



Fábio André Vargas Pereira

Licenciado em Ciências da Engenharia

Eletrotécnica e de Computadores

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo

Orientador: Professor Doutor João Miguel Murta Pina, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Helena Silva Fino

Arguentes: Professora Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto

Vogal: Professor Doutor João Miguel Murta Pina

Desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo

Copyright © Fábio André Vargas Pereira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Aos meus pais...

que fizeram tudo para tornar este objetivo possível.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao professor e orientador desta dissertação João Murta Pina por todo o apoio, dedicação e disponibilidade que demonstrou ao longo da dissertação. Por tudo, obrigado.

Ao professor Pedro Pereira, um obrigado, pois demonstrou-se sempre disponível para me ajudar no desenvolvimento desta dissertação.

À Nova.id que sem o financiamento e disponibilidade em ajudar nada disto tinha sido possível, a vós obrigado.

Quero agradecer à minha família por todo apoio e confiança que me depositaram em mim para concluir esta etapa difícil da minha vida.

Quero deixar um agradecimento especial aos meus pais, porque eles fizeram de mim a pessoa que sou e nunca me deixaram desistir de nada sem dar luta, a vocês obrigado.

Aos meus amigos, em especial à Inês Guimarães, quero agradecer por todo o apoio e ajuda nos bons e maus momentos ao longo da minha vida pessoal e académica, a eles um obrigado sincero.

Um agradecimento ao meu padrinho Tiago Robim Nunes, que sempre me ajudou em toda a minha vida pessoal e académica, porque sem ele esta jornada académica teria sido mais difícil, a ti meu amigo um grande obrigado.

Por fim, gostava de agradecer à FCT-UNL porque esta intuição deu-me todas as ferramentas para ser mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

Hoje em dia a produção de energia elétrica em Portugal provém na sua maioria das energias renováveis. A energia solar é uma das fontes renováveis que ao longo destes anos tem vindo a crescer gradualmente. Este crescimento está relacionado com a diminuição significativa dos custos do fotovoltaico ao longo destes últimos anos. De forma a avaliar a qualidade e o desempenho do fotovoltaico é necessário recorrer a simuladores solares capazes de medir a curva corrente-tensão. Tendo por base este aspeto desenvolveu-se um simulador solar de baixo custo. O desenvolvimento deste simulador teve em atenção as normas da Comissão Eletrotécnica Internacional. O objetivo deste simulador é expor irradiância e medir a curva corrente-tensão de um módulo fotovoltaico convencional.

Na dissertação são abordadas as características de um simulador solar, assim como o seu modo de operação, a sua classificação e a sua constituição. São referidas e explicadas todas as decisões referentes ao simulador desenvolvido, assim como o orçamento referente ao material selecionado para o projeto. Nesta dissertação é também descrita a implementação do simulador solar.

Uma vez implementado o simulador, realizaram-se ensaios com a intenção de caracterizar a irradiância na superfície de ensaio e medir a curva corrente-tensão de um módulo fotovoltaico sob diferentes condições. Por fim, analisou-se os dados obtidos e comparou-se com os dados teóricos.

Palavras-chave: Simulador solar, Irradiância, Módulo fotovoltaico, Fonte de iluminação, Uniformidade, Curva corrente-tensão.

Abstract

Nowadays the production of electricity in Portugal comes mostly from renewable energies. Solar energy is one of the renewable ones that over the years has been growing gradually. This growth is related to the significant decrease in the cost of photovoltaic over the last few years. To evaluate the quality and the performance of the photovoltaic it is necessary to obtain solar simulators capable of withdrawing the current-voltage curve. Based on this aspect, a low-cost solar simulator was developed. The development of this simulator addressed the standards of the International Electrotechnical Commission. The objective of this simulator is to expose irradiance and measure the current-voltage curve of a conventional photovoltaic module.

In this dissertation, the characteristics of a solar simulator are discussed, as well as its mode of operation and its classification and constitution. All the decisions regarding the developed simulator, as well as the budget related to the material selected for the project, are explained. In this dissertation, it is also described the implementation of the solar simulator.

Once the simulator was implemented, tests were carried out with the intention of characterizing the irradiance on the test surface and measuring the current-voltage curve of a photovoltaic module under different operating conditions. Finally, the data obtained were analysed and compared with the theoretical.

Keywords: Solar simulator, Irradiance, Photovoltaic module, Lighting source, Uniformity, Current-voltage curve.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ACRÓNIMOS	XIX
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 CONTRIBUIÇÕES	1
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.1.1 Irradiância	3
2.2 SIMULADORES SOLARES.....	5
2.2.1 Métodos de operação dos simuladores solares	6
2.2.2 Classificação do simulador	8
2.2.3 Exemplos de simuladores solares	10
2.2.3.1 Simuladores comerciais.....	10
2.2.3.2 Simuladores solares não comerciais.....	14
2.2.3.3 Reator solar	16
2.3 FONTES DE ILUMINAÇÃO	17
2.3.1 Classificação das lâmpadas.....	18
2.3.1.1 Lâmpadas incandescentes.....	19
2.3.1.2 Lâmpadas de descarga	20
2.3.1.3 LED.....	22
3 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR SOLAR.....	23
3.1 PROJETO	23
3.1.1 Fonte de iluminação	23
3.1.2 Luminária	24
3.1.3 Lâmpadas.....	26
3.1.4 Área de ensaio.....	28
3.1.5 Simulações em DIALux.....	29
3.1.6 Projeto da estrutura mecânica.....	34

3.1.7	<i>Projeto da infraestrutura elétrica</i>	39
3.1.8	<i>Orçamento</i>	44
3.2	IMPLEMENTAÇÃO.....	46
4	PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE IRRADIÂNCIA A DIFERENTES COTAS	51
4.2	EXEMPLOS DE ENSAIOS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	55
4.2.1	<i>Ensaio sem sombreamento</i>	55
4.2.2	<i>Ensaio com sombreamento</i>	61
4.3	IMAGEM TERMOGRÁFICA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	64
4.4	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	65
5	CONCLUSÕES	73
5.1	CONCLUSÕES FINAIS	73
5.2	TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO	81
	ÍNDICE DE PROTEÇÃO	81
	MÓDULO FOTOVOLTAICO DA SANYO.....	82
	LAFAYETTE DMB-SOLAR.....	83
	TERMÓMETRO INFRAVERMELHO: XINDAR TID200	84
	IMAGENS DO SIMULADOR SOLAR DESENVOLVIDO	85

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL (IHG).....	3
FIGURA 2.2 - MASSA DE AR (MA).....	4
FIGURA 2.3 - ESPECTRO SOLAR DA IRRADIÂNCIA TERRESTRE COM MA 1,5.	5
FIGURA 2.4 - FORMAS DE FUNCIONAMENTO DO SIMULADOR SOLAR.	7
FIGURA 2.5 - EXEMPLOS DE SIMULADORES SOLARES PARA ENSAIAR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.	11
FIGURA 2.6 - SIMULADOR SOLAR QUICKSUN 540LA	13
FIGURA 2.7 - SIMULADOR SOLAR ECOSUN 10L.....	13
FIGURA 2.8 - SIMULADOR SOLAR DA UNIVERSIDADE DE ULSTER.....	14
FIGURA 2.9 - SIMULADOR SOLAR DA MITSUBISHI.....	15
FIGURA 2.10 - SIMULADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO.....	15
FIGURA 2.11 - SIMULADOR DA UNIVERSIDADE DE PORTSMOUTH.....	16
FIGURA 2.12 – SIMULADOR DE ALTO FLUXO.....	17
FIGURA 2.13 - TEMPERATURA DA COR.....	18
FIGURA 2.14 - MAPA DE LÂMPADAS.	19
FIGURA 2.15 - ESPECTRO DE UM CONJUNTO DE LEDs..	22
FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO ESPECTRAL ENTRE TRÊS FONTES DE ILUMINAÇÃO..	24
FIGURA 3.2 - PROJETOR DA PHILIPS RVP351 E DIAGRAMA POLAR DA INTENSIDADE DA LUMINÁRIA.....	25
FIGURA 3.3 – MADER HOME JM-500.....	25
FIGURA 3.4 – ASLO ASPH1000.....	26
FIGURA 3.5 - DIMENSÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	29

FIGURA 3.6 – RESUMO DA SIMULAÇÃO NO DIALUX.....	30
FIGURA 3.7 - RESUMO DA SIMULAÇÃO NO DIALUX.	31
FIGURA 3.8 - RESUMO DA SIMULAÇÃO EM DIALUX.	32
FIGURA 3.9 - RESUMO DA SIMULAÇÃO RETIRADA DO DIALUX.....	33
FIGURA 3.10 - MODELO EM 3D DA ESTRUTURA	35
FIGURA 3.11 - VISÃO LATERAL DA ESTRUTURA.	35
FIGURA 3.12 - VISÃO TRASEIRA DA ESTRUTURA.	36
FIGURA 3.13 - VISÃO FRONTAL DA ESTRUTURA.	36
FIGURA 3.14 - VISÃO DO TOPO DA ESTRUTURA.	37
FIGURA 3.15 - VISÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE AO MÓDULO FOTOVOLTAICO.	37
FIGURA 3.16 - POSTE ANGULAR DE METAL	38
FIGURA 3.17 - VIGA VERSÁTIL.....	38
FIGURA 3.18 - RODA COM ESPIGÃO.....	38
FIGURA 3.19 - PROTEÇÃO DIFERENCIAL ACTI 9 DA SCHNEIDER.....	39
FIGURA 3.20 - DIVISÃO DA INSTALAÇÃO ELÉTRICA.	40
FIGURA 3.21 - DISJUNTORES MAGNETOTÉRMICOS RESI9 DA SCHNEIDER.....	41
FIGURA 3.22 - CABOS ELÉTRICOS	41
FIGURA 3.23 - LIGAÇÃO DAS LUMINÁRIAS.....	43
FIGURA 3.24 - LIGAÇÃO DAS LUMINÁRIAS PARA O QUADRO.	43
FIGURA 3.25 - LIGAÇÃO ENTRE O QUADRO E A FICHA INDUSTRIAL.	44
FIGURA 3.26 - CONSTRUÇÃO DE UMA DAS PARTES LATERAIS DO SIMULADOR SOLAR	46
FIGURA 3.27 - DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA MECÂNICA	46

FIGURA 3.28 - ESTRUTURA MECÂNICA SEM FONTE DE ILUMINAÇÃO.....	47
FIGURA 3.29 - LUMINÁRIAS E ESTRUTURA DE SUPORTA DAS MESMAS.....	47
FIGURA 3.30 - LIGAÇÃO DAS LUMINÁRIAS ÀS CAIXAS DE DERIVAÇÃO.....	48
FIGURA 3.31 - MONTAGEM DO QUADRO E FICHA INDUSTRIAL.....	48
FIGURA 3.32 - ESTRUTURA FINAL IMPLEMENTADA.....	49
FIGURA 4.1 - MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	51
FIGURA 4.2 – PROCEDIMENTO DE MEDIDA.....	52
FIGURA 4.3 - IRRADIÂNCIA SOBRE A SUPERFÍCIE DE ENSAIO À DISTÂNCIA DE 120 CM.....	53
FIGURA 4.4 - RESULTADOS OBTIDOS DA IRRADIÂNCIA AO LONGO DA SUPERFÍCIE DE ENSAIO À DISTÂNCIA DE 150 CM.....	54
FIGURA 4.5 - MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	55
FIGURA 4.6 - ESQUEMA DE MONTAGEM.....	57
FIGURA 4.7 - CURVA I-V OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	58
FIGURA 4.8 – CURVA POTÊNCIA-TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	59
FIGURA 4.9 - CURVA CORRENTE-TENSÃO DO MÓDULO À DISTÂNCIA DE 150 CM.....	60
FIGURA 4.10 – CURVA POTÊNCIA-TENSÃO RESULTANTE DO PRODUTO ENTRE CORRETE E TENSÃO.....	61
FIGURA 4.11 - MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	62
FIGURA 4.12 - ESQUEMA DE MONTAGEM.....	62
FIGURA 4.13 - CURVA I-V DO MÓDULO SOMBREADO.....	63
FIGURA 4.14 - CURVA POTÊNCIA-TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SOMBREADO.....	64
FIGURA 4.15 - IMAGENS TERMOGRÁFICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	65
FIGURA 4.16 - SANYO HIP-210NKHE5.....	66
FIGURA 4.17 - MÓDULO FOTOVOLTAICO DA LUXOR.....	66

FIGURA 4.18 - CURVAS CORRENTE-TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SANYO HIP-210NKHE5 OBTIDA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	70
FIGURA 4.19 - CURVAS I-V DO FABRICANTE MÓDULO FOTOVOLTAICO	71
FIGURA 4.20 - COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS POTÊNCIA-TENSÃO.....	71
FIGURA 4.21 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.	72

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 - CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	6
TABELA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DE SIMULADORES SOLARES.	8
TABELA 2.3 - REFERÊNCIA GLOBAL DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA IRRADIÂNCIA SOLAR SEGUNDO CEI 60904-3.	9
TABELA 2.4 - EXEMPLOS DE SIMULADORES SOLARES PARA ENSAIO CELULAS FOTOVOLTAICAS.	12
TABELA 2.5 - CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS INCANDESCENTES	20
TABELA 2.6 – CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS DESCARGA DE ALTA INTENSIDADE.	21
TABELA 2.7 - LÂMPADAS DESCARGA DE BAIXA INTENSIDADE.	21
TABELA 2.8 - CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS LED	22
TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DAS LUMINÁRIAS.	26
TABELA 3.2 – DIFERENÇAS ENTRE AS LÂMPADAS DE HALOGÉNEO DA PHILIPS, OSRAM E MAXMAT.....	27
TABELA 3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE LÂMPADAS DE HALOGÉNEO DE 1000W.....	27
TABELA 3.4 - COMPARAÇÃO ENTRE PHILIPS E OSRAM.	28
TABELA 3.5 - CUSTOS DAS LUMINÁRIAS E LÂMPADAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO.	30
TABELA 3.6 - CUSTOS ASSOCIADOS ÀS LUMINÁRIAS E LÂMPADAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO.	31
TABELA 3.7 – CUSTOS DA FONTE DE ILUMINAÇÃO NA 3ª OPÇÃO.	33
TABELA 3.8 - CUSTOS DA FONTE DE ILUMINAÇÃO USADA NESTA SIMULAÇÃO.	34
TABELA 3.9 - CARACTERÍSTICAS DOS CABOS VV E VAV.	42
TABELA 3.10 - CARACTERÍSTICAS DOS CABOS XV E XAV.	42
TABELA 3.11 - ORÇAMENTO DO SIMULADOR SOLAR.....	45

TABELA 4.1 – RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL À DISTÂNCIA DE 120 CM.	53
TABELA 4.2 - RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL À DISTÂNCIA DE 150 CM.	54
TABELA 4.3- DADOS RECOLHIDOS DA CORRENTE E TENSÃO.	57
TABELA 4.4 - DADOS ELÉTRICOS DO MÓDULO OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.	58
TABELA 4.5 - DADOS DA CORRENTE E TENSÃO RETIRADOS DA EXPERIÊNCIA.	59
TABELA 4.6 - DADOS ELÉTRICOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.	60
TABELA 4.7- DADOS DA CORRENTE E TENSÃO DO ENSAIO COM SOMBREAMENTO.	63
TABELA 4.8 - DADOS ELÉTRICOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO COM SOMBREAMENTO.	64
TABELA 4.9 - IRRADIÂNCIA SOBRE UM MÓDULO DA LUXOR.	67
TABELA 4.10 - IRRADIÂNCIA SOBRE UM MÓDULO DA SANYO.	68
TABELA 4.11 - IRRADIÂNCIA SOBRE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO LX-50 P.	68
TABELA 4.12- IRRADIÂNCIA SOBRE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO HIP-210NKHE5.	69

Acrónimos

AM	Massa de ar (<i>Air mass</i>)
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
I-V	Corrente-Tensão
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
STC	Condições Normalizadas de Ensaio (<i>Standard Test Conditions</i>)
UV	Ultravioleta

1 Introdução

Neste capítulo é introduzido o trabalho desenvolvido, começando por explicar a motivação que levou a desenvolver o simulador solar. Seguidamente são referenciados os objetivos e as contribuições deste trabalho. Por fim, é descrita a estrutura da dissertação.

1.1 Motivação

A produção de energia elétrica através de fontes renováveis tem vindo a aumentar gradualmente todos os anos, sendo a energia solar um exemplo desse crescimento. Em 2016 a capacidade das centrais fotovoltaicas subiu para 306,5 GW face aos 229,9 GW instalados em 2015 [1]. Espera-se que em 2018 a energia solar fotovoltaica atinja uma capacidade instalada superior à da energia nuclear a nível mundial. Este facto resulta em parte da diminuição significativa dos custos para a instalação de módulos fotovoltaicos. Desde 2008 que o custo para instalar módulos fotovoltaicos diminuiu 80% [2]. Com a imensa procura de módulos fotovoltaicos, conhecer a curva corrente-tensão (I-V) característica do módulo é muito importante para avaliar a qualidade e o desempenho do módulo. Os simuladores solares, equipamentos que servem para retirar a curva I-V, são de elevado custo.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo projetar, implementar e ensaiar um simulador solar de baixo custo. Pretende-se com este simulador ensaiar um módulo fotovoltaico de dimensão convencional (1580 mm x 0,798 mm x 35 mm). Deverá ser também possível ensaiar módulos fotovoltaicos para diferentes valores de irradiância. O simulador, por sua vez, deverá apresentar uma distribuição espectral próxima à do Sol, tal como providenciar uma irradiância uniforme na área de ensaio. Este simulador deverá respeitar as normas da Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI), que definem as características e os requisitos dos simuladores solares. Espera-se poder com o simulador retirar a curva I-V característica do módulo fotovoltaico.

1.3 Contribuições

As contribuições deste trabalho prendem-se com o desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo capaz de expor o módulo fotovoltaico a diferentes valores de irradiância através da distância entre o módulo e o sistema de iluminação. A partir deste simulador é possível ensaiar módulos de várias dimensões e retirar a curva I-V dos mesmos.

O simulador desenvolvido tem a capacidade de estudar o desempenho de módulos fotovoltaicos com dimensões variadas através da curva I-V. No caso particular deste trabalho ensaiou-se um módulo fotovoltaico de 210 Wp da Sanyo (ref. HIP-210NKHA5). Em relação aos simuladores comerciais o simulador solar desenvolvido terá um custo reduzido.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo são mencionadas as motivações e contribuições que levaram à execução deste trabalho, tal como, os objetivos a cumprir no desenvolvimento do simulador solar.

Capítulo 2 – Estado de arte: apresenta a revisão bibliográfica do tema da dissertação. Inicialmente, são apresentados dois conceitos fundamentais na dissertação, irradiância e massa de ar. Seguidamente é apresentado o simulador solar, em que é descrita a sua utilização, constituição e ainda os ensaios que o módulo fotovoltaico pode ser submetido a partir de um simulador solar. São referidas também, pormenorizadas, duas características referentes ao simulador: modo de operação e classificação. São citados exemplos de simuladores solares. Por fim, são referenciadas as características das lâmpadas incandescentes, de descarga e LED.

Capítulo 3 - Projeto e implementação do simulador solar: contém o projeto do simulador solar. Neste capítulo é apresentado o estudo em DIALux da fonte de iluminação a utilizar, o design da estrutura mecânica do simulador e o dimensionamento elétrico do equipamento a desenvolver. Posteriormente é referenciado o orçamento do projeto do simulador solar. Por fim, é citada a implementação do simulador onde é exibido cada passo da implementação.

Capítulo 4 – Procedimentos e resultados experimentais: neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais para obter a característica da irradiância na superfície de ensaio e os ensaios efetuados ao módulo fotovoltaico. Posteriormente é feita uma análise aos resultados obtidos. Por fim, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos do módulo fotovoltaico e os teóricos descritos pelo fabricante.

Capítulo 5 – Conclusão: neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, tal como os trabalhos futuros que permitem melhorar o simulador solar.

2 Revisão bibliográfica

O presente capítulo serve para apresentar o tema da dissertação, simulador solar. Inicialmente serão descritos conceitos de irradiância e massa de ar. Posteriormente, será feita uma descrição do simulador, onde se escreverá superficialmente a sua constituição, o seu modo de funcionamento, tal como a sua classificação. Estes três aspetos serão explicados com mais pormenor ao longo da revisão bibliográfica. Será feito um levantamento dos simuladores solares desenvolvidos em universidades como em empresas comerciais. Por fim, serão descritos três grupos de lâmpadas: incandescentes, de descarga e de LED.

2.1 Introdução

2.1.1 Irradiância

A irradiância (G) é o fluxo de energia que incide sobre uma superfície por unidade de área, em W/m^2 [3]. A radiação solar é fortemente afetada pela atmosfera através da reflexão, absorção (O_3 , H_2O , O_2 , CO_2) e dispersão (partículas de pó e poluição do ar), como tal, a radiação que atinge a superfície terrestre pode ser direta ou difusa. Da soma das duas, radiação direta e difusa, resulta a radiação global. A radiação global que incide sobre um plano horizontal denomina-se por irradiância horizontal global (IHG). Esta é composta pela irradiância direta normal (IDN) que se refere à radiação incidente numa superfície normal ou horizontal à direção do Sol e a irradiância difusa (ID) que se define pela radiação que foi refletida pela atmosfera.

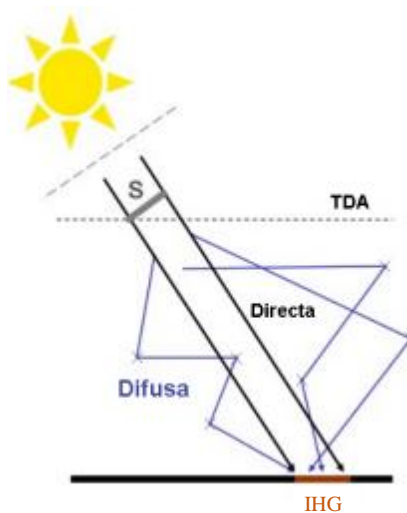


Figura 2.1 - Irradiância global horizontal (IHG). Adaptado de [4].

A irradiância que incide na superfície terrestre varia entre 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 ao longo do ano, isto porque a distância entre o Sol e a Terra difere entre $1,47 \times 10^8 \text{ km}$ e $1,52 \times 10^8 \text{ km}$. Devido a este facto retira-se o valor médio que é designado por constante solar, $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ [5].

Massa de ar

A massa de ar (AM) é a razão entre a distância percorrida pelos raios solares até atmosfera e a distância percorrida pelos raios caso o Sol estivesse diretamente na vertical. Esta razão é descrita pela equação 2.1 e ilustrada pela figura 2.2 [6]:

$$AM = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\text{sen } \beta} \quad 2.1$$

onde h_1 é a distância percorrida pelos raios se o Sol estivesse na vertical, h_2 é o comprimento do caminho percorrido pelos raios solares até atmosfera e β é o ângulo da altitude solar.

