

**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Departamento de Eletrónica Industrial

Luís Filipe Mendes Azevedo

**Estudo Técnico-Económico do Potencial  
para Produção de Energia por Sistemas  
Solares Fotovoltaicos na Universidade do  
Minho**

Dissertação submetida na Universidade do Minho  
para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

Trabalho realizado sob orientação de:

Professor Doutor João Luiz Afonso

Professor Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro

Janeiro de 2021

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição**

**CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# Agradecimentos

Sendo este documento o culminar do maior ciclo de estudos da minha vida não posso deixar de agradecer a todos os meus amigos e companheiros de curso, por toda a entreaajuda durante estes anos de trabalho árduo, companhia, amizade, conhecimento, paciência, sacrifícios, alegria e felicidade. Todas estas vivências e pessoas contribuíram para a pessoa que sou hoje e o bom engenheiro que tenciono ser. Se tivesse de identificar todas estas pessoas, não chegaria uma página, pois nunca me vou esquecer o que cada um destes seres humanos contribuiu para a sempre crescente sabedoria que tanto valorizo.

Um muito obrigado a todos vocês!

De uma forma especial, por estarem diretamente ligados a esta dissertação de mestrado, o meu sentido agradecimento:

Ao meu orientador Professor Doutor João Luiz Afonso pelo conhecimento partilhado tanto a nível de engenharia, como professor, bem como a nível pessoal, com a sua experiência de vida. Um obrigado muito especial ao Professor Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro, como coorientador desta dissertação de mestrado, contribuiu de uma forma imensurável, na realização deste documento. Muito obrigado por todos os seus contributos em todo o meu percurso académico.

Ao meu primo José Domingues, arquiteto formado nesta Universidade, por toda a partilha de conhecimento e ajuda em áreas do seu conhecimento e mestria, adquiridos na sua vida académica e profissional, que contribuíram de forma impagável para o desenvolvimento deste projeto.

Aos engenheiros Carlos Cabral e Sérgio Coelho, pela análise do documento e críticas construtivas, que contribuíram para a melhoria deste documento. Ao Sérgio Coelho tenho também muito a agradecer pela partilha da sua mestria em organização de informação de forma sucinta e por isso um obrigado enorme a este amigo.

À minha namorada, um muito obrigado por toda a compreensão e motivação ao longo desta etapa da minha vida.

Aos meus pais, por todos os sacrifícios pessoais que fizeram para me dar todas as oportunidades que necessitei em todos os desafios da minha vida e com eles me proporcionar uma vida incrível e uma felicidade imensurável. O obrigado que tenho para vocês é infinito.

Muito, Muito, Obrigado!

Este trabalho de dissertação está enquadrado no projeto de IC&DT “newERA4GRIDs – *New Generation of Unified Power Conditioner with Advanced Control, Integrating Electric Mobility, Renewables, and Active Filtering Capabilities for the Power Grid Improvement*”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência PTDC/EEIEEE/30283/2017.

Este trabalho de dissertação está enquadrado no projeto de IC&DT “PV4SUSTAINABILITY *Photovoltaic system for sustainable irrigation of family agricultural production units and training of young people and women in boane district, maputo province*”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência 333203230.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# Resumo

A necessidade de proteger e preservar os (cada vez mais escassos) recursos não renováveis do planeta Terra, obriga a alterações na forma como os seres humanos exploram esses mesmos recursos. Devido ao uso massivo dos recursos não renováveis para produção de energia elétrica, tornou-se expressamente necessário explorar outras alternativas. Neste sentido, nesta dissertação de mestrado é apresentado um estudo técnico-económico do potencial para produção de energia elétrica por sistemas solares fotovoltaicos na Universidade do Minho.

As células fotovoltaicas presentes nos painéis solares são responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Proveniente deste processo, a saída apresentada é em corrente contínua (CC), sendo necessária a empregabilidade de eletrónica de potência, nomeadamente conversores CC-CC e CC-CA, para otimizar a extração de energia elétrica dos painéis solares fotovoltaicos, assim como obter corrente alternada (CA), de forma a possibilitar a ligação à rede elétrica. Em termos de controlo, o estágio de conversão CC-CC contempla um algoritmo de controlo denominado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que permite, a cada instante definido pelo sistema de controlo, a extração da máxima potência do sistema solar fotovoltaico. Adicionalmente, é necessário garantir que não ocorre redução da produção de energia por sombreamento e, para isso, este tópico foi cuidadosamente estudado e avaliado para que, na instalação dos sistemas propostos, tal condicionante não se verifique.

Com a evolução da tecnologia solar fotovoltaica, além da melhoria na eficiência dos módulos, é possível adquirir um sistema de geração de energia a um preço mais competitivo. Tal característica permite a realização de investimentos de maior volume com vista à desejada independência energética parcial, obtida após o retorno do investimento neste tipo de sistemas.

Esta dissertação foi desenvolvida em colaboração entre os Serviços Técnicos e o Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho.

**Palavras-Chave:** Energias Renováveis, Sistema Solar Fotovoltaico, MPPT, Estudo Técnico-Económico, Universidade do Minho.

# Abstract

The need to protect and preserve the (increasingly scarce) non-renewable resources on planet Earth, requires changes in the way human beings exploit these same resources. Due to the massive use of non-renewable resources for the production of electricity, it became expressly necessary to explore other alternatives. In this sense, this master's thesis presents a technical-economic study of the potential for the production of electric energy by solar photovoltaic systems at the University of Minho.

The photovoltaic cells present in the solar panels are responsible for converting solar energy into electrical energy through the photovoltaic effect. From this process, the output presented is in direct current (DC), requiring the use of power electronics, namely DC-CC and DC-AC converters, to optimize the extraction of electrical energy from photovoltaic solar panels, as well as obtaining current alternating (AC), in order to allow connection to the mains. In terms of control, the CC-CC conversion stage includes a control algorithm called Maximum Power Point Tracking (MPPT) that allows, at each instant defined by the control system, the extraction of the maximum power from the photovoltaic solar system. Additionally, it is necessary to ensure that there is no reduction in energy production by shading and, for this, this topic has been carefully studied and evaluated so that, in the installation of the proposed systems, this condition does not occur.

With the evolution of solar photovoltaic technology, in addition to improving the efficiency of the modules, it is possible to purchase a power generation system at a more competitive price. This feature allows for larger investments to be made with a view to the desired partial energy independence, obtained after the return on investment in this type of systems.

This dissertation was developed in collaboration between the Technical Services and the Department of Industrial Electronics at the University of Minho.

**Keywords:** Renewable Energies, Photovoltaic Solar System, MPPT, Technical-Economic Study, University of Minho.

# ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| Agradecimentos.....  | iii |
| Resumo .....   | v   |
| Abstract.....  | vi  |
| Lista de Figuras .....   | ix  |
| Lista de Tabelas.....  | xi  |
| Acrónimos e Siglas .....   | xii |
| Capítulo 1      Introdução .....   | 1   |
| 1.1    Enquadramento .....   | 1   |
| 1.2    Energia Solar Fotovoltaica em Portugal e no Mundo .....           | 2   |
| 1.2.1    Produção de Energia Solar.....                                  | 2   |
| 1.2.2    Instalações Solares Fotovoltaicas .....                         | 6   |
| 1.3    História da Evolução das Células Fotovoltaicas .....              | 10  |
| 1.4    Motivações .....  | 11  |
| 1.5    Objetivos da Dissertação .....                                    | 12  |
| 1.6    Organização da Dissertação.....                                   | 12  |
| Capítulo 2      Tecnologias Solares Fotovoltaicas .....                  | 14  |
| 2.1    Introdução .....  | 14  |
| 2.2    Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica .....       | 14  |
| 2.3    Modelo Elétrico Equivalente de uma Célula Fotovoltaica .....      | 15  |
| 2.4    Tecnologias Fotovoltaicas .....                                   | 17  |
| 2.4.1    Tecnologia de Primeira Geração.....                             | 17  |
| 2.4.2    Tecnologia de Segunda Geração.....                              | 19  |
| 2.4.3    Tecnologia de Terceira Geração .....                            | 21  |
| 2.5    Célula Fotovoltaica Transparente .....                            | 21  |
| 2.6    Conclusão.....  | 23  |
| Capítulo 3      Dimensionamento de Sistemas Solares Fotovoltaicos .....  | 25  |
| 3.1    Conversores de Eletrónica de Potência .....                       | 25  |
| 3.2    Algoritmos de Controlo MPPT .....                                 | 29  |
| 3.3    Orientação e Ângulo de Inclinação .....                           | 33  |
| 3.4    Comparativo entre Sistemas de Geração Solar Fixos e Móveis .....  | 34  |
| 3.5    Conclusão.....  | 36  |
| Capítulo 4      Aproveitamento da Área Útil dos Edifícios Propostos..... | 37  |
| 4.1    Introdução .....  | 37  |
| 4.2    Sistema de Ligação de Equipamentos.....                           | 37  |
| 4.3    Normas de Segurança .....   | 38  |
| 4.4    Planta do Campus de Azurém .....                                  | 39  |

|                      |   |    |
|----------------------|---|----|
| 4.5                  | Sombreamento Solar e Inclinação dos Painéis .....                 | 41 |
| 4.6                  | Conclusão.....  | 50 |
| Capítulo 5           | Análise das Soluções Solares Fotovoltaicas Sugeridas.....         | 52 |
| 5.1                  | Introdução .....  | 52 |
| 5.2                  | Solução Monocristalina .....                                      | 52 |
| 5.2.1                | Módulo Solar Fotovoltaico .....                                   | 53 |
| 5.2.2                | Orçamento do Equipamento para Instalação Solar Fotovoltaica ..... | 53 |
| 5.3                  | Solução Policristalina .....                                      | 56 |
| 5.4                  | Comparativo de Soluções .....                                     | 58 |
| 5.5                  | Conclusão.....  | 59 |
| Capítulo 6           | Expectativa de Retorno Financeiro.....                            | 61 |
| 6.1                  | Introdução .....  | 61 |
| 6.2                  | Software Solargis .....   | 61 |
| 6.3                  | Cálculo do Retorno Financeiro.....                                | 64 |
| 6.4                  | Conclusão.....  | 66 |
| Capítulo 7           | Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro .....                   | 68 |
| 7.1                  | Conclusões .....  | 68 |
| 7.2                  | Sugestões para Trabalho Futuro .....                              | 69 |
| Anexos               | .....   | 71 |
| Lista de Referências | .....   | 75 |



# Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 - Consumo mundial de energia renovável (Fonte: <i>Our world in data</i> , 2020, [3]).  | 3  |
| Figura 1-2 - Geração mundial de energia renovável (Fonte: <i>Our world in data</i> , 2020, [4]).  | 4  |
| Figura 1-3 - Geração de energia renovável em Portugal (Fonte: <i>Our world in data</i> , 2020, [4]).  | 5  |
| Figura 1-4 - Geração de energia solar em Portugal (Fonte: <i>Our world in data</i> , 2020, [6]).  | 5  |
| Figura 1-5 - Capacidade mundial instalada, energia solar (Fonte: <i>Our world in data</i> , 2020, [7]).   | 6  |
| Figura 1-6 - Central fotovoltaica de amareleja, Portugal. (Fonte: Portal da energia, 2008, [10]).   | 7  |
| Figura 1-7 - Central fotovoltaica desert tenger, China. (Fonte: Portal da energia, 2020, [14]).   | 9  |
| Figura 1-8 - Central fotovoltaica kurnool ultra mega solar park, Índia. (Fonte: Portal da energia, 2008, [15]).                                   | 9  |
| Figura 1-9 - Parque solar PV Villanueva, México (Fonte: Portal da Energia, 2020, [16]).   | 10 |
| Figura 2-1 - Representação de uma célula solar fotovoltaica.  | 15 |
| Figura 2-2 - Modelo equivalente da célula solar fotovoltaica.   | 16 |
| Figura 2-3 - Exemplo das tecnologias de primeira geração.   | 17 |
| Figura 2-4 - Imagem ilustrativa de uma célula solar com contactos enterrados ( Fonte : pveducation, 2020, [19]).                                  | 18 |
| Figura 2-5 - Tecnologia de segunda geração - Células de silício amorfo ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]).            | 19 |
| Figura 2-6 - Tecnologia de segunda geração - Células de telureto de cádmio ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]).        | 20 |
| Figura 2-7 - Tecnologia de segunda geração - Células de cobre-índio-gálio-selênio ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]). | 20 |
| Figura 2-8 - Amostra de uma célula solar fotovoltaica transparente (Fonte: MIT, 2020, [23]).  | 22 |
| Figura 2-9 - Fachada de células solares transparentes aplicadas em vidro num banco alemão, (Fonte: <i>Physee</i> ).                               | 23 |
| Figura 3-1 - Esquema de ligação em série.   | 26 |
| Figura 3-2 - Esquema da ligação em paralelo.  | 27 |
| Figura 3-3 - Curvas características de um módulo solar fotovoltaico (Fonte <i>Elsevier</i> [30]).   | 30 |
| Figura 3-4 -Exemplo de algoritmo de controlo.   | 32 |
| Figura 4-1 - Vista 3D do campus de Azurém.  | 39 |
| Figura 4-2 - Vista superior da planta do campus de Azurém.  | 40 |
| Figura 4-3 - Inclinação de inverno.   | 41 |
| Figura 4-4 - Dimensões de ocupação da área disponível, em planta e perfil (1995 x 1002 x 40mm).   | 42 |
| Figura 4-5 - Planta com 675 painéis solares fotovoltaicos nos edificios virados a Sul.  | 43 |
| Figura 4-6 - Dimensões de ocupação da área disponível , em planta e perfil (2008 x 1002 x 40mm).  | 44 |
| Figura 4-7 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 7.   | 45 |
| Figura 4-8 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 9.   | 45 |
| Figura 4-9 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 12 e 13.   | 46 |
| Figura 4-10 - Disposição dos painéis - Edifício 7.  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4-11 - Disposição dos painéis - Edifício 9. ....                           | 48 |
| Figura 4-12 - Disposição dos painéis - Edifício 12 e 13. ....                     | 49 |
| Figura 6-1 - Imagem topográfica da Universidade do Minho, software SOLARGIS. .... | 62 |
| Figura 6-2 - Imagem de satélite da Universidade do Minho, software SOLARGIS. .... | 62 |
| Figura 6-3 - Informação principal disponível na versão trial. ....                | 63 |
| Figura 6-4 - Informação adicional disponível na versão trial. ....                | 64 |

# Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparativo de alguns algoritmos de controlo MPPT[32]. .....     | 31 |
| Tabela 2 - Potência Instalada por Edifício. ....                            | 50 |
| Tabela 3 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 7.....     | 54 |
| Tabela 4 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 9.....     | 54 |
| Tabela 5 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 12. ....   | 55 |
| Tabela 6 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 13. ....   | 55 |
| Tabela 7 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica Total. ....         | 56 |
| Tabela 8 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica policristalina..... | 57 |

# Acrónimos e Siglas

| <b>Acrónimo / Sigla</b> | <b>Significado</b>  |
|-------------------------|---|
| ADC                     | <i>Analog-to-Digital-Converter</i> (Conversor de Analógico para Digital)                  |
| BIPV                    | <i>Building Integrated Photovoltaics</i> (Tecnologia Fotovoltaica Integrada em Edifícios) |
| CA                      | Corrente Alternada  |
| CC                      | Corrente Contínua   |
| D                       | <i>Duty-Cycle</i> (Ciclo de Trabalho, Fator de Ciclo)                                     |
| FER                     | Fontes de Energias Renováveis   |
| IEC                     | <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comité Eletrotécnico Internacional)     |
| MPP                     | <i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Potência Máximo)                                     |
| MPPT                    | <i>Maximum Power Point Tracking</i> (Procura do Ponto de Potência Máximo)                 |
| NIR                     | <i>Near Infrared Radiation</i> (Radiação Próxima da Infravermelho)                        |
| PWM                     | <i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)                            |
| UV                      | Ultravioleta  |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Atualmente, face aos problemas relacionados com a escassez de combustíveis fósseis, e devido também a uma maior consciencialização dos danos que advêm da poluição provocada pela queima deste tipo de combustíveis, cada vez mais, é dada maior ênfase a tecnologias de produção de energia com recurso a Fontes de Energia Renováveis (FER). Esta poluição gerada pela queima de combustíveis fósseis está consequentemente ligada a uma série de alterações climáticas como é o caso do aquecimento global, poluição do ar, chuva ácida, etc...

Assim sendo, a Universidade do Minho, com o objetivo de reduzir a sua pegada ecológica, tomou a iniciativa de realizar um estudo técnico-económico para produzir a sua própria energia com recurso a FER. Entre as diversas FER, a produção de energia solar fotovoltaica assume especial destaque, uma vez que é considerada uma fonte de energia ilimitada e também mais acessível para aplicação em edifícios públicos e privados. Não obstante, o processo de fabrico de um painel solar fotovoltaico gera poluição ainda que em pequena escala, motivo pelo qual esta FER não é considerada totalmente limpa. A longo prazo, também como desvantagem, destaque para a necessária reciclagem dos equipamentos em fim de vida útil, que, dependendo dos materiais de fabrico, pode constituir um maior ou menor problema sob o ponto de vista ambiental. Assim, os painéis fotovoltaicos baseados em silício requerem apenas o tratamento normal do vidro plano e nenhuma remoção específica da camada semicondutora.

As principais aplicações da energia solar fotovoltaica são as telecomunicações, bombeamento de água, iluminação pública, *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), agricultura, aquecimento de água, secagem de grãos, dessalinização de água, veículos espaciais, satélites, entre outros. Estando em constante evolução, esta tecnologia tem vindo a ser mais competitiva, não só em termos de aumento de eficiência, que é um fator

crítico na evolução destes sistemas, como também, no que diz respeito a uma das partes importantes de qualquer investimento, o custo.

Neste sentido, e como mencionado acima, os Serviços Técnicos solicitaram ao Departamento de Eletrónica Industrial, mais precisamente ao Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE), um estudo sobre o tema em questão visando uma perspetiva técnico-económica. Desta forma, esta dissertação de mestrado contempla um estudo técnico e económico do potencial fotovoltaico para produção de energia eléctrica por painéis solares fotovoltaicos na Universidade do Minho.

## **1.2 Energia Solar Fotovoltaica em Portugal e no Mundo**

Os aspetos negativos da exploração excessiva dos recursos não renováveis, mais concretamente a escassez dos combustíveis fósseis e a poluição gerada pela queima dos mesmos, levou a que vários países sejam forçados a adotar novos métodos de produção de energia que apresentem baixas repercussões sob o ponto de vista ambiental e que, ao mesmo tempo, sejam economicamente viáveis. A par disto, a contínua evolução da tecnologia solar fotovoltaica permitiu a vários países a possibilidade de serem mais proactivos no processo de descarbonização que faz parte do roteiro para a neutralidade carbónica (RNC2050). A produção de energia eléctrica recorrendo à radiação solar é considerada pouco poluente, uma vez que, como referido, somente o processo de fabrico dos componentes é ambientalmente prejudicial, ainda que não contribua para o agravamento do aquecimento global [1]. A União Europeia definiu metas para os países que fazem parte da mesma, que visam reduzir as emissões de poluição para a atmosfera, onde os governos analisam a sua pegada ecológica e definem regras para o crescimento energético a par do crescimento da indústria energética, permitindo assim reduzir os impactos do aquecimento global a longo prazo [2].

### **1.2.1 Produção de Energia Solar**

Para uma melhor compreensão deste subtópico, são apresentados gráficos e mapas que retratam a evolução histórica da produção de energia solar no Mundo e em Portugal desde 1965. Primeiramente, serão apresentadas figuras com informações relativas à produção de energia eléctrica com recurso a radiação solar face a outras FER, sendo apresentado um

comparativo entre estas. Posteriormente, o foco é na informação exclusiva da energia solar e consequente produção de energia elétrica. A Figura 1-1 retrata a totalidade de energia renovável consumida em todo o mundo com um total de 18 138,73 TWh de consumo total de energia gerada com recurso a renováveis no mundo, cerca de 61% pertencem a biocombustíveis tradicionais com um consumo anual de 11 111,00 TWh. A energia hídrica e a eólica surgem no gráfico com 4 222,21 TWh e 1 429,62 TWh respetivamente. A energia solar, tema desta dissertação de mestrado, representa cerca de 4 % da energia renovável consumida no mundo, com 724,09 TWh. Na Figura 1-2, o gráfico é apresentado sem a contribuição dos biocombustíveis, pois este trata da geração de combustível através de biomassa que é um processo poluente embora a poluição gerada não contribui para o efeito de estufa. Retirando a energia consumida dos biocombustíveis do gráfico em questão é possível focar o recurso em foco neste documento, permitindo observar o crescimento considerável da energia solar fotovoltaica desde 2010. A informação recolhida para estas figuras da *Our world in data* são consultas de dados em 2020, no entanto, só é possível observar informação até 2019 (dados anuais completos).

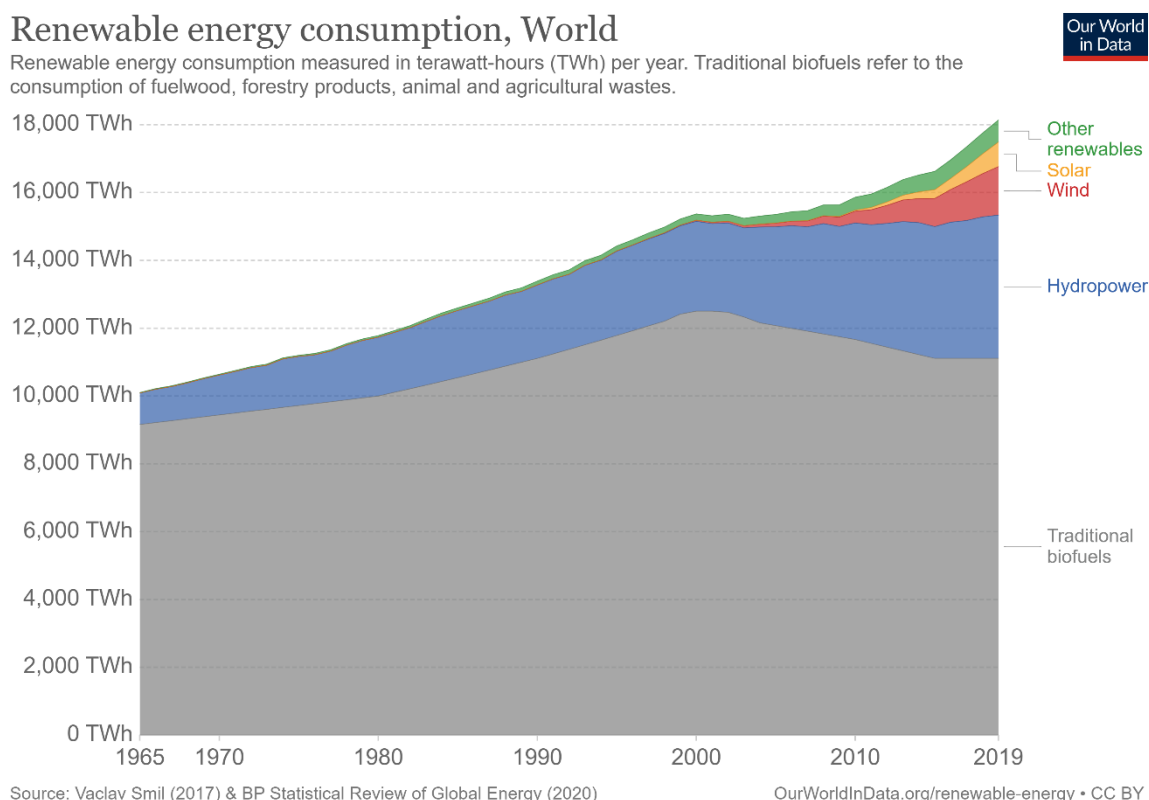


Figura 1-1 - Consumo mundial de energia renovável (Fonte: *Our world in data*, 2020, [3]).

