



**Diogo Carlos Jorge Dias**

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

## **Potencial técnico de aproveitamento da energia solar fotovoltaica em edifícios:**

### **Caso de estudo da cidade de Santarém**

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

Orientador: Professor Doutor João Joanaz de Melo, Professor Auxiliar com agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira

Arguente(s): Mestre Luís Miguel Pereira Dias

Vogal(ais): Prof. Doutor João Miguel Dias Joanaz de Melo



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Março, 2020]





## **Potencial técnico de aproveitamento da energia solar fotovoltaica em edifícios:**

### **Caso de estudo da cidade de Santarém**

Copyright © Diogo Carlos Jorge Dias, da FCT NOVA e da UNL

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.

*With a family standing behind you, there isn't an obstacle that can't be faced and overcome.*



## Agradecimentos

Esta dissertação precisou do contributo de várias pessoas, bem como instituições desta forma queria deixar o meu agradecimento às seguintes partes:

- Ao meu orientador, Professor Doutor João Joanaz de Melo, agradeço todo o tempo disponibilizado tal como as inúmeras dúvidas esclarecidas e conhecimento transmitido;
- À Camara Municipal de Santarém com quem a FCT-NOVA estabeleceu um protocolo de colaboração e me acolheu neste projeto de colaboração com a FCT-UNL, em especial à equipa da divisão de ambiente e sustentabilidade, Eng<sup>a</sup> Maria João Cardoso, Eng<sup>a</sup> Ana Patrícia Pereira, Eng<sup>a</sup> Ana Luísa Alves, Dr.<sup>a</sup> Ana Luísa Gama e Dr.<sup>a</sup> Andreia Lopes, que me acompanhou durante todo o processo e esteve sempre disponível para esclarecer qualquer dúvida;
- À Catarina Lucas, o meu obrigado por me ter ajudado com a informação disponível, tal como se ter disponibilizado a ajudar sempre que necessário;
- Aos meus colegas de curso, um muito obrigado pela viagem que me proporcionaram durante estes longos anos;
- À Joana Gomes Antunes, um grande obrigado pela disponibilidade oferecida, bem como a simpatia e ajuda prestada;
- Aos meus amigos que fazem parte da família, quero agradecer todo o tempo passado e conhecimento que me transmitiram ao longo dos anos;
- Um especial agradecimento à Eng<sup>a</sup> Maria João Cardoso por me ter mostrado o que significa ser um Eng.<sup>o</sup> do Ambiente e por me motivar a nunca desistir de fazer o melhor que conseguimos;
- À Eng<sup>a</sup> Carolina Amaro, um grande abraço por me teres apoiado em todas as dificuldades que foram surgindo ao longo da vida;
- À Eng<sup>a</sup> Débora Rodrigues, um brinde ao nosso tempo passado juntos e a capacidade de ultrapassar as dificuldades e problemas;
- À quase Eng<sup>a</sup> Patrícia Garcês, pelo companheirismo, boa disposição e pela força de vontade em conseguir acabar tudo em que se prepõe a fazer;
- À Eng<sup>a</sup> Mariana Ferreira por me ter dado força em não desistir mantendo sempre um sorriso para mim;
- Ao Marco Santos, um enorme obrigado por fazer parte da minha vida;
- Quero agradecer à minha família todo o investimento que foi feito em mim e especialmente a motivação e apoio necessário para finalizar mais uma etapa na minha vida;
- Por fim, quero agradecer em especial aos meus pais por poder contar sempre com eles em todos os momentos da minha vida.



## Resumo

A energia solar pode ser uma fonte alternativa para produção de eletricidade, onde o aproveitamento das coberturas dos edifícios para implementação de sistemas fotovoltaicos poderá ser uma opção viável no que toca ao aumento da quota de energias renováveis e redução das emissões de gases com efeito de estufa.

A dissertação teve por objetivo analisar o potencial de aproveitamento de energia fotovoltaica nos edifícios do Município de Santarém. Para tal, foi determinada a área de coberturas com capacidade de produção de eletricidade fotovoltaica e desenvolvido um sistema de classificação de 15 tipologias caracterizadas pelo tipo de consumo de eletricidade, tendo sido subseqüentemente divididas em edifícios de bairro e grandes edifícios.

As tipologias dominantes encontradas no decorrer do estudo, para os edifícios de bairro foram os residenciais e residenciais mistos, com 73% e 22% do edificado, respetivamente. No caso dos grandes edifícios, as tipologias dominantes foram a educação e igrejas, com 25 e 14 edifícios, de um total de 102.

Obteve-se um valor da área total de 98,7 ha de coberturas com potencial fotovoltaico em Santarém, sendo esta capaz de produzir 280 GWh/ano e evitar 43,9 kt CO<sub>2</sub>/ano de emissões.

Os resultados obtidos demonstram que a cidade de Santarém tem o potencial de satisfazer 2,5 vezes o consumo de eletricidade dos edifícios e evitar as correspondentes emissões de CO<sub>2</sub>. Caso sejam aplicadas medidas de eficiência energética, o potencial atingirá os 3,0 vezes o consumo. No entanto, para atingir o potencial fotovoltaico serão necessárias medidas de política geral, como incentivos fiscais, e medidas à escala municipal, como balcões de atendimento.

**Palavras-chave:** Potencial solar fotovoltaico, Santarém, produção de eletricidade, emissões de CO<sub>2</sub>



## Abstract

Solar energy can be an alternative source for electricity production, where the use of building rooftops to implement photovoltaic systems could be a viable option to increase the share of renewable energy and reducing greenhouse gas emissions.

This thesis aimed to analyse the potential of using photovoltaic energy in the buildings of the Municipality of Santarém. For this purpose, a classification system of 15 types was developed, characterized by the type of electricity consumption, having subsequently been divided into neighbourhood buildings and large buildings. Areas for implementing photovoltaic systems were also determined, which allowed the calculation of the photovoltaic potential as well as avoided CO<sub>2</sub> emissions.

The dominant typologies for neighbourhood buildings were residential and mixed residential, with 73% and 22% of total buildings, respectively. In the case of large buildings, the dominant typologies were education and churches, with 25 and 14 buildings, respectively.

It was obtained a value of 98,7 ha of the total area of roofs with photovoltaic potential in Santarém, which is capable of producing 280 GWh/year and avoiding 43,9 kt CO<sub>2</sub>/year of emissions.

The results obtained demonstrate that the city of Santarém has the potential to satisfy 2.5 times the electricity consumption of buildings and avoid the corresponding CO<sub>2</sub> emissions. If energy efficiency measures are applied, the potential will reach 3.0 times the consumption. However, in order to reach the photovoltaic potential, general policy measures, such as tax incentives, and measures at the municipal level, such as service desks, will be necessary.

**Keywords:** Solar photovoltaic potential, Santarém, electricity production, CO<sub>2</sub> emissions

## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento Geral.....	1
1.2	Objetivos e âmbito .....	2
1.3	Organização da dissertação .....	2
2	Revisão de literatura.....	3
2.1	Panorama energético .....	3
2.1.1	Perspetivas energéticas.....	3
2.1.2	Visão global da energia renovável .....	4
2.1.3	Cenário nacional da energia renovável .....	6
2.1.4	Energia solar em Portugal .....	8
2.2	Energia Solar .....	9
2.2.1	Implementação da Energia Solar.....	9
2.2.2	Sistema solar fotovoltaico .....	10
2.2.3	Sistema fotovoltaico ligado à rede .....	11
2.2.4	Sistema fotovoltaico autónomo .....	12
2.2.5	O potencial da energia solar fotovoltaica em áreas urbanas.....	14
2.2.6	Instalação de painéis PV nas coberturas e potencial técnico.....	17
2.3	Custo dos sistemas fotovoltaicos.....	19
2.4	Poupança de emissões de CO <sub>2</sub> .....	20
3	Metodologia .....	23
3.1	Área de estudo: A cidade de Santarém.....	23
3.2	Abordagem geral .....	25
3.3	Delimitação da área de estudo.....	26
3.4	Levantamento de informação sobre o edificado da área em estudo .....	27
3.5	Classificação dos edifícios por tipologia de uso e estimativa do consumo de eletricidade .....	28
3.6	Cálculo dos fatores influentes na captação de energia solar .....	32
3.7	Cálculo da área fotovoltaica para instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas .....	34
3.8	Cálculo do potencial fotovoltaico das coberturas dos edifícios .....	36
3.9	Estimativa de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas pela produção PV .....	38
3.10	Análise de Sensibilidade e cenários .....	39
3.10.1	Energia solar térmica e medidas de eficiência energética .....	39
3.10.2	Comunidades de produtores-consumidores.....	40
4	Resultados e Discussão .....	42
4.1	Classificação dos edifícios por tipologia de uso e estimativa do consumo de eletricidade .....	42

4.2	Cálculo dos fatores influentes na captação da energia solar .....	47
4.3	Cálculo da área para instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas .....	48
4.4	Cálculo do potencial fotovoltaico das coberturas dos edifícios .....	49
4.5	Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> evitadas pela produção PV .....	51
4.6	Análise de sensibilidade e cenários .....	52
4.6.1	Energia solar térmica e medidas de eficiência energética .....	52
4.6.2	Comunidades de produtores-consumidores.....	54
4.7	Incentivos à instalação de sistemas fotovoltaicos .....	56
5	Conclusões .....	59
5.1	Síntese .....	59
5.2	Medidas e incentivos.....	61
5.3	Desenvolvimentos futuros.....	62
	Referências bibliográficas .....	63
	Anexos.....	71



## Índice de Figuras

Figura 2.1: Variação da procura de energia primária por fonte nos principais mercados de energia, 2017-2018 (Adaptado de : International Energy Agency, 2019) .....	3
Figura 2.2: Crescimento da produção de energia elétrica por fonte no mundo, 2017-2018 (Adaptado de IEA, 2019) .....	4
Figura 2.3: Capacidade global de energia renovável mundial, 2007-2017 (adaptado de REN21, 2018) .....	5
Figura 2.4: Evolução anual da capacidade de energia renovável global por tecnologia e total, 2012-2018 (adaptado de REN21, 2019).....	5
Figura 2.5: Evolução da produção de eletricidade em Portugal de origem FER (fonte: DGEG, 2019) .....	7
Figura 2.6: evolução da capacidade instalada por tipologia de FER em Portugal (fonte: DGEG, 2019) .....	7
Figura 2.7: Evolução da produção de eletricidade proveniente de solar PV por região em Portugal (Fonte: DGEG, 2019).....	8
Figura 2.8: Potencial de eletricidade Fotovoltaica na Europa e em Portugal (SOLARGIS, 2017) .....	9
Figura 2.9: Eficiências das tecnologias fotovoltaicas em laboratório (NREL, 2019) .....	10
Figura 2.10: Estrutura principal de um sistema fotovoltaico com ligação à rede (Fonte: Universal Automação, 2020) .....	12
Figura 2.11: Princípio de um sistema fotovoltaico autónomo (Fonte: NeoSolar, 2020).....	13
Figura 2.12: Potencial solar urbano para a cidade de Oklahoma City, estimado pelo projeto Sunroof da Google <sup>TM</sup> .....	15
Figura 2.13: Eficiência dos painéis fotovoltaicos de acordo com sua inclinação e orientação na Europa (Electropaedia, 2020).....	15
Figura 2.14: Eficiência dos painéis fotovoltaicos de acordo com sua inclinação e orientação na Europa (evoenergy,2013) .....	16
Figura 2.15: Carta do Potencial Solar do concelho de Lisboa (Fonte: adaptado de <a href="https://lisboaenova.org/solispotencial-solar-em-lisboa">https://lisboaenova.org/solispotencial-solar-em-lisboa</a> ).....	17
Figura 2.16: Projeto Google Headquarters, Califórnia (Blue Oak Energy, 2019) .....	18
Figura 2.17: A energia solar fotovoltaica contribuiria para 4,9 Gt de reduções de emissões de CO <sub>2</sub> em 2050, representando 21% das reduções gerais de emissões no setor de energia necessárias para atender às metas climáticas de Paris (adaptado de IRENA,2019a ).....	21

Figura 3.1: Localização geográfica do distrito de Santarém (Adaptado de: VisitarPortugal,2020) .....	23
Figura 3.2: Área de estudo da Cidade de Santarém (Adaptado de: CMS, 2020) .....	24
Figura 3.3: Produção de eletricidade por fonte de energia renovável (Adaptado de DGEG, 2020) .....	25
Figura 3.4: Estrutura metodológica.....	26
Figura 3.5: Zonas urbanas e respetivas áreas de amostragem.....	27
Figura 3.6: niuGIS - Consulta aos PMOT.....	28
Figura 3.7: Representação esquemática da medição do ângulo das coberturas de duas e três águas (Adaptado de: pngimage, 2020).....	33
Figura 3.8: Disposição de módulos fotovoltaico para cálculo do GCR em coberturas inclinadas (Fonte: Byrne et al., 2015) .....	36
Figura 3.9: Eficiência de captação da radiação solar dos painéis fotovoltaicos de acordo com a sua inclinação e orientação para a latitude de 40°N (adaptado de: evoenergy, 2013; Electropeadia, 2020)).....	37
Figura 4.1: Tipologia de usos dos edifícios residenciais mistos na cidade de Santarém .....	43
Figura 4.2: Tipologia de usos dos edifícios comerciais mistos na cidade de Santarém .....	43
Figura 4.3: Tipologia de usos dos grandes edifícios na cidade de Santarém .....	44
Figura 4.4:Tipologia de uso dos edifícios mistos.....	44
Figura 4.5: Perfil de consumo e venda de energia elétrica para dois prossumers comerciais médios e quatro prossumers residenciais médios no mesmo edifício (dia útil) em Julho (adaptado de: Marques, 2019) .....	55

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Classificação dos edifícios por tipologia de uso.....	29
Tabela 3.2: Consumo de eletricidade dos edifícios de bairro consoante a tipologia.....	29
Tabela 3.3: Consumo de eletricidade dos edifícios de grandes dimensões consoante a tipologia .....	30
Tabela 3.4: Gamas de inclinação nas coberturas dos edifícios .....	33
Tabela 3.5: Orientações das coberturas dos edifícios que foram consideradas.....	34
Tabela 3.6: Ground Coverage Ratio (GCR), Área de serviço (SA) e Área útil em função da inclinação das coberturas (adaptado de Byrne et al, (2015)) .....	35
Tabela 3.7: Características do painel fotovoltaico selecionado .....	37
Tabela 3.8: Fator de emissão CO <sub>2</sub> da produção de eletricidade em Portugal.....	38
Tabela 3.9: Características do painel solar térmico selecionado.....	39
Tabela 3.10: Custo de compra e venda de eletricidade à rede elétrica.....	41
Tabela 4.1: Ocorrência de tipologias de uso nos edifícios de bairro.....	42
Tabela 4.2: Estimativa da população residente e número de famílias em cada zona urbana .....	45
Tabela 4.3: Estimativa do consumo anual de eletricidade por tipologia de uso dos edifícios de bairro e grande edifícios na cidade de Santarém (MWh/ano) .....	46
Tabela 4.4: Consumos de eletricidade no concelho e cidade de Santarém .....	47
Tabela 4.5: Número de edifícios por inclinação e orientação .....	48
Tabela 4.6: Áreas de implantação, bruta, útil e de implementação PV.....	49
Tabela 4.7: Radiação solar média recebida nas coberturas dos edifícios das zonas urbanas .....	49
Tabela 4.8: Potência instalada e potencial técnico de produção PV na área em estudo.....	50
Tabela 4.9: Emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por zona urbana em t CO <sub>2</sub> /ano.....	51
Tabela 4.10: Simulação da perda de produção de energia solar com a instalação de coletores solares térmicos e diminuição do consumo de eletricidade aplicando medidas de eficiência energética .....	52
Tabela 4.11: Consumo de eletricidade potencial satisfeito pelo sistema PV, de acordo com os quatro cenários .....	53
Tabela 4.12: Comparação entre um edifício residencial e residencial misto no âmbito de comunidades energéticas.....	55

Tabela 4.13: Medidas de incentivo à implementação de sistemas PV em Santarém ..... 56

## Lista de Acrónimos

AS – Área de serviço

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CMS – Câmara Municipal de Santarém

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

EUA – Estados Unidos da América

FER – Fonte de energia renovável

GCR – Taxa de cobertura do solo (do inglês *ground coverage ratio*)

GEE – Gases com efeito de estufa

SIG – Sistema de informação geográfica

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

LCOE – Custo nivelado da energia (do inglês *levelized cost of energy*)

MPPT – Localizador de potência máxima (do inglês *maxium power point tracking*)

tep – Toneladas equivalentes de petróleo

PME – Pequenas e médias empresas

PMOT – Planos municipais de ordenamento do território

PNEC 2030 – Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PV –Fotovoltaico (do inglês *photovoltaic*)

t – Toneladas

UE – União Europeia

UN – Nações Unidas

UPAC – Unidades de produção para autoconsumo

Wp – Watt-pico

ZU – Zonas urbanas

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento Geral

Tem-se vindo a assistir a um aumento de fenómenos climatéricos extremos, na sua duração e intensidade, durante os últimos anos (IPCC, 2018). Estas alterações climáticas encontram-se ligadas ao nosso desenvolvimento socioeconómico, onde a grande parte da produção mundial de energia é proveniente da queima de combustíveis fósseis. Assim sendo a concentração de gases com efeito de estufa (GEE) na atmosfera tem vindo a aumentar, provocando um aumento da temperatura global do planeta.

Com o intuito de diminuir as emissões de GEE, a energia elétrica renovável resultante de energia solar apresenta ser uma opção economicamente viável bem como de fácil acesso e massificação. A energia solar recebida num dia pelo planeta Terra é cerca de 120 PW (peta Watt), um valor muito acima das necessidades atuais de energia sendo suficiente para satisfazer a procura global em 20 anos (Chu, 2011).

Tendo em conta a abundância de energia solar recebida, a produção de eletricidade com recurso a solar fotovoltaico (PV) parece ser uma certeza para o futuro. Esta tecnologia exhibe vários aspetos positivos, quando comparada com outras tecnologias de produção de eletricidade, como é o caso de não apresentar emissões de GEE diretas, ter baixa manutenção, e contribuir na redução de custos económicos (Dinçer, 2011). Através da instalação de PV nos telhados dos edifícios, estar-se-ia a aproveitar um espaço que de outra forma não teria utilidade, transformando o processo mais eficiente economicamente, visto não ser necessário a construção de infraestrutura específica.

A instalação de um sistema PV no telhado de um edifício poderá ser o necessário para satisfazer as necessidades energéticas do mesmo. Embora a eficácia do sistema PV se encontre dependente de características, como a sua dimensão, o tipo de telhado e a orientação geográfica. Para atingir uma instalação bem-sucedida, devem ser feitas considerações técnicas e económicas que incluem a disponibilidade de radiação solar, a eficiência da conversão de energia, custos de investimento dos sistemas PV e custos operacionais, vida útil de solar PV, operação de sistema PV e correspondência entre disponibilidade do recurso e consumo de energia (Correia, 2017).

É essencial quantificar o potencial do sistema PV no telhado e determinar a área disponível onde o sistema será instalado. As considerações feitas anteriormente são importantes, já que se poderia determinar a capacidade total de produção de eletricidade e, desta forma, compreender se a produção fotovoltaica é suficiente para colmatar o consumo total do edifício ou qual a proporção deste é satisfeito.

A cidade de Santarém foi selecionada como caso de estudo, uma vez que a câmara municipal de Santarém apresentava interesse em estudar a capacidade de produção de eletricidade por via fotovoltaica, considerando que a cidade se encontra geograficamente numa posição favorável para exploração de energia solar, e porque existe pouco trabalho desenvolvido sobre a energia fotovoltaica descentralizada à escala da cidade, em Portugal.

## 1.2 Objetivos e âmbito

Com o intuito de oferecer uma alternativa sustentável à produção de eletricidade, bem como contribuir para o aumento da energia fotovoltaica no fornecimento de energia elétrica foram desenvolvidos dois objetivos centrais: (i) quantificar o potencial fotovoltaico presente em edifícios na cidade de Santarém e (ii) identificar medidas de promoção de energia solar.

A presente dissertação pretende promover a implementação de sistemas PV nos telhados dos edifícios da cidade de Santarém, com o intuito de encontrar uma alternativa renovável de produção de eletricidade, diminuir as emissões de GEE e apresentar um estudo de apoio a decisão para implementação de sistemas PV.

## 1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos principais:

1) A introdução é constituída por um enquadramento geral que possibilita ao leitor a compreensão da importância da energia solar e de que forma pode ser uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, determinando os objetivos e âmbito da dissertação.

2) Na revisão de literatura é apresentado a evolução da energia PV num panorama global e nacional, são consideradas questões relacionadas com a energia solar fotovoltaica, tais como a radiação solar, características do sistema PV, a instalação de painéis PV nas coberturas e produtividade do sistema PV. É exibido o custo do módulo e global dos sistemas fotovoltaicos.

3) No que diz respeito à metodologia aplicada, pretende-se evidenciar os principais passos que foram seguidos de forma a cumprir os objetivos propostos.

4) Seguidamente, apresentam-se os resultados do trabalho desenvolvido e a discussão dos mesmos.

5) Por fim, a conclusão tem o intuito de sintetizar o que foi investigado e apresentar as principais conclusões.

## 2 Revisão de literatura

### 2.1 Panorama energético

#### 2.1.1 Perspetivas energéticas

O conceito científico de energia encontra-se associado à combustão de fontes fósseis ou através da rotação de máquinas (Castro, 2018). A energia é um dos pilares essenciais da sociedade humana visto que, a grande maioria das atividades desenvolvidas necessita de consumo de energia.

De acordo com o Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (PNUD), existe uma correlação entre o consumo de eletricidade e o índice de desenvolvimento humano (IDH) (UNDP, 2018). A procura de energia elétrica resulta da utilização das tecnologias mais recentes na proporção da sua disponibilidade em cada país. Desta forma, verifica-se maior procura de eletricidade por parte dos países com maior IDH em oposição aos países com maior índice populacional.

Entre os anos 1990 e 2017, o IDH global apresentou uma tendência crescente alcançando o nível “elevado” no ano de 2010. É de notar ainda que este incremento não foi atingido de forma constante, uma vez que houve países que sofreram uma regressão do IDH devido a epidemias, conflitos ou crises económicas (UNDP, 2018).

Considerando a tendência crescente estabelecida no período mencionado anteriormente, pode-se projetar que o consumo de eletricidade continuará a aumentar. De forma a colmatar este consumo acrescido, torna-se necessário efetuar uma transição energética no sentido das renováveis.

Analisando a Figura 2.1, é possível extrair que o maior aumento na procura de energia primária é atribuído aos combustíveis fósseis, onde o Gás Natural é a fonte que apresenta maior crescimento. Em relação às fontes renováveis, a Europa e a China correspondem aos mercados de energia onde houve um crescimento mais elevado.

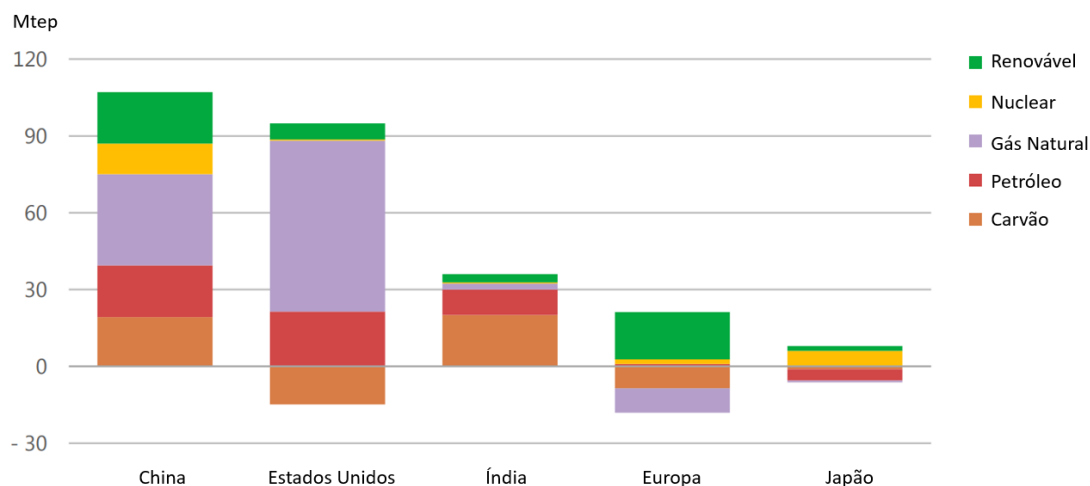


Figura 2.1: Variação da procura de energia primária por fonte nos principais mercados de energia, 2017-2018  
(Adaptado de : International Energy Agency, 2019)

A produção de eletricidade mundial em 2017 continua baseada em combustíveis fósseis, visto que estes correspondem a cerca de 64,5% da produção total de eletricidade enquanto as fontes renováveis apenas representam 23% (International Energy Agency, 2019).

### 2.1.2 Visão global da energia renovável

É presumível que o futuro da produção de energia elétrica seja baseado em energia renovável, considerando que a energia fóssil acarreta um grande custo ambiental em termos de emissões de gases com efeito de estufa.

Observando a Figura 2.2, consegue-se compreender que houve uma subida de 993 TWh na produção de energia elétrica a nível mundial, entre 2017 e 2018, sendo que a maior contribuição proveio da energia fóssil. É de notar ainda que houve um considerável aumento na produção de eletricidade proveniente de energia renovável, com 449 TWh.