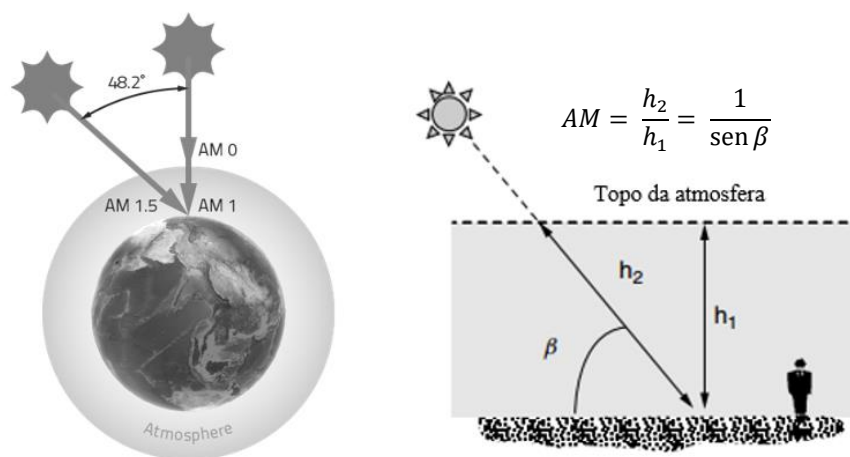


Figura 2.2 - Massa de ar (AM). Adaptada de [6].

O coeficiente massa de ar apresenta três valores de referência [7]:

- AM 1 - o Sol está na vertical, $\beta = 90^\circ$;
- AM 0 - a atmosfera não influencia a radiação solar (radiação extraterrestre);

- AM 1,5 - coeficiente utilizado para o espectro da radiação solar, ilustrado na figura 2.3, segundo a norma CEI 60904-3¹.

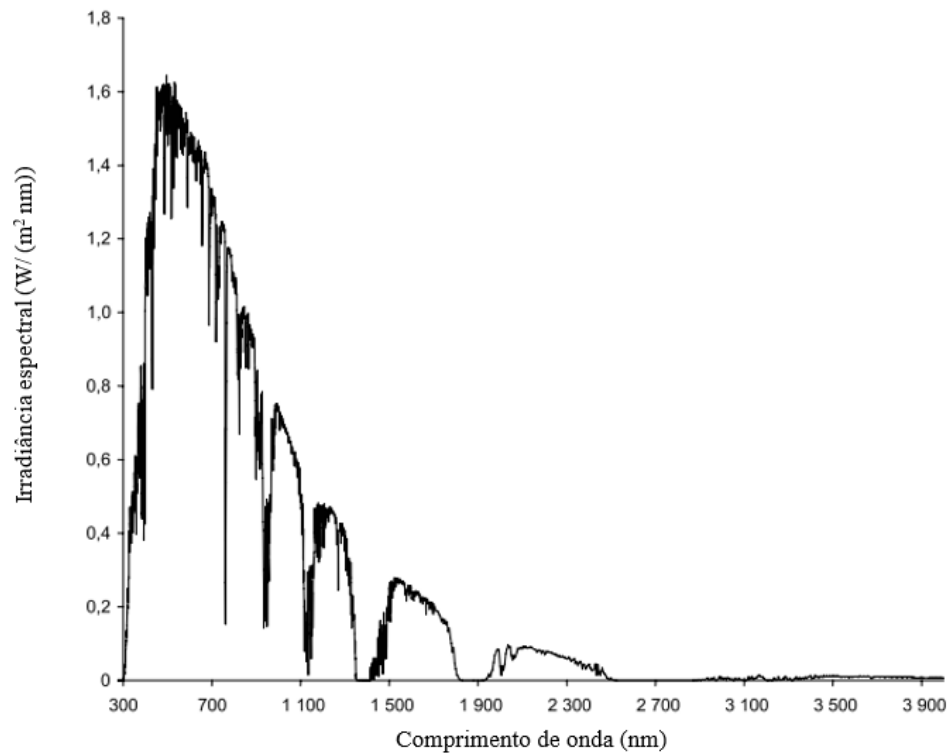


Figura 2.3 - Espectro solar da irradiância terrestre com AM 1,5. Adaptada de [8]

2.2 Simuladores solares

O presente subcapítulo aborda as características e especificações dos simuladores solares, de acordo com a norma da Comissão Eletrotécnica Internacional: CEI 60904-9² (2007), bem como as condições de ensaio padrão definidas pela norma CEI 61853³.

¹ CEI 60904-3 – Fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (PV) de uso terrestre com dados de irradiância espectral de referência (2008).

² CEI 60904-9 – Requisitos de funcionamento para simuladores solares (2007).

³ CEI 61853 - Ensaio de desempenho do módulo fotovoltaico e classificação de energia (2011).

Segundo a norma CEI 60904-9, um simulador solar é um equipamento utilizado para simular a irradiância e o espectro solar, com o propósito de se obter a curva I-V e expor um módulo fotovoltaico à irradiância. Os simuladores solares, normalmente, são constituídos por três elementos[9]:

- Fonte de iluminação e respetiva fonte de alimentação;
- Filtros que são utilizados para modificar o feixe de luz;
- Controladores para ajustar características, como por exemplo, a irradiância;

Os simuladores solares devem ser definidos pelo seu modo de operação durante um período de ensaio: estacionário (*steady state*), pulso único (*single pulse*) e o múltiplo pulso (*multi-pulse*). Estes conceitos serão citados no subcapítulo 2.2.1 com maior rigor [9]. Estes simuladores são também classificados segundo a resposta espectral, a uniformidade e a instabilidade temporal. A classificação de um simulador de acordo com estes parâmetros será descrita no subcapítulo 2.2.2.

De acordo com a norma CEI 61853, existem várias condições de ensaio para aferir o desempenho e medir a curva I-V de um fotovoltaico. As principais condições de ensaio são: condições de alta temperatura, condições de baixa irradiância, condições de baixa temperatura, temperatura nominal da célula operacional (NOCT) e condições de ensaio standard (STC) [10].

Tabela 2.1 - Condições de ensaio [10].

Condições de teste	Irradiância (W/m ²)	Temperatura do módulo (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Massa de ar (MA)	Velocidade do vento (m/s)
Alta temperatura	1000	75	-	1,5	0
Baixa irradiância	200	25	-	1,5	0
Baixa temperatura	500	15	-	1,5	0
NOCT	800	-	20	1,5	1
STC	1000	25	-	1,5	0

2.2.1 Métodos de operação dos simuladores solares

A figura 2.4 mostra as formas três formas de operação referidas no subcapítulo 2.2 e apresenta a curva I-V de cada modo [9].

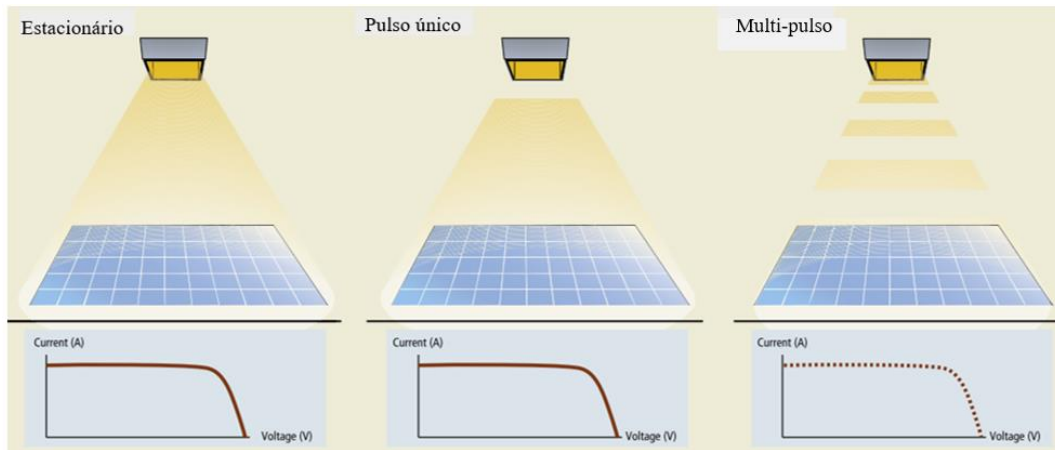


Figura 2.4 - Formas de funcionamento do simulador solar. Adaptado de [11].

Estacionário (*steady state*)

Os simuladores estacionários utilizam uma fonte de luz de forma constante para retirar a curva I-V metodicamente. Contudo, os módulos necessitam de ser arrefecidos para manter as condições de temperatura standard (25 °C). As desvantagens deste tipo de operação são, o seu custo, devido ao elevado consumo de energia, e a necessidade de haver controlo da temperatura [12] [11]. Os simuladores solares estacionários podem ser usados em módulos de filme fino através de um procedimento denominado de *light soaking*, segundo CEI 61646, no qual é necessário recorrer à luz natural ou uma fonte de luz continua a fim de retirar a potência máxima do módulo. Para este tipo de processo é essencial que o módulo seja exposto a uma irradiância entre os 600 W/m² e os 1000 W/m² e a temperatura tem de ser 50 °C ± 10 °C até a potência máxima estabilizar [13] [14].

Pulso único (*single pulse*)

Os simuladores que operam com este método, medem a curva I-V através de um único pulso de luz que pode durar milissegundos. Para os módulos fotovoltaicos de silício cristalino tradicional é necessário um pulso com a duração de 20 ms para se obter resultados sem erros, no entanto, com materiais mais recentes como o CIGS (cobre, índio, gálio, selénio) / CIS (cobre, índio, selénio) é preciso um pulso com a duração de 100 ms ou mais. Os simuladores solares de pulso único são melhores do que os estacionários pois não aumentam a temperatura do módulo e utilizam menos energia porque as lâmpadas não estão constantemente ligadas. Este tipo de simulador é preferencial para ensaios de módulos fotovoltaicos [15] [16].

Multi-pulso (*multi-pulse*)

Os simuladores solares *multi-pulse* constroem a curva I-V através de vários pulsos, sendo que por cada pulso é medido um ponto da curva I-V. Este tipo de operação permite mudar a intensidade da luz e observar assim outras curvas de I-V para diferentes intensidades [17].

2.2.2 Classificação do simulador

A classificação de um simulador é feita através de três letras, por exemplo ACA. Para cada categoria é definida uma letra, A, B ou C. As três categorias a serem classificadas, segundo a CEI 60904-9, são [9]: resposta espectral, não-uniformidade da irradiância no plano de ensaio e a instabilidade temporal da irradiância. Os procedimentos para a medição e cálculo destas categorias encontram-se no ponto 5 da norma CEI 60904-9.

Tabela 2.2 - Classificação de simuladores solares. Adaptado de CEI 60904-9 [9].

Classificação	Correspondência espectral em todo o intervalo especificado na Tabela 2.3	Não-uniformidade da irradiância	Instabilidade Temporal	
			Instabilidade de curto prazo (STI)	Instabilidade de longo prazo (LTI)
A	0,75-1,25	2%	0,5%	2%
B	0,6-1,4	5%	2%	5%
C	0,4-2,0	10%	10%	10%

Correspondência Espectral

A correspondência espectral de um simulador solar define-se pelo desvio espectral da irradiância do simulador em relação à AM 1,5, parâmetro estabelecido em CEI 60904-3. De seguida é apresentada uma tabela onde a irradiância total é especificada para 6 intervalos de comprimento de onda.

Tabela 2.3 - Referência global da distribuição espectral da irradiância solar segundo CEI 60904-3. Adaptado do CEI 60904-9 [9].

	Comprimento de onda nm	Porcentagem de irradiância total no comprimento de onda
1	400 - 500	18,4 %
2	500 - 600	19,9 %
3	600 - 700	18,4%
4	700 - 800	14,9 %
5	800 - 900	12,5 %
6	900- 1100	15,9%

Não-uniformidade da irradiância no plano de ensaio

A não-uniformidade da irradiância no plano de ensaio é um parâmetro no qual existe dificuldade em retirar os valores devido ao simulador ser um conjunto de lâmpadas individuais [18]. A equação 2.2 descreve este parâmetro.

$$\text{Não - uniformidade (\%)} = \left[\frac{\max_{\text{irradiância}} - \min_{\text{irradiância}}}{\max_{\text{irradiância}} + \min_{\text{irradiância}}} \right] \times 100\% \quad 2.2$$

onde o $\max_{\text{irradiância}}$ e o $\min_{\text{irradiância}}$ são medidos na área de ensaio.

Instabilidade temporal da irradiância

A instabilidade temporal é dividida em duas:

- Instabilidade de curto prazo – é referente ao tempo que demora a ser demonstrado um conjunto de dados, como a irradiância, corrente e tensão, durante a mediação da curva I-V. Podem existir diferentes valores para a instabilidade temporal entre conjuntos de dados na curva I-V, assim sendo, a instabilidade de curto prazo é determinada para o pior caso.
- Instabilidade de longo prazo – está relacionado com o tempo de interesse, ou seja, no caso da medição da curva I-V é o tempo que se demora a obter toda a

curva I-V, enquanto que no caso da exposição à radiação é o tempo que o dispositivo está exposto a esta.

A equação 2.3 é utilizada para retirar o valor da instabilidade temporal.

$$\text{Instabilidade temporal (\%)} = \left[\frac{\max_{\text{irradiância}} - \min_{\text{irradiância}}}{\max_{\text{irradiância}} + \min_{\text{irradiância}}} \right] \times 100\% \quad 2.3$$

onde o $\max_{\text{irradiância}}$ e o $\min_{\text{irradiância}}$ dependem do tempo que o simulador solar está ligado.

Caso o simulador solar seja utilizado para aferir o desempenho do módulo sob a exposição à irradiância, a instabilidade temporal é definida pela irradiância máxima e mínima medida por um solarimetro em qualquer ponto específico do módulo durante o tempo de exposição.

2.2.3 Exemplos de simuladores solares

Existe neste momento comercialmente uma enorme variedade de simuladores solares. Simuladores solares para simular células ou módulos fotovoltaicos. Para além dos simuladores comerciais, as universidades têm vindo a desenvolver simuladores solares. Neste subcapítulo serão descritos exemplos de simuladores desenvolvidos em universidades tal como de simuladores comerciais.

2.2.3.1 Simuladores comerciais

Simulador comercial para ensaiar células fotovoltaicas

Comercialmente existe uma grande variedade de simuladores solares para testar células fotovoltaicas. Estes tipos de simuladores podem ser encontrados em empresas como exemplo: Newport, Sciencetech, Spectrolab, Eternal Sunr e Abet Technologies [19] [20] [21].



Figura 2.5 - Exemplos de simuladores solares para ensaiar células fotovoltaicas.

De seguida são apresentados três exemplos destes tipos de simuladores de vários apresentados pela revista Photon – International de outubro de 2013 [22].

Tabela 2.4 - Exemplos de simuladores solares para ensaio de células fotovoltaicas.

Empresa	Abel Technologies	Aescusoft	Wavelabs
Modelo	15309	SolSimTH 100 Thinfilm	SINUS -220
Tamanho	250 x 300 x 480 mm	1000 x 320 x 860 mm	540 x 690 x 1000 mm
Peso	12 kg	320 kg	80 kg
Área max. iluminada	>10 cm ²	100 cm ²	256 cm ²
Tipo de lâmpada	xénon	xénon, halogéneo	21 LED
Modo de funcionamento	contínuo	contínuo	flash ou contínuo
Espectro	AM 0; AM 1,5G; AM 1,5D	AM 1,5; AM 1	AM 1,5
Intensidade da luz	700 - 2000 W/m ²	700 - 1400 W/m ²	100 - 1200 W/m ²
Duração do pulso	contínuo	contínuo	10 ms – contínuo
Classificação	ABB	AAA	AAA
Correspondência espectral	0,75-1,25 (A)	0,98 - 1,02 (A)	0,95 - 1,05 (A)
Instabilidade de curto prazo (STI)	2% (B)	± 0,5% (A)	< 0,2% (A)
Instabilidade de longo prazo (LTI)	2% (A)	± 2% (A)	< 0,2% (A)
Não-uniformidade da irradiância	5% (A)	± 2% (A)	< 1% (A)
Preço	46 864,10 €	125 000 €	264 000 €

Simuladores comerciais para ensaio de módulos fotovoltaicos

No mercado, tal como acontece com os simuladores para células fotovoltaicas, existe uma vasta variedade de simuladores para ensaio de módulos fotovoltaicos. Seguidamente são apresentados dois exemplos de simuladores solares comerciais de entre os vários citados pela revista Photon Internacional de Junho de 2013 [23].

Simulador solar da Endeas - QuickSun 540LA

O QuickSun 540LA é um simulador solar capaz de iluminar módulos fotovoltaicos com tamanho máximo de 1,1 m x 1,9 m. Este simulador utiliza lâmpadas de xénon, produzindo um espectro AM 1,5. O simulador funciona em modo de pulso único, em que o tempo de cada pulso tem uma duração compreendida entre 3 e 10 ms. Desta forma é possível simular 180 módulos fotovoltaicos por hora. A

irradiância que incide sobre o módulo é ajustável entre os 200 W/m² e 1200 W/m². A classificação deste produto é AAA. Em relação ao preço, está disponível entre 82000 € e 87000 € [24] [23].



Figura 2.6 - Simulador solar QuickSun 540LA [24].

Simulador solar da Ecogetti s - Ecosun 10L

O Ecosun 10L é um simulador desenvolvido pela empresa Ecogetti composto por lâmpadas LED que funcionam em modo de pulso único em que cada pulso pode durar entre 200 ms e 1000 ms. Este simulador tem capacidade de iluminar uma área máxima de 1,2 m x 2 m. A irradiância é ajustável desde os 200 W/m² até aos 1000 W/m². Por fim, o Ecosun 10L apresenta uma classificação de AAA e tem um preço de 125000 € [23].



Figura 2.7 - Simulador solar Ecosun 10L [25].

2.2.3.2 Simuladores solares não comerciais

Simulador solar da Universidade de Ulster

O simulador solar construído pela universidade de Ulster tem como objetivo testar módulos fotovoltaicos e sistemas para gerar energia térmica. Este simulador foi desenvolvido de forma a garantir uma luz uniforme, correspondência espectral de AM 1,5 e alta colimação. O simulador é constituído por 35 lâmpadas de iodetos metálicos, cada uma com 575 W de potência, equipadas com lentes que garantem a uniformidade da luz, é também constituído por refletores parabólicos, que permitem um feixe de luz altamente colimado. As lâmpadas são montadas numa estrutura móvel que permite ajustar o ângulo de inclinação e a altura, que pode ir até seis metros acima do chão. Este simulador contém uma estrutura em vidro duplo na frente das lâmpadas que tem como objetivo filtrar a luz infravermelha e ultravioleta. A área iluminada por este simulador é de 2,2 m x 1,5 m. Para o desenvolvimento deste projeto foram necessários 120 mil euros [26].



Figura 2.8 - Simulador solar da universidade de Ulster [26].

Simulador solar Mitsubishi

O simulador desenvolvido pela marca japonesa Mitsubishi é composto por lâmpadas (halogéneo e iodetos metálicos) e filtros, com a finalidade de produzir um espectro semelhante ao do Sol. O simulador ilumina uma área máxima de 2 m x 4 m. É possível variar a irradiância entre os 300 W/m² e os 1200 W/m². Este simulador é utilizado na indústria automóvel [27].



Figura 2.9 - Simulador solar da Mitsubishi[27].

Simulador solar da Universidade Nacional da Malásia

Na Universidade Nacional da Malásia foi desenvolvido um simulador solar de baixo custo, constituído por 23 lâmpadas de halogéneo Philips com refletores embutidos. Este sistema ilumina uma área de ensaio proporcional a um coletor solar com as seguintes dimensões: 1,2 m por 0,53 m. As lâmpadas encontram-se a uma altura de 1,60 m da área de ensaio. A uniformidade da irradiância deste simulador foi medida na área de ensaio, no qual, foram aplicados 4 valores de irradiância diferentes (466 W/m^2 , 580 W/m^2 , 686 W/m^2 e 804 W/m^2), obtendo-se a percentagem de uniformidade para cada valor: 8,9%, 7,6%, 6,9% e 7,8%, respetivamente [28].



Figura 2.10 - Simulador solar de baixo custo [28].

Simulador solar da universidade de Portsmouth

O simulador solar desenvolvido na universidade de Portsmouth tem um objetivo diferente dos anteriormente descritos visto que este serve para investigar a termofisiologia humana e não para ensaiar módulos fotovoltaicos. Este simulador é constituído por doze lâmpadas de halogéneo, 500 W cada e respetiva luminária. Estas estão divididas em duas estruturas, com seis luminárias por cada, que podem ser manobradas para qualquer posição e ângulo. Porém apresentam problemas devido no mecanismo de fixação, na medida em que não permite uma grande precisão. Devido ao orçamento e à natureza das lâmpadas utilizadas neste projeto a distribuição espectral é a mais próxima do espectro solar. A área iluminada pelo simulador solar é de 1,8 m x 0,5 m com uma irradiância variável entre 995 W/m² e 1437 W/m² consoante a distância varie entre 2 m e 1 m, respetivamente. O orçamento inicial deste projeto foi de, aproximadamente, 5895 euros, porém foi gasto somente 4918 euros. A figura 2.20 ilustra este simulador solar e demonstra o seu modo de operar em seres humanos [18].

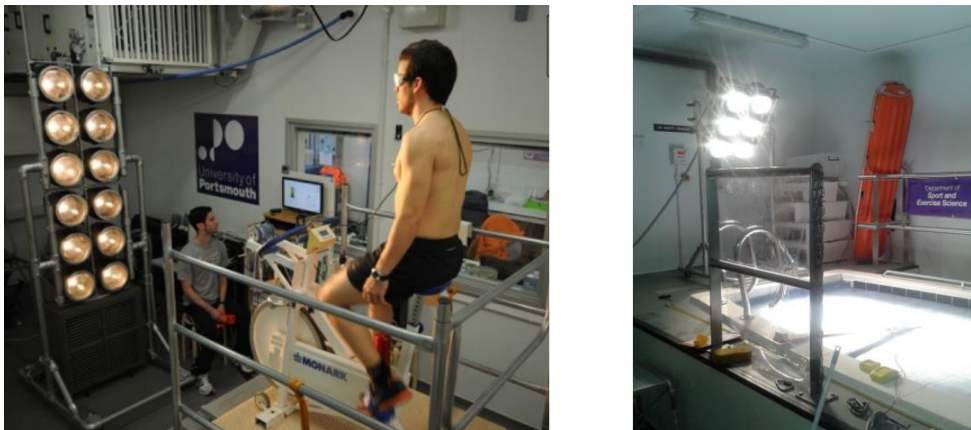


Figura 2.11 - Simulador da universidade de Portsmouth [18].

2.2.3.3 Reator solar

A Universidade do Minnesota desenvolveu um simulador solar de alto fluxo de 45 kW. Este simulador consiste num conjunto de sete lâmpadas xénon acopladas a num refletor de forma elipsoidal. O simulador aplica uma potência radioativa, aproximadamente, de 10,5 kW sobre um disco circular com

6 cm de diâmetro, correspondendo a um fluxo de calor⁴ médio de 3,7 MW/m² e um fluxo máximo de 8,5 MW/m². Estes valores de fluxo são ideais para testar reatores e recetores solares de alta temperatura [29].



Figura 2.12 – Simulador de alto fluxo[29].

2.3 Fontes de iluminação

Num simulador solar, a lâmpada é a componente principal tendo como função iluminar o módulo solar. Existem vários tipos de lâmpadas com diferentes características para diversos fins de iluminação. As características a ter em conta numa lâmpada são [30]:

- Fluxo luminoso – quantidade de luz emitida por uma lâmpada. Esta grandeza é expressa em lúmen (lm);

⁴ Fluxo de calor (q) - Energia térmica transferida por unidade de tempo e por unidade de área. A expressão do fluxo de calor emitido de uma superfície por radiação é: $q = \epsilon \sigma T^4$ [W/m²], onde ϵ é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann que tem o valor de $5,669 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴] e T é a temperatura absoluta da superfície do corpo.