## Renewable energy generation, World

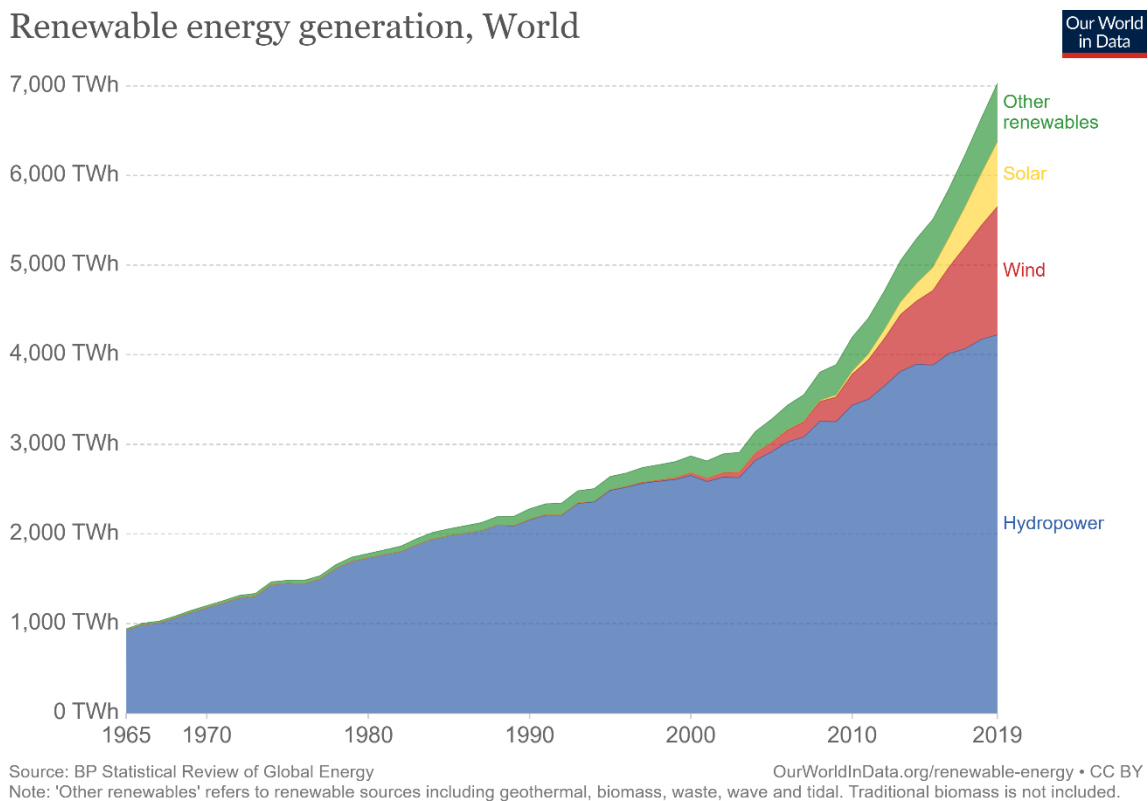


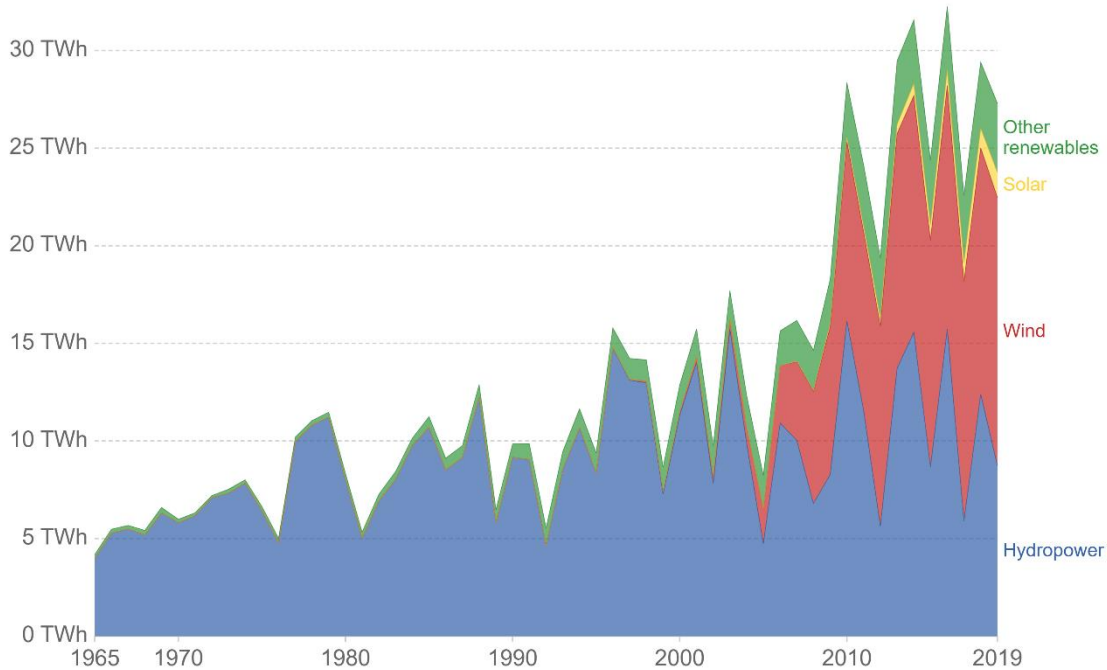
Figura 1-2 - Geração mundial de energia renovável (Fonte: *Our world in data*, 2020, [4]).

Em Portugal a produção de energia com recurso a FER no ano de 2019 foi de, aproximadamente, 27 TWh (Figura 1-3), um valor que coloca o país entre os 12 países que geram mais energia de fontes de energia renováveis [3].

Dos 27 TWh produzidos por Portugal, apenas 1,27 TWh correspondem a energia solar, já a eólica e a hídrica produzem, respetivamente, 13,74 TWh e 8,74 TWh. Observando a Figura 1-4 é possível denotar o crescimento rápido da geração de energia solar em Portugal, tanto que, em 2006 a capacidade de produção era inferior a 0,01 TWh, e em 2010 já apresentava valores na ordem dos 0,2 TWh, denotando-se um aumento exponencial na época referida. Em 2015, Portugal quadruplica a produção desta energia para 0,8 TWh, face ao ano de 2010, acabando o ano de 2019 com 1,27 TWh produzidos.



## Renewable energy generation, Portugal



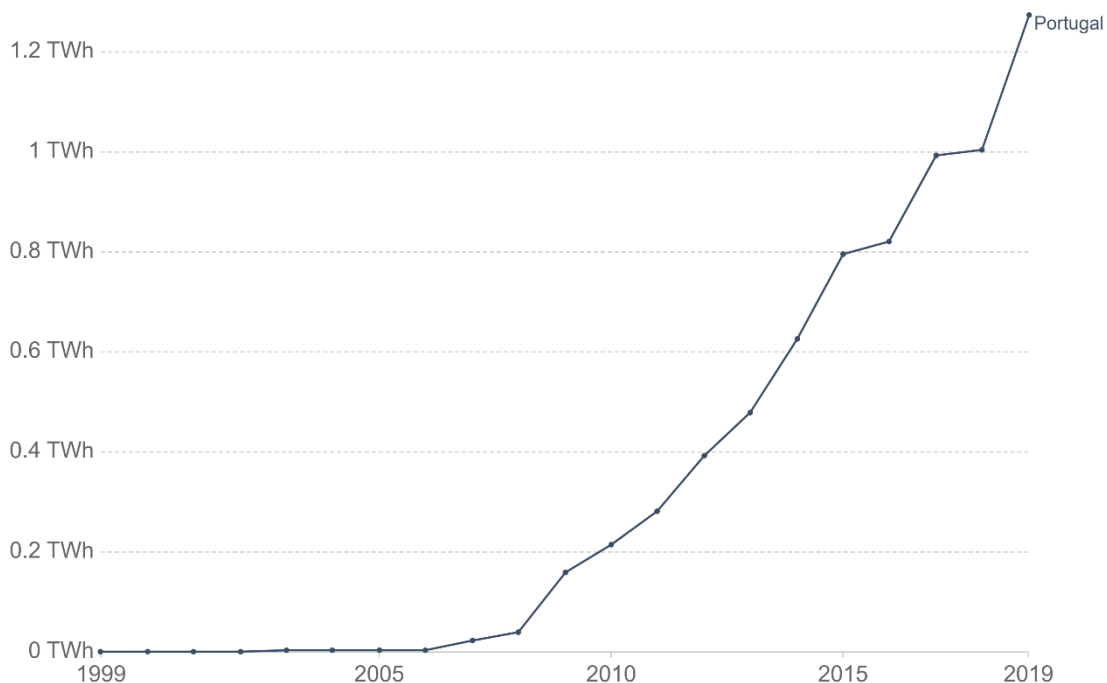
Source: BP Statistical Review of Global Energy  
 OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY  
 Note: 'Other renewables' refers to renewable sources including geothermal, biomass, waste, wave and tidal. Traditional biomass is not included.

Figura 1-3 - Geração de energia renovável em Portugal (Fonte: *Our world in data*, 2020, [4]).

## Solar power generation



Electricity generation from solar, measured in terawatt-hours (TWh) per year.



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember  
 OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

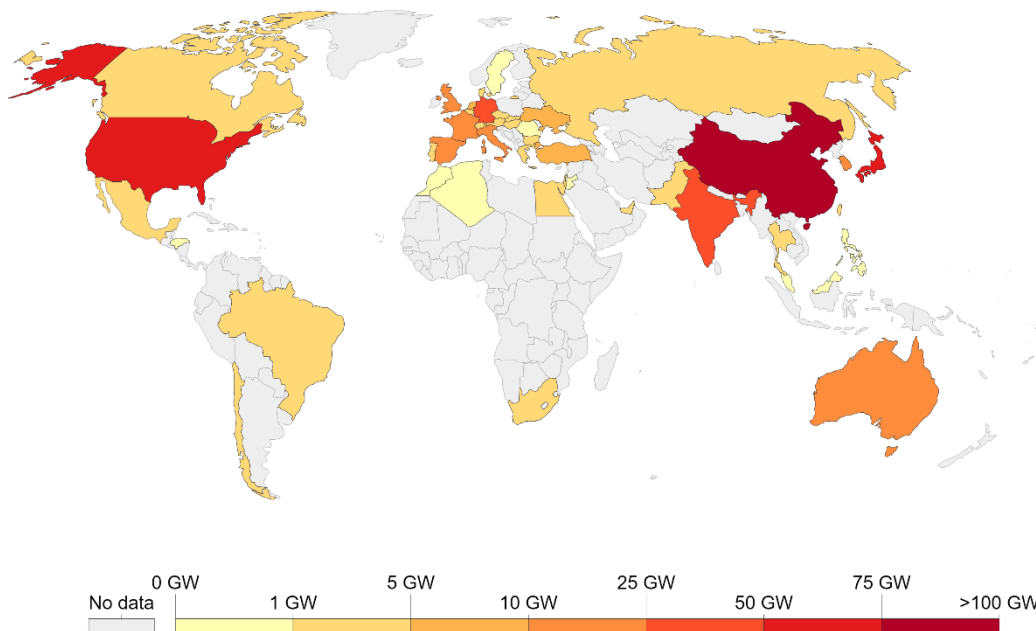
Figura 1-4 - Geração de energia solar em Portugal (Fonte: *Our world in data*, 2020, [6]).

## 1.2.2 Instalações Solares Fotovoltaicas

Neste tópico, é apresentada a potência instalada no mundo, onde estão coloridos os países de acordo com a escala da figura seguinte. Aliado ao facto de redução da pegada ambiental, existe alguma competitividade em conseguir a maior produção energética fotovoltaica no mundo e pela observação da Figura 1-5 é possível concluir que, em 2019, a China lidera a tabela com 205,59 GW de potência total instalada, seguidamente vem a Índia com apenas 35,06 GW. Em terceiro aparece a Espanha com 11,06 GW. Seguidamente na classificação vem o México, o Chile e o Brasil, que respetivamente apresentam 4,44 GW, 2,65 GW e 2,48 GW de potência total instalada.

### Installed solar energy capacity, 2019

Cumulative installed solar capacity, measured in gigawatts (GW).



Source: BP Statistical Review of Global Energy (2020)

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Figura 1-5 - Capacidade mundial instalada, energia solar (Fonte: *Our world in data*, 2020, [7]).

## Centrais de Produção de Energia Solar em Portugal

Para aproveitar as muitas horas de sol a que o país está exposto e a excelente radiação solar a que está submetido (aspetos promissores para o desenvolvimento de energia solar fotovoltaica), existe uma notória aposta em centrais solares, mas também por apelo da UE para a redução de pegada ambiental, regra aplicada a todos os países da UE. Só no ano de

2019, foram construídas em Portugal, 19 novas centrais solares fotovoltaicas, com um investimento de vários setores, privado, nacional e internacional, que rondou os 350 milhões de euros, sendo que 200 milhões são unicamente para o projeto de maior dimensão em Alcoutim, denominado Solara4 [4]. Este projeto ocupará uma área de 400 hectares e produzirá anualmente cerca de 383 GWh de energia elétrica, o suficiente para abastecer uma cidade com 130 mil habitantes, com base num consumo médio por habitação.

No que diz respeito a centrais de maior produção de energia em Portugal, a central fotovoltaica de Amareleja, situada no concelho de Moura (Beja), com uma potência instalada de 46,41 MW, produz cerca de 93 GWh por ano, sendo suficiente para abastecer 30 mil habitações. Esta, conta com uma área de 250 hectares, e contém 2520 seguidores solares, cada um com 104 painéis fotovoltaicos. Em 2008, foi a maior central do mundo, tanto em potência instalada como em capacidade de produção [5].



Figura 1-6 - Central fotovoltaica de amareleja, Portugal. (Fonte: Portal da energia, 2008, [10]).

Num futuro próximo, estando neste momento em licenciamento, será construída a central fotovoltaica de Santas, projeto liderado pela empresa Akuo Renováveis Portugal. Este projeto consiste num total de 444 mil painéis solares fotovoltaicos, de 405 W cada, um investimento que se estima rondar os 100 milhões de euros. Esta central está planificada para ser construída no Alentejo, ocupando cerca de 350 hectares, mais 100 hectares que a maior existente de momento, nas herdades de Santas e da Penuzinha, entre os concelhos de Monforte e Borba. Este projeto terá uma potência instalada de 370 MW e além deste

projeto, existem também já licenciados um com 149 MW da Iberdrola, e outro com 168 MW da Aurapower [6].

Com esta informação, é possível verificar que, só este ano, foram licenciados 687 MW de capacidade de produção de energia, representando 14 vezes mais produção que no parque da central de Amareleja. Isto demonstra a evolução tecnológica dos painéis que já produzem cerca de 400 W por módulo solar, quase o dobro da tecnologia existente na altura, conseguindo assim, com metade do espaço produzir a mesma energia, contribuindo assim para o aumento do benefício por metro quadrado de terreno.

A mais recente candidatura de licenciamento para a maior central fotovoltaica em Portugal deu entrada na Câmara Municipal de Castelo de Vide, com previsão de investimento de 120 milhões de euros e ocupando 400 hectares. Esta central prevê armazenamento de energia e, em caso de aprovação, passará a ser a maior central fotovoltaica do país com 700 000 painéis solares fotovoltaicos com capacidade para produzir energia para 160 mil habitações [7].

## **Centrais de Produção de Energia Solar no Mundo**

Até 1996, os Estados Unidos lideravam com a maior instalação fotovoltaica no mundo, uma vez que, já nesta época contavam com uma potência total instalada de 77 MW. Foram depois superados pelo Japão que manteve a liderança até 2005, data em que foi ultrapassado pela Alemanha. Em 2015, a ainda líder Alemanha, contava com uma potência instalada de 40 GW. Neste momento, após um crescimento enorme, a China é atualmente líder na produção de energia fotovoltaica.

O maior parque fotovoltaico do mundo é o Solar Desert Tenger, localizado na China e construído no início de 2012. Esta construção só foi concluída em 2015, ficando ativo apenas em 2016. Este parque tem uma área de 1200 km<sup>2</sup>, ou seja, 120 mil hectares e produz um total de 1547 MW [8].



Figura 1-7 - Central fotovoltaica desert tener, China. (Fonte: Portal da energia, 2020, [14]).

No segundo lugar, relativamente à capacidade de produção encontra-se o Parque Solar Kurnool Ultra Mega, localizado na Índia e com capacidade para produzir 1000 MW de energia. Este parque ficou ativo no dia 28 de abril de 2018 [15].



Figura 1-8 - Central fotovoltaica kurnool ultra mega solar park, Índia. (Fonte: Portal da energia, 2008, [15]).

A China conta com o terceiro e quarto maior parque do mundo, o primeiro chamado Solar Datong também com 1000 MW potência instalada e segundo denominado por Parque Solar Longyangxia Hydro com 850 MW de potência instalada [8].

O quinto maior parque do mundo, e maior parque da América Latina, é o Parque Solar PV Villanueva com 830 MW de potência instalada, localizado, mais precisamente, em Viesca no México. Encontra-se em operação também desde 2018, demonstrando o crescimento exponencial nos últimos anos devido à evolução das tecnologias solares fotovoltaicas e consequente mercado mais competitivo.



Figura 1-9 - Parque solar PV Villanueva, México (Fonte: Portal da Energia, 2020, [16]).

### 1.3 História da Evolução das Células Fotovoltaicas

O efeito fotovoltaico consiste na emissão de elétrons, normalmente através de um material metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética suficientemente alta, no caso a radiação ultravioleta proveniente do sol. Este efeito foi observado pela primeira vez no ano de 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que constatou que duas placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à radiação solar [9].

Contudo, somente no ano de 1883 é que a primeira célula solar fotovoltaica foi fabricada, uma amostra de selênio semicondutor coberto com pó de ouro, criada por Charles Fritts. Esta célula apresentava uma eficiência inferior a 1 %, mas era suficiente para comprovar a capacidade de se produzir energia elétrica a partir de uma célula fotovoltaica [10]. Na primeira metade do século XX, mais precisamente em 1905, Albert Einstein explica a

natureza da luz e o efeito fotoelétrico que lhe valeu mais tarde um prémio nobel da física [11].

Em 1953, Calvin Fuller, um químico da *Bell Laboratories*, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, denominado de processo de dopagem, produzindo uma barra de silício dopado com uma pequena amostra de gálio, que o torna condutor, obtendo cargas tipo P [12]. Juntamente com o físico Gerald Pearson, mergulhou a barra produzida num banho quente de lítio, criando assim uma superfície com excesso de eletrões livres portadores de cargas tipo N. Na região de contacto entre as cargas tipo N e tipo P, surge um campo elétrico permanente (junção PN). Esta célula apresentava eficiência de 4 %, valor bastante superior ao valor obtido pela célula de selénio já existente.

Com vista ao aumento da eficiência, os físicos da *Bell Laboratories* testaram a substituição de gálio por arsénio, formando um substrato tipo N e uma difusão de boro para a zona tipo P. Estas novas células atingiram uma eficiência recorde de 6 %.

Após autorização do Pentágono, estes resultados foram apresentados na reunião anual da *National Academy of Sciences*, em Washington, e anunciada numa conferência de imprensa no dia 25 de Abril de 1954, sendo publicados no *Journal of applied Physics* [13] e registada uma patente [14].

## 1.4 Motivações

A geração de energia através de uma fonte de energia ilimitada, como é o caso da energia solar, aliada à redução da pegada ecológica no planeta Terra, só por si, já é um grande motivo para criar interesse e dedicação na realização desta dissertação de mestrado.

Sendo este projeto um estudo técnico e económico do potencial para produção de energia solar fotovoltaica, na Universidade do Minho, mais concretamente em Azurém, onde o autor do documento passou pelo seu percurso académico e viveu uma das maiores experiências da sua vida e aliado à possibilidade de aquisição de conhecimento em várias áreas de interesse para o mesmo, são dois dos mais fortes motivos para encarar este trabalho como uma mais valia para o seu começo no mundo da engenharia. Outro motivo aliciante passa pela possibilidade de contribuir embora em pequena escala face ao consumo energético do planeta, para um bem maior para todo o planeta e todos que nele habitam,

reduzindo o consumo de energia da Universidade do Minho no que concerne a fontes de energias fósseis.

Em suma, a razão do interesse neste projeto deve-se à possibilidade de contribuir para a independência energética da Universidade do Minho, bem como para o aumento de produção de energia com recurso a fontes renováveis, diminuindo assim o consumo de energia proveniente de fontes de combustíveis fósseis.

## **1.5 Objetivos da Dissertação**

Para ser possível alcançar o objetivo principal desta dissertação de mestrado, que passa pelo estudo técnico-económico do potencial para produção de energia por sistemas solares fotovoltaicos na Universidade do Minho que culminará numa instalação solar fotovoltaica mais apropriada para as coberturas dos edifícios da Universidade do Minho, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Análise do corrente estado de mercado e da tecnologia existente relativamente a energia solar fotovoltaica sob a forma teórica com base em informações validadas, conseguindo assim criar um estado da arte do tema desta dissertação de mestrado;
- Gestão da área útil dos edifícios, permitindo a colocação dos painéis nas coberturas de forma mais eficiente e respeitando certas regras de segurança e qualidade da produção de energia;
- Análise de soluções empresariais, debatidas de acordo com o conhecimento adquirido sobre instalações solares fotovoltaicas;
- Cálculo da expectativa de retorno financeiro do investimento neste projeto, permitindo assim determinar o momento em que o custo de aquisição e instalação do sistema solar fotovoltaico fica liquidado com a energia produzida pelos painéis.

## **1.6 Organização da Dissertação**

Esta dissertação de mestrado apresenta-se repartida em 6 capítulos.

No Capítulo, 1 ao qual pertence este subtópico, é feito um enquadramento da origem deste projeto, são descritas as motivações que levaram à elaboração deste documento e projeto, são identificados os objetivos e, por fim, é explicada a organização deste documento. É



também abordado o estado atual da produção de energia solar de Portugal e do Mundo, comparando o crescimento anual em cada um dos casos. Posteriormente, são indicadas as maiores instalações solares fotovoltaicas do mundo, onde Portugal tem o seu destaque, nas suas dimensões. Por fim é abordada a história da evolução da célula solar fotovoltaica, uma temática que visa introduzir a base da geração da energia solar fotovoltaica e auxiliar uma melhor compreensão dos capítulos seguintes.

No Capítulo 2 e 3, é definido o ponto de partida para o estudo proposto que resulta da união entre o, conhecimento do autor do documento e de toda a pesquisa efetuada sobre o estado da arte relacionado com o tema desta dissertação de mestrado e é disponibilizada a informação de forma clara permitindo a compreensão das bases do tema para a realização deste documento.

No Capítulo 4, como o título do capítulo assim o indica, é estudada a gestão da área útil das coberturas sugeridas pelos Serviços Técnicos da Universidade do Minho, permitindo assim a distribuição dos painéis solares fotovoltaicos de acordo com os cálculos das áreas de sombreamento estabelecidas como mais viáveis. É apresentada uma proposta de acordo com as autorizações dadas, e uma outra de acordo com a previsão de possíveis inconvenientes na instalação devido a erros fora do alcance do autor deste documento.

No Capítulo 5, é apresentado o resultado da cooperação entre o conhecimento adquirido pelo autor ao longo do seu percurso académico com as informações recolhidas junto de empresas portuguesas da área das instalações solares fotovoltaicas, uma medida que permite a manutenção do investimento dentro do próprio país.

No Capítulo 6, é feita a análise dos consumos energéticos da Universidade do Minho para poder apresentar uma estimativa de retorno financeiro do investimento face à energia consumida, que quanto maior o valor da mesma, menor será o tempo de recuperação do investimento. Contudo, é importante referir que esta situação se restringe com o facto de este sistema ser para consumo instantâneo durante as horas de incidência solar, não contemplando um sistema de baterias para armazenamento de energia elétrica.

No Capítulo 7, são obtidas as conclusões sobre o trabalho realizado e são apresentadas as sugestões de melhorias futuras.

# Capítulo 2

## Tecnologias Solares Fotovoltaicas

### 2.1 Introdução

Das diversas FER, a energia solar fotovoltaica assume especial destaque, uma vez que é ilimitada e permite obter energia sem poluir significativamente a atmosfera. Desta forma, as tecnologias de produção de energia solar fotovoltaica têm sido alvo de evolução constante, melhorando as já existentes e testando novas formas de produzir energia elétrica através da radiação solar.

Neste capítulo é apresentado o estado da arte mais relevante sobre as tecnologias de produção de energia solar fotovoltaica, principal tema desta dissertação de mestrado. É importante referir que a abordagem apresentada é exclusivamente da componente teórica das mesmas.

### 2.2 Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são um equipamento capaz de converter energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Este efeito consiste na excitação de um eletrão do semicondutor presente na célula devido à incidência de fotões na célula. Este semicondutor apresenta uma camada do tipo N e uma do tipo P, onde os eletrões livres do semicondutor tipo N migram para o semicondutor tipo P, para ocuparem as lacunas causadas pela excitação de eletrões, o que provocará um fluxo de eletrões responsável pela criação de uma diferença de potencial.

Como os eletrões excitados podem passar a barreira do semicondutor (junção – PN), mas não podem dirigir-se no sentido contrário, é gerado um desequilíbrio de cargas entre os semicondutores. Para colmatar este desequilíbrio, é criado o caminho desejado com um circuito externo para assim os eletrões poderem voltar ao semicondutor tipo p para

colmatar as lacunas existentes, gerando corrente enquanto existir luz a incidir nas células. Assim, para construir uma célula fotovoltaica, são aplicados condutores metálicos nas extremidades dos semicondutores para ser criada a diferença de potencial e, assim, permitir o fluxo de elétrons responsável pela geração de energia.

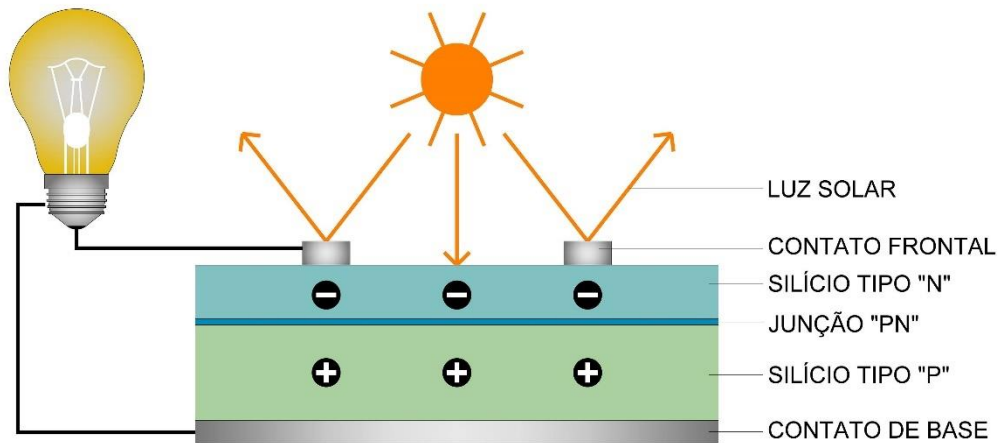


Figura 2-1 - Representação de uma célula solar fotovoltaica.

### 2.3 Modelo Elétrico Equivalente de uma Célula Fotovoltaica

As células solares fotovoltaicas, são constituídas por semicondutores que quando estão expostos a radiação solar, é gerada uma corrente proporcional à radiação recebida devido ao fluxo do movimento das cargas entre os semicondutores, pois com a excitação dos elétrons livres do semicondutor são criadas lacunas que devem ser colmatadas para não haver desequilíbrio entre as cargas. A célula solar ideal não é nada mais do que uma fonte de corrente e um díodo em paralelo, bastando não consideraras resistências da Figura 2-2. Os módulos solares fotovoltaicos são constituídos por várias células para que, em caso de sombreamento parcial ou sujidade, não seja comprometido o total funcionamento do painel. Para melhor compreensão foram estudados modelos que representam eletricamente o funcionamento de um modulo solar fotovoltaico.

