



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



## **Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica**

**MAURO ANALÍDIO PEREIRA DO NASCIMENTO**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes  
Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Júri:

Presidente:

Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Vogais:

Doutor Hugo Miguel Inácio Pousinho  
Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes  
Doutor Mário Rui Melício da Conceição

**Dezembro de 2013**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



## **Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica**

**MAURO ANALÍDIO PEREIRA DO NASCIMENTO**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes  
Doutor Mário Rui Melício da Conceição

Júri:

Presidente:

Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Vogais:

Doutor Hugo Miguel Inácio Pousinho  
Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes  
Doutor Mário Rui Melício da Conceição

**Dezembro de 2013**

**Dissertação realizada em regime de coorientação pelos orientadores:**

**Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes**

Professor Coordenador com Agregação da Área Departamental

de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação

**Instituto Superior de Engenharia de Lisboa**

e

**Doutor Mário Rui Melício da Conceição**

Professor Auxiliar do Departamento de Física

**Universidade de Évora**

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo”.

Nelson Mandela (1918 – 2013)

“Aprendi que a coragem não é a ausência do medo, mas o triunfo sobre ele. O homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas o que conquista por cima do medo”.

Nelson Mandela (1918 – 2013)

# Resumo

Esta dissertação incide sobre o tema de avaliação experimental de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica. O comportamento da célula e do painel são estudados nesta dissertação mediante simulação computacional. O circuito elétrico equivalente da célula do sistema fotovoltaico simulado é constituído por uma fonte de corrente controlada ligada em paralelo a um diodo. É feita a validação dos resultados da simulação do painel mediante a experimentação em painéis fotovoltaicos de silício monocristalino. Ainda no âmbito do aproveitamento da energia fotovoltaica, é estudado o conteúdo harmónico da onda de tensão e da corrente de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica, utilizando a experimentação, sendo o sistema constituído por painéis de silício policristalino.

## Palavras-Chave

Energia Fotovoltaica

Qualidade de Energia

Taxa de Distorção Harmónica

Sistema Fotovoltaico Ligado a Rede Elétrica

# Abstract

This dissertation focuses on the subject of experimental evaluation of quality of energy of a photovoltaic system in an electrical network. The behavior of the cell and the panel are studied in this dissertation by computational simulation. The electric equivalent of the cell in the simulated photovoltaic system is composed by a controlled current source connected in parallel to a diode. The validation of the simulation results of the panel is made through experimentation in the photovoltaic panels of a monocrystalline silicon. Also under the exploitation of photovoltaic energy, is studied using experimentation the harmonic content of the voltage and the current waveforms of the system connected to an electric network. The system consists of polycrystalline silicon panels.

## Keywords

Photovoltaic Energy

Energy Quality

Harmonic Distortion

Photovoltaic System Connected to the Grid



# Agradecimentos

Começo por agradecer os meus orientadores Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes e Doutor Mário Rui Melício da Conceição, por terem transmitido conhecimentos valiosos, pela disponibilidade, apoio e pela forma como ajudaram nas diversas etapas desta dissertação, contribuindo para o desenvolvimento pessoal, académico e profissional.

Agradeço também o Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia, em especial o Doutor António Luiz Moura Joyce e a Doutora Susana Filipa Almeida Castro Viana por permitirem a realização do estágio na unidade de energia solar que foi crucial para a realização da dissertação.

Agradeço os meus pais, Álvaro Domingos e Maria Teresa Pereira pela educação e pelo apoio que recebi em todas etapas da minha vida. Gostaria ainda de agradecer aos meus irmãos, a minha família, aos meus amigos, aos meus colegas, e a todos aqueles que ajudaram direta ou indiretamente nos trabalhos e na realização da dissertação. Expresso ainda a minha gratidão ao ISEL e aos seus professores pela forma como lecionaram o curso de mestrado e a todos os meus colegas de curso.

Para finalizar, gostaria de deixar três agradecimentos muito especiais: à Força Aérea Angolana, por ter possibilitado a minha vinda a Portugal para a realização deste Mestrado à Direção de Preparação de Tropa e Ensino do Estado Maior General das Forças Armadas Angolanas e à Chancelaria Militar de Angola em Portugal por terem feito tudo para que a minha estadia em Portugal fosse um sucesso.



# Índice

CAPÍTULO 1: Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	4
1.4 Notação .....	5
CAPÍTULO 2: Estado da Arte .....	7
2.1 Visão Histórica.....	9
2.2 Estado da Arte.....	18
2.3 Configurações do Sistema Fotovoltaico .....	19
2.3.1 Sistema Isolado.....	19
2.3.2 Sistema Híbrido Isolado .....	20
2.3.3 Sistema Ligado a Rede Elétrica .....	21
2.4 Componentes do Sistema Fotovoltaico.....	22
2.4.1 Painel Fotovoltaico .....	23
CAPÍTULO 3: Recurso Solar .....	31
3.1 Radiação Solar .....	33
3.2 Energia Fotovoltaica em Portugal .....	37
CAPÍTULO 4: Modelação .....	43
4.1 Modelo Matemático .....	45
4.2 Características de Células Fotovoltaicas .....	48
4.3 Qualidade de Energia.....	51
CAPÍTULO 5: Casos de Estudo .....	57
5.1 Primeiro Conjunto de Ensaios .....	59

5.2	Segundo Conjunto de Ensaios .....	62
5.3	Terceiro Conjunto de Ensaios .....	66
CAPÍTULO 6: Conclusões .....		73
6.1	Conclusões .....	75
6.2	Trabalhos Futuros .....	76
Bibliografia .....		77

# Índice de Figuras

Figura 2.1: Amostra de Adams e Day [5].	10
Figura 2.2: Satélite Vanguard I [9].	11
Figura 2.3: Satélites Explorer VI [10].	12
Figura 2.4: Satélite Nimbus [11].	12
Figura 2.5: Satélite observatório astronómico [12].	13
Figura 2.6: Gossamer Penguin [13].	13
Figura 2.7: Moto-planador Sunseeker [13].	14
Figura 2.8: Icare II [13].	15
Figura 2.9: Helios [13].	16
Figura 2.10: Pathfinder Plus [14].	16
Figura 2.11: Sistema fotovoltaico isolado [21].	20
Figura 2.12: Sistema fotovoltaico híbrido [22].	21
Figura 2.13: Sistema fotovoltaico ligado a rede elétrica [23].	22
Figura 2.14: Componentes do painel fotovoltaico [24].	23
Figura 2.15: Efeito fotovoltaico [26].	24
Figura 2.16: Funcionamento da célula fotovoltaica [3].	25
Figura 2.17: Células solar monocristalina (c-Si) [27].	26
Figura 2.18: Célula solar policristalina (pc-Si) [28].	27
Figura 2.19: Concentrador fotovoltaico (CPV) [29].	29
Figura 2.20: Célula solar orgânica [31].	30
Figura 3.1: Componentes da radiação solar incidente [32].	34
Figura 3.2: Distribuição espectral da energia solar [32].	35
Figura 3.3: Piranómetro do LNEG.	36
Figura 3.4: Radiação solar média para Portugal [34].	37
Figura 3.5: Radiação direta e difusa (Adaptado de [33]).	38
Figura 3.6: Sombras no Painel Fotovoltaico [37].	41
Figura 4.1: Modelo equivalente da célula fotovoltaica.	46
Figura 4.2: Configuração em <i>Simulink</i> do sistema simulado.	49

Figura 4.3: Configuração em <i>Simulink</i> do bloco do $V_T$ .....	50
Figura 4.4: Configuração em <i>Simulink</i> do bloco $V_{pv}$ .....	51
Figura 5.1: Influência da irradiância na curva I-V.....	60
Figura 5.2: Influência da irradiância na curva P-V.....	60
Figura 5.3: Influência da temperatura na curva I-V. ....	61
Figura 5.4: Influência da temperatura na curva P-V.....	61
Figura 5.5: Painel fotovoltaico Isofotón M-55 L do sistema do LNEG .....	62
Figura 5.6: Traçador de curvas características PVPM 6020C. ....	63
Figura 5.7: Célula fotovoltaica calibrada ISET sensor 00644.....	64
Figura 5.8: Curvas I-V experimental e simulada do Isofotón M-55 L. ....	64
Figura 5.9: Curvas P-V experimental e simulada do Isofotón M-55 L. ....	65
Figura 5.10: Sistema de silício policristalino Solar LDK-225P-20. ....	66
Figura 5.11: Analisador de qualidade de energia FLUKE 435. ....	67
Figura 5.12: Pinça amperimétrica FLUKE i30s e ligações. ....	68
Figura 5.13: Espectro harmónico da onda de tensão de fase.....	68
Figura 5.14: Espectro harmónico da onda de tensão no neutro. ....	69
Figura 5.15: Espectro harmónico da corrente na fase. ....	70
Figura 5.16: Espectro harmónico da corrente no neutro.....	71

# Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Valores máximos das tensões harmónicas .....	52
Tabela 4.2: Limites de correntes harmónicas (adaptado de [39]). .....	53
Tabela 5.1: Parâmetros do painel fotovoltaico Isofotón M-55 L .....	63
Tabela 5.2: Parâmetros do painel fotovoltaico Solar LDK-225P-20 .....	67