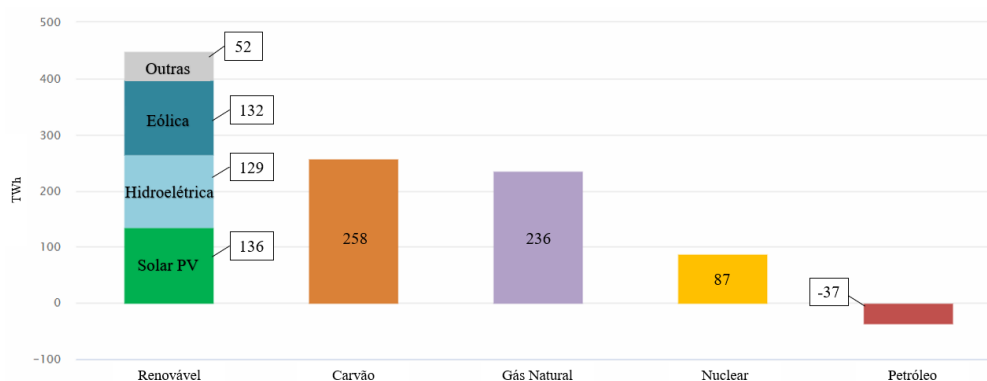


Figura 2.2: Crescimento da produção de energia elétrica por fonte no mundo, 2017-2018 (Adaptado de IEA, 2019)

De acordo com a Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21), as diversas tecnologias de energia renovável encontram-se no caminho de se tornarem cada vez mais competitivas quando comparadas com combustíveis fósseis. A REN21 indica ainda que tanto a energia solar como a eólica têm vindo a tornar-se cada vez mais competitivas devido à diminuição do custo de produção, à aplicação de taxas de carbono e às novas iniciativas vindas pelos governos (REN21, 2018).

A nível mundial, a capacidade global de energia renovável continua a aumentar e espera-se que mantenha a tendência crescente, como se pode observar na Figura 2.3. Nos anos mais recentes, a energia solar PV e a energia eólica correspondem às fontes renováveis que mais contribuíram para o aumento de capacidade de energia renovável global.

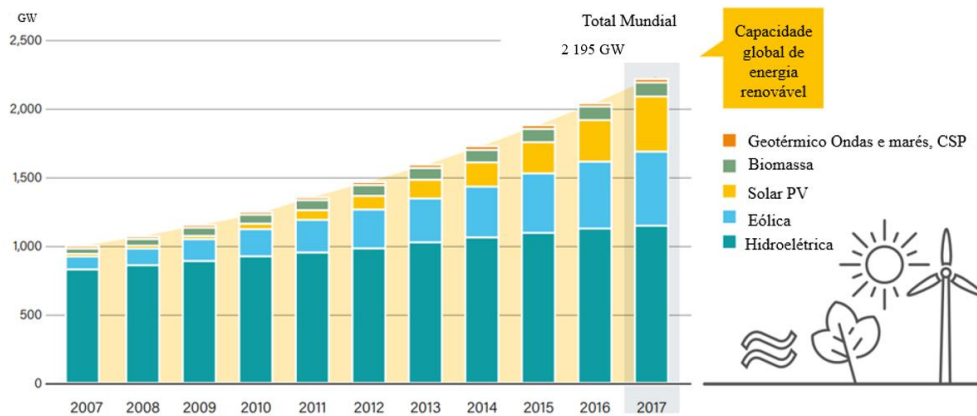


Figura 2.3: Capacidade global de energia renovável mundial, 2007-2017 (adaptado de REN21, 2018)

Segundo a REN21, o aumento da capacidade de energia renovável ultrapassou o aumento da capacidade de energia fóssil pelo quarto ano consecutivo. Observando com maior detalhe para a energia renovável, a nível global, a capacidade de energia solar fotovoltaica aumentou 55%, seguido da energia eólica e hidroelétrica com 28% e 11%, respetivamente (REN21, 2019).

Visualizando a Figura 2.4, consegue-se extrair que a energia solar apresenta um crescimento contínuo em capacidade de energia renovável desde 2012 até 2018, atingindo um aumento de 100 GW no último ano.

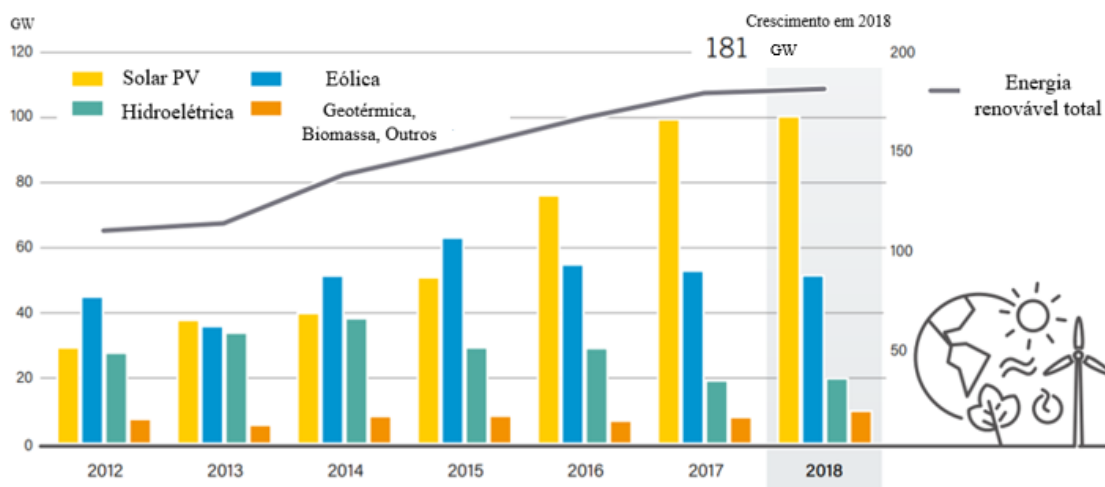


Figura 2.4: Evolução anual da capacidade de energia renovável global por tecnologia e total, 2012-2018 (adaptado de REN21, 2019)

### 2.1.3 Cenário nacional da energia renovável

Portugal é um país que se encontra direcionado para o aproveitamento de energias renováveis, devido à sua localização geográfica, às condições climatéricas propícias, bem como à falta de produção interna de combustíveis fósseis, tornando o investimento em FER uma prioridade.

De acordo com o plano nacional energia e clima (PNEC), Portugal apresenta bons argumentos para continuar a seguir o caminho para a neutralidade carbónica tornar-se numa economia neutra em carbono baseada em fontes de energia renovável (Portugal, 2019). É também indicado, que embora o país se encontre preparado para atingir a meta estabelecida para 2020, 31% de renováveis no consumo de energia, é necessário continuar os esforços e a ambição.

As previsões feitas pelo PNEC, para o horizonte 2030, indicam que a energia renovável irá atingir 47% do consumo total de energia bruta, onde o sector da eletricidade terá a contribuição de 80% do consumo total proveniente de energias renováveis (Portugal, 2019).

Em relação à evolução da capacidade instalada por tipologia de FER, as estimativas para o horizonte 2030 apontam para que a energia solar seja a fonte com maior aumento de capacidade instalada com 9,9 GW, seguida da energia eólica com 9,2 GW e hídrica com 9 GW (Portugal, 2019).

Embora as medidas do PNEC se encontrem no bom caminho para a descarbonização, as metas apresentadas são consideradas muito pouco ambiciosas bem como as medidas indicadas pelo plano são por vezes genéricas e superficiais (Joanaz de Melo *et al.*, 2019).

Com o intuito de atingir as metas referidas anteriormente, é essencial compreender qual a situação em que o país se encontra, quais são as tendências visíveis na produção de energia renovável e qual a evolução da capacidade instalada nos anos mais recentes.

Observando a Figura 2.5, consegue-se compreender que a evolução da fonte renovável hídrica tem sido variável, onde as quebras de produção são atribuídas às secas severas e extremas que se têm sentido ao longo do tempo (DGEG, 2019). As fontes renováveis, eólica e solar mantiveram um crescimento contínuo no decorrer dos anos, sendo que a eólica representa um maior peso a nível nacional.

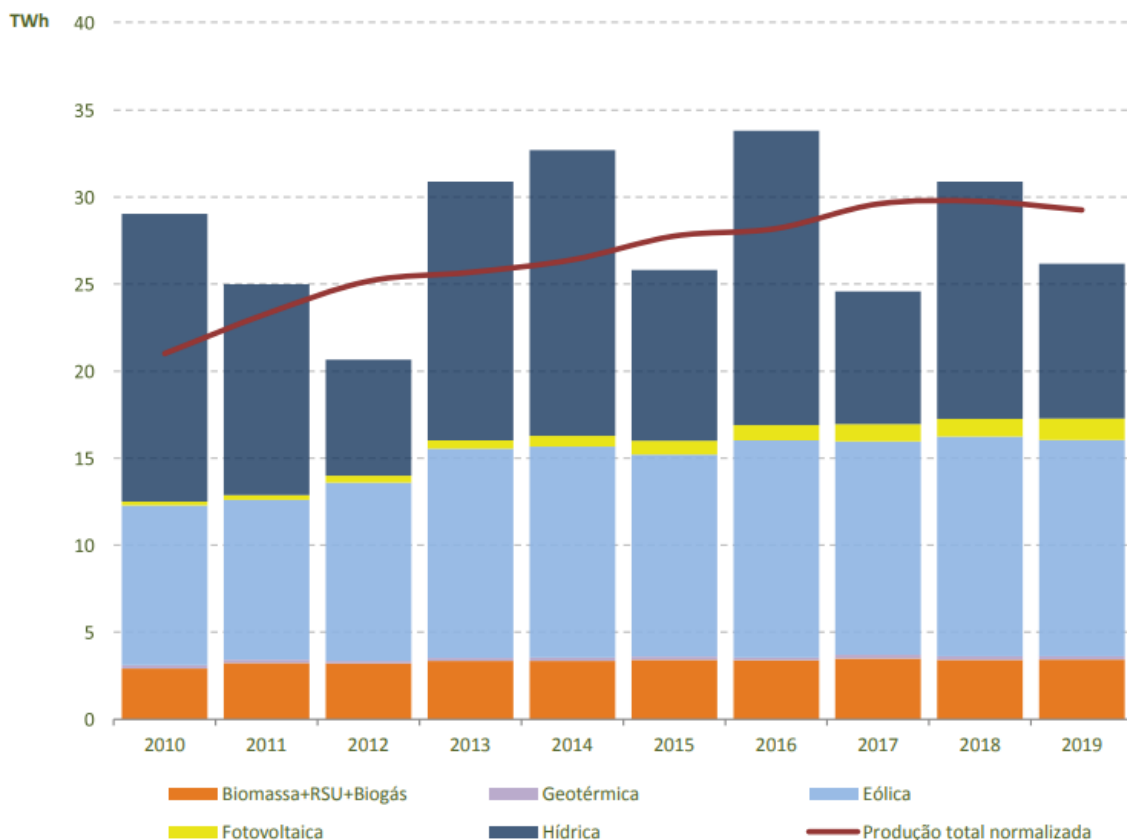


Figura 2.5: Evolução da produção de eletricidade em Portugal de origem FER (fonte: DGEG, 2019)

Visualizando a Figura 2.6, verifica-se que a tecnologia com um maior aumento em capacidade instalada no período estabelecido foi a hídrica com 2,2 GW, atingindo os 7 GW em 2019. A energia eólica representa cerca de 5,5 GW, estabelecendo-se desta forma como a segunda maior força motriz nacional. É de notar ainda que a tecnologia que teve um maior incremento, em termos relativos, foi a energia solar.

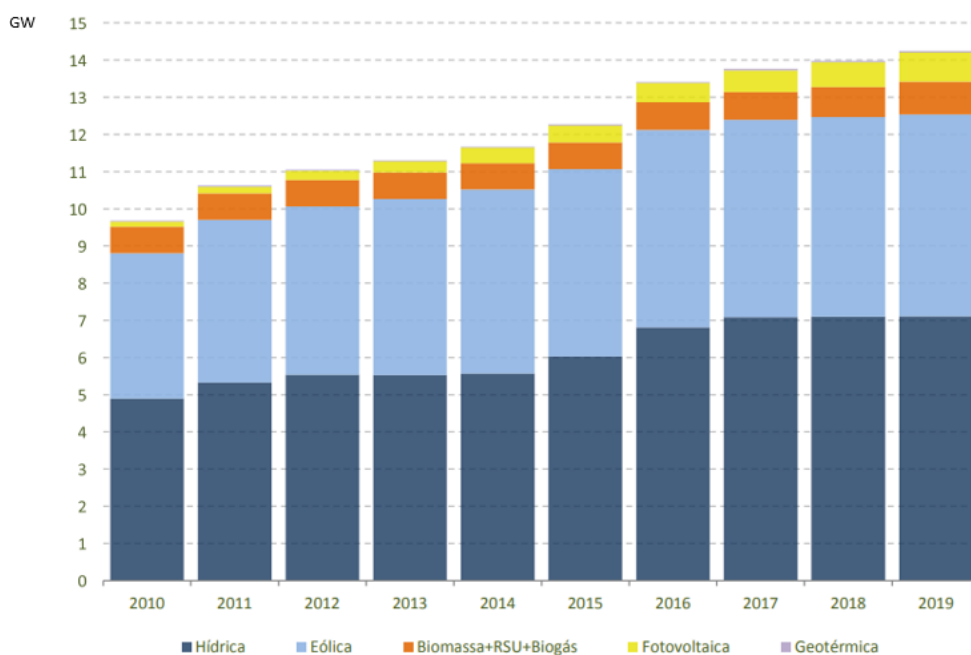


Figura 2.6: evolução da capacidade instalada por tipologia de FER em Portugal (fonte: DGEG, 2019)

Considerando que o futuro da energia renovável em Portugal associado ao aumento do aproveitamento da energia solar (DGEG, 2019), na subsecção 2.1.4 detalha esta fonte de energia renovável.

#### 2.1.4 Energia solar em Portugal

Com o desenvolvimento da tecnologia renovável solar, a produção de energia fotovoltaica apresenta uma solução técnica e economicamente viável capaz de mitigar as necessidades energéticas que uma sociedade moderna acarreta sem prejudicar o ambiente (Pearce, 2002).

A tecnologia solar PV encontra-se tecnicamente madura e em fase avançada de comercialização e implementação (Ellabban *et al.*, 2014). Esta tecnologia pode ser classificada em duas categorias consoante a sua dimensão e localização, nomeadamente em sistemas solar distribuídos (por exemplo em fachadas de edifícios ou telhados) ou grandes centrais de energia solar PV (Angelis-Dinmakis *et al.*, 2011).

Portugal tem uma elevada disponibilidade de radiação solar aliado a um grande número de horas de sol por ano (entre 2200 e 3000 horas), que é um fator essencial para o aproveitamento do solar PV, tornando-o num dos países mais promissores da Europa para investir em projetos de energia solares (Moreira, 2016).

Apesar das condições favoráveis mencionadas anteriormente, a instalação de sistema solar PV em Portugal contou com um progresso reduzido (Jäger-Waldau, 2019). É de notar ainda que a taxa de instalação de sistema solar PV encontra-se baixa quando comparada com outros países da UE (Sarasa-Maestro *et al.*, 2013).

Segundo a DGEG em 2018, a produção de energia elétrica em Portugal proveniente de solar PV atingiu 1 TWh, onde a região que mais contribuiu para este valor foi o Alentejo com 391 GWh da produção total de energia elétrica, como se pode observar na Figura 2.7 (DGEG, 2019).

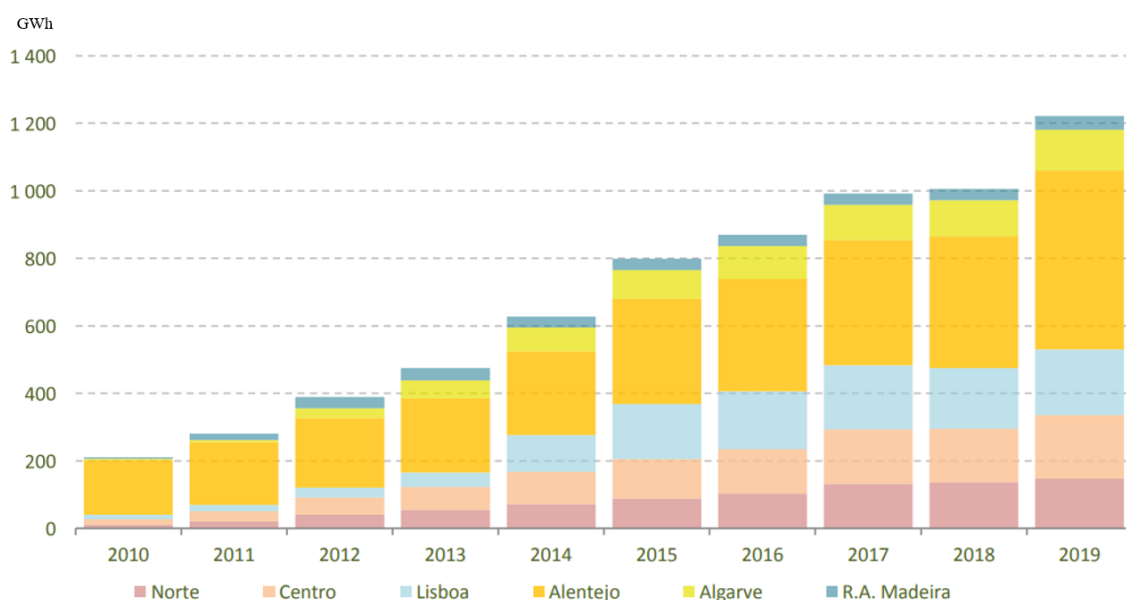


Figura 2.7: Evolução da produção de eletricidade proveniente de solar PV por região em Portugal (Fonte: DGEG, 2019)

## 2.2 Energia Solar

### 2.2.1 Implementação da Energia Solar

A Terra encontra-se constantemente atingida por raios solares, o qual é indispensável para a existência de vida no planeta e representa a maior fonte de energia disponível (Emilio *et al.*, 2012). No entanto, apenas uma pequena fração da radiação solar atinge a superfície terrestre, cerca de  $1 \times 10^{18}$  kWh/ano, devido à distância a que se encontra o planeta Terra, bem como outros condicionantes (GREENPRO, 2004).

A radiação solar que atravessa a atmosfera está condicionada pela presença de gases e partículas líquidas e sólidas que absorvem, difundem ou refletem a energia (Hofierka & Šúri, 2002). A radiação que atinge a superfície da Terra é ainda alterada devido às características do terreno, tais como a elevação, inclinação, orientação e o ensombramento originando fortes gradientes locais (Hofierka & Šúri, 2002).

O ângulo de incidência da radiação solar ótima numa dada superfície é extremamente variável, tendo em conta a criação de azimute e altura solar no decorrer do dia e ano (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008). As oscilações no nível de radiação solar recebido tem implicações ao nível da produção de eletricidade pelo sistema PV (Zahedi, 2011).

O conhecimento da variabilidade geográfica e da dinâmica temporal é essencial para a exploração de energia solar (Šúri *et al.*, 2007), já que a produção de eletricidade a partir de energia solar encontra-se dependente das condições climáticas onde se pretende instalar o sistema PV.

Os países localizados no sul da Europa, mais concretamente na região mediterrânea, como Portugal, Espanha, Itália, Grécia, Malta e Chipre, apresentam o maior potencial de aproveitamento de energia solar (Šúri *et al.*, 2007), como se pode observar na Figura 2.8. Com maior foco em Portugal, existe uma grande potencialidade para produção de eletricidade fotovoltaica em toda a área do país, principalmente nas regiões Centro, Área Metropolitana de Lisboa, Alentejo e Algarve.

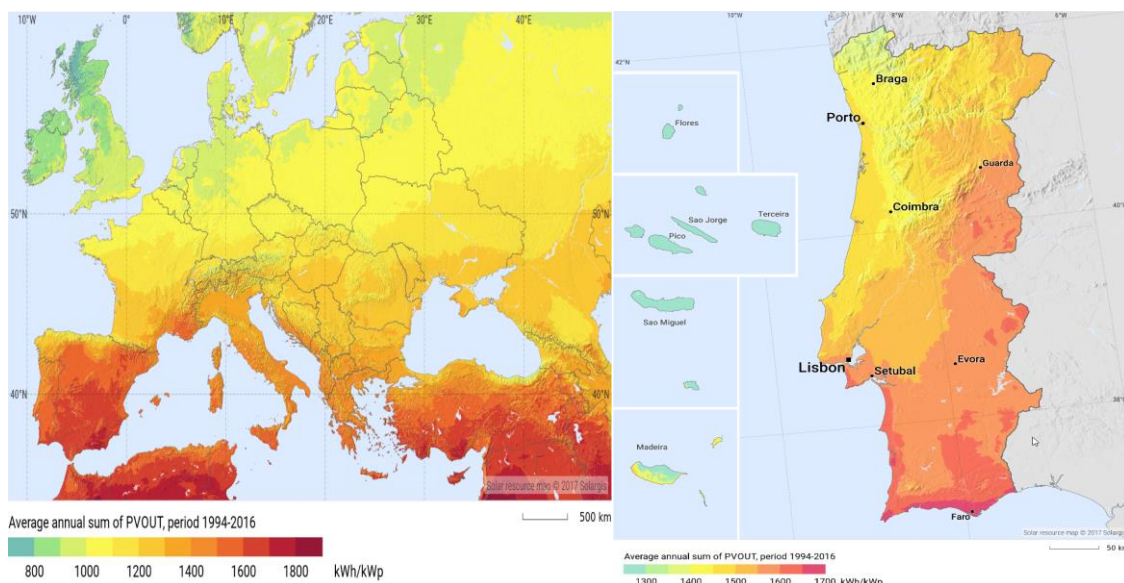


Figura 2.8: Potencial de eletricidade Fotovoltaica na Europa e em Portugal (SOLARGIS, 2017)

## 2.2.2 Sistema solar fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico tem a capacidade de transformar a radiação solar em eletricidade a partir do efeito fotoelétrico. Isto ocorre devido à interação entre os materiais semicondutores nas células fotovoltaicas e a radiação solar que, através da formação de corrente elétrica produz eletricidade (NREL,2003).

Os materiais mais comuns para conversão de energia fotovoltaica são filmes finos, silício monocristalino e multicristalino, designando-se por módulos ou painéis de silício (Yilmaz *et al.* 2015).

A técnica de fabrico do silício monocristalino corresponde à tecnologia mais dispendiosa e antiga, contudo apresenta maior eficiência de conversão solar quando comparada com o silício multicristalino, uma vez que, quanto maior a eficiência maior os custos associados (Atmaja, 2013).

O filme fino é a tecnologia que constitui a menor eficiência de conversão solar, mas apresenta o custo de produção mais baixo, oferece flexibilidade e exibe um bom uso estético (Atmaja, 2013; Bergamasco & Asinari, 2011).

Devido à alta eficiência das células de silícios cristalino, é dada preferência a este tipo de tecnologia (Ciulla *et al.*, 2014). Por esta razão, os módulos de silício cristalino (c-Si), mencionados anteriormente, são responsáveis por sensivelmente 90% do mercado global de solar PV (Ban-Weiss *et al.*, 2013).

A Figura 2.9 demonstra a evolução das eficiências para diversas tecnologias PV atingidas em condições ideais no laboratório NREL, pelo que as eficiências das células encontradas em módulos PV comercialmente disponíveis são inferiores. As tecnologias das células apresentaram um crescimento no nível de eficiência ao longo dos anos. Destaca-se a tecnologia de células de multijunção com quatro ou mais junções (concentrado) que atinge uma eficiência de 47,1%.

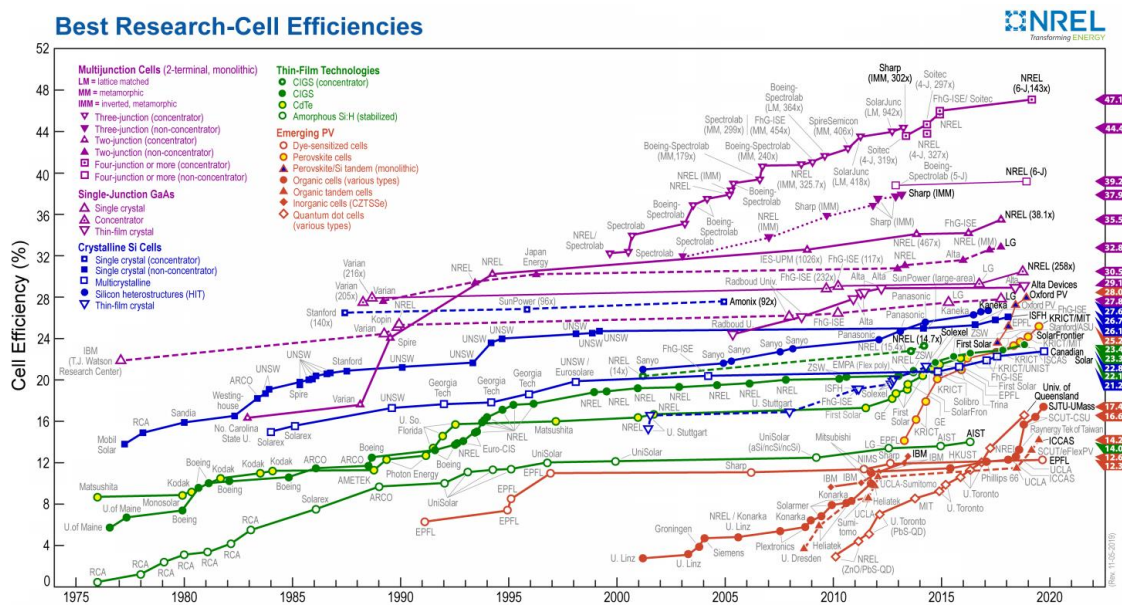


Figura 2.9: Eficiências das tecnologias fotovoltaicas em laboratório (NREL, 2019)

As células fotovoltaicas são apenas um dos constituintes do sistema fotovoltaico. O sistema PV é composto por módulos PV, inversores, cabos, baterias e reguladores de carga (sistema com armazenamento) (GREENPRO, 2004) havendo elementos que variam consoante a categoria a que pertence.