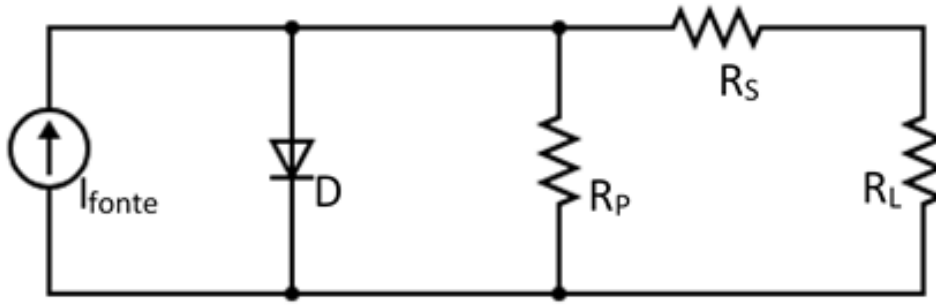


Figura 2-2 - Modelo equivalente da célula solar fotovoltaica.

Analisando este modelo, é possível compreender melhor como é possível calcular os seus valores de corrente e tensão. A resistência  $R_p$  representa perdas associadas à junção PN do semicondutor,  $R_s$  representa as perdas associadas a resistividade do material semicondutor e o diodo representa o movimento dos elétrons que estão a reorganizar devido ao efeito fotovoltaico [15].

Aplicando a 1ª Lei de *Kirchhoff* (Lei das Correntes ou Lei dos Nós) obtém-se a seguinte equação para a corrente de saída.

$$I_L = I_{fonte} - I_D - I_p \quad (1)$$

A corrente inversa de saturação do diodo contempla a seguinte fórmula que depois é necessária para a equação da corrente de saída completa da célula.

$$I_D = I_{sat} \left( e^{\frac{V_L + R_s I_L}{n N_{sc} V_t}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I_L = I_{fonte} - I_{sat} \left( e^{\frac{V_L + R_s I_L}{n N_{sc} V_t}} - 1 \right) - \frac{V_L + R_s V_L}{R_p} \quad (3)$$

$V_L$  e  $I_L$  representam, respetivamente, a tensão e corrente de saída da célula que, no modelo, tem uma resistência,  $R_L$ , representativa da carga. A variável  $I_{fonte}$ , representa a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico,  $V_t$ , representa tensão térmica ( $Kt/q$ ), onde  $k$  é a constante de *Boltzmann* e  $n$  o fator do diodo (ideal),  $q$  é a carga do elétron e  $T$  é a temperatura de funcionamento da célula. tratada em Kelvin.

## 2.4 Tecnologias Fotovoltaicas

No decorrer da evolução das energias renováveis, surge naturalmente um aperfeiçoamento e descoberta de novas tecnologias fotovoltaicas. Assim, na última década, separados por gerações, os tipos de células solares fotovoltaicas existentes no mercado, estão apresentados nos seguintes subtópicos.

### 2.4.1 Tecnologia de Primeira Geração

A primeira geração de células fotovoltaicas é composta pelas células de silício cristalino, sendo esta a geração predominante com cerca de 80 % do mercado mundial [16]. Nesta primeira geração, são dois os tipos de células utilizados, silício monocristalino (c-Si) e o silício policristalino (p-Si). Estes dois tipos de célula destacam-se pela sua eficiência e custo de produção. No caso do silício monocristalino as células fotovoltaicas são obtidas através do corte de um lingote de silício puro monocristal com uma pureza muito próxima dos 100 %, o que torna o seu custo de produção elevado. Estas, apresentam uma eficiência variável na ordem dos 16-24 % e a maior longevidade [16]. Já as células de silício policristalino (p-Si), são provenientes de um lingote de silício com um grau de pureza bem inferior (contendo múltiplos cristais) e, assim sendo, apresentam um custo de produção associado mais baixo e uma eficiência variável na ordem dos 14-18 %.

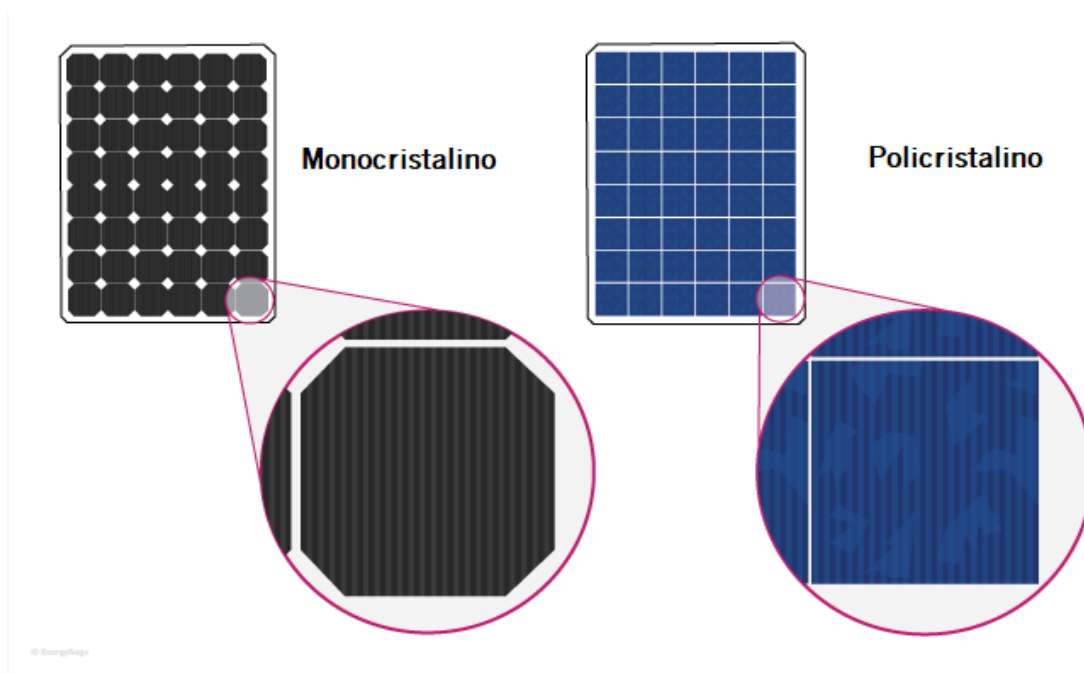


Figura 2-3 - Exemplo das tecnologias de primeira geração.

No que concerne aos processos de fabrico destas células, com o aumento do domínio da tecnologia, os seguintes exemplos são considerados os mais promissores:

- Contactos enterrados (*Buried Contacts*): esta tecnologia visa eliminar o sombreamento causado pelos contactos da parte superior da célula (parte exposta à radiação) enterrando os contactos diretamente na camada de Silício através de sulcos feitos a laser, tecnologia que permite obter eficiências na ordem dos 25 % [17][18].

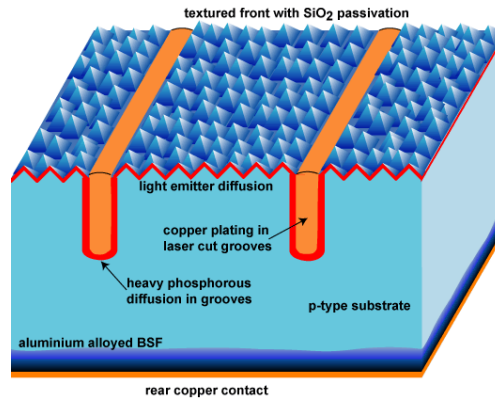


Figura 2-4 - Imagem ilustrativa de uma célula solar com contactos enterrados ( Fonte : pveducation, 2020, [19]).

- Contactos na parte inferior da célula: os contactos da superfície superior são removidos na totalidade para a parte inferior, aumentando assim a exposição da célula à radiação solar permitindo aumentar o número de fótons incidentes na superfície. O aumento de fótons aumenta, conseqüentemente, o número de elétrons para o estado de excitação, levando implicitamente a uma maior produção de energia.
- Texturização da superfície: processo que visa reduzir as perdas por reflexão para os ângulos de incidência maiores (início e fim do dia).
- Heterojunções: esta tecnologia é uma aproximação das tecnologias de 2ª geração (películas finas), que consiste em utilizar uma camada fina monocristalina no meio de camadas ultrafinas de silício amorfo, o que permite diminuir a espessura da célula bem como melhorar a sua eficiência.

## 2.4.2 Tecnologia de Segunda Geração

A segunda geração de materiais fotovoltaicos é constituída por películas finas [19], onde as células fotovoltaicas estão entre os 6 a 10 micrómetros. Estas dimensões de célula permitem reduzir a quantidade de matérias primas necessárias à produção das células, reduzindo desta forma o custo de produção devido ao facto de ser necessária menos energia para a sua produção, contribuindo assim positivamente para o planeta. Associado a um custo de produção menor, a eficiência destas células também é menor quando comparado com as de 1ª geração. Adicionalmente, pelo facto de apresentarem menor massa, são mais adaptáveis, permitindo colocá-las em materiais mais flexíveis, como os têxteis, plásticos ou integração direta nos edifícios. As células em destaque são:

- Células de Silício Amorfo (a-Si): considerada uma das tecnologias mais antigas de película fina. São uma forma de silício sem a estrutura cristalina, devido ao processo de fabrico onde o silício amorfo é depositado em substratos de vidro e coberto com uma camada transparente de TCO um óxido condutor. Contudo, foi verificado que ocorre uma degradação destas células quando expostas à luz, podendo levar ao aparecimento de defeitos estruturais e, conseqüentemente, afetar quedas na eficiência energética na gama de 7 a 8 % [19]. Por outro lado, a flexibilidade das células permite que sejam aplicadas sobre uma vasta gama de substratos, quer sejam rígidos ou flexíveis.



Figura 2-5 - Tecnologia de segunda geração - Células de silício amorfo ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]).

- Células de Telureto de Cádmio (CdTe): capazes de apresentar um rendimento elétrico próximo dos 11 %. As desvantagens deste tipo de células são, essencialmente, o uso de um componente tóxico, no seu fabrico cujo se encontra na lista dos 6 materiais

mais fatais e tóxicos conhecidos, o Cádmio, e a pouca abundância do Telúrio no nosso planeta, limitando assim a sua produção em larga escala [17][19].

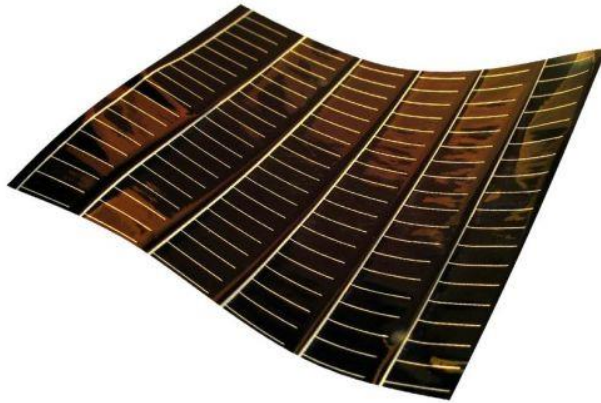


Figura 2-6 - Tecnologia de segunda geração - Células de telureto de cádmio ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]).

- Células de Cobre-Índio-Selênio (CIS) e de Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS): consideradas as células de película fina mais promissoras pois são as que apresentam melhor eficiência da sua geração, com valores entre 7 % e 12 %. Contudo, o processo de fabrico é complexo e o facto de na sua constituição ter presente o Índio, que é um recurso limitado (também é utilizado na indústria dos LCD), leva a que este mantenha um preço elevado.

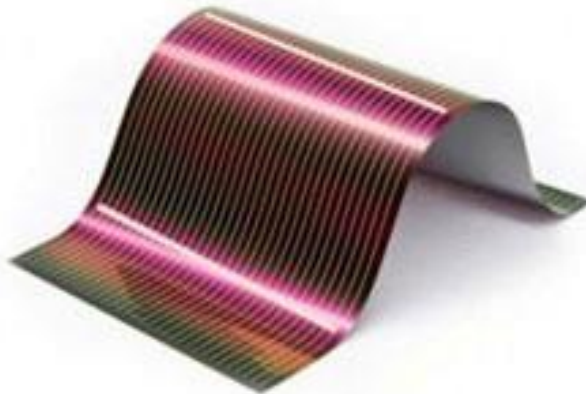


Figura 2-7 - Tecnologia de segunda geração - Células de cobre-índio-gálio-selênio ( Fonte :Solar integrated sustainable architecture, 2020,[20]).

- Célula de Silício micro Amorfo ( $\mu$ -Si): designadas por células híbridas, são formadas a partir da junção de células de silício microcristalino com células de silício amorfo depositadas num substrato. Tendo em conta o seu processo de fabrico, estas células permitem ter menos problemas de instabilidade em relação às células do silício



amorfo e, além disso, permitem uma maior absorção espectral, motivo pelo qual a sua eficiência esteja situada na ordem dos 10 % [16].

### 2.4.3 Tecnologia de Terceira Geração

A tecnologia abrangida nesta tipologia ainda se encontra em fase experimental (sobretudo na área espacial), mas estudos teóricos revelam que estas podem atingir grande eficiência e custos de produção muito menores face às duas gerações anteriormente referidas. No entanto, o seu processo de desenvolvimento pode ser demoroso e não atingir os valores desejados num futuro próximo. As células com maior relevo na aplicação desta tecnologia são:

- Células Sensibilizadas por Corantes (*Dye sensitized*) também designadas por células de Gratzel, baseadas num mecanismo foto-electro-químico rápido e regenerativo. Este tipo de células são constituídas por um eléctrodo de Dióxido de Titânio (TiO<sub>2</sub>) com corante, uma característica que, entre outras, leva a que a sua produção tenha um custo relativamente baixo.
- Células Orgânicas: compostas por materiais orgânicos, como dadores e recetores de electrões e lacunas, levando a que a sua eficiência seja capaz de atingir os 8 %. Tem a vantagem de usar materiais económicos, mas, por outro lado, necessita de ter uma área maior para atingir níveis de potência semelhantes ao das restantes tecnologias.

## 2.5 Célula Fotovoltaica Transparente

Uma das tecnologias mais vanguardistas do mercado atual são os painéis solares transparentes, pertencendo ao grupo dos semicondutores orgânicos [21]. Estes, consistem na manipulação dos semicondutores para uma gama de específica do espectro solar, combinando dois tipos de materiais orgânicos, um dador e um passivo que aceita a combinação do dador de características. A viabilidade de aplicação desta tecnologia já tem provas de sucesso [22], no entanto como qualquer tecnologia vanguardista não apresenta preços apelativos a investimento por parte da grande maioria das empresas. A substituição de vidros dos edifícios por esta tecnologia é algo inevitável pois, aliado à produção de energia, tem como vantagem o facto de reduzir a quantidade de calor da parte interior dos

edifícios nos meses mais quentes, reduzindo assim parcialmente, o enorme consumo dos edifícios em arrefecimento.

A Figura 2-8 representa uma célula solar fotovoltaica transparente, especificando os seus constituintes e o seu princípio de operação. A camada mais grossa (localizada à esquerda na figura 2-8) pode ser vidro, plástico ou outro substrato transparente ficando a parte mais á direita da figura para as múltiplas camadas onde realmente ocorre o efeito fotoelétrico. Sendo constituída por duas camadas ativas, o material semiconductor que fica em estado de excitação molecular através da incidência de radiação solar, criando um campo elétrico que gera o fluxo de energia. Em ambos os lados destas camadas estão eléctrodos transparentes que servem para ligar ao circuito externo de energia, transportando a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico para este. Como os eléctrodos são transparentes, é necessário filtrar alguns comprimentos de onda da radiação incidente. refletindo-os. De forma a ser conseguida a reflexão, é adicionada uma camada logo após as camadas ativas, que são aquelas onde ocorre o efeito fotoelétrico, refletindo raios UV (Ultravioleta) e NIR (*Near Infrared Radiation*). Por fim, podem ser utilizados revestimentos anti refletores nos dois lados das camadas exteriores para reduzir reflexões pois a parte refletida não atravessa a célula[23].

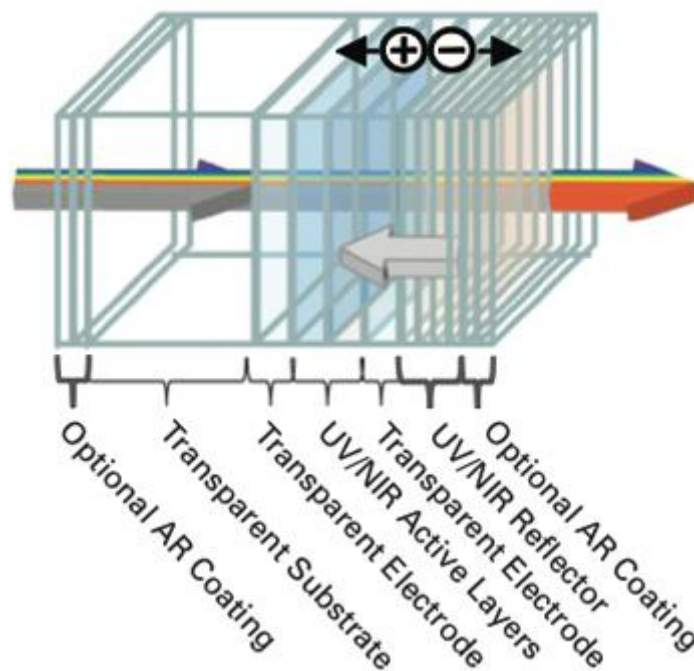


Figura 2-8 - Amostra de uma célula solar fotovoltaica transparente (Fonte: MIT, 2020, [23]).

Os pioneiros desta tecnologia foram os investigadores da *Michigan State University* e do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), bem como fabricantes como *Ubiquitous Energy*, *Physee* e *Brite Solar*. A empresa *Ubiquitous Energy*, em parceria com um fabricante líder em produção de vidro *NSG Group*, encontram-se em desenvolvimento da tecnologia exclusiva da *Ubiquitous Energy* denominada *ClearView Power*. Pretende-se que a mesma seja integrada diretamente em edifícios, pois esta tecnologia já está preparada para aplicação nas janelas de edifícios com o tempo de fabrico igual ao de vidro normal com uma eficiência de conversão em energia elétrica de 10 %. A *Physee* é uma fabricante europeia que introduziu o produto chamado *PowerWindow*, sendo, atualmente, a única instalação no mundo que cobre uma fachada enorme das janelas de um edifício de um banco alemão. Embora este produto não consiga gerar energia suficiente para suportar os gastos energéticos de um edifício, contribui para isso e a empresa acredita que esta tecnologia crescerá rapidamente em escala e eficiência [24].



Figura 2-9 - Fachada de células solares transparentes aplicadas em vidro num banco alemão, (Fonte: *Physee*).

## 2.6 Conclusão

Neste capítulo são abordadas informações relativas ao estado da arte das tecnologias solares fotovoltaicas, começando, primeiramente, por explicar o princípio de

funcionamento e o modelo elétrico de uma célula solar fotovoltaica, auxiliando a uma melhor compreensão de como estas tecnologias produzem realmente energia. São abordadas as três gerações de tecnologias existentes e a tecnologia mais promissora que são os painéis transparentes.

Relativamente ao processo e materiais de fabrico das tecnologias solares fotovoltaicas destacam-se as de primeira geração, uma vez que apresentam os valores de eficiência mais elevados do mercado. Por sua vez, as de segunda geração são consideradas a tecnologia mais flexível e com menos desperdício de recursos, pois são baseadas em camadas mais finas de materiais semicondutores. As células de terceira geração são, aos dias de hoje, as mais promissoras, encontrando-se ainda em desenvolvimento e estudo. Por este mesmo motivo, ainda não são competitivas em termos de eficiência energética face às tecnologias anteriormente referidas, no entanto, a margem de progressão é considerável e acredita-se que, num futuro próximo, consigam competir com as gerações antecessoras.

Os painéis transparentes são, atualmente, o topo do avanço tecnológico na medida em que é permitida a instalação de soluções fotovoltaicas diretamente nas janelas dos edifícios, eliminando, deste modo, a barreira de telhados com área útil para instalação de painéis solares fotovoltaicos. Consequentemente, será possível assistir, a médio/longo prazo, à massificação de vidros solares.

Visando o interesse técnico e económico, certamente que as ofertas comerciais incidirão sobre a tecnologia de primeira geração, dado que ainda são a tecnologia mais consolidada e com um rácio custo-benefício mais rentável para os investidores.

## Capítulo 3

# Dimensionamento de Sistemas Solares Fotovoltaicos

### 3.1 Conversores de Eletrónica de Potência

No que concerne a conversores de eletrónica de potência em sistemas solares fotovoltaicos, existem duas topologias testadas e em uso em diversos sistemas solares por todo mundo. Numa primeira instância, a topologia em série, mais conhecida por *string inverter*, só contempla um conversor por fila de painéis solares, sendo este responsável por operar com o somatório de tensões de todos os painéis da linha (*string*), o que implica uma tensão ( $V_{DC}$ ) elevada. Em contrapartida, os painéis também podem ser conectados em paralelo, sendo utilizado um micro inversor por cada painel solar fotovoltaico, conseguindo tensões no conversor mais baixas e permitindo o controlo de cada um dos conversores individualmente. Este esquema de ligações implica que a performance do processador do sistema embebido que controla o sistema solar seja mais elevada, para além de se verificar um aumento no número de periféricos necessários, nomeadamente, de ADCs (*Analog to Digital Converter*). As figuras seguintes representam os componentes necessários para cada uma das topologias, bem como o seu funcionamento.

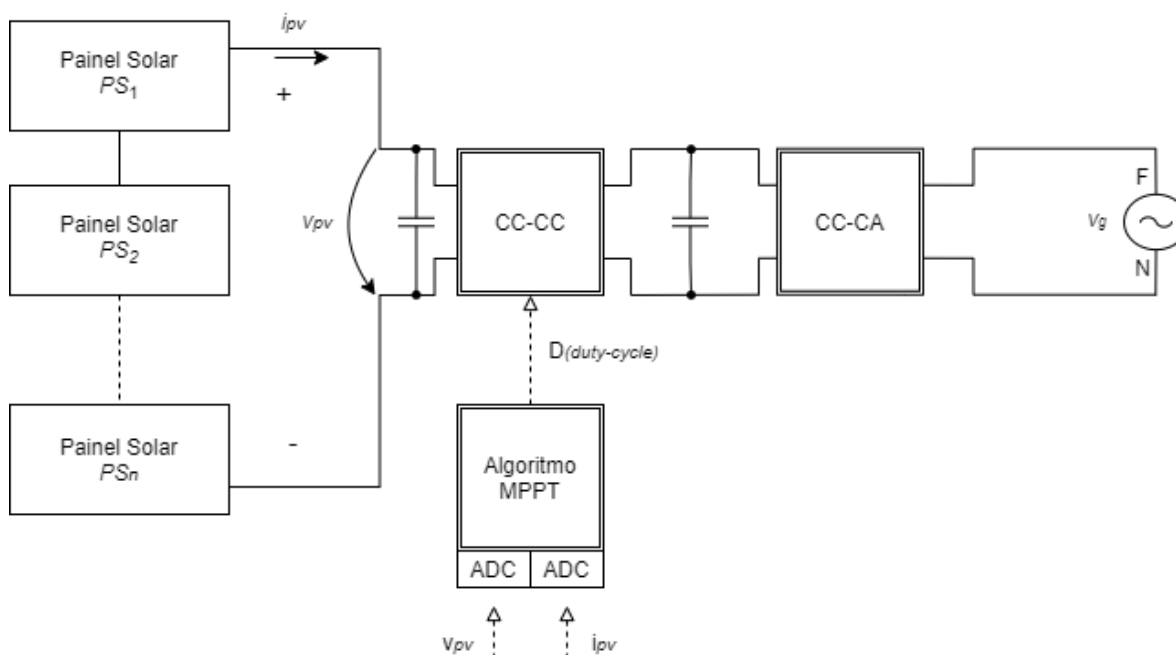


Figura 3-1 - Esquema de ligação em série.

Pela observação da Figura 3-1, é possível constatar que, além de somente se utilizar um conversor para a linha de painéis solares fotovoltaicos (como referido no primeiro parágrafo do capítulo), são utilizadas apenas duas variáveis no algoritmo de controlo MPPT ( $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$ ). Assim, são requeridos menos recursos ao sistema embecido, sendo apenas necessário a utilização de dois ADC. Do algoritmo MPPT, resulta o valor  $D$ , que representa o *duty-cycle* atribuído ao *Pulse-Width Modulation* (PWM) para a comutação dos inversores.

O cenário fica bem diferente no caso da utilização de um micro-inversor por painel, que implica um número de ADC correspondente a 2 vezes o número de inversores  $N$ . Tal característica está diretamente associada à necessidade de adotar uma placa de processamento com mais capacidades, pois além de o número de periféricos ser muito mais elevado, também existem mais variáveis para processar. Na Figura 3-2 é possível observar a situação descrita neste parágrafo.