# Lista de Siglas

AC	Corrente alternada
AM	<i>Air mass</i>
CIS	Disseleneto de cobre e índio
CPV	Concentradores solar fotovoltaicos
DC	Corrente contínua
DFT	<i>Discret fourier transform</i>
DSSC	<i>Dye-sensitized solar cell</i>
EFG	<i>Edge-defined film-fed growth</i>
EN	<i>European norm</i>
EUA	Estados unidos da américa
EVA	Plástico elástico etilvinilacetato
FF	Fator de forma
IEC	<i>International electrotechnical commission</i>
IEEE	<i>Institute of electrical and electronics engineers</i>
IR	Radiação infravermelho
ISEL	Instituto superior de engenharia de lisboa
LNEG	Laboratório nacional de engenharia e geologia
MPP	<i>Maximum power point</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
NASA	<i>National aeronautics and space administration</i>
NEP	Número de horas equivalentes à potência nominal
NOCT	<i>Normal operating cell temperature</i>
NP	Norma portuguesa
OAQ	<i>Orbiting astronomical observatory</i>
OPV	<i>Organic photovoltaic</i>
PV	Painel fotovoltaico
QEE	Qualidade de energia elétrica



STC	<i>Standard test conditions</i>
TFT	<i>Thin-film technology</i>
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
UV	Radiação ultravioleta

# Lista de Símbolos

Símbolo	Grandeza/Unidade	Definição
%	Unidade	Porcentagem
°C	Temperatura	Graus centígrados
a-Si	Elemento químico	Silício amorfo
C	Unidade	Coulomb
CdTe	Elemento químico	Telureto de cádmio
cm <sup>2</sup>	Unidade	Centímetro quadrado
c-Si	Elemento químico	Silício cristalino
e	2,718	Exponencial
G	W/m <sup>2</sup>	Irradiância solar incidente sobre a superfície ativa da célula
I <sub>d</sub>	A (Ampére)	Corrente interna unidirecional que atravessa o díodo
I <sub>MPP</sub>	V (Volt)	Corrente no MPP
I <sub>MPP</sub> <sup>*</sup>	A (Ampére)	Corrente no MPP de referência (STC)
I <sub>O</sub>	A (Ampére)	A corrente inversa máxima de saturação do díodo
I <sub>ph</sub>	A (Ampére)	A corrente elétrica unidirecional gerada pela irradiância
I <sub>pv</sub>	A (Ampére)	Corrente do painel fotovoltaica
I <sub>sc</sub>	A (Ampére)	Corrente de curto-circuito
I <sub>sc</sub> <sup>*</sup>	A (Ampére)	Corrente de curto-circuito de referência (STC)
k	1000	Quilo
K	Unidade	Kelvin
K	1,381×10 <sup>-23</sup> J/K	Constante de boltzman
K <sub>Fact</sub>		Factor de desclassificação do transformador

km	Unidade	Quilometro
kW	Unidade	Quilowatt
kWh	Unidade	Quilowatt hora
ln	Função	Logaritmo natural na base e
$m$	Factor	Fator de idealidade do díodo
m	Unidade	Metro
mc-Si	Elemento químico	Silício multi-cristalino
MW	$10^6 W$	Mega watt
mW	$10^{-3} W$	Mili-watts
NiCd	Elemento químico	Níquel ácido
P	W (watt)	Potência
pc-Si	Elemento químico	Silício policristalino
$P_{MPP}$	W (watt)	Potência no MPP
Pt	Elemento químico	Platina
q	$1,602 \times 10^{-19} C$	Carga elétrica do eletrão
sc-Si	Elemento químico	Silício cristalino simples
Se	Elemento químico	Selénio
Si	Elemento químico	Silício
$S_{max}$	VA(Volt Ampere)	Potência aparente máxima
$S_n$	VA(Volt Ampere)	Potência aparente nominal
$T_{amb}$	°C (Graus Celcius)	Temperatura ambiente
TiO <sub>2</sub>	Elemento químico	Dióxido de titânio
$T_j$	K (kelvin)	Temperatura absoluta da célula
$U_h$	%	Tensão harmónica em percentagem
V	Unidade	Volt
$V_{MPP}$	V (Volt)	Tensão no mpp
$V_{MPP}^*$	V (Volt)	Tensão no mpp de referência (STC)
$V_{oc}$	V (Volt)	Tensão de circuito aberto
$V_{oc}^*$	V (Volt)	Tensão de circuito aberto de referência (STC)
$V_{pv}$	V (Volt)	Tensão aos terminais da célula
$V_t$	V (Volt)	Potencial térmico da célula

W	Unidade	Watt
$X_F$		Valor eficaz da componente fundamental do sinal
$X_H$		Valor eficaz do sinal com o conteúdo harmónico total
$\alpha_{SC}$	Coeficiente	Coeficiente de temperatura relativo a corrente
$\beta_{OC}$	Coeficiente	Coeficiente de temperatura relativo a tensão
$\gamma_{MPP}$	Coeficiente	Coeficiente de temperatura relativo a potência
$\mu$	$10^{-6}$	Micro
$\mu\text{-Si}$	Elemento químico	Micromorph de silício

# CAPÍTULO 1: Introdução

Neste capítulo é apresentado o enquadramento do trabalho, os objetivos, a maneira como está estruturada a dissertação e a notação utilizada.



# **1 Introdução**

## **1.1 Enquadramento**

No início do século XXI é constatado com crescente importância para a diminuição dos problemas ambientais, associados à utilização das fontes de energia baseadas em recursos fósseis, o uso de energias não poluentes e renováveis que não contribuem para as emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa. O tema para Portugal tem particular importância, uma vez que o país tem uma dependência externa, em termos de energia primária superior àquilo que é a média da União Europeia e dos países comparáveis. Acresce ainda que o país é confrontado com a necessidade de desenvolver formas alternativas de produção de energia, não contribuindo para as emissões gasosas poluentes [1, 2].

A incorporação de fontes de energia renováveis, contribuindo para diminuir o recurso às centrais térmicas no sistema produtor elétrico, é uma medida importante na prossecução do objetivo de reduzir as emissões antropogénicas gasosas para a atmosfera, visando o cumprimento do estabelecido no Protocolo de Quioto e das decisões sucedâneas.

O enquadramento desta dissertação no âmbito do aproveitamento da energia fotovoltaica é envolve: o modelo de uma célula fotovoltaica e de um painel fotovoltaico de silício monocristalino; a validação dos resultados da simulação mediante experimentação em painéis fotovoltaicos de silício monocristalino; e a avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico de silício policristalino numa rede elétrica.

## **1.2 Objetivos**

O trabalho apresentado nesta dissertação está situado no âmbito da simulação computacional, da validação dos resultados da simulação mediante a experimentação em fontes de energias fotovoltaicas e a avaliação de qualidade de energia, nomeadamente painéis fotovoltaicos, estando integrado numa linha de investigação na Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Esta dissertação tem como objetivos contribuir para: o estudo do modelo de uma célula fotovoltaica ou de um painel fotovoltaico de silício monocristalino; a validação da simulação do modelo simplificado de um painel fotovoltaico mediante comparação experimental em painéis fotovoltaicos de silício monocristalino; e a avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico de silício policristalino numa rede elétrica no âmbito do aproveitamento da energia fotovoltaica.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos incluindo a introdução, sendo uma descrição do conteúdo de cada capítulo seguidamente apresentada:

No capítulo 2 é apresentada uma visão histórica da tecnologia fotovoltaica desde a descoberta até os dias de hoje; é apresentado o estado da arte; e são apresentados os componentes do sistema fotovoltaico.



No capítulo 3 é apresentado o recurso solar e a posição privilegiada de Portugal em termos de disponibilidade de recurso solar e da produção estimada de energia a partir de sistemas fotovoltaicos em função da potência instalada nas diferentes regiões.

No capítulo 4 é apresentado o modelo do sistema fotovoltaico; a configuração em *Simulink* do sistema simulado; e a normalização sobre a qualidade de energia usada no âmbito dos estudos desta dissertação, nomeadamente, no que respeita o comportamento harmónico descrito pelo THD e a DFT.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações, cuja formulação que descreve o comportamento do painel fotovoltaico foi apresentada nos capítulos anteriores, a simulação de uma célula de silício monocristalino, a validação dos resultados da simulação com os resultados experimentais de um painel de silício monocristalino e a avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico de silício policristalino ligado à rede elétrica.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e linhas para trabalhos futuros.

#### **1.4 Notação**

Em cada um dos capítulos desta dissertação o texto é baseado no novo acordo ortográfico e o estilo de citação foi sustentado segundo a Norma IEEE 2006, i.e., a identificação de equações é apresentada entre parêntesis curvos ( ), e a identificação de referências bibliográficas é

apresentada entre parêntesis retos [ ] e são numeradas de forma sequencial.

As figuras, tabelas e equações são apresentadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas sequencialmente no respectivo capítulo. A numeração é reiniciada em cada capítulo. Expressões em língua estrangeira são apresentadas em itálico. A simbologia e abreviatura utilizada no decorrer do texto seguem o apresentado previamente na lista de siglas e na lista símbolos. Todas as tabelas têm as letras do mesmo tamanho assim como as legendas das figuras.

