo total de energia elétrica por habitante, neste concelho, é de 4 445,50 kWh/hab/ano (INE, 2011a).

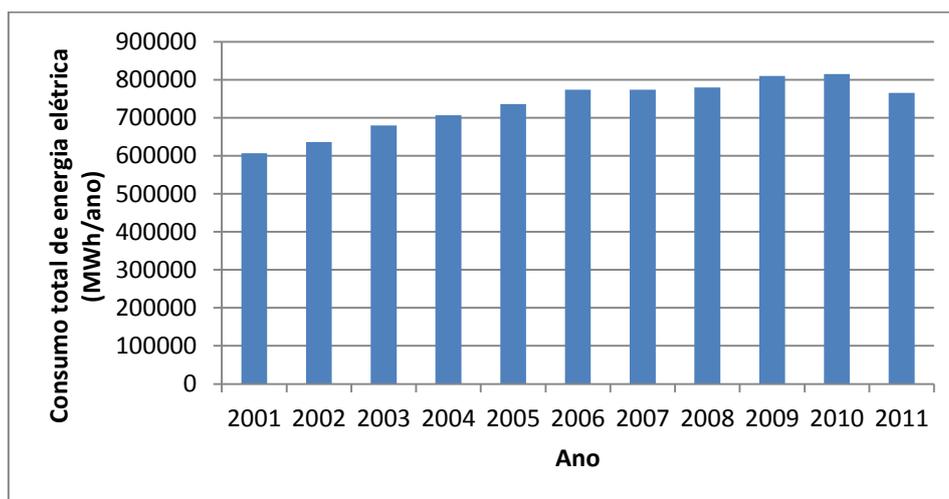


Figura 6.3 - Evolução anual do consumo total de energia elétrica no concelho de Oeiras (adaptado de INE, 2011a)

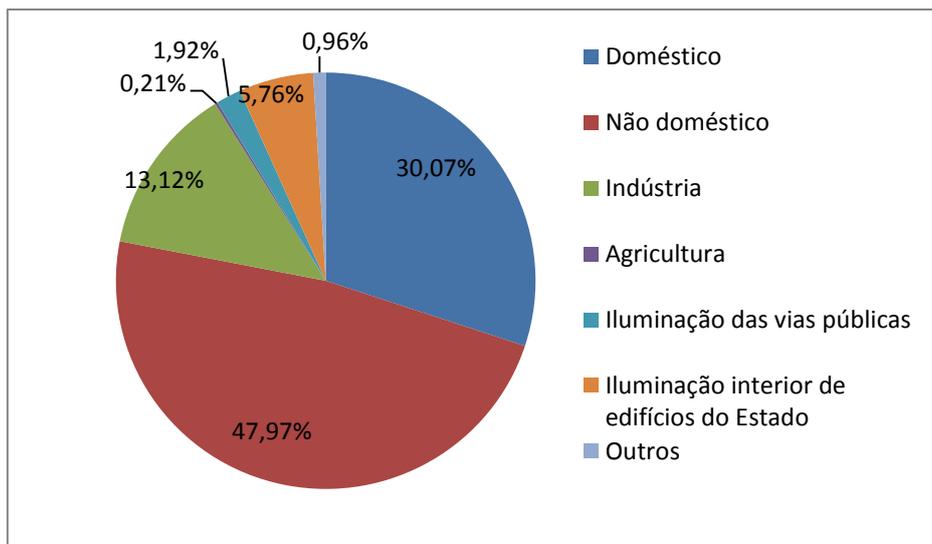


Figura 6.4 - Consumo de energia elétrica por sector no concelho de Oeiras (adaptado de INE, 2011a)

A área total ocupada pelos edifícios da área de estudo corresponde a 0,38 km², representando 17% da área de estudo. Existem 1 676 edifícios, sendo que 87% são habitações, unifamiliares ou multifamiliares, e 13% são edifícios não habitacionais (figuras 6.5 e 6.6). Nos edifícios de habitação, 12% têm função mista ou seja, integram a função de comércio/serviços para além da função residencial. No total dos edifícios habitados existem 10 168 alojamentos, dos quais 8 402 são alojamentos familiares de residência habitual (INE, 2011b).

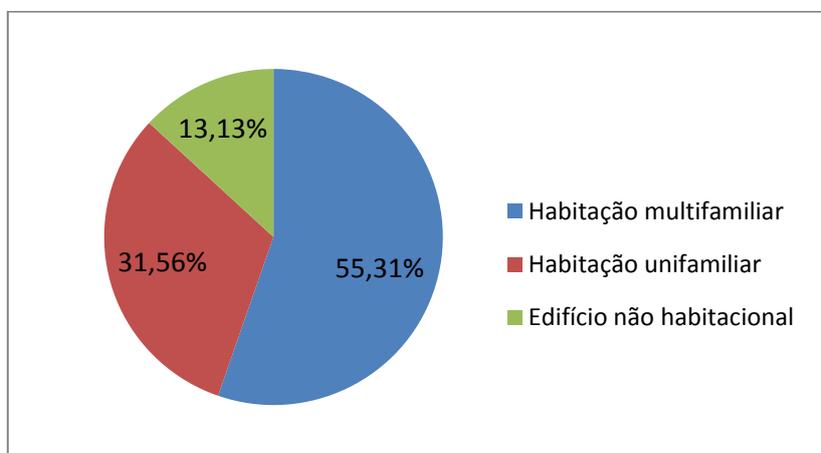


Figura 6.5 - Percentagem de edifícios por tipologia na zona Oeste (adaptados de INE,2011b)

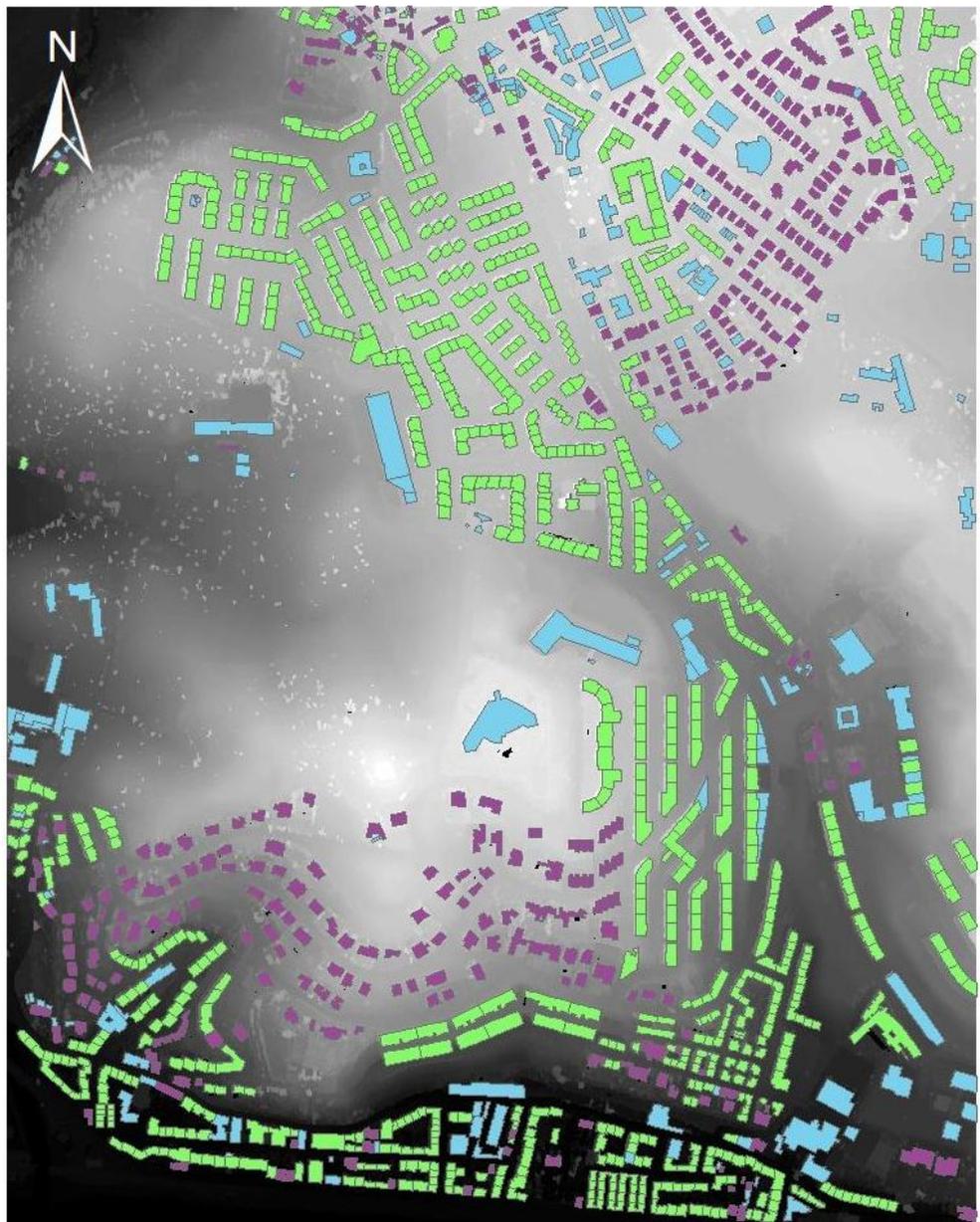


Figura 6.6 – Mapa da distribuição de tipologia de edifícios na zona Oeste

No que se refere à data de construção dos edifícios, existe uma grande heterogeneidade na área, sendo que cerca de 24% foi construído entre 1971 e 1980 (figura 6.7). Relativamente à altura dos edifícios, a maior percentagem de edifícios possui cinco ou mais pisos (figura 6.8) (INE, 2011b).

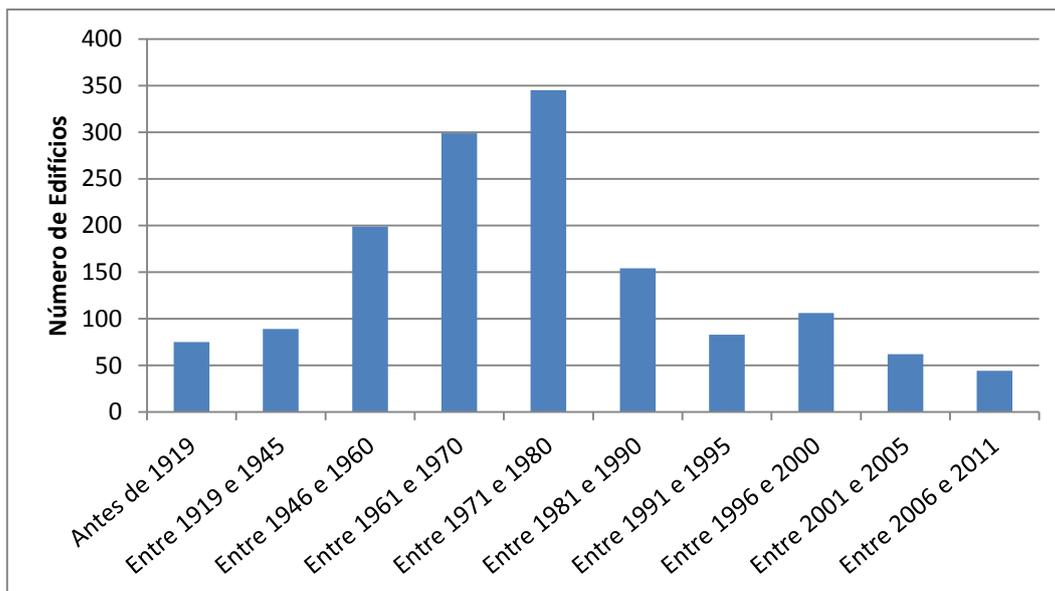


Figura 6.7 – Número de edifícios por classes de ano de construção na zona Oeste (adaptado de INE, 2011b)

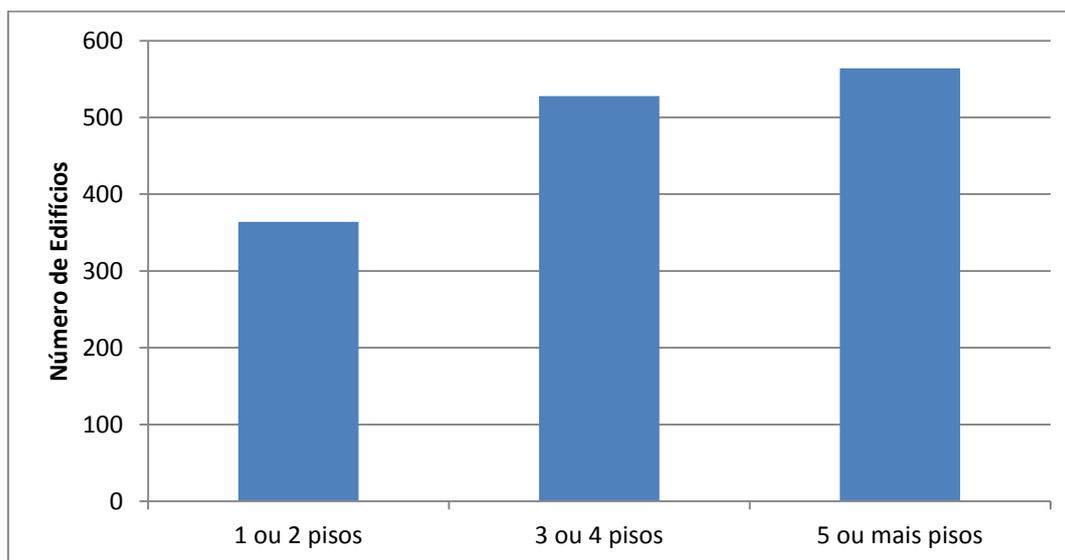


Figura 6.8 - Número de edifícios por número de pisos na zona Oeste (adaptado de INE, 2011b)

No total existem 19 530 residentes na zona de estudo o que corresponde a uma densidade populacional de 8 858,1 habitantes/km². A figura 6.9 apresenta as zonas com maior e menor densidade populacional na área de estudo (INE, 2011b).

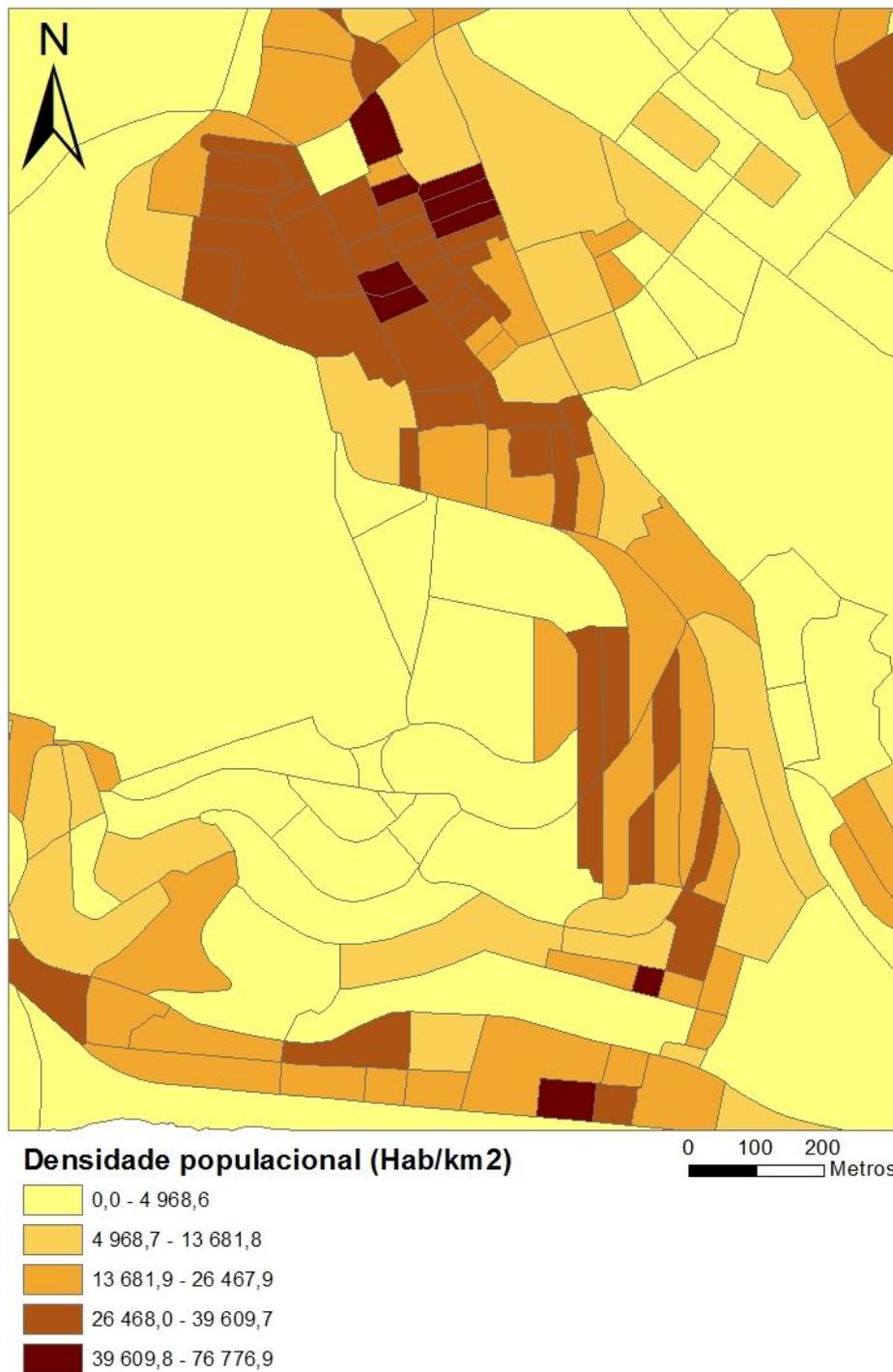


Figura 6.9 – Mapa da densidade populacional por subsecções da zona Oeste (adaptado de INE, 2011b)

O mapa dos declives (figura 6.10) e o mapa das orientações (figura 6.12) permitiram estudar as condições da área de estudo à exposição solar. Após análise, verificou-se que 77% da área total possui declives inferiores a 35° (figura 6.11) e 42% possui orientação a sul, sudeste e sudoeste (figura 6.13).