- Eficiência luminosa – corresponde à relação entre o fluxo luminoso e a potência da lâmpada (W). A unidade SI é lúmen por Watt (lm/W);
- Índice de restituição de cor (IRC) – capacidade da fonte de iluminação artificial se aproximar da luz natural. É uma medida adimensional expressa entre 0 e 100;
- Temperatura de cor – é utilizada para comparar a cor de uma fonte de luz com a cor emitida por um corpo negro. A unidade é o Kelvin (K). A figura 2.13 mostra a escala da temperatura de cor.

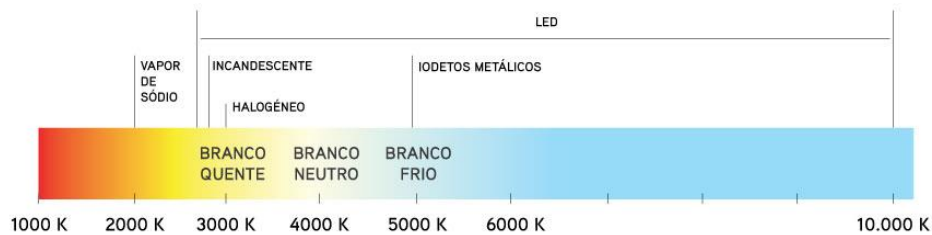


Figura 2.13 - Temperatura da cor [31].

- Vida útil – corresponde ao tempo de vida, em horas, em que a lâmpada funciona corretamente.

2.3.1 Classificação das lâmpadas

As lâmpadas convertem energia elétrica em luz visível. Estas são agrupadas segundo as seguintes famílias:

- Lâmpadas incandescentes;
- Lâmpadas de descarga;
- Lâmpadas LED.

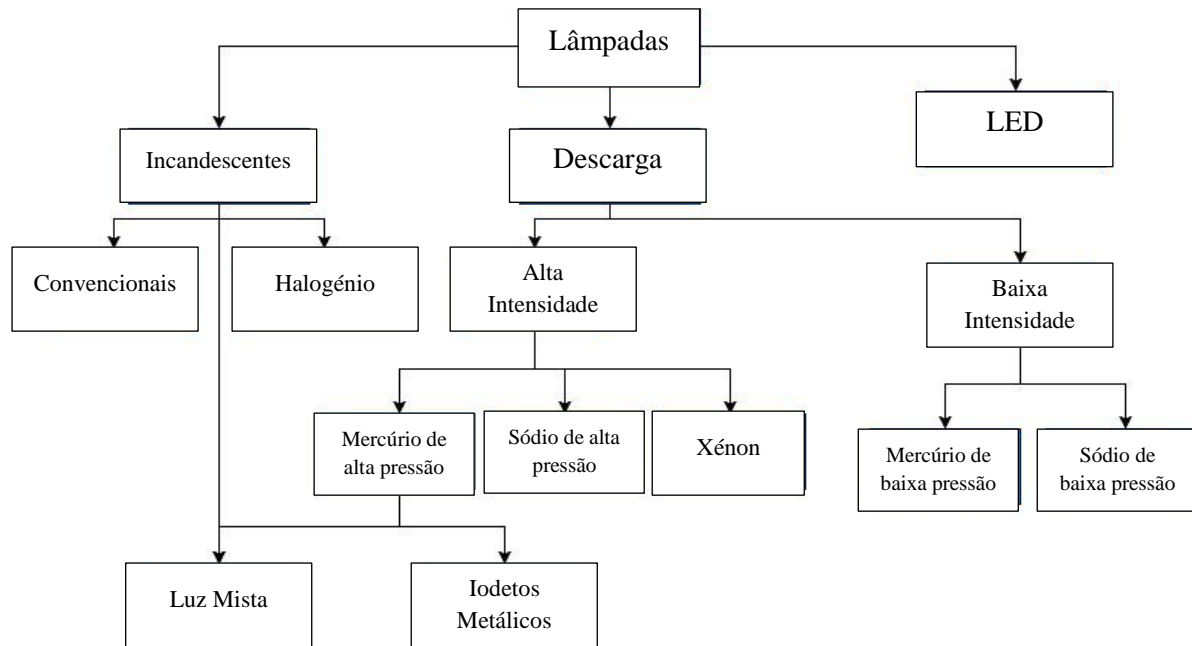


Figura 2.14 - Mapa de lâmpadas. Adaptado de [32].

2.3.1.1 Lâmpadas incandescentes

Nestas lâmpadas a luz é gerada por uma corrente elétrica que percorre um filamento de tungsténio que se encontra dentro de uma ampola de vidro onde está presente um gás inerte [33]. As lâmpadas incandescentes mais comuns são as convencionais e as de halogéneo. As lâmpadas incandescentes convencionais têm uma baixa eficiência luminosa, tal como, uma vida útil reduzida. No entanto, apresentam um custo baixo. Este tipo de lâmpadas é utilizado, na sua maioria, em iluminação doméstica. Em relação, às lâmpadas de halogéneo contem uma eficiência luminosa superior às lâmpadas incandescentes convencionais. Estas lâmpadas utilizam-se para iluminação pública, de veículos e prática desportiva [32].

Tabela 2.5 - Características das lâmpadas incandescentes

	Lâmpadas Incandescentes	
	Convencionais	Halogéneo
Rendimento luminoso (lm/W)	10 - 15	15 - 25
Índice de reprodução de cor	100	100
Temperatura de cor (K)	2700	3000
Tempo de vida útil (horas)	1000	4000

2.3.1.2 Lâmpadas de descarga

As lâmpadas de descarga geram luz a partir de uma descarga elétrica que ocorre num meio gasoso. Estas lâmpadas dividem-se em dois tipos, lâmpadas de descarga de alta intensidade e de baixa intensidade.

Lâmpadas de descarga em alta intensidade

Lâmpadas de mercúrio de alta pressão - apresentam uma eficiência luminosa média e uma vida útil elevada. Estas lâmpadas são utilizadas geralmente em iluminação pública e industrial.

Lâmpadas de iodetos metálicos – contêm uma boa eficiência luminosa e uma vida útil razoável. Estas são utilizadas em iluminação industrial, desportiva e interior.

Lâmpadas de luz mista – são lâmpadas com uma eficiência luminosa média e uma vida útil elevada. São geralmente utilizadas em iluminação doméstica.

Lâmpadas de sódio de alta pressão – são utilizadas em iluminação pública e industrial, devido a terem uma eficiência luminosa boa e uma vida útil elevada. No entanto, o seu custo é elevado.

Lâmpadas de xénon – estas lâmpadas apresentam uma eficiência luminosa média e uma vida útil reduzida. As lâmpadas de xénon utilizam-se geralmente em iluminação automóvel, tal como, em simuladores solares [34].

Tabela 2.6 – Características das lâmpadas descarga de alta intensidade.

	Lâmpadas Descarga				
	Alta Intensidade				
	Vapor de Mercúrio de alta pressão			Vapor de Sódio de alta pressão	Xénon
	Vapor de Mercúrio	Iodetos Metálicos	Luz Mista		
Rendimento luminoso (lm/W)	36 a 60	60 a 96	20 a 30	66 a 130	30 a 50
Índice de reprodução de cor	40 a 57	85 a 95	60	25 a 80	100
Temperatura de cor (K)	3800 a 4100	3000 a 7000	3000 a 4000	1900 a 2500	6200
Tempo de vida útil (horas)	10000 a 12000	3000 a 9000	3000 a 10000	12000 a 18000	500 a 1500

Lâmpadas de descarga em baixa intensidade

Lâmpadas de mercúrio a baixa pressão (fluorescentes) - apresentam uma boa eficiência luminosa e uma vida útil elevada. A utilização destas lâmpadas é feita ao nível da iluminação doméstica e industrial.

Lâmpadas de sódio de baixa pressão – contêm uma eficiência luminosa elevada, uma radiação monocromática e uma vida útil elevada. Porém, apresentam um custo elevado. Estas lâmpadas aplicam-se nomeadamente em iluminação pública e de segurança.

Tabela 2.7 - Lâmpadas descarga de baixa intensidade.

	Lâmpadas Descarga	
	Baixa Intensidade	
	Fluorescentes	Vapor de Sódio de baixa pressão
Rendimento luminoso (lm/W)	até 100	até 200
Índice de reprodução de cor	85 a 95	3
Temperatura de cor (K)	2700 a 5000	2200
Tempo de vida útil (horas)	7500 a 12000	16000

2.3.1.3 LED

Um *Light Emitting Diode* (LED) é um díodo semicondutor que quando é polarizado diretamente emite uma luz. O LED apresenta um tempo de vida útil entre 50000 e 100000 horas, uma boa resistência a impactos externos e uma boa eficiência luminosa.

Tabela 2.8 - Características das lâmpadas LED

	LED
Rendimento luminoso (lm/W)	60 a 130
Índice de reprodução de cor	65 a 90
Temperatura de cor (K)	2700 a 4000
Tempo de vida útil (horas)	50000 a 100000

Com o intuito de produzir um espectro semelhante ao AM 1,5, é necessário utilizar uma combinação de LEDs, como é ilustrada na figura 2.15.

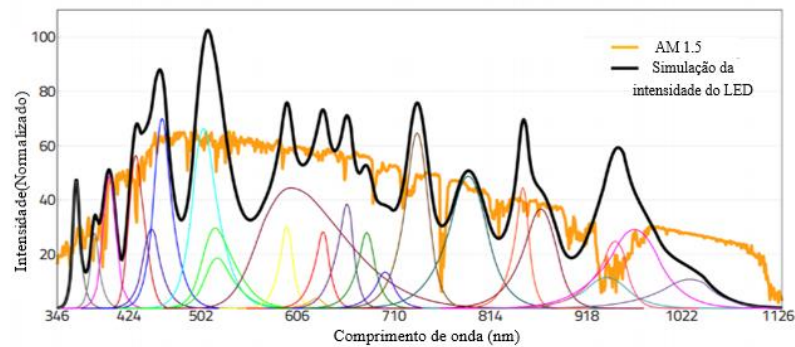


Figura 2.15 - Espectro de um conjunto de LEDs. Adaptado de [35].

3 Projeto e implementação do simulador solar

O presente capítulo irá retratar o projeto e sua implementação. No projeto serão apresentados e explicados todos os constituintes (fonte de iluminação, estrutura mecânica e a instalação elétrica) escolhidos para o desenvolvimento do simulador solar. Por fim, é explicada a implementação do trabalho com base no projeto.

3.1 Projeto

O planeamento do simulador solar tem de respeitar a norma CEI 60904-9. Além disso o equipamento terá de iluminar um módulo fotovoltaico de tamanho 1580 mm por 798 mm em condições de ensaio standard (STC). Para este fim, serão escolhidas duas fontes de iluminação diferentes. Serão ainda simulados, num software computacional (DIALux⁵), quatro sistemas de iluminação com as fontes de iluminação selecionadas. A partir das simulações serão explicados os motivos que levaram à escolha da fonte de iluminação a utilizar neste trabalho. Será ainda apresentado e explicado o modelo em 3D desenvolvido no SketchUp⁶ da estrutura mecânica. Será feito também um estudo elétrico do projeto. Por fim, é apresentado o orçamento para o desenvolvimento do simulador solar.

3.1.1 Fonte de iluminação

A fonte de iluminação é uma componente fundamental num simulador solar, sendo esta o elemento responsável por produzir e direcionar a luz. Existe uma variedade de lâmpadas, como é referenciado no capítulo 2, no entanto nem todas têm capacidade para serem utilizadas num simulador solar. As lâmpadas normalmente utilizadas neste tipo de equipamento são as lâmpadas incandescentes de halogéneo ou as de alta intensidade. As lâmpadas de alta intensidade são utilizadas em equipamentos que requerem um espectro solar preciso, como por exemplo os simuladores solares comerciais. Estas lâmpadas precisam de equipamentos sofisticados para as controlar, tornando estas fontes de iluminação muito dispendiosas, o que difere do objetivo deste trabalho. Por outro lado, as lâmpadas incandescentes

⁵ DIALux – software destinado para projetar, calcular e visualizar a iluminação em espaços interiores e exteriores (<https://www.dial.de/en/dialux/>).

⁶ SketchUp – software computacional utilizado para a criação de modelos em 3D (<https://www.sketchup.com/>).

de halogéneo são económicas e facilmente controláveis. A maior dificuldade na utilização destas lâmpadas, reside no facto das mesmas não produzirem uma réplica exata do espectro solar devido a estarem deslocadas para a zona de infravermelhos, como é ilustrado pela figura 3.1. Contudo, o simulador solar de baixo custo desenvolvido na Universidade Nacional da Malásia demonstra que as lâmpadas de 500 W conseguem ser bem-sucedidas e apresentar valores de irradiância muito próximos dos 1000 W/m². Posto isto, foram feitos ensaios no software DIALux com lâmpadas de halogéneo e de iodetos metálicos com finalidade de comparar o custo entre as lâmpadas e escolher a melhor opção.

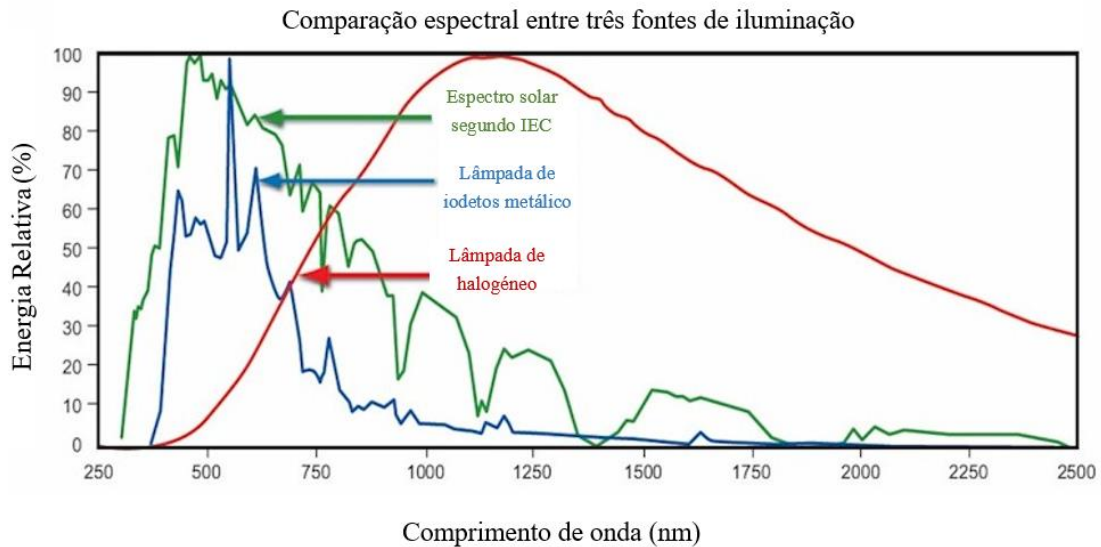


Figura 3.1 - Comparação espectral entre três fontes de iluminação. Adaptada de [36].

3.1.2 Luminária

Após a escolha das lâmpadas para o simulador (halogéneo e iodetos metálicos), foi feita uma pesquisa a fim de determinar a potência a utilizar. Para as lâmpadas de halogéneo foram determinados dois valores de potência, 500 W e 1000 W. Em relação às lâmpadas de iodetos metálicos foi adotada uma potência de 400 W. A escolha das luminárias teve em consideração o baixo custo, de entre as disponíveis no mercado. As luminárias escolhidas serão descritas nos parágrafos seguintes:

Philips RVP351 HPI-TP400W – luminária específica para lâmpadas de iodetos metálicos com uma potência de 400 W.

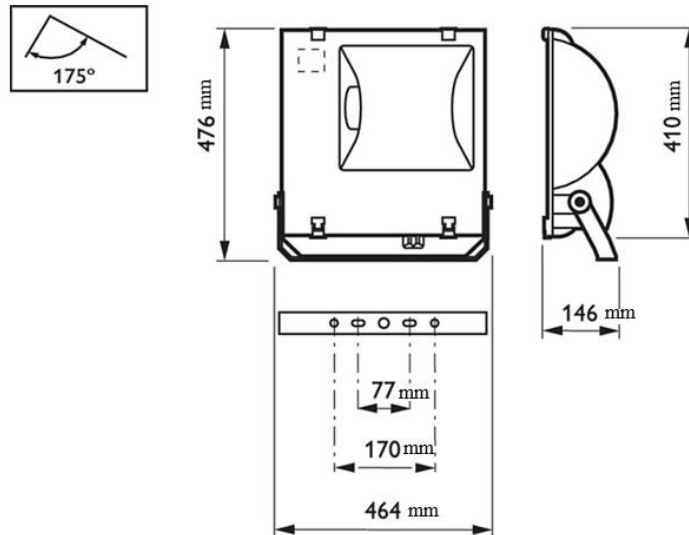
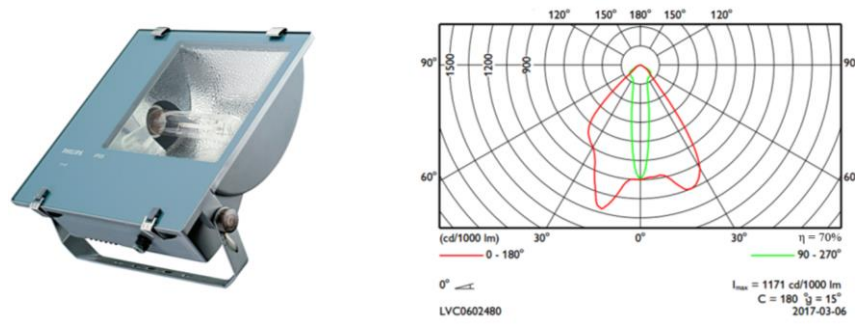


Figura 3.2 - Projetor da Philips RVP351 e diagrama polar da intensidade da luminária. Adaptada de [37].

Mader Home JM-500 – esta luminária é destinada a lâmpadas de halógeno com potência de 500 W.

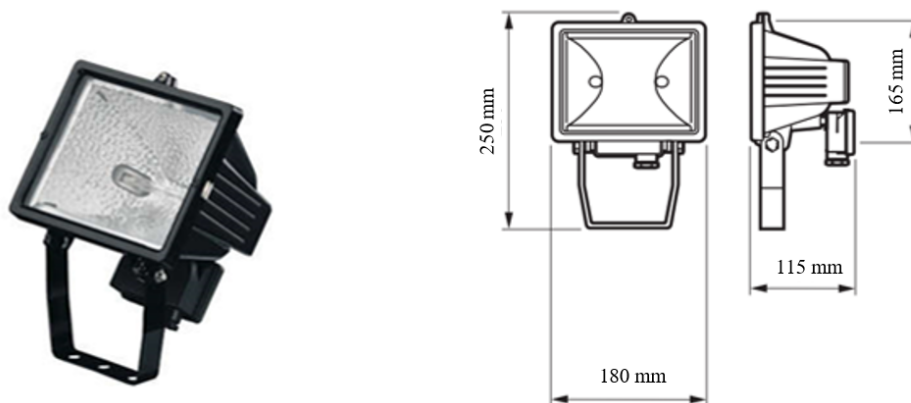


Figura 3.3 – Mader Home JM-500.

ASLO ASPH1000 – esta luminária utiliza lâmpadas de halogéneo com potência de 1000 W.

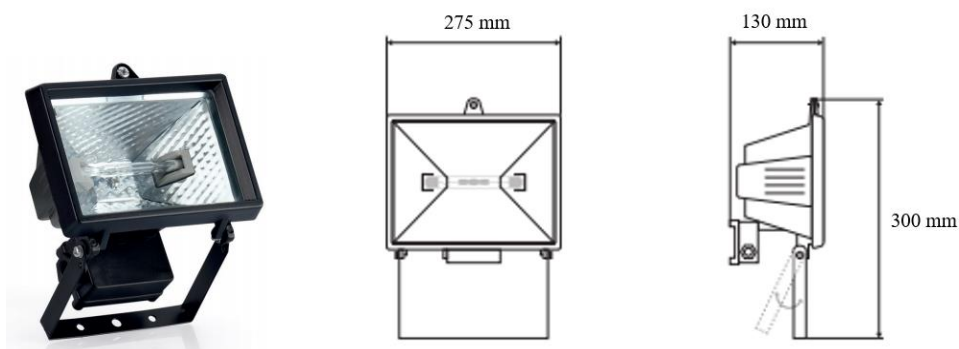


Figura 3.4 – ASLO ASPH1000. Adaptada de [38].

As diferenças entre as três luminárias consideradas serão descritas seguidamente.

Tabela 3.1 - Características das luminárias.

Luminária	Lâmpada	Potência da lâmpada	Índice de proteção de invólucros elétricos (IP) ⁷	Preço
Philips RVP351	Iodetos metálicos	400 W	IP65	170,69 €
Mader Home JM-500	Halogéneo	500 W	IP44	5,49 €
ASLO ASPH1000	Halogéneo	1000 W	IP54	21,34 €

3.1.3 Lâmpadas

As lâmpadas têm certas características que foram definidas no capítulo 2. Neste subcapítulo, serão expostas várias lâmpadas, três de halogéneo com potência de 400 W, mais três de halogéneo, mas

⁷ Índice de proteção de invólucros elétricos (IP) – A norma CEI 60629 define a partir dos códigos IP, o grau de proteção de um invólucro para material elétrico contra a penetração de corpos sólidos estranhos e contra líquidos com efeitos prejudiciais. O código IP é definido por dois algarismos, o primeiro define a proteção contra corpos sólidos estranhos e o segundo define a proteção contra líquidos com efeitos prejudiciais.

com uma potência de 1000 W e por fim duas lâmpadas de iodetos metálicos com uma potência de 400 W. Esta exposição servirá como termo de comparação entre lâmpadas iguais.

Lâmpadas de halogéneo de 400 W

As lâmpadas de halogéneo escolhidas são a Plusline ES S de 400 W da Philips, a HALOLINE SST 400 W da Osram e a Eco de 400 W comercializada pela Maxmat. Apesar da potência ser de 400 W a potência é equivalente a 500 W, termo descrito pelas três marcas apresentadas.

Tabela 3.2 – Diferenças entre as lâmpadas de halogéneo da Philips, Osram e Maxmat.

	Plusline ES S	HALOLINE SST 400 W	Maxmat
Potência	400 W	400 W	400 W
Fluxo luminoso (nominal)	8600 lm	8750 lm	8500lm
Eficiência luminosa	21,5 lm/W	21,88 lm/W	21,25 lm/W
Temperatura da cor	2900 K	2900 K	2700 K
Índice de restituição cromática	100	100	100
Vida útil	2000 h	2000 h	2000 h
Casquilho	R7S	R7S	R7S
Preço	3,29 €	3,00 €	2,00 €

Lâmpadas de halogéneo de 1000 W

Tabela 3.3 - Comparação entre lâmpadas de halogéneo de 1000W.

	Plusline Large	HALOLINE 1000 W	ASLH1000
Potência	1000 W	1000 W	1000 W
Fluxo luminoso (nominal)	21500 lm	22000 lm	18000 lm
Eficiência luminosa	21,5 lm/W	22 lm/W	18 lm/W
Temperatura da cor	2900 K	2900 K	2800 K
Índice de restituição cromática	100	100	99
Vida útil	2000 h	2000 h	2000 h
Casquilho	R7S	R7S	R7S
Preço	8,00 €	7,15 €	1,56 €

Por fim, para as lâmpadas de halogéneo de 1000 W, foram escolhidas as Plusline Large da Philips, a Haloline da Osram e a ASLH1000 da Aslo.