Os diferentes sistemas PV podem ser integrados em duas categorias, sistema ligado à rede (on-grid) e autónomo (off-grid) ou descentralizado. Na primeira categoria, a rede atua como um elemento de armazenamento ideal e promove fiabilidade de sistema enquanto na segunda categoria, são necessárias baterias de armazenamento (Eltawil & Zhengming, 2010; Timilsina *et al.*, 2012).

Os dois sistemas mencionados anteriormente são capazes de lidar com o excesso e défice de produção de eletricidade pelo sistema PV (Ramirez *et al.*, 2015), visto que tanto a bateria como a rede conseguem atenuar esses picos de produção.

Embora os dois sistemas PV tenham aplicabilidade, os sistemas fotovoltaicos ligados à rede são responsáveis por 99% da capacidade instalada de energia fotovoltaica total, sendo o restante associado aos sistemas autónomos (Kouro *et al.*, 2015).

Em termos de rentabilidade, os sistemas PV ligados à rede não necessitam de baterias para armazenamento de eletricidade. Esta característica torna-os mais rentáveis, já que carecem de menor manutenção e de reinvestimento quando comparados com os sistemas autónomos (Kouro *et al.*, 2015).

### 2.2.3 Sistema fotovoltaico ligado à rede

O sistema PV ligado à rede diz respeito a um sistema que se encontra conectado à rede elétrica pública, sendo que estes são ideais para zonas que se situem perto da rede (Muneer *et al.*, 2003), uma vez que, a infraestrutura para distribuição de eletricidade já se encontra montada.

A instalação do sistema PV ligado à rede iniciou-se no topo dos telhados dos edifícios e, posteriormente, integrou-se os sistemas fotovoltaicos em diferentes tipos de prédios como, apartamentos, escolas e centros comerciais (GREENPRO, 2004) considerando que existia um potencial energético que poderia ser aproveitado.

Através da Figura 2.10, que corresponde a um sistema fotovoltaico ligado à rede, observa-se a estrutura do sistema composto por módulos PV, cabos AC-DC, inversor, um mecanismo de proteção e um medidor bidirecional (Universal Automação, 2020).

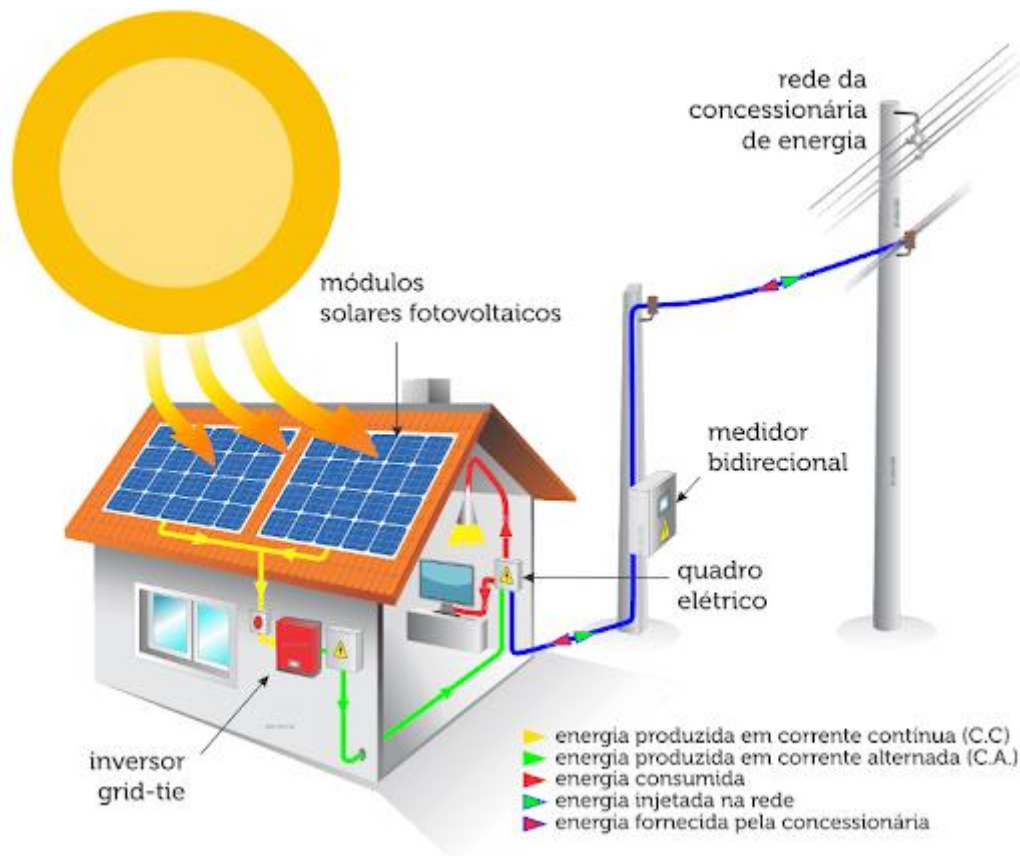


Figura 2.10: Estrutura principal de um sistema fotovoltaico com ligação à rede (Fonte: Universal Automação, 2020)

Considerando que a eletricidade gerada a partir do sistema PV sai em corrente contínua (CC), é necessário um inversor para transformar a eletricidade em corrente alternada (CA) ao nível da tensão da rede (Shukla *et al.*, 2016).

A interligação do sistema PV com a rede tem a vantagem de proporcionar uma utilização de eletricidade mais eficiente produzida pelo sistema PV, já que a rede funciona como uma bateria de capacidade ilimitada (Eltawil & Zhengming, 2010).

O sistema fotovoltaico com ligação à rede não consegue dar resposta ao consumo elétrico em todas as alturas do dia, necessitando, por isso, que a rede forneça eletricidade quando há carência de produção. Contudo, nos períodos do dia onde o sistema consegue exceder o consumo de eletricidade, é injetado na rede o excedente de produção.

Através do sistema PV ligado à rede, o produtor é capaz de recuperar o investimento por duas vias, poupando, ou por autossuficiência ou por remuneração da eletricidade injetada à rede quando ocorre excedente de produção (Colmenar-Santos *et al.*, 2012).

#### 2.2.4 Sistema fotovoltaico autónomo

O sistema PV autónomo é caracterizado pela falta de ligação à rede elétrica pública, funcionando independentemente do serviço da rede. Por isso, o sistema necessita de uma bateria para armazenamento de eletricidade quando existem picos de excesso de produção PV (Kaundinya *et al.*, 2009).

Este sistema costuma ser instalado em locais remotos, longe da rede elétrica pública onde o acesso à rede é impraticável ou economicamente inviável. Nestes casos, o sistema PV autónomo é a solução mais plausível e viável para fornecimento de eletricidade (Muneer *et al.*, 2003; Kaundinya *et al.*, 2009).

Através da Figura 2.11, que corresponde a um sistema PV autónomo, observa-se a estrutura do sistema composto por um painel fotovoltaico, regulador de carga, baterias, inversor autónomo e aparelhos elétricos (NeoSolar, 2020).



Figura 2.11: Princípio de um sistema fotovoltaico autónomo (Fonte: NeoSolar, 2020)

O sistema Fotovoltaico autónomo necessita de um regulador de carga com o localizador de potência máxima (MPPT) (Shen, 2009), uma vez que, desta forma, o regulador protege e garante um maior tempo de vida útil aos acumuladores.

É de notar ainda que os inversores do sistema regularizam a tensão CA, debitando corrente de forma a manter a tensão de armazenamento da eletricidade da bateria (Eltawil & Zhengming 2010) e possibilitando a alimentação de vários equipamentos elétricos.

A capacidade finita da bateria corresponde a uma desvantagem deste sistema, já que quando a produção de eletricidade ultrapassa a capacidade de armazenamento da bateria, esta é desperdiçada (Kaundinya *et al.*, 2009). O elevado custo das baterias é outra desvantagem que o sistema PV autónomo enfrenta (Kaundinya *et al.*, 2009), sendo que os custos das baterias variam entre 500€ e 1000€ dependendo das necessidades de cada caso (Reis, 2019).

Nestes sistemas, a capacidade de armazenamento das baterias encontra-se geralmente desde 0,1 kWh a 100 kWh, ainda que existam alguns sistemas implementados com uma capacidade em MWh (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).

## 2.2.5 O potencial da energia solar fotovoltaica em áreas urbanas

O crescimento das cidades a nível global tem impulsionado o interesse na energia solar fotovoltaica como resposta às necessidades de energia sustentável das populações urbanas.

Os centros urbanos são responsáveis pelo maior consumo energético, mas também por apresentarem um elevado potencial de aproveitamento de energia solar. Os telhados dos edifícios urbanos são um recurso disponível que pode ser aproveitado para produção de energia solar (Byrne *et al.*, 2015), contudo este encontra-se pouco utilizado para fins energéticos.

A tecnologia solar PV no edificado constitui menor impacto ambiental, de uso e ocupação de solo quando comparada com as grandes centrais solares PV (Alsema *et al.*, 2006), já que os sistemas PV encontram-se localizados em áreas que já sofreram alterações pelo Homem. A localização destes em coberturas permite um abastecimento eficiente de energia, considerando que a produção de eletricidade no local de consumo impede as perdas associadas à transmissão e distribuição de energia (Byrne *et al.*, 2015).

Um estudo realizado em Hong Kong sobre o potencial solar PV nos telhados dos edifícios urbanos indicou que os sistemas PV seriam capazes de garantir 14,2% do consumo elétrico anual, bem como mitigar perto de 4 milhões de toneladas de gases com efeito de estufa (Peng & Lu, 2013).

No contexto urbano, a disponibilidade de energia solar é afetada pelo ensombramento causado pela proximidade do edificado e pelo espaço disponível para implementação de sistemas PV, sendo condicionada por características como a altura e dimensão dos edifícios (Mohajeri *et al.*, 2016).

A utilização de imagens de satélite constitui uma alternativa rápida e eficiente para quantificação das áreas disponíveis e determinação da radiação solar para implementação dos sistemas Fotovoltaicos em edifícios (Santos *et al.*, 2014).

Através de projetos como o Sunroof do Google™ consegue-se prever a produtividade dos painéis fotovoltaicos em termos de eletricidade gerada por área do telhado (Figura 2.12), contudo esta ferramenta encontra-se apenas disponível para algumas regiões dos EUA.

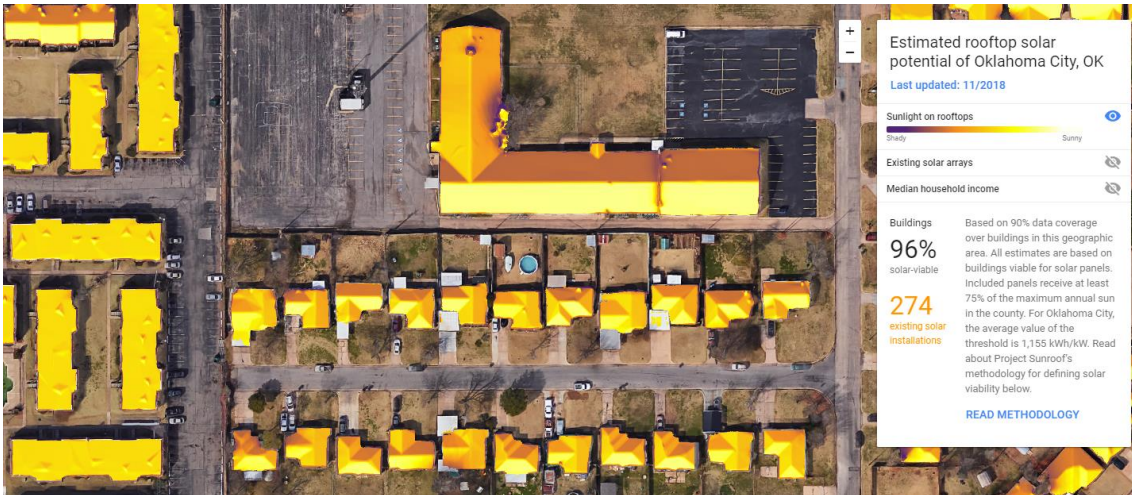


Figura 2.12: Potencial solar urbano para a cidade de Oklahoma City, estimado pelo projeto Sunroof da Google <sup>TM</sup>

O potencial solar das coberturas dos edifícios encontra-se associado à inclinação das coberturas, bem como a orientação no qual o sistema fotovoltaico está inserido. Com o intuito de analisar este potencial, as Figura 2.13 e Figura 2.14 permitem determinar as diversas eficiências dos painéis solares.

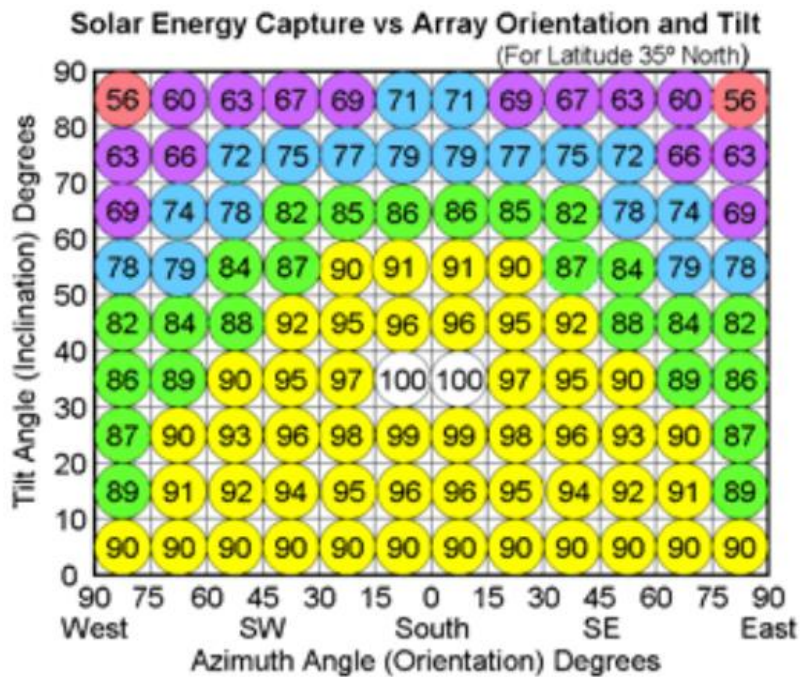


Figura 2.13: Eficiência dos painéis fotovoltaicos de acordo com sua inclinação e orientação na Europa (Electropaedia, 2020)



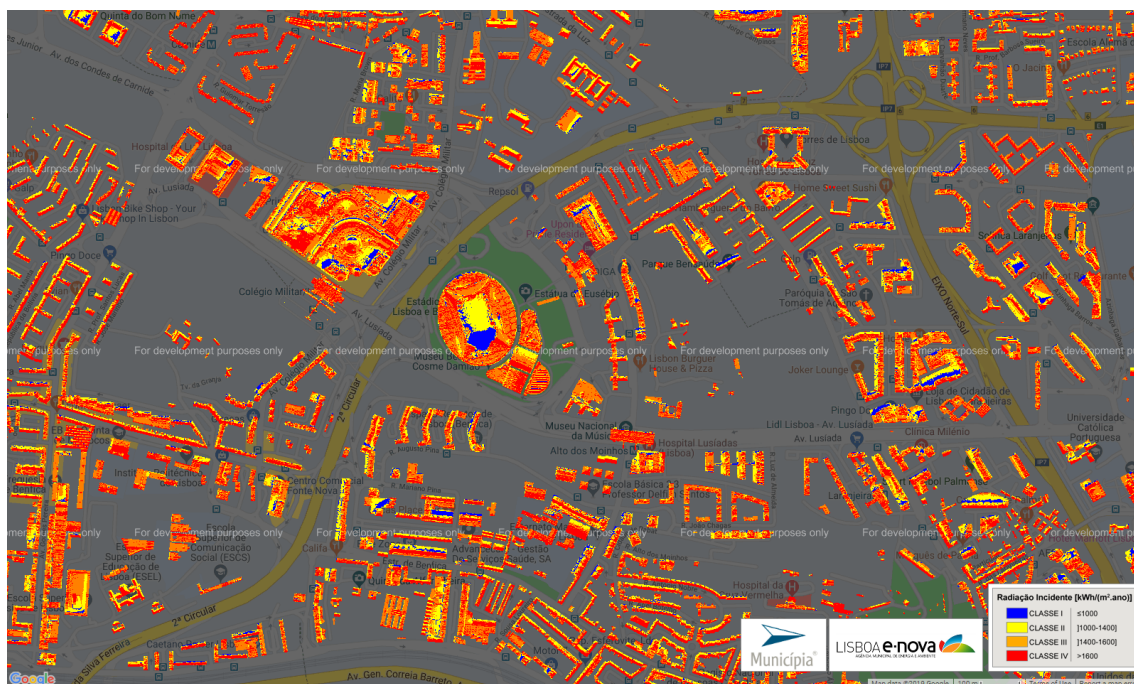


Figura 2.15: Carta do Potencial Solar do concelho de Lisboa (Fonte: adaptado de <https://lisboanova.org/solispotencial-solar-em-lisboa>)

As iniciativas que têm vindo a ser desenvolvidas para várias cidades demonstram a importância que a tecnologia solar pode vir a ter no fornecimento de eletricidade em grande escala nos centros urbanos de forma sustentável.

### 2.2.6 Instalação de painéis PV nas coberturas e potencial técnico

Segundo Azadian & Radzi, o sistema PV consegue ser integrado nos telhados, paredes, varandas ou nos envidraçados (Azadian & Radzi, 2013). Visto que os telhados apresentam poucos usos para além de produção de energia solar térmica, este poderia ser aproveitado para produção de eletricidade por via fotovoltaica (Mainzer *et al.*, 2014).

A implementação dos sistemas PV no edificado usualmente traduz-se em menos de 100 kWp de capacidade elétrica (Nelson *et al.*, 2014), devido a fatores limitantes como a área disponível ou a irradiância recebida.

Com o intuito de determinar a possibilidade de instalação dos painéis PV nas coberturas é necessário realizar uma lista de verificação de especificações da cobertura e do sistema a ser instalado.

Esta lista é constituída pela orientação, inclinação, área disponível, tipo de montagem, sombreamento, dimensão dos cabos, localização do inversor, entre outros (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008). De acordo com as especificações mencionadas anteriormente determina-se o número de módulos PV que se consegue colocar sobre a área da cobertura disponível (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008). Conhecendo o número de módulos é possível calcular a potência geral do sistema fotovoltaico, onde a regra geral indica que 1 kWp corresponde a aproximadamente 10 m<sup>2</sup> de área PV (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008).

Os sistemas PV podem ser incorporados nas coberturas dos estacionamentos, junto aos edifícios comerciais e industriais, considerando que é um espaço que não é aproveitado e pode ser transformado para aproveitamento de energia solar.

Existem países onde os parques de estacionamento dos edifícios já se encontram adaptados com solar PV para produção de eletricidade. Um exemplo desse projeto é o Google Headquarters (Figura 2.16), que através da instalação do sistema PV em 7 telhados dos edifícios da sede e nas 2 coberturas dos estacionamentos automóvel atingiu uma capacidade instalada de 2 MW (Blue Oak Energy, 2019).



Figura 2.16: Projeto Google Headquarters, Califórnia (Blue Oak Energy, 2019)

O potencial técnico do sistema PV diz respeito à quantidade máxima teórica de produção de energia solar numa área, tendo em conta a irradiação que atinge o módulo PV, a eficiência dos mesmos e o espaço disponível (Mainzer *et al.*, 2014).

De forma a determinar o potencial técnico do sistema fotovoltaico é necessário calcular: (a) o potencial físico, ou seja, a radiação solar que pode ser aproveitada pelo sistema PV; (b) o potencial geográfico, isto é, a área dos telhados disponível para instalação do sistema; (c) o potencial técnico do painel, ou seja, a eficiência dos módulos em transformar radiação solar em energia elétrica (Bergamasco & Asinari, 2011).

O potencial técnico do sistema fotovoltaico associado aos telhados dos edifícios é influenciado por fatores como o ângulo das inclinações dos módulos PV, a orientação dos módulos e/ou a orientação do edifício, latitude geográfica, condições climáticas, área disponível e sombreamento (Atmaja, 2013; Izquierdo *et al.*, 2008).

O sombreamento nos telhados dos edifícios é um fator que necessita de especial atenção pois afeta a irradiação solar disponível nos painéis fotovoltaicos diminuindo desta forma a produtividade dos mesmos (Schallenberg-Rodríguez, 2013).

A irradiação solar pode ser considerada como o fator de maior importância para determinação do potencial PV, visto que a irradiação limita a capacidade de produção (Lang *et al.*, 2015).

O potencial económico poderá ser integrado na caracterização da implementação do sistema PV, permitindo uma avaliação técnico-económica mais completa (Izquierdo *et al.*, 2008). Existem quatro fatores que estabelecem o desempenho económico do sistema solar PV: a radiação solar, o custo unitário ou potência instalada (€/kWp), o tempo de vida útil do sistema PV e finalmente o custo operacional que inclui o custo capital (Šúri *et al.*, 2007).

### 2.3 Custo dos sistemas fotovoltaicos

A tecnologia de energia solar entrou num período de queda de custos, onde os preços dos módulos fotovoltaicos diminuíram cerca de 80% desde o final do ano de 2009, permitindo desta forma aumentar a implementação dos sistemas fotovoltaicos e acelerar o progresso tecnológico (IRENA, 2017a).

Globalmente espera-se que durante as três próximas décadas, o custo total de instalação dos sistemas PV continue a diminuir tornando a energia solar fotovoltaica altamente competitiva com diminuições de 304 a 747 €/kW até 2030 e 148 a 431 €/kW até 2050, tendo estes valores têm como base a média de 1084 €/kW em 2018 (IRENA, 2019a).

A diminuição dos custos das matérias-primas, bem como os resultados alcançados da produção dos módulos PV em larga escala, implicaram a descida significativa do custo dos sistemas PV (Peng & Lu, 2013).

As quedas de custos dos sistemas fotovoltaicos encontram-se também associados aos decréscimos dos custos dos inversores e dos custos de montagem, que permitiram a diminuição de cerca de 85% e 70% desde os anos 90, respetivamente (Strupeit & Neij, 2017).

O custo do sistema PV depende de vários fatores, como o tipo de tecnologia utilizado nos módulos fotovoltaicos, o mercado em que se inclui, o custo da instalação, a localização do projeto, bem como a estrutura dos custos dos fabricantes (IRENA, 2012).

Em 2016, o preço médio mundial de um sistema PV residencial com instalação, mas sem custos administrativos ou de ligação à rede, estabeleceu-se nos 1,60 €/Wp variando entre 1,25 e 2,40 €/Wp (Jäger-Waldau, 2016a). No mesmo ano, o preço para um sistema PV comerciais apresentou um intervalo de 0,92 a 1,80 €/Wp (Jäger-Waldau, 2016a).

Em 2016, o preço médio europeu de um sistema fotovoltaico residencial, encontrava-se nos 1,21 €/Wp (Jäger-Waldau, 2016b). Considerando o preço médio e adicionando uma taxa de 0,14 €/Wp para cobrir os restantes custos, um sistema PV instalado ficaria a 1350 €/Wp (Jäger-Waldau, 2016b).

O custo nivelado de eletricidade (LCOE) para a energia solar fotovoltaica já se encontra competitiva quando comparada com todas as fontes de produção de eletricidade, incluindo os combustíveis fósseis (IRENA, 2019a). Espera-se que o seu custo diminua mais até 2050, tornando a energia solar fotovoltaica numa das fontes mais baratas para produção de energia elétrica (IRENA, 2019a).

## 2.4 Poupança de emissões de CO<sub>2</sub>

A sustentabilidade ambiental energética pode ser conseguida com a aplicação de energias renováveis, considerando que têm a capacidade de minimizar as emissões de GEE a nível global e local (IRENA, 2017b), substituindo as fontes fósseis que acarretam uma intensidade de emissão de CO<sub>2</sub> mais elevada.

As tecnologias energéticas podem ter impactes sobre o clima, uma vez que são caracterizadas pela sua intensidade de emissão de CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>-equivalente emitido por unidade de energia produzida (Nelson *et al.*, 2014).

A tecnologia solar PV é uma forma de produção de eletricidade que se encontra com menor dependência de carbono (Nelson *et al.*, 2014), sendo uma solução custo-eficaz para reduzir e mitigar as emissões de GEE (Breyer *et al.*, 2015) emitidas pelo consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis.