Figura 6.10 - Mapa de declives da zona Oeste

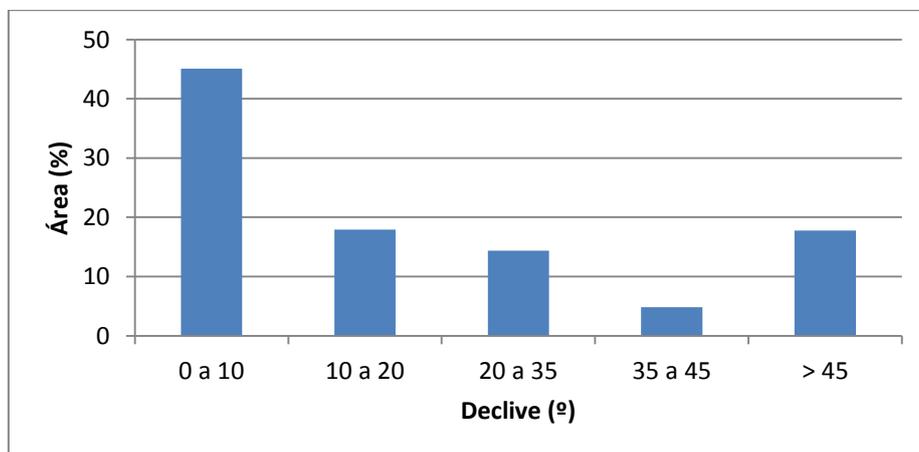


Figura 6.11 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de declive

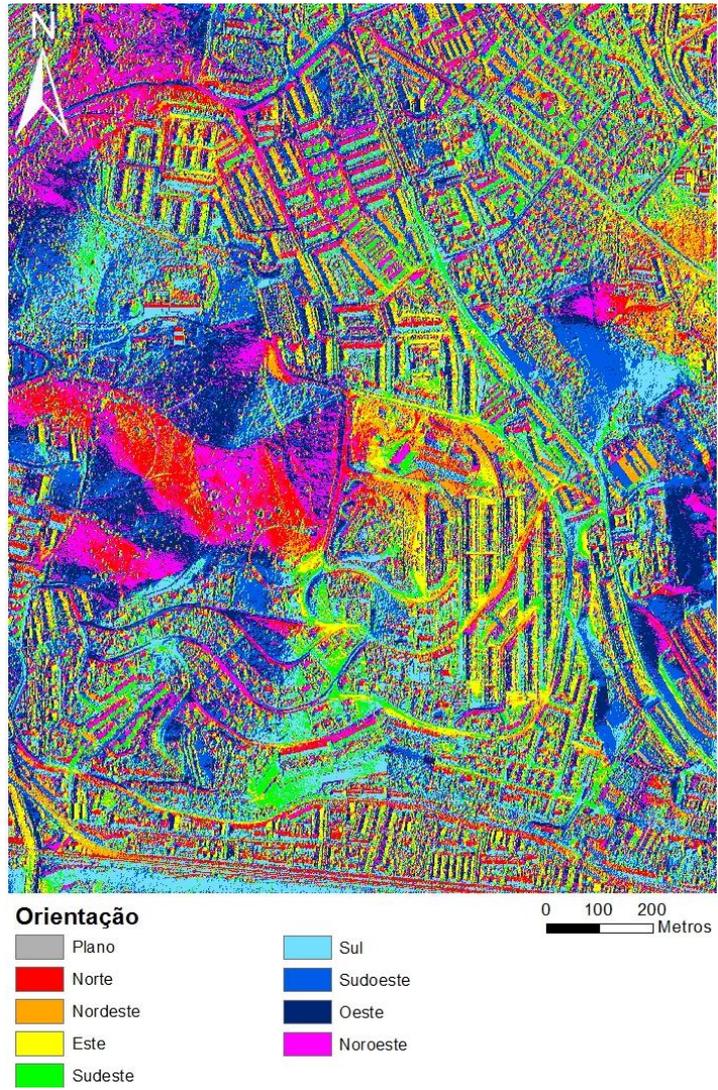


Figura 6.12 - Mapa de orientações da zona Oeste

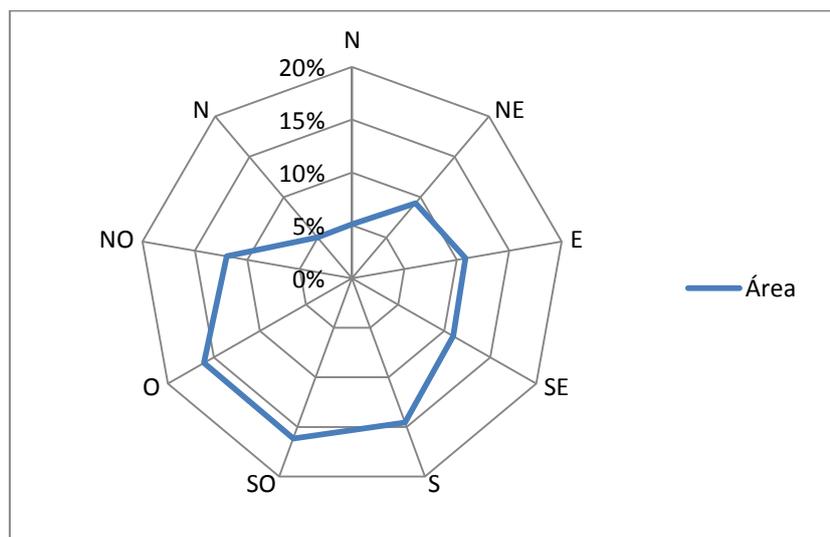


Figura 6.13 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de orientação

6.1.2 Área Este

A segunda área de estudo ($38^{\circ} 42' 0''$ N, $9^{\circ} 12' 0''$ W), apresentada na figura 6.14, tem uma área de $1,83 \text{ km}^2$ ($1,34 \times 1,37 \text{ km}$) e pertence ao concelho de Lisboa, localizando-se a este da primeira área. Esta área abrange as antigas freguesias de Santa Maria de Belém (a sul) e São Francisco Xavier (a norte), que se agregaram e passaram a formar a nova freguesia de Belém, com a aprovação da Lei nº56/2012, de 8 de novembro.



Figura 6.14 - Área de estudo Este (Bing Maps, 2010)

Esta zona encontra-se incluída em menos subsecções do que a área a Oeste (116 subsecções), o que seria de esperar, uma vez que possui uma área menor. Ao contrário da zona de estudo anterior possui uma malha urbana mais regular e organizada. A zona situada no centro da área de estudo possui um tecido urbano organizado em leque com habitações unifamiliares em banda. Ao contrário da zona Oeste, nas visitas ao terreno identificaram-se mais árvores próximas de edifícios, provocando sombreamento nas suas coberturas, uma vez que estas habitações têm, no geral, menor altura do que as presentes na área anterior.

Pode-se observar pelo MDS da zona de estudo (figura 6.15) que a elevação na área varia entre -0,34 m e 105,29 m, com um valor médio de 30,12 m, inferior ao obtido na zona Oeste. A data de aquisição destes dados foi em junho de 2006, sendo a sua resolução de 1m e sistema de coordenadas Datum 73.

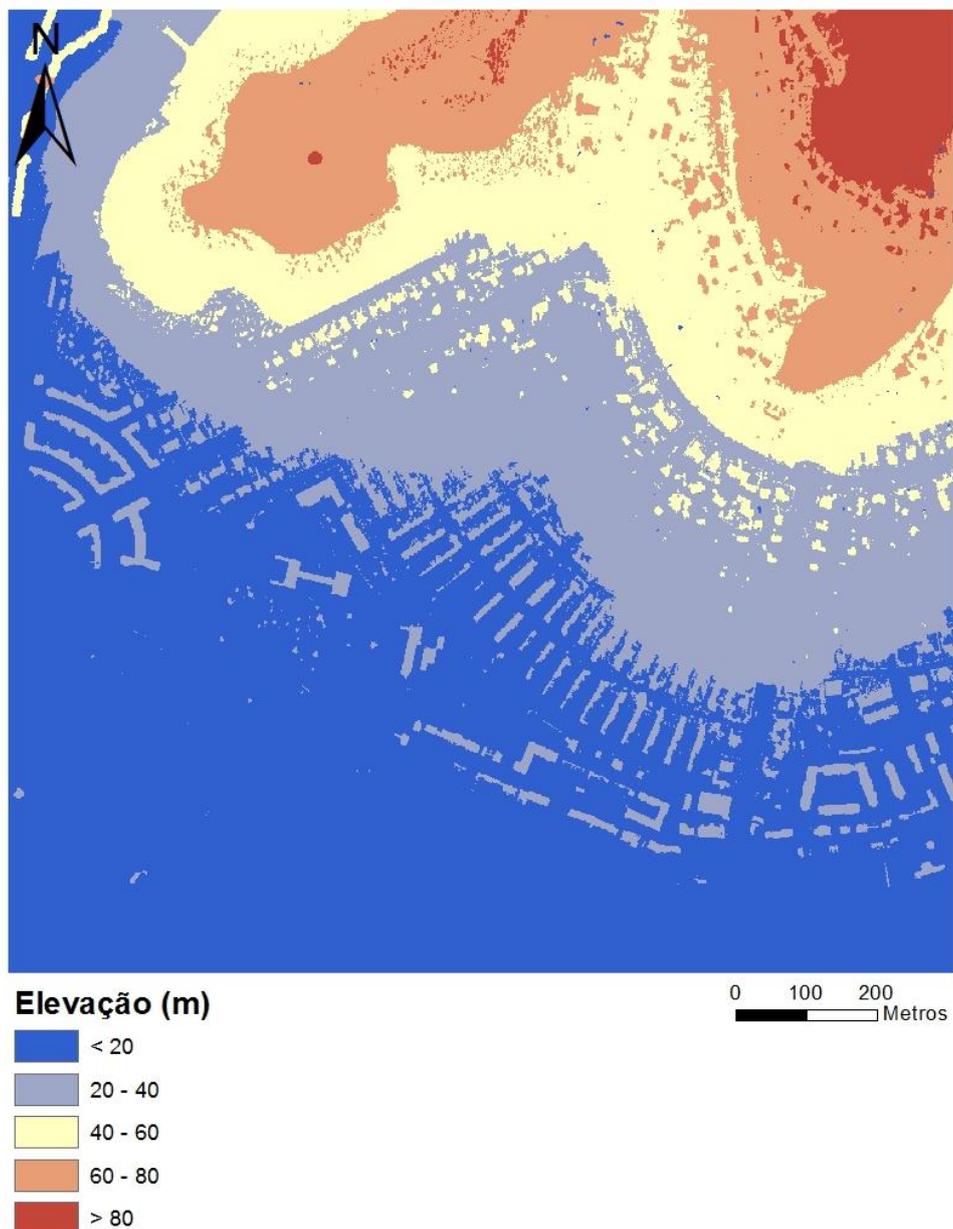


Figura 6.15 - MDS da zona Este

O concelho de Lisboa é influenciado por um clima temperado mediterrânico, tal como o concelho de Oeiras, caracterizando-se por uma temperatura média anual da ordem dos 16 °C e valores anuais de precipitação entre os 650 mm e os 760 mm (DMPU, 2009). Na tabela 6.2 são apresentados os dados de insolação para a estação meteorológica da Tapada da Ajuda, localizada no concelho de Lisboa.

Tabela 6.2 - Valores de insolação da estação de Tapada da Ajuda/Lisboa (adaptado de INMG, 1991)

Mês	Insolação Total (h)
Janeiro	131,2
Fevereiro	148,1
Março	184,5
Abril	235,5
Maio	287,0
Junho	299,8
Julho	350,3
Agosto	332,6
Setembro	248,7
Outubro	199,1
Novembro	156,4
Dezembro	137,9
Total	2 711,1

No concelho de Lisboa o consumo de energia elétrica total em 2011 foi de 3 282 898,76 MWh, tendo diminuído ligeiramente em relação ao ano anterior (figura 6.16). Deste consumo, 50% é atribuído ao sector não doméstico e 24% ao sector doméstico (figura 6.17), sendo o consumo doméstico de energia elétrica por habitante 1 439,9 kWh/habitante/ano. Neste concelho, o consumo total de energia elétrica por habitante é superior ao concelho de Oeiras, sendo de 5 993,6 kWh/habitante/ano (INE, 2011a).

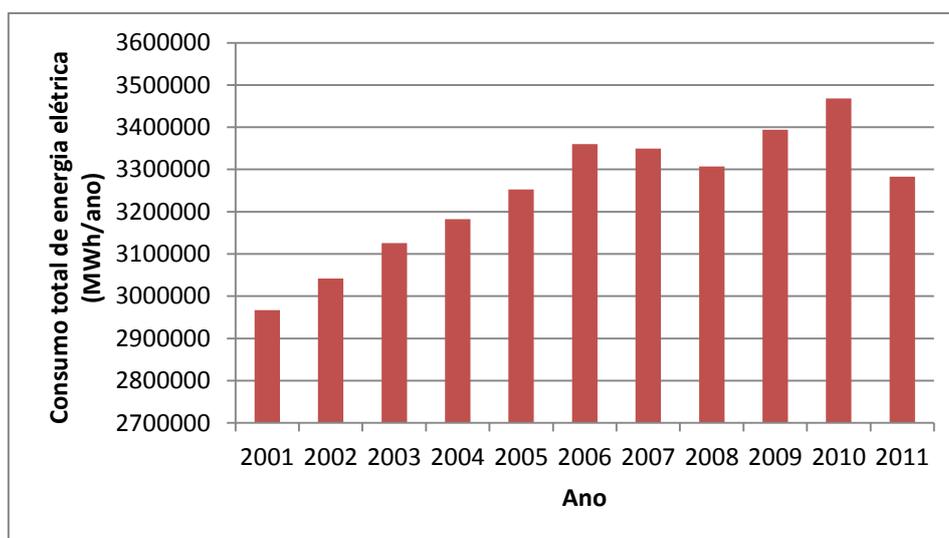


Figura 6.16 - Evolução anual do consumo total de energia elétrica no concelho de Lisboa (adaptado de INE, 2011a)

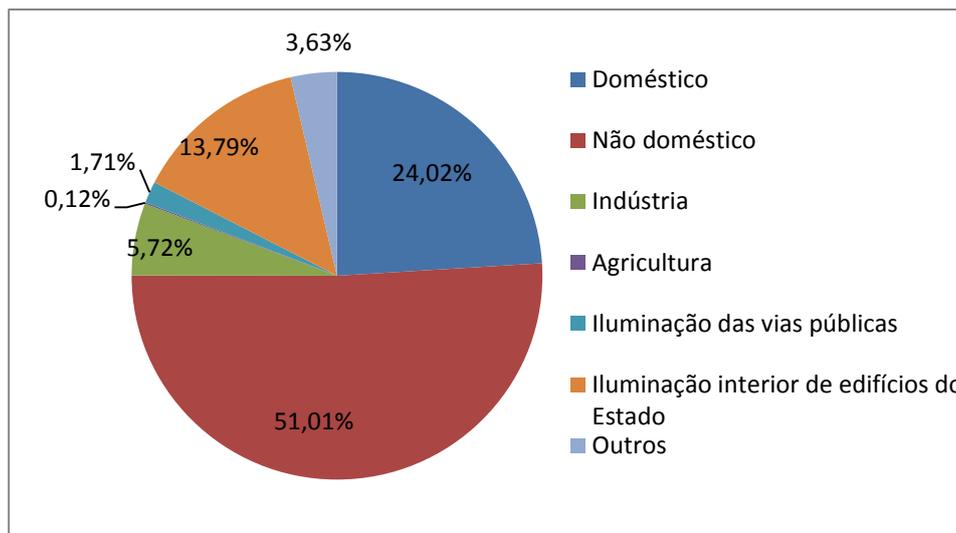


Figura 6.17 - Consumo de energia elétrica por sector no concelho de Lisboa (adaptado de INE, 2011a)

Em comparação com a zona Oeste verifica-se uma grande diferença na tipologia das habitações, uma vez que grande parte dos edifícios presentes na área Este são habitações unifamiliares (51%) e apenas 12% são habitações multifamiliares (figura 6.18). Entre os 1 829 edifícios identificados, existem ainda 36% classificados como edifícios não habitacionais. (INE, 2011b).

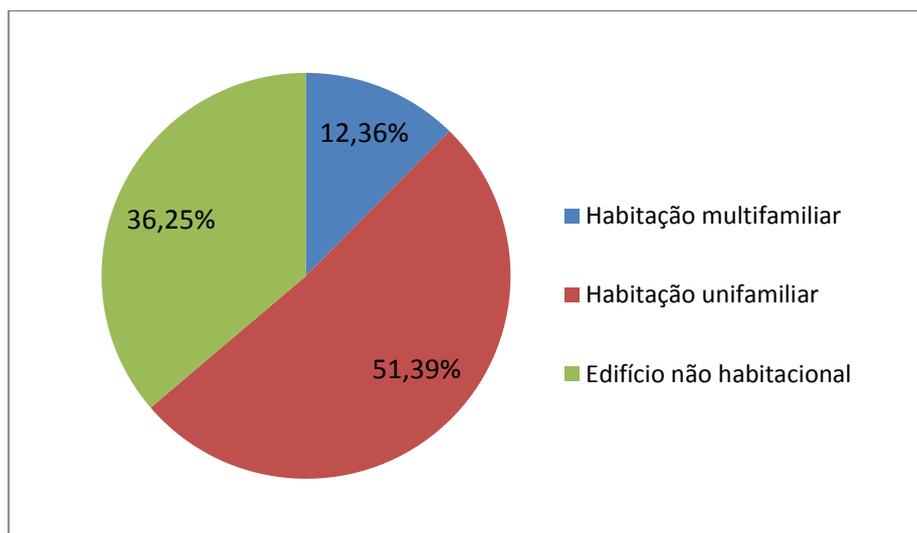
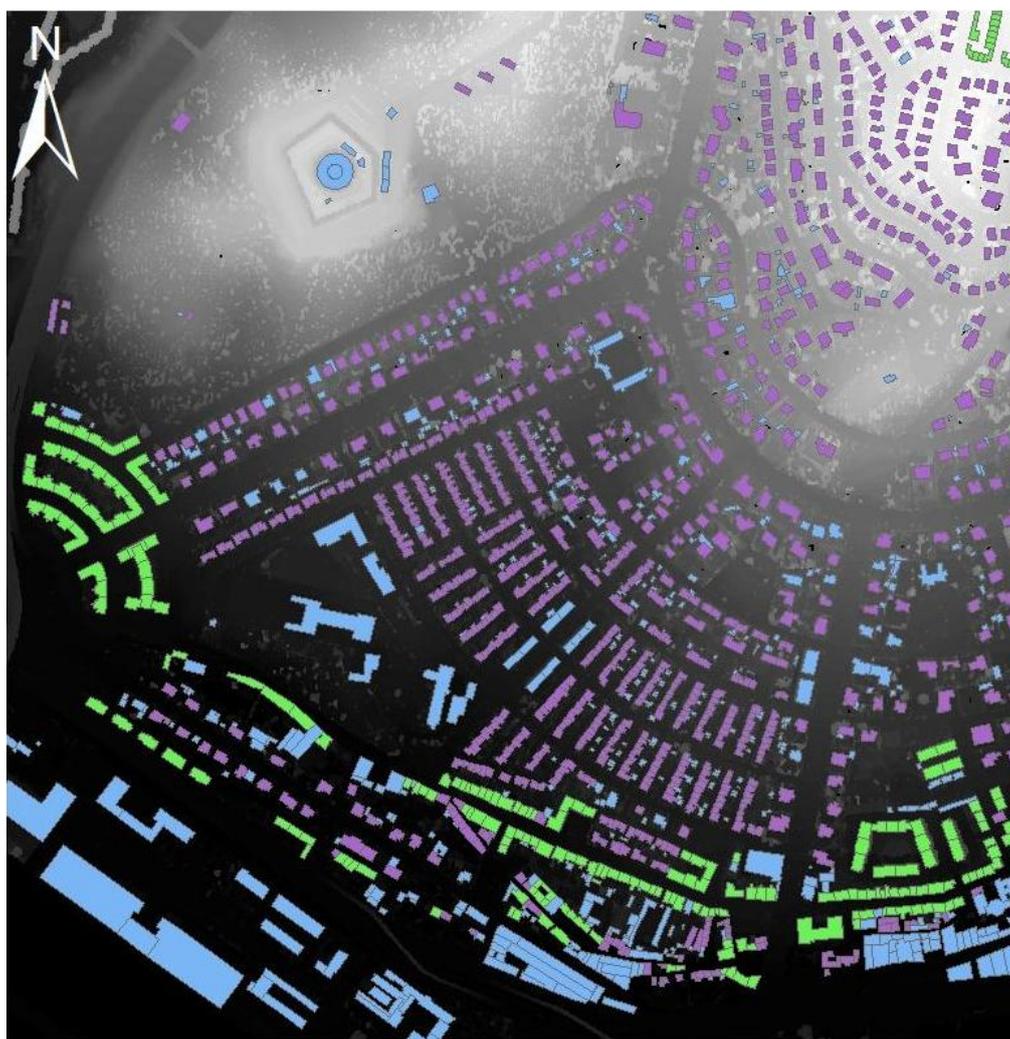


Figura 6.18 – Percentagem de edifícios por tipologia na zona Este (adaptado de INE, 2011b)

No total, estão inseridos na área de estudo 2 469 alojamentos, sendo que destes 1 824 são alojamentos familiares de residência habitual (INE, 2011b). No total a área ocupada pelos edifícios é 0,28 km², representando 15% da área de estudo. A figura 6.19 apresenta a distribuição e tipologia dos edifícios na zona de estudo.



Legenda

- Edifício não habitacional
- Habitação multifamiliar
- Habitação unifamiliar

0 100 200
Metros

Figura 6.19 – Mapa da distribuição de tipologia de edifícios na zona Este

Relativamente à data de construção, nesta zona verificou-se que cerca de 50% dos edifícios existentes foram construídos entre 1946 e 1960 (figura 6.20), tendo uma menor variedade do que a área Oeste. No que se refere à quantidade de pisos dos edifícios, também se verifica uma grande diferença, uma vez que 56 % dos edifícios possui apenas um piso (figura 6.21) (INE, 2011b).