# CAPÍTULO 2: Estado da Arte

Neste capítulo é apresentada uma visão histórica da tecnologia fotovoltaica desde a descoberta até os dias de hoje; é apresentado o estado da arte; e são apresentados os componentes do sistema fotovoltaico.



## **2 Estado da Arte**

### **2.1 Visão Histórica**

Antes de abordar a visão histórica no que diz respeito aos módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis fotovoltaicos, é importante definir a origem da palavra "fotovoltaica" que é composta por duas palavras: foto, uma palavra de origem grega para luz, e voltaica, que define o valor da medição através da qual a atividade do campo elétrico é expressa, i.e., a diferença de potencial [3].

Para conferir ao leitor uma visão do desenvolvimento da energia solar fotovoltaica, é importante explicar a origem do aproveitamento da energia solar fotovoltaica e o modo como a utilização da energia do Sol está relacionado com as mudanças verificadas na civilização [3].

Em 1839, Edmond Becquerel observa que placas metálicas, de platina ou prata, quando mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz produzem uma pequena diferença de potencial. A experiência realizada foi denominada de efeito fotovoltaico [4].

Em 1876, William Grylls Adams e Richard Evans Day dão o seu contributo para a energia fotovoltaica com a descoberta do efeito da fotocondutividade do selênio. A descoberta foi realizada utilizando amostras com objetivo de demonstrar que é possível começar a uma corrente no selênio apenas pela ação da luz [5].

A amostra utilizada por Adams e Day para a investigar a fotocondutividade do selênio é apresentada na Figura 2.1.

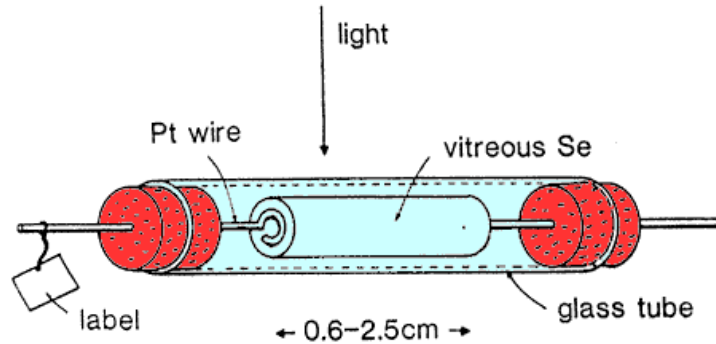


Figura 2.1: Amostra de Adams e Day [5].

Em 1877, Adams e Day produzem a primeira célula fotovoltaica usando elétrodos de selênio. Os elétrodos de selênio quando expostos à radiação geram uma corrente elétrica. Devido a falta do conhecimento sobre os materiais semicondutores, a eficiência da célula era reduzida. Com a investigação sobre os materiais semicondutores, só em 1954 é que as células fotovoltaicas alcançam eficiências aceitáveis [4].

Em 1905, Albert Einstein motiva a aceitação da conversão da radiação solar em energia elétrica publicando, a propósito, a sua teoria para explicar o efeito fotoelétrico. Esta teoria proporcionou uma compreensão mais profunda do processo físico de produção de eletricidade a partir da radiação solar [4]. Em 1921, Einstein recebeu um prêmio nobel a propósito da explicação do efeito [6].

Em 1918, Jan Czochralski desenvolve um processo de crescimento de cristais de silício, a partir de um único cristal, e décadas mais tarde o

processo desenvolvido possibilitou a criação de silício monocristalino que constitui a base de uma das tecnologias de células fotovoltaicas [4].

Em 1954, Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin desenvolvem uma célula fotovoltaica, tendo apenas  $2 \text{ cm}^2$  de superfície usando silício e gerando de 5 mW de potência, com uma eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica de 6 % [7].

Com a realização das primeiras células fotovoltaicas de silício monocristalino houve grande desenvolvimento e progresso que foram estimulados pela utilização nos veículos espaciais [7].

Em 1958, foi alcançada a eficiência de conversão de 9 % nas células fotovoltaicas [8]. Com a eficiência de conversão de 9 %, foi possível usar a célula fotovoltaica para alimentar o satélite Vanguard I, tendo funcionado durante oito anos [4]. O satélite Vanguard I é apresentado na Figura 2.2.



Figura 2.2: Satélite Vanguard I [9].

Em 1959, é lançado o satélite Explorer VI levando placas fotovoltaicas [8]. O satélite Explorer VI é apresentado na Figura 2.3.

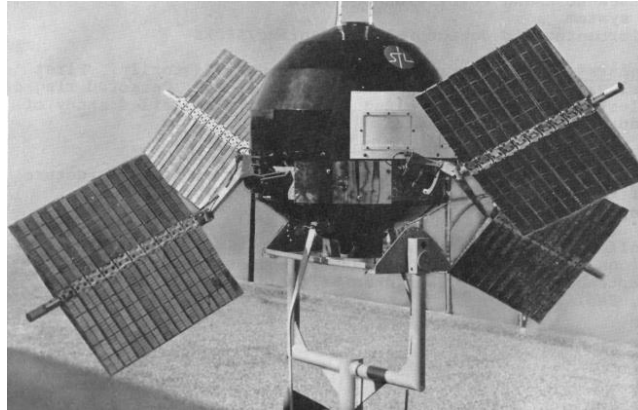


Figura 2.3: Satélites Explorer VI [10].

Em 1964, a NASA lança o satélite Nimbus equipado com placas fotovoltaicas para alimentar uma potência instalada de 470 W [8]. O satélite Nimbus é apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4: Satélite Nimbus [11].

Entre 1966 e 1972, a NASA lança uma série de quatro satélites observatórios astronômicos orbitais equipados com painéis fotovoltaicos para alimentar os equipamentos do observatório astronômico [8].



O primeiro satélite da série de satélites observatórios astronômicos orbitais (OAO) [12] é apresentado na Figura 2.5.

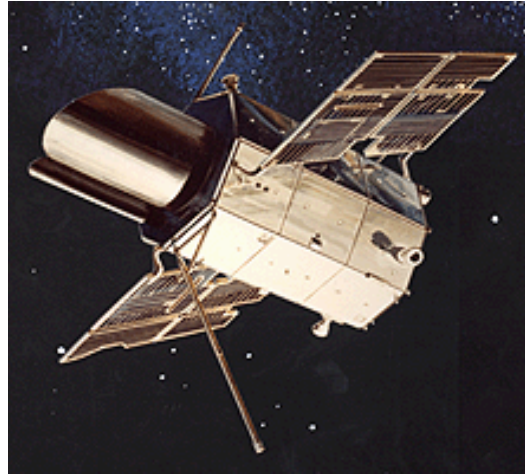


Figura 2.5: Satélite observatório astronômico [12].

Em 1981, Paul MacCready constrói uma aeronave experimental denominada de Gossamer Penguin movida por um motor elétrico alimentado por energia de origem fotovoltaica. O sistema fotovoltaico instalado na aeronave tinha uma potência de 2,5 kW [8]. O Gossamer Penguin é apresentado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Gossamer Penguin [13].

Em 1990, Eric Raymond cruza os EUA com uma aeronave moto-planador denominada Sunseeker I, equipada com painéis fotovoltaicos que carregavam uma bateria. A viagem foi realizada em 21 etapas ao longo de um período de quase dois meses [13]. O Sunseeker I é apresentado na Figura 2.7.



Figura 2.7: Moto-planador Sunseeker [13].

Em 1992, na universidade do Sul da Flórida é desenvolvida uma célula fotovoltaica de película fina feita de telureto de cádmio tendo a eficiência de conversão da ordem de 15,9% [8]. No ano de 1992, a produção mundial de módulos fotovoltaicos é contabilizada contendo alcançado a potência instalada de 60 MW [7].

Na década de 90 do século XX, foram construídos aviões para participar na competição designada por *Berblinger Flight Competition*. O objetivo desta competição é atingir a altitude de 450 m com ajuda da energia das baterias e manter o voo horizontal com energia elétrica de origem fotovoltaica [13].

O prêmio é ganho em 1996 pela equipa *Professeur Voit-Nitschmann* da Universidade de *Stuttgart*, com o *Icare II* de 25 metros de envergadura, equipado com 26 m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas [13]. O *Icare II* é apresentado na Figura 2.8.



Figura 2.8: *Icare II* [13].

Em 1999, a capacidade de energia fotovoltaica mundial instalada atinge os 1000 MW [8].

Em 2000, a *Sandia National Laboratories* desenvolve uma interface de eletrônica de potência, i.e., inversor para sistemas fotovoltaicos. Os inversores eletrônicos de potência convertem a corrente contínua (DC) à saída do sistema em corrente alternada (AC), que é o padrão atual para os consumidores de energia elétrica e para as linhas de transporte [8].

Em 2001, a aeronave não tripulada *Helios*, fabricada pela *AeroVironment*, bate o recorde mundial atingindo cerca de 3000 m de altitude, com uma aeronave movida a energia elétrica de origem fotovoltaica [13]. A aeronave *Helios* é equipada com painéis fotovoltaicos

instalados no extradorso das asas com uma envergadura de mais de 70 m [13]. A aeronave não tripulada Helios é apresentada na Figura 2.9.