Lâmpadas de iodetos metálicos de 400 W

Como já anteriormente referido, escolheram-se duas lâmpadas do mesmo tipo e com a mesma potência, diferindo na marca. A lâmpada escolhida da Philips foi a Master HPI-T Plus e da Osram a HQI-T 400W W/N/SI. As características das mesmas serão descritas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Comparação entre Philips e Osram.

	MASTER HPI-T Plus	HQI-T 400 W/N/SI
Potência	400 W	400 W
Fluxo luminoso (nominal)	32000 lm	33000 lm
Eficiência luminosa	84 lm/W	82 lm/W
Temperatura da cor	4500 K	4100 K
Índice de restituição cromática	65	65
Vida útil	20000 h	10000 h
Casquilho	E40	E40
Preço	20,00 €	25,00 €

Em suma as características das lâmpadas são idênticas, logo, a fim de cumprir com um dos principais objetivos deste trabalho, a escolha recaiu sobre as lâmpadas de menor custo. Seguidamente serão demonstradas as simulações efetuadas em DIALux com as luminárias e lâmpadas.

3.1.4 Área de ensaio

O presente trabalho requer iluminar um módulo fotovoltaico de dimensão convencional (1580 mm x 798 mm x 35 mm). Sendo o objetivo principal deste trabalho implementar um simulador solar de baixo custo, pelo que o planeamento das fontes de iluminação a utilizar teve este parâmetro em conta. Desta forma, tentou-se minimizar o número de luminárias necessárias.

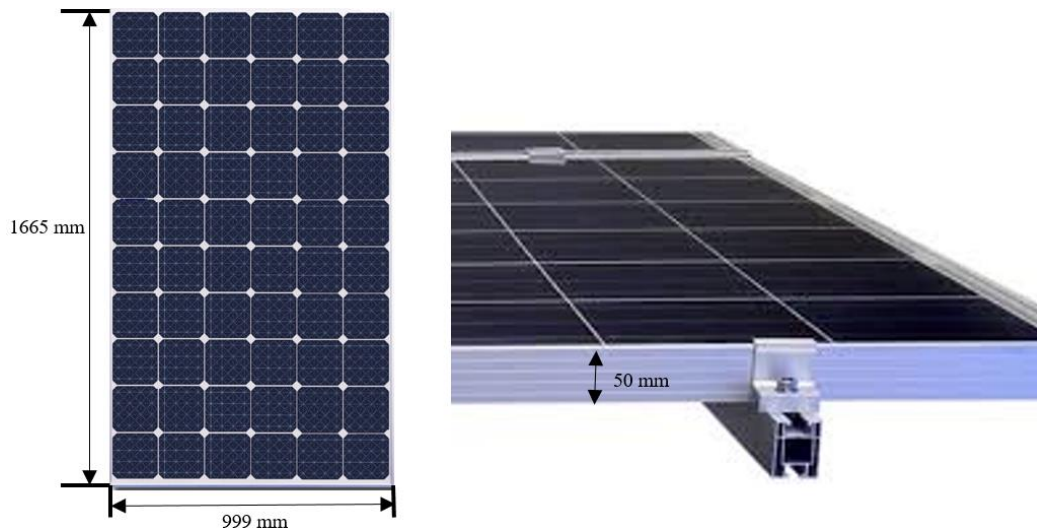


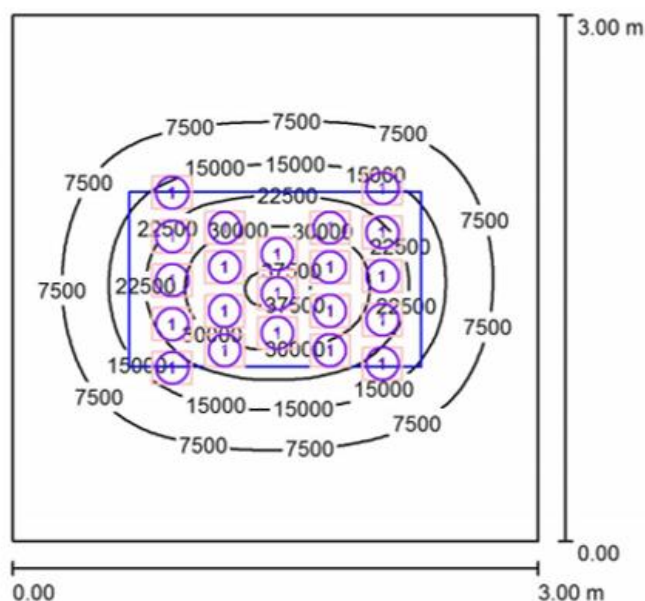
Figura 3.5 - Dimensões do módulo fotovoltaico

3.1.5 Simulações em DIALux

As fontes de iluminação consideradas para o projeto foram testadas no DIALux. Este software permite realizar estudos luminotécnicos essenciais como termo de comparação entre os sistemas de iluminação. Os 4 sistemas de iluminação simulados tiveram como ponto de partida o simulador de baixo custo desenvolvido na Malásia, referenciado no capítulo 2. Neste simulador, utilizaram 23 luminárias e obtiveram uma irradiância, aproximada, de 800 W/m^2 . No simulador da Malásia a distância entre as luminárias e a área de ensaio é de 160 cm. Em relação ao simulador a desenvolver, optou-se por colocar as luminárias a uma distância de 150 cm da área de ensaio, tendo em vista a obtenção de uma maior intensidade de luminosa no módulo fotovoltaico.

Seguidamente serão apresentadas as 4 opções consideradas para a disposição das luminárias. Devido à inexistência das luminárias de halogéneo (500 W e 1000 W), referidas no subcapítulo 3.1.2, utilizou-se para os estudos duas luminárias que apresentam características idênticas.

1º Opção – 21 luminárias de halogéneo de 500 W com uma potência total aproximada de 10,5 kW.



Distância entre a fonte de iluminação e o módulo fotovoltaico: 150 cm
 □ Módulo fotovoltaico de dimensões 1665 mm x 999 mm x 50 mm
 ⊙ Luminária de halogéneo de 500 W
 Nota: A unidade dos valores apresentados na figura é lumens (lm)

Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	21	PELSAN 5321 1020 Halogen 500W Halogen R7s (1.000)	4556	8900	488.2
			Total: 95667	Total: 186900	10252.2

Potência específica: $1139.13 \text{ W/m}^2 = 11.10 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 9.00 m^2)

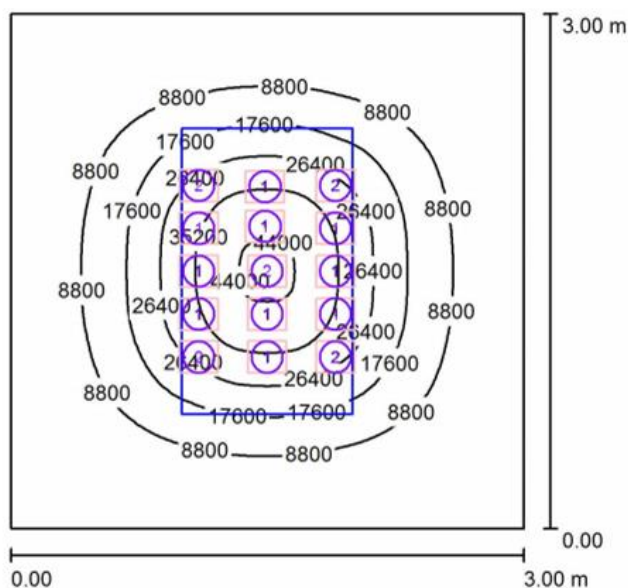
Figura 3.6 – Resumo da simulação no DIALux.

A tabela 3.5 descreve os custos associados a esta opção.

Tabela 3.5 - Custos das luminárias e lâmpadas utilizadas na simulação.

Descrição	Preço (Unidade)	Quantidade	Preço Total
Philips Plusline ES 400W R7s 230V 1CT/10X10F	3,08 €	21	64,68 €
Mader Home JM-500	5,49 €	21	115,29 €
Valor Total			179,97 €

2ª Opção – 15 luminárias de halogéneo em que 10 luminárias são de 500 W e 5 luminárias de 1000 W, que prescreve uma potência total de 10 kW.



Distância entre a fonte de iluminação e o módulo fotovoltaico: 150 cm

□ Módulo fotovoltaico de dimensões 1665 mm x 999 mm x 50 mm

○ Luminária de halógeno de 500 W

○ Luminária de halógeno de 1000 W

Nota: A unidade dos valores apresentados na figura é lumens (lm)

Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	10	PELSAN 5321 1020 Halogen 500W Halogen R7s (1.000)	4556	8900	488.2
2	5	PELSAN 5321 1140 Halogen 1000W Halogen R7s (1.000)	14070	21500	985.2
			Total: 115903	Total: 196500	9808.0

Potência específica: $1089.78 \text{ W/m}^2 = 8.76 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 9.00 m^2)

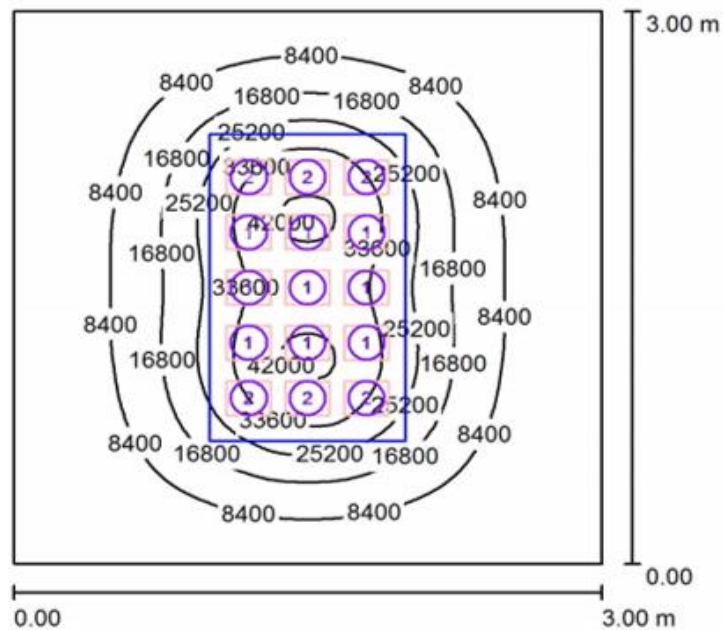
Figura 3.7 - Resumo da simulação no DIALux.

Os custos associados a esta opção estão descritos na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Custos associados às luminárias e lâmpadas utilizadas na simulação.

Descrição	Preço (Unidade)	Quantidade	Preço Total
Philips Plusline ES 400W R7s 230V 1CT/10X10F	3,08 €	10	30,80 €
Philips Plusline L 1000W R7s 230V	8,53 €	5	42,65 €
Mader Home JM-500	5,49 €	10	54,90 €
ASLO ASPH1000	21,34 €	5	106,70 €
Valor Total			235,05 €

3ª Opção – 15 luminárias de halogéneo onde 9 luminárias de 500 W e 6 luminárias de 1000 W, que prescreve uma potência total de 10,5 kW.



Distância entre a fonte de iluminação e o módulo fotovoltaico: 150 cm

Módulo fotovoltaico de dimensões 1665 mm x 999 mm x 50 mm

Luminária de halogéneo de 500 W

Luminária de halogéneo de 1000 W

Nota: A unidade dos valores apresentados na figura é lumens (lm)

Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	9	PELSAN 5321 1020 Halogen 500W Halogen R7s (1.000)	4556	8900	488.2
2	6	PELSAN 5321 1140 Halogen 1000W Halogen R7s (1.000)	14070	21500	985.2
Total:			125417	Total: 209100	10305.0

Potência específica: $1145.00 \text{ W/m}^2 = 8.52 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 9.00 m^2)

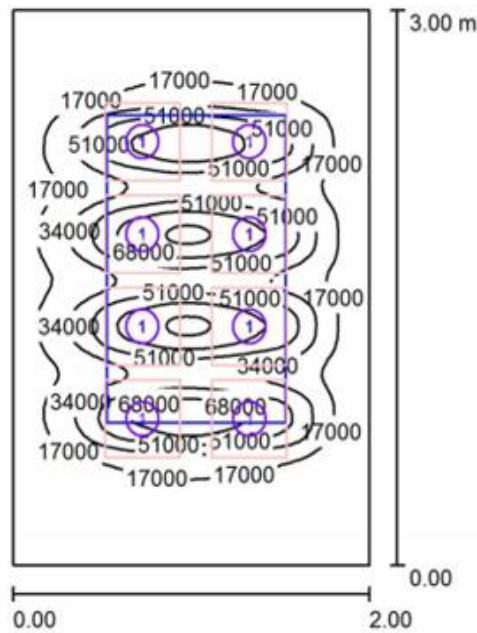
Figura 3.8 - Resumo da simulação em DIALux.

Na tabela 3.7 são descritos os custos associados a esta opção.

Tabela 3.7 – Custos da fonte de iluminação na 3ª opção.

Descrição	Preço (Unidade)	Quantidade	Preço Total
Philips Plusline ES 400W R7s 230V 1CT/10X10F	3,08 €	9	27,72 €
PHILIPS Plusline L 1000W R7s 230V	8,53 €	6	51,18 €
Mader Home JM-500	5,49 €	9	49,41 €
ASLO ASPH1000	21,34 €	6	128,04 €
Valor Total			256,35 €

4ª Opção – 8 luminárias de iodetos metálicos com uma potência total, aproximada, de 3,2 kW.



Distância entre a fonte de iluminação e o módulo fotovoltaico: 150 cm

Módulo fotovoltaico de dimensões 1665 mm x 999 mm x 50 mm

Luminária de iodetos metálicos de 400 W

Nota: A unidade dos valores apresentados na figura é lumens (lm)

Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	8	PHILIPS RVP351 1xHPI-TP400W S (1.000)	22400	32000	411.0
Total:			179200	Total: 256000	3288.0

Potência específica: $548.00 \text{ W/m}^2 = 1.90 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 6.00 m^2)

Figura 3.9 - Resumo da simulação retirada do DIALux.

A tabela 3.8 retrata os custos associados a esta opção.

Tabela 3.8 - Custos da fonte de iluminação usada nesta simulação.

Descrição	Preço (Unidade)	Quantidade	Preço Total
Philps Master HPI-T Plus	57,21 €	8	457,68 €
PHILIPS RVP351 HPI-TP400W	137,89 €	8	1103,12
Valor Total			1 560,80 €

Em suma, a melhor simulação, é a opção número quatro devido à proximidade entre o espectro das lâmpadas de iodetos de metálicos e o espectro solar referenciado no CEI 60904-3, ilustrada na figura 3.1 do subcapítulo 3.1.1, assim como, o facto de serem necessárias menos luminárias para ter um bom valor de fluxo luminoso. No entanto, o preço desta simulação é demasiado elevado, como tal, atendendo ao objetivo do trabalho, esta simulação não foi considerada como ideal. Entre as restantes opções, existem diferenças no preço e fluxo luminoso. Apesar da terceira opção apresentar um fluxo luminoso superior, este fluxo não é uniforme, exibindo valores de 42000 lm no centro e 16800 lm nos cantos do módulo, fator que levou a que a escolha recaísse sobre a primeira e segunda opção. Tendo em conta que as características destes dois tipos de simulador são idênticas, a escolha recaiu sobre a primeira opção, pois é a que possuiu um orçamento mais baixo.

3.1.6 Projeto da estrutura mecânica

A estrutura mecânica teve em conta o peso das luminárias e do módulo fotovoltaico. As 21 luminárias apresentam um peso total, aproximado, de 21 kg e o módulo fotovoltaico exibe um peso de 20 kg. A estrutura terá que sustentar um peso total de 41 kg. Para além do peso, a altura é também importante visto que a distância entre área de ensaio e a fonte de iluminação será de 150 cm. Por outro lado, teve-se em consideração a largura e o comprimento de forma a distribuir as 21 luminárias. Assim sendo, o tamanho da estrutura mecânica é de 2 m x 2 m x 2,5 m. Por fim, a estrutura deverá ser capaz de ser movida, para tal, serão utilizadas rodas capazes de sustentar o peso da estrutura e facilitar o deslocamento da mesma. Tendo em conta estes pormenores modelou-se a estrutura em 3D no SketchUp.

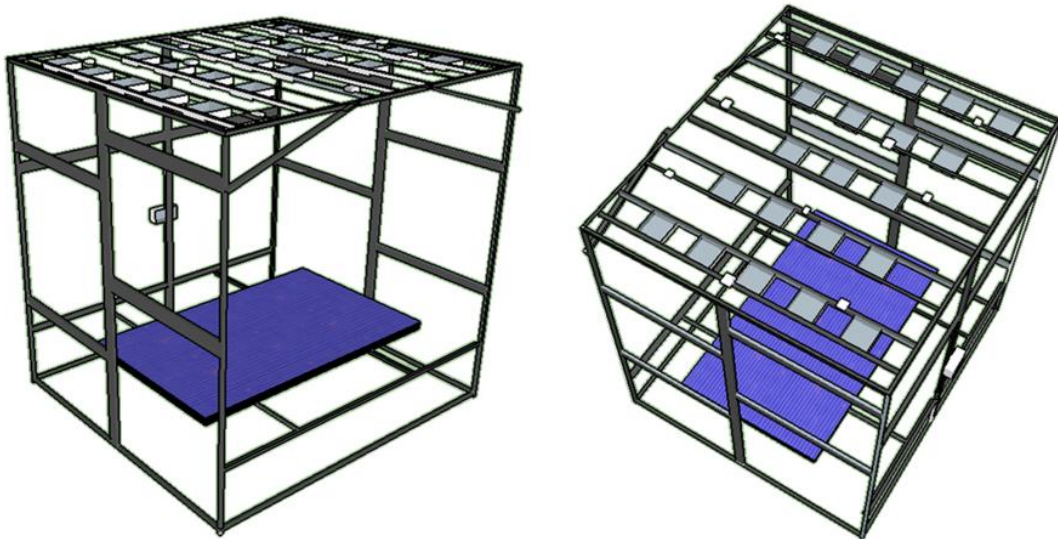


Figura 3.10 - Modelo em 3D da estrutura

A figura 3.11 demonstra uma das partes laterais da estrutura, onde se pode observar quatro “reforços” que ajudam a estrutura a não baloiçar.

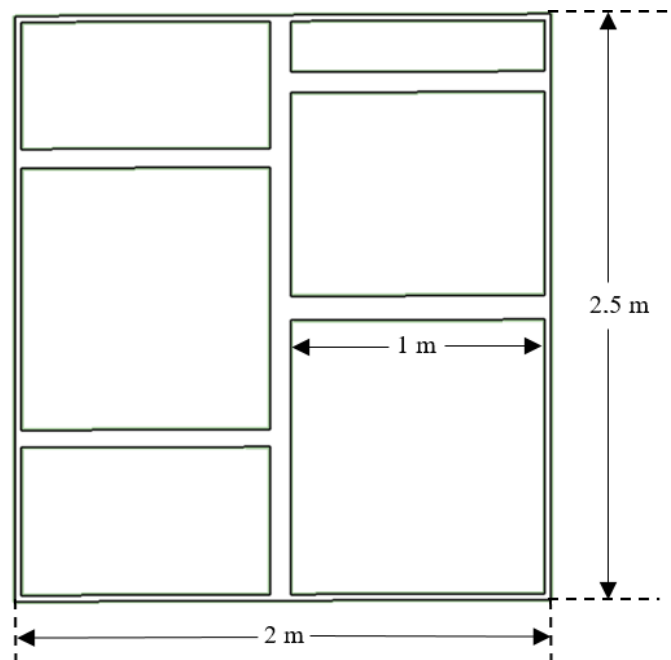


Figura 3.11 - Vista lateral da estrutura.

A figura 3.12 é referente à parte traseira da estrutura, neste lado tem se duas vigas que servem para reforçar a estrutura e mais duas que se encontram a 1,5 metros de distância da iluminação que servem de apoio para estrutura onde irá assentar o módulo fotovoltaico.

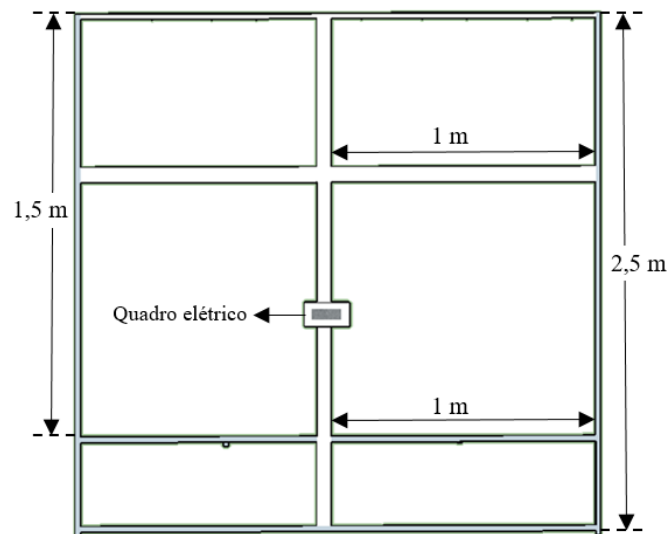


Figura 3.12 - Vista traseira da estrutura.

A figura 3.13 é a vista frontal da estrutura, esta apresenta dois postes angulares de metal que ajuda na estabilidade da estrutura e um poste angular de 2 metros que irá servir de apoio para a estrutura do módulo fotovoltaico.

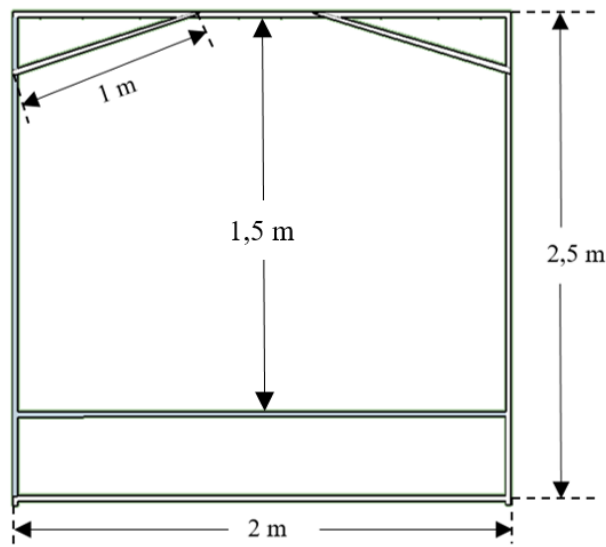


Figura 3.13 - Vista frontal da estrutura.

A figura 3.14 retrata o topo da estrutura onde são inseridas as luminárias e as caixas de derivação. A disposição das luminárias está em conformidade com a simulação escolhida no subtítulo 3.1.5.