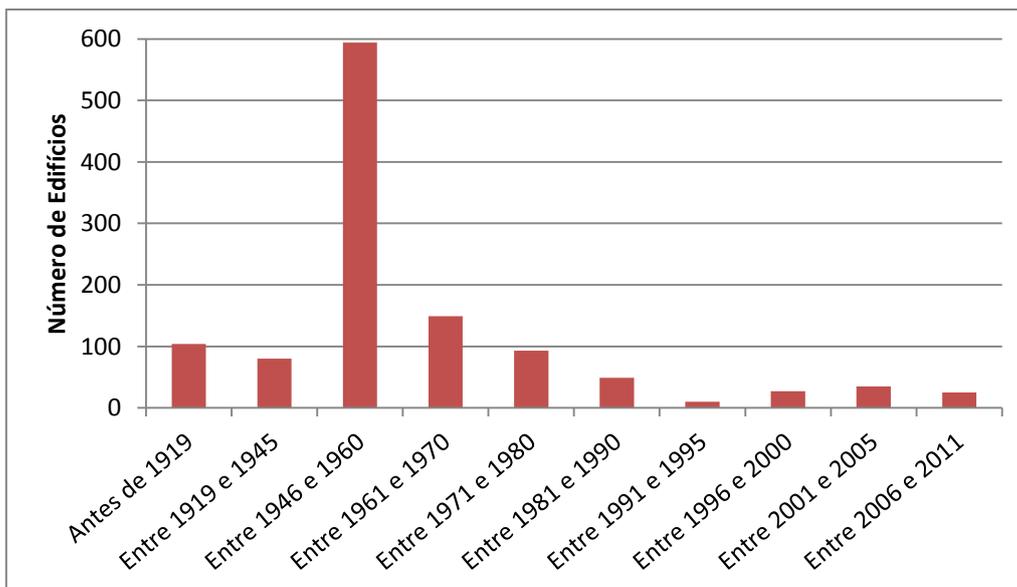


Figura 6.20 - Número de edifícios por classes de ano de construção na zona Este (adaptado de INE, 2011b)

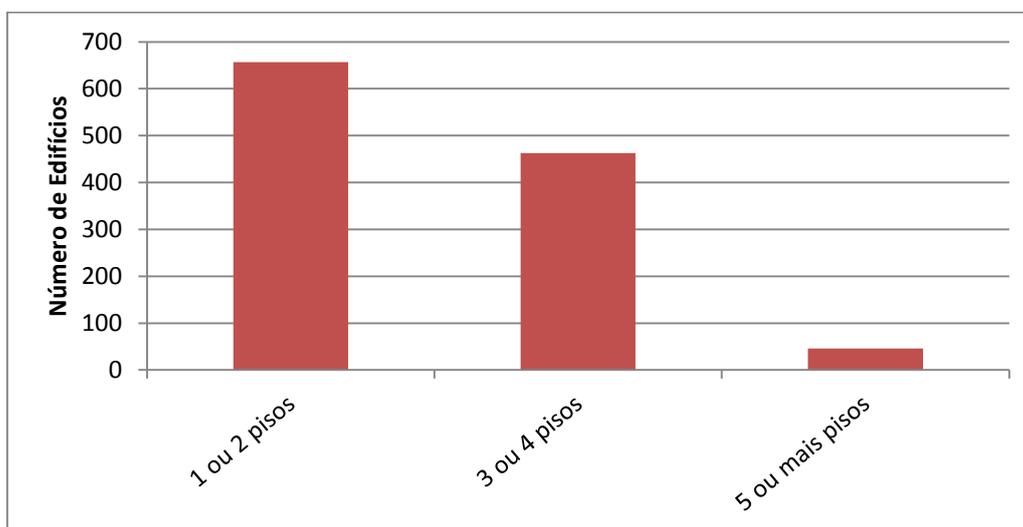


Figura 6.21 - Número de edifícios por número de pisos na zona Este (adaptado de INE, 2011b)

A densidade populacional da zona Este é de 2 622,8 habitante/km², valor inferior ao da área Oeste em 70%. No total existem 4 664 indivíduos residentes na área, sendo que destes 97% encontravam-se presentes nos Censos de 2011 (INE, 2011b). Na figura 6.22 é possível identificar a densidade populacional por subsecções estatísticas.

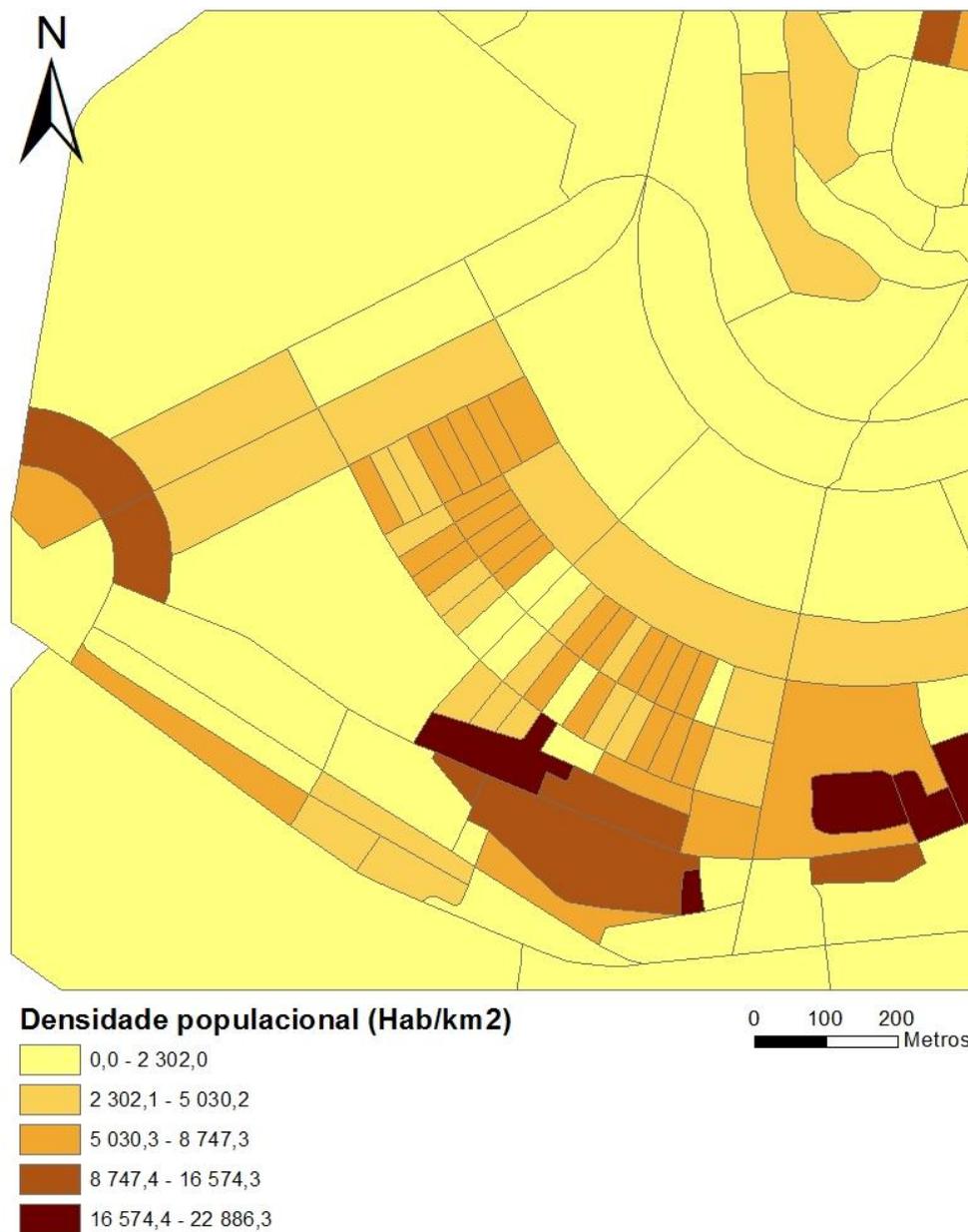


Figura 6.22 – Mapa da densidade populacional por subsecções estatística da zona Este (adaptado de INE, 2011b)

Quanto aos mapas de declive e orientação, verificou-se que 70% da área total tem declive inferior a 35° (figuras 6.23 e 6.24) e 45% possui orientação a sul, sudeste e sudoeste (figuras 6.25 e 6.26), valores próximos dos obtidos para a zona Oeste.



Figura 6.23 - Mapa de declives da zona Este

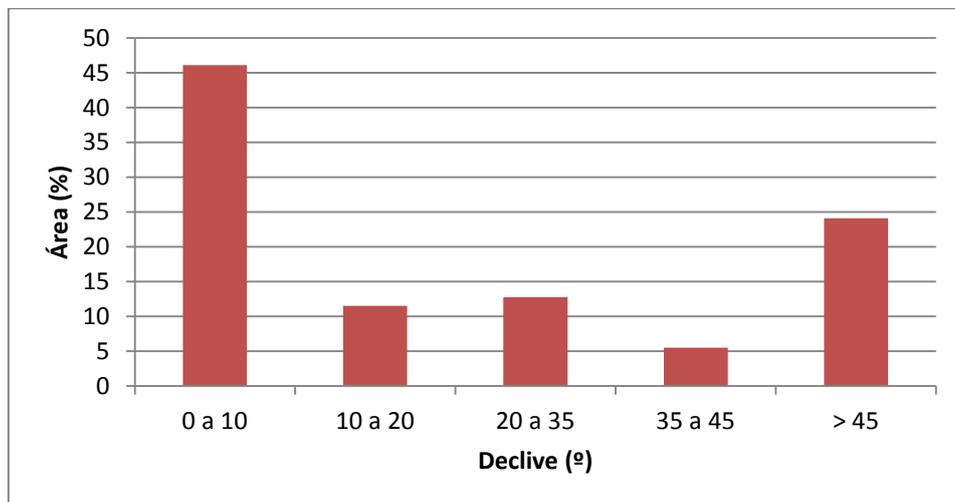


Figura 6.24 - Distribuição da área total da zona Este por classes de declive

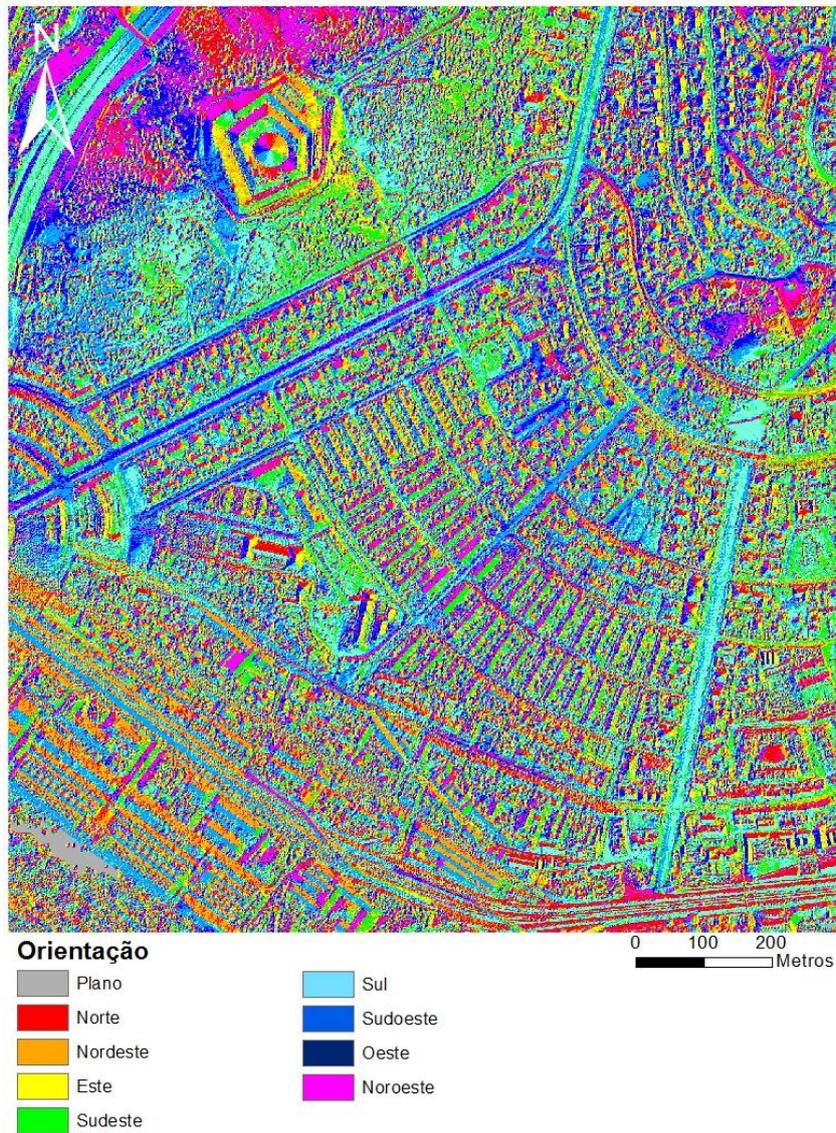


Figura 6.25 - Mapa de orientações da zona Este

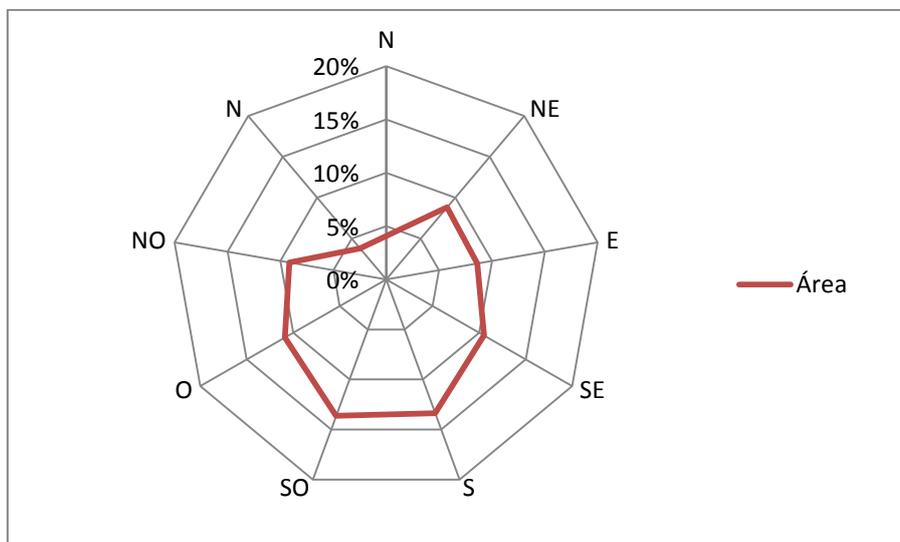


Figura 6.26 - Distribuição da área total da zona Oeste por classes de orientação

6.2. Determinação da radiação incidente nas áreas de estudo

Após a caracterização das áreas de estudo foi aplicado o modelo Solar Analyst ao MDS de cada área de estudo e obtido, assim, dois mapas anuais da radiação solar global incidente, apresentados nas figuras 6.27 e 6.28.

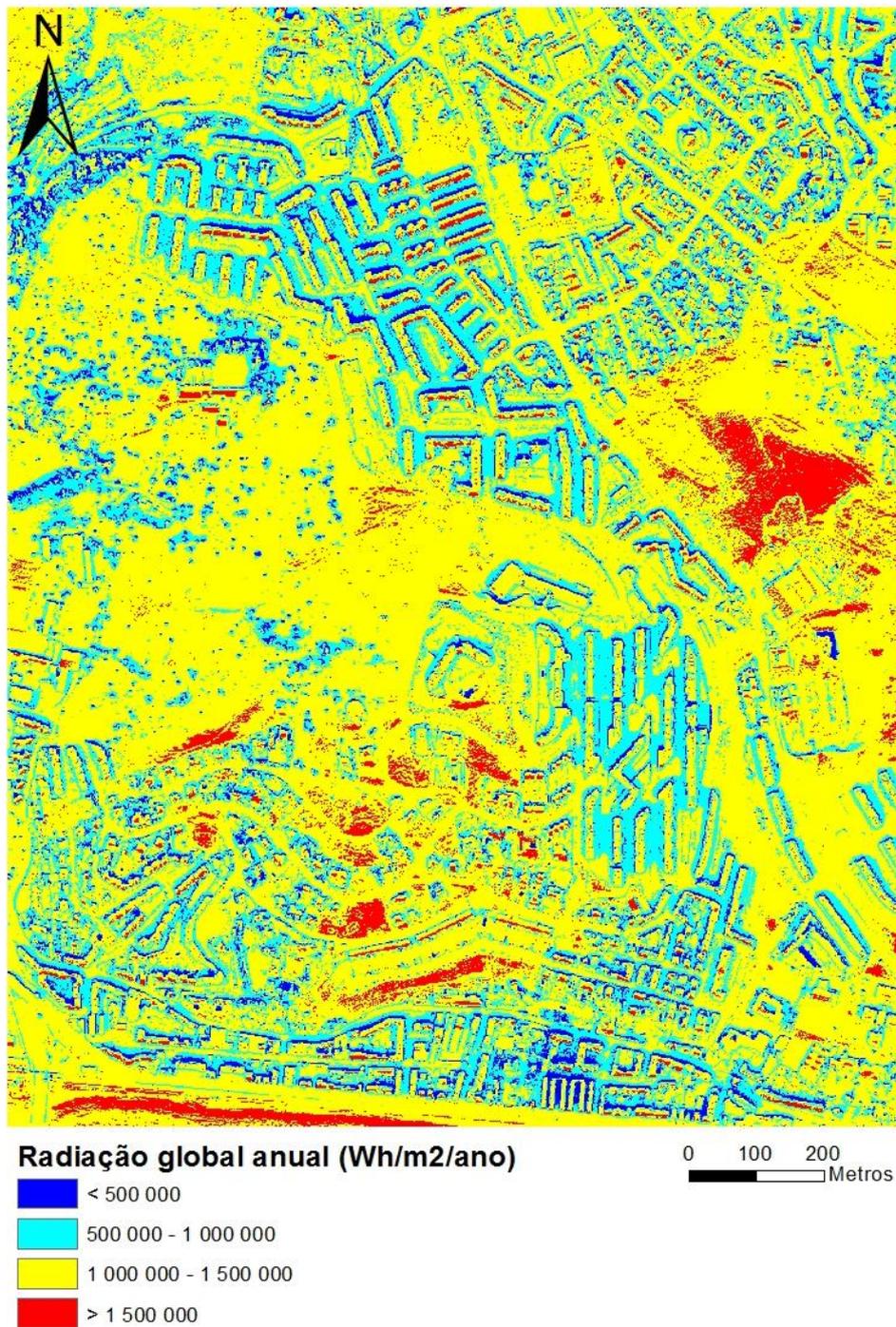


Figura 6.27 - Mapa da radiação global anual da zona Oeste

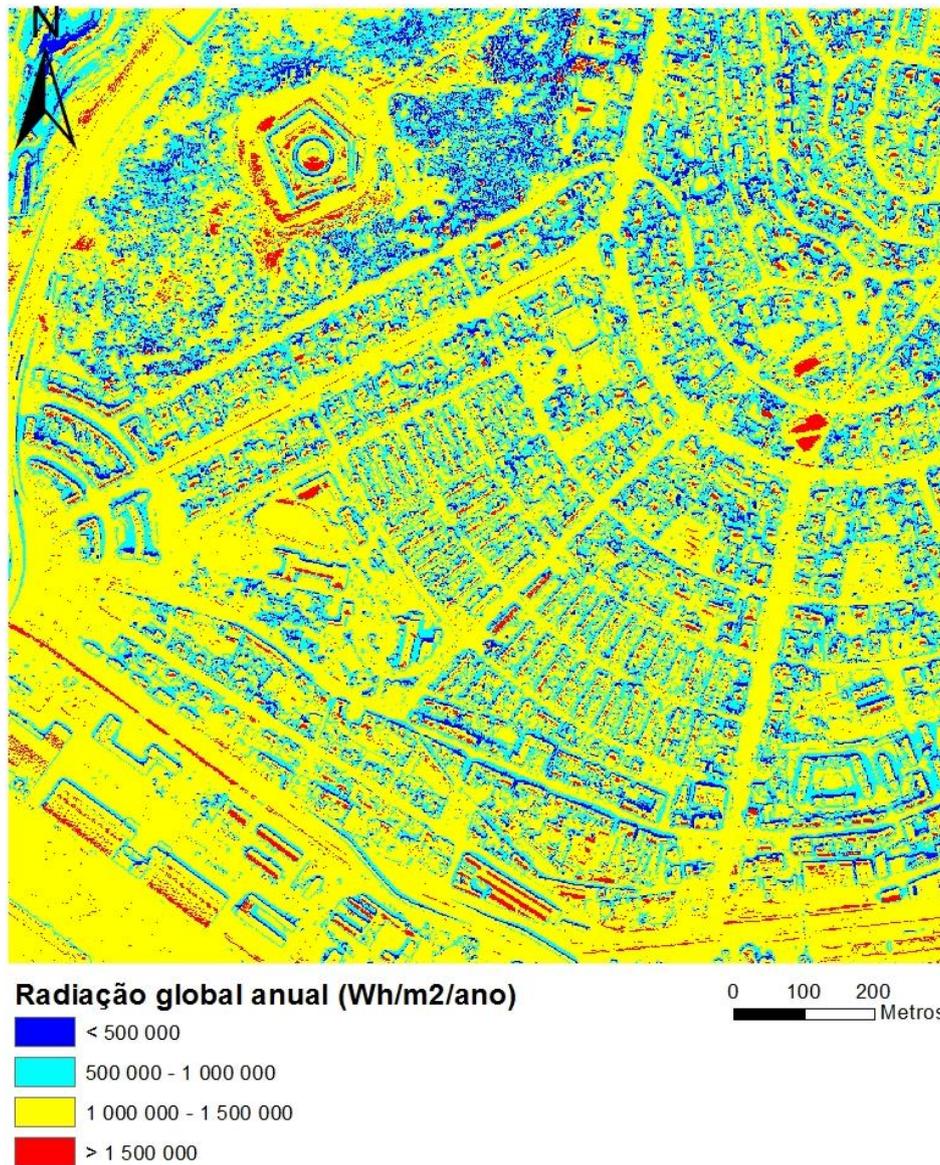


Figura 6.28 – Mapa da radiação global anual da zona Este

6.3. Determinação da radiação incidente nos telhados

A realização do corte do mapa da radiação solar global anual de cada zona de estudo com os polígonos dos edifícios permitiu, então, obter os mapas de radiação global anual nas coberturas, apresentados nas figuras 6.29 e 6.30.