Figura 2.9: Helios [13].

Em 2002, o presidente dos EUA George W. Bush coloca o nome na história da energia fotovoltaica quando autoriza a instalação de sistemas fotovoltaicos com um valor de potência de pico de 9 kW sobre a cobertura do edifício de manutenção da Casa Branca [6].

Em 2002, a NASA realiza testes com uma aeronave dirigida por controlo remoto e movida a energia elétrica de origem fotovoltaica conhecida por Pathfinder Plus [8] apresentada na Figura 2.10.



Figura 2.10: Pathfinder Plus [14].

Em 2004, é produzido cerca de mil milhões de células fotovoltaicas, alcançando a capacidade instalada mundial superior a 8,2 GW de potência de pico [7].

Os painéis fotovoltaicos são um conjunto de células fotovoltaicas ligadas em serie e em paralelo, utilizando o vidro transparente como revestimento e proteção e necessitam de uma estrutura metálica para os instalar [4].

De modo a reduzir o custo da tecnologia de painéis fotovoltaicos, uma solução passou por reduzir o material semiconductor por painel [4].

Um tipo de conceção de células fotovoltaicas são as designadas de células fotovoltaicas de 2ª geração. Muitos fabricantes desenvolveram diferentes tecnologias de película fina utilizando muitas vezes silício amorfo, o disseleneto de cobre e índio e o telureto de cádmio, pois permitem reduzir consideravelmente o custo de produção dos painéis fotovoltaicos [4].

A investigação e desenvolvimento sobre tecnologias de película fina prossegue com o aparecimento do que se designa por 3ª geração de painéis fotovoltaicos [4].

Na tecnologia de 3ª geração, é destacada como mais promissora a tecnologia baseada em tintas sensíveis, que foi desenvolvida por Michael Grätzel do Instituto Federal Suíço de Tecnologias, usando a combinação de um corante químico com um semiconductor [4].

## 2.2 Estado da Arte

O ponto de partida para a origem de uma expressão para a célula fotovoltaica é a junção  $p-n$ . A junção  $p-n$  funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional que depende da tensão aos terminais da célula [15].

Em [16] é estudado o modelo equivalente da célula fotovoltaica representado pelo modelo constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo, uma resistência em série e uma resistência em paralelo. A resistência em série representa as perdas devido à resistência através do material semiconductor, à resistência entre os contactos metálicos da parte frontal e posterior da célula e resistência devida às conexões entre célula e terminais. A resistência em paralelo representa as perdas relacionadas com as correntes de fuga que ocorrem nas extremidades e com imperfeições do semiconductor.

Em [17] é estudado o modelo equivalente da célula fotovoltaica representado pelo modelo simplificado, i.e., o modelo ideal constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo e pelo modelo constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo e uma resistência em série. No estudo é incluído o efeito da variação da temperatura da célula, da radiação solar e do fator de idealidade e para o modelo com resistência em série é estudado o comportamento do modelo mediante a variação do valor da resistência. Os autores concluem que o modelo com resistência em série oferece um comportamento da célula mais próximo da realidade.

Em [18] o sistema fotovoltaico ligado ao sistema de energia elétrica representado pelo modelo constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um diodo, é suficiente para que se obtenham bons resultados.

## **2.3 Configurações do Sistema Fotovoltaico**

O sistema fotovoltaico têm um ciclo de produção de energia muito inconstante devido ao facto de não produzirem energia de noite, e também, porque que há dias em que quase não há Sol e a produção é muito limitada. Consequentemente, os sistemas fotovoltaicos são divididos em dois tipos: sistemas com acumulação de energia; e sistemas sem acumulação de energia [19].

Nos sistemas com acumulação de energia as configurações existentes para sistemas fotovoltaicos são: sistemas fotovoltaicos isolados, e sistemas fotovoltaicos híbridos isolados [19, 20].

Nos sistemas sem acumulação de energia a configuração existente para o sistema fotovoltaico é o ligado a rede elétrica [19, 20].

### **2.3.1 Sistema Isolado**

Os sistemas isolados têm armazenamento de energia, pois normalmente fornecem energia elétrica a áreas remotas [20].

Nos sistemas isolados as cargas podem ser alimentadas em corrente contínua ou em corrente alternada, sendo que em corrente alternada necessitam de uma interface de eletrônica de potência, i.e., o inversor DC/AC para converter a corrente contínua em alternada [20]. O sistema isolado é apresentado na Figura 2.11.

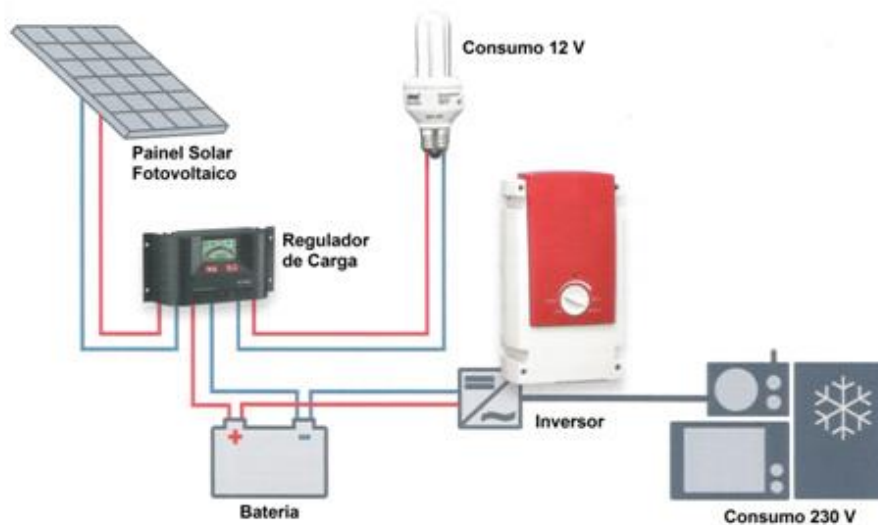


Figura 2.11: Sistema fotovoltaico isolado [21].

### 2.3.2 Sistema Híbrido Isolado

Os sistemas de energia fotovoltaica que utilizam armazenamento de energia podem ser combinados com outras fontes de geração de energia, tais como turbinas eólicas, gerador diesel ou outro tipo de tecnologia [20].

Dado haver a combinação de várias tecnologias existe a necessidade de controlar todas as fontes para que haja a máxima eficácia na entrega de energia [20].



Sistemas híbridos são usados normalmente quando há vários consumidores e necessitam de uma interface de eletrônica de potência, i.e., o inversor DC/AC para converter a corrente contínua em alternada [20]. O sistema híbrido isolado é apresentado na Figura 2.12.

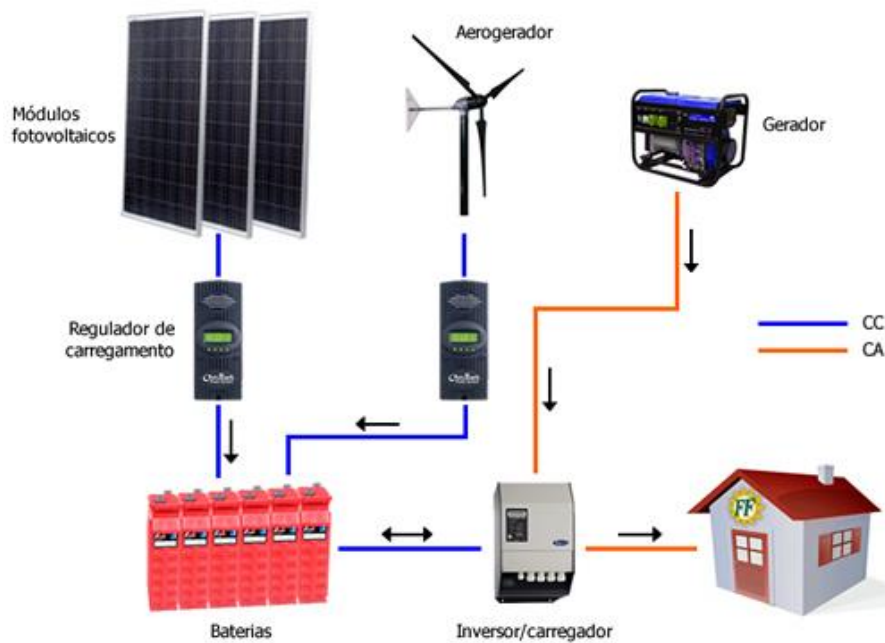


Figura 2.12: Sistema fotovoltaico híbrido [22].

### 2.3.3 Sistema Ligado a Rede Elétrica

Os sistemas ligados a rede normalmente não utilizam armazenamento de energia em baterias, pois, a rede elétrica assume o papel de uma bateria de acumulação infinita, i.e., toda a energia produzida é entregue a rede elétrica [20].

Os sistemas ligados a rede representam uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está ligado, e a ligação é feita mediante uma

interface de eletrônica de potência, i.e., inversores DC/AC devendo, os inversores, satisfazer as exigências de qualidade de energia e segurança para que a rede não seja afetada [20]. O sistema ligado a rede é apresentado na Figura 2.13.