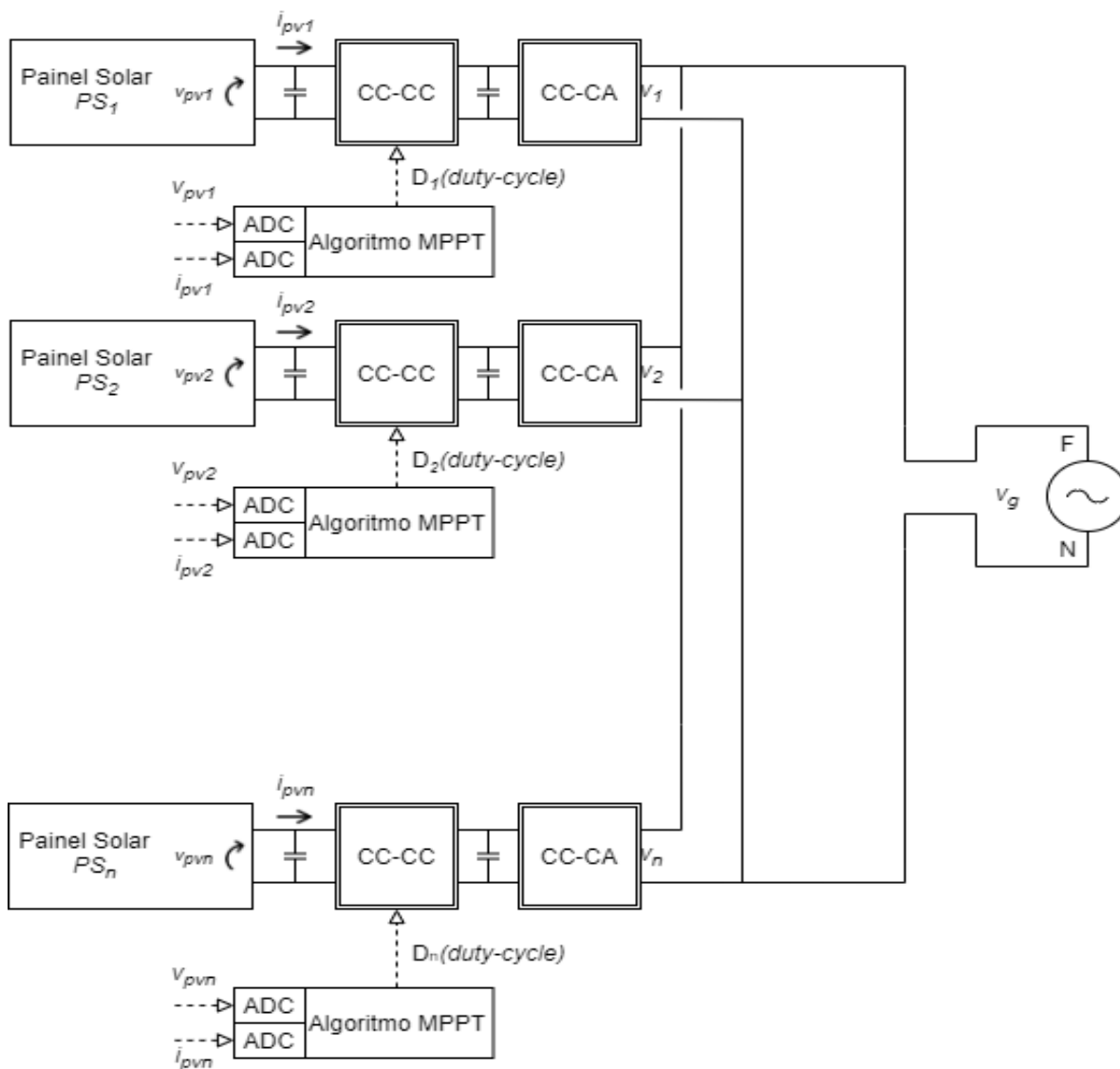


Figura 3-2 - Esquema da ligação em paralelo.

Após a apresentação das duas configurações mais utilizadas, é necessário compreender as vantagens e desvantagens de cada uma delas, abstraindo do nível do circuito propriamente dito [25]. Sendo o fator segurança um tópico de extrema importância em qualquer projeto, para este caso em específico, isto é, um sistema que pode operar com tensões e correntes elevadas, é fundamental adotar as topologias que garantam estas mesmas premissas. Posto isto, no caso da utilização de um só inversor para um conjunto de painéis em série, a tensão atingida será seguramente muito maior em comparação com a aplicação de um micro inversor em cada painel, situação verificada na ligação em paralelo. No entanto, existem, desde 2017 mecanismos de deteção de falha, aplicados a sistemas solares fotovoltaicos em série, com um atuador de corte em caso de fogo [26][27].

A criação de arcos elétricos é mais propícia de acontecer no sistema em série, sendo considerado o somatório de tensões dos painéis a instalar, atingindo valores bastante elevados, na ordem das centenas de volts. Por sua vez, na configuração com micro inversor, a tensão está limitada à tensão de saída do módulo fotovoltaico, isto é, na gama das dezenas de volts. Verificando-se tensões mais baixas, fica descartada a hipótese de arco elétrico perigoso para um ser humano e, além disso, nesta configuração o micro inversor está junto ao painel, o que implica uma instalação mais compacta. No caso de falha ou desconexão, estes micro inversores estão equipados com um sistema de segurança para estas situações [28].

O efeito do sombreamento na produção de energia varia com o tipo de inversor utilizado. Ambos utilizam o algoritmo MPPT para extrair a máxima potência do circuito. No caso do inversor em série, o algoritmo MPPT é aplicado ao conjunto dos módulos, e no caso dos micro inversores este é aplicado individualmente. Ou seja, caso um dos painéis, na montagem em série, seja afetado por uma sombra que afete 30 % do painel, todo o circuito só irá extrair 70 % da energia inicialmente disponível. No caso dos micro inversores, isto não acontece, ficando somente afetado o painel no qual a sombra é incidente, estando os restantes a funcionar em condições normais, o que é uma grande vantagem.

É importante ter em consideração que no caso de uma falha no sistema, e esta implique o não funcionamento do mesmo, a paragem de produção vai depender do tempo de deteção da falha e do tempo da sua reparação. No entanto, com os avanços tecnológicos verificados ao longo dos últimos anos, é possível monitorizar à distância a produção do sistema em aplicações móveis, mas para isso, é necessário a mesma ser verificada regularmente. No caso da utilização de inversores em série, podem existir falhas que não estão necessariamente ligadas ao inversor em si, podendo ser facilmente ignoradas e que levam o sistema a operar com valores de produção de energia mais baixos. A título de exemplo, se um conector num sistema com duas linhas em série falhar, o sistema fotovoltaico ficaria a funcionar apenas a 50 %, ficando uma das linhassem produzir a energia esperada. Tal exemplo ajuda a perceber o quão difícil é, em determinadas situações, encontrar onde é localizado o problema de perda de energia sem analisar toda a instalação.



## 3.2 Algoritmos de Controlo MPPT

Um algoritmo de controlo que seja baseado em *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), é um algoritmo que procurará, a cada instante, o valor mais elevado de potência instantânea. Este método de controlo para extração da maior potência possível tem uma importância elevada no que concerne a painéis solares fotovoltaicos, pois estes estão sujeitos a oscilações constantes de radiação e são dependentes das condições climáticas. Como estas variam frequentemente, devido às rotações terrestres, o sol (fonte de energia) irá incidir com ângulos diferentes no painel, o que implica variações da radiação incidente no mesmo e consequentemente oscilação da potência instantânea. Além disto, também existe o problema causado pela temperatura de funcionamento (perdas por calor nas células fotovoltaicas), sombreamento e sujidade que afetam diretamente a eficiência das células dos painéis solares fotovoltaicos.

Dito isto, quanto mais preciso for o algoritmo de controlo na aquisição constante do MPP consequentemente será obtida uma melhoria no rendimento de produção de energia desta tecnologia, o que se apresenta como maior meta, já que os rendimentos dos painéis solares fotovoltaicos (ainda) não são considerados elevados como seria desejado.

Algo que afeta diretamente o algoritmo de controlo MPPT no seu valor de saída é a forma como os inversores estão ligados, ou seja, caso o sistema contemple uma ligação série dos inversores num conjunto de painéis solares fotovoltaicos. Basta um painel sofrer sombreamento ou ficar com maior sujidade que os restantes, que todo o circuito de potência será comprometido, havendo assim uma implicância direta no MPPT. Assim, este último passará automaticamente a atingir valores mais baixos, mesmo que o algoritmo seja considerado o mais adequado para o sistema em causa. Se a arquitetura do sistema contemplar uma ligação dos painéis em paralelo, este problema não é considerado, pois cada painel passa a ser tratado individualmente, não comprometendo toda a rede no caso de um painel apresentar uma redução na percentagem de energia produzida [29].

O *Maximum Power Point* (MPP) é um valor que oscila em concordância com as condições de operação, no entanto ele representa sempre o que é mais desejado neste tipo de sistemas de produção de energia com base na radiação solar, isto é, o ponto em que é possível atingir a maior potência de extração de energia do sol. Para o algoritmo cumprir o

seu desígnio, é necessário o conhecimento dos gráficos característicos de um módulo solar fotovoltaico, isto é, estar a par dos valores que seriam esperados atingir. O gráfico que se segue contém a informação de exemplo desejada, representando as seguintes curvas:

- Curva (P-V) que relaciona a potência (P) com a tensão de saída ( $V_{DC}$ ) do módulo.
- Curva (I-V) que relaciona a corrente de saída(I) com a tensão de saída ( $V_{DC}$ ) do módulo.
- Curva (P-I) que relaciona a potência (P) com a corrente de saída (I) do módulo.

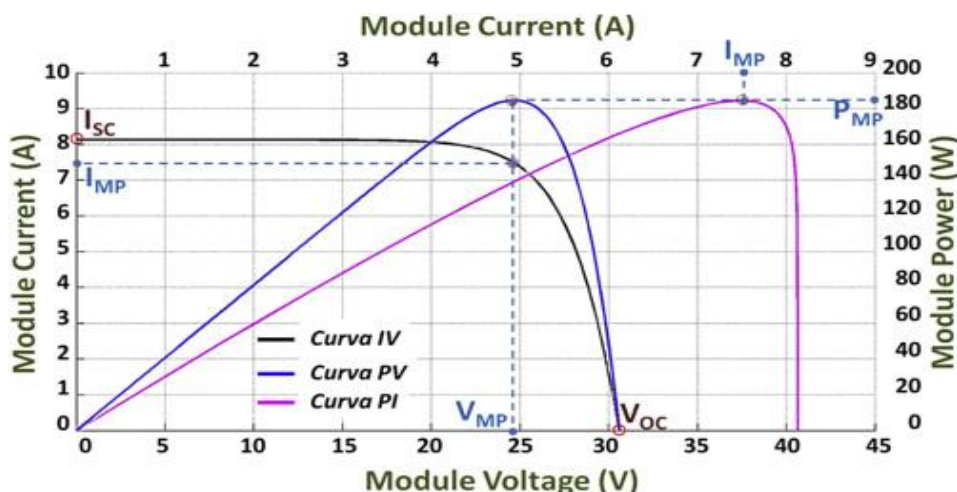


Figura 3-3 - Curvas características de um módulo solar fotovoltaico (Fonte Elsevier [30]).

Para melhor compreender este gráfico é necessário saber o que cada acrónimo significa:

- $I_{sc}$  -- Corrente de curto-circuito;
- $V_{oc}$  -- Tensão de circuito aberto;
- $I_{mp}$  -- Corrente correspondente à máxima potência;
- $V_{mp}$  -- Tensão correspondente à máxima potência;

$$PMP = I_{mp}V_{mp} \tag{5}$$

A equação (5) representa a máxima potência que um dado painel pode atingir com um dado  $I_{mp}$  e um  $V_{mp}$  e pode ser observada graficamente como sendo o ponto ótimo entre estes dois dados. Quando os terminais positivo e negativo do painel são ligados por um fio, que representa uma resistência simbólica, é obtida a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , sendo nesse momento a tensão nula. Quando o circuito está em aberto é possível obter  $V_{oc}$ .

Uma fonte de energia que depende diretamente de condições meteorológicas tem sempre de considerar que os valores de corrente e tensão oscilam ao longo de um dia e, neste

sentido, nem sempre é possível estar perto dos valores nominais de tensão e corrente indicados pelos fabricantes dos painéis. Estes valores são intermitentes, na medida em que, para uma dada localização os valores de radiação e temperatura variam do dia e do mês. Dito isto, está mais do que clara a importância que o algoritmo de controlo MPPT representa no rendimento apresentado pelos módulos solares fotovoltaicos [31].

Tabela 1 - Comparativo de alguns algoritmos de controlo MPPT[32].

| <b>MPPT Algorithms</b>                         | <b>Tracking of efficiency (%)</b> | <b>Control Variables</b>   | <b>Response Time (s)</b> |
|--|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <i>Fractional Open-Circuit Voltage (FOCV)</i>  | 92,50                             | <i>Voltage</i>             | 0,02                     |
| <i>Fractional Short-Circuit Current (FSCC)</i> | 93,75                             | <i>Current</i>             | 0,02                     |
| <i>Hill Climbing (HC)</i>                      | 96,25                             | <i>Voltage and Current</i> | 0,15                     |
| <i>Incremental of Conductance (INC)</i>        | 98,50                             | <i>Voltage and Current</i> | 0,07                     |
| <i>Perturb and Observe (P&amp;O)</i>           | 98,75                             | <i>Voltage and Current</i> | 0,06                     |
| <i>Fuzzy Logic Control (FLC)</i>               | 99,10                             | <i>Voltage and Current</i> | 0,005                    |

Existem vários algoritmos de controlo MPPT como, Tensão Constante, Perturbação e Observação (P&O), condutância incremental, entre outros [33]-[36]. Na Tabela 1, no que diz respeito à eficiência destas técnicas de controlo, é possível reparar, pela observação da mesma, que é a eficiência é considerada baixa se o valor estiver abaixo dos 90 %, o que reforça positivamente a ideia de que, sistemas solares fotovoltaicos necessitam de ser aproveitados ao máximo. A técnica de controlo mais utilizada nos sistemas solares fotovoltaicos é o método de P&O, que está descrito na figura seguinte:

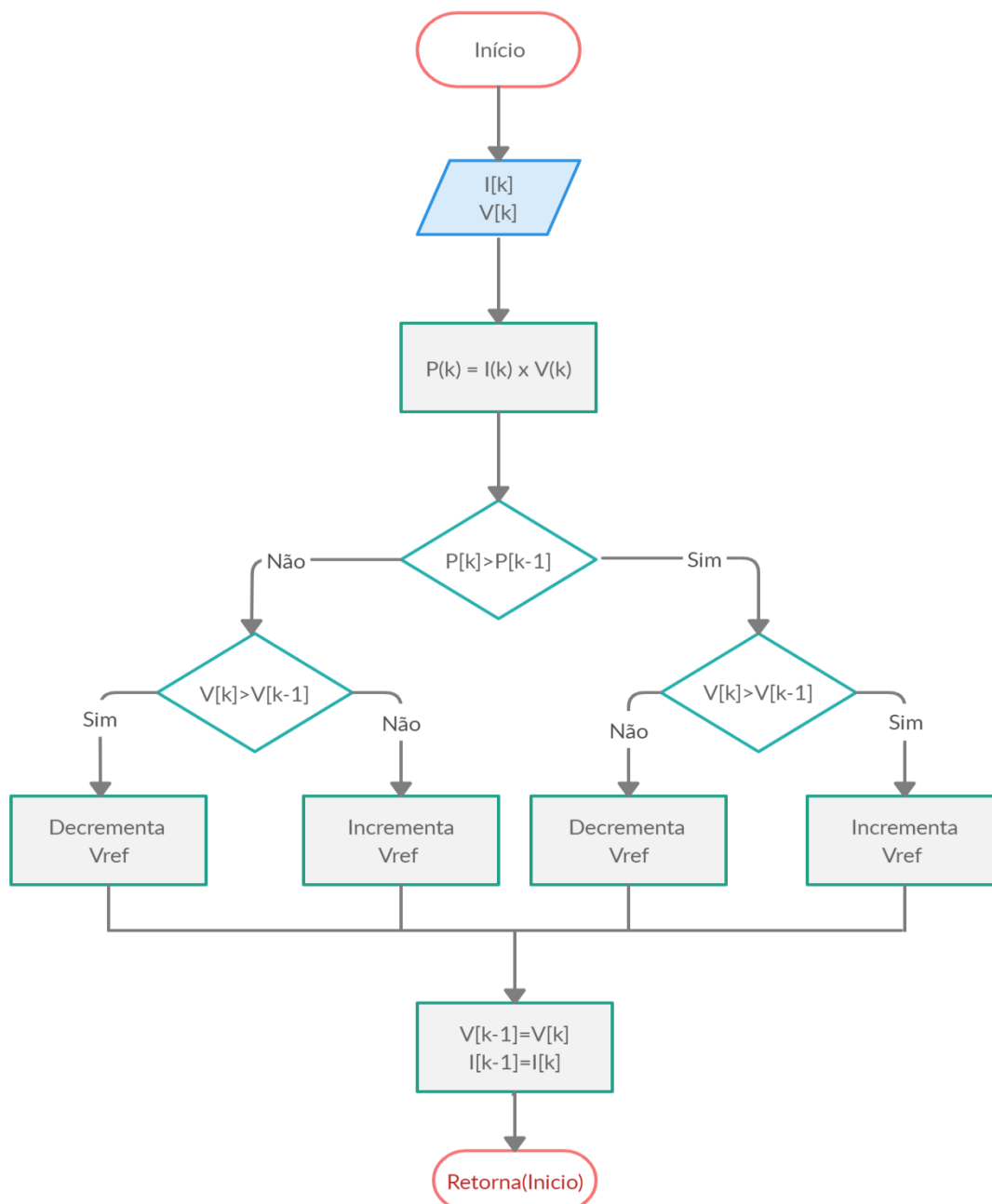


Figura 3-4 -Exemplo de algoritmo de controlo.

Para utilizar este algoritmo, é necessária uma placa de desenvolvimento que contenha um Analog to Digital Converter (ADC), que servirá para converter o sinal analógico de corrente e tensão que será adquirido através de sensores. Este sinal adquirido pelos sensores deverá estar sujeito a um ajuste elétrico de sinal antes de ser ligado ao pino do ADC da placa pois a tensão que estes suportam ronda normalmente a gama dos 0 V – 3.3 V ou 0 V – 5 V. Isto implica que os valores lidos terão de ser multiplicados por um escalar para se perceber a que valor real de tensão corresponde. É também importante ter atenção que no lado digital importa saber qual o gama de valores, diferindo consoante o número de bits. Por norma a

aquisição de dados do ADC opera com 8 bits o que corresponde a uma escala de inteiros de 0 – 255.

Os valores de tensão e corrente do sistema solar fotovoltaico servirão para calcular a sua potência instantânea que será o primeiro caso de teste deste algoritmo. Estes valores são adquiridos com a limitação da frequência de aquisição máxima da placa, que no caso de ser suficiente, o programador pode optar por uma leitura a uma frequência inferior que por vezes é suficiente. Com isto, nem sempre a maior velocidade corresponde a maior eficiência pois pode gerar problemas diversos, variando de sistema para sistema.

A potência instantânea estará em comparação com o valor adquirido anteriormente na última leitura. Como resultado da comparação, caso seja maior ou menor, será feita então a comparação dos valores de tensão, que dependendo da potência atual estar menor ou maior que a anteriormente guardada na memória terá consequências diferentes no valor da tensão de referência,  $V_{ref}$ , que é o valor que regula o sistema. Depois é feita a atualização dos valores anteriores para os atuais, para na nova leitura estarmos a comparar atual com o anterior corretamente.

Em regime permanente, este algoritmo apresenta resultados bastante satisfatórios. No entanto é importante ter em atenção ao valor que é atribuído ao incremento ou decremento da variável  $V_{ref}$ , a variável a ser manipulada pelo sistema de controlo, pois quanto maior for o seu valor, maiores serão as oscilações. Estas últimas são o inverso do desejado neste tipo de sistemas, que ainda apresenta o rendimento baixo face ao que seria desejado.

### 3.3 Orientação e Ângulo de Inclinação

Num sistema de produção de energia, como o caso dos painéis solares fotovoltaicos, onde o rendimento não é tão alto como o desejado, a posição do painel face à radiação passível de ser absorvida pelo mesmo tem um grau de importância elevado. Sendo esperada a utilização de painéis solares de um só eixo, só será possível regular a sua inclinação. Os mesmos devem estar orientados de acordo com a sua localização geográfica face a linha do equador. No caso de Portugal, o painel deverá ser orientado a Sul porque se encontra acima da linha do Equador [37].

Quanto ao ângulo face ao plano horizontal, o painel deve ser utilizado segundo a seguinte fórmula [38]:

$$\beta = \delta \pm 15^\circ \quad (6)$$

onde,  $\beta$  representa o ângulo que o painel deverá apresentar face ao plano horizontal e  $\delta$  representa a latitude do local a instalar o painel. Consoante a estação do ano, verifica-se um incremento de  $15^\circ$  no Inverno e um decréscimo do mesmo valor no Verão. Como esta dissertação de mestrado trata do estudo técnico-económico do potencial fotovoltaico na Universidade do Minho situada no concelho de Guimarães, distrito de Braga, a latitude deste é, em resultado decimal para facilitar o cálculo, 41.55032. Sendo as suas coordenadas de latitude e longitude  $41^\circ 26' 39.95''\text{N}$ ,  $8^\circ 17' 46.28''\text{W}$ , e estando a 4608 km do Equador e a 5399 km do Pólo Norte[39].

### 3.4 Comparativo entre Sistemas de Geração Solar Fixos e Móveis

Esta comparação entre painéis solares fotovoltaicos fixos e móveis servirá para enaltecer as vantagens e desvantagens de cada uma das possibilidades.

A opção mais utilizada na instalação de painéis solares fotovoltaicos é a opção em que o painel se encontra fixo, tendo como principal vantagem para o proprietário o custo associado à instalação dos mesmos. Para tal, é necessário adquirir uma estrutura de fixação, um ou mais painéis consoante a instalação pretendida, um inversor que tanto pode ser um único no caso de ser uma instalação em que os painéis estão em série ou um micro inversor por cada painel (cujas vantagens e desvantagens se encontram supracitadas no subtópico 2.4) cabos de ligação e equipamento de controlo para utilização de algoritmo MPPT. Outra vantagem, talvez normalmente desconsiderada, é a manutenção dos equipamentos, que, no caso dos painéis fixos, cinge-se à limpeza regular dos mesmos para evitar perdas de rendimento por sujidade nos painéis, isto claro, durante o tempo de vida útil dos equipamentos integrantes do sistema fixo. Já nos sistemas móveis, existem mais componentes passíveis de desgaste que são utilizados na locomoção do painel solar fotovoltaico e que acrescem custo ao sistema. Uma vez que o custo de instalação é a variável com maior ponderação por parte dos consumidores de energia, é essencial que o mesmo seja o mais reduzido possível e, por vezes, é considerado como um fator de exclusão face a outro tipo de instalação.

Os painéis solares fotovoltaicos móveis são sistemas normalmente associados a um seguidor solar pois não é esperado que o seu movimento seja manual devido à inviabilidade de se recorrer a técnicos para ajuste dos painéis manualmente.

Um seguidor solar é um sistema de controlo da posição do painel, que tem por objetivo garantir o máximo proveito da energia proveniente do sol, normalmente feito através de sensores que trabalhem com luminosidade ou radiação. Estes sensores servem para converter uma grandeza física em energia elétrica, permitindo assim ser controlado um valor de tensão eletronicamente recorrendo a um microcontrolador. Posto isto, este sistema embebido irá enviar informações á parte de eletrónica de potência responsável pelo controlo dos motores que fazem mover o painel de acordo com o desejado. Com isto, é possível um aumento considerável na energia produzida, que segundo testes, ronda os 38 % [40].

Após esta descrição de seguidor solar, é possível concluir que os custos associados a um sistema destes terá um investimento superior, no entanto, a energia produzida é maior porque o sistema é mais eficiente. Os custos de manutenção são consequentemente maiores, pois existindo componentes em movimento, é implícito um maior desgaste dos mesmos face a uma instalação fixa. Tratando-se de uma instalação na cobertura de um edifício, um fator de importância elevada é a área útil, que, no caso do sistema móvel, cada painel ou módulo de painéis, ocuparão uma área maior pois tem de ser incluída a área referente aos seus movimentos. O fator área pode ser um fator limitador de um projeto, no entanto, cada cenário de instalação deve ser analisado por forma a que não ocorram problemas relacionados com esta.

Neste sentido, implementar um sistema de geração móvel no topo de um telhado (onde exista circulação constante de pessoas ou veículos) iria aumentar o risco de segurança para os estudantes e professores da Universidade, uma situação passível de suceder num dia ventoso. Adicionalmente, os custos de reparação seriam elevadíssimos, e posto isto, entende-se a importância de uma correta fixação dos painéis. Esta situação começa a tomar cada vez mais importância em Portugal, uma vez que o país se aproxima, cada vez mais, de um clima tropical, normalmente associado a mais tempestades e variações climatéricas mais abruptas. No caso de estudo desta dissertação de mestrado, isto é, os edifícios do

campus de Azurém da Universidade do Minho, fará mais sentido adotar a instalação de painéis solares fotovoltaicos fixos.

### **3.5 Conclusão**

Neste capítulo é abordada a forma como pode ser extraída a máxima energia de um sistema solar fotovoltaico, começando pela parte dos esquemas de instalação possíveis e quais as características de cada um destes sistemas, informação crucial antes de planear iniciar a execução de uma instalação solar fotovoltaica. Seguidamente, é abordado o processo de extração de máxima energia de um sistema solar, utilizando algoritmos de MPPT para o efeito. Este processo tem como base a análise dos valores de tensão e corrente adquiridos por sensores aplicados ao sistema em causa que, posteriormente, são processados por um algoritmo de controlo. O principal objetivo do MPPT é encontrar os melhores pontos de tensão e corrente, que serão processados à velocidade de um processador de um microcontrolador para assim conseguir o ponto máximo de potência. Sendo a captação de radiação solar a fonte de energia destes sistemas, é essencial estudar o comportamento do sol face à posição geográfica em que o sistema de geração será instalado. Assim, pelo facto de o sol não incidir na terra sempre com a mesma posição geográfica, a inclinação também está diretamente relacionada com o aumento de produção de energia, que consoante a posição geográfica já foram estudados os ângulos mais adequados para uma melhor produção de energia. Por fim são comparados os sistemas fixos com os sistemas móveis, onde são mencionadas as vantagens e desvantagens de cada sistema, sendo denotada a vantagem de uma instalação fixa para este estudo.



## Capítulo 4

# Aproveitamento da Área Útil dos Edifícios Propostos

### 4.1 Introdução

Neste capítulo é demonstrado o processo necessário para conseguir o melhor aproveitamento possível da área útil das coberturas dos edifícios do campus de Azurém. De todos os edifícios do campus só alguns é que foram selecionados para a instalação do sistema solar fotovoltaico, pois apresentavam as melhores condições, quer de espaços livres e desimpedidos para a mesma, melhorando assim a área útil para a instalação, quer do material da cobertura para fixação dos painéis.