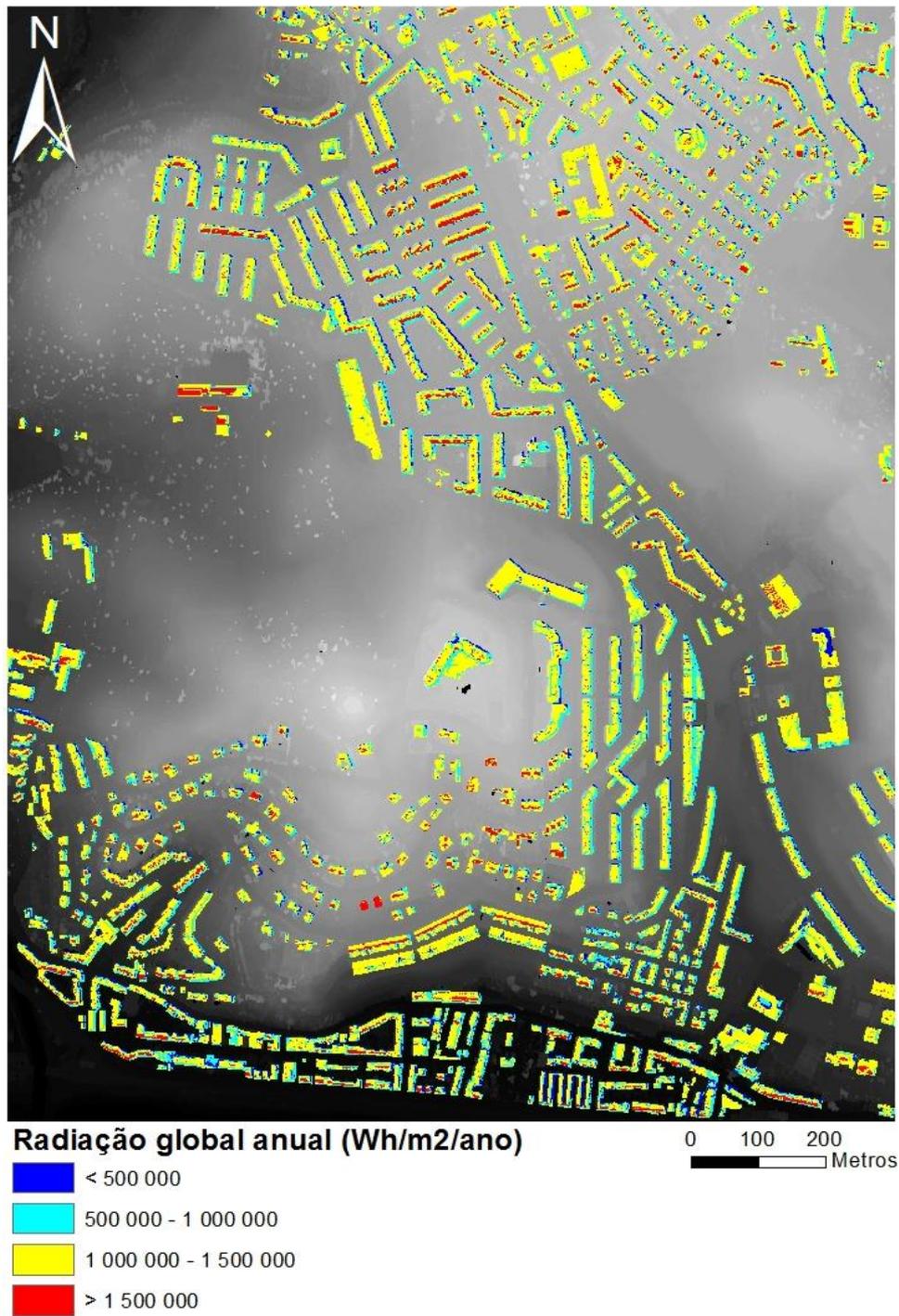
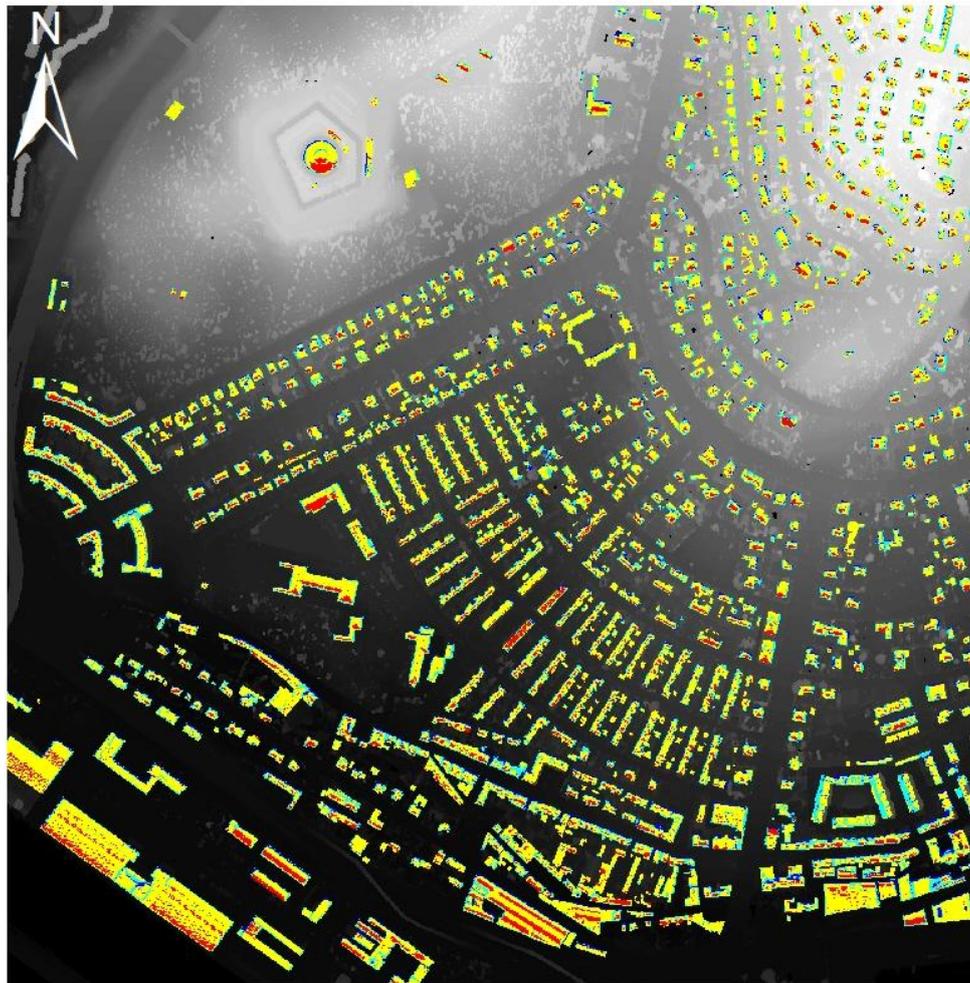


Figura 6.29 - Mapa da radiação global anual nos telhados dos edifícios da zona Oeste



Radiação global anual (Wh/m²/ano)

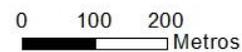


Figura 6.30 - Mapa da radiação global anual nos telhados dos edifícios da zona Este

Numa análise à quantidade de radiação incidente nas coberturas, constatou-se que 66% da área dos edifícios da zona Oeste e 64% da área dos edifícios da zona Este encontram-se no intervalo entre 1 000 000 Wh/m²/ano e 1 500 000 Wh/m²/ano (figura 6.31). Verificou-se ainda, que os edifícios não habitacionais (anexos e edifícios de comércio/serviços, públicos e de património) são os que recebem, em média, maior quantidade de radiação por ano, em ambas as áreas de estudo (figura 6.32). No entanto, na zona Oeste, o edifício que recebe maior quantidade de radiação solar, a seguir ao edifício não habitacional, é a habitação multifamiliar. Pelo contrário, na zona Este, a habitação unifamiliar é o segundo tipo de edifício a receber, em média, mais radiação global anual.

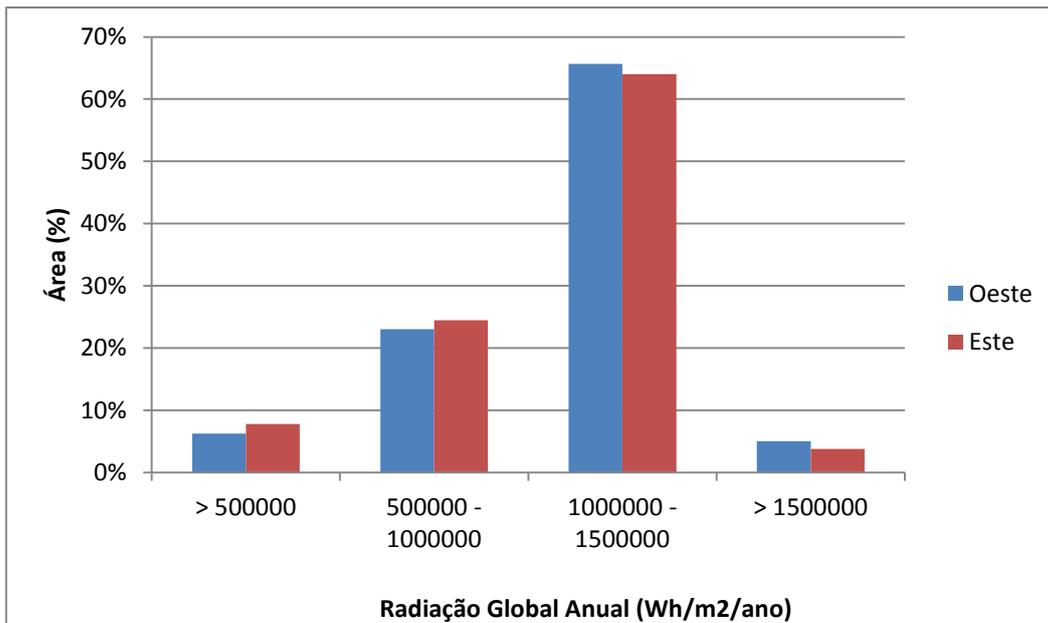


Figura 6.31 - Radiação global anual por percentagem de área de edifício nas duas zonas de estudo

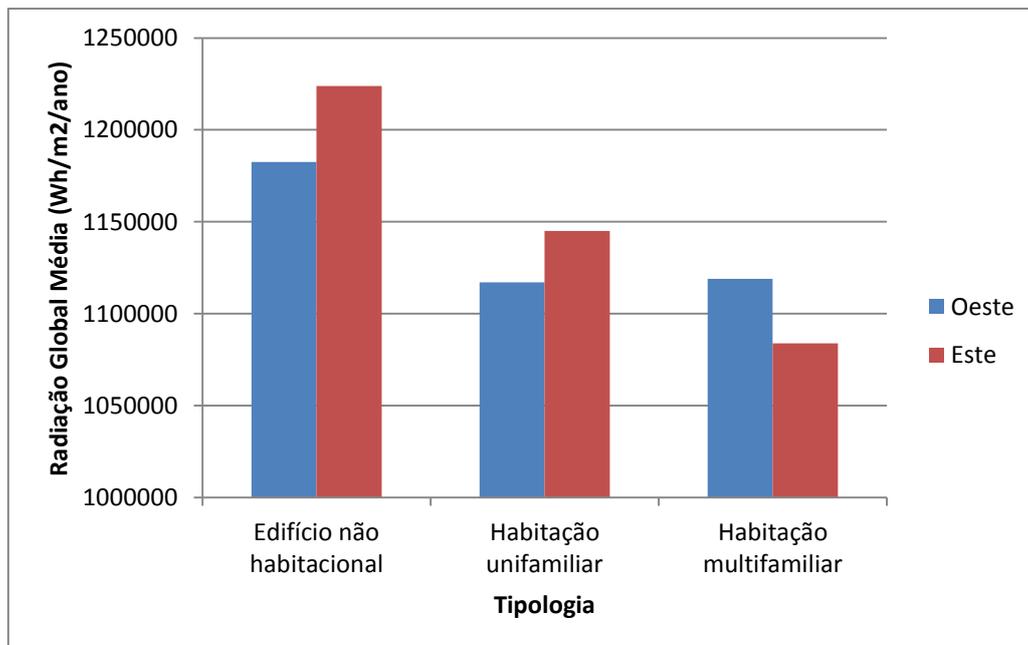


Figura 6.32 - Radiação global anual por tipologia de edifício nas duas zonas de estudo

6.4. Seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos

O estudo do comportamento da radiação solar nos diferentes declives dos telhados dos edifícios permitiu constatar que, em ambas as zonas de estudo, o valor máximo de radiação global anual ocorre nos declives entre 20 e 35° (figura 6.33). Assim, todas as áreas nos edifícios com declive de cobertura superior a 35° foram excluídas, de modo a considerar um intervalo de inclinações mais adequadas.

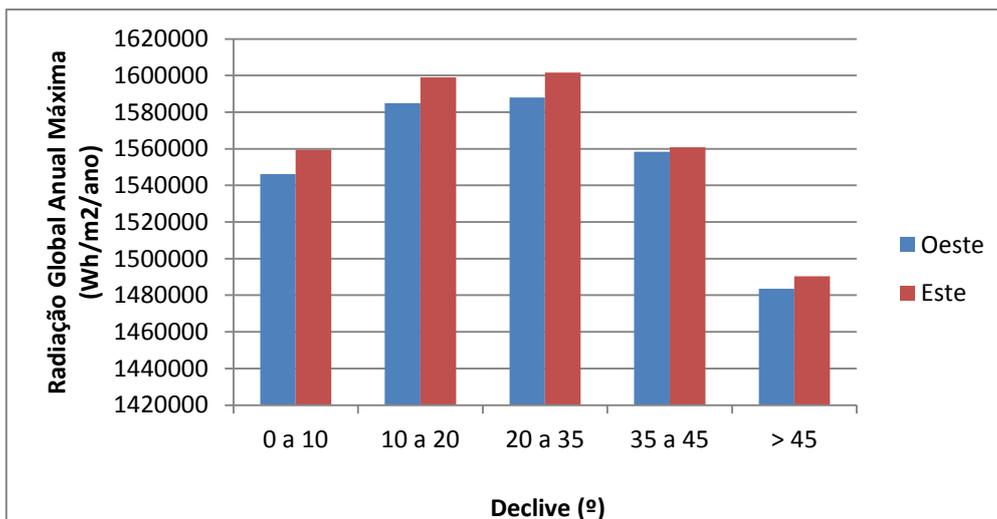


Figura 6.33 - Valores máximos de radiação global anual por declive nas duas zonas de estudo

No estudo da incidência de radiação solar nas diferentes orientações dos edifícios, constatou-se que os valores máximos de radiação global anual ocorrem nas orientações a sul, sudoeste e sudeste (figura 6.34), tal como esperado. Para além destas orientações, foram ainda selecionados os telhados planos, pois estes oferecem um grande potencial em termos de áreas utilizáveis e permitem ainda uma certa liberdade no desenho dos geradores, sendo possível orientá-los para Sul e escolher o ângulo de inclinação ótimo (GREENPRO, 2004a).

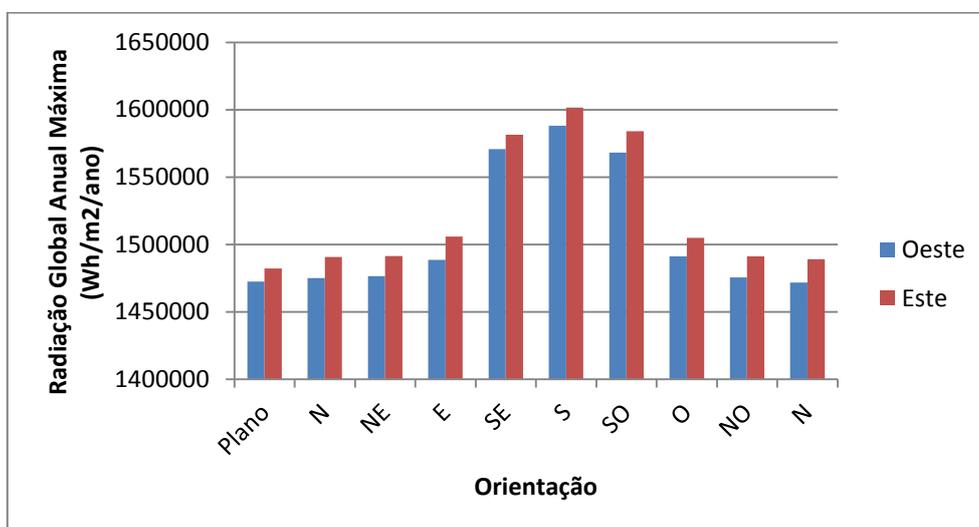


Figura 6.34 - Valores máximos de radiação global anual por orientação

Relativamente ao valor de radiação incidente nos telhados, o critério definido foi a exclusão de todos os locais com valores inferiores a $1\,000\,000\text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$, pois este valor representa o mínimo de irradiação na cobertura para que seja vantajoso considerar a instalação de um sistema solar, tendo em conta fatores económicos e limitações técnicas (Compagnon, 2004).

Por fim, foi ainda tido em conta a área mínima de telhado necessária. Para tal, foram excluídos edifícios com áreas disponíveis de cobertura inferiores a 10 m^2 , uma vez que esta é a área

mínima necessária para a instalação de sistemas fotovoltaicos de 1 kWp (Hofierka & Kaňuk, 2009).

Nas figuras 6.35 e 6.36 são apresentados os edifícios ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos, após aplicadas as restrições, na zona Oeste e Este respetivamente.

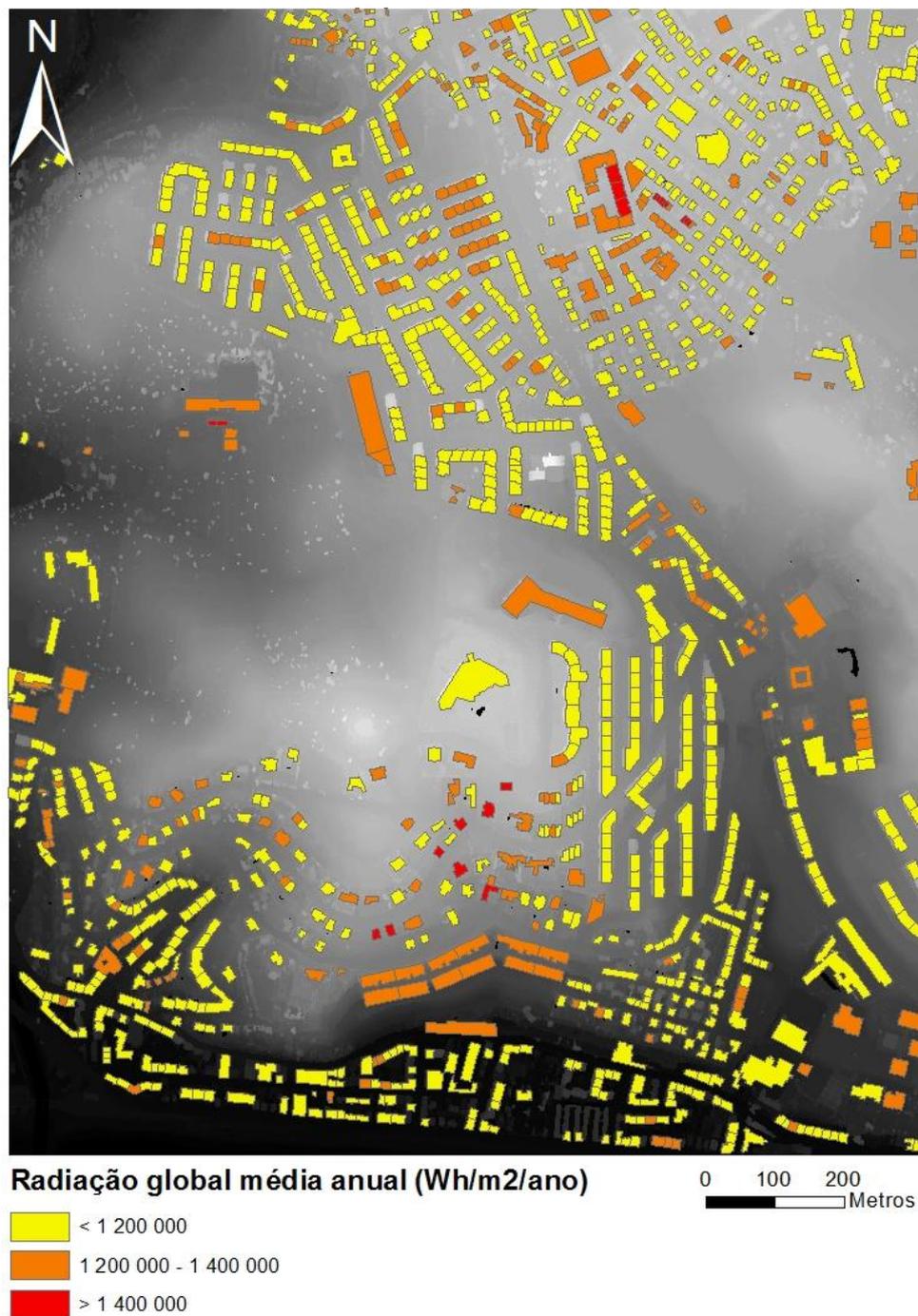


Figura 6.35 – Mapa da radiação global média anual nos edifícios ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos da zona Oeste

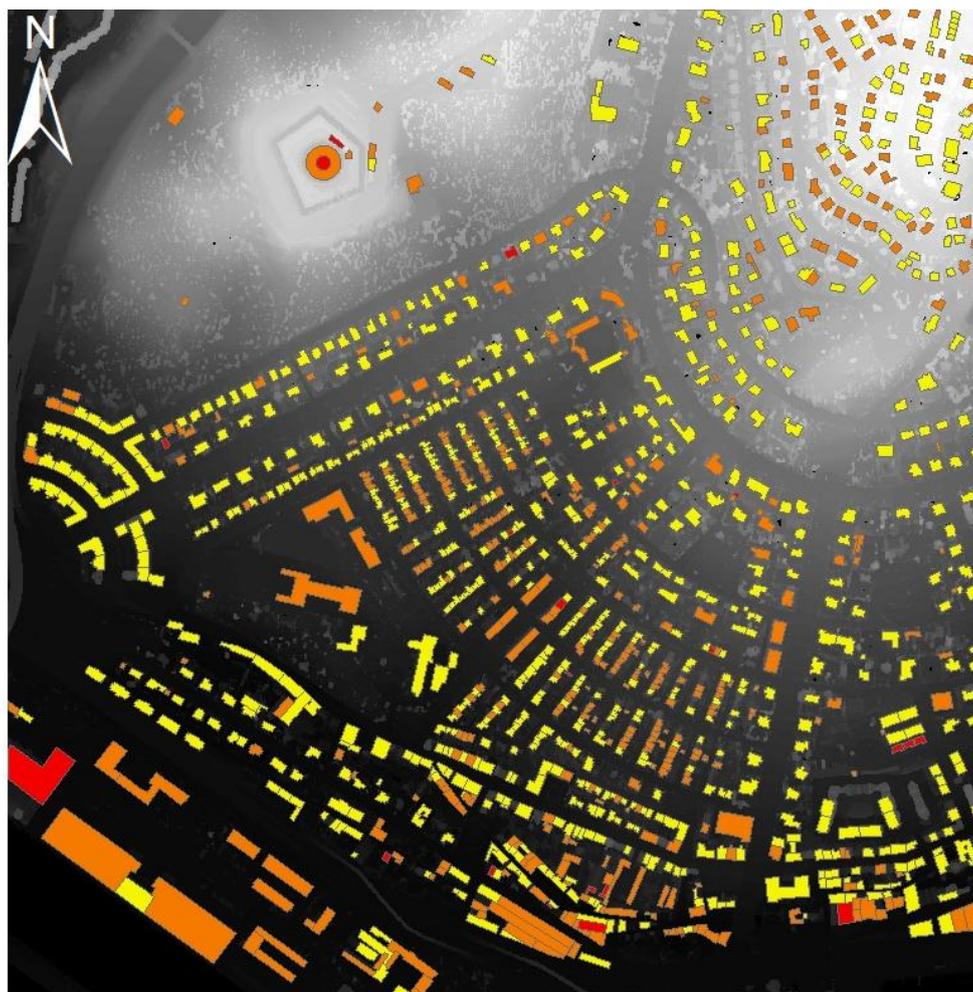


Figura 6.36 – Mapa da radiação global média anual nos edifícios ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos da zona Este

Na tabela 6.3 são apresentados os resultados obtidos para cada zona de estudo, onde a área total corresponde à soma das áreas totais de cada edifício ideal e a área ideal corresponde à soma das áreas ideais existentes em cada edifício, segundo as restrições estabelecidas de declive, orientação, área mínima (Hofierka & Kaňuk, 2009) e mínimo de irradiação (Compagnon, 2004).