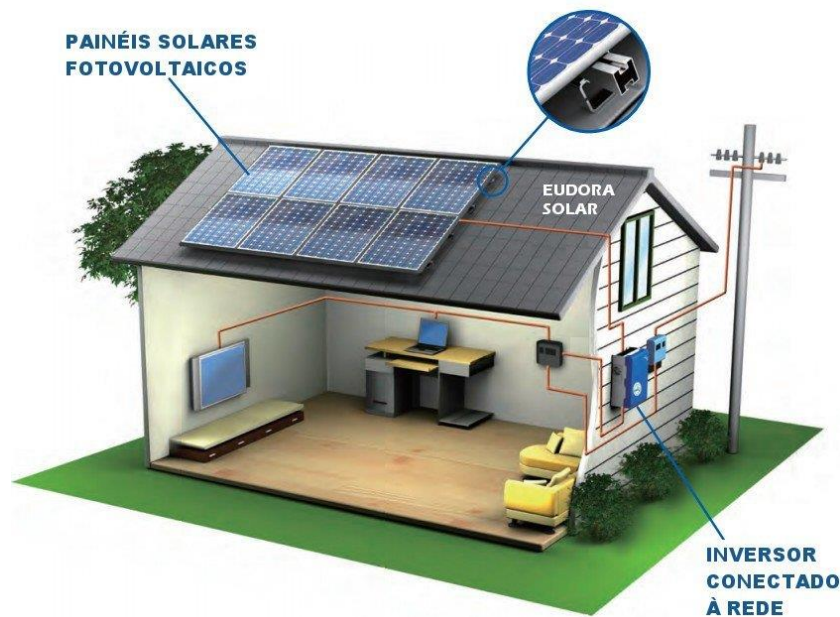


Figura 2.13: Sistema fotovoltaico ligado a rede elétrica [23].

## 2.4 Componentes do Sistema Fotovoltaico

Os componentes principais presentes na constituição de um sistema fotovoltaico são: o módulo fotovoltaico, o controlador de carga, bateria e o inversor [4].

Dos componentes do sistema fotovoltaico o painel fotovoltaico é considerado principal para esta dissertação, pois é o elemento estudado na parte prática desenvolvida no capítulo 5.

### 2.4.1 Painel Fotovoltaico

A célula apesar de ser o elemento base do sistema fotovoltaico, não é comercializada individualmente, é ligado em série e em paralelo para configurar o módulo ou painel fotovoltaico para ser comercializado [4].

A constituição do módulo fotovoltaico varia de acordo com o fabricante, mas em geral é uma bolacha composta pelas seguintes camadas: uma superfície plana de vidro, uma película anti-refletora para melhorar o comportamento do vidro face à radiação que o atravessa, a célula fotovoltaica e uma superfície de fundo que pode ser também de vidro ou de um polímero como por exemplo o poliéster. O número total de camadas na bolacha pode aumentar, dependendo do modelo e do fabricante. Para a proteção mecânica o painel é inserido numa estrutura metálica [4]. O painel fotovoltaico é apresentado na Figura 2.14.

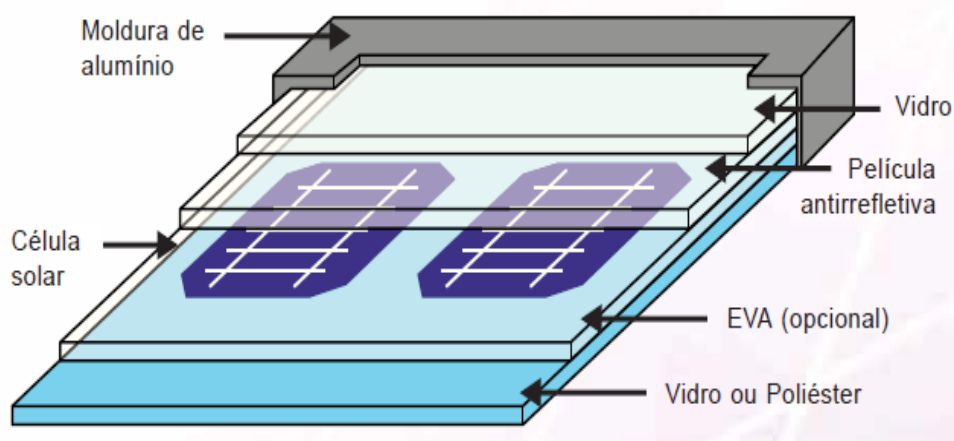


Figura 2.14: Componentes do painel fotovoltaico [24].

O efeito fotovoltaico ocorre quando dois materiais semicondutores diferentes ou dois do mesmo material, dopados de forma diferente, estão em estreito contacto e expostos à luz solar geram corrente elétrica [25].

A luz solar fornece elétrons com a energia necessária para deixar os limites dos materiais semicondutores, e atravessar a junção entre os dois materiais. O efeito fotovoltaico acontece com maior facilidade numa direção do que na outra, pois dá a um dos lados da junção uma carga negativa em relação ao outro lado da junção p-n, gerando assim uma tensão e uma corrente contínua [25]. O efeito fotovoltaico é apresentado na Figura 2.15.

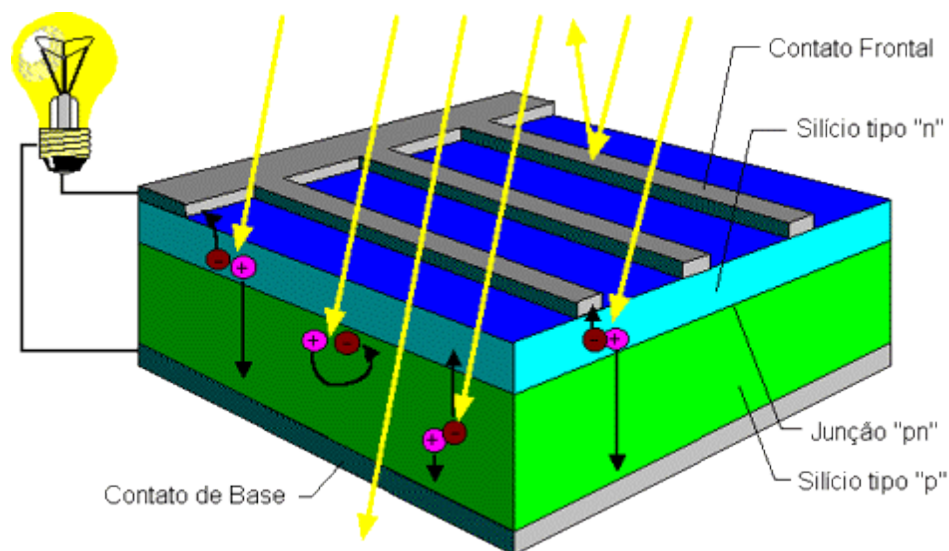


Figura 2.15: Efeito fotovoltaico [26].

A junção do painel fotovoltaico é um limite entre os dois materiais semicondutores dopados de modo diferente. Um dos elementos da junção é do tipo p excesso de buracos, e o outro é do tipo n excesso de elétrons. Na fronteira entre a área p e n existe um campo elétrico espontâneo que afeta os elétrons e buracos gerados, e determina a direção da corrente [3].

Para obter a energia por efeito fotoelétrico, tem de haver um movimento dirigido de fotoelétrons. Todas as partículas carregadas incluindo os fotoelétrons, sofrem um deslocamento devido à influência de um campo elétrico. O campo elétrico está localizado na área empobrecida da junção

entre os dois materiais semicondutores. Fotoeletrões e cavidades em semicondutores são acumulados em extremidades opostas, criando assim uma diferença de potencial [3]. Se a diferença de potencial é ligada um dispositivo recetor será gerada corrente elétrica. Desta forma, as células fotovoltaicas produzem uma tensão de 0,5 V a 0,7 V, com uma densidade de corrente na ordem de grandeza das dezenas de mA/cm<sup>2</sup>, dependendo da potência da radiação solar, bem como o espectro de radiação [3]. O funcionamento da célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2.16.