### 4.2 Sistema de Ligação de Equipamentos

A ligação dos equipamentos, tanto entre eles como à rede elétrica, é algo que, por vezes, não é considerado com a importância devida, uma vez que podem ocorrer perdas de energia por má escolha dos cabos. É fundamental analisar adequadamente as características dos cabos para a tensão e corrente que o circuito terá de operar. Em instalações solares fotovoltaicas, os cabos de ligação devem ser resistentes às altas temperaturas a que o sistema em funcionamento está sujeito, e em simultâneo têm que ser resistentes a condições meteorológicas adversas. Relativamente à exposição solar, existem várias nomenclaturas usadas nos cabos para este tipo de instalações [41] que devem ser tidas em conta na escolha dos mesmos, que variam de acordo com o tipo de utilização. As cores dos cabos também são importantes pois este sistema apresentará ligações em regime CC e em regime CA, devendo ser usada uma estratégia para que os mesmo sejam distinguidos.

Num sistema em que sejam necessários muitos metros de cabo, é preciso reparar nas perdas que os mesmos apresentam a cada secção definida pelo fabricante do cabo. A título de exemplo, um cabo de 6 metros com 10 A com 3 % de perda permite usar um cabo de 6 mm, no entanto, se o mesmo cabo fosse usado numa instalação de 16 metros teria de ser aumentada a secção do cabo de forma a reduzir as perdas ao longo do mesmo e assim

garantir o bom funcionamento de todo o sistema. Por este mesmo motivo é aconselhado por especialistas em energia elétrica que é mais seguro o uso de cabos com maior secção.

Neste tipo de instalações, grande parte das vezes, são utilizados cabos de alumínio, por serem mais baratos que cabos de cobre e também mais rígidos (consequentemente mais fáceis de partir). Para tal, devem ser usados cabos de cobre pois, para a mesma secção, apresentam valores de condutividade superiores e, além disso, são mais maleáveis, correndo menos riscos de partir.

### 4.3 Normas de Segurança

As normas, ou regras, de segurança utilizadas em sistemas solares fotovoltaicos, estão estabelecidas no *International Electrotechnical Commission* (IEC) e, como forma de permitir o comércio global em todo o mundo, foram definidas e aprimoradas continuamente [42].

A primeira norma a ser abordada neste documento é a proteção de pessoas de choques elétricos, onde vem mencionado no IEC 60364-4-41 [43], que a proteção básica é garantida pelo isolamento básico e a proteção de falhas deve ser providenciada por isolamento complementar. Esta medida visa prevenir o aparecimento de tensões perigosas em partes acessíveis do equipamento elétrico através de uma falha básica de isolamento. A norma IEC 60364-7-712 [44], estabelece que sistemas solares fotovoltaicos cuja tensão de circuito aberto seja superior a 120 V, devem dobrar ou reforçar o isolamento como proteção de choque elétrico, isto porque, as caixas de corte, como fusíveis ou cortes de circuito no lado CC, não oferecem proteção contra choque elétrico e não há nenhum corte automático da fonte. Ainda dentro desta norma, relativo a proteção de sobrecorrentes, existe a proteção da linha, referindo-se a uma linha em série de módulos solares fotovoltaicos, onde é referido que havendo sobre correntes na linha é necessária uma proteção, e cada linha de módulos deverá ter um dispositivo de proteção de sobre correntes. A corrente nominal do fusível ou circuito de corte deve ser calculada cuidadosamente para que caso ocorra algum problema que leve ao aumento de corrente tudo esteja preparado para que o sistema de corte pare imediatamente o funcionamento do sistema, não causando danos no sistema nem em volta deste.

## 4.4 Planta do Campus de Azurém

As duas figuras seguintes foram cedidas pelos Serviços Técnicos da Universidade do Minho, criadas especificamente para o projeto em causa. O impacto solar, a exposição solar, o sombreamento, o material do suporte, a resistência estrutural e o espaço livre foram os aspetos avaliados na escolha destes edifícios. É essencial garantir que a instalação tenha o menor impacto visual na paisagem, que aproveite ao máximo a exposição solar (tendo em conta a orientação do sol ao longo do dia e das estações), que evite locais com sombreamento de edifícios ou árvores, que o material da cobertura permita uma fixação simples e eficaz, que a estrutura do edifício esteja preparada para novas cargas e, por fim, que se verifique se existe espaço livre suficiente para a instalação.

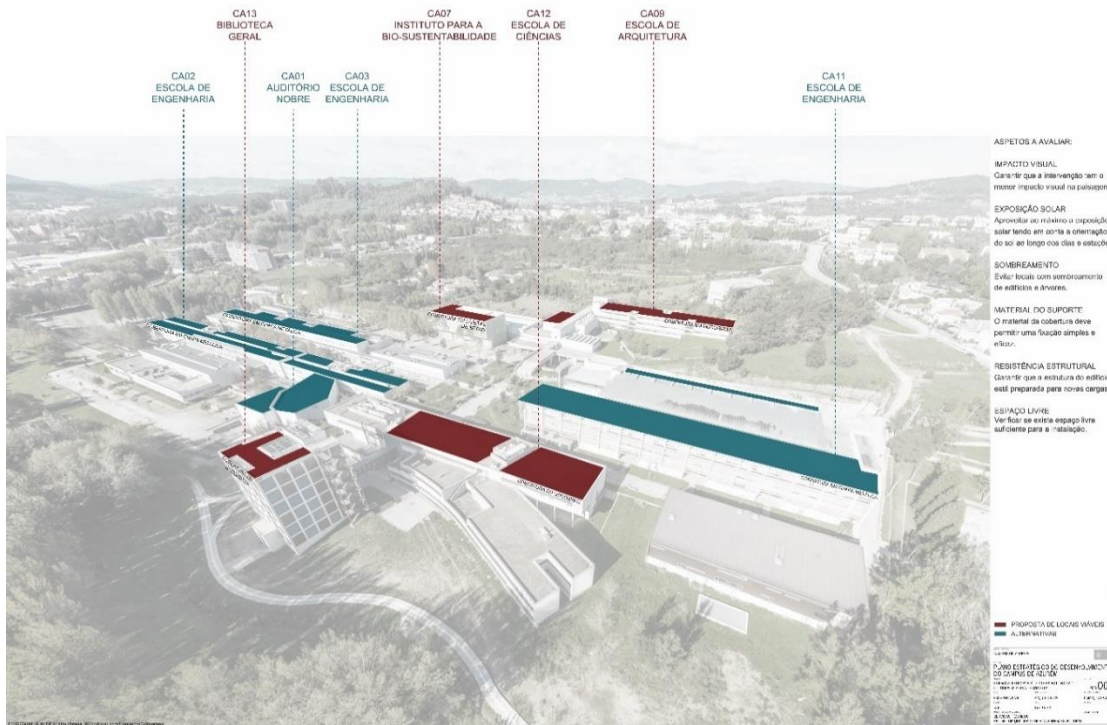


Figura 4-1 - Vista 3D do campus de Azurém.

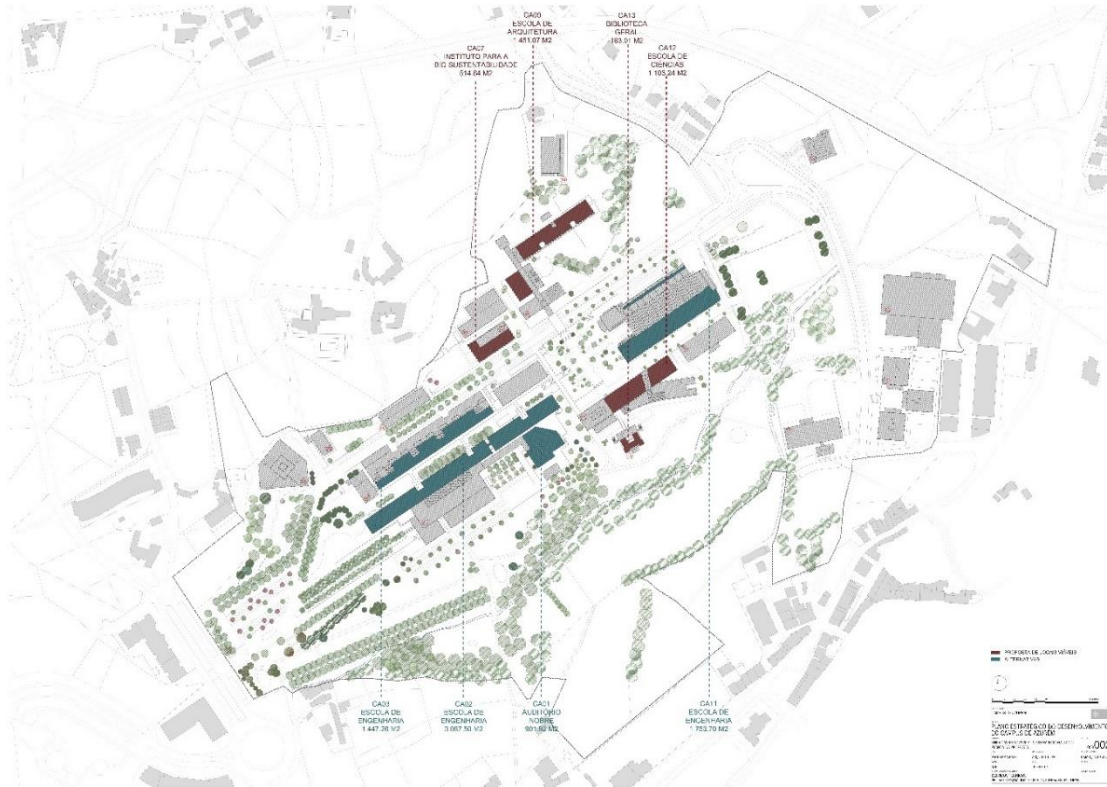


Figura 4-2 - Vista superior da planta do campus de Azurém.

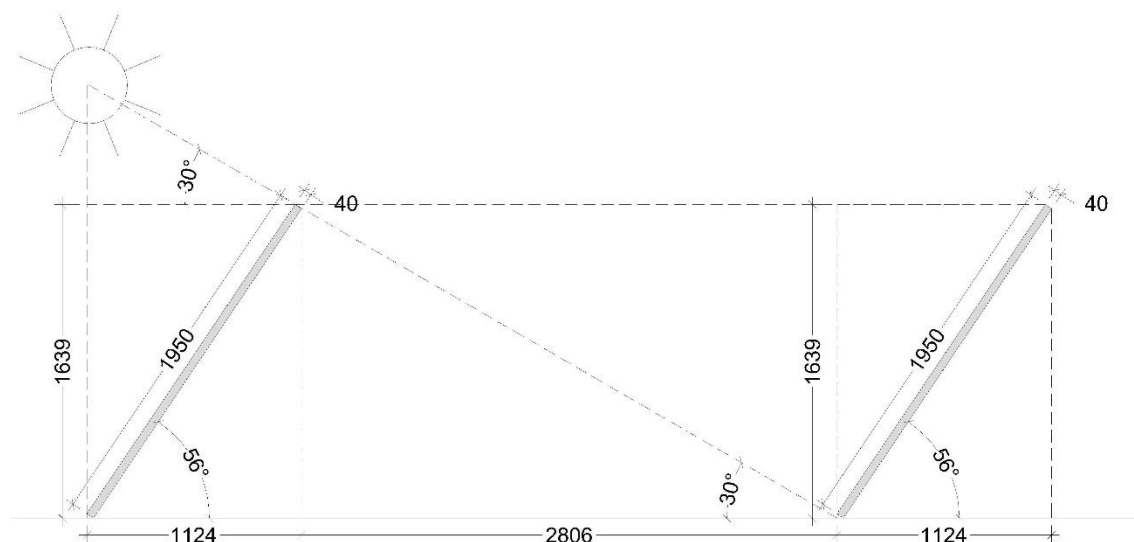
Os locais sombreados a vermelho na Figura 4-1 e na Figura 4-2 foram os eleitos para a instalação do sistema solar fotovoltaico pelos Serviços Técnicos da Universidade do Minho, ao passo que os locais a azul não serão tidos em consideração para o projeto. Os edifícios a ter em conta são o edifício da Escola de Arquitetura (CA09), com 1451,07 m<sup>2</sup>, o edifício do Instituto para a Sustentabilidade (CA07), com 514,0 m<sup>2</sup>, o edifício da Escola de Ciências (CA12), com 1103,21 m<sup>2</sup>, e por último, mas não menos importante o edifício da Biblioteca Geral (CA13), com 183,01 m<sup>2</sup>. O somatório das áreas dos edifícios mencionados é 3251,31 m<sup>2</sup>, no entanto, há que ter em consideração que as linhas dos painéis solares que serão instalados têm uma altura que pode ser variável e conseqüentemente a sua sombra também o será, o que implica, que haverá área útil utilizada pela sombra.

Analisando a Figura 4-1 consegue-se observar que o edifício da Biblioteca Geral é mais alto que o edifício da Escola de Ciências o que poderá implicar sombreamento parcial ao final do dia.

## 4.5 Sombreamento Solar e Inclinação dos Painéis

O objetivo dos painéis solares fotovoltaicos é converter uma quantidade de energia solar incidente sob a sua superfície em energia elétrica. Para isso, é necessário que seja possível aproveitar toda a luz que o sol disponibiliza, evitando o sombreamento que pode levar a perdas de rendimento de uma linha inteira de painéis, caso a configuração seja com um inversor em série, ou mesmo de alguns painéis, no caso de ser uma configuração com um micro inversor em cada painel. Estas perdas em dispositivos cujo rendimento anda perto dos 20 %, é um fator de extrema importância pois pode comprometer o bom funcionamento da instalação, reduzindo drasticamente os valores de energia produzida. Serão apresentados dois cenários possíveis com medidas de painéis diferentes, um com 1950 x 995 x 40 mm e outro com 2008 x 1002 x 40 mm, onde o sombreamento ditará quantos painéis é possível instalar em cada cenário. Estas medidas são as disponíveis no mercado atual.

Com recurso ao software Autocad testou-se graficamente várias inclinações dos painéis solares e os correspondentes sombreamentos produzidos em planta. Nos desenhos efetuados foram introduzidas dimensões e ângulos com valores exatos e reais de forma a garantir absoluto rigor nos resultados obtidos. Recorreu-se à utilização desta ferramenta de desenho assistido por computador uma vez que a mesma permite simular e verificar visualmente a realidade através do desenho rigoroso, sendo mais conclusivo e infalível do que uma análise matemática muito mais abstrata e sujeita a algum erro de cálculo.



PAINEL SOLAR COM INCLINAÇÃO DE 56°

Figura 4-3 - Inclinação de inverno.

A situação com uma inclinação superior 15 graus à latitude da instalação no Campus de Azurém, que tem uma latitude de aproximadamente de 41 graus, está representada na Figura 4-3. A figura descreve a situação que seria o ângulo adequado para a maior produção de energia no período de Inverno, com 56 graus de inclinação face ao plano horizontal. Nesta situação podemos observar que temos 2,806 m de sombreamento para apenas 1,124 m de comprimento ocupados pelo painel. Como não permite um bom aproveitamento das coberturas e só seria aplicado a 25 % do ano, a hipótese de variar a instalação consoante a época do ano foi descartada. Optou-se assim por uma instalação fixa para o ano todo.

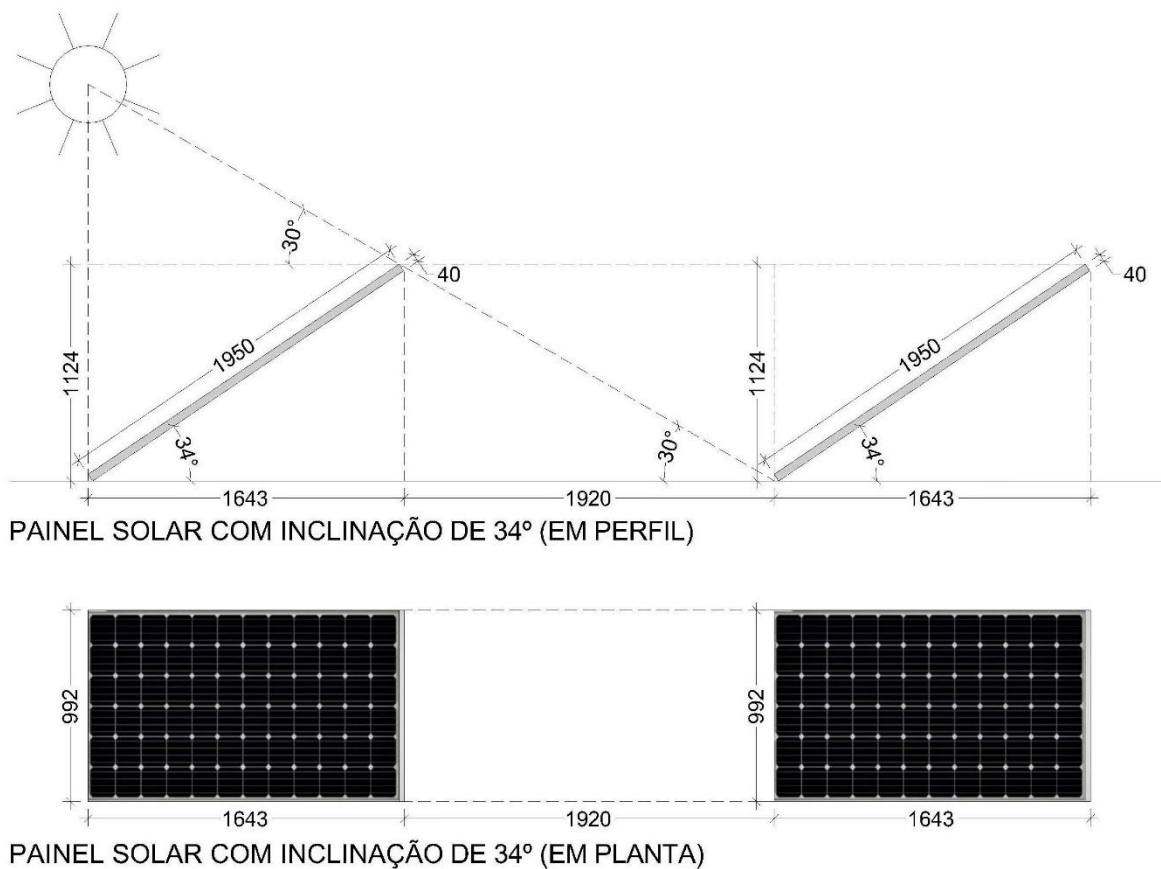


Figura 4-4 - Dimensões de ocupação da área disponível, em planta e perfil (1995 x 1002 x 40mm).

A Figura 4-4 representa as dimensões em perfil e em planta para os painéis de dimensões 1950 x 995 x 40 mm com uma inclinação fixa de 34 ° para o ano todo. Este valor é um compromisso entre o espaço ocupado pelos painéis e o espaço ocupado pelo sombreamento resultando num bom aproveitamento de área útil da cobertura.

Assumindo que o valor de inclinação de inverno são 56 ° e o de Verão são 26 °, sabendo que, o inverno representa ¼ do ano e que o verão que representa a situação em que está

preparado para o maior aproveitamento da exposição solar, os 34 ° são provenientes do seguinte cálculo:

$$56 * 0,25 + 26 * 0,75 = 33,5 \text{ } ^\circ.$$

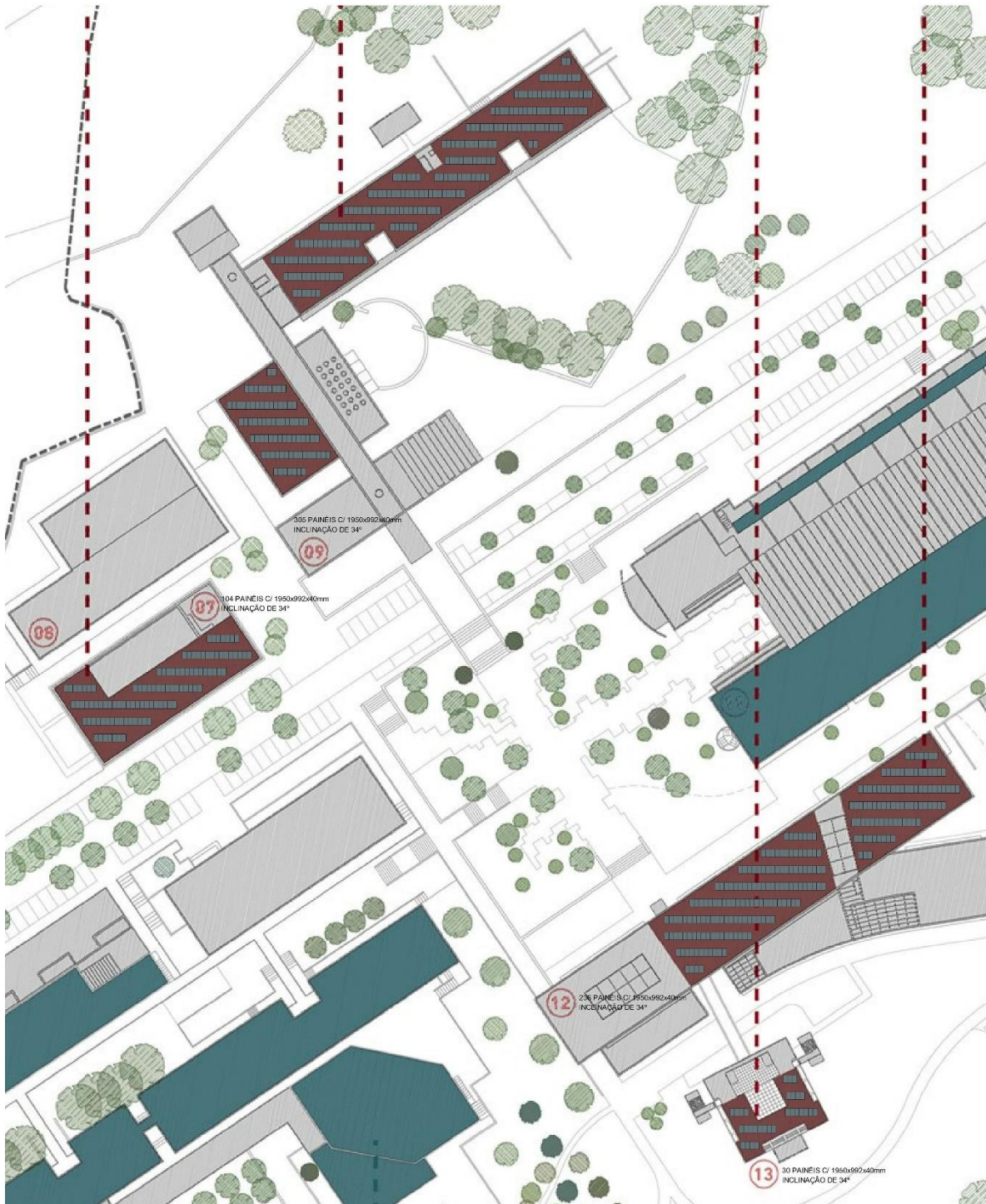


Figura 4-5 - Planta com 675 painéis solares fotovoltaicos nos edifícios virados a Sul.

A Figura 4-5 representa a forma como os painéis ficariam colocados em planta, permitindo assim verificar o número de painéis que seria possível colocar em cada um dos edifícios. O

principal objetivo passa pelo aproveitamento máximo da área útil das coberturas para instalar o maior número possível de painéis solares fotovoltaicos, o que, conseqüentemente, se reflete na maximização dos valores de energia elétrica produzida com base na instalação solar fotovoltaica. Tendo em conta as dimensões dos painéis, e como descrito na legenda da figura, foi possível colocar um total de 675 painéis na superfície dos edifícios. A maioria dos painéis é de 72 células e apresenta uma potência de 330 W.

A distribuição por cada edifício foi a seguinte:

- Edifício 07 – 104 painéis
- Edifício 09 – 305 painéis
- Edifício 12 – 236 painéis
- Edifício 13 – 30 painéis

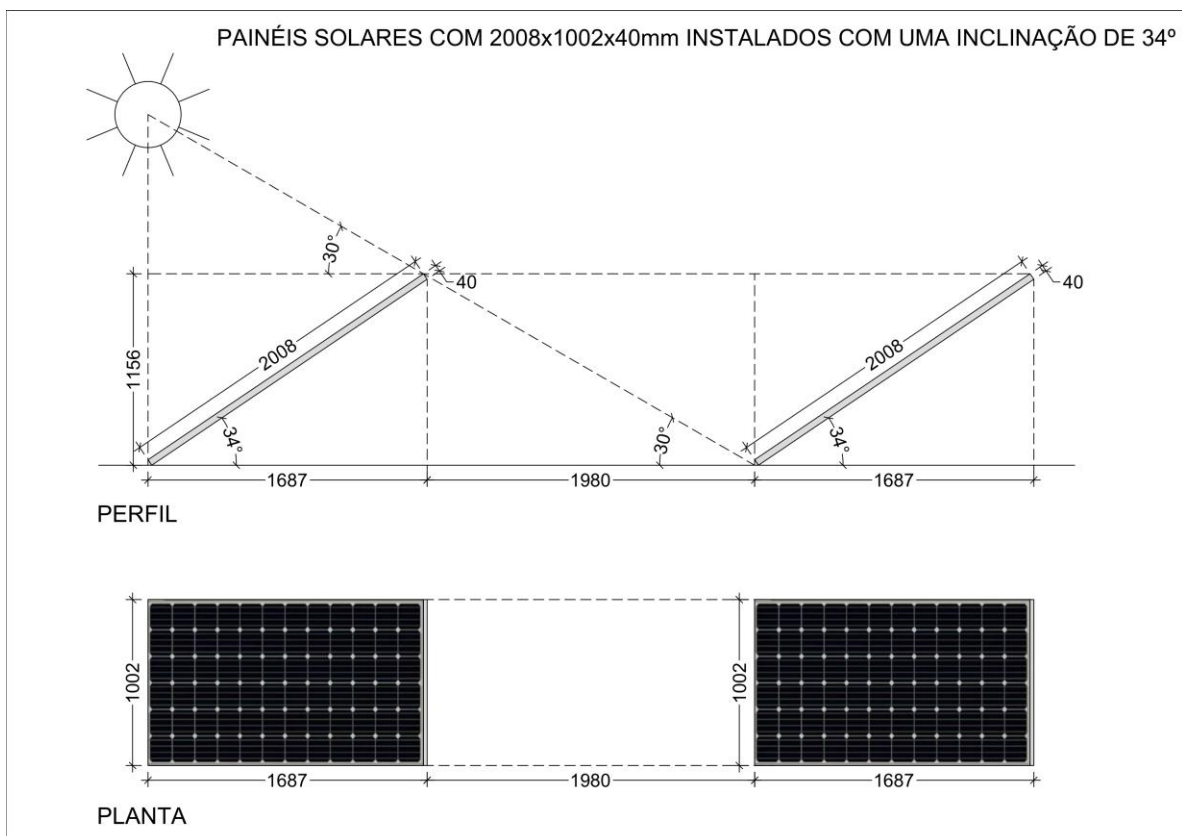


Figura 4-6 - Dimensões de ocupação da área disponível , em planta e perfil (2008 x 1002 x 40mm).