Tabela 6.3 - Resultados da seleção dos melhores locais para instalação de sistemas fotovoltaicos nas duas zonas de estudo

Designação	Edifícios Ideais		
	Quantidade (nº)	Área Total (km ²)	Área Ideal (km ²)
Zona Oeste	1 285	0,33	0,08
Zona Este	1 244	0,24	0,06

Nas figuras 6.37 e 6.38 encontram-se as áreas mais adequadas presentes na cobertura dos edifícios ideais da zona Oeste e Este, respetivamente.



Figura 6.37 – Mapa das áreas adequadas e não adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos na zona Oeste

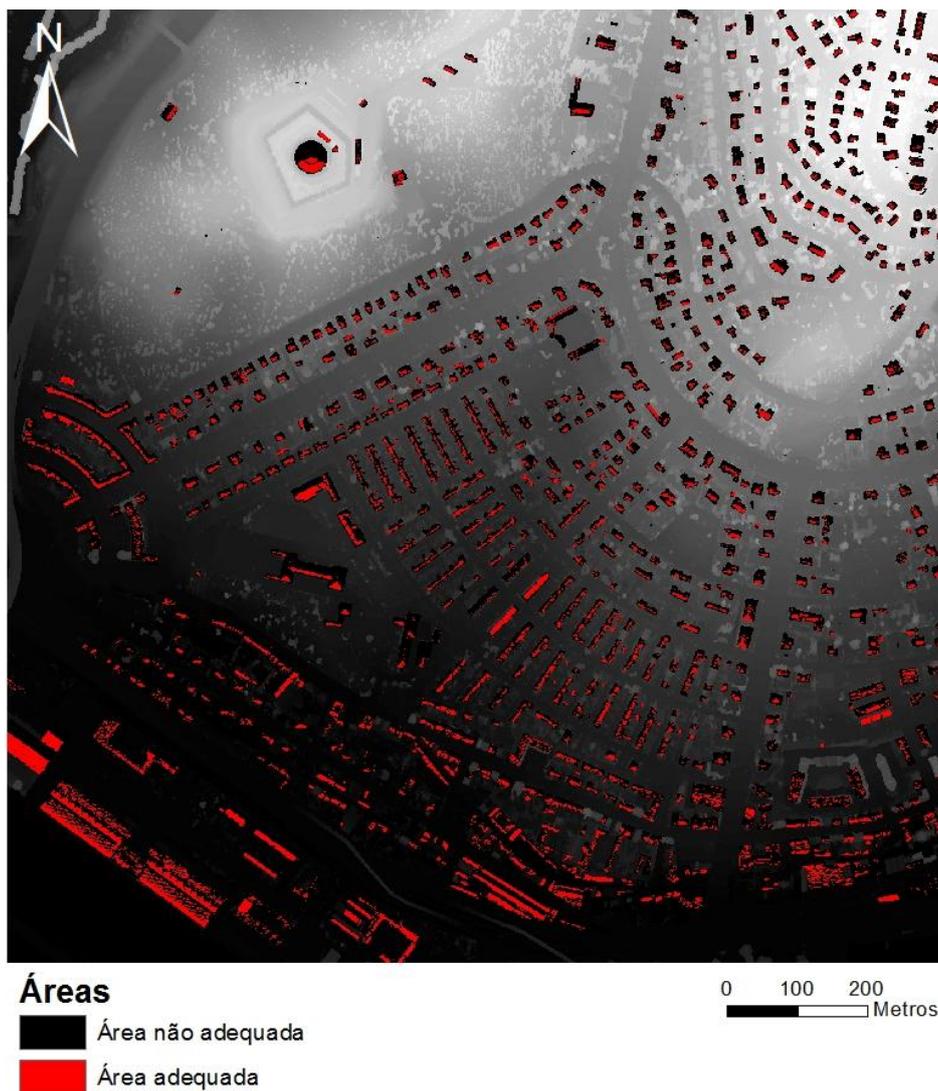


Figura 6.38 – Mapa das áreas adequadas e não adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos na zona Este

6.5. Determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo

Os resultados obtidos através da seleção dos melhores locais permitiram então estimar o potencial fotovoltaico das áreas de estudo. A partir da área ideal e seguindo a equação apresentada na metodologia (Hofierka & Kaňuk, 2009), tendo em conta a eficiência total do sistema fotovoltaico (Brito & Silva, 2006; Šúri *et al.*, 2007) bem como a irradiação global anual média no edifício, foi possível obter a energia produzida. Na tabela 6.4 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 6.4 - Resultados da energia produzida nas duas zonas de estudo

Designação	Oeste		Este	
	Área ideal (m ²)	Energia produzida (MWh/ano)	Área ideal (m ²)	Energia produzida (MWh/ano)
Habitação multifamiliar	44 965	5 872	8 810	1 110
Habitação unifamiliar	16 042	2 145	2 4261	3 188
Edifício não habitacional	21 349	2 946	26 515	3 838
TOTAL	82 357	10 963	59 586	8 136

Nas figuras 6.39 e 6.40 estão representados os mapas dos potenciais fotovoltaicos para a zona Oeste e Este, respetivamente.

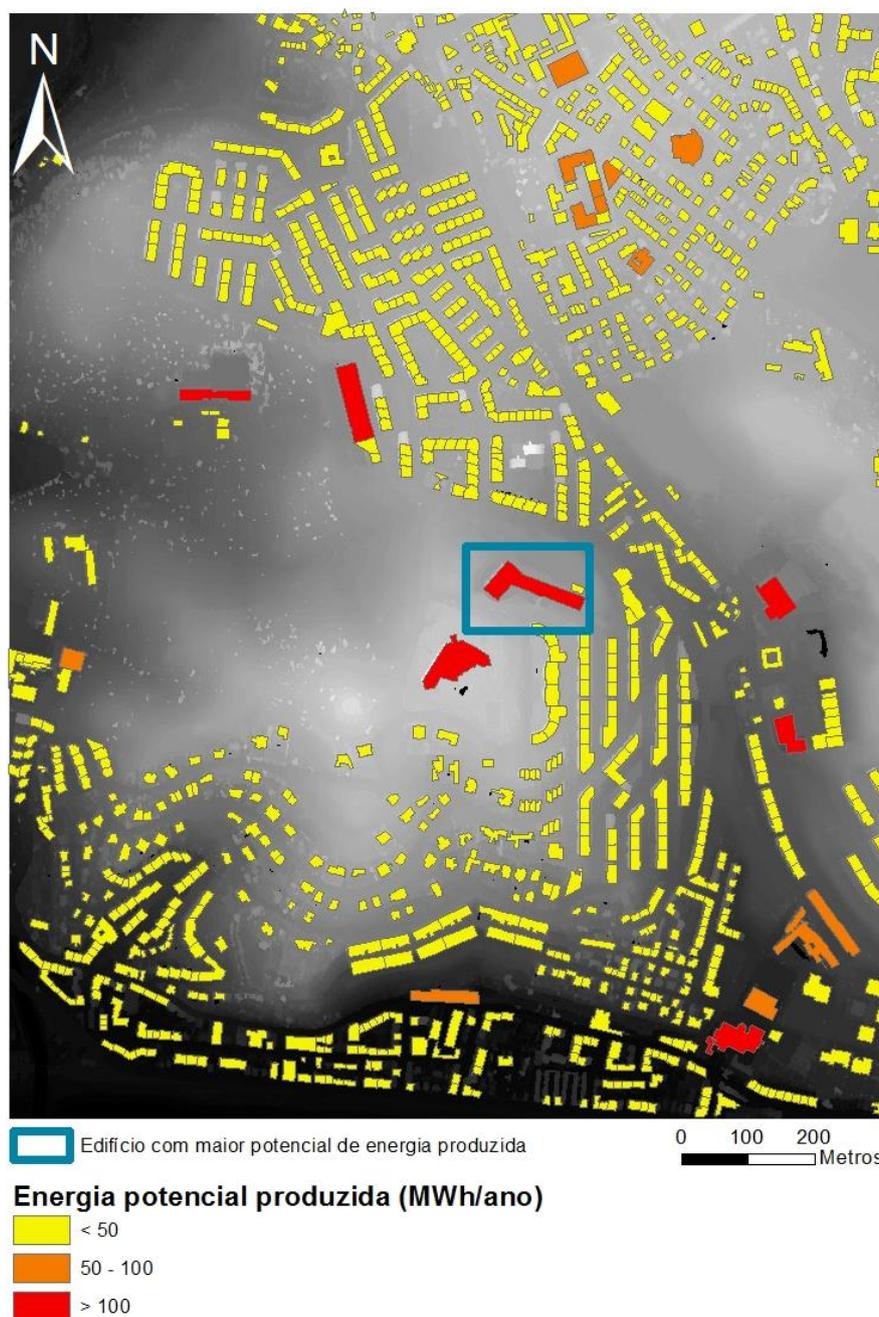


Figura 6.39 - Energia potencial produzida nas coberturas dos edifícios ideais da zona Oeste

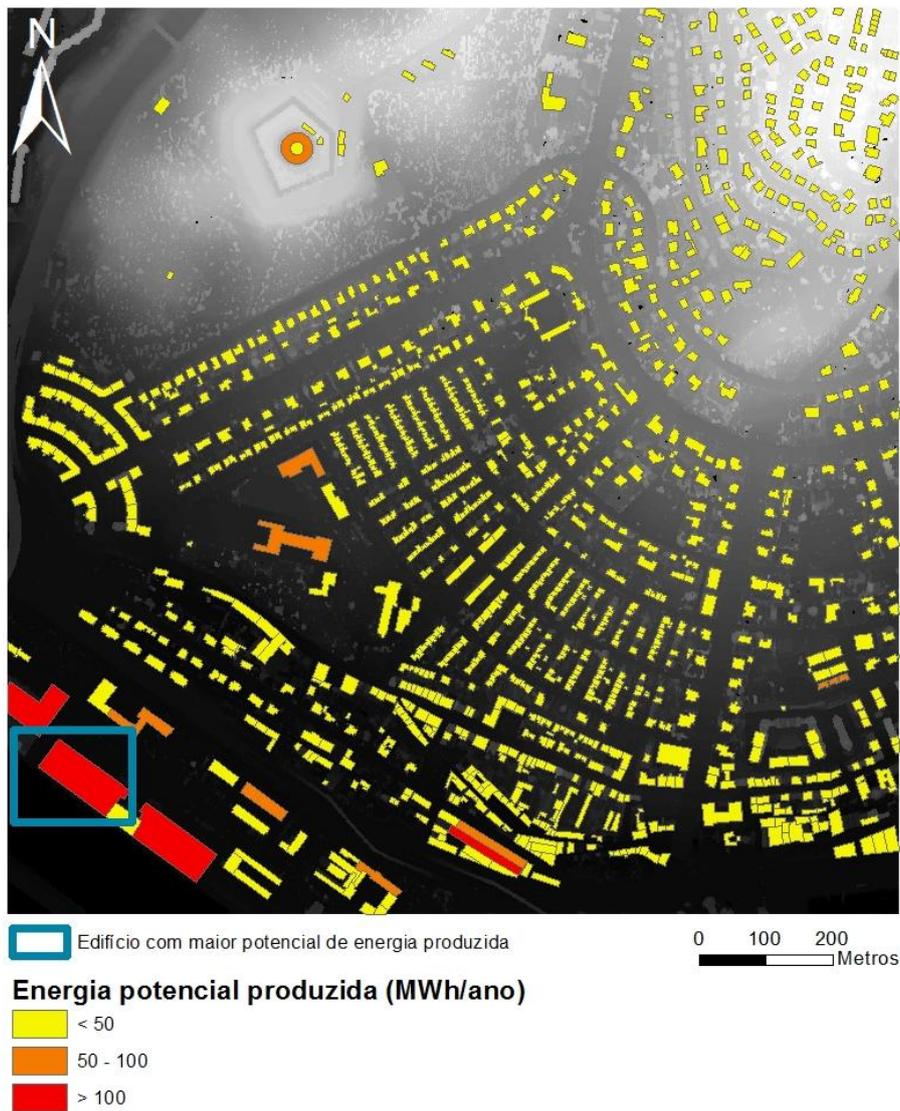


Figura 6.40 - Energia potencial produzida nas coberturas dos edifícios ideais da zona Este

Tendo em conta o número de pessoas residentes nas zonas de estudo (INE, 2011b) e o consumo de energia elétrica por habitante para cada concelho (INE, 2011a) foi calculado, através da energia potencial produzida, o consumo satisfeito pelos sistemas fotovoltaicos e a produção total de energia elétrica por habitante. Os resultados são apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Resultados do consumo de energia elétrica anual e produção potencial de energia fotovoltaica nas duas zonas de estudo

Designação	Oeste	Este
Consumo de energia elétrica por habitante (MWh/hab)	4,45	5,99
Quantidade de pessoas residentes (nº)	19 530	4 664
Consumo total de energia elétrica anual (MWh/ano)	86 820,62	27 954,15
Produção total de energia elétrica anual (MWh/ano)	10 963	8 136
Consumo satisfeito pelos sistemas fotovoltaicos (%)	12,63	29,11
Produção total de energia elétrica por habitante (MWh/hab)	0,56	1,74

Na tabela 6.6 encontram-se apresentados os valores para a emissão e potencial de redução de toneladas de CO₂ nas zonas de estudo, calculados com base na Portaria n.º 63/2008 de 21 de janeiro que estabelece o valor 0,47 kg CO₂/kWh como fator de emissão associado ao consumo de eletricidade em território nacional.

Tabela 6.6 - Emissão e redução de CO₂e nas duas zonas de estudo

Designação	Emissão total anual de CO₂ (ton CO₂)	Emissão total anual de CO₂ com sistemas fotovoltaicos (ton CO₂)	Redução anual de CO₂ (%)
Oeste	40 805,69	35 652,99	12,63
Este	13 138,45	9 314,30	29,11

7. Discussão de resultados

7.1. Características das áreas de estudo

Na caracterização das zonas de estudo foi possível identificar algumas diferenças entre as duas áreas. No geral, verifica-se que as principais diferenças correspondem aos seguintes pontos:

- Elevação média do MDS;
- Número de pisos dos edifícios;
- Tipologia de edifícios;
- Número de alojamentos;
- Densidade populacional.

De facto, a zona Oeste apresenta uma maior elevação média que pode ser justificada, em parte, pela maior percentagem de edifícios com mais de cinco pisos. Enquanto que na zona Este 56% dos edifícios possui apenas um piso, na zona Oeste apenas 25% corresponde a essa categoria. Este facto deve-se à grande quantidade de habitações unifamiliares presentes na zona Este que tendem a ter menor altura do que as habitações multifamiliares.

Existe assim uma diferença notável na tipologia de edifícios dominantes em cada zona. Na zona Oeste predominam as habitações multifamiliares (55%) e na zona Este as habitações unifamiliares (51%). Verifica-se ainda que na zona Este existem 36% de edifícios classificados como não habitacionais, percentagem superior à da zona Oeste (13%). Como referido em capítulos anteriores, esta tipologia inclui anexos, para além de edifícios de comércio/serviços, públicos e de património. Os anexos são edificadas muito comuns em habitações unifamiliares que podem ter diversos usos (por exemplo garagem e arrumações). Assim, uma vez que na zona Este grande parte das habitações são unifamiliares, os anexos são a categoria com maior peso na tipologia de edifícios não habitacionais. Pelo contrário, na zona Oeste quase não foram identificados anexos, o que teve como consequência menor número de edifícios não habitacionais.

Relativamente aos outros edifícios não habitacionais foi feita uma análise aos que se encontram presentes em cada zona de estudo. Verificou-se que, na zona Oeste, estes dizem respeito a diversos estabelecimentos de ensino, tal como a Escola Básica e Secundária Amélia Rey Colaço, edifícios de comércio/serviços, tais como postos de abastecimento de combustível, supermercados, restaurantes/café, bombeiros voluntários e escritórios, e ainda edifícios de património, tal como o Palácio dos Aciprestes. Na zona Este existem também estabelecimentos de ensino, como por exemplo o Instituto Superior de Estudos Militares, edifícios de comércio/serviços, tais como postos de abastecimento de combustível, supermercados, um centro comercial, restaurantes/café, escritórios e oficinas, e edifícios de património, tal como o Forte do Alto Duque.

A diferença no número de alojamentos entre as duas zonas deve-se à diferença da tipologia dominante nas áreas. A zona Este possui 2 469 alojamentos, número bastante inferior à zona Oeste (10 168 alojamentos) devido, mais uma vez, ao facto de existirem mais edifícios de habitação unifamiliar que constituem apenas um alojamento, ao contrário dos edifícios de habitação multifamiliar.

Uma vez que os edifícios multifamiliares possuem mais alojamentos, o que permite a residência de maior número de pessoas, a zona Oeste apresenta uma densidade populacional (8 858,1 habitantes/km²) superior à da zona Este (2 622,8 habitante/km²). De facto, comparando os mapas da densidade populacional por subsecções estatística (figura 6.9 e 6.22) com os mapas da distribuição de tipologia de edifícios (figura 6.6 e 6.19), verifica-se que, em ambas as áreas, as zonas com maior densidade populacional correspondem àquelas que possuem mais habitações, principalmente às áreas com maior número de edifícios multifamiliares.

É importante ainda realçar que a insolação anual da zona Este é 2% superior à da zona Oeste, não sendo uma diferença significativa mas que deve ser referida. A figura 7.1 representa a variação mensal da insolação nas duas zonas de estudo. Ao longo do ano a estação da Tapada da Ajuda regista valores ligeiramente superiores aos da estação localizada na zona Oeste, exceto nos meses de abril, maio, junho, julho e outubro. A maior diferença registada ocorre em dezembro, quando se observam valores de insolação na zona Este 42% superiores aos da zona Oeste.