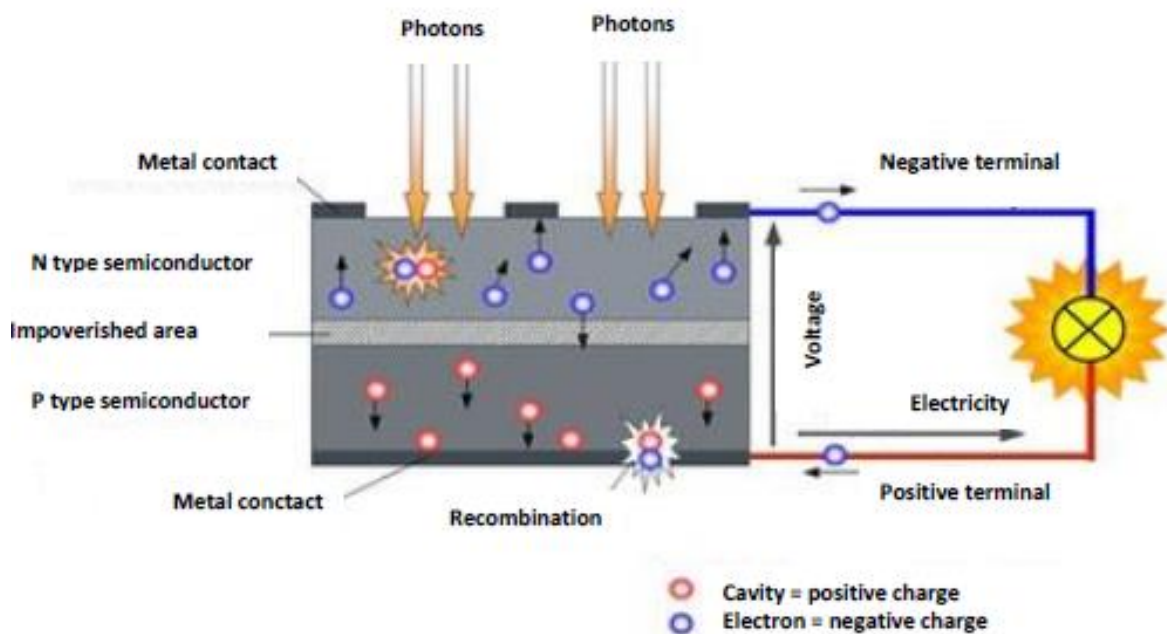


Figura 2.16: Funcionamento da célula fotovoltaica [3].

A tecnologia de células fotovoltaicas é classificada em três gerações, dependendo do material de base utilizado e a dimensão comercial [25]. A primeira geração, totalmente comercial, utiliza células baseadas em silício. A segunda geração utiliza células baseadas em películas finas. A terceira geração inclui tecnologias, tais como concentradores fotovoltaicos e células orgânicas fotovoltaicas que ainda não foram amplamente comercializadas [25].

## Primeira Geração de Células Solares: Células de silício cristalino

O silício cristalino é o material mais usado na indústria de painéis fotovoltaicos. É produzido a partir de bolachas de cristal de silício de alta qualidade, baseado em células de silício cristalino, que atualmente são os módulos que dominam o mercado atual. A tecnologia de silício foi responsável por cerca de 87 % da venda global de painéis fotovoltaicos no ano 2010. As células de silício cristalino são classificados em três tipos nomeadamente monocristalino, policristalina e fita de silício variando na forma como as bolachas de silício são fabricadas [25].

Tipo monocristalino (c-Si) ou também conhecido comercialmente como *single* cristalino (sc-Si) [25]. A eficiência de conversão para as células de silício monocristalino varia entre 13 % a 17 %. Com as células monocristalinas é possível converter a irradiância solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  para 140 W de potência elétrica usando uma célula com a superfície de  $1 \text{ m}^2$ . A vida útil das células é tipicamente de 25 a 30 anos [3]. A célula monocristalina é apresentada na Figura 2.17.



Figura 2.17: Células solar monocristalina (c-Si) [27].



Tipo policristalina (pc-Si) é por vezes referida como multi-cristalino (mc-Si). Com as células policristalinas é possível converter a irradiância solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  para  $130 \text{ W}$  de potência elétrica usando uma célula com a superfície de  $1 \text{ m}^2$ . A produção destas células é economicamente mais viável em comparação com a monocristalina. A eficiência de conversão da célula policristalina varia entre 10 % a 14 %, sendo ligeiramente inferior a eficiência de conversão da célula do tipo monocristalino. O tempo de vida útil da célula policristalina varia de 20 a 25 anos [25]. A célula policristalina é apresentada na Figura 2.18.

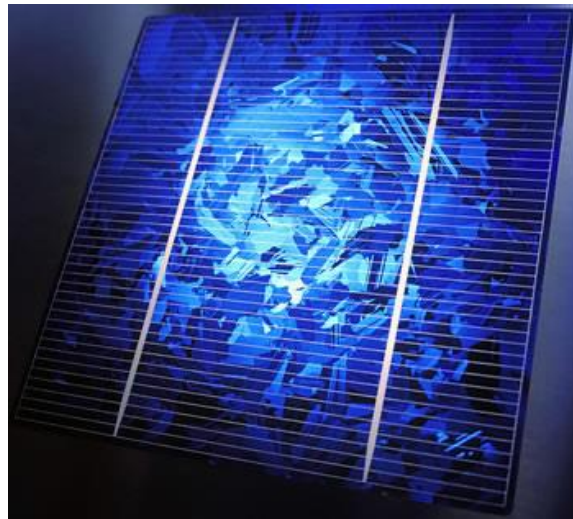


Figura 2.18: Célula solar policristalina (pc-Si) [28].

O tipo fita de silício (EFG *ribbon-sheet* c-Si) tem a vantagem de não precisar de ser fabricada no formato de bolacha, que permite diminuir as perdas do material no processo de corte. A eficiência da fita de silício é de cerca de 11 % [3].

## **Segunda Geração de Células Solares: Película fina**

Atualmente, as células fotovoltaicas de película fina ocupam no mercado da energia fotovoltaica 15 % e está constantemente a aumentar, reduzindo assim, a taxa de mercado adverso em relação ao módulo fotovoltaico de silício cristalino [3, 25].

Na tecnologia de película fina os módulos são fabricados empilhando camadas extremamente finas de materiais fotossensíveis num substrato barato tal como vidro, ou plástico. O processo de geração de módulos em tecnologia de película fina tem reduzido os custos de produção comparados com a tecnologia de silício cristalino, no entanto, a sua baixa eficiência de conversão, que varia entre 5 % a 13 %, acaba por equilibrar comparando com as células de silício cristalino. As películas finas podem ser facilmente integradas em componentes de construção e o tempo útil de vida varia entre 15 a 20 anos [25].

## **Terceira Geração de Células Solares: Concentradores e Células Organicas**

As células fotovoltaicas de terceira geração estão no início da comercialização, entretanto, existem quatro tipos de tecnologias de terceira geração nomeadamente o concentrador fotovoltaico, a célula solar *dye-sensitized*, a célula solar orgânica e os novos e emergentes conceitos de células solares [25].

O concentrador fotovoltaico (CPV) utiliza dispositivos óticos tais como lentes ou espelhos para concentrar a irradiância solar [25]. Para que este



processo seja eficaz, os concentradores fotovoltaicos devem contar com irradiância direta para maximizar o desempenho. As lentes precisam de ser permanentemente orientadas para o Sol, daí envolve o uso de um sistema de rastreamento, conhecido como *sun-tracking*. Como as lentes do concentrador atingem altas temperaturas, em alguns casos, é necessário um sistema de arrefecimento [25]. O sistema de concentração solar é apresentado na Figura 2.19.



Figura 2.19: Concentrador fotovoltaico (CPV) [29].

A célula solar *dye-sensitized* (DSSC) utiliza células solares eletroquímicas, que são baseadas em estruturas de semicondutores formados entre um ânodo fotossensível e um eletrólito. Numa célula solar *dye-sensitized*, os nano-cristais semicondutores servem como antenas que captam a luz solar, e a molécula de corante é responsável pela separação de cargas. As células solares *dye-sensitized* libertam elétrons a partir de, por exemplo, dióxido de titânio, cobertos por um pigmento que absorve luz [25]. A célula solar orgânica compete com as outras tecnologias, em algumas aplicações, pois o custo de fabricação continua a diminuir [30]. As células orgânicas podem ser aplicadas em folhas de plástico, o que indica que as células são leves e flexíveis, sendo ideais

para aplicações móveis e em superfícies irregulares [25]. As células orgânicas são particularmente úteis para aplicações portáteis, sendo estas aplicações um alvo do mercado para a tecnologia [25].

Os potenciais usos para esta tecnologia incluem carregadores de baterias para telemóveis, computadores portáteis, rádios, lanternas, brinquedos e qualquer dispositivo de mão que usa bateria. As células orgânicas também podem ser enroladas ou dobradas para armazenamento quando não estão em uso. Outra vantagem é que a tecnologia não apresenta riscos de toxicidade [25]. A tecnologia fotovoltaica de células solares orgânicas é apresentada na Figura 2.20.

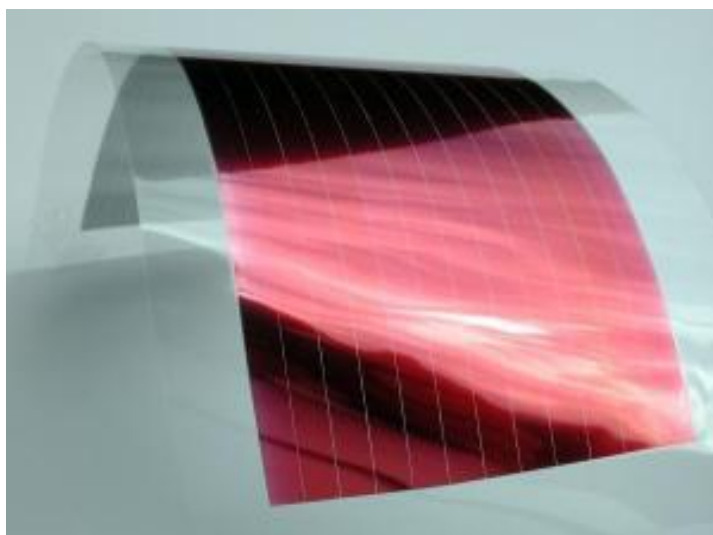


Figura 2.20: Célula solar orgânica [31].