O sistema fotovoltaico quando aplicado em massa tem a capacidade de reduzir as potenciais emissões de carbono provenientes de outras fontes de energia (Sun *et al.*, 2013), visto que o solar PV produz pouca ou nenhuma emissão de CO<sub>2</sub> durante o seu tempo de vida útil (Nelson *et al.*, 2014).

Os edifícios são responsáveis por mais de 40% do uso total da energia e 24% do total de emissões de gases com efeito de estufa (Azadian & Radzi, 2013). Por esta razão a implementação de sistemas PV nas coberturas dos edifícios poderá ser uma solução para minimizar as emissões relacionadas com consumo de energia.

A implementação de sistemas fotovoltaicos nos telhados apresenta benefícios ambientais locais, uma vez que ao aproveitar-se um espaço sem utilidade evita-se a aquisição de espaço adicional para instalação dos sistemas PV (Byrne *et al.*, 2015), podendo reduzir os impactes ambientais e económicos.

O tempo de retorno de energia corresponde à quantidade de tempo que uma tecnologia energética leva para fornecer a quantidade de energia necessária para fabricar o equipamento e restante ciclo de vida. O tempo de retorno de GEE refere-se ao tempo que a tecnologia energética demora a poupar a mesma quantidade de emissões que foi gerada durante o fabrico do equipamento e restante ciclo de vida. Peng e Lu (2013) determinaram que o tempo de retorno de energia varia entre 1,9 e 3,0 anos e o tempo de retorno de GEE varia entre 1,4 e 2,1 anos. Em ambos os casos, o tempo de retorno fica muito abaixo do tempo de vida útil do sistema PV que é cerca de 30 anos.

Com o intuito de se ter a noção do caminho para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, foi elaborado o acordo de Paris pelas Nações Unidas (UN) fornecendo diretivas e metas aos vários países.

O acordo de Paris indica que o aumento da temperatura média global tem de se situar abaixo dos 2 °C até 2050 quando comparado com níveis da era pré-industrial e ainda realizar esforços para limitar o aumento de temperatura a 1,5 °C, reconhecendo que isso reduzirá significativamente os riscos e os impactos das mudanças climáticas (APA, 2020).

De forma a atingir os limites impostos pelo acordo de Paris é necessário a redução de emissões de gases com efeito de estufa, neste âmbito a energia solar possui um grande potencial, já que não emite GEE durante a produção de eletricidade e é uma tecnologia de relativo baixo custo (Jäger-Waldau, 2019).

Em 2050 espera-se que a energia solar atinja uma capacidade instalada de 8 500 GW conseguindo assegurar mais de 25% das necessidades elétricas nesse ano. Por esta razão as previsões indicam que o solar PV consiga mitigar cerca de 4,9 Gt CO<sub>2</sub>, correspondendo a 21% (Figura 2.17) do potencial total de redução de emissões de CO<sub>2</sub> das energias renováveis (IRENA, 2019a).

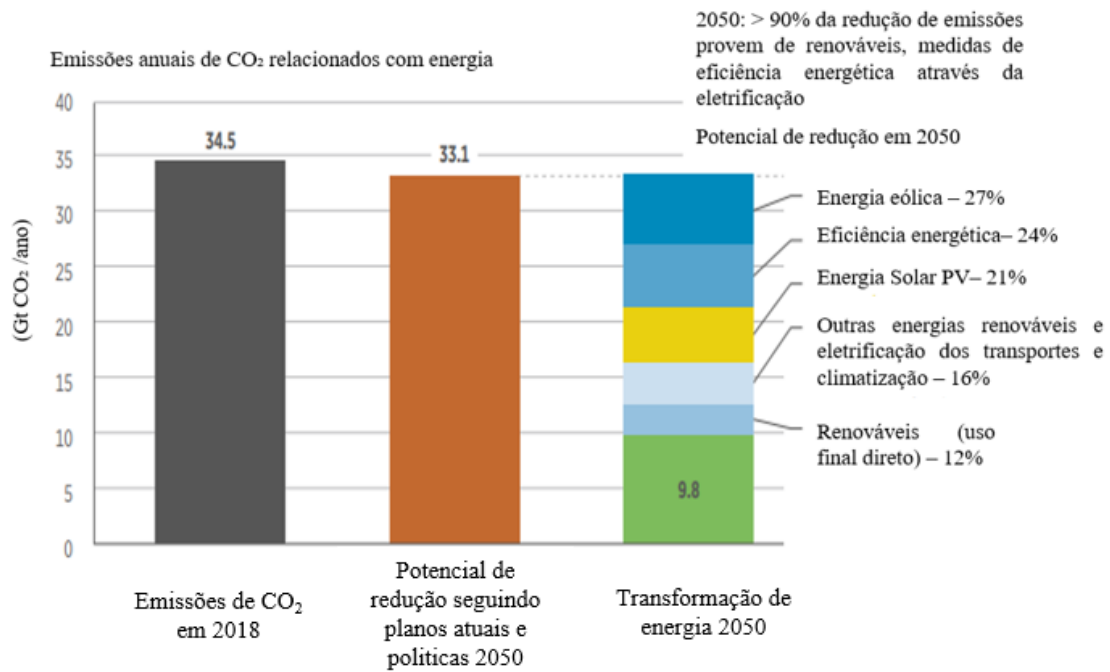


Figura 2.17: A energia solar fotovoltaica contribuiria para 4,9 Gt de reduções de emissões de CO<sub>2</sub> em 2050, representando 21% das reduções gerais de emissões no setor de energia necessárias para atender às metas climáticas de Paris (adaptado de IRENA, 2019a )



### 3 Metodologia

#### 3.1 Área de estudo: A cidade de Santarém

O Município de Santarém encontra-se inserido na região estatística NUTS III da Lezíria do Tejo, sendo também capital de distrito de Santarém. A União de Freguesias da Cidade de Santarém apresenta uma área total de 55 km<sup>2</sup> e uma densidade populacional de 539 hab/km<sup>2</sup> (INE, 2011). O perímetro urbano tem uma área de 25,26 km<sup>2</sup>

Na Figura 3.1, apresenta-se a localização geográfica do distrito, concelho e cidade de Santarém.

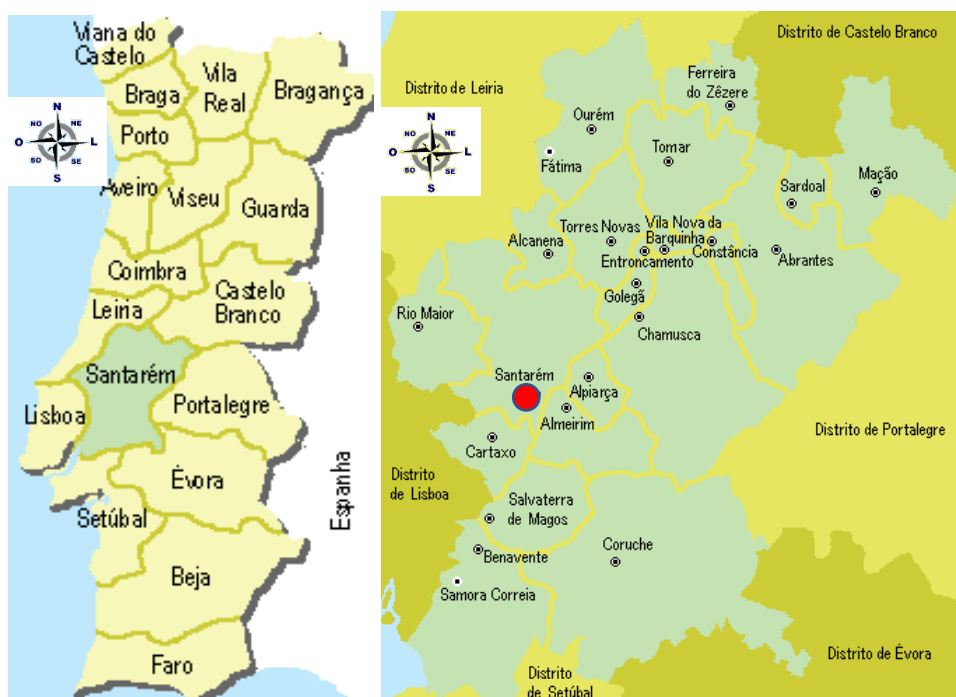


Figura 3.1: Localização geográfica do distrito de Santarém (Adaptado de: VisitarPortugal,2020)

Na Figura 3.2 apresentam-se os limites da União de Freguesias da Cidade de Santarém do perímetro urbano da cidade e da área de estudo analisada na presente dissertação.

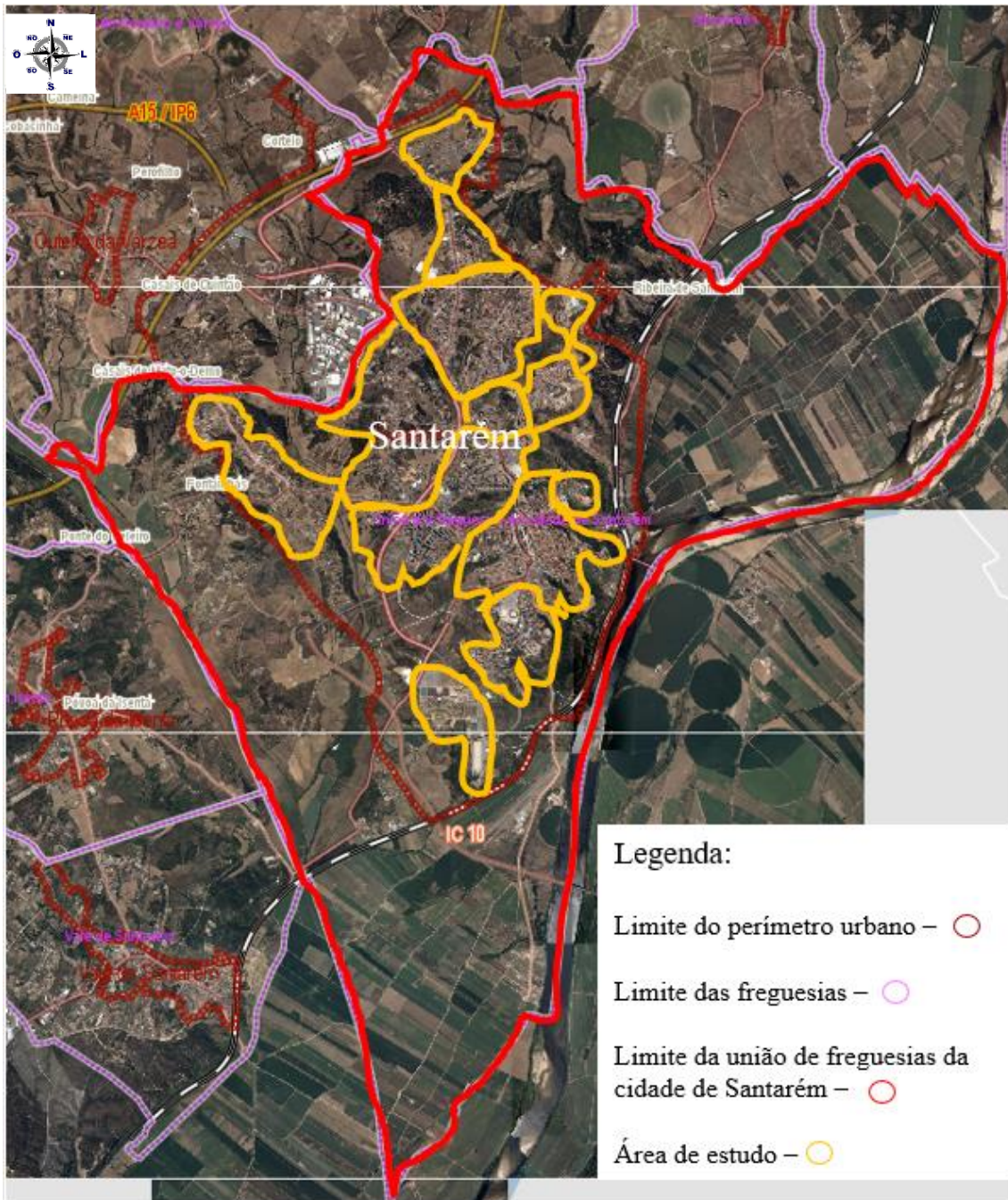


Figura 3.2: Área de estudo da Cidade de Santarém (Adaptado de: CMS, 2020)

O Município de Santarém apresenta um valor de radiação solar global recebida de  $1717,2 \text{ kWh/ano/m}^2$  (PV\*SOL, 2020), o que indica que se encontra acima do nível médio europeu do espectro de produção de eletricidade via sistema PV.

Este Município foi selecionado para o caso de estudo, uma vez que se encontra numa zona geográfica com potencial fotovoltaico e apresenta uma produção de eletricidade proveniente de energia solar relativamente baixa quando comparada com outros distritos (Figura 3.3), sendo, portanto, uma solução renovável por explorar.

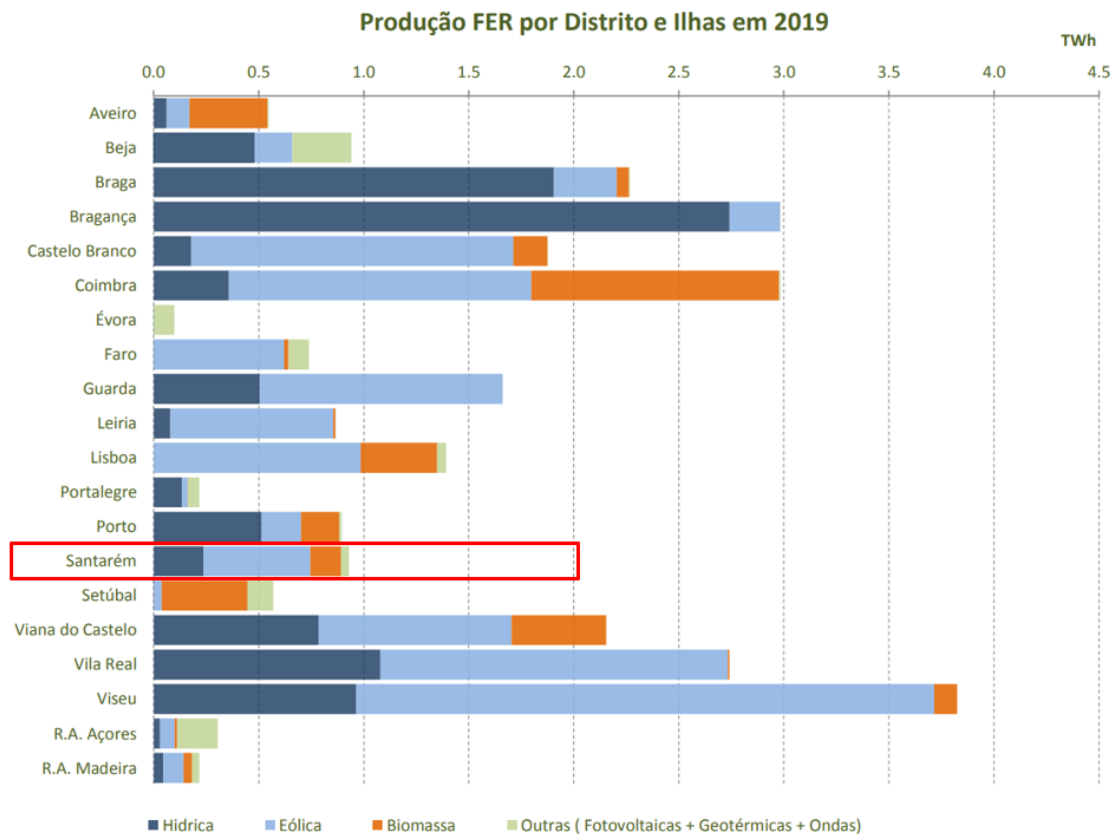


Figura 3.3: Produção de eletricidade por fonte de energia renovável (Adaptado de DGEG, 2020)

### 3.2 Abordagem geral

A cidade de Santarém foi selecionada como caso de estudo, já que a câmara municipal de Santarém tinha interesse em estudar o potencial fotovoltaico disponível nos edifícios.

Neste capítulo serão abordadas as metodologias que foram seguidas de forma a avaliar o potencial técnico dos sistemas PV e a respetiva mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> dos edifícios selecionados no município de Santarém.

Os edifícios selecionados foram divididos em duas categorias, edifícios de bairro e grandes edifícios. Os edifícios de bairro dizem respeito ao edificado que se encontra dentro das áreas de amostragem, aglomerado e em disposição de bairro, enquanto os grandes edifícios são os edifícios que se distinguem dos restantes devido à sua dimensão e área.

A metodologia é constituída por oito etapas, (Figura 3.4), onde a primeira etapa consiste na delimitação, a segunda etapa traduz-se no levantamento de informação sobre os edifícios, a terceira resume-se à classificação dos edifícios por tipologias de uso e consumo de eletricidade nos mesmos, a quarta etapa consiste no cálculo dos fatores influentes na captação de luz solar, a quinta etapa diz respeito à determinação da área útil das coberturas para instalação de sistemas PV, a sexta etapa traduz-se no cálculo do potencial fotovoltaico, a sétima etapa resume-se ao cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> e mitigação através da produção de eletricidade por via fotovoltaica e finalmente na oitava etapa realizou-se uma análise de sensibilidade e elaboração de cenários.

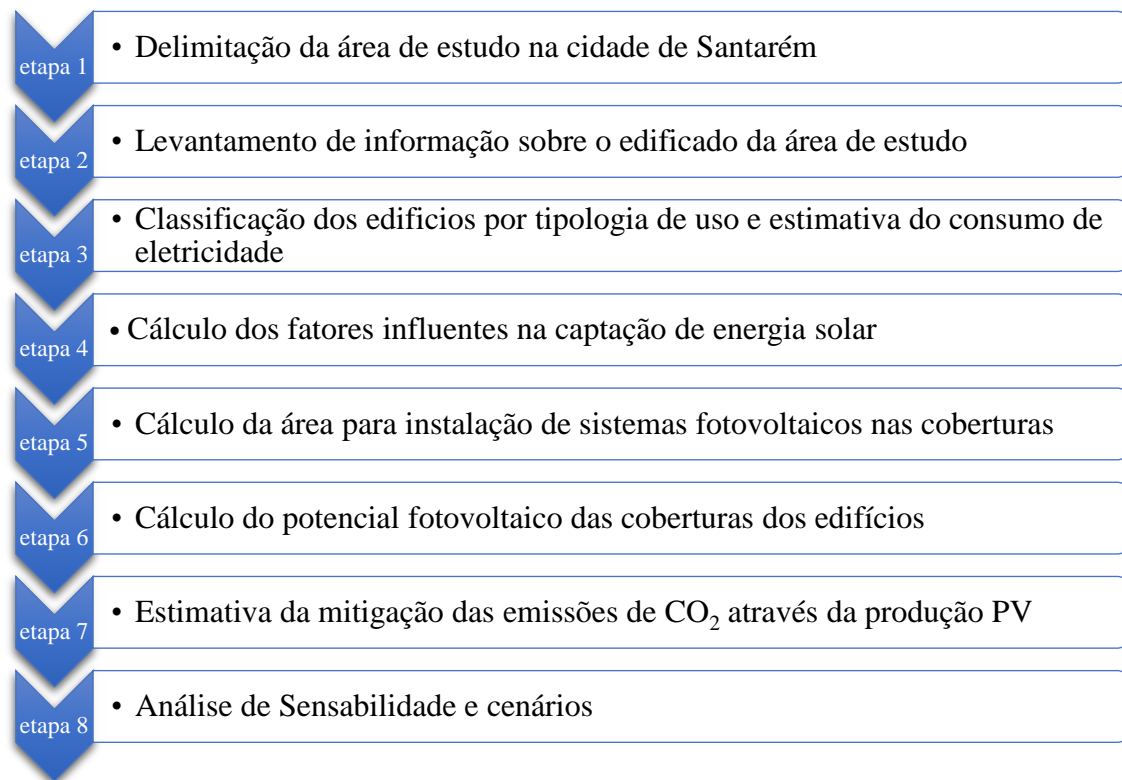


Figura 3.4: Estrutura metodológica

Na etapa 8, a análise de sensibilidade consistiu na determinação do impacto da instalação dos coletores solares térmicos e da aplicação de medidas de eficiência energética na capacidade de produção de eletricidade e no consumo de eletricidade, respetivamente. Em relação aos cenários, foi feito um estudo preliminar de que forma a aplicação de comunidades energéticas de consumidores-produtores poderão afetar a viabilidade económica da instalação de sistemas fotovoltaicos.

### 3.3 Delimitação da área de estudo

A delimitação da área de estudo foi efetuada recorrendo ao programa Google Earth, onde se considerou características como a localização geográfica, idade de construção dos edifícios e limites territoriais das freguesias, com essas características selecionaram-se 13 zonas urbanas (ZU) distintas na cidade de Santarém (Figura 3.5). O conjunto da área de estudo tem uma área de 9,68 km<sup>2</sup>.

Com o intuito de caracterizar o edificado presente na área de estudo, procedeu-se à realização de amostragens aleatórias sobre as zonas urbanas. Estas amostragens correspondem a uma área de 5% da área total de cada uma das 13 ZU, com a exceção da ZU 4 que foi tratada na sua totalidade considerando que o número de edifícios era reduzido. As áreas de amostragens referidas anteriormente apresentam áreas que variam entre 1 e 3 hectares, representadas na Figura 3.5.

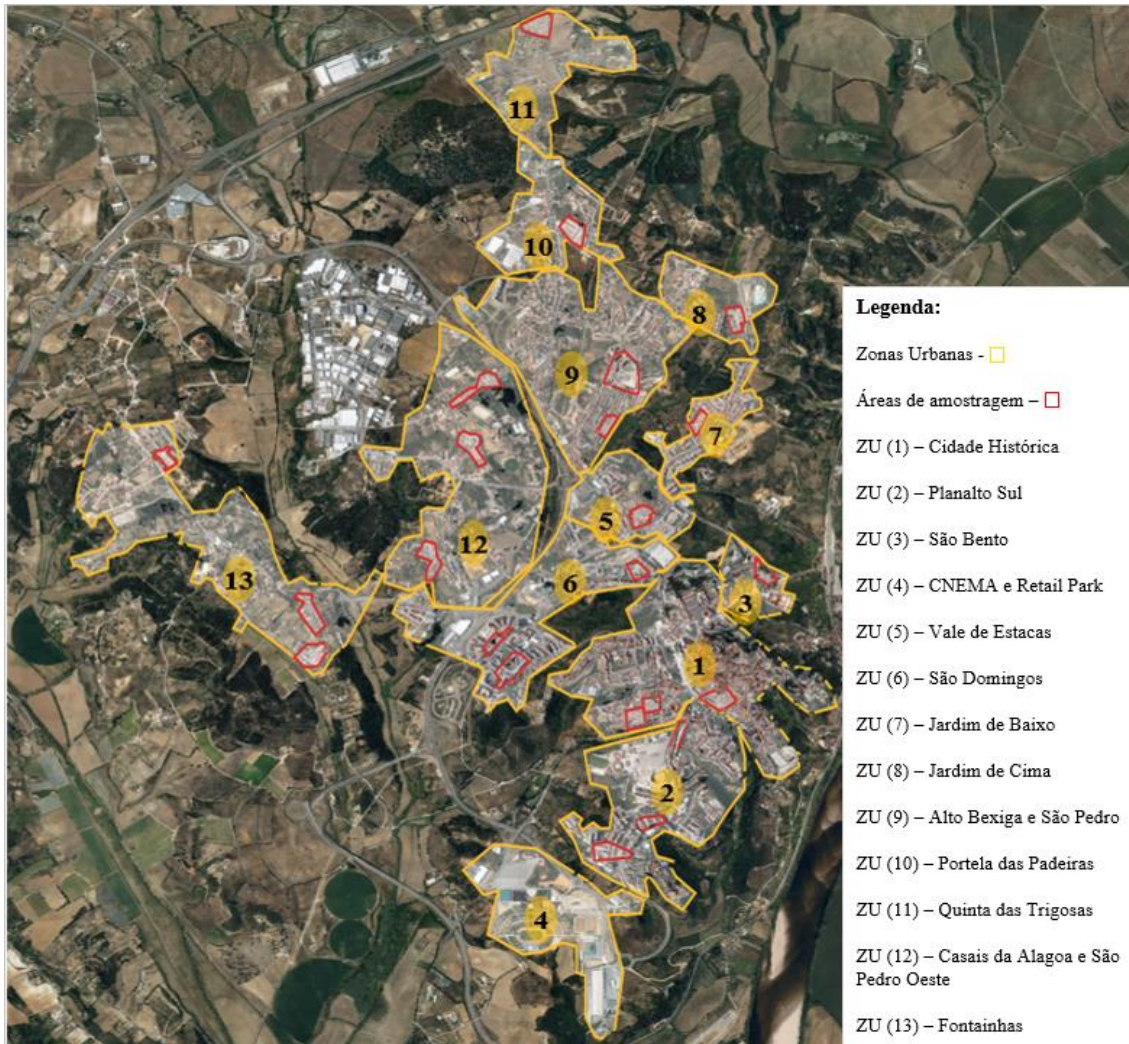


Figura 3.5: Zonas urbanas e respetivas áreas de amostragem

### 3.4 Levantamento de informação sobre o edificado da área em estudo

A informação relevante sobre os edifícios da área em estudo foi obtida através do acesso a um site da Câmara Municipal de Santarém com mapas de informação geográfica denominado de niuGIS – Consulta aos PMOT (Figura 3.6) e através do Google Earth.