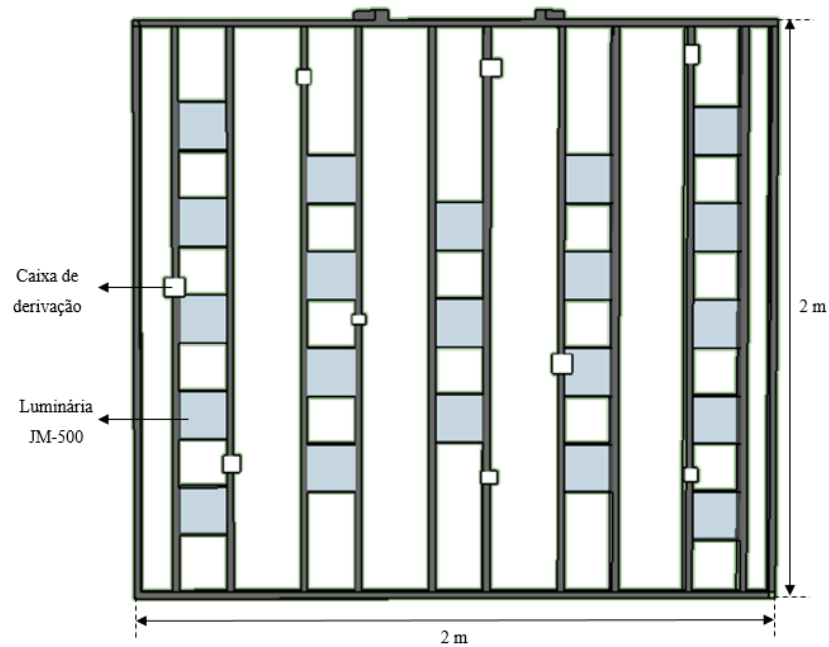


Figura 3.14 - Vista do topo da estrutura.

Por fim, a figura 3.15 ilustra a estrutura metálica que serve de suporte para o módulo fotovoltaico.

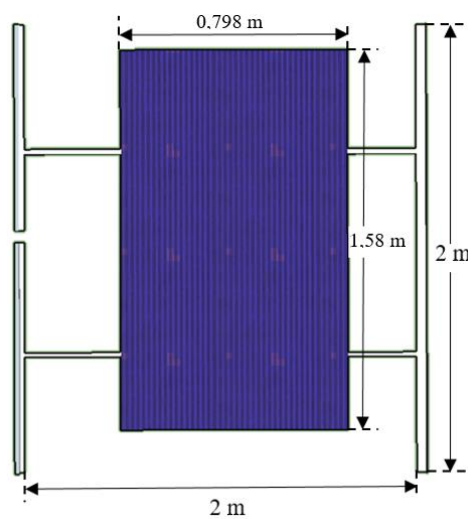


Figura 3.15 - Vista da estrutura de suporte ao módulo fotovoltaico.

Em relação, ao material pensado para o projeto da estrutura mecânica é o seguinte:

- 23 postes angulares de metal 4 cm × 4 cm com 2 metros de altura;
- 10 postes angulares de metal 4 cm × 4 cm com 2,5 metros de altura;



Figura 3.16 - Poste angular de metal [39].

- 10 vigas versateis de 1 metro;



Figura 3.17 - Viga versátil [40].

- 4 rodas com espigão capazes de suportar no total 160 kg;



Figura 3.18 - Roda com espigão [40].

3.1.7 Projeto da infraestrutura elétrica

Disjuntores e interruptores diferencial

Conhecidas as luminárias a utilizar no projeto é necessário efetuar um dimensionamento elétrico. Inicialmente foi feito o cálculo da corrente máxima na instalação. Para tal, tem se que saber a potência máxima da instalação. Sabendo que se utiliza 21 luminárias de 500 W, a potência máxima da instalação é retirada através do cálculo seguinte:

$$P_{max} = 500 W \times 21 = 10,5 kW$$

Sabendo que a potência total das 21 luminárias é de 10,5 kW e que a tensão em Portugal é de 230 V entre fase e neutro e 400 V entre fases, a corrente máxima da instalação é calculada através da equação 3.1.

$$I = \frac{P}{U \times \cos \varphi} \quad 3.1$$

A partir da equação 3.1 obteve-se uma corrente de 46 A, aproximadamente. Conhecendo o valor da corrente recorreu-se ao catálogo da Schneider e escolheu-se um interruptor diferencial para proteger a instalação contra as correntes de fuga. O interruptor escolhido é de quatro polos com sensibilidade de 300 mA e uma intensidade estipulada de 63 A.


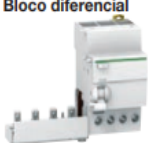
Modelo	Pág.	Classe	Temporização	N.º de pólos	Calibres (A)	Sensibilidade (mA)	Auxiliares	
 iID interruptor diferencial	iIDKI	AC	Instantâneo	2	25 e 40	30 e 300	iOF, iOF+OF/SD, iMX, iMX+OF, iMN, iMSU, ARA (comuns ao iC60)	
				2	25	10, 30, 300 e 500		
	iID	AC	Instantâneo	2	40, 63 e 80	30, 300 e 500		
					80 e 100	300		
				4	25, 40 e 63	30, 300 e 500		
					80 e 100	300 e 500		
				2	63, 80 e 100	300 e 500		
					4	40, 63, 80 e 100		300 e 500
	A superimunizado	Instantâneo	2, 4	25, 40 e 63	30			
			2, 4	40, 63, 80 e 100	300 e 500			
 Bloco diferencial	Quick Vigi acoplável ao iC60	AC	Instantâneo	2	≤ 25	10, 30 e 300		
				3	≤ 40 e ≤ 63	30, 300 e 500		
				A superimunizado	Instantâneo	2, 3 e 4	≤ 25, ≤ 40 e ≤ 63	30
						2, 3 e 4	≤ 63	300

Figura 3.19 - Proteção diferencial Acti 9 da Schneider [41].

Com o intuito de não sobrecarregar o interruptor diferencial e proteger a instalação contra sobrecargas e curto-circuitos utilizaram-se três disjuntores. Desta forma dividiu-se a instalação em três partes, em que cada uma é constituída por sete luminárias como é ilustrado na figura 3.20.

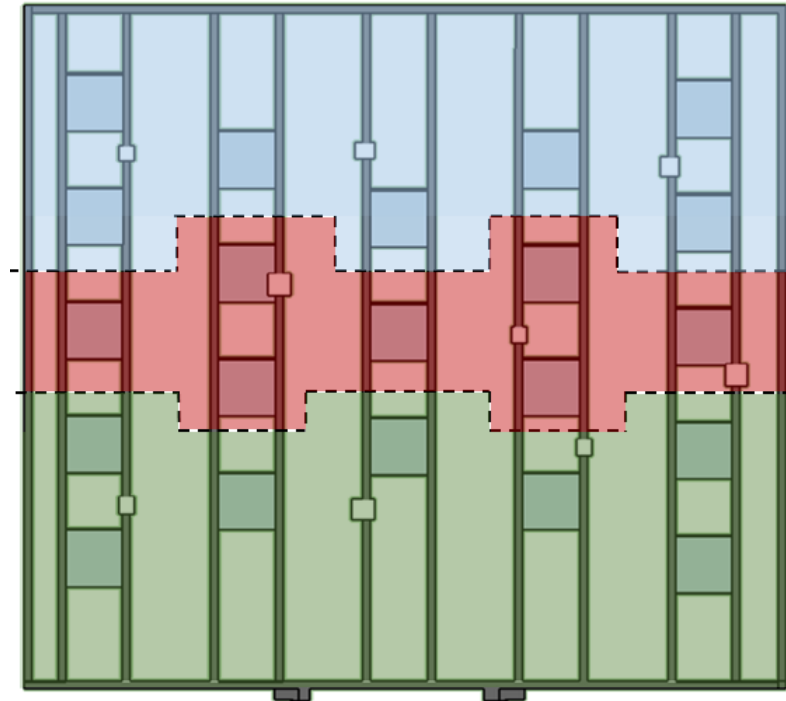


Figura 3.20 - Divisão da instalação elétrica.

Para efetuar o dimensionamento da corrente elétrica máxima para sete luminárias de 500 W correspondente a cada divisão da instalação utilizou-se a equação 3.1.

$$I = \frac{P}{U \times \cos \varphi} = \frac{7 \times 500}{230} \approx 15,22 \text{ A}$$

Obtida a corrente máxima em cada divisão da instalação consultou-se o catálogo de disjuntores da Schneider de forma a escolher os disjuntores adequados à instalação. Foram assim escolhidos três disjuntores de um polo com corrente nominal na ordem dos 20 A, capacidade de corte de 3 kA e curva de disparo C.



Disjuntores magnetotérmicos Resi9			
Nº de pólos	Tensão (V CA)	Largura em módulos de 18 mm	Calibre (A)
1P	230	1	6
			10
			16
			20
			25
			32
2P	400	2	40
			6
			10
			16
			20
			25
3P	400	3	32
			40
			6
			10
			16
			20
4P	400	4	25
			32
			40
			6
			10
			16

Características dos disjuntores Resi9
Poder de corte: 3000A.
 Proteção dos circuitos contra curto-circuitos e contra sobrecargas.
 Ligação: rígido: até 25mm²; flexível: até 16mm².
 Pente de forquilha (pela base do aparelho). Não permite auxiliares e acessórios elétricos.
 Conformidade com a norma: EN 60898-1.

Figura 3.21 - Disjuntores magnetotérmicos Resi9 da Schneider.

Cabos elétricos

Em relação aos cabos, utilizaram-se 3 tipos de cabos diferentes na instalação. Consultou-se as tabelas da secção dos cabos elétricos e escolheu-se para cada caso o mais apropriado para a instalação.



Figura 3.22 - Cabos elétricos

A tabela 3.9 apresenta as características dos cabos VV e VAV.

Tabela 3.9 - Características dos cabos VV e VAV.

Características Eléctricas dos Cabos: VV, VAV
Baixa Tensão – Condutor em Cobre - Revestimento em PVC

Secção Nominal mm ²	1 Condutor			2 Condutores (5)			3, 4 e 4+T Condutores (6)		
	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$ (4)	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação Ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação Ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$
0,5	-	12	-	-	10	-	-	9	-
0,75	-	15	-	-	13,5	-	-	12	-
1	-	18	-	-	14,5	34,800	-	13	30,100
1,5	34	23	20,200	30	19	23,300	25	17	20,200
2,5	45	31	12,400	40	26	14,300	35	24	12,400
4	60	42	7,770	50	35	8,940	45	31	7,740
6	75	52	5,220	65	44	6,000	60	42	5,190
10	105	74	3,140	90	61	3,600	80	57	3,120
16	135	96	2,020	120	83	2,300	110	79	1,990
25	180	127	1,310	155	110	1,480	135	96	1,280
35	225	158	0,963	185	132	1,080	165	114	0,946
50	260	184	0,734	220	158	0,822	190	132	0,718
70	345	242	0,533	280	198	0,589	245	171	0,520
95	410	290	0,406	335	237	0,443	295	206	0,393
120	485	343	0,340	380	268	0,368	340	237	0,326
150	550	387	0,299	435	308	0,313	390	272	0,279
185	630	444	0,250	490	343	0,265	445	312	0,238
240	740	523	0,210	570	400	0,218	515	360	0,198
300	855	602	0,183	640	448	0,188	590	413	0,172
400	1015	721	0,160	760	536	0,164	700	492	0,150
500	1170	822	0,140	-	-	-	-	-	-

- (1) - As intensidades de corrente são indicadas para um cabo monopolar sem influências térmicas exteriores. No caso de associações de cabos monopolares (ternos juntos por exemplo) multiplicar os valores indicados por 0,80.
 (2) - Temperatura do solo de 20°C.
 (3) - Temperatura ambiente de 30°C.
 (4) - As quedas de tensão são indicadas para canalização trifásica.
 (5) - As intensidades e quedas de tensão são indicadas para canalização monofásica.
 (6) - As intensidades e quedas de tensão são indicadas para uma canalização trifásica.

Na tabela 3.10 são apresentadas as características dos cabos XV e XAV.

Tabela 3.10 - Características dos cabos XV e XAV.

Baixa Tensão – Condutor em Cobre - Revestimento em XLPE

Secção Nominal mm ²	1 Condutor			2 Condutores (5)			3, 4 e 4+T Condutores (6)		
	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$ (4)	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação Ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação Ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U=V / AKm$ Cos $\phi = 0,8$
1	-	24	32,100	-	20	37,000	-	18	32,000
1,5	48	32	21,500	32	26	24,800	30	24	21,400
2,5	63	43	13,200	43	35	15,200	40	32	13,100
4	82	57	8,270	55	45	9,510	52	42	8,240
6	103	72	5,600	68	58	6,380	64	53	5,530
10	137	99	3,340	90	80	3,830	86	73	3,310
16	177	131	2,140	115	105	2,440	111	96	2,110
25	229	177	1,360	149	143	1,570	143	130	1,350
35	275	218	1,020	178	176	1,150	173	160	1,010
50	327	266	0,776	211	215	0,870	205	195	0,774
70	402	338	0,562	259	270	0,623	252	247	0,559
95	482	416	0,427	310	335	0,469	303	305	0,425
120	550	487	0,356	352	390	0,387	346	355	0,353
150	618	559	0,306	396	447	0,329	390	407	0,303
185	701	648	0,261	449	514	0,227	441	469	0,259
240	819	779	0,218	521	610	0,228	511	551	0,215
300	931	902	0,189	-	-	-	-	-	-
400	1073	1100	0,165	-	-	-	-	-	-
500	1223	1246	0,144	-	-	-	-	-	-

- (1) - As intensidades de corrente são indicadas para um cabo monopolar sem influências térmicas exteriores. No caso de associações de cabos monopolares (ternos juntos por exemplo) multiplicar os valores indicados por 0,80.
 (2) - Temperatura do solo de 20°C.
 (3) - Temperatura ambiente de 30°C.
 (4) - As quedas de tensão são indicadas para canalização trifásica.
 (5) - As intensidades e quedas de tensão são indicadas para canalização monofásica.
 (6) - As intensidades e quedas de tensão são indicadas para uma canalização trifásica.

O cabo utilizado para fazer a ligação das luminárias às caixas de derivação, como demonstrado na figura 3.23, foi o cabo H05VV-F 3G1,5. Este cabo é flexível, a bainha e o isolamento são em PVC e é constituído por três condutores com uma secção de $1,5 \text{ mm}^2$.

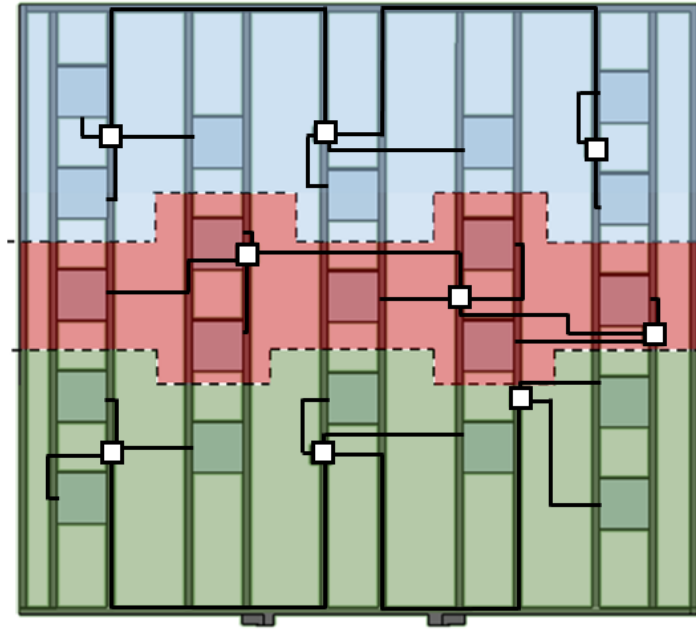


Figura 3.23 - Ligação das luminárias.

Quanto à ligação entre um conjunto de sete luminárias e o disjuntor, foi utilizado o cabo XV 1KV 3G2.5. Este cabo é rígido, apresenta um isolamento em polietileno reticulado, a bainha em PVC e três condutores com secção de $2,5 \text{ mm}^2$.

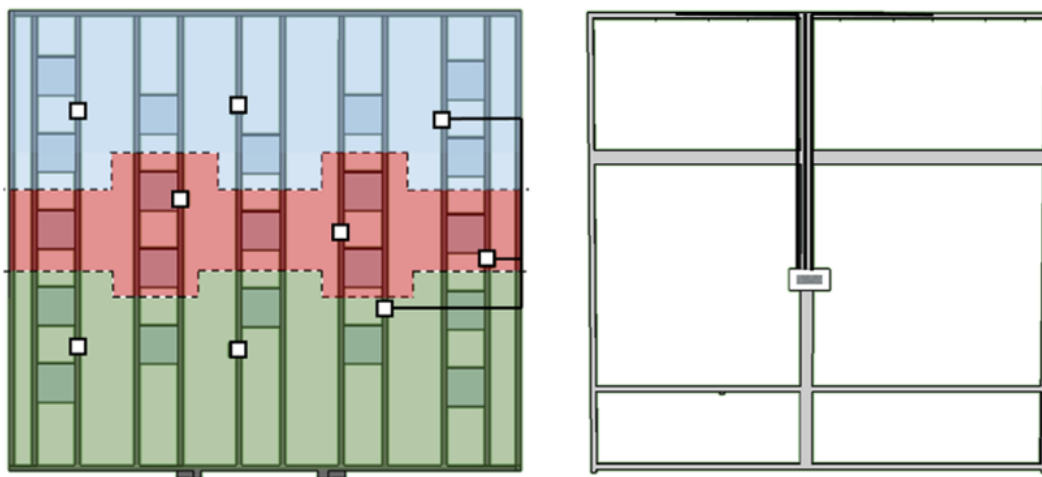


Figura 3.24 - Ligação das luminárias para o quadro.

Por fim, o cabo escolhido para fazer a ligação entre o interruptor diferencial e a ficha industrial de 32 A foi o H05VV-F 5G10, este cabo é flexível, apresenta um isolamento e uma bainha em PVC e cinco condutores com uma secção de 10 mm^2 .

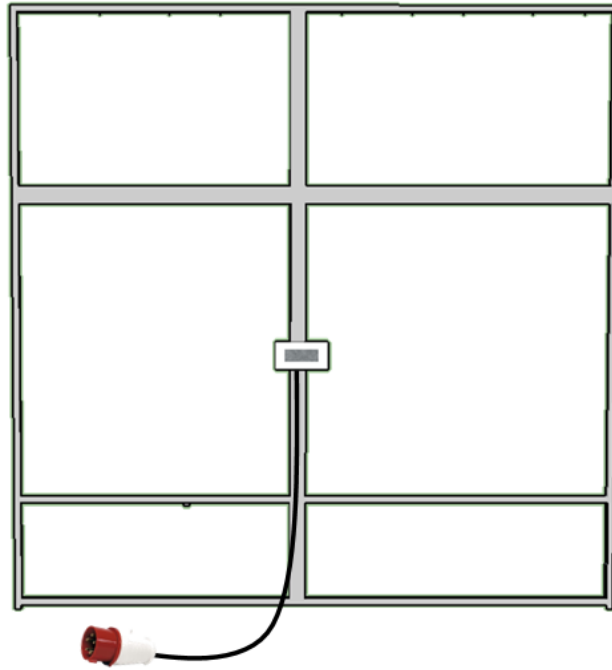


Figura 3.25 - Ligação entre o quadro e a ficha industrial.

Por ultimo, a ligação entre o simulador e a fonte de alimentação será feita através de uma ficha industrial trifásica com 3P+N+T de 32 A, como é ilustrado na figura 3.25.

3.1.8 Orçamento

A tabela 3.9 mostra o orçamento para a realização deste projeto. Como se pode ver pela tabela o valor é muito abaixo dos valores apresentados no capítulo 2. Assim sendo, o objetivo de desenvolver um simulador de baixo custo foi cumprido.

Tabela 3.11 - Orçamento do simulador solar.

Material	Quantidade	Preço Unit.	Total
Luminária Mader Home JM-500	21 Un.	5,490 €	115,29 €
Poste angular de metal 4x4 cm com 2 metros de altura	23 Un.	6,190 €	142,37 €
Poste angular de metal 4x4 cm com 2,5 metros de altura	10 Un.	7,190 €	71,90 €
Viga versátil de 1 metro	10 Un.	2,790 €	27,90 €
Roda com espigão capaz de suportar 40 kg	4 Un.	4,290 €	17,16 €
Interruptor diferencial 63 A	1 Un.	38,000 €	38,00 €
Disjuntor de 20 A	3 Un.	1,890 €	5,67 €
Cabo H05VV F 3G1,5	30 Mt.	0,516 €	15,48 €
Cabo XV 1KV 3G2.5	5 Mt.	1,398 €	6,99 €
Cabo H05VV-F 5G10	4 Mt.	3,000 €	12,00 €
Caixa de derivação	9 Un.	1,190 €	10,71 €
Ficha industrial 3P+N+T de 32 A	1 Un.	3,350 €	3,35 €
Quadro elétrico saliente de 12 módulos	1 Un.	8,990 €	8,99 €
Conjunto de 40 parafusos e 40 porcas M8	2 Un.	6,690 €	13,38 €
Conjunto de 10 parafusos e 10 porcas M6	1 Un.	2,190 €	2,19 €
Conjunto de 12 parafusos e 12 porcas M5	2 Un.	2,190 €	4,38 €
Conjunto de 20 anilhas extra larga M6	1 Un.	2,390 €	2,39 €
Régua de junção 12 polos 10mm	3 Un.	0,990 €	2,97 €
Braçadeira 3,6x142	100 Un.	0,021 €	2,11 €
		Valor total	503,23 €

3.2 Implementação

O simulador solar desenvolvido tem como sua função iluminar o módulo fotovoltaico, a sua implementação teve como base o projeto efetuado. As próximas figuras demonstram cada fase da implementação do simulador solar.

A figura 3.26 demonstra o primeiro passo da implementação, onde foi construída uma das partes laterais do simulador solar.



Figura 3.26 - Construção de uma das partes laterais do simulador solar

A figura 3.27, corresponde à segunda fase da construção da estrutura mecânica, onde é implementada a outra parte lateral do simulador e a base da estrutura, em que se incluem as rodas.



Figura 3.27 - Desenvolvimento da estrutura mecânica

A figura 3.28 corresponde à fase da construção da estrutura mecânica, em que não é incluída a estrutura de suporte das luminárias.



Figura 3.28 - Estrutura mecânica sem fonte de iluminação.

Seguiu-se a montagem da estrutura que suporta as luminárias e a fixação das mesmas.

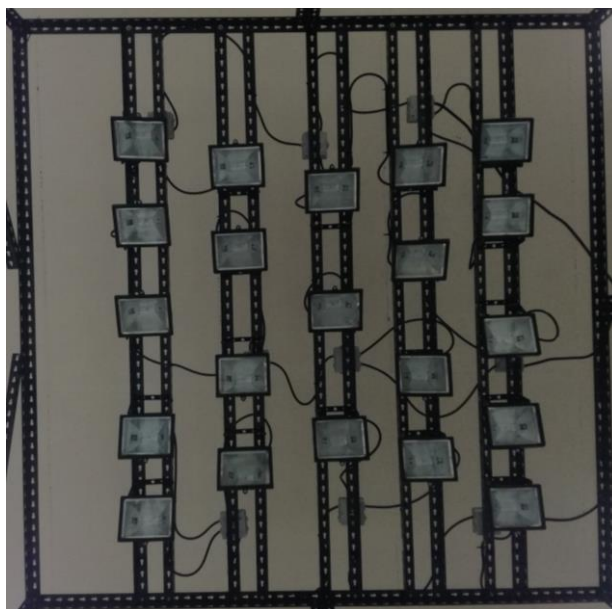


Figura 3.29 - Luminárias e estrutura de suporte das mesmas.