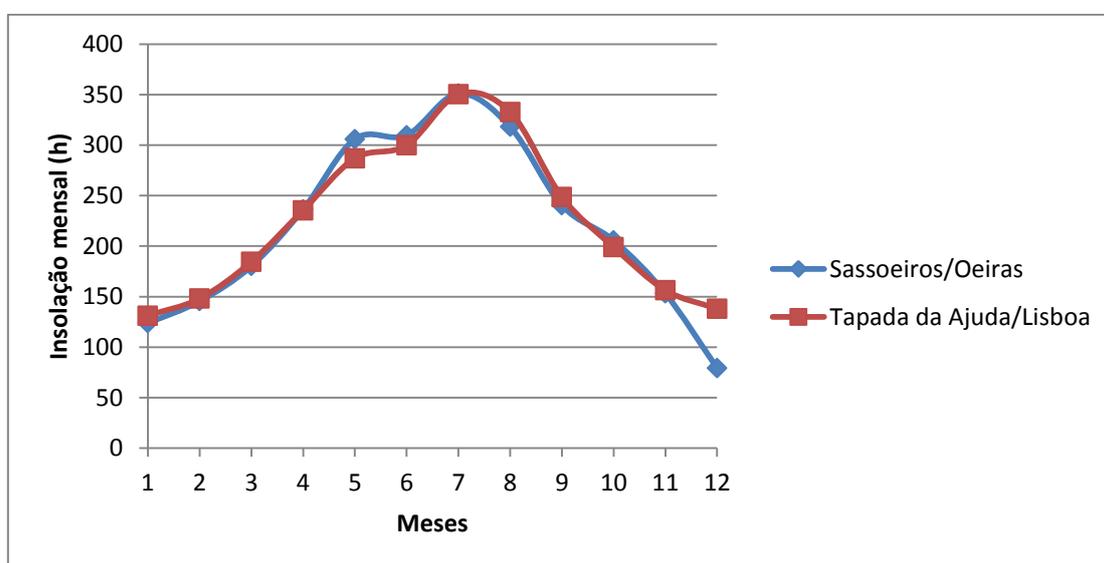


Figura 7.1 - Variação mensal da insolação nas estações de Sassoeiros e Tapada da Ajuda

7.2. Radiação incidente nas áreas de estudo

Os resultados obtidos na determinação da radiação incidente nas áreas de estudo permitem verificar, numa primeira análise, que a radiação solar global anual mínima incidente na zona Oeste (13 Wh.m⁻².ano⁻¹) é 15% inferior à radiação solar global anual mínima incidente na zona

Este ($15 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$). A explicação para esta diferença poderá dever-se à zona Oeste possuir mais edifícios com maior elevação (figura 6.8), o que provoca maior obstáculo à incidência da radiação solar.

Nota-se ainda que é possível distinguir a presença de edifícios no mapa solar uma vez que, existe uma predominância da cor azul nas suas imediações causada por uma menor radiação devido ao ensombramento causado por estes. A presença de arborização também é notada nos mapas devido ao mesmo efeito.

Quanto à radiação máxima, também se verifica que a zona Este regista um valor superior ($1\ 601\ 592 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) ao da zona Oeste ($1\ 588\ 085 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$). No entanto, o melhor valor para comparação entre as duas zonas será o da radiação global média anual. Na zona Oeste, o valor médio ($1\ 133\ 788 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) é superior ao da zona Este ($1\ 111\ 015 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) mas, esta não é uma diferença significativa, sendo que em média, ao longo do ano, a zona Oeste recebe apenas mais 2% de radiação, do que a zona Este.

Em Portugal, o valor de radiação solar anual situa-se entre os $1\ 300\ 000 \text{ Wh.m}^{-2}$ e os $1\ 800\ 000 \text{ Wh.m}^{-2}$ (GREENPRO, 2004a). Ambos os valores de radiação global máxima incidente nas áreas de estudo encontram-se neste intervalo, no entanto o valor médio situa-se abaixo. Tal ocorre devido ao facto da quantidade de radiação solar que atinge a superfície ser dependente da localização, logo os valores registados em estações meteorológicas são aproximações dos valores registados nas áreas de estudo. Para uma área maior existe uma grande variação de valores devido ao facto de existirem diversos fatores que afetam a radiação incidente, tais como as sombras provocadas por árvores e edifícios.

Numa análise mais detalhada, o mesmo se verifica com os valores obtidos no SolTerm, provenientes das estações meteorológicas instaladas nos concelhos em estudo. Os valores máximos obtidos pelo modelo usado aproximam-se dos valores do SolTerm (figuras 7.2 e 7.3), enquanto que os valores médios encontram-se abaixo destes (figuras 7.4 e 7.5). As estações meteorológicas situam-se geralmente em zonas amplas, onde não existem barreiras que impeçam a incidência da radiação solar.

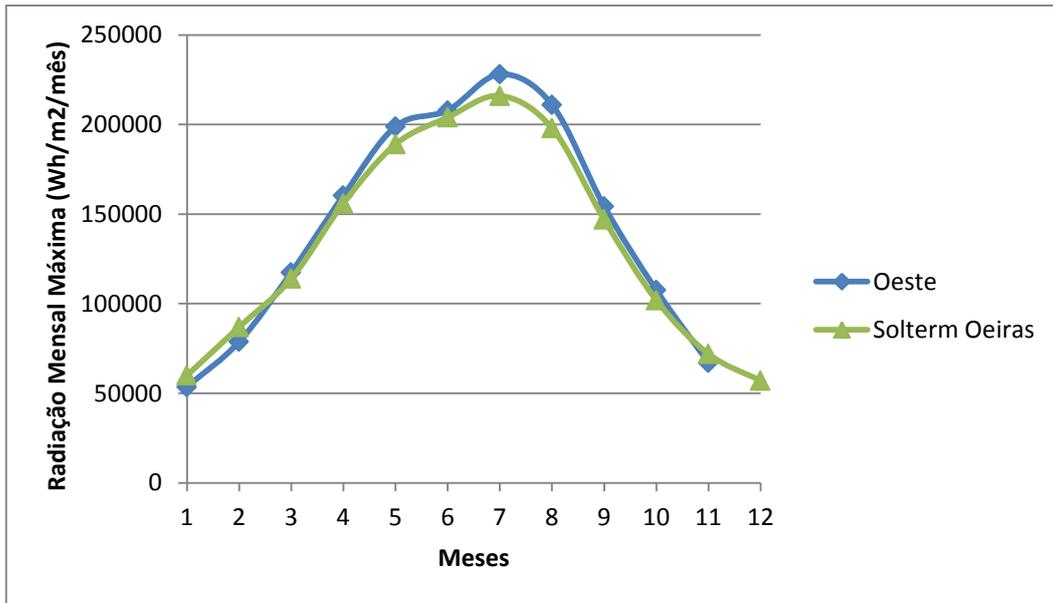


Figura 7.2 - Comparação entre a radiação mensal máxima da zona Oeste e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Oeiras

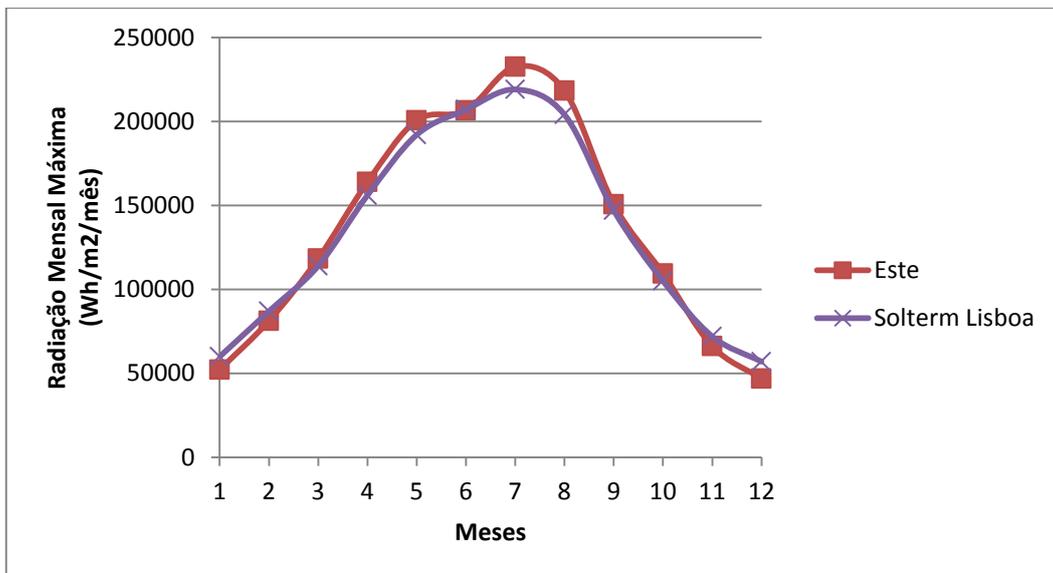


Figura 7.3 - Comparação entre a radiação mensal máxima da zona Este e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Lisboa

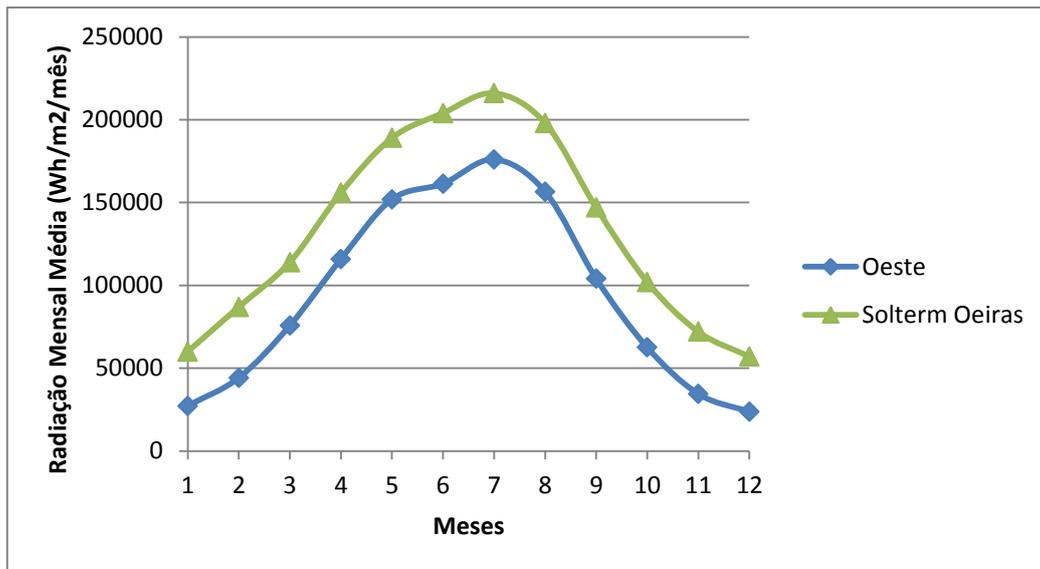


Figura 7.4 - Comparação entre a radiação mensal média da zona Oeste e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Oeiras

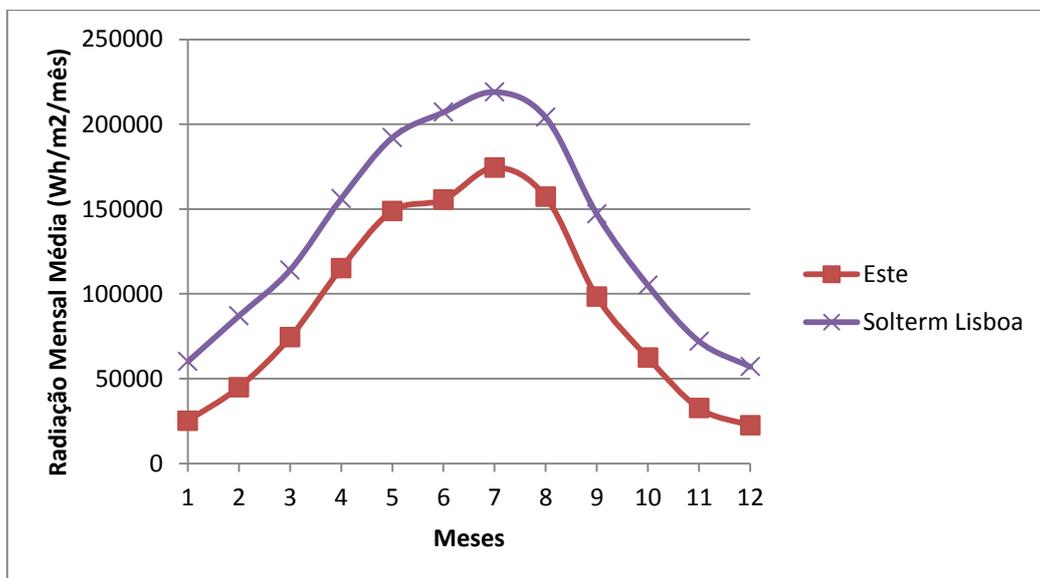


Figura 7.5 - Comparação entre a radiação mensal média da zona Este e os valores de radiação mensal do SolTerm para o concelho de Lisboa

Num estudo realizado por Kodysh *et al.* (2013) a maior diferença existente entre os valores obtidos através do Solar Analyst e os valores medidos numa estação meteorológica foi registada nos meses de inverno, obtendo-se valores subestimados. No presente caso de estudo o mesmo se verifica, uma vez que a maior diferença entre os valores obtidos e os valores do SolTerm regista-se, em ambas as áreas, no mês de dezembro. Esta diferença é de 15% para a zona Oeste e 18% para a zona Este. No global, a diferença entre os valores corresponde a 2% para ambas as áreas de estudo.

Tal como esperado, os valores obtidos são mais elevados nos meses de verão e mais baixos nos meses de inverno. Em ambas as áreas de estudo, os valores de radiação mais elevados são observados no mês de julho e os mais baixos no mês de dezembro.

Em análise à duração média da radiação direta nas zonas de estudo, verifica-se que a área Oeste tem 2 698 horas de sol/ano e a zona Este tem 2 633 horas de sol/ano. Estes valores encontram-se próximos dos valores registados em cada estação meteorológica dos concelhos (tabelas 6.1 e 6.2) no entanto, neste caso, a zona Oeste apresenta maior duração média do que a zona Este. Ao longo do ano, ambas os locais têm comportamentos idênticos (figura 7.6), registando-se os menores valores de horas de sol nos meses de inverno, tal como esperado. A maior diferença entre os valores da zona Oeste e da zona Este regista-se, tal como nas estações meteorológicas, no mês de dezembro com uma diferença de 6%.

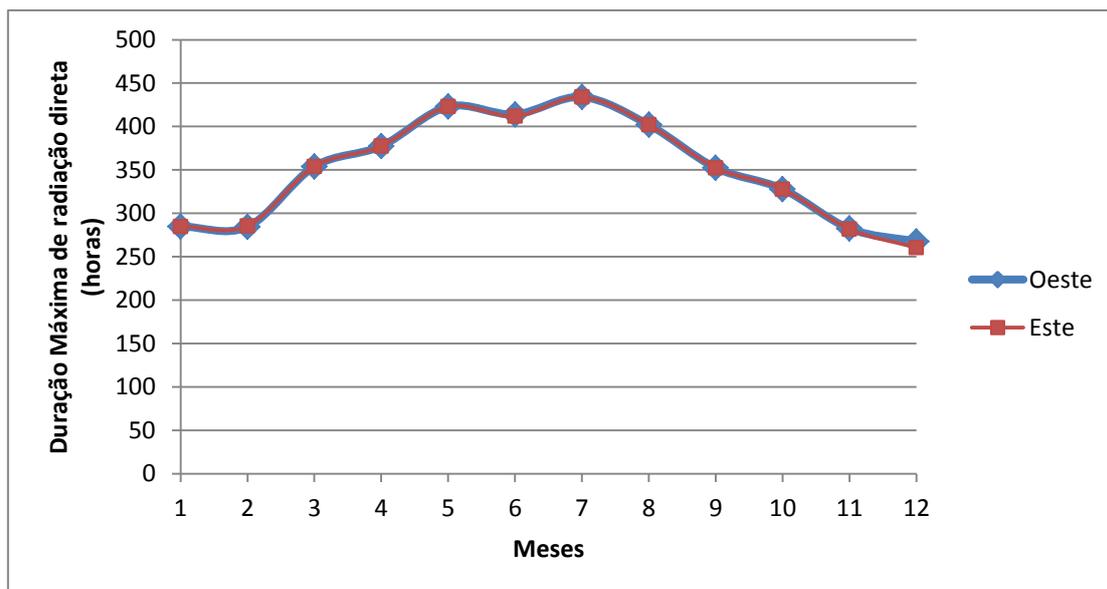


Figura 7.6 - Duração máxima de radiação direta ao longo do ano nas duas zonas de estudo

Conclui-se que ambas as áreas de estudo têm um potencial solar próximo com variações de radiação global muito semelhantes ao longo do ano. São registadas pequenas diferenças, mas que não se consideram significativas. Os valores obtidos estão de acordo com as médias nacionais e com os valores obtidos nas estações meteorológicas, sendo apenas subestimados para os meses de inverno, confirmando assim a qualidade do modelo.

7.3. Radiação incidente nos telhados

Os mapas de radiação solar nos telhados dos edifícios são ferramentas úteis para analisar a distribuição geográfica e intensidade da radiação solar nas coberturas (Kodysh *et al.*, 2013). Assim, é possível verificar quais os telhados que recebem mais radiação solar ao longo do ano e selecionar os melhores locais para a instalação dos sistemas fotovoltaicos.

A radiação global anual incidente em cada edifício varia consoante as características da cobertura, nomeadamente o seu declive e orientação, bem como o sombreamento a que se encontra sujeita. Na zona Oeste obtiveram-se valores que variam entre os 31 Wh.m⁻².ano⁻¹ e os 1 588 084 Wh.m⁻².ano⁻¹. O valor máximo identificado nos telhados é igual ao valor máximo

obtido no mapa solar anual no MDS (figura 6.27), verificando-se que a radiação solar incidente máxima foi registada no topo dos edifícios, indicando que estes são os locais mais apropriados para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Na zona Este os valores variam entre os 111 Wh.m⁻².ano⁻¹ e os 1 601 592 Wh.m⁻².ano⁻¹. Tal como na zona Oeste, o valor máximo identificado é igual ao valor máximo obtido no mapa da solar anual no MDS, indicando que existem coberturas com condições ótimas no local para a instalação de sistemas fotovoltaicos (figura 6.28).

A figura 6.32 permitiu verificar que os edifícios não habitacionais são os que recebem, em média, maior quantidade de radiação por ano, em ambas as áreas de estudo. Tal ocorre pois estes correspondem, em grande parte, a edifícios com grandes áreas contíguas e pouco ensombramento. Na figura 7.7 é possível observar a radiação global anual incidente num equipamento escolar (Escola Básica e Secundária Amélia Rey Colaço) situado na zona Oeste. É possível constatar que existe um grande potencial solar uma vez que apresenta uma grande área e, devido ao facto de não possuir edifícios ou árvores nas proximidades, não tem sombreamento na sua cobertura.

Nota-se ainda que a presença de objetos nas coberturas é identificada pelo Solar Analyst uma vez que existe alteração da radiação incidente nessas áreas. Esta é uma vantagem pois, apesar de não serem identificados os objetos presentes nas coberturas dos edifícios nos polígonos usados para o corte dos mapas, estes são tidos em conta no modelo. Assim, na posterior seleção das áreas ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos, haverá uma menor probabilidade de ser escolhida uma área indisponível para instalação dos sistemas.

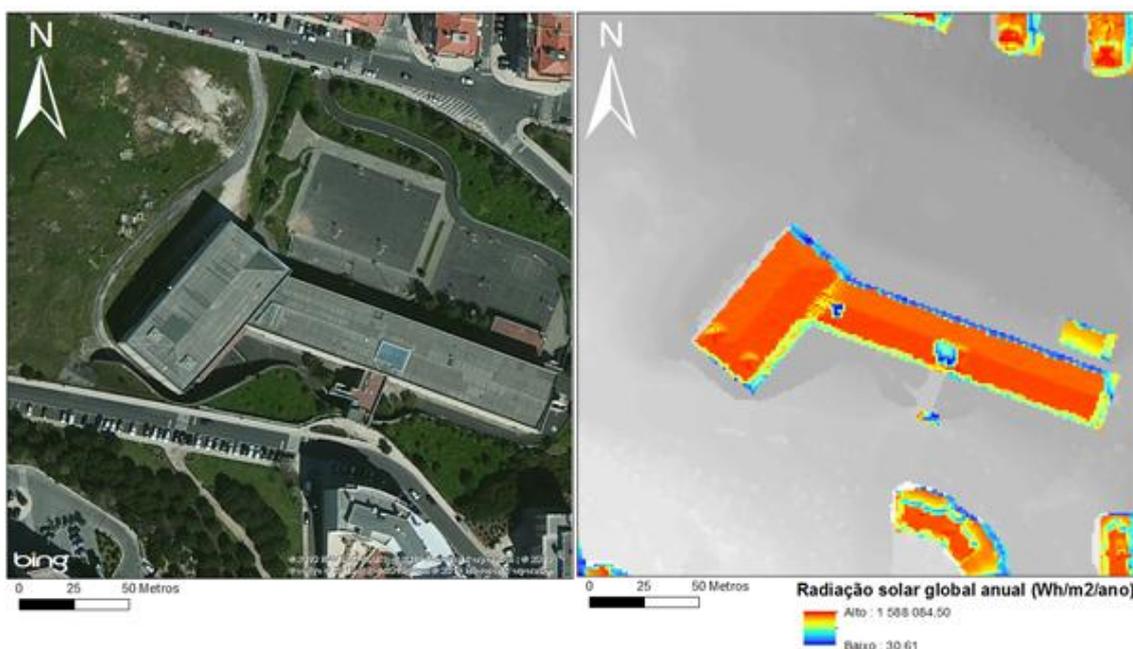


Figura 7.7 - Radiação global anual incidente num equipamento escolar da zona Oeste

De facto, a obtenção da radiação incidente nos telhados permite uma melhor aproximação do potencial fotovoltaico do edifício. Ao contrário da simples estimativa feita através da área do telhado e da radiação global anual da região, esta inclui as características específicas das coberturas, assim como a presença de sombreamentos, permitindo seleccionar as melhores áreas para a instalação dos sistemas fotovoltaicos.