O Google Earth foi utilizado para obter informação sobre o número total de edifícios, e as dimensões, número e tipos de coberturas, por forma a complementar a informação proveniente do niuGIS, nomeadamente, quanto a tipologias de uso, áreas de implantação e número de andares.

A informação que poderia ser obtida em ambas as ferramentas, foram comparadas de forma a conseguir uma maior validade da informação recolhida.

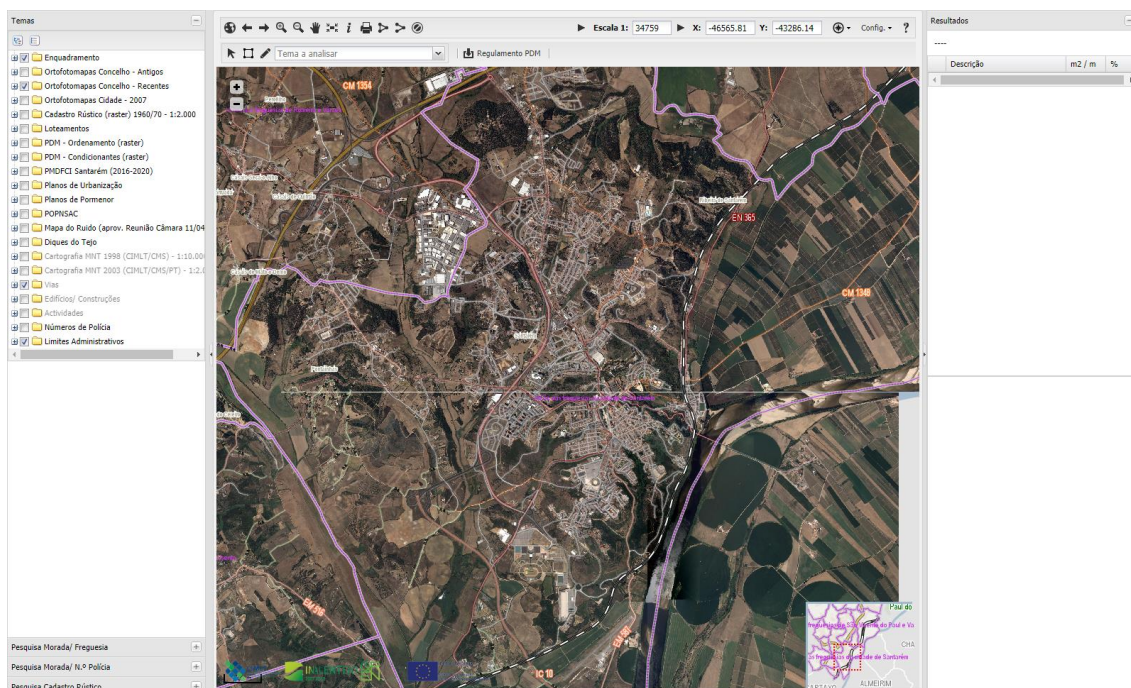


Figura 3.6: niuGIS - Consulta aos PMOT

### 3.5 Classificação dos edifícios por tipologia de uso e estimativa do consumo de eletricidade

A caracterização por tipologia dos edifícios foi realizada de acordo com as informações disponíveis no niuGIS e adaptado de modo a obter uma caracterização mais concisa possível. Desta forma procedeu-se à classificação dos edifícios em tipologias de uso, onde os fatores como, o horário de funcionamento, a presença de equipamentos de refrigeração ou funcionalidades dos edifícios foram utilizados para conseguir um melhor critério de classificação.

Elaborou-se uma tabela com 15 tipologias de uso na qual foram atribuídos códigos para simplificar a leitura. Na Tabela 3.1 encontram-se disponíveis as tipologias de uso aplicadas, aos edifícios de bairro e grandes edifícios presentes nas 13 zonas urbanas. É de notar ainda que se encontra descrito os diversos edifícios que se encontram abrangidos pelos códigos.

Tabela 3.1: Classificação dos edifícios por tipologia de uso

Código	Designação	Tipologia de uso
R	Residencial	Estritamente residencial
C	Comércio	Comércio a retalho geral
F	comércio Frio	Comércio alimentar com armazenagem fria
H	Hotelaria	Hotéis
A	restAuração	Restaurantes, cafés, bares
G	Grandes superfícies	Hipermercados e centros comerciais
P	serviços Públicos	Administração pública, tribunais, polícia e bombeiros
S	Serviços	Serviços diversos: escritórios, telecomunicações, bancos e correios
U	saúde	Hospitais, clínicas de saúde, farmácias e centros de saúde
E	Educação	Escolas e universidades
D	Desporto e cultura	Pavilhões multiusos, piscinas e salas de espetáculos
I	Igrejas	Igrejas
RMx	Residenciais Mistos	Edifícios de uso misto, residencial e outros
CMx	Comerciais Mistos	Edifícios de uso misto, comercial e outros
Mx	edifícios Mistos	Edifícios com múltiplos usos

Em relação à estimativa do consumo de eletricidade consoante as tipologias de uso, foram construídas duas tabelas (Tabela 3.2 e Tabela 3.3) onde se encontram descritos os consumos típicos de eletricidade dos edifícios de bairro e dos grandes edifício.

Tabela 3.2: Consumo de eletricidade dos edifícios de bairro consoante a tipologia

Tipologia de usos para edifícios de bairro	Consumo de eletricidade médio por família ou estabelecimento (kWh/ano)	Referências
R <sup>0</sup>	3493	(INE, 2011)
R <sup>0</sup>	3221	(INE, 2017)
R <sup>1</sup>	2982	(Fonseca, 2016)
R <sup>2</sup>	1534	(Fonseca, 2016)
C	2300	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
F	28400	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
A	15500	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
P	3000	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
S	3200	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
U	2500	(Franco, 2017)
E	3200	(Sequeira & Joanaz Melo, 2020)
D	13000	(Fiaschi,2012)

<sup>0</sup> Consumo médio por família no Município de Santarém

<sup>1</sup> Consumo de uma família típica

<sup>2</sup> Consumo de uma família ecológica (com equipamentos apenas da classe mais eficiente e um perfil de utilização racional de energia)

Tabela 3.3: Consumo de eletricidade dos edifícios de grandes dimensões consoante a tipologia

Tipologia de usos para grandes edifícios	Consumo de eletricidade por área (kWh/(m <sup>2</sup> .ano))	Referências
C	48	(Correia,2017)
F	403	(kolokotroni,2019)
H	745	(Cabello,2016)
A	278	(NAPE SA, 2014)
G	454	(Lam, 2003)
P	90	(Oliver-Solà, 2013)
S	48	(Correia,2017)
U	545	(Bawaneh, 2019)
E	51	(Lourenço, 2014)
D	165	(Oliver-Solà, 2013)
I	23	(Kamaruzzaman, 2006)

Procedeu-se ao cálculo da estimativa de população em cada zona urbana, através da contagem de residentes nas áreas de amostragem e posteriormente extrapolou-se para as respetivas ZU (equação (1)).

$$Pop_z = \frac{Pop_a}{Pop_{at}} \times Pop_c \quad (1)$$

Onde:

Pop<sub>z</sub> – População residente na zona urbana (hab);

Pop<sub>a</sub> – População residente em cada área de amostragem (hab);

Pop<sub>at</sub> – População residente na totalidade das áreas de amostragem (hab);

Pop<sub>c</sub> – População residente na cidade de Santarém (hab).

O cálculo da estimativa do consumo de eletricidade nas diferentes áreas de estudo foi realizado em duas partes:

- 1) Calcular o consumo de eletricidade nas diversas amostras e estimar o seu consumo para a totalidade da área de estudo;
- 2) Calcular o consumo de eletricidade nos edifícios de grandes dimensões e adicionar ao consumo determinado na primeira parte.

De forma a calcular-se o consumo de eletricidade total na área de estudo, equação (2), foi necessário proceder-se ao cálculo dos consumos dos edifícios de bairro e edifícios de grandes dimensões.

$$E_T = E_{FG} + E_{FB} \quad (2)$$

Onde:

E<sub>T</sub> – Consumo total de eletricidade dos edifícios na área de estudo (MWh/ano);

E<sub>FG</sub> – Consumo de eletricidade dos edifícios de grandes dimensões (MWh/ano);

E<sub>FB</sub> – Consumo de eletricidade dos edifícios de bairro (MWh/ano);

Os consumos de eletricidade, na amostragem, dos edifícios de bairro foram determinados recorrendo à equação (3), onde os edifícios residenciais, residenciais mistos e comerciais mistos foram obtidos aplicando as equações (4), (5) e (6), respetivamente.

$$E_{FB} = \sum_{z=1}^y \left( \left( \frac{N_x}{N_a} \right) \times N_{tz} \times E_x \right) + E_{F0} + E_{F1} + E_{F2} \quad (3)$$

Onde:

- $E_{FB}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios de bairro (MWh/ano);
- $N_x$  – Número de edifícios da tipologia de uso x na amostragem;
- $N_a$  – Número total de edifícios na amostragem;
- $N_{tz}$  – Número total de edifícios por zona urbana;
- y – Número de zonas urbanas na cidade de Santarém;
- $E_x$  – Consumo de eletricidade da tipologia x, exceto a tipologia residencial (MWh/ano) (Tabela 3.2);
- $E_{F0}$  – Consumo de eletricidade dos edifícios residenciais (MWh/ano);
- $E_{F1}$  – Consumo de eletricidade dos edifícios residenciais mistos (MWh/ano);
- $E_{F2}$  – Consumo de eletricidade dos edifícios comerciais mistos (MWh/ano);

$$E_{F0} = \sum_{z=1}^y \left( \frac{Pop_z}{2,5} \times f_{rz} \times E_R \right) \quad (4)$$

Onde:

- $E_{F0}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios residenciais (MWh/ano);
- $Pop_z$  – População residente por zona urbana;
- 2,5 – Número médio de habitantes por família em Santarém (hab);
- $f_{rz}$  – Fração da tipologia residencial na amostragem por zona urbana (%);
- y – Número de zonas urbanas na cidade de Santarém;
- $E_R$  – Consumo de eletricidade de uma família típica (MWh/ano) (Tabela 3.2);

$$E_{F1} = \sum_{z=1}^y \left( \left( \frac{Pop_z}{2,5} \times f_{rsz} \times E_R \right) + \sum_{x=1}^{m1} (N_{rsz} \times f_{zx} \times E_x) \right) \quad (5)$$

Onde:

- $E_{F1}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios residenciais mistos (MWh/ano);
- $Pop_z$  – População residente por zona urbana;
- 2,5 – Número médio de habitantes por família em Santarém (hab);
- $f_{rsz}$  – Fração da tipologia residenciais mistos na amostragem por zona urbana (%);
- y – Número de zonas urbanas na cidade de Santarém;
- $E_R$  – Consumo de eletricidade de uma família típica (MWh/ano) (Tabela 3.2);
- m1 – Número de tipologias encontradas nos edifícios residenciais mistos;
- $N_{rsz}$  – Número de edifícios residenciais mistos por zona urbana;
- $f_{zx}$  – Fração da tipologia m1 na amostragem por zona urbana (%);
- $E_x$  – Consumo de eletricidade do pequeno estabelecimento de tipologia x (MWh/ano) (Tabela 3.2);

$$E_{F2} = \sum_{z=1}^y \left( \left( \frac{N_{csz}}{N_z} \times N_t \times E_c \right) + \sum_{x=1}^{m2} (N_{csz} \times f_{zx} \times E_x) \right) \quad (6)$$

Onde:

$E_{F2}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios comerciais mistos (MWh/ano);

$N_{csz}$  - Número de edifícios comerciais mistos por zona urbana;

$N_z$  – Número total de edifícios na zona urbana;

$N_t$  – Número total de edifícios na cidade de Santarém;

$E_c$  – Consumo de eletricidade dos edifícios comerciais (MWh/ano) (Tabela 3.2);

$m2$  – Número de tipologias encontradas nos edifícios comerciais mistos;

$N_{csz}$  – Número de edifícios comerciais mistos por zona urbana;

$f_{zx}$  – Fração da tipologia  $m2$  na amostragem por zona urbana (%);

$E_x$  – Consumo de eletricidade da tipologia  $x$  (MWh/ano) (Tabela 3.2);

Em relação ao cálculo dos consumos de eletricidade dos edifícios de grandes dimensões foi utilizada a equação (7) e os consumos dos edifícios mistos foram calculados pela equação (8).

$$E_{FG} = (N_x \times EU_x) + E_{F3} \quad (7)$$

Onde:

$E_{FG}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios de grandes dimensões (MWh/ano);

$N_x$  – Número de edifícios com tipologia de uso  $x$ ;

$EU_x$  – Consumo de eletricidade da tipologia  $x$  (MWh/( $m^2$ .ano)) (Tabela 3.3);

$E_{F3}$  – Consumo de eletricidade dos edifícios comerciais (MWh/ano);

$$E_{F3} = \sum_{x=1}^m EU_x \times O_x \times A \quad (8)$$

Onde:

$E_{F3}$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios mistos (MWh/ano);

$m$  – Número de tipologias;

$EU_x$  – Consumo de eletricidade unitário da tipologia  $x$  (MWh/( $m^2$ .ano)) (Tabela 3.3);

$O_x$  – Quota parte do uso  $x$  no edifício (%);

$A$  – Área total do edifício ( $m^2$ ).

### 3.6 Cálculo dos fatores influentes na captação de energia solar

Foram realizadas medições da altura e da base das coberturas dos edifícios, através do Google Earth, para posterior utilização na equação (9) de forma a obter o ângulo de inclinação das coberturas (Figura 3.7). É de notar que a medição dos ângulos das coberturas dos edifícios de 4 águas foi efetuada segundo a média de ocorrência dos ângulos das coberturas de edifícios da zona em que se encontrava.

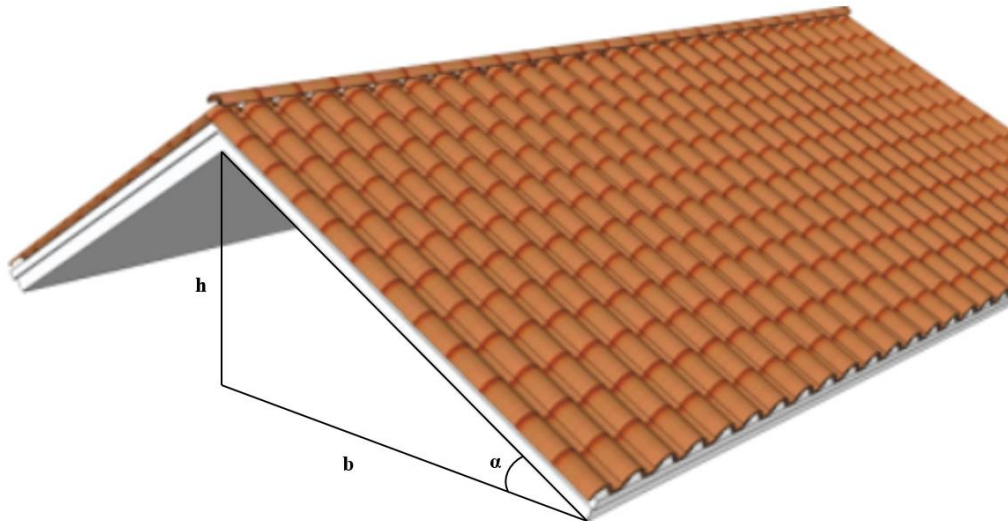


Figura 3.7: Representação esquemática da medição do ângulo das coberturas de duas e três águas (Adaptado de: pngimage, 2020)

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{h}{b} \right) \quad (9)$$

Onde:

$\alpha$  – Ângulo de inclinação das coberturas dos edifícios ( $^{\circ}$ );

h – Altura das coberturas dos edifícios (m);

b – Base das coberturas dos edifícios (m).

Com os dados obtidos pela equação (9), foi possível a elaboração de uma tabela com o número de edifícios por gamas de inclinações, as quais se apresentam na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Gamas de inclinação nas coberturas dos edifícios

Inclinação das coberturas
[0 $^{\circ}$ - 5 $^{\circ}$ [
[5 $^{\circ}$ - 10 $^{\circ}$ [
[10 $^{\circ}$ - 15 $^{\circ}$ [
[15 $^{\circ}$ - 20 $^{\circ}$ [
[20 $^{\circ}$ - 25 $^{\circ}$ [
[25 $^{\circ}$ - 30 $^{\circ}$ [
$\geq 30^{\circ}$

Procedeu-se ao cálculo da dimensão média da sombra do edifício, equação (10), que corresponde à área ocupada pela sombra causada por um edifício mais alto que se encontra a norte e adjacente a outros edifícios com menores alturas. Este cálculo foi realizado considerando que o valor padrão da altura solar na terra para uma massa de ar de 1,5 seria de 41,8 $^{\circ}$  (GREENPRO, 2004).

$$d_s = \frac{H_2 - H_1}{\tan(42^\circ)} \quad (10)$$

Onde:

- $d_s$  – Dimensão média da sombra do edifício (m).
- $H_2$  – Altura do edifício que causa ensombramento (m)
- $H_1$  – Altura do edifício que é ensombrado (m)
- $c$  – Comprimento da cobertura do edifício (m);

Uma vez determinado a dimensão média da sombra do edifício, procedeu-se ao cálculo do fator de sombreamento dos edifícios adjacentes sobre as coberturas (equação (11)).

$$F_s = \frac{c}{d_s} \quad (11)$$

Onde:

- $F_s$  – Fator de sombreamento dos edifícios adjacentes sobre as coberturas;
- $c$  – Comprimento da cobertura do edifício (m);
- $d_s$  – Dimensão média da sombra do edifício (m).

De forma a obter informação relativa à orientação das coberturas dos edifícios, foi determinado o número de edifícios que apresentava uma das seis orientações que se consideraram, tendo sido colocadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Orientações das coberturas dos edifícios que foram consideradas

Orientação
N-S
NE-SO
E-O
SE-NO
N-S-E-O
Horizontal

### 3.7 Cálculo da área fotovoltaica para instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas

Nesta etapa, foi realizada uma estimativa da área de implantação total, equação (12), e posteriormente, determinada a área bruta das coberturas dos edifícios, equação (14). No cálculo da área de implementação total foi aplicado um fator de implementação destinado a retificar a proporção de edifícios na zona urbana e considerando os edifícios nas áreas de amostragem, equação (13).

$$A_{zi} = (A_T - A_{se} - A_{iG}) \times f \quad (12)$$

Onde:

- $A_{zi}$  – Área de implantação dos edifícios na zona urbana (m<sup>2</sup>);
- $A_T$  – Área total da zona urbana (m<sup>2</sup>);
- $A_{se}$  – Área sem edificado (m<sup>2</sup>);
- $A_{iG}$  – Área de implantação dos grandes edifícios na zona urbana (m<sup>2</sup>);
- $f$  – Fator de implantação.

$$f = \frac{A_{ai}}{A_{at}} \quad (13)$$

f – Fator de implantação;

$A_{ai}$  – Área de implantação dos edifícios presentes na área de amostragem ( $m^2$ );

$A_{at}$  – Área territorial na área de amostragem ( $m^2$ ).

$$A_{Tb} = A_{zi} \times \left( O_p + \left( O_i \times \frac{1}{\cos(\alpha)} \right) \right) \quad (14)$$

Onde:

$A_{Tb}$  – Área total bruta da cobertura dos telhados dos edifícios ( $m^2$ );

$A_{zi}$  – Área total de implantação dos edifícios na zona urbana ( $m^2$ );

$O_p$  – Fração de ocorrência de coberturas planas nos edifícios (%);

$O_i$  – Fração de ocorrência de coberturas inclinadas nos edifícios (%);

$\alpha$  – Ângulo de inclinação das coberturas dos edifícios ( $^\circ$ ).

O coeficiente de cobertura do solo (GCR), que tem em consideração o sombreamento proveniente dos painéis fotovoltaicos adjacentes, corresponde ao fator de utilização da área disponível e varia consoante a inclinação das coberturas (Byrne *et al*,2015). O autor menciona ainda que os sistemas PV necessitam de uma área de serviço (AS) para acesso e manutenção dos mesmos (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Ground Coverage Ratio (GCR), Área de serviço (SA) e Área útil em função da inclinação das coberturas (adaptado de Byrne *et al*, (2015))

Inclinação ( $^\circ$ )	GCR (%)	AS (%)	Área útil (%)
0	100	20	80
5	80	17	63
10	66	13	53
15	57	10	47
20	51	7	44
25	46	3	43
30	42	0	42

Na Figura 3.8 encontra-se esquematizado as fórmulas de cálculo do coeficiente de cobertura do solo, bem como a disposição dos painéis fotovoltaicos em coberturas inclinadas.

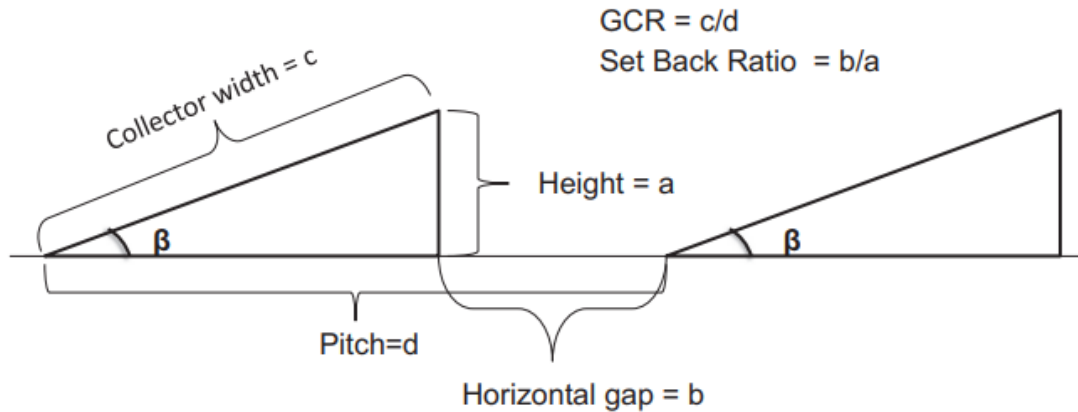


Figura 3.8: Disposição de módulos fotovoltaico para cálculo do GCR em coberturas inclinadas (Fonte: Byrne et al., 2015)

Após o cálculo da área bruta das coberturas dos edifícios e da proporcionalidade da área útil consoante a inclinação das coberturas procedeu-se então ao cálculo da área útil das coberturas, equação (15).

$$A_{Tu} = A_{Tb} \times K_x \times O_y \quad (15)$$

Onde:

$A_{Tu}$  – Área total útil da cobertura dos edifícios ( $m^2$ );

$K_x$  – Fração de área útil das coberturas segundo a inclinação (%) (Byrne et al, 2015);

$O_y$  – Fração de ocorrência nos edifícios, de acordo com a inclinação das coberturas (%) ( $0^\circ$  a  $30^\circ$ );

Por fim, a área de implementação PV foi obtida através da aplicação da equação (16) (Karteris et al., 2013).

$$A_{Tpv} = A_{Tu} \times F_s \quad (16)$$

Onde:

$A_{Tpv}$  – Área total de implementação PV ( $m^2$ );

$A_{Tu}$  – Área total útil da cobertura dos edifícios ( $m^2$ );

$F_s$  – Fator de sombreamento dos edifícios.

É de notar ainda que, para o cálculo da área total de implementação PV, foi utilizado toda a área disponível das coberturas dos edifícios independente da sua orientação.

Adicionalmente foi determinado a área de implementação PV dos parques de estacionamento de grandes dimensões nas zonas 2 e 4, onde os lugares de estacionamento do parque de estacionamento seriam aproveitados para colocação de painéis fotovoltaicos em cima de uma estrutura de forma a aproveitar o potencial.

### 3.8 Cálculo do potencial fotovoltaico das coberturas dos edifícios

Na etapa 6 foram determinadas e calculadas a potência a instalar e a capacidade de produção de eletricidade pelos painéis PV nas coberturas dos edifícios.

O painel fotovoltaico selecionado para realizar os cálculos foi o Sun power SPR-225 considerando que apresenta, uma boa quota de mercado, preços competitivos e 25 anos de garantia (energysage, 2020). As características do mesmo encontram-se dispostas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Características do painel fotovoltaico selecionado

Modelo	Tipo de célula	Eficiência (%)	Área do painel (m <sup>2</sup> )	Potência nominal STC (W)	Potência pico (W/m <sup>2</sup> )	Vida útil 80% (anos)*	Custo (€)
Sun power SPR-225	Silício monocristalino	18,1%	1,244	225	180,8	25	472,5

\*período a que a potência nominal diminui para 80% da potência total STC – Teste padrão de fábrica (do inglês *standart test control*)

O cálculo da potência a instalar foi realizada segundo a equação (17) (Hartmann, 2018).

$$P_{Ti} = A_{Tpv} \times P_p \times 10^{-6} \quad (17)$$

Onde:

$P_{Ti}$  – Potência a instalar total (MW);

$A_{Tpv}$  – Área total de implementação PV (m<sup>2</sup>);

$P_p$  – Potência pico do painel fotovoltaico selecionado (W/m<sup>2</sup>).