A figura 3.30 retrata a ligação das luminárias, dividida em três partes, como é mostrada na figura 3.20.



Figura 3.30 - Ligação das luminárias às caixas de derivação.

Por último, implementou-se o quadro elétrico com três disjuntores (em que cada disjuntor é responsável por 7 luminária) e o interruptor diferencial. Foi ainda implementada a ficha industrial.



Figura 3.31 - Montagem do quadro e ficha industrial.

Na figura 3.32 apresenta-se o resultado final da construção do simulador solar. Pode-se consultar mais imagens deste projeto em anexo.



Figura 3.32 - Estrutura final implementada.

4 Procedimentos e resultados experimentais

4.1 Caracterização da superfície de irradiância a diferentes cotas

Para retirar a característica da irradiância na superfície de ensaio foi efetuado o seguinte procedimento experimental com base na montagem da figura 4.1.

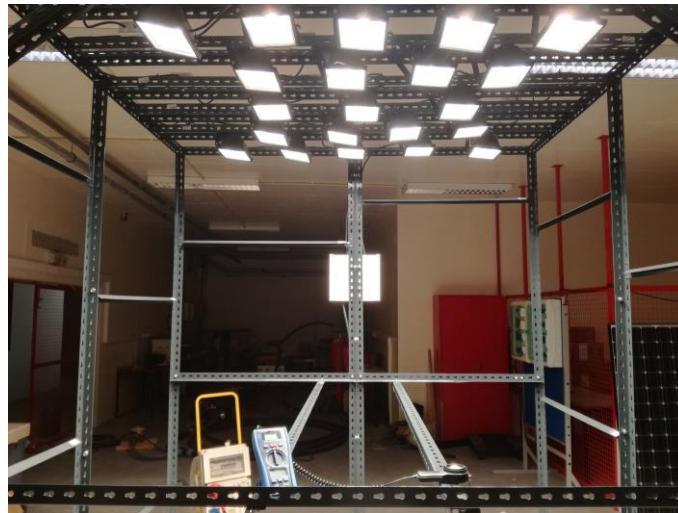


Figura 4.1 - Montagem experimental.

Procedimento experimental:

- Colocar a área de ensaio à distancia de 120 cm da fonte de iluminação;
- Ligar as 21 luminárias;
- Aguardar que a irradiância estabilize;
- Retirar o valor da irradiância de 20 em 20 centímetros, segundo o eixo y apresentado na figura 4.2, utilizando um medidor de radiação solar da Lafayette⁸.

⁸ Lafayette DMB-SOLAR - é um medidor de energia solar e multímetro digital. As características deste aparelho estão em anexo neste trabalho.

- Seguidamente desloca-se o poste angular 40 cm e repete-se o procedimento anteriormente descrito. Este procedimento é repetido até ao limite da estrutura de suporte.

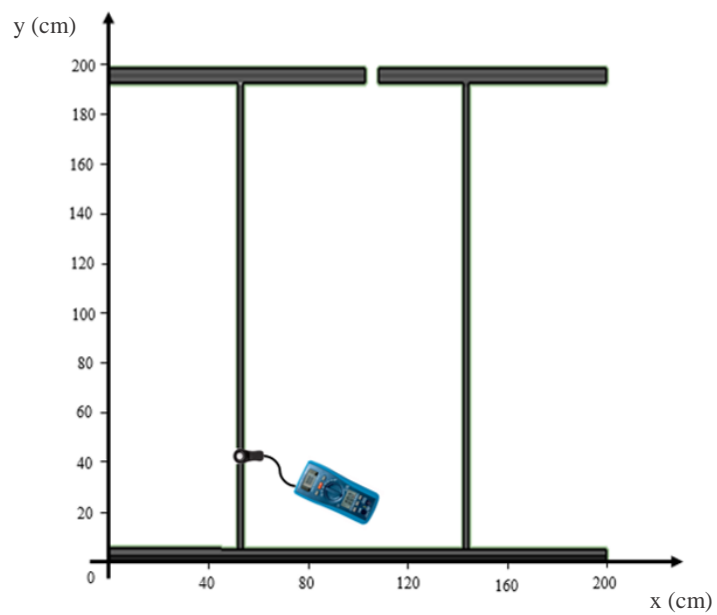


Figura 4.2 – Procedimento de medida.

Na tabela 4.1 encontram-se os valores de irradiância resultantes do procedimento experimental, para cada ponto da área de ensaio.

Tabela 4.1 – Resultados do procedimento experimental à distância de 120 cm.

		y (cm)											Irradiância (W/m ²)
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
x (cm)	0	227	245	302	360	406	422	414	396	368	297	280	
	40	329	445	557	673	728	746	739	701	622	507	376	
	80	418	548	725	864	965	1010	1018	990	862	702	555	
	120	385	515	683	806	900	968	972	924	817	675	534	
	160	269	359	466	537	581	597	581	545	490	388	292	
	200	164	200	248	281	326	390	368	350	300	274	196	

Após a recolha dos dados do procedimento experimental, realizou-se o gráfico de superfície apresentado na figura 4.3.

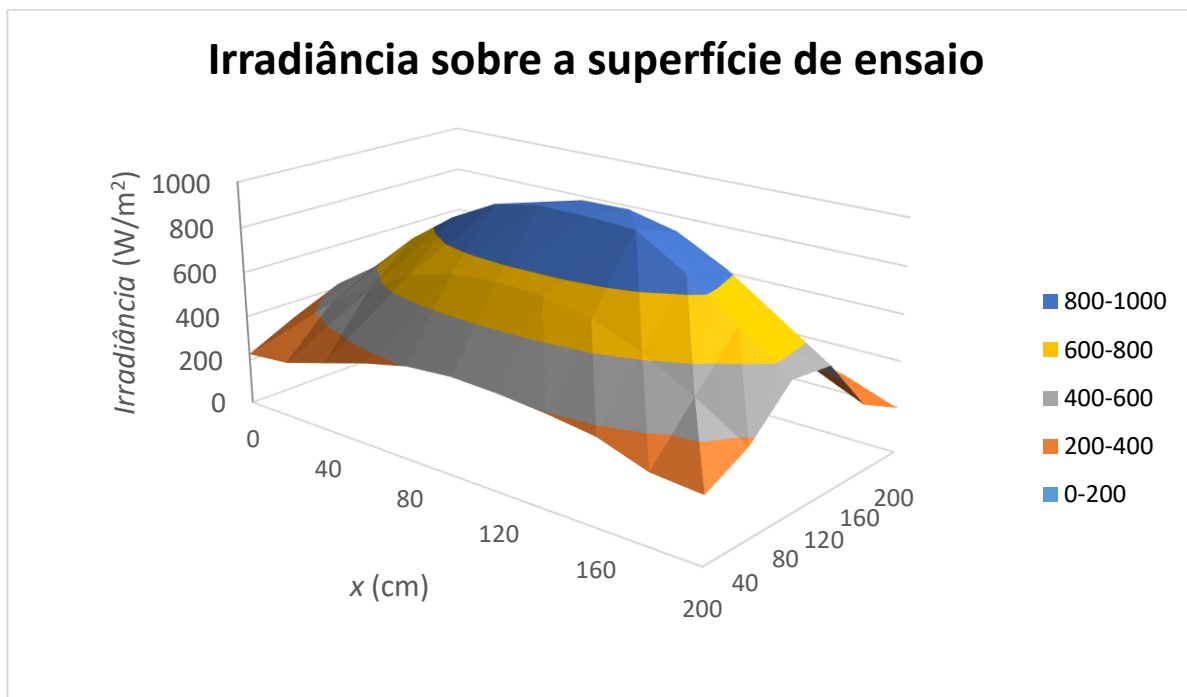


Figura 4.3 - Irradiância sobre a superfície de ensaio à distância de 120 cm.

De forma averiguar a variação da irradiância com a distância entre a superfície de ensaio e a iluminação, realizou-se o procedimento experimental anteriormente descrito alterando somente a

distância entre a superfície de ensaio e a iluminação para 150 cm. Na tabela 4.2 encontram-se os dados obtidos desta experiência.

Tabela 4.2 - Resultados do procedimento experimental à distância de 150 cm.

		y (cm)											Irradiância (W/m ²)
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
x (cm)	0	245	294	353	402	438	474	466	438	388	298	270	
	40	322	398	480	547	600	604	594	568	508	420	357	
	80	374	476	590	673	734	756	749	707	600	521	436	
	120	364	435	541	612	659	693	683	657	575	477	404	
	160	280	333	398	449	476	481	478	452	402	357	302	
	200	184	206	255	289	308	351	314	298	270	243	194	

Após a obtenção dos resultados obtidos experimentalmente efetuou-se o gráfico de superfície apresentado na figura 4.2.

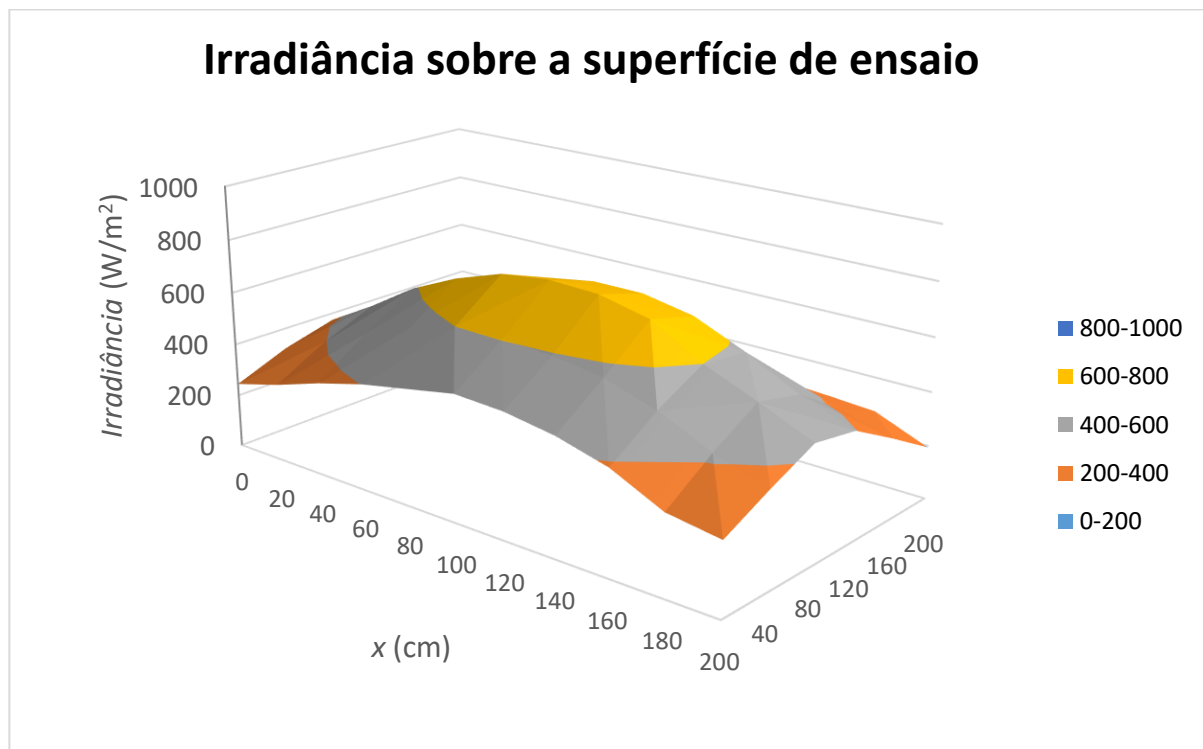


Figura 4.4 - Resultados obtidos da irradiância ao longo da superfície de ensaio à distância de 150 cm.

Em suma, pelas figuras 4.3 e 4.4 observa-se que o simulador solar desenvolvido não apresenta valores de irradiância uniformes ao longo da superfície de ensaio, tanto para a distância de 120 cm e 150 cm.

4.2 Exemplos de ensaios de um módulo fotovoltaico

Neste subcapítulo foram efetuados dois ensaios diferentes para retirar a característica da curva I-V do módulo fotovoltaico⁹ convencional. No primeiro ensaio o módulo fotovoltaico é colocado a duas distâncias diferentes (120 cm e 150 cm) da iluminação. O segundo é referente ao ensaio do módulo com sombreamento.

4.2.1 Ensaio sem sombreamento.

Para efetuar o ensaio do módulo sem sombreamento, colocou-se o módulo a duas distâncias diferentes da iluminação e retirou-se a característica da curva I-V para cada distância. A montagem desta experiência está representada na figura 4.5. O procedimento experimental será descrito seguidamente.



Figura 4.5 - Montagem experimental.

⁹ O módulo fotovoltaico utilizado no procedimento experimental apresenta a dimensão de 1580 mm x 798 mm x 50 mm. Em anexo encontram-se as características referentes ao módulo fotovoltaico utilizado.

Procedimento experimental:

- Colocar o a estrutura de suporte do módulo a 120 cm de distância da iluminação;
- Posicionar o módulo fotovoltaico na área de ensaio;
- Ligar as luminárias;
- Aguardar que a irradiância estabilize e retirar a temperatura do módulo com um termómetro digital de infravermelhos¹⁰;
- Ligar, segundo o esquema da figura 4.6, o amperímetro, o voltímetro e 3 resistências variáveis¹¹;
- Retirar a corrente em curto circuito (I_{CC}) e a tensão em vazio (U_0);
- Variar as resistências de forma a medir o valor da corrente e correspondente, valor de tensão. Este processo repete-se até ao valor da tensão em vazio.

¹⁰ O termómetro digital de infravermelhos utilizado é da marca Xindar, as suas características principais encontram-se em anexo.

¹¹ As resistências variáveis podem ir dos 0 aos 11,2 Ω e uma corrente máxima de 5 A.

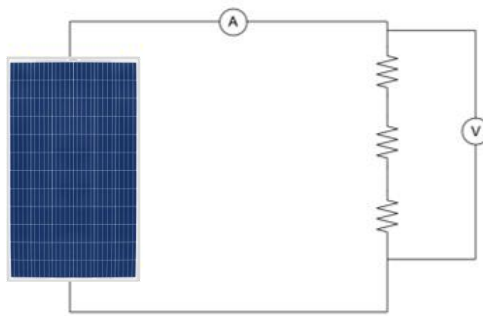


Figura 4.6 - Esquema de montagem.

Recolheram-se e registaram-se os dados da corrente e da tensão na tabela 4.3. Em relação à temperatura medida foi de 60 °C.

Tabela 4.3- Dados recolhidos da corrente e tensão.

Tensão (V)	Corrente (A)
0	4,07
5,24	4,07
9,05	4,06
12,93	4,18
17,36	3,83
24,5	3,82
27,8	3,78
36,1	3,77
40,09	3,7
41,4	3,53
42	3,34
42,6	3,17
43	2,93
43,4	2,71
43,7	2,46
46,4	0

Com os dados da corrente e tensão apresentados na tabela 4.3 traçou-se a curva corrente-tensão, ilustrada na figura 4.7.

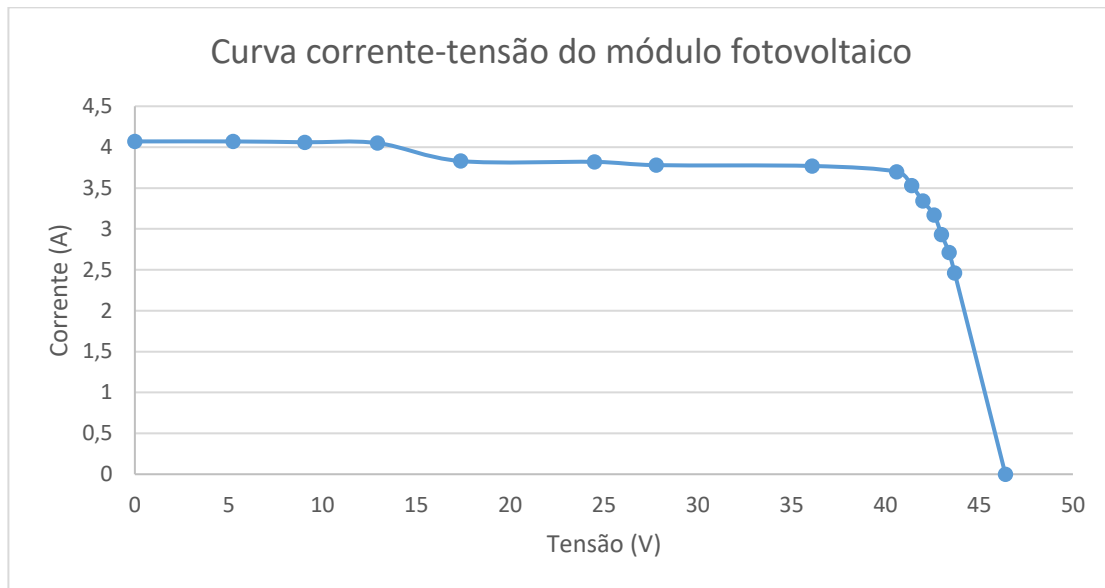


Figura 4.7 - Curva I-V obtida experimentalmente.

Através dos dados obtidos na tabela 4.3 e do gráfico da figura 4.7 retirou-se os valores da potência máxima (P_{MPP}), tensão à potência máxima (U_{MPP}) e corrente à potência máxima (I_{MPP}), apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Dados elétricos do módulo obtidos experimentalmente.

Potência máxima	Tensão à potência máxima	Corrente à potência máxima
150 W	40,6 V	3,7 A

A curva potência-tensão demonstrada na figura 4.8 resulta do produto¹² dos valores da corrente e tensão apresentados na tabela 4.3.

¹² Para retirar o valor da potência para cada ponto efetuou-se o seguinte produto: $P = UI$.

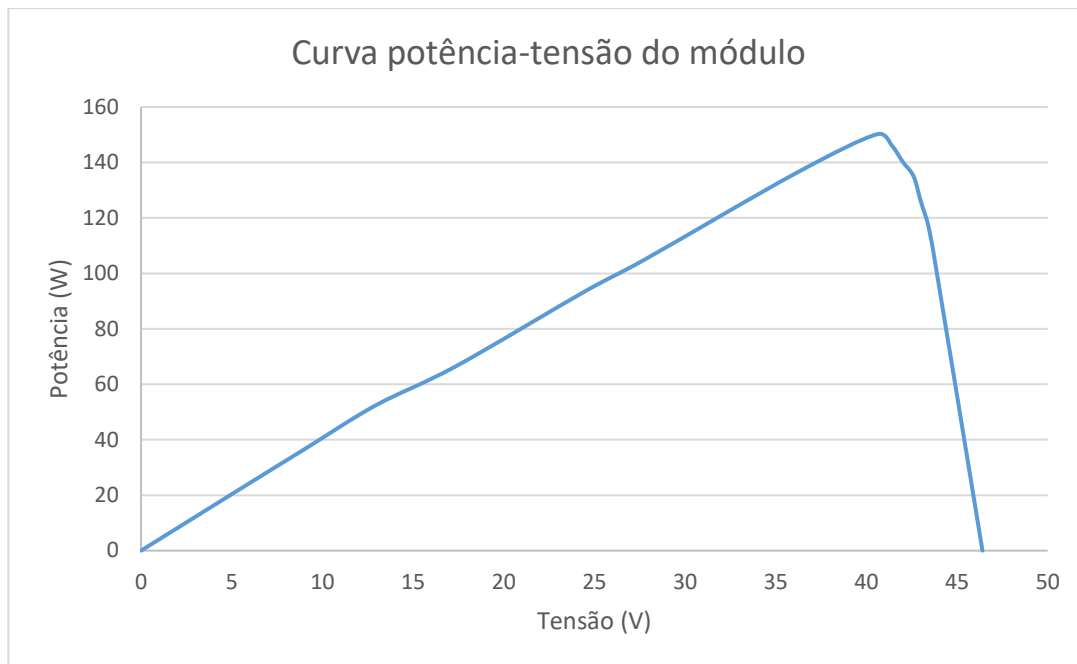


Figura 4.8 – Curva potência-tensão do módulo fotovoltaico.

Realizou-se novamente o procedimento experimental, anteriormente descrito, alterando somente a distância entre o módulo fotovoltaico e a fonte de iluminação para 150 cm. Os dados recolhidos foram registados na tabela 4.5. Neste caso, o módulo fotovoltaico atingiu uma temperatura de 52°C.

Tabela 4.5 - Dados da corrente e tensão retirados da experiência.

Tensão (V)	Corrente (A)
0	3,12
5,24	3,12
9,05	3,11
12,93	3,08
18,04	3,07
22,7	3,06
25,4	3,04
26	2,94
28,8	2,92
31,2	2,91
37,4	2,89
39,8	2,84
40,2	2,77
40,6	2,68

40,9	2,6
41,4	2,47
41,5	2,37
41,8	2,26
46,1	0

Após a recolha dos dados da corrente e da tensão foi traçada a curva de corrente-tensão apresentada nas figuras 4.9.

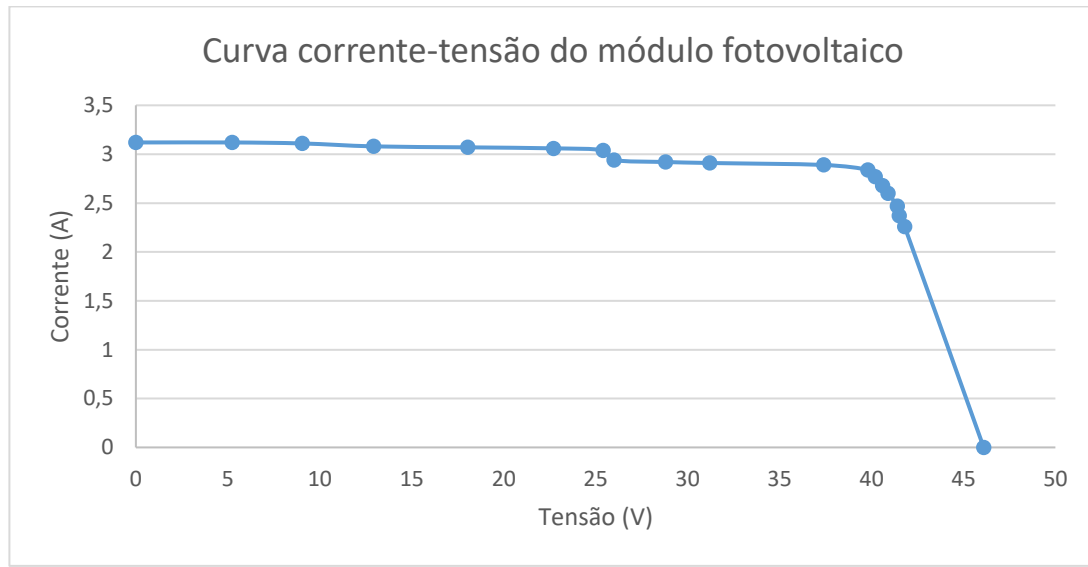


Figura 4.9 - Curva corrente-tensão do módulo à distância de 150 cm.

Observando o gráfico da figura 4.9 retirou-se a potência máxima (P_{MPP}), tensão à potência máxima (U_{MPP}) e a corrente à potência máxima (I_{MPP}).

Tabela 4.6 - Dados elétricos obtidos experimentalmente.

Potência máxima	Tensão à potência máxima	Corrente à potência máxima
113 W	39,8 V	2,8 A

A partir do produto dos valores de corrente e tensão da tabela 4.5 traçou-se a curva potência-tensão, figura 4.10.