7.4. Locais ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos têm a vantagem de serem facilmente integrados no ambiente urbano. No entanto, o estudo dos locais mais favoráveis para a instalação destes é importante, na medida em que permite investigar a inclinação óptima dos telhados, a orientação mais favorável e os locais sem sombreamentos nas zonas de estudo de modo a evitar implementações que impeçam o seu aproveitamento máximo (Brito *et al.*, 2012; Pellegrino *et al.*, 2008).

A seleção dos melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos permitiu aplicar diversas restrições nos edifícios presentes nas áreas de estudo. Para além da exclusão de áreas com declives superiores a 35°, foram ainda preteridas as áreas com orientações a norte, nordeste, este, oeste e noroeste. De facto, como exemplo, observa-se pela figura 7.8 que as coberturas viradas para sul apresentam maior radiação global anual do que as coberturas viradas para norte.

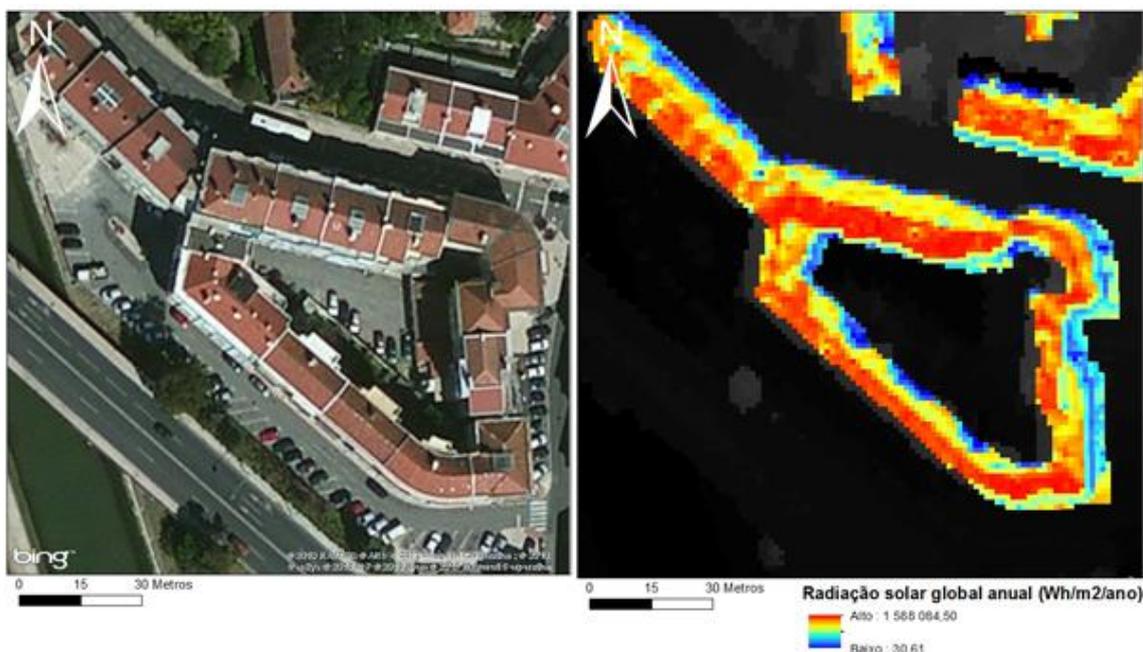


Figura 7.8 - Radiação global anual incidente nas coberturas com diferentes orientações

Após aplicadas as restrições, verificou-se que 77% do total de edifícios da zona Oeste e 68% da zona Este são adequados para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Para ambas as áreas de estudo, 25% da área total destes edifícios ideais é suscetível de implementação, ou seja corresponde a uma área ideal. Segundo Denholm & Margolis (2008) a área de cobertura ideal

para a instalação de sistemas fotovoltaicos em edifícios varia entre 22% (países com climas frios) e 27% (países com climas quentes).

Segundo Izquierdo *et al.* (2008) o número de edifícios presentes e a altura destes, a densidade populacional e a tipologia dos edifícios numa área são fatores que têm influência na área disponível para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, a orientação, declive, localização, presença de sombreamento e de outras características na cobertura do edifício determinam a relação entre a área disponível e a área ideal. De facto, constata-se que a zona Oeste possui uma maior área disponível para a implementação de sistemas fotovoltaicos do que a zona Este mas, após aplicadas as restrições, a área de cobertura ideal, em ambas as zonas, é igual a 25% do total de área dos edifícios ideais.

A observação da tabela 7.1 permite verificar que o maior número de edifícios excluídos na zona Este encontra-se na tipologia de edifícios não habitacionais. Tal ocorre pois esta categoria inclui os anexos, que é uma tipologia de edifícios pouco presente na zona Oeste. Geralmente, a localização destes é muitas vezes pouco adequada para a exposição solar, uma vez que se situam perto das habitações ou de árvores, estando sujeitos a sombreamento durante grande parte do dia.

Tabela 7.1 - Quantidade de edifícios totais, ideais e excluídos por zona de estudo e tipologia

Designação	Edifícios Totais (nº)		Edifícios Ideais (nº)		Edifícios Excluídos (nº)	
	Oeste	Este	Oeste	Este	Oeste	Este
Habitação multifamiliar	927	226	776	175	151	51
Habitação unifamiliar	529	940	359	776	170	164
Edifício não habitacional	220	663	150	293	70	370
Total	1 676	1 829	1 285	1 244	391	585

Constata-se ainda que o maior número de edifícios ideais na zona Oeste corresponde às habitações multifamiliares (776), enquanto que na zona Este a tipologia com maior número de edifícios ideais é a habitação unifamiliar (776). Uma vez que estes são os edifícios predominantes em cada zona de estudo, tal resultado era expectável.

7.5. Potencial fotovoltaico das áreas de estudo

Na última fase do estudo foi possível estimar o potencial fotovoltaico dos edifícios. O total de energia potencial produzida na área Oeste é de 10 963 MWh.ano⁻¹ para uma área ideal total de 82 357 m², sendo as habitações multifamiliares os edifícios com maior percentagem de produção de energia (55%). Na área Este, o potencial de energia produzida total é de 8 136 MWh.ano⁻¹, para uma área de 59 586 m², sendo os edifícios não habitacionais os que apresentam maior percentagem de produção de energia (47%).

Na zona Oeste, 98% dos edifícios têm um potencial de produção inferior a 50 MWh.ano⁻¹ e apenas 0,5% tem um potencial de produção superior a 100 MWh.ano⁻¹. Na zona Este 99% dos edifícios têm um potencial de produção inferior a 50 MWh.ano⁻¹, enquanto que apenas 0,3% têm um potencial superior a 100 MWh.ano⁻¹.

Comparando as figuras 6.39 e 6.40 com as figuras 6.35 e 6.36 verifica-se que existem diversos edifícios que, apesar de apresentarem bons potenciais solares (cor vermelha), por apresentarem áreas ideais pequenas, não correspondem aos edifícios com maior potencial de produção.

De facto, entre os 100 edifícios com maior produção de energia, em ambas as áreas, a tipologia de edifícios não habitacionais (maioritariamente edifícios de comércio/serviços e públicos) é a que representa a maior percentagem – 48% para a zona Oeste e 61% para a zona Este – seguida das habitações multifamiliares – 35% para a zona Oeste e 20% para a zona Este. Tal deve-se ao facto de serem estes os edifícios com maior área adequada para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Segundo Izquierdo *et al.* (2008) o principal fator determinante no potencial fotovoltaico de um edifício é a área ideal da sua cobertura.

Na zona Oeste, o edifício que apresenta maior produção de energia potencial é o identificado na figura 6.39 (Escola Básica e Secundária Amélia Rey Colaço) com uma área de 1 377 m² (36% da área total do edifício) correspondendo a uma produção de 198 MWh.ano⁻¹. Na zona Este, o edifício com maior produção de energia potencial, identificado na figura 6.40 (edifício de serviço Docapesca), possui uma área adequada de 2 855 m² (42% da área total do edifício) e uma produção de 442 MWh.ano⁻¹.

A implementação de sistemas fotovoltaicos no total da área adequada da zona Oeste supriria cerca de 13% das necessidades de energia da área. Como se pode observar pela tabela 6.5. No caso da zona Este, a percentagem de consumo satisfeito pela implementação dos sistemas fotovoltaicos nas áreas selecionadas corresponde a 29%, valor superior ao da zona Oeste.

Deve ser notada a diferença na quantidade pessoas residentes em ambas as áreas de estudo (15 066 pessoas). Uma vez que a área Oeste possui uma densidade populacional bastante superior à da zona Este, 8 858,13 hab/km² e 2 622,76 hab/km² respetivamente, e que o potencial de produção da zona Oeste é superior em apenas 26%, seria de esperar que a capacidade para satisfazer o consumo anual de energia elétrica na zona Oeste fosse inferior ao da zona Este.

A partir da área disponível para instalação de sistemas fotovoltaicos, em cada zona de estudo, e da quantidade de pessoas residentes, obtém-se uma área de sistemas fotovoltaicos por habitante de 4,22 m²/hab na zona Oeste e 12,78 m²/hab na zona Este.

Um estudo realizado por Brito *et al.* (2012) numa área localizada em Carnaxide no concelho de Oeiras demonstrou que o potencial fotovoltaico desta zona é de 11 500 MWh.ano⁻¹ para uma área de 85 000 m². Comparando com os valores obtido para as zonas Oeste (10 963 MWh.ano⁻¹)

e Este ($8\,136\text{ MWh}\cdot\text{ano}^{-1}$), verifica-se que o potencial para ambas as áreas é inferior ao de Carnaxide. O mesmo se verifica para a percentagem de consumo satisfeita com a instalação dos sistemas fotovoltaicos – para a zona de Carnaxide o resultado obtido foi 48% de consumo satisfeito. Tal poderá dever-se ao facto desta ser uma zona com maior elevação do que as áreas em estudo, levando a que esteja mais exposta à radiação solar anual e consequentemente, apresente um potencial fotovoltaico superior.

Foi ainda calculado o potencial de redução anual de CO_2 , verificando-se que a instalação de sistemas fotovoltaicos nos locais seleccionados permitiria uma redução anual de 13% de CO_2 na zona Oeste e de 29% na zona Este.

Assim, apesar de em ambas as áreas de estudo existir um potencial solar semelhante, verifica-se que a instalação de sistemas fotovoltaicos na zona Este seria mais eficiente, uma vez que permitiria satisfazer uma maior percentagem de consumo de energia eléctrica e resultaria numa redução anual de CO_2 superior à da zona Oeste.

8. Conclusão

8.1. Síntese

O principal objetivo proposto consistia em avaliar o potencial solar e fotovoltaico de duas zonas de estudo com características diferentes, localizadas no concelho de Oeiras e Lisboa. De forma a cumprir o objetivo foi proposta uma metodologia faseada que permitisse estudar a radiação solar incidente nas áreas de estudo e obter conhecimentos úteis acerca das principais diferenças existentes entre os dois locais e a sua influência no potencial das zonas.

Em primeiro lugar, procedeu-se à caracterização das áreas de estudo. Este passo permitiu analisar diversas características que pudessem variar de uma zona para a outra. As principais diferenças encontradas dizem respeito à elevação média das áreas de estudo, densidade populacional, número de alojamentos e tipologia e altura de edifícios. A zona Oeste apresentou uma elevação média superior, bem como uma densidade populacional e altura de edifícios maior que a zona Este. Tais conclusões estão em concordância com a maior percentagem de edifícios identificados na zona pois a tipologia predominante diz respeito às habitações multifamiliares. Estes edifícios possuem, no geral, maior altura e maior número de alojamentos, levando a uma maior elevação média e densidade populacional.

Seguidamente obtiveram-se os mapas de radiação global anual incidente nas áreas de estudo através do modelo Solar Analyst. Nesta fase, a utilização do MDS como *input* no modelo permitiu obter um mapa solar adequado ao estudo. As estruturas presentes no terreno ficaram claramente identificadas no mapa, criando zonas com menor radiação global anual devido aos sombreamentos provocados por estas.

O Solar Analyst revelou ainda ser uma ferramenta adequada para a modelação da radiação solar em zonas urbanas uma vez que considera fatores locais como a orientação, declive, sombreamento e condições climáticas. Estes são parâmetros cruciais quando se pretende determinar o potencial solar de uma zona, uma vez que influenciam significativamente a radiação solar incidente nos edifícios.

Os mapas de radiação global anual permitiram concluir que o potencial solar nas duas regiões não apresenta uma diferença significativa, sendo que a radiação média global anual da zona Oeste é 2% superior à da zona Este.

A etapa seguinte consistiu na obtenção da radiação global anual na cobertura dos edifícios, de modo a estudar a sua viabilidade para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Mais uma vez, o potencial solar na cobertura dos edifícios foi muito semelhante nas duas zonas de estudo, sendo que cerca de 60% dos edifícios de ambas as áreas se encontram no intervalo entre $1\ 000\ 000\ \text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ e $1\ 500\ 000\ \text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$. Foi possível concluir, ainda, que os edifícios

não habitacionais são os que recebem, em média, mais radiação global anual, tanto na área Oeste como na área Este.

Na fase de seleção das áreas mais adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos foram estudadas as zonas com maior incidência de radiação solar, de modo a escolher as restrições a impor. Relativamente ao declive e à orientação foi confirmado que as melhores áreas dizem respeito aos declives com inclinações inferiores a 35° e orientação sul, sudeste e sudoeste. Para além destas restrições, foram ainda selecionados apenas os edifícios com área de cobertura superior 10 m² e radiação global média anual superior a 1 000 000 Wh.m⁻².

Após aplicadas as restrições concluiu-se que a zona Oeste possui mais edifícios adequados à instalação de sistemas fotovoltaicos do que a zona Este, mas que a área de cobertura ideal face à área total de edificado é igual em ambas as zonas (25%). Na zona Este, o maior número de edifícios não adequados para a instalação de sistemas fotovoltaicos pertence à tipologia de edifícios não habitacionais, enquanto que na zona Oeste foram excluídas mais habitações unifamiliares. Pelo contrário, o maior número de edifícios ideais na zona Oeste corresponde à tipologia de habitações multifamiliares e na zona Este às habitações unifamiliares. Tendo em conta o estudo de caracterização realizado para cada zona de estudo, os resultados obtidos eram expectáveis.

Na determinação do potencial fotovoltaico das áreas de estudo, verificou-se que na zona Oeste a percentagem de edifícios com maior produção de energia potencial corresponde às habitações multifamiliares (55%), enquanto que na zona Este os edifícios não habitacionais são os que apresentam maior potencial de produção (47%). Apesar deste facto, entre os 100 edifícios com maior potencial de produção de cada zona, a maior percentagem corresponde aos edifícios não habitacionais por apresentarem maiores áreas contíguas.

Por fim, foi possível concluir que a zona Oeste tem um potencial fotovoltaico (10 963 MWh.ano⁻¹) superior ao da zona Este (8 136 MWh.ano⁻¹). No entanto, a zona Este consegue suprimir uma maior percentagem do consumo anual de eletricidade (29%) do que a zona Oeste (13%) por apresentar uma densidade populacional inferior e uma produção potencial de energia mais adequada. Foi ainda calculada a percentagem de redução de emissões de CO₂ e concluído que o mesmo resultado é verificado, a zona Este possui maior potencial de redução do que a zona Oeste.

Pode-se então afirmar que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados com sucesso. Os procedimentos metodológicos aplicados permitiram estimar o potencial solar e fotovoltaico de ambas as zonas de estudos, bem como estudar as influências das características de cada zona nos resultados obtidos.

A presente dissertação permitiu ainda concluir que o estudo prévio do potencial solar e fotovoltaico de uma determinada área é muito importante quando se pretende implementar sistemas fotovoltaicos, na medida em que permite evitar a instalação em zonas não adequadas que levem a uma redução do potencial de energia produzida. A combinação das diversas variáveis possibilita a obtenção de resultados pertinentes em momentos de decisão, como a redução potencial do consumo de recursos energéticos não renováveis e de emissões de gases com efeito de estufa.

8.2. Limitações do estudo e desenvolvimentos futuros

Na metodologia seguida o modelo Solar Analyst foi aplicado separadamente para cada mês do ano com diferentes valores de transmissividade e proporção difusa de modo a obter mapas solares mais fiáveis. Apesar do Solar Analyst revelar ser um ferramenta adequada para a modelação de radiação solar em zonas urbanas, a obtenção de mapas solares mensais torna o processo moroso e pouco automatizado.

A falta de informação disponível acerca do edificado presente nas zonas de estudo foi outra das limitações do estudo. Este entrave levou a uma necessidade frequente de realização de visitas técnicas ao terreno para identificar a tipologia dos edifícios. Tal leva a que possam ocorrer erros pontuais na classificação, uma vez que existem edifícios que não são facilmente identificáveis.

Outra limitação do estudo consiste na metodologia seguida para a determinação do potencial fotovoltaico. Uma vez que o total de energia produzida depende da eficiência de cada sistema, a consideração de um valor único para todas as implementações leva a uma generalização que deve ser considerada para cada caso.

É importante notar que o aproveitamento de energia solar em zonas urbanas possui um potencial de crescimento muito elevado no entanto, o estudo do potencial fotovoltaico não deve ser a única análise a ser feita. Uma vez que a rentabilidade da instalação é fundamental na implementação dos sistemas, é recomendável que, antes de qualquer instalação, se realize um estudo de viabilidade económica.

No decorrer do estudo foram identificadas questões que poderão ser desenvolvidas em trabalhos futuros, de modo a complementar e melhorar a presente dissertação. Nomeadamente, a determinação do potencial solar térmico nas áreas de estudo, de modo a obter informação acerca de outras tecnologias solares passíveis de serem implementadas em edifícios.

Por fim, também seria interessante alargar este estudo para outras zonas do país, de modo a ficar a conhecer a localidade com maior potencial solar e fotovoltaico em Portugal. Esta metodologia poderia ser aplicada ao nível de cada concelho, fornecendo assim informações úteis tanto para os moradores como para planeadores que pretendam integrar a produção de energia solar nas cidades.

Referências bibliográficas

- Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning—present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 64–67. doi:10.1016/S0924-2716(99)00009-X
- ADENE. (2013). PNAEE E PNAER aprovados em Conselho de Ministros. *ADENE - Agência para a Energia*. Obtido 23 de Maio de 2013, de <http://www.adene.pt/pt-pt/Comunicacao/Noticias/Paginas/Not130228a.aspx>
- Aguiaro, G., Nex, F., Remondino, F., Filippi, R. De, Droghetti, S., & Furlanello, C. (2012). Solar Radiation Estimation on Building Roofs and Web-based Solar Cadastre. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1-2, 177–182.
- Aguiaro, G., Remondino, F., Stevanato, G., Filippi, R. De, & Furlanello, C. (2011). Estimation of Solar Radiation on Building Roofs in Mountainous Areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 155–160.
- Aguiar, R., & Coelho, R. E. (2012). *Manual de Instalação e Utilização do software SolTerm*. Lisboa: Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Amado, M., & Poggi, F. (2012). Towards Solar Urban Planning: A New Step for Better Energy Performance. *Energy Procedia*, 30, 1261–1273. doi:10.1016/j.egypro.2012.11.139
- APISOLAR. (2011). *Sector solar em portugal*. Lisboa: Associação Portuguesa da Indústria Solar.
- Araújo, L., & Coelho, M. J. (2013). Políticas públicas de energia e ambiente: rumo a um país sustentável? *Sociologia, Problemas e Práticas*, (72), 145–158. doi:10.7458/SPP2013722622
- Atlas do Ambiente. (1987). *Insolação - Notícia Explicativa*. Lisboa: Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais.
- Atlas do Ambiente. (1988). *Radiação Solar - Notícia Explicativa*. Lisboa: Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais.
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 83–94. doi:10.1016/S0924-2716(99)00014-3
- Bing Maps. (2010). Bing Maps Aerial.
- Branker, K., & Pearce, J. M. (2010). Financial return for government support of large-scale thin-film solar photovoltaic manufacturing in Canada. *Energy Policy*, 38(8), 4291–4303. doi:10.1016/j.enpol.2010.03.058
- Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., & Tenedório, J. A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), 283–288. doi:10.1016/j.solener.2011.09.031

- Brito, Miguel C., & Silva, J. A. (2006). Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. *O instalador*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Caiaffa, E. (2005). Geographic Information Science for geo-knowledge-based governance. Em *AGILE 2005 8th Conference on Geographic Information Science* (pp 26–28). Estoril, Portugal.
- Carneiro, C., Morello, E., Ratti, C., & Golay, F. (2008). Solar radiation over the urban texture : LIDAR data and image processing techniques for environmental analysis at city scale. Em *3D Geo-Information Sciences* (pp 319–340). Springer Berlin Heidelberg.
- Collares-Pereira, M. (1998). Energia Solar. Em *Energias Renováveis, a opção inadiável* (SPES - Soc., pp 85–110). Lisboa.
- Collares-Pereira, M. (2012). O aproveitamento da energia solar em Portugal. *INGENIUM*, II(131), 27–28.
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321–328. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.009
- Denholm, P., & Margolis, R. (2008). *Supply Curves for Rooftop Solar PV-Generated Electricity for the United States*.
- Dereli, Z., Yücedağ, C., & Pearce, J. M. (2013). Simple and low-cost method of planning for tree growth and lifetime effects on solar photovoltaic systems performance. *Solar Energy*, 95, 300–307. doi:10.1016/j.solener.2013.06.019
- DGEG. (2013a). Balanço Energético Sintético 2012. *Direcção Geral de Energia e Geologia*.
- DGEG. (2013b). Renováveis: estatísticas rápidas abril 2013. *Direcção Geral de Energia e Geologia*, nº 98.
- DMPU. (2009). *Relatório do Estado do Ordenamento do Território*. Lisboa: Departamento de Planeamento Urbano.
- Dubayah, R., & Rich, P. M. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 405–419.
- Earthscan. (2010). *Planning & Installing Solar Thermal Systems: A guide for installers, architects and engineers* (Second Edi.). International Institute for Environment and Development.
- ESRI. (2011). Area Solar Radiation (Spatial Analyst). *ArcGIS Help 10.1*. Obtido 21 de Maio de 2013, de <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>
- ESRI. (2012). What is lidar data? *ArcGIS Help 10.1*. Obtido 21 de Maio de 2013, de <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>
- ESTIF. (2012). *Solar Thermal Markets in Europe - Trends and Market Statistics 2011*. Brussels: European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF).