Os novos e emergentes conceitos de células solares de terceira geração baseiam na utilização de pontos quânticos. Estas tecnologias poderiam atingir eficiências muito elevadas, superando as limitações termodinâmicas convencionais das células cristalinas. No entanto, estas abordagens de alta eficiência estão ainda em fase de investigação de materiais [25].

# CAPÍTULO 3: Recurso Solar

Este capítulo incide sobre o recurso solar e a posição privilegiada de Portugal em termos de disponibilidade de recurso solar e da produção estimada de energia a partir de sistemas fotovoltaicos em função da potência instalada nas diferentes regiões.



### **3 Recurso Solar**

Este capítulo incide sobre o recurso solar e a posição privilegiada de Portugal em termos de disponibilidade de recurso solar e da produção estimada de energia a partir de sistemas fotovoltaicos em função da potência instalada nas diferentes regiões.

#### **3.1 Radiação Solar**

A radiação solar representa a quantidade de energia solar que é irradiada sobre uma unidade de superfície num determinado momento, e normalmente expressa em valores horários, mas muitas vezes aparece também como radiação diária, radiação mensal e anual, variando com o intervalo de tempo. A irradiância é a densidade média da potência radiante, que é igual à razão entre a potência da radiação solar e a superfície do plano perpendicular a direção desta radiação, e é expressa em  $W/m^2$  [32].

O Sol fornece energia na forma de radiação. Na composição do Sol existem vários elementos químicos, onde em maior quantidade está presente o hidrogénio e o hélio, e em menor quantidade, o oxigénio, o carbono, o ferro, o néon, o azoto, o magnésio e o enxofre [32].

No interior do Sol acontecem reações nucleares onde o hidrogénio é transformado em hélio por um processo de fusão libertando grande quantidade de energia, atingindo temperaturas da ordem dos 15 milhões °C. A irradiância que surge das reações nucleares no interior do Sol, acima da atmosfera terrestre, é conhecida como a constante

solar e é igual a  $1366 \text{ W/m}^2$ . O valor da constante solar é reduzido em cerca de 30% no seu caminho para a Terra, devido a interação com gases e vapores na atmosfera dando uma irradiância na superfície da Terra de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$  num dia claro [32].

A radiação solar incidente sobre uma superfície dentro da atmosfera terrestre tem três componentes: a radiação direta, proveniente diretamente do Sol; a radiação difusa, proveniente do firmamento exceto do disco solar; e a radiação refletida no chão, dita albedo ou nas superfícies mais próximas. Parte da radiação é absorvida ao atravessar a atmosfera e também é refletida nas nuvens, assim, a radiação que chega ao nível do mar é menor que a radiação acima da atmosfera [16]. As três componentes da radiação solar são apresentados na Figura 3.1.

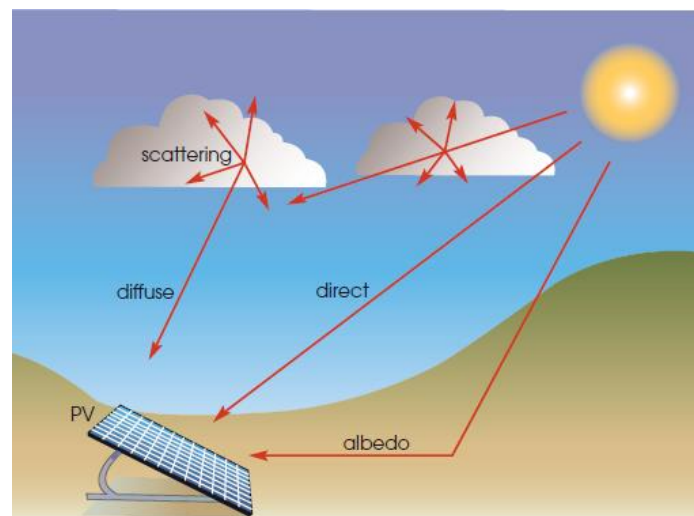


Figura 3.1: Componentes da radiação solar incidente [32].

A potência elétrica a partir das células fotovoltaicas depende do efeito combinado das três componentes nomeadamente direta, difusa, e albedo. Sob Sol forte, a componente direta da radiação é normalmente maior em comparação com as outras duas componentes, mas se houver

grande quantidade de nuvens, especialmente no Inverno, a componente difusa pode dominar a direta, pois as nuvens também causam o bloqueio, ou a atenuação, da radiação direta. A contribuição da componente de albedo é pequena, mas pode ser muito significativa [32].

O percurso ótico da radiação através da atmosfera até ao nível do mar, normalizado pelo menor percurso, é dito de massa de ar (*Air Mass - AM*). A ausência de modificação na irradiância solar é dito de massa de ar zero ou AM0. A massa de ar AM0 é a considerada nas aplicações espaciais. A massa de ar AM1 é a que corresponde ao percurso perpendicular sobre a superfície terrestre. A massa de ar AM1.5 é a considerada para o espectro de referência para o teste de painéis fotovoltaicos na superfície terrestre, corresponde à distribuição espectral de irradiância que chega a uma superfície inclinada a 37° virada a Sul com um ângulo de zénite de 48.19° [16, 32]. O espectro para a radiação solar AM0 e para a radiação de referência AM1.5 são apresentados na Figura 3.2.

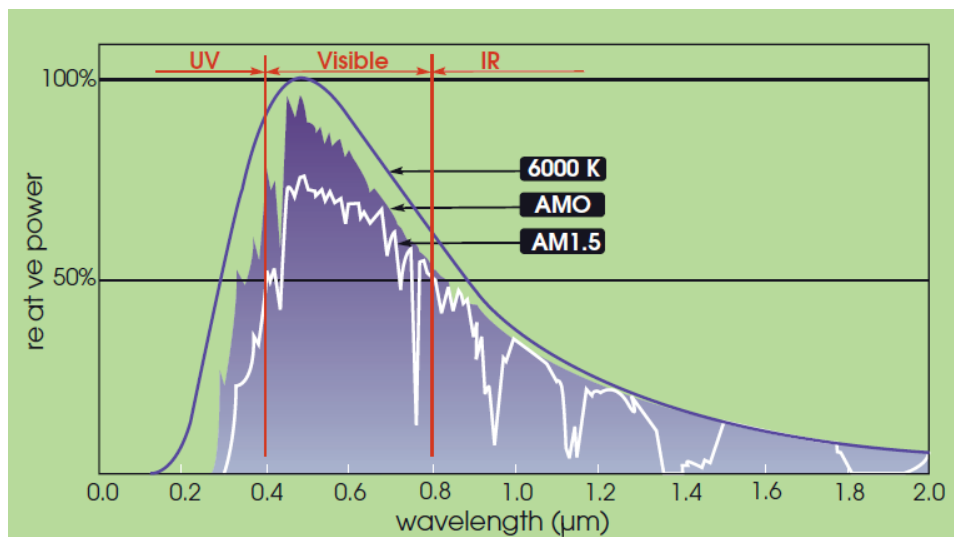


Figura 3.2: Distribuição espectral da energia solar [32].

Para o teste de painéis fotovoltaicos a funcionar sobre a superfície terrestre, as condições de referência (*Standard Test Conditions – STC*) são definidas para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25^\circ\text{C}$  de temperatura das células e com a distribuição espectral do espectro de radiação global AM1.5 definido pela norma IEC 60904-3 [16].

A irradiância solar pode ser medida através de um piranómetro, ou de um sensor fotovoltaico, ou ainda indiretamente através da análise das imagens de satélites [33].

O piranómetro é um instrumento de medição de elevada precisão, que mede a irradiância solar num plano horizontal [33]. O piranómetro é apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3: Piranómetro do LNEG.

Os sensores fotovoltaicos são células solares que fornecem corrente elétrica proporcional à irradiância solar. São normalmente utilizadas células de silício monocristalino, mas também pode ser utilizado um sensor com células silício amorfo, silício policristalino, e ainda com células de cádmio e telúrico [33].



### 3.2 Energia Fotovoltaica em Portugal

Portugal é um dos países da União Europeia com grande exposição à radiação solar [34]. A radiação solar média para Portugal é apresentada na Figura 3.4.