A radiação solar recebida nas coberturas dos edifícios teve em consideração a percentagem da radiação que atinge a cobertura segundo a orientação e inclinação da mesma (Figura 3.9), a qual foi obtida através da adaptação das Figuras 2.13 e 2.14.

Inclinação (°)	-180	-165	-150	-135	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
[80-90[	29	30	35	40	45	49	55	61	66	72	76	77	76	77	76	72	66	61	55	49	45	40	35	30	29
[70-80[	32	34	38	42	49	55	63	67	74	84	85	85	85	85	85	84	74	67	63	55	49	42	38	34	32
[60-70[	37	38	41	47	53	61	70	74	80	85	90	91	92	91	90	85	80	74	70	61	53	47	41	38	37
[50-60[	42	44	47	52	59	67	73	79	85	90	95	96	97	96	95	90	85	79	73	67	59	52	47	44	42
[40-50[	48	51	54	58	64	72	76	82	89	94	97	99	100	99	97	94	89	82	76	72	64	58	54	51	48
[30-40[	57	59	61	67	69	77	81	87	92	96	99	100	100	100	99	96	92	87	81	77	69	67	61	59	57
[20-30[	67	67	68	72	75	77	84	88	93	94	98	99	99	99	98	94	93	88	84	77	75	72	68	67	67
[10-20[	76	76	77	79	81	81	87	89	93	94	96	97	97	97	96	94	93	89	87	81	81	79	77	76	76
[0-10[	84	84	84	85	86	89	90	90	90	90	91	91	91	91	91	90	90	90	90	89	86	85	84	84	84

Figura 3.9: Eficiência de captação da radiação solar dos painéis fotovoltaicos de acordo com a sua inclinação e orientação para a latitude de 40°N (adaptado de: *evoenergy*, 2013; *Electropeadia*, 2020))

Conhecendo-se as eficiências da captação da radiação solar por parte dos painéis fotovoltaicos consoante a inclinação e orientação, procedeu-se posteriormente ao cálculo da radiação solar captada nas coberturas dos edifícios (equação (18)).

$$R = k \times R_s \times \eta_{IO} \times N_{IO} \quad (18)$$

Onde:

R – Radiação solar recebida na cobertura dos edifícios consoante a sua orientação e ângulo de inclinação (kWh/(m<sup>2</sup>.ano));

k – Fator de orientação (0,25 para coberturas de quatro faces, 0,5 para coberturas de duas faces e 1 para coberturas horizontais);

R<sub>s</sub> – Radiação solar global recebida (kWh/(m<sup>2</sup>.ano));

η<sub>IO</sub> – Eficiência dos painéis consoante a orientação e ângulo de inclinação (%);

N<sub>IO</sub> – Número de edifícios que têm determinada orientação e ângulo de inclinação.

Depois de obtido o valor da radiação recebido nas coberturas dos edifícios recorreu-se à equação (19) (Martins, 2017) para cálculo da capacidade de produção de eletricidade produzida pelos sistemas PV.

$$E_{Tp} = A_{Tpv} \times \eta_{pv} \times p_r \times R \times 10^{-3} \quad (19)$$

Onde:

E<sub>Tp</sub> – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (MWh/ano);

A<sub>Tpv</sub> – Área total de implementação PV (m<sup>2</sup>);

η<sub>pv</sub> – Eficiência do painel fotovoltaico PV (%);

p<sub>r</sub> – Performance Ratio (intervalo entre 0,5 e 0,9, valor padrão = 0,75). O valor de p<sub>r</sub> considerado para efeito da presente dissertação é 0,75;

R – Radiação solar recebida na cobertura dos edifícios consoante a sua orientação (kWh/(m<sup>2</sup>.ano)).

Para os painéis fotovoltaicos a instalar nos parques de estacionamento considerou-se que a radiação solar recebida seria de 1717,2 kWh/(m<sup>2</sup>.ano).

### 3.9 Estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela produção PV

A estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> foi calculada pelo produto entre o fator de emissão de CO<sub>2</sub> do gás natural para produção eletricidade em Portugal (Tabela 3.8) e o consumo de eletricidade por parte dos edifícios da cidade de Santarém, equação (20).

O fator de emissão utilizado foi o do gás natural, uma vez que é o fusível do sistema energético em Portugal e a adição de produção de energia renovável irá substituir centrais a ciclo combinado a gás natural.

Tabela 3.8: Fator de emissão CO<sub>2</sub> da produção de eletricidade em Portugal

Fator de emissão de gás natural (t CO <sub>2</sub> /MWh)	Referências
0,157	APA, 2019

$$e_T = F_e \times E_T \quad (20)$$

Onde:

$e_T$  – Emissões totais de CO<sub>2</sub> proveniente do consumo de eletricidade dos edifícios (t CO<sub>2</sub>);

$F_e$  – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do gás natural (t CO<sub>2</sub>/MWh);

$E_T$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios nas áreas de estudo (MWh/ano);

Foi efetuado ainda o cálculo de poupança de emissões de CO<sub>2</sub> através da produção de eletricidade por sistemas fotovoltaicos, equação (21).

$$e_p = F_e \times E_{Tp} \quad (21)$$

Onde:

$e_p$  – Poupança de emissões de CO<sub>2</sub> proveniente da produção de eletricidade pelos sistemas PV (t CO<sub>2</sub>);

$F_e$  – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do gás natural (t CO<sub>2</sub>/MWh);

$E_{Tp}$  – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (MWh/ano);

### 3.10 Análise de Sensibilidade e cenários

#### 3.10.1 Energia solar térmica e medidas de eficiência energética

De forma a calcular a estimativa do impacto da instalação de coletores solares térmicos sobre a produção de eletricidade, procedeu-se primeiramente à determinação da área de implementação térmica (equação (22)), de seguida foi calculado a eletricidade produzida na área de implementação dos coletores térmicos segundo a equação (23) e finalmente determinada a perda de produção associada a instalação (equação (24)).

Para esse cálculo foi selecionado o coletor solar térmico que melhor se adaptava à capacidade de satisfação de água quente, de acordo com o Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril, para a população média de Santarém (Tabela 3.9).

Tabela 3.9: Características do painel solar térmico selecionado

Modelo	Área do painel (m <sup>2</sup> )	Capacidade (L)	Custo (€)
Painel solar Termossifão INOX 316 (Marla Energias)	2,915	150	1050

A área total de implementação térmica teve em consideração a população residente, considerando que de acordo com a legislação em vigor cada habitante deverá ter acesso a 40L de água quente por dia. Uma vez que não se conseguiu acesso aos agregados familiares das áreas de amostragem, dividiu-se a população residente pelo número médio de famílias em Santarém, desta forma determinando a área necessária para instalação dos coletores solares térmicos para as famílias na cidade de Santarém.

$$A_{Tpt} = \sum_{z=1}^y \left( \left( \frac{Pop_z}{2,5} \right) \times \frac{A_s \times 100}{A_a} \times f_z \right) \quad (22)$$

Onde:

- $A_{Tpt}$  – Área total de implementação térmica (m<sup>2</sup>);
- $Pop_z$  – População residente por zona urbana (hab);
- 2,5 – Número médio de habitantes por família em Santarém (hab);
- $A_s$  – Área ocupada pelo painel térmico (m<sup>2</sup>);
- $A_a$  – Fração de área das amostras (%);
- $f_z$  – Fator de correção por zona urbana (equação (13)).

$$E_{Tpt} = A_{Tpt} \times \eta_{pv} \times p_r \times R \times 10^{-3} \quad (23)$$

Onde:

- $E_{Tpt}$  – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos associados a área dos coletores solares térmicos (MWh/ano);
- $A_{Tpt}$  – Área total de implementação térmica (m<sup>2</sup>);
- $\eta_{pv}$  – Eficiência do painel fotovoltaico PV (%);
- $p_r$  – Performance Ratio (intervalo entre 0,5 e 0,9, valor padrão = 0,75). O valor de  $p_r$  considerado para efeito da presente dissertação é 0,75;
- $R$  – Radiação solar recebida na cobertura dos edifícios consoante a sua orientação (kWh/(m<sup>2</sup>.ano)).

$$P_p = 1 - \frac{E_{Tpt}}{E_{Tp}} \quad (24)$$

Onde:

- $P_p$  – Perda de produção associada aos coletores solares térmicos (%);
- $E_{Tp}$  – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (MWh/ano);
- $E_{Tpt}$  – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos associados a área dos coletores térmicos (MWh/ano).

Adicionalmente foi analisado o impacte da aplicação de medidas de eficiência energética em habitações, onde o cálculo do consumo de eletricidade segundo as tipologias de uso dos edifícios, com medidas de eficiência, foi efetuado recorrendo ao consumo de eletricidade médio por uma família ecológica em vez do consumo de eletricidade de uma família típica. A família ecológica utiliza equipamentos apenas da classe mais eficiente e apresenta um perfil de utilização racional de energia, diminuindo desta forma o consumo de eletricidade.

### 3.10.2 Comunidades de produtores-consumidores

Com o intuito de analisar a viabilidade económica, realizou-se o cálculo do custo da eletricidade consumida (equação (25)) e lucro da produção de eletricidade (equação (26)) nos edifícios da cidade de Santarém, bem como à escala do edifício segundo a tipologia residencial misto, através do custo de compra e venda da eletricidade à rede (Tabela 3.10).

Tabela 3.10: Custo de compra e venda de eletricidade à rede elétrica

Custo da compra de eletricidade residencial (€/kWh)	0,215	(Pordata, 2019)
Custo da compra de eletricidade comercial (€/kWh)	0,1409	
Preço de venda de eletricidade à rede (€/kWh)	0,020	Portaria n.º 32/2018, de 23 de janeiro

$$C_{Ts} = (E_{Tr1} \times C_r) + (E_{Trm1} \times C_r) + \sum_{x=1}^m (E_{Tcx1} \times C_c) \quad (25)$$

Onde:

$C_{Ts}$  – Custo da compra de eletricidade à rede (€/ano);

$E_{Tr1}$  – Eletricidade consumida pelos edifícios residenciais (kWh/ano);

$E_{Trm1}$  – Eletricidade consumida pelos edifícios residenciais mistos (kWh/ano);

$C_r$  – Custo de eletricidade residencial (€/kWh);

$m$  – Número de tipologias;

$E_{Tcx1}$  – Eletricidade consumida pelos edifícios consoante a tipologia não residencial (kWh/ano);

$C_c$  – Custo de eletricidade comercial (€/kWh).

O lucro da aplicação de sistemas fotovoltaicos destina-se à venda do excedente de eletricidade produzido das unidades de UPAC para a rede elétrica. Considerando que o preço de venda de eletricidade à rede é variável, optou-se por utilizar o valor de 10 de junho de 2020.

$$L_{Tf} = (E_{Tp} - E_T) \times C_v \quad (26)$$

Onde:

$L_{Tf}$  – Lucro através da aplicação de sistemas fotovoltaicos na área de estudo (€/ano);

$E_T$  – Consumo total de eletricidade dos edifícios na área de estudo (MWh/ano);

$E_{Tp}$  – Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (MWh/ano);

$C_v$  – Preço de venda de eletricidade à rede elétrica (€/kWh).

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Classificação dos edifícios por tipologia de uso e estimativa do consumo de eletricidade

A classificação dos edifícios, em Santarém, por tipologia de uso permite determinar a variância de tipologias nas infraestruturas presentes na área de estudo e desta forma proceder-se a uma estimativa do consumo de eletricidade dos mesmos.

Pela observação da Tabela 4.1, consegue-se verificar que a tipologia de uso dominante nos edifícios de bairro corresponde ao Residencial, o que seria de esperar considerando que a maioria dos edifícios é para habitação. É de notar ainda que os edifícios residenciais mistos correspondem à segunda tipologia com maior contagem, o que poderá indicar que existe possibilidade de aplicação de comunidades energéticas.

Tabela 4.1: Ocorrência de tipologias de uso nos edifícios de bairro

Código	Tipologias de uso	Ocorrências		
		Contagem real na amostragem	Estimativa do total na área de estudo	%
R	Residencial	545	4318	73,2
C	Comércio	13	103	1,8
F	Comércio Frio	1	8	0,1
A	Restauração	3	24	0,4
S	Serviços	1	8	0,1
U	Saúde	2	16	0,2
E	Educação	3	24	0,4
D	Desporto e cultura	3	24	0,4
RMx	Residenciais Mistos	171	1355	22,1
CMx	Comerciais Mistos	7	55	1,1
<b>Total</b>		<b>749</b>	<b>5934</b>	<b>100</b>

Através de uma análise mais detalhada sobre os edifícios residenciais mistos (Figura 4.1) é perceptível que as tipologias de uso comércio e serviços representam mais de metade (59%) das ocorrências verificadas nestes edifícios. É passível de compreender ainda que 25% das ocorrências das tipologias de uso encontradas correspondem a tipologias que necessitam de refrigeração, pelo que terão consumos energéticos mais elevados.

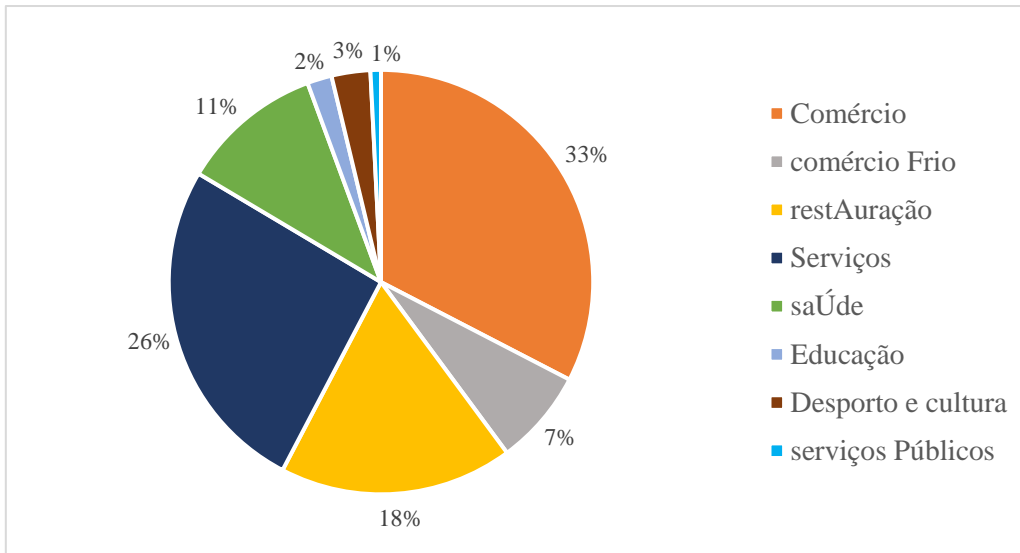


Figura 4.1: Tipologia de usos dos edifícios residenciais mistos na cidade de Santarém

Em relação aos edifícios comerciais mistos apenas três tipologias de uso foram encontradas, onde os Serviços representam três quartos das tipologias de uso identificadas (Figura 4.2).

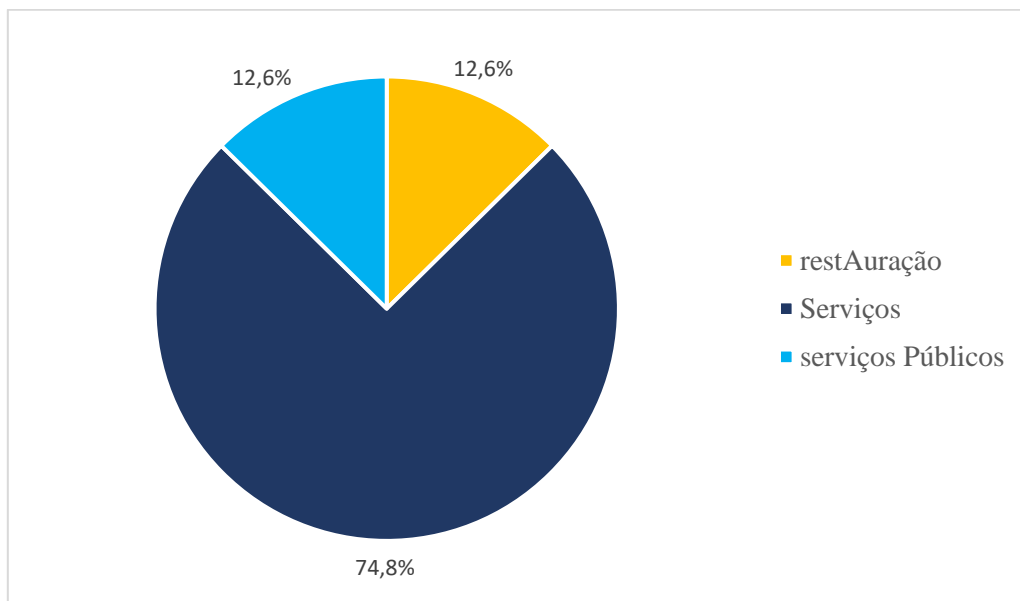


Figura 4.2: Tipologia de usos dos edifícios comerciais mistos na cidade de Santarém

As tipologias de uso observadas nos grandes edifícios encontram-se disponíveis na Figura 4.3, onde a tipologia de uso educação encontra-se destacada com maior valor. Embora a tipologia Grandes superfícies apresente um valor relativamente reduzido, esta será responsável por elevados consumos de eletricidade.

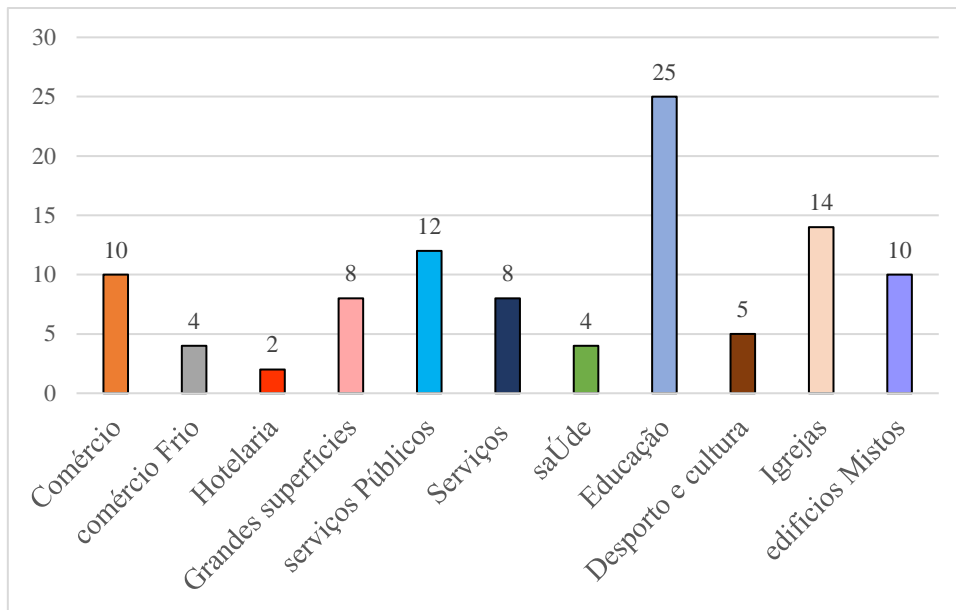


Figura 4.3: Tipologia de usos dos grandes edifícios na cidade de Santarém

Através de uma análise com maior detalhe sobre os edifícios Mistos, percebe-se que existe uma distribuição mais equilibrada das tipologias de uso, sendo que a tipologia de uso com maior ocorrência corresponde aos Serviços (Figura 4.4).

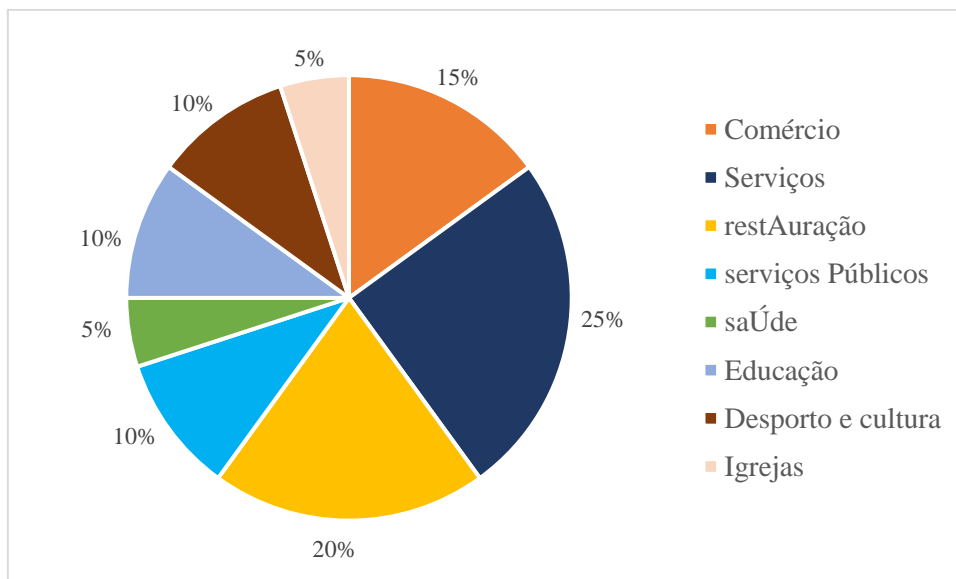


Figura 4.4: Tipologia de uso dos edifícios mistos

As estimativas da população residente e as respetivas famílias em cada zona urbana da cidade de Santarém encontram-se na Tabela 4.2. Recorreu-se ao INE (2011) para recolha do número total da população residente na cidade, permitindo o cálculo da distribuição desta pelas várias zonas urbanas (CMS, 2020).

*Tabela 4.2: Estimativa da população residente e número de famílias em cada zona urbana*

ZU	População	Famílias
1	1 915	766
2	9 874	3 950
3	254	102
4	143	57
5	695	278
6	8 137	3 255
7	196	78
8	713	285
9	3 149	1 260
10	258	103
11	436	175
12	3 055	1 222
13	1 105	442
<b>Total</b>	<b>29 929</b>	<b>11 972</b>

A estimativa do consumo de eletricidade dos edifícios de bairros e grandes edifícios encontram-se descritos na Tabela 4.3. De acordo com a informação acima descrita, a estimativa do consumo total proveniente dos edifícios da cidade de Santarém é de 112 GWh/ano.

Nos edifícios de bairro verifica-se que a tipologia de uso residenciais mistos é a que mais consome eletricidade seguida dos residenciais. Estes valores podem ser explicados devido ao elevado número de edifícios residenciais presentes na área de estudo face ao número mais reduzido de outras tipologias.

Em relação ao consumo de eletricidade dos grandes edifícios, são as grandes superfícies que mais consomem eletricidade. Os valores dos grandes edifícios encontram-se dentro do que era esperado, uma vez que as grandes superfícies apresentam zonas com armazenagem fria e possuem elevadas áreas.

Tabela 4.3: Estimativa do consumo anual de eletricidade por tipologia de uso dos edifícios de bairro e grande edifícios na cidade de Santarém (MWh/ano)

Código	Tipologia de uso	Estimativa de consumo de eletricidade (MWh/ano)
R	Residencial	18 600
C	Comércio	809
F	Comércio Frio	2150
H	Hotelaria	753
A	Restauração	368
G	Grandes superfícies	44 355
P	Serviços públicos	1 257
S	Serviços	308
U	Saúde	8 031
E	Educação	1 727
D	Desporto e cultura	2 385
I	Igrejas	349
RMx	Residenciais mistos	29 709
CMx	Comerciais mistos	389
Mx	Edifícios mistos	4 010
<b>Total</b>		<b>115 200</b>

De forma a tentar compreender a validade das estimativas do consumo de eletricidade obtidas, procedeu-se à comparação das estimativas calculadas com os dados de consumo de eletricidade para o concelho de Santarém (Pordata, 2011; Pordata, 2017) (Tabela 4.4). O valor da estimativa calculada aproxima-se do consumo no concelho, o que seria de esperar uma vez que a cidade de Santarém contém 49% da população do concelho e grande parte das infraestruturas dos serviços e comércio.

Em relação aos edifícios do estado, existe uma elevada diferença entre as estimativas e os valores reais para concelho, considerando que o concelho tem 18 freguesias e que cada uma dela contém várias infraestruturas o que poderá influenciar este resultado.

Tabela 4.4: Consumos de eletricidade no concelho e cidade de Santarém

	Ano	
	2011	2017
Consumo de eletricidade no concelho de Santarém* (GWh/ano)	170	158
Estimativa do consumo de eletricidade na cidade de Santarém (GWh/ano)	118	115
%	0,69	0,73
Consumo de eletricidade doméstico no concelho de Santarém (GWh/ano)	87	75
Estimativa do consumo de eletricidade doméstico na cidade de Santarém (GWh/ano)	42	39
%	0,48	0,52
Consumo de eletricidade não doméstico no concelho de Santarém (GWh/ano)	65	72
Estimativa do consumo de eletricidade não doméstico na cidade de Santarém (GWh/ano)	62	62
%	0,95	0,86
Consumo de eletricidade dos edifícios do estado no concelho de Santarém (GWh/ano)	19	12
Estimativa do consumo de eletricidade dos edifícios do estado na cidade de Santarém (GWh/ano)	5	5
%	0,26	0,41

\*Inclui os consumos doméstico, não doméstico (comércio e serviços) e edifícios do estado

## 4.2 Cálculo dos fatores influentes na captação da energia solar

A Tabela 4.5 contém o número de edifícios para cada tipo de inclinação e orientação definidas, de modo a permitir o cálculo da área útil e do potencial fotovoltaico. Os valores obtidos indicam que a maioria dos edifícios se encontra na gama de inclinação dos [20° - 30°] e apresenta quatro orientações.