Embora as medidas pareçam similares, em 675 painéis, 5 cm fazem a diferença. Para conseguir o mesmo número de painéis foi necessário encurtar o espaço de passagem para aproximadamente 30 cm. Assim sendo, esta passagem poderia ser central, uma medida de segurança que iria evitar a circulação de pessoas nas extremidades do edifício. No entanto



assumindo que somente técnicos qualificados é que subirão a esta cobertura, tal medida deverá ser suficiente. As imagens seguintes estão legendadas para melhor compreensão e foi colocada uma escala e um ponto indicativo do Norte geográfico.

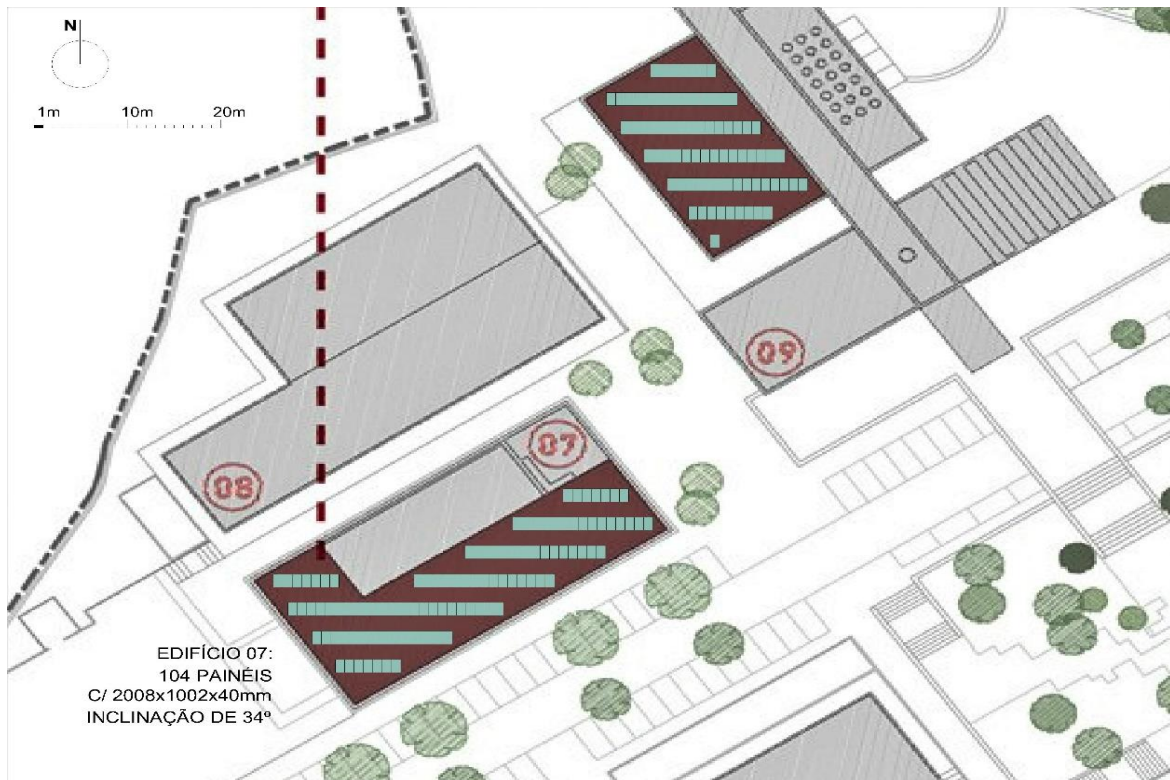


Figura 4-7 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 7.

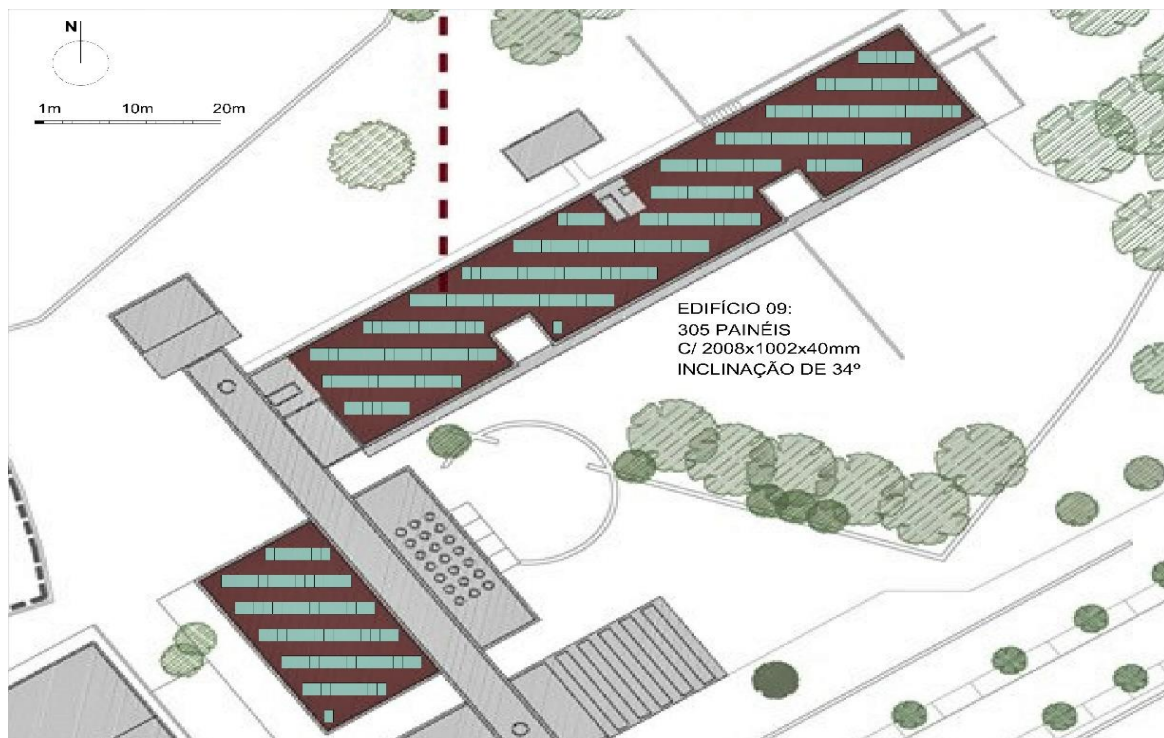


Figura 4-8 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 9.

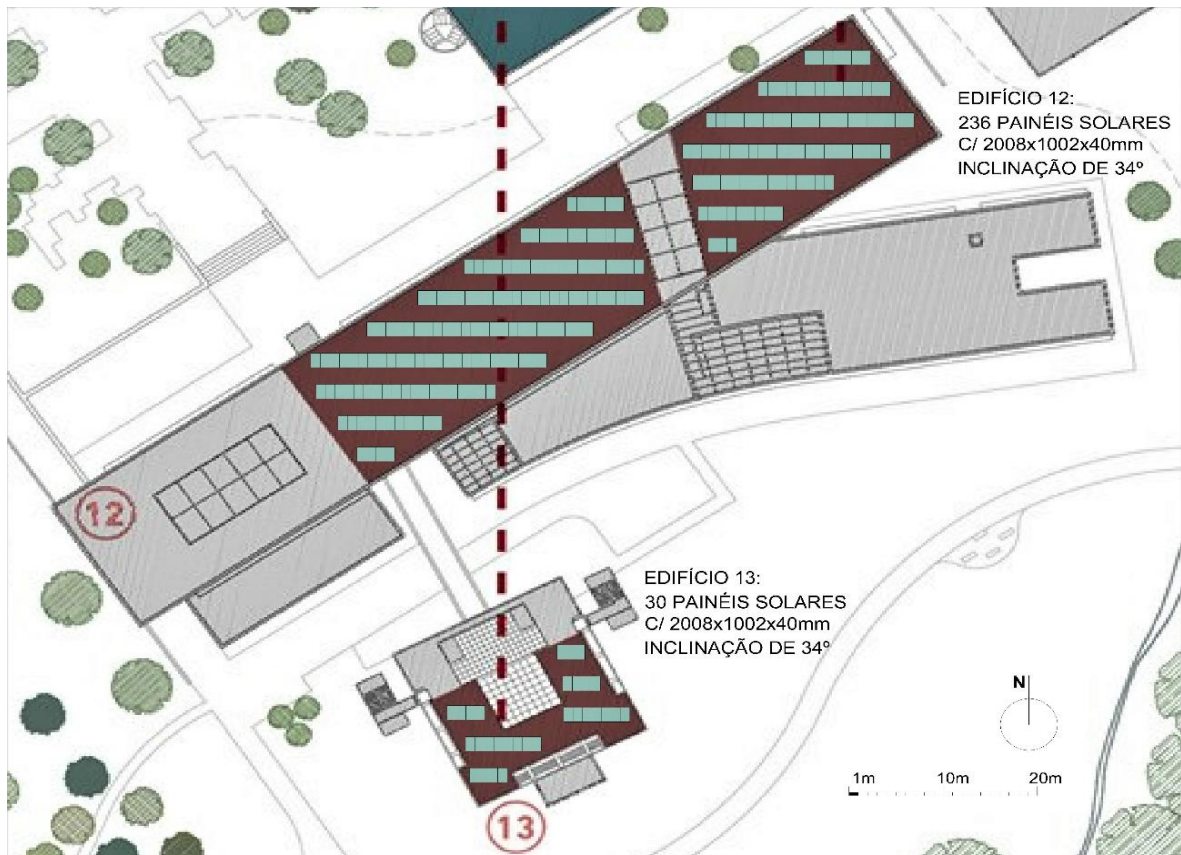


Figura 4-9 - Aproveitamento máximo da área útil facultada - Edifício 12 e 13.

Uma vez que a possibilidade de existirem dificuldades na passagem de pessoas, e prevendo de antemão algum imprevisto durante a instalação no terreno, foi criada uma solução preventiva para este tipo de cenário. Para tal, e como se pode observar nas figuras que se seguem, distribuíram-se painéis numa nova área (área amarela), colmatando, deste modo, as situações acima descritas. Primeiramente, elimina a distância mínima de passagem, sendo agora a mesma de 1 metro para as platibandas nos edifícios (salvo certos edifícios em que, de acordo com a área da superfície dos mesmos, a distância é de cerca de 80 centímetros). Com esta medida, a área útil dos telhados é utilizada da forma mais eficiente possível. Assim, conseguiu-se criar espaço para os 675 painéis iniciais e até mais 54 painéis para o caso de obstruções no terreno. Estes 54 painéis não aparecem coloridos na Figura 4-12, uma vez que não estão previstos no orçamento dos 675 painéis, estabelecido com base nas áreas a vermelho.

Esta solução preventiva, caso seja aprovada a utilização destas coberturas não previstas na planta disponibilizada para o projeto, permitiria mais espaço nas coberturas e até a colocação um maior número de painéis, gerando assim, mais energia.



Figura 4-10 - Disposição dos painéis - Edifício 7.

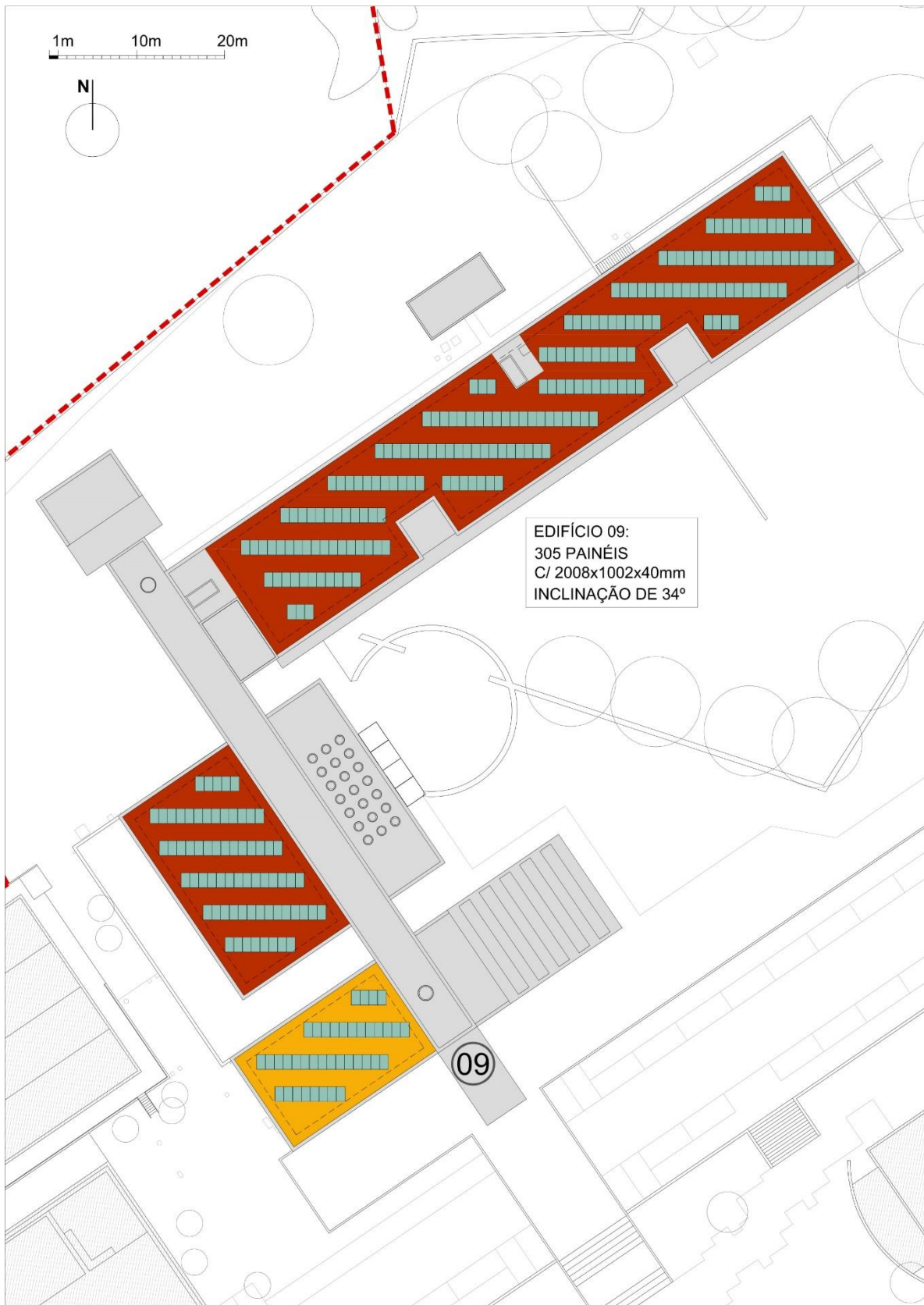


Figura 4-11 - Disposição dos painéis - Edifício 9.

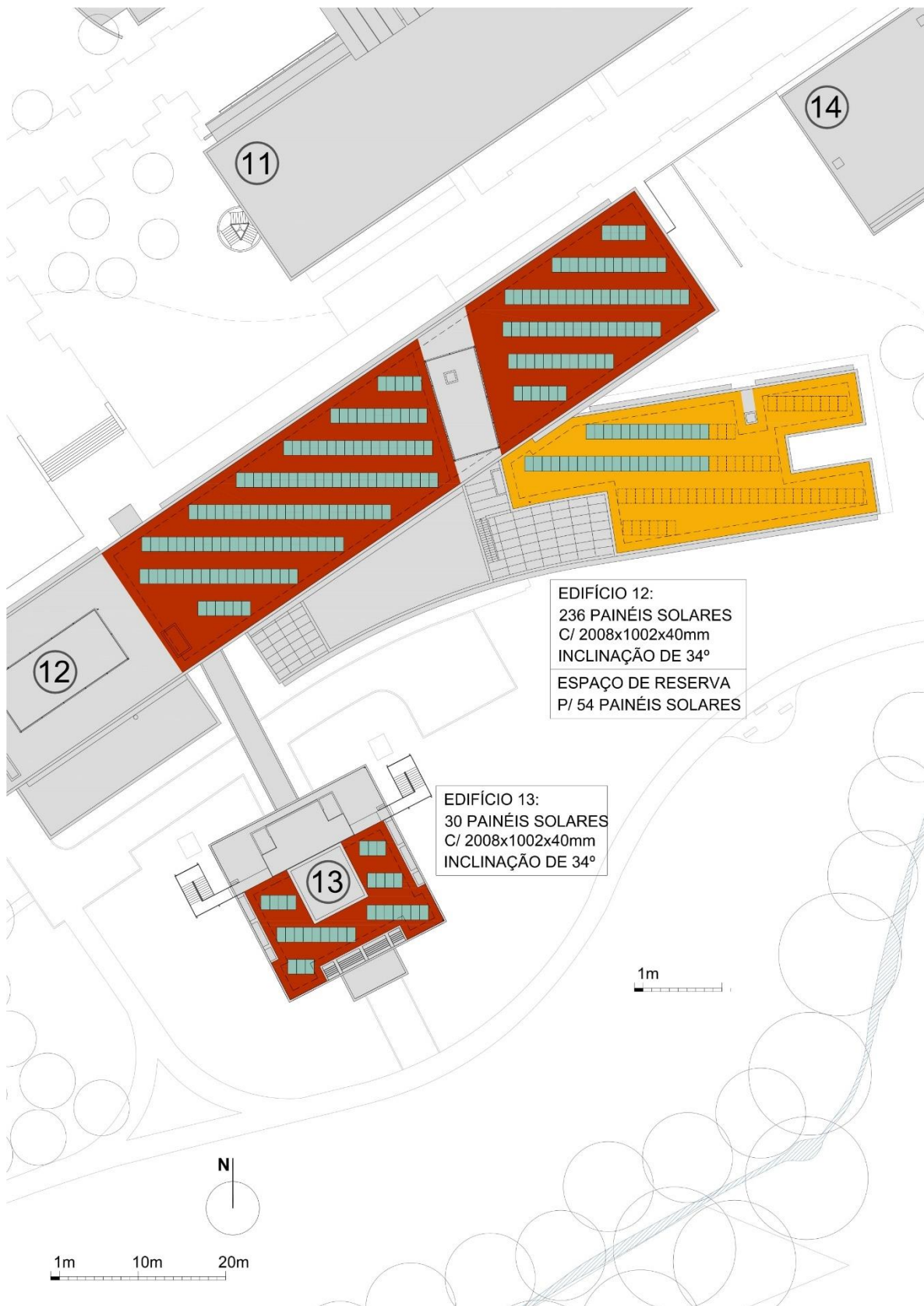


Figura 4-12 - Disposição dos painéis - Edifício 12 e 13.

Estas dimensões de painéis solares fotovoltaicos permitem a existência de mais espaço para células solares fotovoltaicas, face a dimensões menores, contando cada painel com uma potência nominal de 400 W. Para o cálculo da potência instalada em cada edifício apenas é

necessário fazer a multiplicação entre a potência nominal do painel em causa e o número de painéis instalados no edifício em que a instalação irá ter lugar. Com a informação neste capítulo, é facilmente possível chegar à potência instalada por edifício.

Tabela 2 - Potência Instalada por Edifício.

| Identificação edifício | Potência Instalada |
|------------------------|--------------------|
| Edifício 7             | 41,6 kW            |
| Edifício 9             | 122 kW             |
| Edifício 12            | 94,4 kW            |
| Edifício 13            | 12 kW              |
| Total                  | 270 kW             |

## 4.6 Conclusão

Neste capítulo, são retratadas possíveis soluções para a instalação do sistema solar fotovoltaico no terreno, começando por abordar como deve ser feito o sistema de ligações dos equipamentos e quais os cuidados necessários para não haver incidentes no terreno. Seguidamente, são abordadas as normas de segurança, que devem ser cumpridas para não ocorrem potenciais choques elétricos, visando sempre a proteção do ser humano e frisando a importância da segurança das ligações de cabos com proteção reforçada.

De acordo com as dimensões dos painéis mais recentes e mais potentes do mercado, foi calculado o sombreamento em planta para poder colocar os painéis na planta das coberturas dos edifícios. Tal cálculo foi efetuado de acordo com a área disponível e a distância de separação dos painéis em planta, estando assim já pré-desenhado todo este sistema do ponto de vista de dimensionamento do espaço e de acordo com as regras necessárias para o bom funcionamento do sistema. É ainda proposta uma possível área de expansão do sistema, uma medida que se iria refletir na produção de uma maior quantidade de energia e no aumento da distância de passagem nos restantes edifícios (a vermelho). Ou seja, para além da segurança ser reforçada, com a inclusão desta alteração, o retorno do investimento da Universidade do Minho seria mais célere.

Os valores de energia produzida apresentados na Tabela 2 correspondem à instalação dos 675 painéis inicialmente previstos para a área a vermelho das figuras. Os edifícios 9 e 12 são

os que representam maior potência instalada, pois produzem cerca de 80 % da potência total instalada, com 216,4 kW dos 270 kW estimados. Caso se opte pela solução que inclui as áreas a amarelo, será aumentado o orçamento, mas também a energia produzida, sendo uma vantagem para esta instalação solar fotovoltaica.

# Capítulo 5

## Análise das Soluções Solares Fotovoltaicas Sugeridas

### 5.1 Introdução

Nesta secção serão abordadas duas propostas para a instalação solar fotovoltaica. Uma solução cuja tecnologia usada nos painéis é monocristalina e outra policristalina. Estes dois tipos de tecnologia são os que tem maior oferta de mercado, o que, conseqüentemente, implica que são o tipo de tecnologias que mais vantagens trará aos utilizadores, sejam eles um cliente a título empresarial ou um cliente a título individual, pois a oferta é ajustada com a procura, provando ser das tecnologias mais consolidadas no mercado. As diferenças entre estas tecnologias passam pelo rendimento e preço de aquisição dos mesmos, onde os painéis solares fotovoltaicos monocristalinos são os que apresentam estas duas características com valores mais elevados. A análise mostrará qual a solução selecionada e quais os motivos para essa mesma seleção. As soluções serão apresentadas separadamente por cada um dos edifícios para análise mais pormenorizada.

### 5.2 Solução Monocristalina

Esta solução foi apresentada pela SINERSOL, cuja apresentação da empresa é a seguinte: “A SINERSOL é uma empresa dinâmica, profissional com o olhar no futuro, que oferece soluções em energias renováveis. A SINERSOL foi criada em 2007 e pertence a um grupo de empresas com mais de 40 anos no ramo empresarial. Somos certificados por alguns dos principais fabricantes mundiais de painéis e de inversores. (somos Fronius Service Partner, REC Solar Professional, Instalador Certificado Kostal, Instalador LG PRO). Contamos com mais de 900 instalações de Norte a Sul do país. A SINERSOL tem a sua sede principal na zona Norte na Rua Padre Manuel da Nóbrega nº 15, 4350-226 Porto, possui também uma filial na zona Sul na Rua R. Câmara Pestana, Ed. Sintra, loja 12, 2710-546 Sintra.”



### 5.2.1 Módulo Solar Fotovoltaico

Após o contacto com a empresa em questão e discussão de qual seria o módulo fotovoltaico mais adequado para o caso em estudo, foi selecionado um modelo da marca AXITEC, uma empresa alemã que apresenta no seu site a gama AXIpower, com duas soluções policristalinas, e a gama AXIpremium que apresenta 8 soluções monocristalinas. Este fabricante para além de ter uma garantia sobre o painel de 15 anos, possui uma garantia exclusiva de máximo rendimento, oferecendo garantia de 15 anos para 90 % de potência nominal e garantia de 25 anos para 85 % da potência nominal. A hipótese sugerida é o painel de 144 células com a referência AC-400Mh/144S, que apresenta uma potência nominal de 400 W. Além destas características, que são normalmente as mais comuns, este fabricante vai mais além, testando a eletroluminescência das células e obtendo 100 % no mesmo. Suporta cargas até um máximo de 2400 Pa, e tem tecnologia *Half-cut*. Esta tecnologia consiste na divisão das células do módulo solar fotovoltaico, recorrendo a um corte a laser das mesmas para melhorar o seu desempenho e durabilidade. Estes módulos apresentam uma menor resistência das células face aos módulos padronizados, contudo têm como principais vantagens a redução das perdas em resistência e o aumento da tolerância ao sombreamento, apresentando, assim, uma potência maior.

### 5.2.2 Orçamento do Equipamento para Instalação Solar Fotovoltaica

Neste tópico serão apresentados os orçamentos para cada um dos edifícios eleitos para a instalação fotovoltaica desejada, apresentado uma descrição detalhada de todos os componentes necessários para a instalação bem como o valor de cada instalação. Estes orçamentos serão apresentados em forma de tabela, por edifício, e com valores detalhados. Por fim, será apresentada uma tabela com o somatório de cada orçamento, podendo-se assim verificar o custo total deste projeto para a Universidade do Minho. Todos os valores serão apresentados sem IVA, uma vez que, neste tipo de sistemas de geração de energia baseados em FER, é aplicada Autoliquidação do IVA.