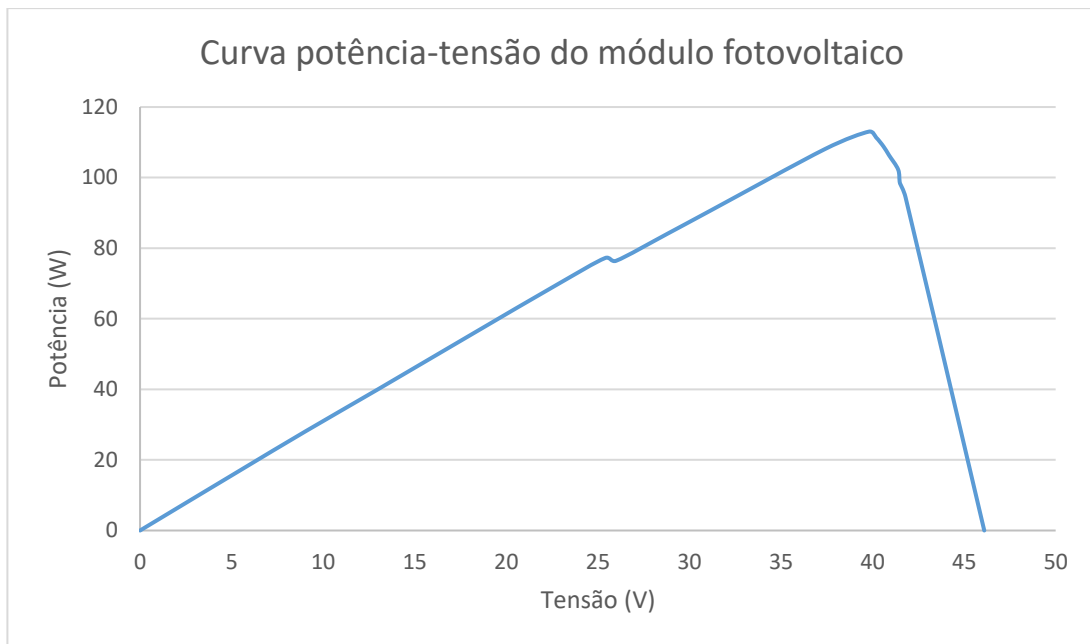


Figura 4.10 – Curva potência-tensão resultante do produto entre corrente e tensão.

4.2.2 Ensaio com sombreamento

Neste ensaio simulou-se um sombreamento ao colocar-se três folhas cinzentas sobre o módulo fotovoltaico, figura 4.11, com o intuito de averiguar a característica da curva I-V.



Sombreamento simulado por folhas de papel

Figura 4.11 - Montagem experimental.

Procedimento experimental:

- Colocar a estrutura de suporte do módulo a 150 cm de distância da iluminação;
- Posicionar o módulo fotovoltaico na área de ensaio;
- Ligar as luminárias;
- Aguardar que a irradiância estabilize e retirar a temperatura do módulo;
- Instalar o amperímetro, voltímetro e resistência variável como é demonstrado na figura 4.12.
- Retira-se a corrente em curto circuito (I_{CC}) e a tensão em vazio (U_0).
- Variar as resistências de forma a retirar o valor da corrente e correspondente, valor de tensão. Este processo repete-se até ao valor de tensão em vazio.

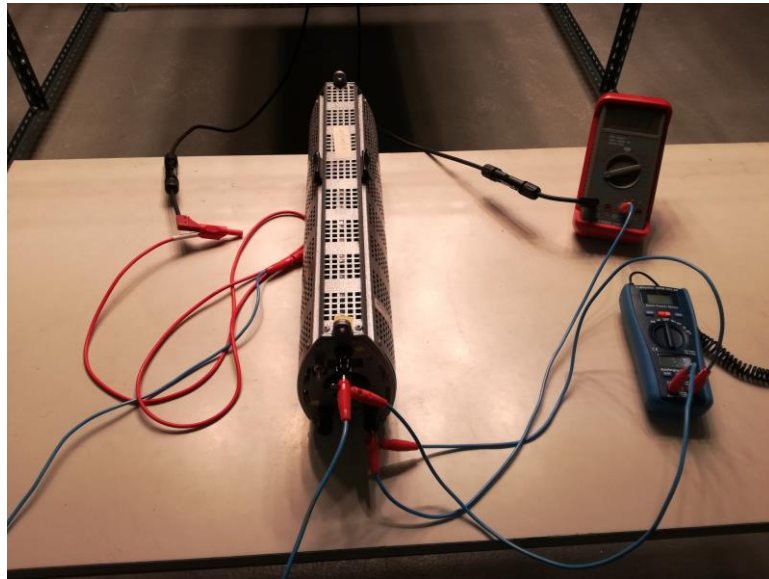


Figura 4.12 - Esquema de montagem.

Os dados referentes a esta experiência foram registados na tabela 4.7. A temperatura do módulo durante o ensaio foi de 52 °C.

Tabela 4.7- Dados da corrente e tensão do ensaio com sombreamento.

Tensão (V)	Corrente (A)
0	0,28
2,15	0,28
4,31	0,28
9,38	0,28
12,17	0,28
14,57	0,28
17,28	0,26
24,8	0,24
28,9	0,24
29,9	0,24
35,6	0,23
39,8	0,23
41,5	0,22
45,7	0

Com os dados da corrente e tensão obtidos traçou-se as curvas de corrente-tensão e potência-tensão, figuras 4.13 e 4.14.

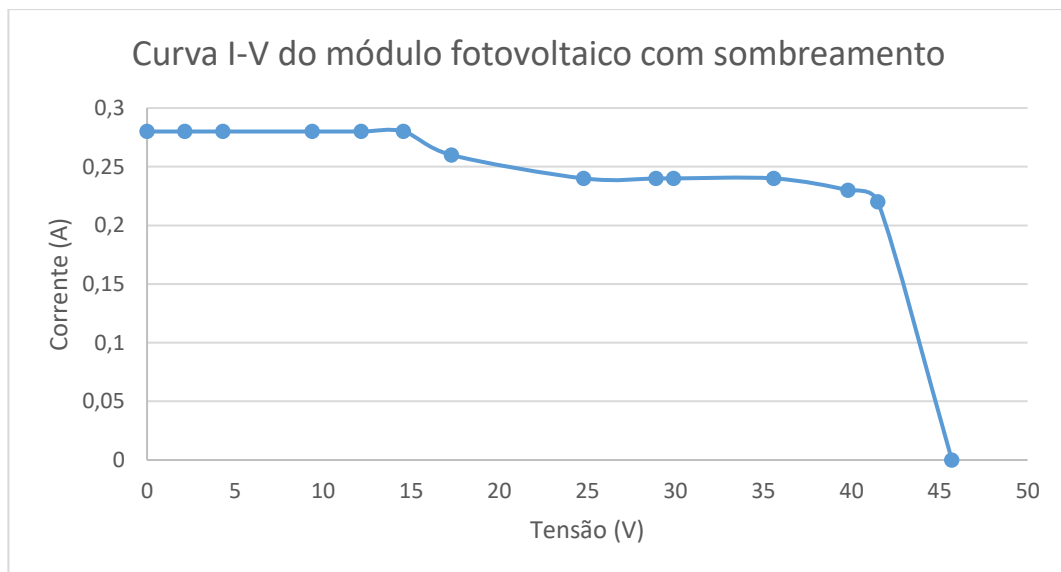


Figura 4.13 - Curva I-V do módulo sombreado.

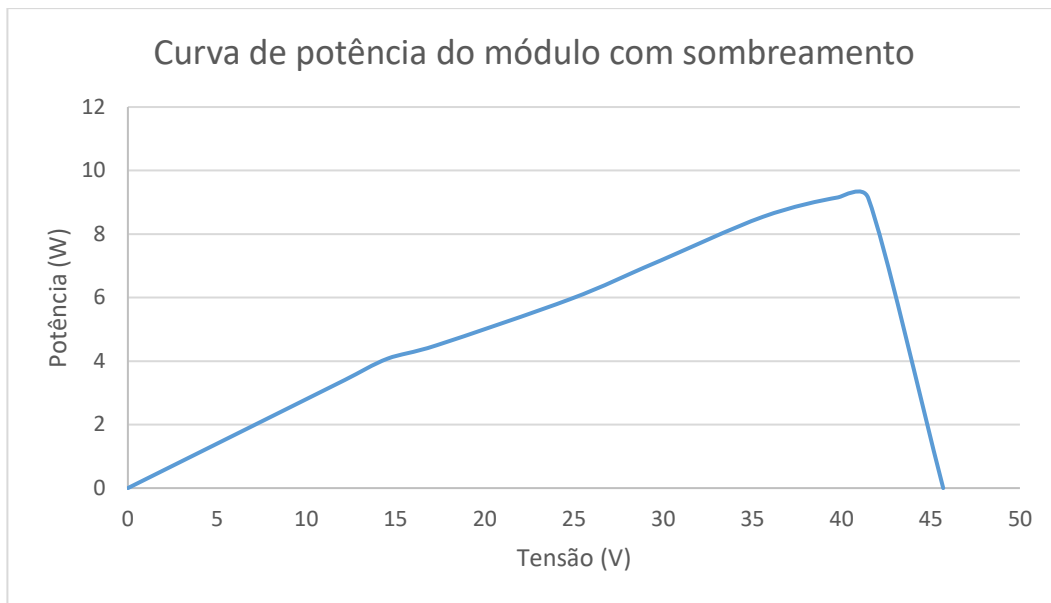


Figura 4.14 - Curva potência-tensão do módulo fotovoltaico sombreado.

A partir das curvas de corrente-tensão e potência-tensão, retirou-se a potência máxima (P_{MPP}), tensão à potência máxima (U_{MPP}) e a corrente à potência máxima (I_{MPP}), tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dados elétricos do módulo fotovoltaico com sombreamento.

Potência máxima	Tensão à potência máxima	Corrente à potência máxima
9,514 W	39,8 V	0,23 A

Observando os valores da tabela 4.8 verifica-se uma queda acentuada da potência máxima em relação aos valores da tabela 4.6.

4.3 Imagem termográfica do módulo fotovoltaico

De forma a obter imagens térmicas do módulo, utilizou-se uma câmara termográfica. O procedimento experimental será seguidamente descrito.

Procedimento experimental

- Colocar o módulo a uma distância de 150 cm da iluminação;
- Ligar as luminárias durante um período de tempo;
- Desligar as luminárias;

- Retirar fotografias com a câmara termográfica.

As imagens retiradas pela câmara são de fraca qualidade, contudo, encontram-se em baixo duas imagens deste procedimento experimental.

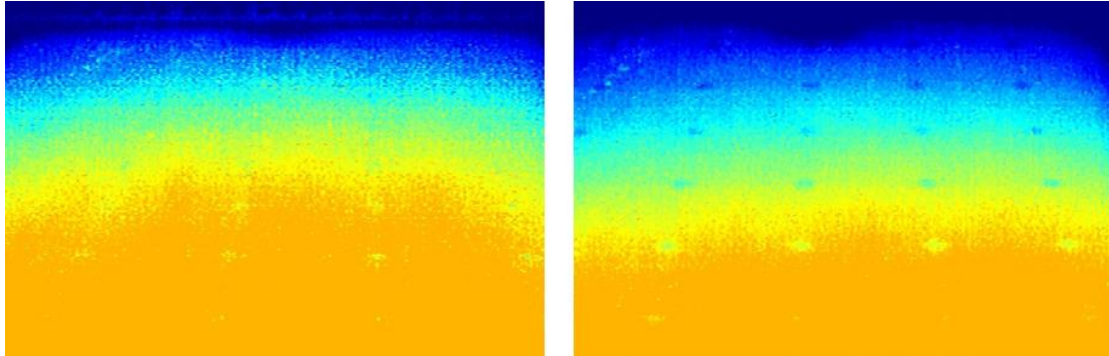


Figura 4.15 - Imagens termográficas do módulo fotovoltaico.

4.4 *Análise e comparação de resultados*

Uniformidade da irradiância

A uniformidade de um simulador solar é especificada na norma CEI 60904-9 da Comissão Eletrotécnica Internacional.

Com o objetivo de analisar a uniformidade do simulador solar desenvolvido utilizou-se a equação 2.2 do subcapítulo 2.2.2. Analisou-se a uniformidade para as duas distâncias ensaiadas, 120 cm e 150 cm.

O valor máximo e mínimo da irradiância para a distância de 120 cm entre a superfície de ensaio e a iluminação é de 1010 W/m² e 228 W/m², respetivamente.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{1010 - 228}{1010 + 228} \right] \times 100 \cong 63 \%$$

Em relação à distância de 150 cm entre a superfície de ensaio e a iluminação, o valor máximo e mínimo de irradiância é 813 W/m² e 184 W/m², respetivamente.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{813 - 184}{813 + 184} \right] \times 100 \cong 63 \%$$

Analisando os resultados obtidos, a percentagem da não-uniformidade nos dois ensaios está longe dos 10 % da classificação C referida na norma CEI 60904-9. Deverá ser tido em conta que os cálculos da uniformidade foram efetuados numa superfície de ensaio com dimensão de 2 m por 2 m. Como tal, optou-se por verificar a uniformidade para dois módulos diferentes, seguidamente apresentados:

- Sanyo HIP-210NKHE5 de dimensões: 1580 mm x 798 mm x 35 mm;

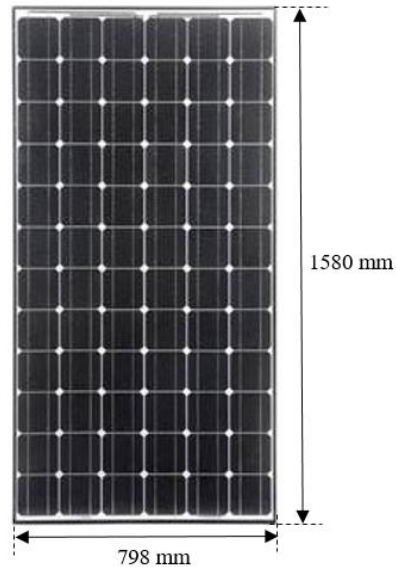


Figura 4.16 - Sanyo HIP-210NKHE5. Adaptado de [42].

- Luxor LX-50 P de dimensões: 665 mm x 538 mm x 35 mm.

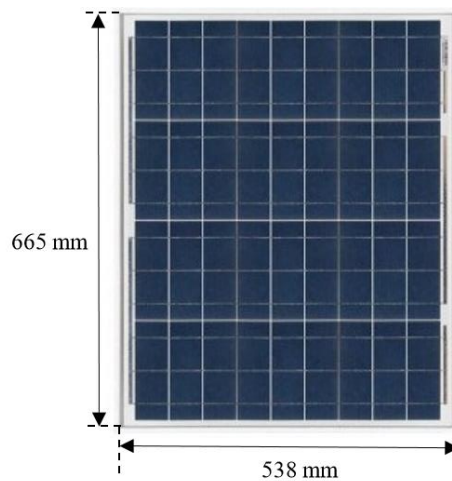


Figura 4.17 - Módulo fotovoltaico da Luxor. Adaptado de [43].

Começou-se por analisar a percentagem de uniformidade da irradiância para o módulo fotovoltaico da Luxor. Para a distância de 150 cm entre a superfície de ensaio e a iluminação, escolheu-se o intervalo de irradiância mais uniforme, de acordo com a tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Irradiância sobre um módulo da Luxor.

		Largura (cm)											Irradiância (W/m ²)
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
Comprimento (cm)	0	223	282	327	363	404	462	422	409	374	340	294	
	40	318	413	502	565	633	659	661	642	588	512	422	
	80	400	489	600	702	776	809	813	792	722	608	504	
	120	364	435	541	612	659	693	683	657	575	477	404	
	160	280	333	398	449	476	481	478	452	402	357	302	
	200	184	206	255	289	308	351	314	298	270	243	194	

Embora as dimensões colocadas na tabela 4. não serem as exatas do módulo, são uma aproximação. A não-uniformidade para este caso é calculada pela equação 4.4.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{813 - 657}{813 + 657} \right] \times 100 \cong 10,61\% \quad 4.4$$

A percentagem de não-uniformidade obtida na equação 4.4 é bastante próxima da descrita pela norma CEI 60904-9, ou seja, para ensaiar módulo fotovoltaicos da Luxor o simulador solar desenvolvido contém uma classificação C no parâmetro de não-uniformidade da irradiância. Referir ainda que neste caso a irradiância média é de 735,25 W/m².

Relativamente ao módulo fotovoltaico ensaiado neste trabalho, Sanyo HIP-210NHEK5, repetiu-se o procedimento anterior e escolheu-se a posição mais uniforme da tabela 4.10. Neste caso, utilizou-se a mesma distância de 150 cm entre a área de ensaio e a iluminação.

Tabela 4.10 - Irradiância sobre um módulo da Sanyo.

		Largura (cm)											
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180		200
Comprimento (cm)	0	223	282	327	363	404	462	422	409	374	340	294	Irradiância (W/m ²)
	40	318	413	502	565	633	659	661	642	588	512	422	
	80	400	489	600	702	776	809	813	792	722	608	504	
	120	364	435	541	612	659	693	683	657	575	477	404	
	160	280	333	398	449	476	481	478	452	402	357	302	
	200	184	206	255	289	308	351	314	298	270	243	194	

Nesta situação a irradiância apresenta um valor médio de 622,89 W/m². Sendo o valor máximo de 813 W/m² e o valor mínimo de 413 W/m². Através destes valores é calculada a percentagem de não-uniformidade da irradiância.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{813 - 413}{813 + 413} \right] \times 100 \cong 33\%$$

A não-uniformidade obtida apesar de ser menor que apresentada no cálculo anterior, continua distante dos 10% referidos na norma CEI 60904-9.

Depois de se verificar a uniformidade para a distância de 150 cm entre a superfície de ensaio e a iluminação, seguiu-se a mesma análise, mas para a distância de 120 cm. Começou-se por analisar o módulo fotovoltaico da Luxor, tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Irradiância sobre um módulo fotovoltaico LX-50 P.

		Largura (cm)											
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180		200
Comprimento (cm)	0	227	245	302	360	406	422	414	396	368	297	280	Irradiância (W/m ²)
	40	329	445	557	673	728	746	739	701	622	507	376	
	80	418	548	725	864	965	1010	1018	990	862	702	555	
	120	385	515	683	806	900	968	972	924	817	675	534	
	160	345	388	481	550	586	616	612	599	539	451	382	
	200	228	241	293	341	366	422	395	375	353	280	239	

A irradiância média para o caso apresentado na tabela 4.14 é de 968,375 W/m², sendo a irradiância máxima de 1010 W/m² e mínima de 900 W/m². A partir do valor máximo e mínimo calculou-se a percentagem de não-uniformidade da irradiância.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{1010 - 900}{1010 + 900} \right] \times 100 \cong 5,8 \%$$

Neste caso específico, o simulador solar desenvolvido enquadra-se na classificação B no parâmetro da não-uniformidade especificado na norma CEI 60904-9. Os resultados obtidos neste estudo estão dentro dos objetivos deste trabalho, pois verificou-se que tem uma fonte de iluminação uniforme e uma irradiância média aproximada dos 1000 W/m².

Efetuuou-se o mesmo estudo apresentado na tabela 4.12, alterando somente o tamanho do módulo fotovoltaico, Sanyo HIP-210NKHE5

Tabela 4.12- Irradiância sobre um módulo fotovoltaico HIP-210NKHE5.

		Largura (cm)											Irradiância (W/m)
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
Comprimento (cm)	0	227	245	302	360	406	422	414	396	368	297	280	
	40	329	445	557	673	728	746	739	701	622	507	376	
	80	418	548	725	864	965	1010	1018	990	862	702	555	
	120	385	515	683	806	900	968	972	924	817	675	534	
	160	345	388	481	550	586	616	612	599	539	451	382	
	200	228	241	293	341	366	422	395	375	353	280	239	

A irradiância máxima e mínima retirada da tabela 4.15 é de 1010 W/m² e 445 W/m², respectivamente. O valor médio de irradiância é de 725,35 W/m². A partir do valor máximo e mínimo calculou-se a percentagem de não-uniformidade da irradiância, equação 4.6.

$$Non - uniformity (\%) = \left[\frac{1010 - 445}{1010 + 445} \right] \times 100 \cong 38,83 \% \quad 4.6$$

A percentagem de uniformidade da irradiância para o módulo fotovoltaico HIP-210NKHE5 é superior aos valores apresentados (2%, 5% e 10%) na norma CEI 60904-9.

Em suma, o simulador solar desenvolvido apresenta uma percentagem de não-uniformidade de irradiância boa para o módulo fotovoltaico da Luxor. No entanto, os valores percentuais da não-uniformidade de irradiância para o módulo fotovoltaico da Sanyo estão acima dos indicados pela norma CEI 60904-9.

Efeito da irradiância no módulo fotovoltaico

Para estudar o efeito da irradiância no módulo fotovoltaico, comparou-se as curvas I-V ilustradas nas figuras 4.7 e 4.9.

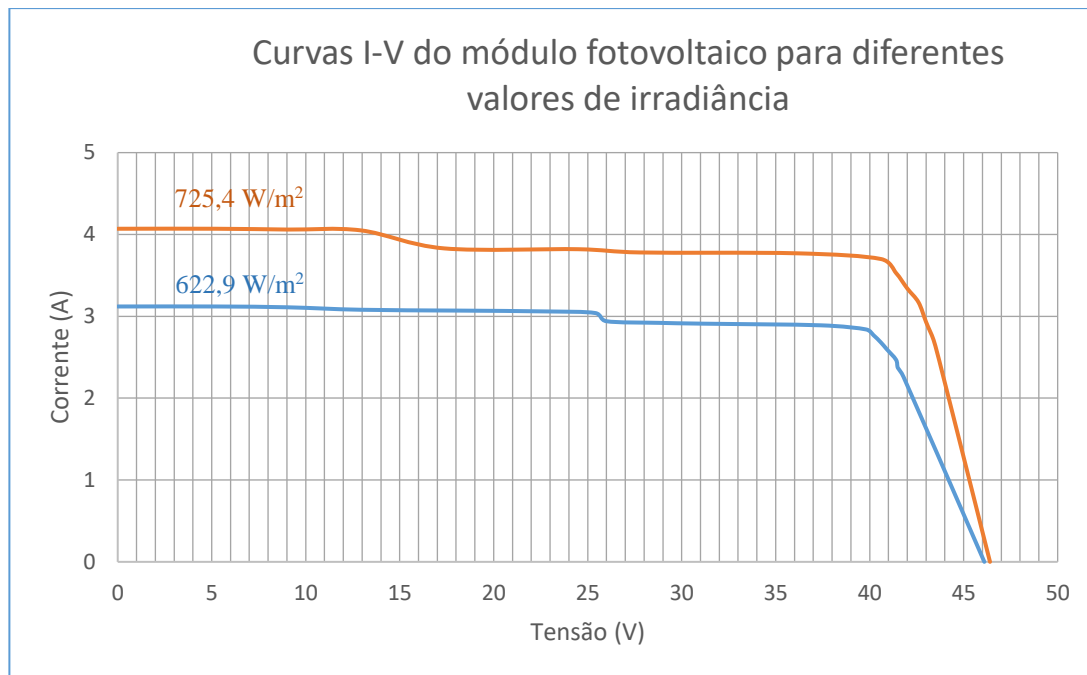


Figura 4.18 - Curvas corrente-tensão do módulo fotovoltaico Sanyo HIP-210NKHE5 obtida do procedimento experimental.