Tabela 4.5: Número de edifícios por inclinação e orientação

Inclinação	Orientação					
	N-S	NE-SO	E-O	SE-NO	N-S-E-O	Horizontal
[0°-5° [	47	209	36	382	111	9
[5° - 10° [	125	229	105	174	187	9
[10° - 15° [	505	748	644	929	819	20
[15° - 20° [	518	766	618	994	1 048	13
[20° - 25° [	1 232	1 906	1 119	2 045	2 368	33
[25° - 30° [	1 536	2 179	1 608	1 999	3 777	40
≥ 30°	679	403	419	283	651	18
<b>Total</b>	<b>4 641</b>	<b>6 441</b>	<b>4 549</b>	<b>6 806</b>	<b>8 961</b>	<b>141</b>

O cálculo do fator de sombreamento dos edifícios foi efetuado de acordo com uma extrapolação dos valores obtidos para a amostragem de cada uma das 13 zonas urbanas (Anexo 7).

A ZU 1 e 5 apresentaram fatores de sombreamento de 0,2 e 0,009, respetivamente, considerando que foram as únicas zonas urbanas que na área de amostragem continham edifícios adjacentes a outros causadores de sombreamento. Em relação às restantes ZU, o fator de sombreamento foi igual a 0 já que os conjuntos de edifícios que se encontravam nas áreas de amostragem apresentavam as mesmas alturas.

### 4.3 Cálculo da área para instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas

Na Tabela 4.6 encontram-se descritos os valores das várias áreas calculadas de forma a obter a área de implementação PV para as diversas áreas em estudo. Observando os resultados percebe-se que a área de implementação PV corresponde a cerca de 47% da área bruta das coberturas. É de notar ainda que existe um défice total de 6,6 hectares, entre a área útil e a área de implementação PV causado pelo sombreamento dos edifícios.

A área de implementação PV obtida relativamente aos parques de estacionamento nas zonas 2 e 4, é de 0,437 ha e 2,02 ha, respetivamente.

Tabela 4.6: Áreas de implantação, bruta, útil e de implementação PV

ZU	Área de implantação dos edifícios	Área bruta do telhado	Área útil	Área de implementação PV
	ha			
1	49,4	59,0	27,1	22,2
2	23,3	27,1	13,3	13,3
3	3,6	4,3	1,9	1,9
4	7,4	6,4	5,1	5,1
5	8,0	9,5	4,5	4,5
6	19,2	21,9	12,3	12,3
7	6,9	8,2	3,8	3,8
8	1,3	1,4	0,8	0,8
9	22,5	26,8	13,3	13,3
10	6,4	7,3	3,8	3,8
11	4,9	5,8	2,7	2,7
12	20,0	23,8	11,1	11,1
13	7,2	8,7	4,2	4,2
<b>Total</b>	<b>179,9</b>	<b>210,3</b>	<b>103,6</b>	<b>98,7</b>

#### 4.4 Cálculo do potencial fotovoltaico das coberturas dos edifícios

A Tabela 4.7 apresenta a radiação solar recebida nas coberturas dos edifícios consoante a orientação e inclinação dos mesmos, para as 13 zonas urbanas destacadas na cidade de Santarém. Estes valores de radiação solar serviram de base para o cálculo do potencial técnico de produção PV de eletricidade.

Tabela 4.7: Radiação solar média recebida nas coberturas dos edifícios das zonas urbanas

ZU	Edifícios de bairro	Grandes edifícios
	Radiação solar (kWh/(m <sup>2</sup> .ano))	
1	1531	1537
2	1531	1598
3	1527	1527
4	1576	1576
5	1527	1574
6	1530	1576
7	1534	1525
8	1527	1527
9	1527	1533
10	1533	1535
11	1528	1625
12	1530	1580
13	1541	1544

A potência a instalar nas diferentes zonas urbanas varia entre 1,4 MW e 40,2 MW, atingindo um total de 175,8 MW na cidade de Santarém. As zonas urbanas 1, 2 e 9 correspondem às que apresentam maior potência instalada 40,2 MW, 23,5 MW e 24 MW, respetivamente.


Em relação ao potencial técnico de produção PV de eletricidade, a eletricidade produzida pelos sistemas fotovoltaicos, as zonas urbanas 1, 2 e 9 correspondem a 50% da produção total de energia elétrica apresentando valores de 63 GWh/ano, 37 GWh/ano e 38 GWh/ano, respetivamente. A estimativa da produção de eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos para Santarém corresponde a 280 GWh/ano.

As zonas urbanas 4 e 5 correspondem às zonas onde o consumo de energia elétrica não foi compensado na totalidade, o que indica que a implementação de sistemas fotovoltaicos nestas zonas poderá assegurar parte das necessidades energéticas dos edifícios, reduzindo o consumo de eletricidade da rede.

No caso das restantes zonas, existe um excedente de produção de eletricidade fotovoltaica, que poderá ser utilizada para satisfazer os consumos em falta nas zonas em que a produção de eletricidade não é suficiente, aumentando desta forma a rentabilidade do conjunto dos sistemas PV. A análise para a cidade de Santarém aponta para que se consiga obter um excesso de produção na ordem dos 165 GWh/ano, que podem ser fornecidos à rede elétrica para compensar os consumos elétricos de regiões com défice. O número total de painéis fotovoltaicos necessários para a produção de eletricidade seria mais de 780 000.

Os valores discutidos acima encontram-se na Tabela 4.8 com a potência a instalar, o potencial técnico de produção PV e o excedente de produção do sistema PV na área em estudo.

Tabela 4.8: Potência instalada e potencial técnico de produção PV na área em estudo



ZU	Potência a instalar (MW)	Potencial técnico de produção PV <sup>1</sup> (MWh/ano)	Estimativa de consumo de eletricidade (MWh/ano)	Excedente de produção (MWh/ano)
1	40,2	63 825	11 215	52 610
2	23,5	37 662	23 777	13 885
3	3,4	5 337	618	4 719
4	6,9	11 339	13 489	-2 150
5	8,2	12 974	14 500	-1 526
6	22,3	35 592	30 604	4 988
7	6,8	10 834	546	10 288
8	1,4	2 172	943	1 229
9	24,0	38 020	5 723	32 296
10	6,8	10 797	5 970	4 827
11	4,8	7 695	694	7 000
12	20,0	31 913	5 142	26 772
13	7,6	12 066	1 603	10 463
<b>Total</b>	<b>175,8</b>	<b>280 225</b>	<b>115 200</b>	<b>165 024</b>

<sup>1</sup>Nas zonas urbanas 2 e 4 encontra-se associado a produção fotovoltaica proveniente dos parques de estacionamento

É de notar ainda que o potencial real dos sistemas fotovoltaicos será inferior ao potencial técnico, considerando que parte da instalação não será economicamente viável enquanto o preço dos sistemas PV não diminuir e também pelo facto de nem todos os proprietários terão interesse ou capacidade de realizar os investimentos necessários, sendo grande parte dos investimentos se encontram associados aos incentivos disponíveis.

#### 4.5 Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela produção PV

As estimativas das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela produção de sistemas fotovoltaicos encontram-se descritas na Tabela 4.9, onde a cidade de Santarém terá a capacidade de evitar 43,9 kt CO<sub>2</sub>.

Todas as zonas urbanas, à exceção da 4 e 5, apresentam emissões evitadas superiores às associadas ao consumo de eletricidade, sendo que poderão compensar as emissões de CO<sub>2</sub> de outros setores de atividade ou regiões.

As zonas urbanas 4 e 5 correspondem às zonas que não conseguem mitigar as emissões na totalidade uma vez que, naquelas áreas existem poucos edifícios para produção de energia elétrica e o consumo de eletricidade é mais acentuado devido à presença de grandes superfícies e hipermercados, respetivamente.

As zonas onde a capacidade de produção de energia elétrica por sistema fotovoltaico não é suficiente para colmatar o consumo local, implica a necessidade de consumo de energia da rede para compensar as necessidades de eletricidade. Complementarmente, foram identificadas zonas urbanas onde a produção excede o consumo de energia elétrica, resultando numa poupança de emissões de CO<sub>2</sub>.

*Tabela 4.9: Emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por zona urbana em t CO<sub>2</sub>/ano*

ZU	Emissões de CO <sub>2</sub> associado ao consumo de eletricidade (t CO <sub>2</sub> /ano)	Emissões evitadas de CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> /ano)
1	1 761	10 021
2	3 733	5 913
3	97	838
4	2 118	1 780
5	2 277	2 037
6	4 805	5 588
7	86	1 701
8	148	341
9	899	5 969
10	937	1 695
11	109	1 208
12	807	5 010
13	252	1 894
<b>Total</b>	<b>18 027</b>	<b>43 995</b>

## 4.6 Análise de sensibilidade e cenários

### 4.6.1 Energia solar térmica e medidas de eficiência energética

De forma a calcular a área necessária para a instalação de coletores solares térmicos, assumiu-se que a dimensão média das famílias na cidade de Santarém é de 2,5 indivíduos (Pordata, 2011) e que cada indivíduo necessita de 40L de água quente a 60° por dia de acordo com o Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril. Os cálculos apresentados referem-se apenas aos edifícios residenciais, não contabilizando consumos de água quente por parte de outros edifícios.

Em relação à aplicação de medidas de eficiência energética em habitações, diz respeito à população residente adaptar o seu padrão de consumo de eletricidade para um padrão mais racional e à substituição de equipamentos elétricos por equipamentos com a mais alta classe de eficiência energética.

Na Tabela 4.10 encontra-se as estimativas de eletricidade produzida com e sem a instalação de coletores solares térmicos, bem como as estimativas de consumo de eletricidade com e sem medidas de eficiência nos edifícios residenciais.

*Tabela 4.10: Simulação da perda de produção de energia solar com a instalação de coletores solares térmicos e diminuição do consumo de eletricidade aplicando medidas de eficiência energética*

ZU	Estimativa do potencial técnico de produção PV (GWh/ano)		Estimativa de consumo de eletricidade dos edifícios (GWh/ano)	
	Sem a adição de coletores solares térmicos	Com a adição de coletores solares térmicos	Sem medidas de eficiência	Com medidas de eficiência
1	64	61	11,0	9,0
2	38	23	22,9	17,1
3	5	5	0,6	0,4
4	11	11	13,5	13,4
5	13	12	14,4	14,0
6	36	25	29,8	25,1
7	11	11	0,5	0,4
8	2	1	0,9	0,5
9	38	33	5,4	3,6
10	11	10	5,9	5,8
11	8	7	0,7	0,4
12	32	27	4,9	3,1
13	12	10	1,5	0,9
<b>Total</b>	<b>280</b>	<b>238</b>	<b>112</b>	<b>94</b>

Foram considerados quatro cenários de consumo de eletricidade satisfeito pelo sistema fotovoltaico, onde houve a conjugação de medidas como a instalação de coletores térmicos e medidas de eficiência (Tabela 4.11). Embora o cenário 3 demonstre a maior satisfação de consumo, com três vezes mais em termos elétricos, é o cenário 4 que apresenta maior interesse em ser implementado, considerando que através da combinação das duas medidas consegue-se uma redução mais significativa nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Tabela 4.11: Consumo de eletricidade potencial satisfeito pelo sistema PV, de acordo com os quatro cenários

ZU	Consumo de eletricidade potencial satisfeito pelo Sistema PV			
	$\left(\frac{\text{Capacidade de produção}}{\text{Consumo}}\right)$			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	Sem medidas de eficiência e sem coletores térmicos	Sem medidas de eficiência e com coletores térmicos	Com medidas de eficiência e sem coletores térmicos	Com medidas de eficiência e com coletores térmicos
1	5,8	5,7	7,1	7,1
2	1,7	1,2	2,2	1,8
3	8,9	8,9	11,9	11,9
4	0,8	0,8	0,9	0,9
5	0,9	0,8	0,9	0,8
6	11,9	9,0	1,4	1,1
7	20,5	20,5	26,2	26,1
8	2,5	2,1	4,7	4,3
9	7,0	6,9	10,6	10,4
10	1,8	1,8	1,9	1,8
11	11,7	11,7	19,2	19,1
12	6,6	6,4	10,4	10,2
13	8,0	7,9	14,0	13,9
<b>Total</b>	<b>2,5</b>	<b>2,4</b>	<b>3,0</b>	<b>2,8</b>

Apesar da instalação de coletores térmicos nas coberturas dos edifícios diminuir o espaço disponível para produção de eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos, a aplicação dos coletores deve ser realizada independentemente, visto que a produção energética proveniente dos mesmos é cerca de 3,5x superior ao do sistema PV garantindo desta forma uma minimização do consumo geral de energia.

A energia solar térmica e as medidas de eficiência energética não foram estudadas em maior detalhe, uma vez que o foco da dissertação se encontra no edificado existente e a implementação de coletores solares térmicos ocorre usualmente em edifícios construídos de raiz ou em grandes remodelações de edifícios.

#### 4.6.2 Comunidades de produtores-consumidores

A prioridade da instalação de painéis fotovoltaicos para produção de eletricidade quando aplicada aos edifícios é a produção de eletricidade para autoconsumo dos mesmos. Deste modo, é esperado uma redução no custo da fatura da eletricidade tendo por base a compensação de energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos na necessidade elétrica dos edifícios em oposição à compra de eletricidade à rede na sua íntegra.

A estimativa para o consumo de eletricidade dos edifícios na cidade de Santarém acarreta um custo económico anual de 19,2 milhões de euros. Este poderá ser compensado na totalidade a longo prazo com a instalação de sistemas PV, sendo capaz de obter um potencial de lucro de 3,4 milhões de euros, caso o excesso de produção seja vendido à rede elétrica a um preço de 0,020€/kWh.

Analisando a produção de eletricidade fotovoltaica à escala do edifício, podem existir períodos durante o funcionamento do sistema PV onde ocorre um excedente de produção caso as necessidades energéticas sejam baixas o suficiente. Assim sendo, este excedente de produção poderá ser utilizado por outros edifícios que apresentem uma necessidade elétrica superior à sua produção. Com o intuito de agilizar o processo de compra e venda de eletricidade local, é necessário a criação de comunidade de produtores-consumidores.

Selecionou-se um edifício residencial misto da zona urbana 2 e com base nas características desse edifício determinou-se o perfil de consumo e venda de energia elétrica.

Encontra-se na Figura 4.5 a média do perfil de um edifício misto com 4 prosumers residenciais e 2 comerciais, respetivamente, para a área metropolitana de Lisboa. Assumindo que estes são idênticos para a cidade de Santarém, então ocorrerá um excedente de produção no edifício caso seja aproveitado a totalidade da área de cobertura dos edifícios. Este excedente poderá ser vendido a edifícios industriais através da rede elétrica, considerando que o consumo dessas infraestruturas é significativamente mais elevado.

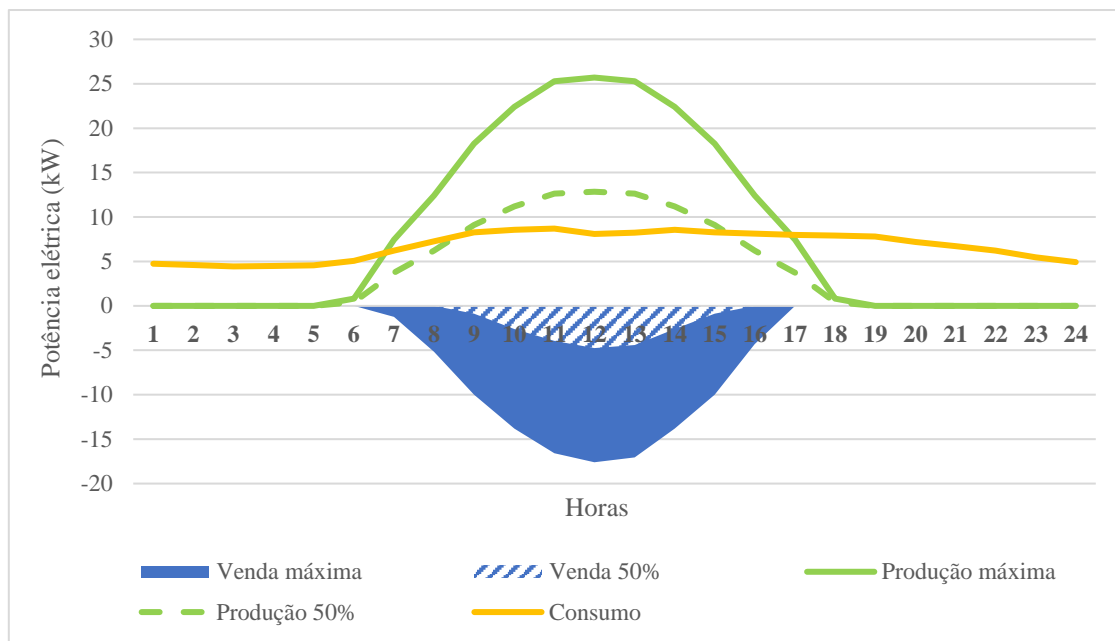


Figura 4.5: Perfil de consumo e venda de energia elétrica para dois prossumers comerciais médios e quatro prossumers residenciais médios no mesmo edifício (dia útil) em Julho (adaptado de: Marques, 2019)

A Tabela 4.12 demonstra que existe um excedente de produção de eletricidade no edifício residencial e um déficit no edifício residencial misto. Caso houvesse a aplicação do conceito de comunidades energéticas nestes edifícios, o edifício residencial poderia vender a eletricidade que produz ao edifício residencial misto a um preço superior ao de venda à rede e o edifício misto compraria a eletricidade a um valor inferior, sendo ambos beneficiados.

Tabela 4.12: Comparação entre um edifício residencial e residencial misto no âmbito de comunidades energéticas

	Edifício residencial <sup>1</sup>	Edifício residencial misto <sup>2</sup>
Área de cobertura (m <sup>2</sup> )	347	310
Área de instalação PV (m <sup>2</sup> )	198	176
Radiação solar (kWh/(m <sup>2</sup> .ano))	1531	1531
Consumo estimado de eletricidade residencial (kWh/dia)	49	33
Consumo estimado de eletricidade não residencial (kWh/dia)	0	84
Consumo de eletricidade total (kWh/dia)	49	117
Produtibilidade do edifício (kWh/dia)	113	100
Consumo satisfeito pelo sistema PV (%)	230%	86%

<sup>1</sup> edifício de 3 andares na zona urbana 2 com 6 famílias

<sup>2</sup> edifício de 3 andares na zona urbana 2 com 4 famílias, 1 comércio a retalho e 1 comércio com armazenagem fria

O excedente de produção é usualmente escoado para a rede elétrica, visto que esta se encontra mais acessível para receber a eletricidade e onde o preço da venda de eletricidade é de 0,020 €/kWh para UPAC. Tendo em conta que a venda da eletricidade à rede apresenta pouco retorno financeiro, seria uma mais valia promover as comunidades energéticas de forma a consumir a eletricidade localmente a um preço mais competitivo.

A viabilidade económica não foi estudada com maior detalhe, uma vez que a dimensão do estudo dificultava a sua execução. Foi elaborado um subcapítulo de forma a reconhecer a importância deste estudo.

#### 4.7 Incentivos à instalação de sistemas fotovoltaicos

Encontra-se na Tabela 4.13, um conjunto de medidas de incentivo à implementação de sistemas PV na cidade de Santarém. Com as medidas propostas espera-se que se consiga a minimização de entraves à energia fotovoltaica, bem como a promoção de uma forma de energia com menor emissão de carbono.

*Tabela 4.13: Medidas de incentivo à implementação de sistemas PV em Santarém*

Medida	Objetivo
Criação de benefícios fiscais diretos para a aquisição de sistemas fotovoltaicos	Reduzir o custo de compra dos sistemas PV tornando-os mais acessíveis para a população
Redução do imposto Municipal sobre imoveis (IMI) através da instalação dos painéis PV	Incentivar a população a instalar os sistemas PV de forma a reduzir o consumo da rede elétrica
Realização de ações de sensibilização sobre a importância da energia solar	Fornecer ao público informação fiável sobre a oferta de sistemas fotovoltaicos dirigida aos privados
Elaboração de uma base dados sobre os potenciais PV de cada edifício e indicadores económicos	Apoiar a tomada de decisão por parte dos munícipes
Criação de um balcão de atendimento para facilitar a implementação dos sistemas fotovoltaicos	
Organização de leilões com vários produtores de painéis PV, mediados pela CMS	Diminuir o custo da implementação a que o sistema PV está sujeito
Simplificar a burocracia associada à instalação de sistemas PV	Promover a participação ativa da população no mercado de eletricidade, nomeadamente no fornecimento de energia à rede
Promoção legal das comunidades energéticas	

Caso sejam aplicadas estas medidas é esperado que a taxa de aproveitamento da energia solar para produção de energia elétrica nas coberturas dos edifícios aumente, de forma a reduzir o consumo de energia fóssil e consequentemente proporcionar a descarbonização da eletricidade nos edifícios.



## 5 Conclusões

### 5.1 Síntese

A dissertação foi desenvolvida com o objetivo de determinar o potencial técnico de produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos nas coberturas dos edifícios da cidade de Santarém, bem como quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com a implementação desses sistemas.

A metodologia utilizada baseou-se na criação de tipologias de uso para os edifícios e consequente caracterização por consumo de eletricidade, na determinação de áreas disponíveis para implementação PV, no cálculo do potencial de produção de eletricidade em Santarém e finalmente na avaliação da redução de emissões de CO<sub>2</sub> associado ao consumo de eletricidade.

Relativamente à classificação dos edifícios de bairro, a tipologia de uso que se revela dominante corresponde ao Residencial, com uma ocorrência de 73%, seguido dos edifícios residenciais mistos com 22% na área em estudo. Estas duas tipologias correspondem a mais de 95% das ocorrências encontradas na cidade de Santarém.

Contudo existem considerações no que diz respeito à utilização direta da eletricidade produzida relacionadas com a sobreposição dos períodos de consumo e produção. Uma vez que os períodos de maior consumo de energia elétrica nos edifícios residenciais ocorrem fora do período de maior produção fotovoltaica, é necessário equipamento complementar por forma a direcionar o excedente para a rede elétrica ou para dispositivos de armazenamento. Em relação aos grandes edifícios a produção de eletricidade proveniente dos sistemas fotovoltaicos poderá ser um ótimo investimento, considerando que dispõem de grandes áreas disponíveis e os períodos de consumo e produção de energia elétrica sobrepõem-se.

Na classificação de uso dos grandes edifícios, os resultados conseguidos indicam que a tipologia de uso dominante é a educação, uma vez que contém o maior número de edifícios com 25 edifícios na cidade de Santarém. Apesar dos edifícios de educação serem em maior número, é a tipologia de grandes superfícies que apresenta o maior potencial fotovoltaico, já que possui áreas de cobertura superiores às de educação.

A área disponível para implementação de painéis fotovoltaicos corresponde a cerca de 47% da área bruta das coberturas dos edifícios.

Uma vez determinada a área disponível para implementação de sistemas fotovoltaicos procedeu-se à escolha de um painel fotovoltaico, que juntamente com a análise das condições de irradiância disponíveis permitiu simular o cálculo da capacidade instalada bem como o potencial fotovoltaico. Os resultados apontam para a capacidade de instalação de mais de 780 000 painéis.

A seleção do painel corresponde a um passo importante na determinação do potencial fotovoltaico, uma vez que a eficiência do painel determina a capacidade de produção instalada. O painel fotovoltaico selecionado para a simulação da produção de eletricidade apresenta uma eficiência de 18,1%, encontrando-se dentro da gama expectável para as eficiências disponíveis no mercado.

Em termos de limitações, o consumo de eletricidade segundo as tipologias de edifícios foi realizado de acordo com a literatura existente, já que não foi possível o acesso à informação sobre o consumo real dos edifícios.

Os resultados obtidos demonstram que existe uma elevada área disponível de coberturas para implementação de painéis fotovoltaicos que de momento não tem outra funcionalidade e que existe uma alta capacidade fotovoltaica em Santarém para produção de energia elétrica. Os dados indicam que a cidade tem a capacidade de produzir 280 GWh/ano.

O potencial real dos sistemas fotovoltaicos será inferior ao potencial técnico, considerando que existem alguns fatores que impeçam que sejam atingidos este potencial técnico, como falta de investimento ou baixa viabilidade económica.

A nível das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela produção de eletricidade pelos painéis fotovoltaicos, verificou-se que é possível evitar totalmente as emissões associadas ao consumo de eletricidade. Assim sendo, poderá ocorrer uma poupança de 43,9 kt CO<sub>2</sub>/ano, contribuindo para o cumprimento das metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub> estabelecidas no Plano Nacional Energia e Clima.

Desta forma é expectável que se consiga reduzir a importação de combustíveis fósseis permitindo a poupança económica, considerando que Portugal não tem produção de energia fóssil. Esse excedente económico poderia ser aplicado em incentivos de forma a continuar o aumento do contributo das energias renováveis na produção de eletricidade, mais concretamente da energia solar.