**Edifício 7**

Tabela 3 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 7.

| <b>Descrição (Edifício 7)</b>   | <b>Quantidade</b> | <b>Valor sem IVA</b> |
|---|-------------------|----------------------|
| Painel AXIPREMIUM AC 400 M<br>Painel com 400 W de potência – Total 41,6 kWp | 104 unidades      | 14 560,00 €          |
| Estrutura<br>Cobertura Plano Sandwich em Alumínio e Aço Inox                | 104 unidades      | 3 800,00 €           |
| Inversor Huawei Sun2000 36 KTL  | 1 unidade         | 3 200,00 €           |
| Contador de Produção  | 1 conjunto        | 600,00 €             |
| <i>Smartlogger</i> 3000 A   | 1 conjunto        | 1 200,00 €           |
| Cablagem de Ligação   | 1 conjunto        | 1 500,00 €           |
| Instalação  | 1 conjunto        | 1 800,00 €           |
| <b>TOTAL</b>  |                   | <b>26 660,00 €</b>   |

**Edifício 9**

Tabela 4 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 9.

| <b>Descrição (Edifício 9)</b>  | <b>Quantidade</b> | <b>Valor sem IVA</b> |
|--|-------------------|----------------------|
| Painel AXIPREMIUM AC 400 M<br>Painel com 400 W de potência – Total 122 kWp | 305 unidades      | 42 700,00 €          |
| Estrutura<br>Cobertura Plano Sandwich em Alumínio e Aço Inox               | 305 unidades      | 12 500,00 €          |
| Inversor Huawei Sun2000 60 KTL   | 2 unidade         | 7 200,00 €           |
| Contador de Produção   | 1 conjunto        | 600,00 €             |
| <i>Smartlogger</i> 3000 A  | 1 conjunto        | 1 200,00 €           |
| Cablagem de Ligação  | 1 conjunto        | 3 000,00 €           |
| Instalação   | 1 conjunto        | 5 500,00 €           |
| <b>TOTAL</b>   |                   | <b>72 700,00 €</b>   |

**Edifício 12**

Tabela 5 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 12.

| <b>Descrição (Edifício 12)</b>  | <b>Quantidade</b> | <b>Valor sem IVA</b> |
|---|-------------------|----------------------|
| Painel AXIPREMIUM AC 400 M<br>Painel com 400 W de potência – Total 94,4 kWp | 236 unidades      | 33 040,00 €          |
| Estrutura<br>Cobertura Plano Sandwich em Alumínio e Aço Inox                | 236 unidades      | 9 676,00 €           |
| Inversor Huawei Sun2000 60 KTL  | 1 unidade         | 3 600,00 €           |
| Inversor Huawei Sun2000 20 KTL  | 1 unidade         | 2 300,00 €           |
| Contador de Produção  | 1 conjunto        | 600,00 €             |
| <i>Smartlogger</i> 3000 A   | 1 conjunto        | 1 200,00 €           |
| Cablagem de Ligação   | 1 conjunto        | 1 800,00 €           |
| Instalação  | 1 conjunto        | 4 584,00 €           |
| <b>TOTAL</b>  |                   | <b>56 800,00 €</b>   |

**Edifício 13**

Tabela 6 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica edifício 13.

| <b>Descrição (Edifício 13)</b>  | <b>Quantidade</b> | <b>Valor sem IVA</b> |
|---|-------------------|----------------------|
| Painel AXIPREMIUM AC 400 M<br>Painel com 400 W de potência – Total 12 kWp | 30 unidades       | 4 200,00 €           |
| Estrutura<br>Cobertura Plano Sandwich em Alumínio e Aço Inox              | 30 unidades       | 1 450,00 €           |
| Inversor Huawei Sun2000 10 KTL  | 1 unidade         | 1 750,00 €           |
| Contador de Produção  | 1 conjunto        | 600,00 €             |
| <i>Smartlogger</i> 3000 A   | 1 conjunto        | 1 200,00 €           |
| Cablagem de Ligação   | 1 conjunto        | 700,00 €             |
| Instalação  | 1 conjunto        | 950,00 €             |
| <b>TOTAL</b>  |                   | <b>10 850,00 €</b>   |

## Orçamento Total da Instalação

Tabela 7 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica Total.

| Descrição (Total)  | Quantidade   | Valor sem IVA       |
|--|--------------|---------------------|
| Painel AXIPREMIUM AC 400 M<br>Painel com 400 W de potência – Total 270 kWp | 675 unidades | 94 500,00 €         |
| Estrutura<br>Cobertura Plano Sandwich em Alumínio e Aço Inox               | 675 unidades | 27 426,00 €         |
| Inversor Huawei Sun2000 60 KTL   | 3 unidades   | 10 800,00 €         |
| Inversor Huawei Sun2000 36 KTL   | 1 unidade    | 3 200,00 €          |
| Inversor Huawei Sun2000 20 KTL   | 1 unidade    | 2 300,00 €          |
| Inversor Huawei Sun2000 10 KTL   | 1 unidade    | 1 750,00 €          |
| Contador de Produção   | 4 conjuntos  | 2 400,00 €          |
| Smartlogger 3000 A   | 4 conjuntos  | 4 800,00 €          |
| Cablagem de Ligação  | 4 conjunto   | 7 000,00 €          |
| Instalação   | 4 conjunto   | 12 834,00 €         |
| <b>TOTAL</b>   |              | <b>167 010,00 €</b> |

### 5.3 Solução Policristalina

Esta solução foi encontrada na efectoLED, uma empresa Espanhola que tem como um dos seus mercados de operação a Península Ibérica. O painel escolhido pertence a um kit de autoconsumo para empresas que a efectoLED criou, onde contempla quase tudo o que é necessário para a instalação da potência que o kit promete. Para isso o painel utilizado é o que aparece em anexo neste documento, do fabricante *BYD*, com a referência P6C-36-SERIES-4BB. O mesmo apresenta uma eficiência de célula de 18.6 %, tem tolerância positiva de 0 a 5 W e uma garantia de 12 anos para o equipamento e garantia de 25 anos de queda de produção linear garantida (caindo para 80%). De referir que já vêm preparados para uso doméstico e aguentam cargas no mesmo valor para vento que o módulo monocristalino anterior com 2400 Pa e uma carga superior para neve com 5400 Pa.

O kit Grande Auto-Consumo Trifásico Para Empresas com conexão à rede de 15 kW de potência é composto pelos seguintes componentes:

- 50 Painéis solares Fotovoltaicos Policristalinos 24 V 320 W (1950 x 992 x 50 mm)
- 1 Inversor com conexão à rede trifásico Duplo MPPT 15 kW (duplo *input* de controlo)
- 20 m Cabo 10 mm<sup>2</sup> PV ZZ-F Preto
- 20 m Cabo 10 mm<sup>2</sup> PV ZZ-F Vermelho
- 2 Conectores multicontacto MC4 1/1 e pontas contacto
- 2 Fusíveis CC 10 A
- 2 Porta-Fusíveis CC 10 x 38 mm
- 1 Repartidor de Energia de 4 pólos
- 1 Protetor de Sobretensões Transitórias 2 pólos-Classe II-40 kA-20 kA-3,8 kV 1000 V DC
- 1 Interruptor automático industrial 3 pólos 6 kA
- 1 Interruptor diferencial industrial 2 pólos-30 mA-classe AC (apenas deteta fugas em corrente alternada) 6 kA
- 2 Quadros elétricos IP65 (8 módulos)

Este kit não inclui suportes, fixações e estrutura para segurar os painéis. Estes também existem nesta empresa, tendo uma inclinação fixa de 30 °.

Esta empresa não dispõe de serviço de instalação, sendo a mesma requerida a outrem ou realizada pelos serviços técnicos da Universidade do Minho. No entanto, verificar-se-iam custos de mão de obra mais elevados para este projeto. Como cada kit representa 15 kW de potência total, significa que este sistema teria uma potência total de 210 kW.

Tabela 8 - Orçamento para instalação solar fotovoltaica policristalina.

| Descrição  | Quantidade | Valor Sem IVA |
|--|------------|---------------|
| Kit Auto Consumo Trifásico Conexão à Rede 15 kW Exclusive      | 14         | 91 358,68 €   |
| Estrutura Para Painéis Solares 30° de Inclinação (10 unidades) | 70         | 27 299,30 €   |
| TOTAL  |            | 118 657,98 €  |

## 5.4 Comparativo de Soluções

Na Solução monocristalina, temos uma proposta desenhada para os edifícios pretendidos, não sendo um kit pré-estabelecido e multiplicado consoante a necessidade do projeto, como acontece na Solução policristalina. Sendo elaborado à medida, gera menos desperdício de material porque a logística de cada edifício pode implicar ajustes que não irão de encontro ao estabelecido num kit genérico, o que implicaria mais custos para a Universidade do Minho.

A primeira solução contempla um contador de produção e um *smartlogger* 3000 A, por edifício, o que permite realizar consultas remotamente. Esta consulta pode ser feita tanto por computador como por smartphone e permite visualizar a produção instantânea da instalação, bem como receber avisos sobre o inversor. A Solução policristalina não apresenta esta funcionalidade, perdendo neste tópico tecnológico que em nada afeta a produção de energia em condições normais de funcionamento.

A diferença entre a potência instalada das duas possíveis instalações é de 60 kW. A primeira solução apresentada, tratando-se de uma instalação solar fotovoltaica monocristalina, apresenta maior eficiência por módulo, produzindo, desta feita 400 W face aos 320 W da segunda solução (policristalina). Estes factos permitem afirmar que a solução monocristalina é a melhor das duas soluções, uma vez que, além do descrito nos parágrafos anteriores, os 60 kW de diferença de produção de energia solar fotovoltaica, sendo um investimento a longo prazo, compensam um maior investimento inicial. Assumindo que a solução policristalina necessitaria de uma instalação de valor igual (potência instalada) à solução monocristalina, a diferença de investimento seria na ordem dos 30 mil euros. Face aos consumos energéticos da Universidade do Minho, este investimento, seria facilmente recuperado com os 60 kW extra da solução monocristalina.

Em ambas as situações seria utilizado um *string inverter*. Apesar de contemplar todas as limitações que já foram apresentadas no estado da arte desta dissertação de mestrado, esta é a solução mais usada a nível empresarial, pois a solução com micro inversor por painel seria demasiado dispendiosa num projeto de 675 painéis solares fotovoltaicos. De referir ainda que, optando pela solução monocristalina, seriam usados menos inversores, pois este tipo de painéis está preparado para sistemas de potência elevada, ao contrário da solução

policristalina, que a cada 50 painéis terá um inversor, ou seja, neste caso, 14 inversores face a 6 inversores da solução monocristalina.

No que diz respeito à inclinação das estruturas, e consequentemente dos painéis a solução monocristalina oferece a liberdade de colocar o painel com a inclinação calculada, ao passo que, no caso da solução policristalina, a inclinação é, obrigatoriamente de 30 °, um revés face aos 34 ° desejados. Como mencionado, tal limitação resultaria num pior rendimento do painel sob o ponto de vista teórico.

A importância das garantias é mais que notória em qualquer investimento, mas em investimentos a curto prazo e de baixos valores, esta é um bocado esquecida por alguns consumidores. No entanto, investimentos a longo prazo e garantias extensas são apreciadas. O inversor utilizado na solução policristalina oferece uma garantia de 2 anos do fabricante, já os da solução monocristalina, sendo da HUAWEI, apresentam uma garantia de 5 anos, podendo ser expansível até 10 anos. Sendo estes inversores os componentes com um tempo de vida útil mais curto, a opção com mais garantia é a melhor escolha. A garantia dos painéis também é favorecida na solução monocristalina, dado que a garantia de fabricação do painel proposto nesta solução é de 15 anos, face aos 10 anos de garantia oferecidos nos painéis da solução policristalina.

Com estes factos, é possível perceber que a solução monocristalina apresenta bastantes mais vantagens para este investimento a longo prazo da Universidade do Minho. Embora seja uma diferença de 30 mil euros, este conjunto de vantagens inerentes a esta solução, serão certamente recuperados num curto intervalo temporal.

## 5.5 Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as duas soluções selecionadas, sendo primeiramente apresentada a solução monocristalina e seguidamente a solução policristalina. A primeira solução apresenta detalhe ao nível do edifício, pois foi assim apresentada de acordo com as instruções do pedido. Por outro lado, a segunda solução apresenta apenas uma solução única de um kit chave na mão. Esta diferença entre a diferença da qualidade dos orçamentos também evidencia o profissionalismo de cada uma, o que deve ser tido em conta na hora da escolha da empresa que instalará o sistema.

Depois de apresentadas as soluções, é feito um comparativo entre ambas com vista a eleger a melhor, averiguando e pesando as vantagens e desvantagens de cada uma, concluindo-se que a solução monocristalina é a melhor proposta favorecendo as necessidades deste projeto.



# Capítulo 6

## Expectativa de Retorno Financeiro

### 6.1 Introdução

O retorno financeiro de qualquer investimento deve ser calculado, pois é dos tópicos mais importantes em qualquer investimento e uma vez que existem muitas condicionantes e variáveis, foram simplificados os cálculos. Não obstante, este processo apresenta como maior dificuldade prever as horas de sol a que os painéis estão expostos, pois o tempo de incidência solar varia com as estações do ano e com as condições atmosféricas. Analisando a informação retirada de um software de dados solares recolhidos através de satélite, ficou mais fácil compreender quantas horas de sol seria possível esperar de cada estação e, com isso, estimar uma data para o retorno no investimento com base na energia produzida esperada. Para isto acontecer, é necessário saber quanto é o valor total investido no projeto para ser considerado nos cálculos do retorno financeiro.

### 6.2 Software Solargis

Como forma de auxílio, com informação recolhida com recurso a satélites, o software Solargis, apresentou-se como o mais popular da área de informação auxiliar para instalações fotovoltaicas. Foi reconhecido como mais confiável através da realização de vários estudos face aos oponentes que prestam o mesmo serviço. Parte da informação é gratuita por tempo limitado e apresenta também a versão paga, que permite o uso de ferramentas como economia, desempenho fotovoltaico entre outras. É também o software mais detalhado, com uma resolução espacial de 250 metros e análise temporal com maior resolução para melhorar a qualidade dos dados. A sua base de dados contempla informações passadas, atuais e previsões futuras, uma característica que contribui para o aumento da realidade da simulação.

Primeiramente, seleccionou-se o ponto geográfico que é pretendido, sendo este o *pinpoint* presente na imagem abaixo a vermelho. O valor 1461 representa a quantidade de radiação na zona geográfica, segundo os dados deste software.



Figura 6-1 - Imagem topográfica da Universidade do Minho, software SOLARGIS.



Figura 6-2 - Imagem de satélite da Universidade do Minho, software SOLARGIS.



Figura 6-3 - Informação principal disponível na versão trial.

Esta figura contém informações e dados geográficos do projeto em questão, uma vez que a configuração do sistema fotovoltaico foi colocada no software para obter os dados apresentados. Neste tópico, são tidos em consideração fatores como tipo de módulo fotovoltaico para saber com que eficiência lidar, o espaçamento entre cada linha de painéis e a inclinação dos painéis solares fotovoltaicos para validar que a distância do sombreamento está corretamente calculada. O tipo de inversor escolhido está diretamente ligado ao custo da instalação. Por esse mesmo motivo, esta instalação, pelo facto de contemplar um inversor em cadeia ou série, representa uma poupança em euros de até 96.4 % nos inversores. São consideradas perdas genéricas de transformadores e perdas por sujidade ou sombreamento nos módulos, fator de extrema importância no cálculo de eficiência energética deste tipo de sistemas.

Os 4 valores em cima são gerados à custa da informação descritiva supracitada na Figura 6-3, onde, no caso do valor mais a esquerda, não depende da dimensão da instalação pois representa a irradiação média global para aquele ponto geográfico com base em informações de satélites. O segundo valor, que representa a temperatura média anual, está associado às perdas por calor, devido às altas temperaturas de funcionamento a que os painéis solares estão expostos. O terceiro valor representa, com base no valor de potência da instalação solar fotovoltaica, a energia média anual de produção. O quarto e último é apresentado como razão de desempenho, uma média anual, que representa as diferenças

de produção durante as diferentes estações do ano com ciclos solares de duração diferente, considerando assim a eficiência real estimada do projeto.

A imagem seguinte contém mais informações sobre o projeto como o horizonte e caminho do sol no projeto e duração do dia e ângulo do zênite solar.

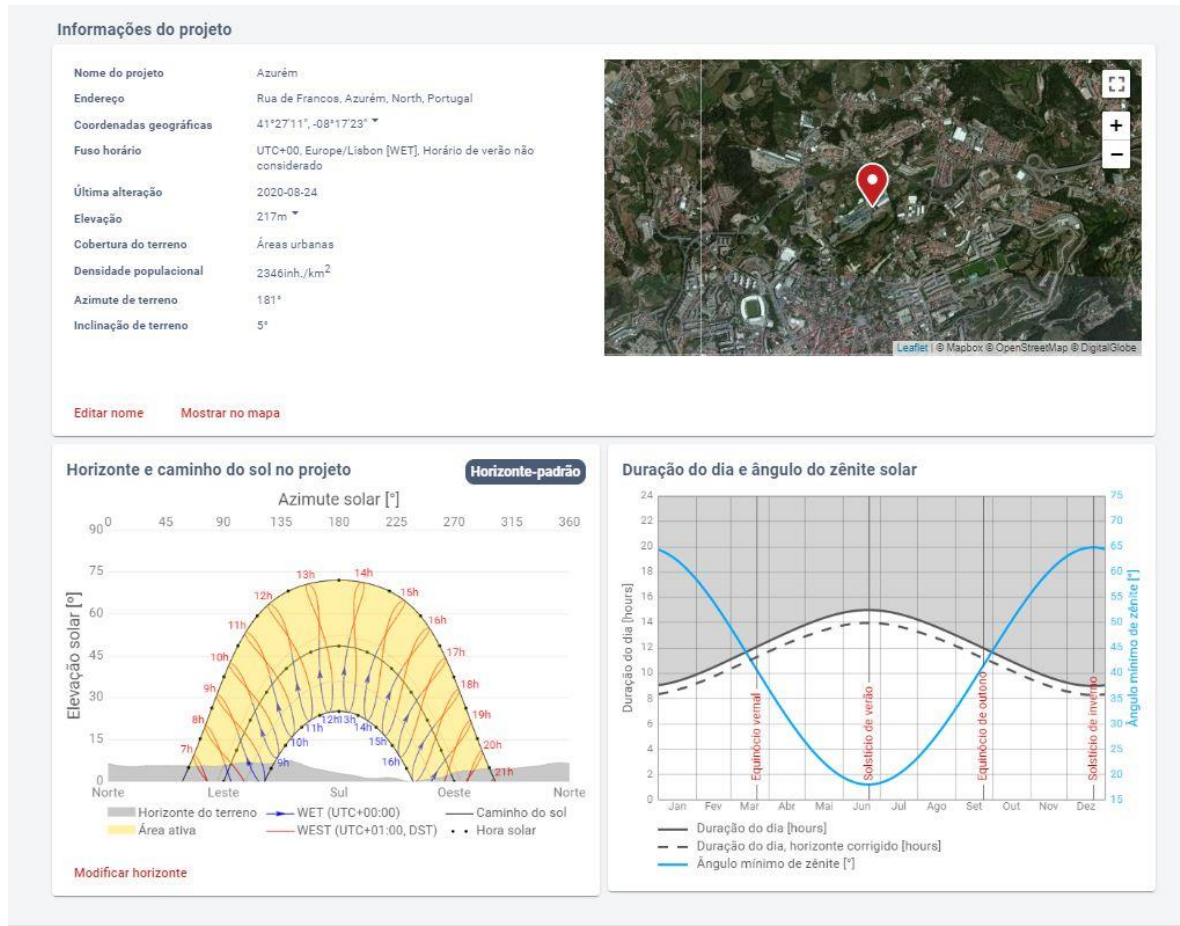


Figura 6-4 - Informação adicional disponível na versão trial.

Esta versão *trial* foi obtida com o *login* académico de estudante da Universidade do Minho, sendo requerida uma versão com total liberdade de uso por uma semana. A versão completa deste software representa uma licença no valor de 3600 euros. O uso deste software é totalmente académico, sem interesse de rentabilizar este projeto a nível pessoal.

### 6.3 Cálculo do Retorno Financeiro

Para calcular o período de retorno, é necessário ter em consideração os seguintes fatores:

- O custo total do sistema de geração solar fotovoltaico, com todos os valores relacionados com a aquisição do mesmo, depende do tamanho do sistema e do equipamento que escolhido para esse sistema;
- Incentivos fiscais;
- Gastos mensais em energia elétrica, uma vez que, quanto maior o gasto, mais rápido será o retorno do investimento;
- Geração estimada de energia, que não é igual à produção ideal por diversos motivos de ambiente real.

Matematicamente, é necessário determinar os custos combinados e os benefícios anuais da instalação. Estes estão relacionados com a energia gerada em comparação com o consumo elétrico e o que estes representam na fatura da energia elétrica. Posto isto, a solução deste processo é dividir os custos do sistema pelos ganhos anuais da instalação, obtendo como resultado o tempo necessário para a recuperação do investimento. Assumindo que o sistema para ser feito um investimento é a primeira opção do capítulo anterior (sistema monocristalino), e que esse valor já contempla, tanto equipamento como instalação no valor de 167 010,00 €. Este com uma capacidade de produção de 270 kWp, consegue cobrir o consumo instantâneo nas horas de produção deste sistema, produzindo mais energia que a consumida. Como se trata de um sistema sem armazenamento, é possível vender o excedente à empresa fornecedora de energia, valor este bastante baixo, comparativamente ao preço do kWh da empresa responsável pelo contrato, dependendo este valor da companhia que fornece o serviço. Este tipo de cálculo, como depende da meteorologia local e sendo este um fator cada vez mais variável devido as alterações climáticas provocadas pelo aquecimento global, deve ser calculado por defeito e não por excesso para não comprometer a veracidade da estimativa. Será assumido um ciclo de exposição solar médio de 5 horas de produção, para assim incluir uma produção de 7 horas no verão, 5 na primavera e outono e 3 horas no inverno. Neste caso, a energia produzida é suficiente para o consumo energético do campus de Azurém, sendo que o remanescente pode ser vendido à rede, que é o cenário menos rentável. O ideal seria, dado ambos os polos da Universidade estarem associados ao mesmo contribuinte e o contrato comercial de distribuição de energia elétrica ser na mesma empresa deveria ser possível usufruir dessa energia não consumida no campus de Braga, que como tem consumos energéticos maiores que o campus de Azurém reduziria imenso a data da recuperação do investimento.

Os cálculos seguintes incluem a energia produzida nas condições anteriormente referidas, o rendimento médio dos painéis que vai decaindo ao longo dos anos, a conversão em euros da energia anual produzida e por fim o tempo de retorno do investimento em anos.

$$\begin{aligned} \text{Energia}_{\text{Produzida}} &= (270 \text{ kW} \times 7 \text{ horas} \times 92 \text{ dias}) \\ &+ (270 \text{ kW} \times 2 \times 5 \text{ horas} \times 91 \text{ dias}) \\ &+ (270 \text{ kW} \times 3 \text{ horas} \times 91 \text{ dias}) \end{aligned}$$

$$\text{Energia}_{\text{Produzida}} = 493290 \text{ kWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Rendimento médio assegurado pelo fabricante em 25 anos} \\ = \text{Energia}_{\text{Produzida}} \times 0.9 = 443961 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Valor anual de Energia Produzida} = 443961 \text{ kWh} \times 0,065 = 28\,857,47 \text{ €}$$

$$\text{Retorno do Investimento Expectável(anos)} = \frac{\text{Investimento no Sistema}}{\text{Valor anual de Energia Produzida}}$$

$$\text{Retorno do Investimento Expectável(anos)} = \frac{167010,00 \text{ €}}{28\,857,47 \text{ €}}$$

$$\text{Retorno do Investimento Expectável(anos)} = 5,79 \text{ anos}$$

Após a análise destas equações, é possível concluir que no espaço de 5 anos e 9 meses se recuperaria o investimento neste sistema de produção de energia. Adicionalmente, após o investimento ser recuperado, este sistema solar fotovoltaico representaria uma poupança anual de 28857,47 €, pelo menos até á garantia de produção de energia de 25 anos normalmente. Faltando depois 19 anos e 3 meses até a dita garantia de funcionamento representaria uma poupança de:

$$\text{Poupança}_{25 \text{ anos}} = (25 - 5.79) \times 28\,857,47 \text{ €}$$

$$\text{Poupança}_{25 \text{ anos}} = 554\,351,99 \text{ €}$$

## 6.4 Conclusão

Este capítulo visa estimar o retorno financeiro do investimento do sistema solar fotovoltaico com base na informação retirada do software Solargis. Posteriormente, os cálculos apresentados neste tópico são referentes a uma estimativa de uma data de retorno do investimento com base na energia produzida, período após o qual tudo que o sistema

produzir é, efetivamente, poupança. Este período foi calculado com base em estimativas de exposição solar em cada estação, sendo realizado por defeito para maior veracidade dos resultados, algo que poderia ser comprometido se o cálculo fosse realizado com valores otimistas.

Verifica-se ainda que, 25 anos após o investimento no sistema solar fotovoltaico supracitado no capítulo anterior, a Universidade do Minho obterá uma poupança de mais de meio milhão de euros, recuperando o investimento em 5 anos e 9 meses.

# Capítulo 7

## Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

### 7.1 Conclusões

A proposta deste trabalho surgiu da necessidade de redução da pegada ecológica e das despesas elétricas da Universidade do Minho. Neste sentido, os Serviços Técnicos da mesma sugeriram este projeto para uma dissertação de mestrado ao Departamento de Eletrónica Industrial, mais precisamente ao Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE), por ser o departamento com maior conhecimento científico sobre a temática de energias renováveis.

Selecionado e atribuído este tema, o autor do documento, tem em vista as várias áreas de conhecimento que este projeto engloba, além do contributo para o ambiente e para a Universidade do Minho, como ambição no sucesso deste projeto e término de um ciclo da sua vida pessoal.