Observando a figura 4.18 verifica-se que a corrente varia com a irradiância. Em relação à tensão em circuito aberto, U_{CA} , varia pouco com a irradiância. Comparando as curvas obtidas do módulo verifica-se que existe uma quebra na corrente nas duas curvas I-V. Este facto provém de as células fotovoltaicas apresentarem problemas de sujidade, por exemplo, e não produzirem corretamente. Uma forma de verificar o problema do módulo fotovoltaico será recorrer a uma câmara termográfica e observar se existe algum ponto de maior calor sobre o módulo.

Seguidamente são apresentadas as curvas I-V fornecidas pelo fabricante do módulo fotovoltaico, figura 4.19.

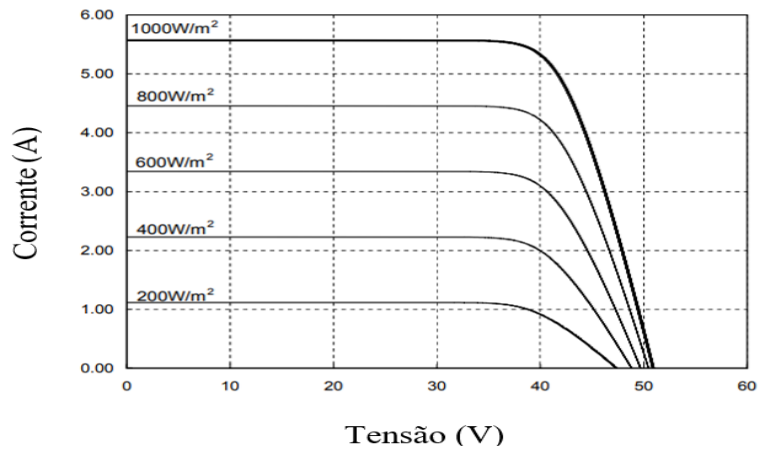


Figura 4.19 - Curvas I-V do fabricante módulo fotovoltaico [44].

Comparando as curvas I-V obtidas com as do fornecedor, verifica-se que existe uma diferença na corrente e na tensão. Este facto deriva de as condições de ensaio não serem as mesmas que as condições standard da norma CEI 60904-9 (irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura do módulo de 25°C e AM1,5).

Efeito do sombreamento no módulo fotovoltaico

Após estudar a curva I-V para diferentes valores de irradiância média, efetuou-se o estudo da curva potência-tensão do módulo com sombreamento. Para este estudo comparou-se as curvas potência-tensão obtidas nas figuras 4.10 e 4.14.

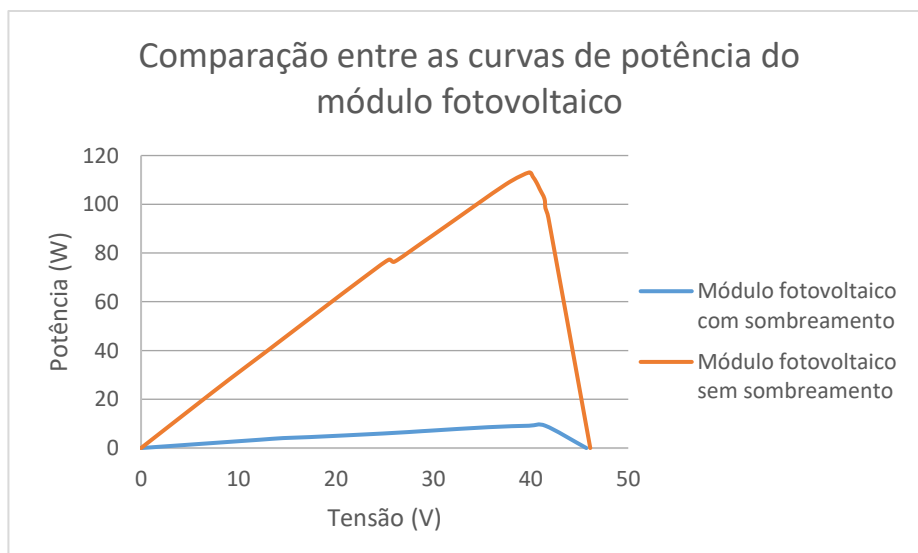


Figura 4.20 - Comparação entre curvas potência-tensão.

A existência de sombreamento no módulo fotovoltaico faz com que a célula fotovoltaica passe a estar inversamente polarizada, comportando-se como uma resistência elétrica. Devido a este facto, a temperatura do módulo aumenta, de tal forma, que pode danificar o módulo. Nestas situações, os díodos de bypass tornam-se importantes pois desviam a corrente, evitando que esta passe nas células sombreadas, mantendo o módulo fotovoltaico a produzir, porém a energia produzida diminui como se pode observar pela figura 4.20.

Imagens termográficas

As imagens termográficas são importantes na manutenção do módulo fotovoltaico. A partir destas imagens pode-se verificar se o módulo se encontra limpo. Caso existam pontos de temperatura mais elevada no módulo é necessário fazer uma manutenção, visto que nestes pontos não existe produção de energia e ocorre a dissipação de energia elétrica. As imagens obtidas experimentalmente, figura 4.15, não apresentam uma boa resolução, em comparação com a figura 4.21, como tal não se pode verificar o estado do módulo fotovoltaico ensaiado.

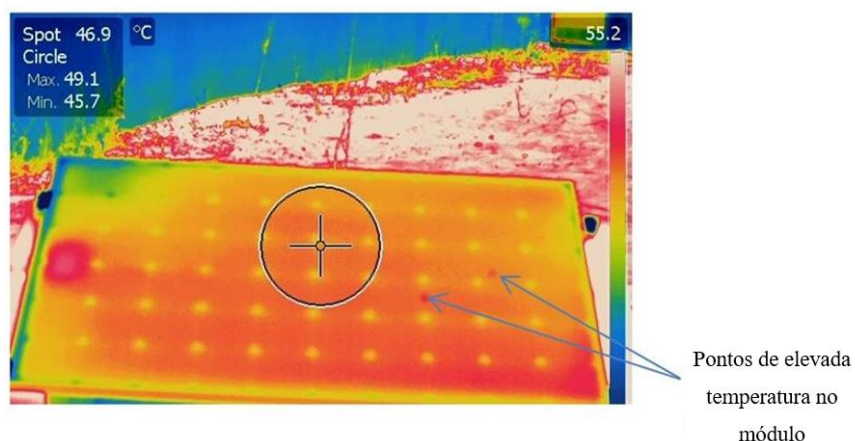


Figura 4.21 - Imagem termográfica de um módulo fotovoltaico. Adaptado de [45].

5 Conclusões

No decurso desta dissertação foi apresentado o simulador solar, com o intuito de desenvolver um simulador capaz de ensaiar um módulo fotovoltaico de dimensões 1580 mm x 798 mm x 35 mm. Serve o presente capítulo para apresentar as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho. Serão ainda abordados trabalhos futuros, com a finalidade de melhorar o simulador solar.

5.1 Conclusões finais

O desenvolvimento do simulador solar teve como base os objetivos apresentados inicialmente. O primeiro objetivo era que o simulador deveria ser de baixo custo, como é apresentado no orçamento, o objetivo foi alcançado comparando o preço com o dos simuladores comerciais. Os objetivos seguintes, eram conseguir ensaiar módulos fotovoltaicos de tamanho convencional em condições standard e uniformizar a irradiância na superfície de ensaio. Verificou-se que o simulador consegue efetivamente ensaiar módulos fotovoltaicos convencionais, no entanto, não foi possível testar o módulo em condições standard (STC), devido à irradiância não ser subitamente uniforme para módulos fotovoltaicos de tamanho convencional e também pela inexistência de um sistema de arrefecimento. Desta forma não se conseguiu cumprir dois objetivos, a uniformidade e ensaiar o módulo em condições de ensaio standard.

Por outro lado, foi possível expor à irradiância o módulo fotovoltaico e medir a curva I-V. O simulador solar desenvolvido é composto por fontes de iluminação e respetiva fonte de alimentação, tal como, é possível variar a irradiância através da distância entre a fonte de iluminação e o módulo fotovoltaico. Este simulador tanto pode operar em modo estacionário como em modo de pulso único. Todos estes elementos contribuem para que se possa afirmar, que a maioria dos aspetos da norma da Comissão Eletrotécnica Internacional, CEI 60904-9, foram respeitados.

Analisando os resultados, obtiveram-se valores percentuais da não-uniformidade de irradiância satisfatórios para o módulo fotovoltaico da Luxor e menos satisfatórios para o módulo da Sanyo. Resultados esses que permitiram também, concluir que o simulador solar desenvolvido serve para utilizar em módulos fotovoltaicos com dimensões na ordem dos 600 mm por 500 mm.

Em suma, o simulador solar desenvolvido é de baixo custo com capacidade de variar a irradiância a partir da distância entre a superfície de ensaio e a fonte de iluminação. Permite também medir a curva I-V e verificar a sua alteração com o efeito da irradiância. É um simulador direcionado para módulos fotovoltaicos de dimensão de 600 mm por 500 mm.

5.2 *Trabalhos futuros*

A maior dificuldade do simulador foi retirar resultados coerentes, isto porque a falta de um sistema de arrefecimento faz com que não se consiga controlar a temperatura do módulo, existindo assim uma variação de resultados. Outro aspeto é que não existe uma irradiância uniforme, como tal observou-se uma enorme diferença do valor da irradiância desde do centro do módulo até ao seu extremo, assim sendo, o módulo não consegue estabilizar a corrente e a tensão, sendo este o maior problema no simulador solar desenvolvido.

Ao nível do arrefecimento, é possível implementar um sistema de baixo custo capaz de manter o módulo fotovoltaico à temperatura de 25 °C, descritos nas condições de ensaio standard da norma CEI 60904-9. Com este sistema de arrefecimento é possível recolher os dados da curva I-V e averiguar o efeito que a temperatura tem sobre o módulo fotovoltaico. Algo que não se pode efetuar neste trabalho devido à falta de um sistema de arrefecimento.

A uniformidade da iluminação para módulos fotovoltaicos convencionais também é um problema, pois apresenta valores percentuais acima dos indicados na norma CEI 60904-9. A estrutura mecânica desenvolvida permite a aplicação de mais luminárias e uma melhor distribuição das mesmas. Esta modificação no simulador irá permitir uma uniformidade dentro dos valores referidos na norma CEI 60904-9 e também uma irradiância média próxima dos 1000 W/m².

Por fim, fazendo uso de uma câmara termográfica de melhor qualidade seria possível verificar se o módulo fotovoltaico se encontra em perfeitas condições de limpeza, facto que irá permitir averiguar alterações na produção de energia através dos dados da curva I-V.

Referências

- [1] N. Chestney, “New global solar capacity could surpass 2016 record this year,” *Reuters*, 2017. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-global-solar/new-global-solar-capacity-could-surpass-2016-record-this-year-idUSKBN18Q131>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [2] E. Meza, “IRENA: PV prices have declined 80% since 2008 – pv magazine International,” *PV magazine*, 2014. [Online]. Available: https://www.pv-magazine.com/2014/09/11/irena-pv-prices-have-declined-80-since-2008_100016383/. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [3] J. A. Duffie and W. A. Beckman, “Solar Radition,” in *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 116, I. John Wiley & Sons, Ed. 2003, p. 928.
- [4] M. G. Lopes, “Dissertação para obtenção do Grau de Mestre - Desenvolvimento de um sistema de baixo custo para a previsão da irradiância solar a curto prazo Engenharia Física Tecnológica,” 2015.
- [5] Green Pro, *Energia Fotovoltaica -Manual Sobre Tecnologias, Projeto E Instalação*. 2004.
- [6] G. M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems,” in *John Wiley & Sons, Inc.*, 2004, p. 676.
- [7] J. Pinho and M. Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, CEPTEL – C. Rio de Janeiro, 2014.
- [8] IEC, “IEC 60904-3 : 2008 Photovoltaic devices — Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data,” 2008.
- [9] IEC, “I EC 60904-9 : 2007 Photovoltaic devices — Part 9: Solar simulator performance requirements,” 2007.
- [10] Niclas, “Solar Panel Testing Conditions Comparison,” *Sino Voltaics*, 2014. [Online]. Available: <http://sinovoltaics.com/solar-basics/comparing-major-solar-panel-testing-conditions/>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [11] C. Centro, E. El, and H. G. Custodio, “Nothing but the sun Market survey on solar simulators for PV modules,” *Phot. Int.*, no. June, pp. 186–210, 2008.
- [12] M. Bliss, T. R. Betts, and R. Gottschalg, *Advantages in using LEDS as the main light source in solar simulators for measuring PV device characteristics*. 2008, p. 12.
- [13] R. Arndt and D. I. R. Puto, “Basic understanding of IEC standard testing for photovoltaic panels.” TUVamerica, p. 15, 2010.
- [14] M. Galdino, “Estado da arte da tecnologia de simuladores solares,” Rio de Janeiro, 2014.
- [15] M. Shimotomai, Y. Shinohara, and S. Igari, “The development of the I-V measurement by pulsed multi-flash, and the effectiveness,” *Conf. Rec. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4*, vol. 2, pp. 2223–2226, 2007.

- [16] H. B. Serreze, M. Rodzik, and J. E. Burns, “High Performance, Enhanced UV Spectrum, Compact Solar Simulators for Accurate Testing of Advanced PV Modules,” *Spire Sol. LLC*, pp. 3492–3495, 2013.
- [17] International Electrotechnical Commission, “IEC 61215: Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) modules - Design Qualification And Type Approval,” *IEC*, 2005.
- [18] G. M. Long, “Development of a Low Cost Solar Simulator for Human Thermophysiological Research,” University of Portsmouth, 2015.
- [19] Sciencetech, “(UHE-16) Solar Simulator - Ultra High Efficiency Solar Simulators - Steady State Solar Simulators - Solar Simulation and PV Testing Equipment - All Products | Sciencetech Inc.” [Online]. Available: http://www.sciencetech-inc.com/all-products/solarsimulators/continuous-solar/ultra-high-efficiency/uhe-16-solar-simulator.html?__store=chinese&__from_store=english. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [20] Sciencetech, “(SLB-150B-F) Fundamental Series Solar Simulator Package Class ABA - Low Cost Solar Simulators. - Steady State Solar Simulators - Solar Simulation and PV Testing Equipment - All Products | Sciencetech Inc.” [Online]. Available: <http://www.sciencetech-inc.com/all-products/solarsimulators/continuous-solar/low-cost-solar-simulators/slb-150b-f-fundamental-series-solar-simulator-package-class-aba.html>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [21] Newport, “Oriel Sol3A Class AAA Solar Simulators.” [Online]. Available: <https://www.newport.com/f/class-aaa-solar-simulators>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [22] S. K. Chunduri, “Cool light getting hot,” *Phot. Int.*, vol. October 20, pp. 98–124, 2013.
- [23] D. Richard, “Closer to the sun,” *Phot. Int.*, pp. 116–124, 2013.
- [24] P. O. Y. P. endeas, “QuickSun ® 540LA In-Line Solar Simulator,” pp. 1–2.
- [25] EcoProgetti, “Pv module inspection with Ecosun 10L.” [Online]. Available: <https://ecoprogetti.com/pv-module-inspection-with-ecosun-10l/>. [Accessed: 17-Aug-2017].
- [26] A. Zacharopoulos, J. D. Mondol, M. Smyth, T. Hyde, and V. O. Brien, “State of the art solar simulator with flexible mounting,” University of Ulster, 2009.
- [27] Mitsubishi, “Solar Simulator | Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.” [Online]. Available: https://www.mhi.com/products/detail/solar_simulator.html. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [28] F. Hussain, M. Y. H. Othman, B. Yatim, H. Ruslan, K. Sopian, Z. Anuar, and S. Khairuddin, “Fabrication and Irradiance Mapping of a Low Cost Solar Simulator for Indoor Testing of Solar Collector,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 133, no. 4, p. 44502, 2011.
- [29] University of Minnesota, “High-flux solar simulation.” [Online]. Available: <http://www.me.umn.edu/labs/solar/facilities/hfss.shtml>. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [30] N. F. V. Silva, “Dissertação para obtenção do Grau de Mestre - Iluminação LED - Avaliação económica e ambiental,” Universidade do Porto, 2012.
- [31] Climar, “Luminotechnical Concepts.” [Online]. Available: http://www.climar.pt/en/info_tec_eng_luz_conc.html. [Accessed: 08-Aug-2017].

- [32] P. Waide and S. Tanishima, “Light’s Labour’s Lost,” in *Internacional Energy Agency*, OECD, Ed. 2006, p. 561.
- [33] J. C. Soares, “Dissertação - Arquitectura e Luz, Estratégias de Iluminação – Teatro Capitólio,” Universidade Técnica de Lisboa - Faculdade de Arquitectura, 2011.
- [34] Wacom, “Xenon lamps,” *Wacom ElectricCo., LTD.* [Online]. Available: <http://www.wacom-ele.co.jp/en/products/lamp/xenon/>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [35] Aescusoft, “LEDSim TM All LED Solar Simulator Spectrally Tunable Class AAA Sun Simulator,” *LEDSimTM All LED Sol. Simulator*, vol. 49, pp. 1–2, 2011.
- [36] W. Lighting, “Halogen lamp spectrum - 10 reasons to buy,” *Warisan Lighting*. [Online]. Available: <http://warisanlighting.com/halogen-lamp-spectrum.html>. [Accessed: 17-Aug-2017].
- [37] Philips Lighting, “Tempo 3 RVP351 - RVP351 HPI-TP400W K IC S MASTER,” *Philips Lighting*. Philips Lighting Holding B.V., p. 3, 2017.
- [38] P. Lighting, “QVF416 HAL-TDL1000W BK QVF415/416.” [Online]. Available: http://www.lighting.philips.com.eg/prof/outdoor-luminaires/sports-and-area-floodlighting/area-and-recreational-floodlighting/qvf415-416/910503675818_EU/product. [Accessed: 22-Aug-2017].
- [39] L. Merlin, “Leroy Merlin - Produtos - Poste angular de metal.” [Online]. Available: <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Arrumacao/Estantes-utilitarias/Metal/17107881.aspx>. [Accessed: 10-Jan-2018].
- [40] L. Merlin, “Leroy Merlin - Produtos - Viga versátil.” [Online]. Available: <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Arrumacao/Estantes-utilitarias/Metal/17107923.aspx>. [Accessed: 10-Jan-2018].
- [41] Schneider Electric, “Distribuição Eléctrica de Baixa Tensão - Complemento Acti 9.” pp. 1–29, 2011.
- [42] “Sanyo (now Panasonic) Sanyo 210 HIP-210HKHA6 Solar Panel Solar Panel - Wholesale Solar.” [Online]. Available: <https://www.wholesalesolar.com/1902103/sanyo-now-panasonic/solar-panels/sanyo-now-panasonic-sanyo-210-hip-210hkha6-solar-panel-solar-panel>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [43] “Luxor 50 Poly - Szigetüzemű napelemek - PV Trade.” [Online]. Available: <http://pvtrade.eu/hu/szigetuzemu-napelemek/320003-luxor-50-poly.html>. [Accessed: 19-Sep-2017].
- [44] Sanyo, “HIT Photovoltaic Module - HIT Power 210N,” SANYO Energy, 2009.
- [45] J. Silva, “Energias Renováveis em Casa,” *Deco Proteste*, 2015. [Online]. Available: https://energias-renovaveis-emcasa.pt/solar_fotovoltaiico/f/8/t/148. [Accessed: 15-Sep-2017].

Anexo

Índice de proteção

Índice de proteção - IP					
Primeiro algarismo			Segundo algarismo		
Protecção contra corpos sólidos			Protecção contra líquidos		
0		Sem protecção	0		Sem protecção
1		Protecção contra corpos superiores a 50 mm (ex.: contactos involuntários da mão)	1		Protegido contra as quedas verticais de gotas de água (condensação)
2		Protegido contra corpos sólidos superiores a 12 mm (ex.: dedos da mão)	2		Protegido contra as quedas de água com direcção até 15° da vertical
3		Protegido contra corpos sólidos superiores a 2,5 mm (ex.: ferramentas, cabos)	3		Protegido contra a água da chuva com direcção até 60° da vertical
4		Protegido contra corpos sólidos superiores a 1 mm (ex.: ferramentas finas, pequenos cabos)	4		Protegido contra as projecções de água em todas as direcções
5		Protegido contra o pó (sem sedimentos prejudiciais)	5		Protegido contra os jactos de água em todas as direcções
6		Totalmente protegidos contra o pó	6		Protegido contra os jactos de água semelhantes a golpes do mar
			7		Protegido contra a imersão
			8		Protegido contra os efeitos prolongados da imersão sob pressão

Módulo fotovoltaico da Sanyo

Model	Sanyo HIP-210NKHE5
Nominal power	210 W +10 %, -5 %
Max. system voltage	1000 V DC
Operating voltage	41.3 V
Operating current	5.09 A
Open circuit voltage	50.9 V
Short circuit current	5.57 A
Temp. coefficient power	-0.30 %/°C
Temp. coefficient voltage	-127 mV/°C
Temp. coefficient current	1.67 mA/°C
Reverse current load	15 A
Cells per module	72 pc.
Cell type	HIT solar cell, monocrystalline
Cell dimensions	125 / 125 mm
Connection	MC3 connectors, cable 960 mm each (+ / -)
Mounting frame	Anodized aluminium
Dimensions (L / W / H)	1580 mm ±2 mm / 798 mm ±2 mm / 35 mm ±1 mm
Weight	15.0 kg (approx.)
Max. load	2400 N/m ²
Performance warranty *	10 / 20 years
Product warranty	5 years
Norms	IEC 61730, IEC 61215, CE mark, protection class II, TÜVdotCOM-ID: 0000022408

Lafayette DMB-SOLAR

Especificações elétricas

- Display: LCD, 3½ dígitos com leitura máxima de 1999 W/m².
- Tempo de amostragem: cerca de 0,25 segundos.
- Resolução: 1 W/m²; 1 Btu.
- Precisão: ± 10 W/m² [± 3Btu] ou ± 5
- Escala: 1999 W/m², 634 Btu.

Multímetro digital:

Função	Alcance máximo	Precisão
Tensão em DC	600 V	±0,5%
Tensão em AC	600 V	±1,2%
Corrente em DC	200 mA	±2,0%
Corrente em AC	200 mA	±1,5%
Resistência	20 MΩ	±0,8%



Termómetro infravermelho: Xindar TID200

(P) TERMÔMETRO INFRAVERMELHO SEM CONTATO

Informações Técnicas:

- Ecrã digital
- Dimensões: 155 x 108 x 40 mm
- Peso: 185 g
- Pilha: 1 x 9V (6F22) (incluída)

Função:

- Faixa: -20 ° C ~ 400 ° C
- Precisão: ± 2%
- Repetibilidade: ± 0,5 ° C ou ± 0,5%
- Resolução da tela: 0.1°C/°F
- Relação Ponto Distância (D: S): 12:1
- Tempo de resposta: 250 mS
- Emissividade ajustável 0.1 ~ 1.0
- Indicação de bateria baixa
- Retenção Valor en Display
- Função Auto Off
- Leitura MIN/MAX
- Alarme de Limites Alta / Baixo



Imagens do simulador solar desenvolvido