Com a aplicação de sistemas fotovoltaicos estaremos a contribuir para a massificação do aproveitamento de energia solar, tornando a produção de eletricidade por outras fontes não renováveis menos competitivas, evitando emissões de dióxido de carbono.

Considerando que a tendência do custo de produção dos painéis fotovoltaicos continuará a diminuir nas próximas décadas, seria uma oportunidade perdida não se investir nesta fonte de energia elétrica, já que a diminuição do custo aumentará a competitividade desta fonte de energia face às outras fontes.

A análise da dissertação enquadra-se num âmbito de criação das comunidades energéticas com o intuito de tirar proveito da produção descentralizada de energia elétrica, uma vez que existem zonas com capacidade de produção de eletricidade superior ao consumo local podendo contribuir para compensar zonas onde a capacidade de produção não é suficiente.

A produção de energia a nível local é fundamental para promover a produção e democratização da energia renovável, através da emancipação da população em termos das suas necessidades energéticas. A descentralização e reestruturação da rede elétrica, sob a forma de comunidades energéticas, potencia o aumento da taxa a que se verifica o afastamento do monopólio natural que é a atual rede elétrica nacional.

Através das comunidades energéticas é expectável a redução da dependência da energia da rede elétrica, bem como a redução dos custos associados ao consumo de eletricidade considerando que este é efetuado em períodos em que a eletricidade é menos dispendiosa.

O potencial técnico fotovoltaico calculado corresponde ao máximo teórico associado ao aproveitamento das coberturas dos edifícios e aos grandes parques de estacionamento para produção de energia fotovoltaica.

O estudo da potencialidade fotovoltaica deveria ser efetuado em todas as áreas onde exista a capacidade de instalação de sistemas PV, já que a energia solar é um recurso abundante e que se encontra subaproveitado, permitindo aumentar o contributo da energia solar para a descarbonização da produção de eletricidade.

## 5.2 Medidas e incentivos

Com as medidas propostas é esperado que as partes interessadas apliquem algumas destas, com o intuito de promover o uso de energia solar na cidade de Santarém, a fim de reduzir o consumo de energia elétrica da rede minimizando as emissões de CO<sub>2</sub> e incentivar a produção e consumo local de eletricidade.

De entre as medidas propostas, foram selecionadas três que merecem destaque pois detêm maior potencial de obterem melhores resultados. Estas medidas irão ser exploradas com maior detalhe em seguida.

A implementação de um balcão de atendimento com vista a dar apoio técnico personalizado aos munícipes acerca da instalação de sistemas PV e respetivos indicadores económicos, o que se traduz numa tomada de decisão mais informada, por via do aumento da acessibilidade à informação.

Através da promoção legal das comunidades energéticas pretende-se incentivar a população a aderir a este sistema de fornecimento de eletricidade alternativo permitindo um retorno local maior em termos económicos e sociais, considerando que torna a produção de eletricidade por via fotovoltaica mais rentável e promove a participação ativa da comunidade no mercado de eletricidade.

Aplicando os benefícios fiscais diretos na aquisição de sistemas PV é esperado que haja um incremento na motivação para a instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas, uma vez que a medida tenciona reduzir o custo de investimento inicial, o qual poderá ser um impedimento para algumas PME ou famílias.

### 5.3 Desenvolvimentos futuros

Nos desenvolvimentos futuros propõem-se os seguintes temas de estudo:

- Aprofundar a análise económica e financeira sobre a instalação de sistemas fotovoltaicos nas coberturas;
- Aumentar a área de estudo para o Concelho de Santarém, incluindo todas as freguesias nele presente;
- Realizar uma análise sobre o ciclo de vida dos sistemas PV a serem implementados, determinando a sua seleção;
- Analisar com maior detalhe as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao consumo de energia elétrica com a implementação dos sistemas PV e sistemas complementares;
- Estudar a complementaridade dos painéis fotovoltaicos e a ligação à rede elétrica ou as baterias;
- Estudar a viabilidade dos coletores solares térmicos no Município de Santarém.

## Referências bibliográficas

APA (2019). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (INERPA). Agência Portuguesa Do Ambiente. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=150>. Consultado a 11 de junho de 2020.

APA (2020). *Acordo de Paris*. Agência Portuguesa Do Ambiente. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=1367>, consultado a 13 de janeiro de 2020.

Alsema, E., Horst, E. W., Baechler, M., & Fthenakis, V. M. (2006). A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006, (September), 4–8.

Angelis-Dimakis, A., Biberacher, M., Dominguez, J., Fiorese, G., Gadocha, S., Gnansounou, E., Robba, M. (2011). Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1182–1200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.049>

Atmaja, T. D. (2013). “Façade and Rooftop PV Installation Strategy for Building Integrated Photo Voltaic Application.” *Energy Procedia* 32: 105–14. doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.014.

Azadian, F., and Radzi, M. A. M. (2013). “A General Approach toward Building Integrated Photovoltaic Systems and Its Implementation Barriers: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (June): 527–38. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.056.

Ban-Weiss, G., Craig, W., Woody, D., Peter, L., Hashem, A., and Ronnen, L. (2013). “Electricity Production and Cooling Energy Savings from Installation of a Building-Integrated Photovoltaic Roof on an Office Building.” *Energy and Buildings* 56 (January): 210–20. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.06.032.

Bawaneh, K., Nezami, F. G., Rasheduzzaman, Md., Deken, B. (2019). Energy Consumption Analysis and Characterization of Healthcare Facilities in the United States. doi: doi:10.3390/en12193775

Bergamasco, L., and Asinari, P. (2011). “Scalable Methodology for the Photovoltaic Solar Energy Potential Assessment Based on Available Roof Surface Area: Application to Piedmont Region (Italy).” *Solar Energy* 85 (5): 1041–55. doi: 10.1016/j.solener.2011.02.022.

Blue Oak Energy (2019). “Solar Canopies.” Disponível em: <http://www.blueoakenergy.com/solar-carports>. Consultado a 15 de dezembro de 2019.

Breyer, C., Koskinen, O., Blechinger, P. (2015) “Profitable climate change mitigation: The case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (April): 610-628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.061>

- Byrne, J., Taminiu, J., Kurdgelashvili, L., & Nam, K. (2015). A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 830–844. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.023>
- Cabello Eras, J. J., Sousa Santos, V., Sagastume Gutiérrez, A., Guerra Plasencia, M. Á., Haeseldonckx, D., & Vandecasteele, C. (2016). Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of Cleaner Production*, 137, 803–812. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.192
- Castro, R. (2018). Uma introdução às energias renováveis: eólica, fotovoltaica e mini hidrica. 3. Portugal.
- Chu, Y. & Meisen, P. (2011). Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. Global Energy Network Institute (GENI). San Diego. Consultado em 21 de outubro de 2019. Disponível em: <http://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solartechnologies/Review-and-Comparison-of-Different-Solar-Technologies.pdf>
- Ciulla, G., Valerio, L. B., Vincenzo, D. D., and Giovanni, C. (2014). “A Comparison of Different One-Diode Models for the Representation of I–V Characteristic of a PV Cell.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (April): 684–96. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.027.
- Colmenar-Santos, A., Campiñez-Romero, S., Pérez-Molina, C., and Castro-Gil, M. (2012). “Profitability Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Facilities for Household Electricity 74 Self-Sufficiency.” *Energy Policy* 51 (December): 749–64. doi: 10.1016/j.enpol.2012.09.023.
- Correia, I. (2017). Análise do potencial técnico-económico de sistemas fotovoltaicos em grandes edifícios comerciais. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- CMS (2020). Câmara Municipal de Santarém. Disponível em: <https://www.cm-santarem.pt/>. Consultado a 10 de dezembro de 2019.
- Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril. *Diário da República n.º 67/2006, Série I-A de 2006-04-04*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. (2008). “Planning and Installing Photovoltaic Systems - A Guide for Installers, Architects and Engineers, Second Edition.” Berlin. [http://www.kimiagaranenergy.com/Free\\_Download/Renewable\\_Energy/Book\\_PV\\_1.pdf](http://www.kimiagaranenergy.com/Free_Download/Renewable_Energy/Book_PV_1.pdf).
- Dinçer, F. (2011). “The Analysis on Photovoltaic Electricity Generation Status, Potential and Policies of the Leading Countries in Solar Energy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1): 713–20. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.026.
- DGEG (2016). ENERGIA em Portugal - 2016. Direção Geral de Energia e Geologia. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. Consultado a 11 de janeiro de 2020.
- DGEG (2019). Renováveis: estatísticas rápidas - nº 179 - setembro de 2019. Direção Geral de Energia e Geologia. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. Consultado a 15 de outubro de 2019.

DGEG (2020). Renováveis: estatísticas rápidas - nº 182 - janeiro de 2020. Direção Geral de Energia e Geologia. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. Consultado a 10 de março de 2020.

Electropaedia (2020). Battery and Energy Technologies. Disponível em: [https://www.mpoweruk.com/solar\\_power.htm](https://www.mpoweruk.com/solar_power.htm). Consultado a 20 de janeiro de 2020.

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>

Eltawil, M. A., and Zhengming, Z. (2010). “Grid-Connected Photovoltaic Power Systems: Technical and Potential problems—A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1): 112–29. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.015.

Emilio, M., Kuhn, J., Bush, R. & Scholl, I. (2012). “Measuring the Solar Radius from Space during the 2003 and 2006 Mercury Transits”. *The Astrophysical Journal*, 750 (2): doi:10.1088/0004-637X/750/2/135

Energysage (2020). What are the best solar panels on the market? Disponível em: <https://news.energysage.com/best-solar-panels-complete-ranking/>. Consultado a 4 de fevereiro de 2020.

Evoenergy (2013). Is it worth/possible fitting photovoltaics on a NW facing roof? Disponível em: <https://www.evoenergy.co.uk/blog/18520/northwest-facing-pv/>. Consultado a 24 de janeiro de 2020.

Fiaschi, D., Bandinelli, R., & Conti, S. (2012). A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Applied Energy*, 97, 101–114. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.008

Fonseca, S. (2016). Caracterização do Consumo de Energia no Sector Residencial em Portugal. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

Franco, A., Shaker, M., Kalubi, D., & Hostettler, S. (2017). A review of sustainable energy access and technologies for healthcare facilities in the Global South. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 92–105. doi: 10.1016/j.seta.2017.02.022

Grauthoff, M., Janssen, U., & Fernandes, J. (2012). Identification and mobilisation of solar potentials via local strategies - POLIS.

GREENPRO (2004). Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projetos e instalação. Lisboa. Portugal. Disponível em: <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>. Consultado a 2 de dezembro de 2019

Hartmann, R. (2018). Potencial técnico de produção de eletricidade por solar PV em Almada e complementaridade entre geração e consumo em edifícios sintéticos de uso misto.

Hofierka, J., and Šúri, M. (2002). “The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications.”.

INE (2011). Censos de 2011. Instituto Nacional de Estatística. Disponível em: [https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos\\_subseccao](https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_subseccao).

IRENA (2012) – Renewable Energy technologies: Cost Analysis Series (Solar Photovoltaics), International Renewable Energy Agency, Volume 1: Power Sector, Issue 4/5, Abu Dhabi.

IRENA (2017a) - Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA. (2017b). “REthinking Energy 2017: Accelerating the Global Energy Transformation.” International Renewable Energy Agency. Disponível em: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).

IEA (2018). CO2 emissions by energy source. International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2018>. Consultado a 18 de novembro de 2019.

IEA (2019). Global EV Outlook 2019. International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/>. Consultado a 18 de novembro de 2019.

IRENA (2019a) - Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019b), Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency Abu Dhabi.

Izquierdo, S., Rodrigues M., and 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): 929–39. doi: 10.1016/j.solener.2008.03.007

Jäger-Waldau, A. (2019). “Snapshot of Photovoltaics—February 2019.” Scientific and Policy Report by the Joint Research Centre of the European Commission, 1–8. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/331354440\\_Snapshot\\_of\\_Photovoltaics\\_-\\_February\\_2019](https://www.researchgate.net/publication/331354440_Snapshot_of_Photovoltaics_-_February_2019).

Jäger-Waldau, A. (2019). PV Status Report 2019, EUR 29938 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12608-9, doi:10.2760/326629, JRC118058.

Jäger-Waldau, A. (2016a). “Snapshot of Photovoltaics—March 2016.” Scientific and Policy Report by the Joint Research Centre of the European Commission, 1–19. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301821210\\_Snapshot\\_of\\_Photovoltaics\\_March\\_2016](https://www.researchgate.net/publication/301821210_Snapshot_of_Photovoltaics_March_2016).

Jäger-Waldau, A. (2016b). “Costs And Economics Of Electricity From Residential PV Systems In Europe.” Scientific and Policy Report by European Commission, Joint Research Centre, Renewables and Energy Efficiency Unit. Disponível em: <http://www.europeanenergyinnovation.eu/Articles/Winter-2016/Costs-and-Economics-of-Electricity-from-Residential-PV-Systems-in-Europe>

Joanaz de Melo, J., Fernandes, F., Sousa, M. J. F., Galvão, A. G., Pereira, A. M. (2019). *Estratégia energética alternativa: princípios e identificação de medidas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Caparica.

- JRC and Institute for Energy and Transport (2012). *PV status report 2012*. Doi: 10.2760/326629.
- Kamaruzzaman, S. N., & Edwards, R. E. (2006). Evaluating performance characteristics of electricity use of British historic buildings in Malaysia. *Facilities*, 24(3/4), 141–152. doi:10.1108/02632770610649403
- Karteris, M., Slini, T., and Papadopoulos, A.M. (2013). “Urban Solar Energy Potential in Greece: A Statistical Calculation Model of Suitable Built Roof Areas for Photovoltaics.” *Energy and Buildings* 62 (July): 459–68. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.033.
- Kaundinya, P. D., Balachandra, P., and Ravindranath, N.H (2009). “Grid-Connected versus Stand-Alone Energy Systems for Decentralized power—A Review of Literature.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (8): 2041–50. doi: 10.1016/j.rser.2009.02.002.
- Kolokotroni, M., Mylona, Z., Evans, J., Foster, A., Liddiard, R. (2019). Supermarket Energy Use in the UK. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.108
- Kouro, S., Leon, J., Vinnikov, D., Franquelo, L., (2015). “Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology.” *IEEE Industrial Electronics Magazine* 1 (9): 47-61.
- Lam, J. C., & Li, D. H. W. (2003). Electricity consumption characteristics in shopping malls in subtropical climates. *Energy Conversion and Management*, 44(9), 1391–1398. doi:10.1016/s0196-8904(02)00167-x
- Lang, T., Gloerfeld E., and Girod B. (2015). “Don’t Just Follow the Sun - A Global Assessment of Economic Performance for Residential Building Photovoltaics.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (February): 932–51. doi:10.1016/j.rser.2014.10.077.
- Lourenço, P., Pinheiro, M. D., & Heitor, T. (2014). From indicators to strategies: Key Performance Strategies for sustainable energy use in portuguese school buildings. *Energy and Buildings*, 85, 212–224. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.025
- Mainzer K., Fath, K., Mckenna, R., Stengel, J., Fichtner, W., and Schultmann, F. (2014). “A High-Resolution Determination of the Technical Potential for Residential-Roof-Mounted Photovoltaic Systems in Germany.” *Solar Energy* 105 (July): 715–31. doi: 10.1016/j.solener.2014.04.015.
- Martins, F. (2017). “PV Sector in the European Union Countries – Clusters and Efficiency.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (74): 173–77. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.026.
- Marques, F. (2019). *Perspectivas de penetração da energia solar fotovoltaica no mercado português*. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J., & Scartezzini, J. L. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469–482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.053>
- Mohajeri, N., Assouline, D., Gudmundsson, A., & Scartezzini, J. L. (2017). Effects of city size on the large-scale decentralised solar energy potential. *Energy Procedia*, 122, 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.372>

- Moreira, D. (2016). Solar PV rooftop in households: technical potential for the municipality of Évora. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Muneer, T., Asif, M., and Kubie, J. (2003). “Generation and Transmission Prospects for Solar Electricity: UK and Global Markets.” *Energy Conversion and Management* 44 (1): 35–52. doi:10.1016/S0196-8904(02)00043-2.
- NAPE SA (2014). “State of the art Bars & Restaurants”. Disponível em: [http://energycheckup.eu/uploads/media/PL\\_SoA\\_BarsRestaurants.pdf](http://energycheckup.eu/uploads/media/PL_SoA_BarsRestaurants.pdf). Consultado a 15 de janeiro de 2020.
- NREL (2003). A consumers guide, get your power from the sun. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington, USA. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35297.pdf>. Consultado a 04 de dezembro de 2019.
- Nelson, J., Gambhir A., and Ekins-Daukes, N. (2014). “Solar Power for CO2 Mitigation.” *Grantham Institute for Climate Change* 11: 1–16. Disponível em: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperialcollege/grantham-institute/public/publications/briefing-papers/Solar-power-for-CO2-mitigation---Grantham-BP-11.pdf>.
- Neosolar (2020). Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acedido a 9 de junho de 2020.
- Oliver-solà, J., Armero, M., Martinez de foix, B., Rieradevall, J. (2013). Energy and environmental evaluation of municipal facilities: Case study in the province of Barcelona. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.053>
- Portugal (2019). “Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030)”. Dezembro de 2019. Disponível em: [https://apambiente.pt/\\_zdata/Alteracoes\\_Climaticas/Mitigacao/PNEC/PNEC%20PT\\_Template%20Final%202019%2030122019.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/Alteracoes_Climaticas/Mitigacao/PNEC/PNEC%20PT_Template%20Final%202019%2030122019.pdf) Consultado a 28 de janeiro de 2019.
- Pearce, J. M. (2002). Photovoltaics - A path to sustainable futures. *Futures*, 34(7), 663–674. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(02)00008-3)
- Peng, J., & Lu, L. (2013). Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.030>
- PV\*SOL (2020). PV\*SOL Online. Disponível em: <http://pvsol-online.valentin-software.com/#/>. Consultado a 10 de janeiro de 2020.
- Ramirez, L. C., Zink, R., Dorner, W., and Stoegelehner, G. (2015). “SpatioTemporal Modeling of Roof-Top Photovoltaic Panels for Improved Technical Potential Assessment and Electricity Peak Load Offsetting at the Municipal Scale.” *Computers, Environment and Urban Systems* 52 (July): 58–69. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.03.002.
- Reis, P. (2019). Qual o preço das baterias para um sistema solar fotovoltaico. *Portal-Energia*. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/preco-baterias-sistema-solar-fotovoltaico-147012/>. Acedido a 9 de junho de 2020.

- REN21 (2018) – Renewables 2018 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network For the 21<sup>st</sup> Century. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/04/gsr\\_2018\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/04/gsr_2018_full_report_en.pdf). Consultado a 5 de novembro de 2019.
- REN21 (2019) – Renewables 2019 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network For the 21<sup>st</sup> Century Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf). Consultado a 20 de dezembro de 2019.
- Santos, T., Gomes, N., Freire, S., Brito, M. C., Santos, L., & Tenedório, J. A. (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.03.008>
- Sarasa-Maestro, C. J., Dufo-López, R., and Bernal-Agustín, J. L. (2013). “Photovoltaic Remuneration Policies in the European Union.” *Energy Policy* 55 (April): 317–28. doi: 10.1016/j.enpol.2012.12.011.
- Schallenberg-Rodriguez, J. (2014). “Photovoltaic Techno-Economical Potential on Roofs in the Canary Islands.” *Journal of Sustainable Development of Energy J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst* 2 (21): 68–87. doi: 10.13044/j.sdewes.2014.02.0007.
- Sequeira, M., Joanaz de Melo, J. (2020). Energy saving potential in the small business service sector: case study Telheiras neighborhood, Portugal. *Energy Efficiency*. <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09842-y>
- Shen, W.X. (2009). “Optimally Sizing of Solar Array and Battery in a Standalone Photovoltaic System in Malaysia.” *Renewable Energy* 34 (1): 348–52. doi: 10.1016/j.renene.2008.03.015.
- Shukla, Akash Kumar, K. Sudhakar, and Prashant Baredar. (2016). “Simulation and Performance Analysis of 110 kWp Grid-Connected Photovoltaic System for Residential Building in India: A Comparative Analysis of Various PV Technology.” *Energy Reports* 2 (November): 82–88. doi:10.1016/j.egyr.2016.04.001.
- SOLARGIS (2019). Solar resource maps of World. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>. Consultado a 10 de janeiro de 2019.
- Strupeit, L., and Neij, L. (2017). “Cost Dynamics in the Deployment of Photovoltaics: Insights from the German Market for Building-Sited Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (March): 948–60. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.095.
- Sun, Y., Hof, A., Wang, R., Liu, J., Lin, Y., and Yang, D. (2013). “GIS-Based Approach for Potential Analysis of Solar PV Generation at the Regional Scale: A Case Study of Fujian Province.” *Energy Policy* 58 (July): 248–59. doi: 10.1016/j.enpol.2013.03.002.
- Šúri, M., Thomas, A. H., Dunlop, E. D., and 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.
- Timilsina, G. R., Kurdgelashvili, L., and Narbel, P. A.. (2012). “Solar Energy: Markets, Economics and Policies.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1): 449–65. doi: 10.1016/j.rser.2011.08.009.

UNDP (2018). 'Human development indices and indicators. 2018 Statistical Update', United Nations Development Programme, 27 (4), p. 123.

Universal Automação (2020). Entenda o sistema fotovoltaico conectado à rede (on grid). Disponível em: <http://www.universalautomacao.com.br/post/sistema-fotovoltaico-energia-solar.html>. Acedido a 9 de junho de 2020.

Yilmaz, S. et al., (2015). The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaras, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, pp.1015–1024. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007935>.

Zahedi, A. (2011). "Maximizing Solar PV Energy Penetration Using Energy Storage Technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1): 866–70. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.011.

## Anexos

Anexo 1: Contagem das tipologias de uso existentes nos edifícios de bairro nas áreas de amostragem (5% da área da Zona Urbana)

Edifícios de Bairro	Áreas de Amostragem													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Tipologia de Usos														
R	159	12	11	3	31	14	19	15	75	36	28	90	49	<b>542</b>
C	12	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>15</b>
F	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
A	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
G	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
P	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
S	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
U	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
E	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
D	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
MRx	44	47	2	0	4	51	1	0	12	1	0	7	2	<b>171</b>
MCx	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>8</b>
<b>Total</b>	<b>232</b>	<b>60</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>38</b>	<b>65</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>87</b>	<b>37</b>	<b>28</b>	<b>97</b>	<b>51</b>	<b>753</b>

Anexo 2: Contagem de tipologias existentes nos edifícios residenciais mistos (5% da área da Zona Urbana)

Edifícios de Bairro	Áreas de amostragem													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Usos Mistos (RMx)														
C	27	25	0	0	1	25	0	0	5	0	0	2	0	<b>85</b>
F	4	4	0	0	2	6	0	0	2	0	0	1	0	<b>19</b>
S	13	25	2	0	1	17	1	0	6	0	0	2	1	<b>68</b>
P	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
U	5	13	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	<b>29</b>
E	1	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	<b>5</b>
A	8	17	0	0	1	15	0	0	2	1	0	2	1	<b>47</b>
D	1	2	0	0	0	4	0	0	1	0	0	0	0	<b>8</b>
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>89</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>80</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>263</b>

Anexo 3: Contagem de tipologias existentes nos edifícios comerciais mistos (5% da área da Zona Urbana)

Edifícios de bairro	Áreas de amostragem													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Usos Mistos (MCx)														
S	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>6</b>
A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
P	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>

Anexo 4: Contagem das tipologias de uso existentes nos Grandes edifícios nas zonas urbanas

Grandes Edifícios	Zonas Urbanas													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
C	1	0	0	2	0	0	0	0	4	0	0	3	0	10
F	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	4
H	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	0	1	0	2	2	2	0	0	0	1	0	0	0	8
P	6	2	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	12
S	2	2	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	8
U	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	4
E	2	8	2	0	0	3	2	0	2	0	2	3	1	25
D	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
I	10	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	14
Mx	6	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	10
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>102</b>

Anexo 5: Contagem de tipologias existentes nos edifícios mistos nas zonas urbanas

Grandes Edifícios	Zonas urbanas													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Usos Mistos (Mx)														
C	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
S	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5
A	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4
P	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
U	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
E	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
D	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
I	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>20</b>

Anexo 6: Radiação solar global recebida segundo a orientação e inclinação das coberturas

Radiação solar (kWh/(m <sup>2</sup> .ano))								
Orientação	Inclinação							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	Média
Norte	1 545	1 545	1 545	1 425	1 425	1 288	1 288	1 438
Sul	1 545	1 545	1 545	1 649	1 649	1 700	1 700	1 619
Este	1 545	1 545	1 545	1 528	1 528	1 494	1 494	1 526
Oeste	1 545	1 545	1 545	1 528	1 528	1 494	1 494	1 526
Sudeste	1 545	1 545	1 545	1 597	1 597	1 631	1 631	1 585
Sudoeste	1 545	1 545	1 545	1 597	1 597	1 631	1 631	1 585
Nordeste	1 545	1 545	1 545	1 460	1 460	1 631	1 339	1 504
Noroeste	1 545	1 545	1 545	1 460	1 460	1 339	1 339	1 462

Anexo 7: Fator de sombreamento calculado para as zonas urbanas

ZU	Fator de sombreamento	
	Edifícios de bairro	Grandes edifícios
1	0,200	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0,009	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0