Este projeto consiste, em suma, no dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico a ser aplicado nas coberturas elegidas como viáveis no campus de Azurém. Posto isto, o sistema mais adequado é um sistema com uma capacidade de produzir 270 kWp, composto por 675 painéis solares fotovoltaicos da marca alemã Axitec, com 400 Wp cada, pertencendo ao topo, no que diz respeito a garantias e eficiências. Estes painéis são monocristalinos e apresentam a maior eficiência no mercado competitivo atual. O inversor escolhido permite ligações em série por questões do melhor rácio custo-benefício, sendo da marca *Huawei*, conhecida pela grande eficiência e fiabilidade, sendo das marcas de inversores mais vendidas mundialmente. O sistema de gestão e monitorização de energia é um *Smartlogger* da *Huawei*, onde é possível monitorizar a produção, o consumo e otimizar os consumos durante o dia, bem como receber avisos sobre o inversor. Todo este material, bem como as estruturas com inclinação de 34 ° e a instalação, estão associados à empresa Sinersol. Para chegar a um orçamento e listagem de material, foi necessário gerir a área útil



disponível, cumprindo todas as regras e cálculos para que não existissem perdas na produção por sombreamento, fator mais importante na produção de energia solar fotovoltaica com inversores em série.

Por fim, foi realizada uma estimativa de retorno do investimento neste sistema, permitindo verificar uma poupança considerável em 25 anos na fatura da energia elétrica. Os cálculos efetuados permitiram ainda prever que o investimento neste projeto é recuperado ao fim de 5 anos e 9 meses.

Dito isto, é possível concluir que:

- As tecnologias mais utilizadas do mercado industrial são as soluções monocristalinas e policristalinas, apresentando maior rendimento face às demais, bem como uma tecnologia mais consolidada para produção em grande escala.
- Das duas soluções apresentadas, a monocristalina apresenta maiores vantagens a longo prazo tendo em conta um maior investimento inicial.
- O sistema solar fotovoltaico para o meio industrial contempla uma solução em que os painéis são colocados em série com um conversor a cada uma ou mais linhas de painéis, dependendo da potência de cada linha. Esta solução cumpre os requisitos de produção de energia elétrica, sendo consideravelmente mais barata, embora uma solução com um micro inversor instalado em cada painel apresente vantagens ao nível da segurança e do sistema de controlo mais eficiente no caso de sombreamento. No entanto, o custo retira estes inversores dos planos do projeto.
- A rentabilidade do investimento num sistema solar fotovoltaico é comprovada para o cenário estudado, cenário este de alto consumo energético e um sistema solar de grande dimensão. O sistema deve ser sempre ajustado de acordo com o consumo energético.

## 7.2 Sugestões para Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, sendo verificada a validade deste projeto, será importante investir no estudo de soluções similares para o campus de Gualtar da Universidade do Minho, com o objetivo de se propor uma maior redução da pegada ecológica da Universidade, e visando que a longo prazo possa ser possível alcançar um funcionamento energético autossustentável.

Além da sugestão anterior, propõe-se a aplicação de painéis transparentes no telhado da escola de engenharia em Azurém, aquando das condições da tecnologia fotovoltaica em questão seja competitiva em termos de economia e performance. Uma boa altura para este investimento poderia ser quando se fizesse uma troca de telhado, aproveitando que já seria necessário despende dinheiro em vidro novos, ao aplicar painéis transparentes, seria subtraído o valor dos vidros novos apreço dos painéis pois a troca já seria efetuada de qualquer das formas.

Considerando esta dissertação de mestrado como base, será certamente mais motivador ingressar num novo projeto onde sejam aprofundadas as vantagens do mesmo.

# Anexos



385 - 415 Wp







**AXITEC**  
high quality german solar brand

## AXIpremium X HC

144 Half-Cut full-square monocristalino  
Módulos fotovoltaicos de alto rendimento

 Engenharia alemã

Vantagens:

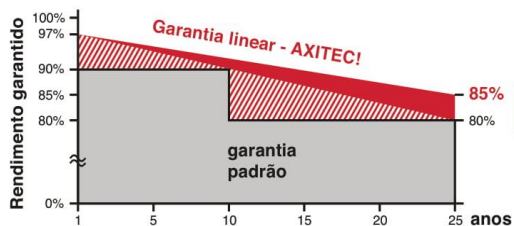
-  15 Years  
Garantia de fabricação de 15 anos
-  HC  
Máxima performance com tecnologia „Half-Cut“ e materiais certificados
-  Wp  
Tolerância de potência positiva garantida de -0/+5 Wp
-  2.400 Pa  
Carga máxima de 2400 Pa
-  100%  
100% teste de electroluminescência
-  IP 68  
Caixa de conexão e sistema de conectores de alta qualidade



144MHBR200415A  
Ilu. similar

Garantia linear exclusiva de AXITEC de máximo rendimento!

- Garantia de 15 anos para 90% de potência nominal
- Garantia de 25 anos para 85% de potência nominal



1 - 8 % mais energia  
depois de 25 anos



**PROCEL**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE CONSERVAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

Axitec do Brasil - Cel. 071-99295-2723 - info@axitecsolar.com.br - www.axitecsolar.com.br



## AXIpremium X HC 385 - 415 Wp

**Dados elétricos** (em condições de teste padrão (STC) irradiância 1.000 W/m<sup>2</sup> com espectro AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C)

| Tipo          | Potência nominal<br>P <sub>mpp</sub> | Tensão nominal<br>U <sub>mpp</sub> | Corrente nominal<br>I <sub>mpp</sub> | Corrente de<br>curto-circuito I <sub>sc</sub> | Tensão de<br>circuito aberto U <sub>oc</sub> | Eficiência<br>de módulo |
|---------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|--|-------------------------|
| AC-385MH/144S | 385 Wp                               | 40,24 V                            | 9,58 A                               | 10,10 A                                       | 48,11 V                                      | 19,1 %                  |
| AC-390MH/144S | 390 Wp                               | 40,50 V                            | 9,64 A                               | 10,21 A                                       | 48,30 V                                      | 19,4 %                  |
| AC-395MH/144S | 395 Wp                               | 40,80 V                            | 9,69 A                               | 10,33 A                                       | 48,52 V                                      | 19,6 %                  |
| AC-400MH/144S | 400 Wp                               | 41,12 V                            | 9,74 A                               | 10,46 A                                       | 48,81 V                                      | 19,9 %                  |
| AC-405MH/144S | 405 Wp                               | 41,43 V                            | 9,79 A                               | 10,59 A                                       | 49,50 V                                      | 20,1 %                  |
| AC-410MH/144S | 410 Wp                               | 41,75 V                            | 9,83 A                               | 10,72 A                                       | 49,79 V                                      | 20,4 %                  |
| AC-415MH/144S | 415 Wp                               | 41,98 V                            | 9,89 A                               | 10,84 A                                       | 50,08 V                                      | 20,6 %                  |

### Estrutura

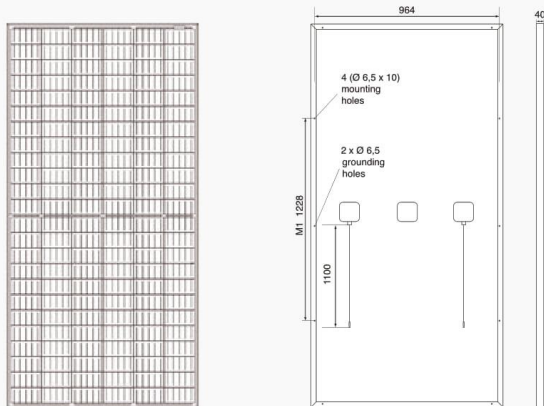
|         |  |
|---------|--|
| Frente  | vidro temperado e de baixa reflexão, 3,2 mm            |
| Célula  | 144 células de silício monocristalino de alta potência |
| Verso   | película posterior resistente às intempéries (branca)  |
| Moldura | 40 mm moldura de alumínio (cor de prata)               |

### Dados mecânicos

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| C x L x A | 2008 x 1002 x 40 mm |
| Peso      | 23,5 kg com moldura |

### Conexão

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Caixa de conexão      | grau de proteção IP68                              |
| Cabo                  | ca. 1,1 m, 4 mm <sup>2</sup>                       |
| Sistema de conectores | grau de proteção IP68, Stäubli MC4 / MC4 pluggable |



Todas medidas em mm

### Valor limite

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Tensão do sistema                          | 1000 VDC              |
| NOCT (nominal operating cell temperature)* | 45°C +/-2K            |
| Máxima de carga                            | 2400 N/m <sup>2</sup> |
| Corrente reversa                           | 20,0 A                |
| Temperatura de operação permitida          | -40°C até +85°C       |

(Não podem ser aplicadas ao módulo tensões externas maiores que U<sub>oc</sub>)

\*NOCT, irradiância 800 W/m<sup>2</sup>; AM 1.5; velocidade de vento 1 m/s

### Coefficiente de temperatura

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Tensão U <sub>oc</sub>    | -0,29 %/K |
| Corrente I <sub>sc</sub>  | 0,04 %/K  |
| Potência P <sub>mpp</sub> | -0,39 %/K |

### Comportamento com luz fraca (Exemplo AC-415MH/144S)

| I-U Característica    | Corrente | Tensão  |
|-----------------------|----------|---------|
| 200 W/m <sup>2</sup>  | 2,02 A   | 40,40 V |
| 400 W/m <sup>2</sup>  | 4,08 A   | 40,87 V |
| 600 W/m <sup>2</sup>  | 6,09 A   | 41,19 V |
| 800 W/m <sup>2</sup>  | 8,05 A   | 41,54 V |
| 1000 W/m <sup>2</sup> | 9,89 A   | 41,98 V |

### Embalagem

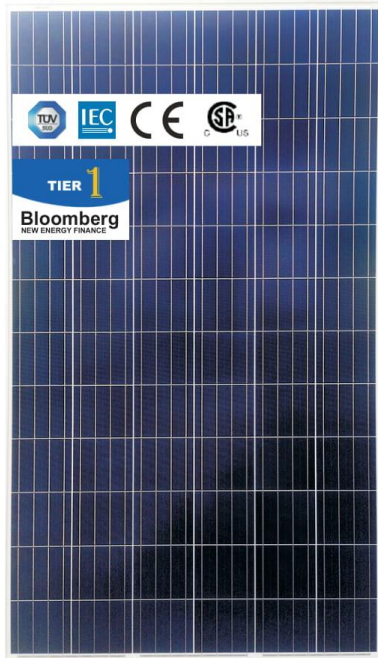
|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| Módulos Solares por pallet            | 25x unidades  |
| Módulos Solares por Container (40'HC) | 550x unidades |







Podem ocorrer sem aviso prévio alterações nas especificações dos dados técnicos. Todos os direitos reservados. Tolerâncias das medidas: +/-3%. Tenha em atenção o seguinte: Todos os dados técnicos indicados nas nossas fichas de dados são propriedade da Axitec Energy GmbH & Co.KG e têm apenas caráter informativo para os nossos clientes. Não se pode garantir a sua correção e exaustividade. Qualquer tipo de uso comercial destes dados é proibido.

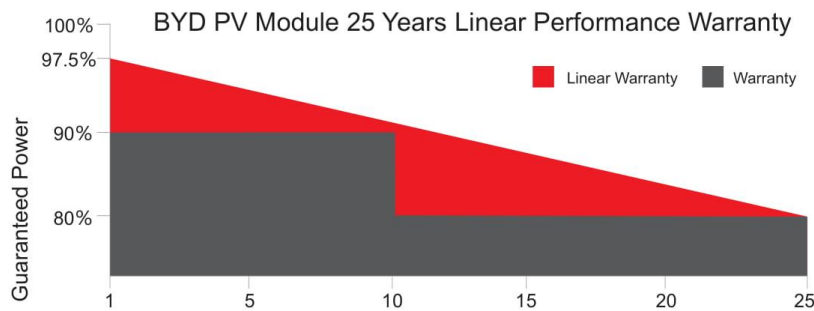
# P6C-36-SERIES-4BB



156.75P



-  Average cell efficiency up to 18.6%  
Excellent optical performance
-  Positive tolerance 0~5W  
Reliability for output performance
-  12 years for product  
25 years linear Warranty
-  Residential roof top systems  
On/Off-grid commercial systems  
On/Off-grid utility systems
-  TUV Class C fire class rating  
TUV Salt corrosion resistance test  
TUV 5400Pa for Snow Load Test  
TUV 2400Pa for Wind Load Test  
CSA Type 1 fire class rating  
CSA Mechanical Load=1.5\*3600Pa=5400Pa
-  IEC 61215(Edition 2005), IEC 61730  
ULC/ORD-C 1703-01, UL 1703-3rd Edition  
ISO9001:2008, ISO14001:2004



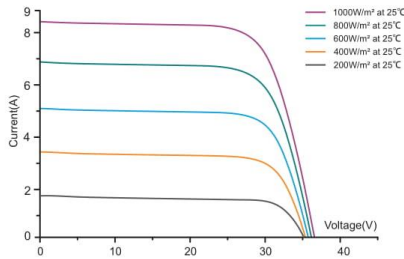
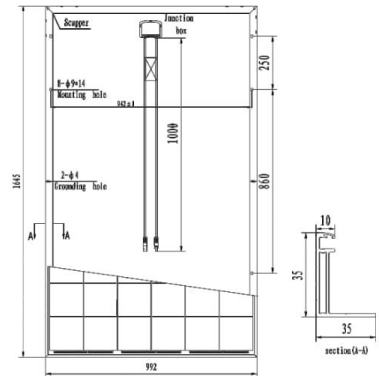
## ABOUT BYD

BYD (HK:1211), one of the world's top PV manufacturers, produces from wafer to module, committing to high quality sustainable products and continuous improvement. Integrating with Electrical Vehicles and Battery Energy Storage technology makes BYD the world-leading solution provider from energy generating to consumption and storage.

# P6C-36-SERIES-4BB

310-340W

156.75P



## MECHANICAL SPECIFICATIONS

|                     |   |
|---------------------|---|
| Cell                | Poly-crystalline 156.75×156.75mm / 6.17 inch    |
| No. of Cells        | 72 (6×12) pcs                                   |
| Dimension of Module | 1962×992×35mm / 77.24 inch×39.06 inch×1.38 inch |
| Weight              | 22.1 kg / 48.62 lbs                             |
| Front Glass         | 3.2 mm tempered glass with AR Coating           |
| Frame               | Anodized aluminum alloy                         |
| Junction Box        | IP67  |
| Plug Connector      | IP67  |
| Bypass-Diodes       | 3 pcs   |
| Type of Connector   | MC4-compatible                                  |
| Cable Section Area  | 4 mm <sup>2</sup> / 0.0062 Sq in                |
| Cable Length        | 2×1200 mm / 2×47.2 inch                         |

## TEMPERATURE COEFFICIENTS

|   |            |
|---|------------|
| Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)     | 45°C ± 2°C |
| Short-Circuit Current Temperature Coefficient | 0.07%/°C   |
| Open-Circuit Voltage Temperature Coefficient  | -0.31%/°C  |
| Peak Power Temperature Coefficient            | -0.39%/°C  |

## PACKAGE INFORMATION

|                    |        |
|--------------------|--------|
| Package            | 40' HC |
| Pcs / Pallet       | 30     |
| Pallet / Container | 22     |
| Pcs / Container    | 660    |

## STC

| Module Type                     | 310P6C-36  | 315P6C-36 | 320P6C-36 | 325P6C-36 | 330P6C-36 | 335P6C-36 | 340P6C-36 |
|---------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Open Circuit Voltage (Voc)      | 45.79 V    | 46.09 V   | 46.39 V   | 46.69 V   | 46.98 V   | 47.28 V   | 47.58 V   |
| Maximum Operating Voltage (Vmp) | 36.38 V    | 36.58 V   | 36.78 V   | 36.98 V   | 37.16 V   | 37.35 V   | 37.53 V   |
| Short Circuit Current (Isc)     | 8.99 A     | 9.07 A    | 9.15 A    | 9.23 A    | 9.31 A    | 9.39 A    | 9.47 A    |
| Maximum Operating Current (Imp) | 8.52 A     | 8.61 A    | 8.70 A    | 8.79 A    | 8.88 A    | 8.97 A    | 9.06 A    |
| Maximum Power in STC (Pmax)     | 310 Wp     | 315 Wp    | 320 Wp    | 325 Wp    | 330 Wp    | 335 Wp    | 340 Wp    |
| Module Efficiency               | 15.9%      | 16.2%     | 16.4%     | 16.7%     | 17.0%     | 17.2%     | 17.5%     |
| Operating Temperature           | -40°C-85°C |           |           |           |           |           |           |
| Max.Fuse Current Rating         | 15 A       |           |           |           |           |           |           |
| Maximum System Voltage          | 1000 VDC   |           |           |           |           |           |           |
| Power Tolerance                 | 0-5W       |           |           |           |           |           |           |
| Application Classes             | Class A    |           |           |           |           |           |           |

STC: IRRADIANCE 1000W/m<sup>2</sup>, Module Temperature 25°C, AM=1.5 Ave. efficiency reduction of 4.5% at 200W/m<sup>2</sup>

## NOCT

| Module Type                     | 310P6C-36 | 315P6C-36 | 320P6C-36 | 325P6C-36 | 330P6C-36 | 335P6C-36 | 340P6C-36 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Open Circuit Voltage (Voc)      | 42.20 V   | 42.50 V   | 42.80 V   | 43.10 V   | 43.40 V   | 43.70 V   | 43.90 V   |
| Maximum Operating Voltage (Vmp) | 33.80 V   | 34.00 V   | 34.30 V   | 34.50 V   | 34.80 V   | 35.10 V   | 35.30 V   |
| Short Circuit Current (Isc)     | 7.29 A    | 7.36 A    | 7.42 A    | 7.49 A    | 7.54 A    | 7.60 A    | 7.66 A    |
| Maximum Operating Current (Imp) | 6.77 A    | 6.83 A    | 6.90 A    | 6.96 A    | 7.01 A    | 7.08 A    | 7.14 A    |
| Maximum Power in STC (Pmax)     | 228.80 Wp | 232.60 Wp | 236.4 Wp  | 240.4 Wp  | 244.2 Wp  | 248.1 Wp  | 251.9 Wp  |

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m<sup>2</sup> irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.



**BYD SOLAR** No.3009, BYD Road, Pingshan, Shenzhen, 518118, P.R.China

T +86-755-8988 8888

F +86-755-8420 2222

@ bydpv@byd.com

e www.byd.com/pv

## Lista de Referências

- [1] “A review on global solar energy policy | Elsevier Enhanced Reader.” [Online]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032111000220?token=A79C4632849C17750E60D6D6B92044A17AA597C6229EC51E50E312CC824F1620FC66218707DC36BAE807D53CDC7B5F6B>. [Accessed: 24-Sep-2020].
- [2] “Energy Policy - an overview (pdf) | ScienceDirect Topics.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/energy-policy/pdf>. [Accessed: 24-Sep-2020].
- [3] “Que países lideram nas energias renováveis? | Know The Story.” [Online]. Available: <https://www.be-the-story.com/pt/ambiente/os-doze-paises-mais-limpos-quem-lidera-nas-energias-renovaveis/#>. [Accessed: 25-Sep-2020].
- [4] “Siemens ganha construção da subestação da central SOLARA4 no Algarve – O Jornal Económico.” [Online]. Available: <https://jornaleconomico.sapo.pt/noticias/siemens-ganha-construcao-da-subestacao-da-central-solara4-no-algarve-335709>. [Accessed: 29-Sep-2020].
- [5] “PLANO DE URBANIZAÇÃO DA CENTRAL FOTOVOLTAICA RELATÓRIO,” 2009.
- [6] “Expresso | Central solar mais barata do país entra em licenciamento e ocupará mais de 350 hectares no Alentejo.” [Online]. Available: [https://expresso.pt/economia/2020-08-24-Central-solar-mais-barata-do-pais-entra-em-licenciamento-e-ocupara-mais-de-350-hectares-no-Alentejo?utm\\_source=onesignal&utm\\_medium=notification&utm\\_campaign=economia&utm\\_content=Central+solar+mais+barata+do+país+entra+em+licenciamento+e+ocupará+mais+de+350+hectares+no+Alentejo](https://expresso.pt/economia/2020-08-24-Central-solar-mais-barata-do-pais-entra-em-licenciamento-e-ocupara-mais-de-350-hectares-no-Alentejo?utm_source=onesignal&utm_medium=notification&utm_campaign=economia&utm_content=Central+solar+mais+barata+do+país+entra+em+licenciamento+e+ocupará+mais+de+350+hectares+no+Alentejo). [Accessed: 27-Aug-2020].
- [7] “Início licenciamento para a maior central solar fotovoltaica de Portugal.” [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/licenciamento-maior-central-solar-fotovoltaica-portugal/>. [Accessed: 25-Sep-2020].
- [8] “Portal Energias Renováveis.” [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/>. [Accessed: 21-Nov-2019].
- [9] Edmond Becquerel, "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique", Paris, 1842.
- [10] C. E. Fritts, “New Form of Selenium Cell.,” *Am. J. Sci.*, vol. 26, pp. 465–472, 1883.
- [11] S. Klassen, “The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom,” pp. 719–731, 2009.

- 
- [12] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power [3]," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [13] G. L. Pearson, "Conversion of Solar to Electrical Energy," *Am. J. Phys.*, vol. 25, no. 9, pp. 591–598, Dec. 1957.
- [14] G. A. A. Asy, "Solar energy converting apparatus," , Serial No. 414,273 , Mar. 1957.
- [15] A. H. M. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. A. van Swaaij, and M. Zeman, *Solar Cell Parameters and Equivalent Circuit*. 2016, pp. 113–121.
- [16] A. Joyce, "As tecnologias fotovoltaicas," *Renováveis Magazine, n° 6*. pp. 40–44, 2011.
- [17] A. Mohammad Bagher, "Types of Solar Cells and Application," *Am. J. Opt. Photonics*, 2015.
- [18] S. R. Wenham, C. B. Honsberg, and M. A. Green, "Buried contact silicon solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 34, no. 1–4, pp. 101–110, Sep. 1994.
- [19] A. V. Shah *et al.*, "Thin-film silicon solar cell technology," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 2–3, pp. 113–142, 2004.
- [20] "Thin Film Solar Cells-BIPV / Solar Integrated Sustainable Architecture." [Online]. Available: <http://sisahub.com/thin-film-solar-cells-bipv/>. [Accessed: 28-Dec-2020].
- [21] A. Anctil, E. Lee, and R. R. Lunt, "Net energy and cost benefit of transparent organic solar cells in building-integrated applications," *Appl. Energy*, vol. 261, p. 114429, Mar. 2020.
- [22] C. J. Traverse, R. Pandey, M. C. Barr, and R. R. Lunt, "Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications," *Nature Energy*, vol. 2, no. 11. Nature Publishing Group, pp. 849–860, 01-Nov-2017.
- [23] "Transparent solar cells | MIT Energy Initiative." [Online]. Available: <http://energy.mit.edu/news/transparent-solar-cells/>. [Accessed: 03-Dec-2020].
- [24] "Transparent Solar Panels: Reforming Future Energy Supply." [Online]. Available: <https://solarmagazine.com/solar-panels/transparent-solar-panels/>. [Accessed: 03-Dec-2020].
- [25] S. Harb, M. Kedia, H. Zhang, and R. S. Balog, "Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system - A comprehensive study," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2885–2890, 2013.
- [26] "US9843193B2 - Safety shutdown system for photovoltaic power generators - Google Patents." [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US9843193B2/en>. [Accessed: 30-Sep-2020].
- [27] M. C. Falvo and S. Capparella, "Safety issues in PV systems: Design choices for a secure fault detection and for preventing fire risk," *Case Stud. Fire Saf.*, vol. 3, pp. 1–16, May 2015.



- 
- [28] C. Strobl and P. Meckler, "Arc faults in photovoltaic systems," in *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010, pp. 216–222.
- [29] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model," *J. Electr. Electron. Eng. Aust.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–55, 2001.
- [30] J. Ramos-Hernanz, J. M. Lopez-Guede, O. Barambones, E. Zulueta, and U. Fernandez-Gamiz, "Novel control algorithm for MPPT with Boost converters in photovoltaic systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17831–17855, Jul. 2017.
- [31] R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008.
- [32] C. Bertin, N. Fapi, M. Kamta, and P. Wira, "A comprehensive assessment of MPPT algorithms to optimal power extraction of a PV panel," University of Tehran, Aug. 2019.
- [33] C. Bertin, N. Fapi, M. Kamta, and P. Wira, "Journal of Solar Energy Research ( JSER ) JSER A comprehensive assessment of MPPT algorithms to optimal power extraction of a PV panel," vol. 4, no. 3, pp. 172–179, 2019.
- [34] M. A. G. De Brito, L. P. Sampaio, G. Luigi, G. A. E Melo, and C. A. Canesin, "Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications," in *3rd International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2011*, 2011, pp. 99–104.
- [35] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45. Elsevier Ltd, pp. 637–648, 01-May-2015.
- [36] S. S. Soumyadeep Ray, "A Comparative Study on Different MPPT Techniques Applied On Photovoltaic System," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 04, no. 03, pp. 1249–1252, Mar. 2015.
- [37] H. Gunerhan and A. Hepbasli, "Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications," *Buld. Environ.*, vol. 42, no. 2, pp. 779–783, Feb. 2007.
- [38] C. Stanciu and D. Stanciu, "Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models," *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 133–143, May 2014.
- [39] "Guimarães latitude longitude." [Online]. Available: <https://latitudelongitude.org/pt/guimaraes/>. [Accessed: 19-Jan-2021].
- [40] N. Cunha, "Estudo da influência da posição de painéis solares na geração de energia elétrica", Outubro 2015.
- [41] "Everything You Need to Know About Solar Wires and Cables." [Online]. Available: <https://www.zw->

---

cable.com/news/Everything\_You\_Need\_to\_Know\_About\_Solar\_Wires\_and\_Cables.html.

[Accessed: 02-Oct-2020].

[42] “Welcome to the IEC - International Electrotechnical Commission.” [Online]. Available: <https://www.iec.ch/>. [Accessed: 08-Oct-2020].

[43] Iec, “Low-voltage electrical installations-Part 4-41: Protection for safety-Protection against electric shock Low-voltage electrical installations-Part 4-41: Protection for safety-Protection against electric shock including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher,” 2005.

[44] Iec, “Electrical installations of buildings-Part 7-712: Requirements for special installations or locations-Solar photovoltaic (PV) power supply systems.”, 2002.