- ESTIF. (2013). Solar Thermal Applications and Technology. *European Solar Thermal Industry Federation*. Obtido 23 de Maio de 2013, de http://www.estif.org/st_energy/technology/introduction/
- European Commission. (2009). *Photovoltaic solar energy - Development and current research*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union. doi:10.2768/38305
- Fu, P., & Rich, P. M. (2000). *The Solar Analyst 1.0 User Manual*. Helios Environmental Modeling Institute.
- Gabinete do Desenvolvimento Municipal. (2009). *Oeiras, factos e números*. Câmara Municipal de Oeiras.
- Geirinhas, J. (2001). *BGRI - Base Geográfica de Referenciação de Informação informação*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.
- GeoModel_Solar. (2011). Solar Radiation Maps: Global Horizontal Irradiation (GHI). *SolarGIS*. Obtido 26 de Junho de 2013, de <http://solargis.info/>
- Gonçalves, G., & Gonçalves-Seco, L. (2007). Utilização de dados lidar na classificação de objectos situados em zonas rurais. Em *Actas da V Conferencia Nacional de Cartografia e Geodesia* (pp 167–176). Lisboa: Lidel.
- Gonçalves, H., & Graça, M. J. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. Lisboa.
- Grauthoff, M., Janssen, U., & Fernandes, J. (2012). *Identification and mobilisation of solar potentials via local strategies*. POLIS Project.
- GREENPRO. (2004a). *Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalação*. Obtido de <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>
- GREENPRO. (2004b). *Energia Solar Térmica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação*. Obtido de <http://www.greenpro.de/po/solartermico.pdf>
- Herzog, A. V, Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2001). Renewable energy sources. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Forerunner*.
- Hofierka, J., & Kaňuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, 34(10), 2206–2214. doi:10.1016/j.renene.2009.02.021
- Hofierka, J., & Šúri, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS : implementation and applications. Em *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference* (pp 1–19). Trento, Italy.
- Huang, S., & Fu, P. (2009). Modeling Small Areas Is a Big Challenge solar. *ESRI ArcUser Online Volume*, 28–31.
- INE. (2011a). Dados Estatísticos. *Instituto Nacional de Estatística*. Obtido 5 de Setembro de 2013, de <http://www.ine.pt/>

- INE. (2011b). Base Geográfica de Referenciação da Informação 2011. *Instituto Nacional de Estatística*. Obtido 5 de Setembro de 2013, de <http://mapas.ine.pt/>
- INMG. (1991). *Normais climatológicas da região de «Ribatejo e Oeste», correspondentes a 1951-1980. O Clima de Portugal (XLIX., Vol 2-2ª Reg)*. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M., & Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 82(10), 929–939. doi:10.1016/j.solener.2008.03.007
- Jäger-Waldau, A. (2012). *PV STATUS REPORT 2012*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/44375
- Jesus, L., Almeida, M., & Pereira, E. (2005). A Integração de Fotovoltaicos nos Edifícios em Portugal - Dificuldades e Oportunidades. *Engenharia e Vida*, 20(Janeiro), 38–45.
- Kassner, R., Koppe, W., Schüttenberg, T., & Bareth, G. (2008). Analysis of the Solar Potential of Roofs by Using Official LiDAR Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B4), 399–404.
- Kaygusuz, K. (2009). Environmental Impacts of the Solar Energy Systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(15), 1376–1386. doi:10.1080/15567030802089664
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., & Neish, B. S. (2013). Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31–41. doi:10.1016/j.scs.2013.01.002
- Kopp, G., & Lean, J. L. (2011). A new , lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1). doi:10.1029/2010GL045777
- Lains, P. (1994). O Estado e a industrialização em Portugal 1945-1990. *Análise Social*, XXIX(128), 923–958.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science*. United Kingdom: Wiley.
- Max Fordham and Partners, & Feilden Clegg Architects. (1999). *Photovoltaics in Buildings - A Design Guide*. London, Crow.
- Mckenney, D. W. (1999). Calibration and sensitivity analysis of a spatially- distributed solar radiation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(1), 49–65. doi:10.1080/136588199241454
- McVeigh, J. C. (1977). *Energia Solar*. Lisboa: CETOP.
- Mészáros, I., Miklánek, P., & Parajka, J. (2002). Solar energy income modelling in mountainous areas. Em *Interdisciplinary Approaches in Small Catchment Hydrology: Monitoring and Research - Proceedings of the 9th Conference of the European Network of Experimental and Representative Basins* (pp 127–135). Slovakia.

- Ministério da Economia e da Inovação. (2007). *Energias renováveis em Portugal*. Lisboa: Ministério da Economia e da Inovação.
- Nguyen, H. T., & Pearce, J. M. (2012). Incorporating shading losses in solar photovoltaic potential assessment at the municipal scale. *Solar Energy*, 86(5), 1245–1260. doi:10.1016/j.solener.2012.01.017
- Nguyen, H. T., Pearce, J. M., Harrap, R., & Barber, G. (2012). The application of LiDAR to assessment of rooftop solar photovoltaic deployment potential in a municipal district unit. *Sensors*, 12(4), 4534–4558. doi:10.3390/s120404534
- NOAA. (2012). *Lidar 101: An Introduction to lidar technology, data, and applications*. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- Olz, S., Sims, R., & Kirchner, N. (2007). *Contribution of renewables to energy security*. Paris: International Energy Agency.
- Peixoto, J. P. (1981). *A Radiação Solar e o Ambiente* (Col. O Amb.). Lisboa: Comissão Nacional do Ambiente.
- Pellegrino, M., Caiaffa, E., Grassi, A., & Pollino, M. (2008). GIS as a Tool for Solar Urban Planning. Em *Proceedings of 3rd International Solar Energy Society Conference - Asia Pacific Region (ISES-AP 2008)*. Sydney, Australia.
- POLIS. (2010). *Planeamento Urbano Solar - Manual de Boas Práticas*. POLIS Project.
- Priestnall, G., Jaafar, J., & Duncan, a. (2000). Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(2), 65–78. doi:10.1016/S0198-9715(99)00047-2
- Quaschnig, V. (2003). Technology Fundamentals - The Sun as an Energy Resource. *Renewable Energy World*, 6(5), 90–93. Obtido de <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index.php>
- Ramos, C., & Ventura, J. E. (1998). A energia solar em Portugal: potencialidades e diferenciação regional. Em *III Congresso Da Geografia Portuguesa, Porto* (pp 453–461). Colibri e Associação Portuguesa de Geógrafos.
- Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T., & Page, J. (2003). Worldwide Linke turbidity information. Em *Proceedings of ISES Solar World Congress* (pp 16–19). Göteborg, Sweden: International Solar Energy Society.
- Santos, T., Gomes, N., Brito, M., Freire, S., Fonseca, A., & Tenedório, J. A. (2011). Solar Potential Analysis in Lisbon Using LiDAR Data. Em *31st EARSeL Symposium 2011 and 34th General Assembly* (pp 13–19).
- Shan, J., & Sampath, A. (2005). Urban DEM Generation from Raw Lidar Data: A Labeling Algorithm and its Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2), 217–226.
- Šúri, M., Cebecauer, T., & Skoczek, A. (2011). SolarGIS: Solar Data And Online Applications For PV Planning And Performance Assessment. Em *26th European Photovoltaics Solar Energy Conference*. Hamburg, Germany.

- Šúri, M., Huld, T. A., & Dunlop, E. D. (2005). PV-GIS : a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy*, 24(2), 55–67. doi:http://dx.doi.org/10.1080/14786450512331329556
- Šúri, M., Huld, T. a., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. a. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10), 1295–1305. doi:10.1016/j.solener.2006.12.007
- U.S. Energy Information Administration. (2013). *International Energy Outlook 2013*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- United Nations. (2012). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. New York: United Nations Secretariat, Population Division.
- Vieira, A., Garrett, C., Cordeiro, J., Lopes, M., Santos, P. C., & Fonseca, S. (2010). *Plano de Acção Energia Sustentável para Oeiras 2010*. Oeiras: Câmara Municipal de Oeiras (DAE/GDM) e OEINERGE.
- Voivontas, D., Assimacopouloss, D., Mourelatos, A., & Corominas, J. (1998). Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable energy*, 13(3), 333–344.
- Watt, M. (2001). *Added Values of Photovoltaic Power Systems*. International Energy Agency.
- Wolfsegger, C., Fraile, D., & Teske, S. (2008). *Solar Generation V – 2008*. European Photovoltaic Industry Association (EPIA) and Greenpeace.
- Wong, J. L. (2009). Getting Out of the Shade : Solar Energy as a Security Strategy. *China Security*, 5(1), 91–103.
- Wyatt, P., & Ralphs, M. (2003). *Gis in Land and Property Management* (p 390). UK: Taylor & Francis.

Legislação consultada

Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de maio. Diário da República n.º 123/88 – I Série. Ministério da Indústria e Energia. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 312/2001 de 10 de dezembro. Diário da República n.º 284/2001 – I Série A. Ministério da Economia. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 339-C/2001 de 29 de dezembro. Diário da República n.º 300/2001 – I Série A. Ministério da Economia e do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 68/2002 de 25 de março. Diário da República n.º 71/2002 – I Série A. Ministério da Economia. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 33-A/2005 de 16 de fevereiro. Diário da República n.º 33/2005 – I Série A. Ministério das Atividades Económicas e do Trabalho. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 225/2007 de 31 de maio. Diário da República n.º 105/2007 – I Série. Ministério da Economia e da Inovação. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de novembro. Diário da República n.º 211/2007 – I Série. Ministério da Economia e da Inovação. Lisboa.

Portaria n.º 63/2008 de 21 de janeiro. Diário da República n.º 14/2008 – I Série. Ministério da Economia e da Inovação. Lisboa.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de abril. Diário da República n.º 73/2010 – I Série. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 118-A/2010 de 25 de outubro. Diário da República n.º 207/2010 – I Série. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de março. Diário da República n.º 47/2011 – I Série. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento. Lisboa.

Lei n.º 56/2012 de 8 de novembro. Diário da República n.º 216/2012 – I Série. Presidência da República. Lisboa

Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de fevereiro. Diário da República n.º 35/2013 – I Série. Ministério da Economia e do Emprego. Lisboa.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013 de 10 de abril. Diário da República n.º 70/2013 – I Série. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.

Anexo 1 – Caracterização das zonas de estudo

Tabela A1.1 - Características da zona Oeste e Este

Característica	Oeste	Este	
Latitude, Longitude	38° 43' 0" N, 9° 14' 0" W	38° 42' 0" N, 9° 12' 0" W	
Área (km ²)	2,20	1,83	
Concelho	Oeiras	Lisboa	
Subsecções (n°)	165	116	
Malha urbana	Desorganizada	Organizada	
Elevação média (m)	58,86	30,12	
Clima	Temperado mediterrâneo	Temperado mediterrâneo	
Consumo total de energia elétrica por habitante (kWh/hab/ano)	4 445,50	5 993,6	
Densidade Populacional (hab/km ²)	8 858,13	2 622,76	
Área coberta por edifícios (km ²)	0,38	0,28	
Área coberta por edifícios (%)	17	15	
Edifícios (n°)	Tipologia		
	Habitação unifamiliar	529	940
	Habitação multifamiliar	927	226
	Edifício não habitacional	220	663
	Total	1 676	1 829
	Função		
	Edifícios exclusivamente residenciais	1 262	1 055
	Edifícios principalmente não residenciais	17	8
	Edifícios principalmente residenciais	177	103
	Altura		
	1 ou 2 pisos	364	657
	3 ou 4 pisos	528	463
	5 ou mais pisos	564	46
	Ano de construção		
	Antes de 1919	75	104
	Entre 1919 e 1945	89	80
	Entre 1946 e 1960	199	594

	Entre 1961 e 1970	299	149
	Entre 1971 e 1980	345	93
	Entre 1981 e 1990	154	49
	Entre 1991 e 1995	83	10
	Entre 1996 e 2000	106	27
	Entre 2001 e 2005	62	35
	Entre 2006 e 2011	44	25
Alojamentos (n°)	Total	10 168	2 469
	Residência habitual	8 402	1 824
Indivíduos (n°)	Presentes	18 796	4 543
	Residentes	19 530	4 664
Área por declive (%)	0 a 10	45,09	46,10
	10 a 20	17,94	11,54
	20 a 35	14,38	12,75
	35 a 45	4,82	5,53
	> 45	17,77	24,08
Área por orientação (%)	Plano	0,07	0,01
	N	5,92	6,00
	NE	12,52	14,29
	E	16,96	11,70
	SE	14,90	12,56
	S	15,47	12,64
	SO	11,84	15,96
	O	10,47	11,15
	NO	7,60	11,01
N	4,26	4,67	

Anexo 2 – Resultados do Modelo Solar Analyst

Tabela A2.1 - Resultados mensais e totais para a radiação global na zona Oeste

Meses	Radiação global (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	53 580,02	27 258,11	0,52
Fevereiro	78 744,27	44 197,82	0,70
Março	117 471,19	75 739,00	1,00
Abril	160 324,19	115 848,13	1,31
Maiο	198 934,91	151 930,09	1,50
Junho	207 862,67	161 385,22	1,64
Julho	228 050,63	176 029,86	1,58
Agosto	211 047,91	156 582,28	1,47
Setembro	154 371,69	104 066,00	1,23
Outubro	107 580,78	62 554,79	0,88
Novembro	67 056,46	34 498,55	0,61
Dezembro	48 478,88	23 698,44	0,48
Total	1 588 084,50	1 133 788,32	12,93

Tabela A2.2 - Resultados mensais e totais para a radiação global na zona Este

Meses	Radiação global (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	52 207,12	25 171,27	0,57
Fevereiro	81 337,28	44 935,61	0,93
Março	118 319,25	74 315,80	1,22
Abril	163 867,42	115 068,33	1,67
Maiο	200 595,16	148 837,06	1,83
Junho	206 419,81	155 564,00	1,81
Julho	232 558,11	174 426,32	1,90
Agosto	218 268,38	157 131,64	1,73
Setembro	150 648,50	98 215,01	1,33
Outubro	109 459,05	62 371,64	1,12
Novembro	66 224,14	32 591,13	0,69
Dezembro	46 899,88	22 387,10	0,57
Total	1 601 591,63	1 111 014,90	15,36

Tabela A2.3 - Resultados mensais e totais para a radiação difusa na zona Oeste

Meses	Radiação difusa (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	18 920,49	13 881,26	0,52
Fevereiro	25 081,61	18 453,67	0,70
Março	35 736,74	26 329,83	1,00
Abril	46 864,27	34 588,15	1,31
Maio	53 358,31	39 415,69	1,50
Junho	58 243,48	43 035,64	1,64
Julho	56 112,75	41 489,66	1,58
Agosto	52 131,75	38 543,48	1,47
Setembro	43 950,27	32 444,38	1,23
Outubro	31 560,33	23 250,41	0,88
Novembro	22 045,00	16 201,98	0,61
Dezembro	17 452,79	12 806,34	0,48
Total	461 457,81	340 440,51	12,93

Tabela A2.4 - Resultados mensais e totais para a radiação difusa na zona Este

Meses	Radiação difusa (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	17 389,88	12 331,26	0,57
Fevereiro	28 233,80	20 089,54	0,93
Março	37 136,66	26 467,95	1,22
Abril	50 822,68	36 296,55	1,67
Maio	55 599,46	39 749,33	1,83
Junho	54 702,55	39 127,11	1,81
Julho	57 423,37	41 106,12	1,90
Agosto	52 314,93	37 452,82	1,73
Setembro	40 249,23	28 752,44	1,33
Outubro	34 187,25	24 362,94	1,12
Novembro	21 094,43	14 990,39	0,69
Dezembro	17 387,49	12 331,87	0,57
Total	466 539,31	333 058,30	15,36

Tabela A2.5 - Resultados mensais e totais para a radiação direta na zona Oeste

Meses	Radiação direta (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	38 981,38	13 376,85	0,00
Fevereiro	58 251,27	25 744,15	0,00
Março	85 616,55	49 409,17	0,00
Abril	115 685,12	81 259,98	0,00
Maio	146 311,45	112 514,40	0,00
Junho	150 163,98	118 349,58	0,00
Julho	172 464,47	134 540,20	0,00
Agosto	160 562,83	118 038,81	0,00
Setembro	114 297,34	71 621,62	0,00
Outubro	80 894,05	39 304,38	0,00
Novembro	49 926,39	18 296,57	0,00
Dezembro	35 181,81	10 892,10	0,00
Total	1 150 213,25	793 347,81	0,00

Tabela A2.6 - Resultados mensais e totais para a radiação direta na zona Este

Meses	Radiação direta (Wh/m ² /ano)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	38 830,87	12 840,02	0,00
Fevereiro	58 062,12	24 846,08	0,00
Março	85 347,72	47 847,86	0,00
Abril	115 420,86	78 771,78	0,00
Maio	145 974,02	109 087,73	0,00
Junho	152 283,64	116 436,89	0,00
Julho	175 864,52	133 320,20	0,00
Agosto	167 627,41	119 678,82	0,00
Setembro	114 027,59	69 462,57	0,00
Outubro	80 733,02	38 008,71	0,00
Novembro	49 806,00	17 600,73	0,00
Dezembro	33 693,72	10 055,23	0,00
Total	1 159 021,38	777 956,60	0,00

Tabela A2.7 - Resultados mensais e totais para a duração de radiação direta na zona Oeste

Meses	Duração (horas)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	285,00	156,53	0,00
Fevereiro	284,50	169,26	0,00
Março	354,00	225,92	0,00
Abril	377,50	255,42	0,00
Maio	423,00	292,50	0,00
Junho	414,00	291,64	0,00
Julho	434,00	300,44	0,00
Agosto	402,00	276,55	0,00
Setembro	352,50	232,07	0,00
Outubro	328,00	201,00	0,00
Novembro	282,50	158,28	0,00
Dezembro	267,50	138,10	0,00
Total	4 204,50	2 697,729	0,00

Tabela A2.8 - Resultados mensais e totais para a duração de radiação direta na zona Este

Meses	Duração (horas)		
	Máxima	Média	Mínima
Janeiro	285,00	151,71	0,00
Fevereiro	285,50	164,81	0,00
Março	354,00	220,45	0,00
Abril	377,50	250,00	0,00
Maio	423,00	287,58	0,00
Junho	412,00	285,70	0,00
Julho	434,00	295,79	0,00
Agosto	402,00	271,19	0,00
Setembro	352,50	226,73	0,00
Outubro	328,00	195,85	0,00
Novembro	282,00	153,53	0,00
Dezembro	260,50	129,38	0,00
Total	4 196,00	2 632,722	0,00

Anexo 3 – Valores SolTerm

Tabela A3.1 – Valores SolTerm mensais e totais da radiação global na zona Oeste e Este

Meses	Radiação global (Wh/m ² /ano)	
	Oeste	Este
Janeiro	60 000	60 000
Fevereiro	87 000	87 000
Março	114 000	114 000
Abril	156 000	156 000
Maio	192 000	189 000
Junho	207 000	204 000
Julho	219 000	216 000
Agosto	204 000	198 000
Setembro	147 000	147 000
Outubro	105 000	102 000
Novembro	72 000	72 000
Dezembro	57 000	57 000
Total	1 620 000	1 602 000