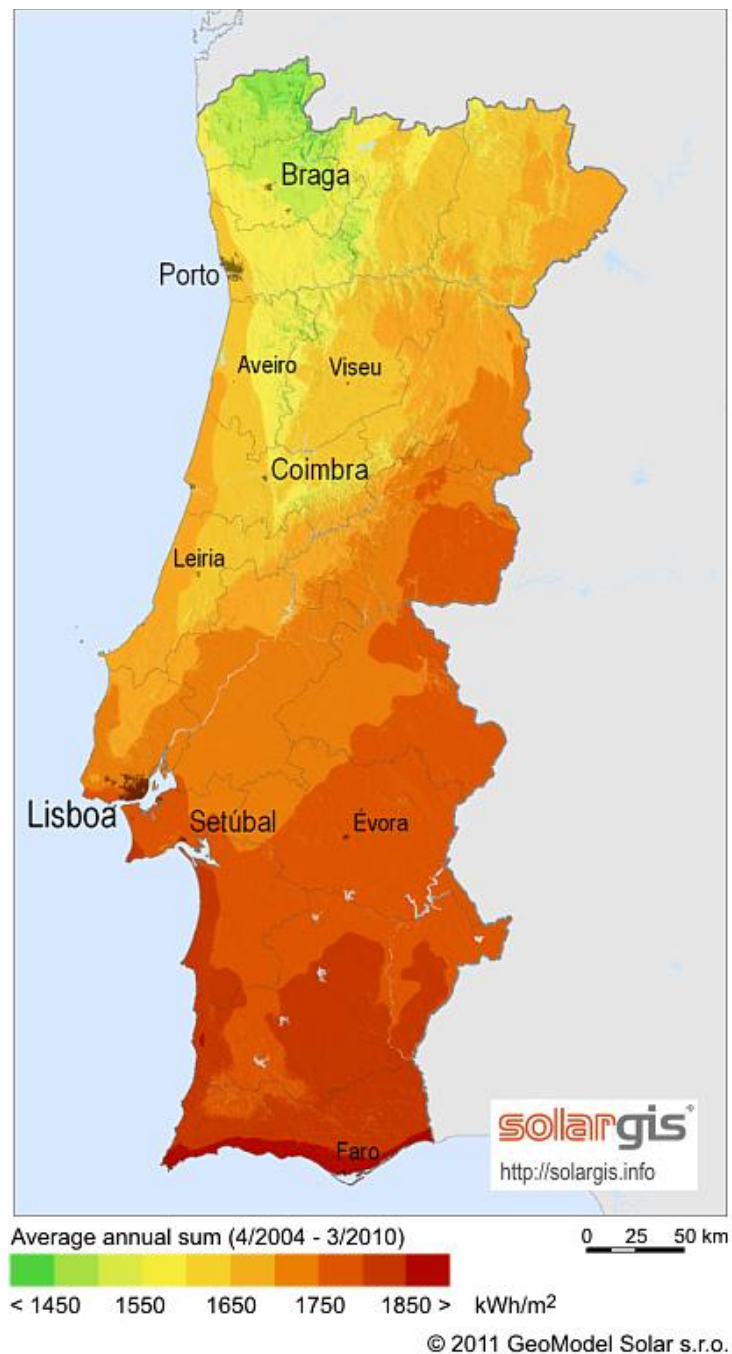


Figura 3.4: Radiação solar média para Portugal [34]

A radiação solar média que chega a uma superfície horizontal Figura 3.4, varia entre o valor de 1450 kWh/m<sup>2</sup> e o valor de 1850 kWh/m<sup>2</sup>. Os melhores locais em Portugal continental para a instalação de sistemas fotovoltaicos é no Alentejo interior e a zona Este do Algarve. Em número de horas equivalentes à potência nominal, dito de NEP's, para a inclinação ótima, os sistemas fotovoltaicos na zona menos favorável do país irão produzir 1300 h equivalentes e para a zona mais favorável o valor das NEP's para a mesma inclinação será de 1550 h [33].

Em Portugal, a proporção da radiação solar difusa durante um ano, é da ordem dos 40 % e da radiação direta é da ordem dos 60 %. A radiação direta e difusa diárias durante o período de um ano em Lisboa [33] são apresentadas na Figura 3.5.

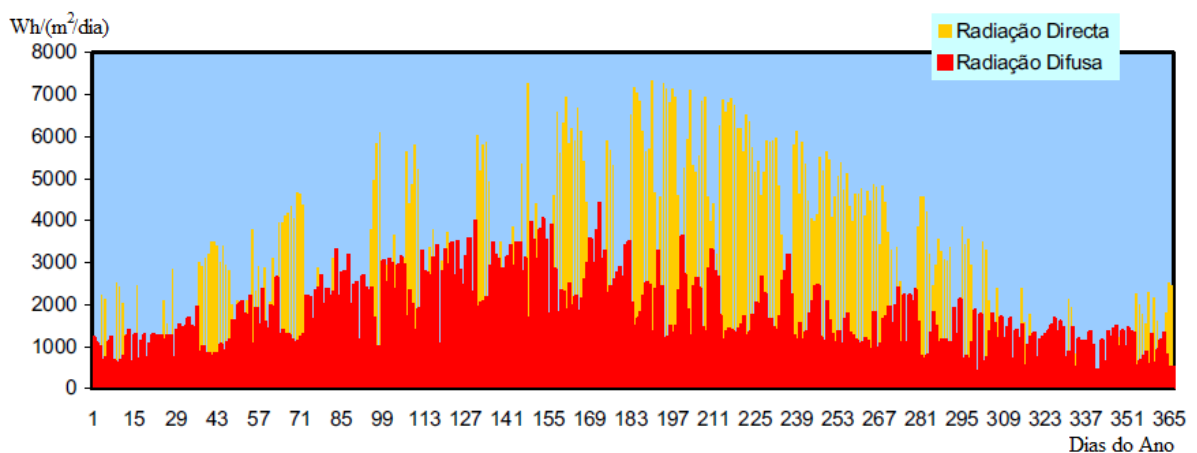


Figura 3.5: Radiação direta e difusa (Adaptado de [33]).

A maior componente da radiação solar obtida numa superfície perpendicular em relação a direção dos raios do Sol. Previsivelmente, para atingir a maior radiação em qualquer instante e local, deve ser constantemente acompanhado o movimento do Sol [33].

O painel fotovoltaico é um objeto estacionário e pode ser fixado a um telhado, no entanto, o Sol não é estacionário altera constantemente a sua posição em relação à Terra, desde a manhã até a noite dificultando, assim, a correta orientação do painel [33].

Garantir que um painel fotovoltaico ou uma matriz fotovoltaica é corretamente orientada e posicionada com relação à luz solar direta em todos os momentos do dia é um desafio. Para além da correta orientação dos painéis, para maximizar a produção de energia elétrica, é necessário ter muitas horas de luz solar por dia, e grande intensidade ou brilho da luz solar [33].

Quando o Sol está baixo no céu, durante os meses de inverno, a orientação dos painéis fotovoltaicos deve ser mais vertical pois a radiação solar atravessa uma camada maior da atmosfera para alcançar o painel e, portanto, a sua intensidade é reduzida pelo efeito de dispersão e absorção da atmosfera e nuvens. Nos meses de verão, quando o Sol está mais alto no céu a radiação solar é mais direta e, portanto, mais forte, pois tem menos distância para viajar através da atmosfera da Terra e a orientação do painel é mais horizontal [35].

A orientação do painel fotovoltaico está relacionada com a definição do azimute. O painel deve ser virado para o equador terrestre, i.e., de frente para o sul no hemisfério norte, ou para o norte no hemisfério sul, de modo que durante o dia a sua orientação permita que o painel apanhe a maior quantidade possível de radiação solar [35].

O painel ou a matriz fotovoltaica pode ser simplesmente apontado para o Sul ou para o Norte usando uma bússola, encontrando o ângulo central,

em azimute ou, mais precisamente, posicionar os painéis relativos ao meio-dia solar [35].

O meio-dia solar é a posição mais alta que o Sol atinge desde que nasce até o pôr-do-sol. O meio-dia-solar é diferente das 12 h ou meio-dia como uma medida de tempo. Geralmente o meio-dia solar ocorre entre 12 h e 14 h, dependendo da localização [35].

A inclinação do painel fotovoltaico está relacionada com a definição do zénite ou elevação do painel. Uma vez que a melhor posição azimutal é encontrada, o próximo parâmetro, que é a chave para a produção de eletricidade é a elevação do painel [35].

Para Lisboa, com uma latitude de  $38,7^\circ$ , a inclinação ótima é da ordem dos  $34^\circ$  [16]. No entanto,  $34^\circ$  de inclinação não é tão crítico no que diz respeito à inclinação dos painéis fotovoltaicos, pois, com um ângulo de inclinação de cerca de  $45^\circ$  em relação aos raios solares, o painel ainda recebe mais do que 75% de energia por unidade de superfície. Um desalinhamento de até  $15^\circ$  positivo ou negativo faz pouca diferença na saída do painel [35].

É muito importante quanto o posicionamento e alinhamento de um painel fotovoltaico ou uma matriz que nenhuma parte dos painéis estejam sombreadas, pois, é necessário que toda a radiação solar chega ao painel, evitando sombras sobre os painéis a qualquer hora do dia ou do ano [35].

O desempenho de um painel fotovoltaico ou de uma matriz fotovoltaica é afetado se todas as suas células não são igualmente iluminadas, i.e., se algumas células estão parcialmente sombreadas [36] como apresentado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Sombras no Painel Fotovoltaico [37].

A sombra caindo sobre o painel fotovoltaico afeta negativamente a estabilidade do sistema, pois os módulos localizados parcialmente na sombra não têm uma produção linear de eletricidade, o que resulta em variações de tensão. Se uma única célula de um módulo está localizada na sombra pode reduzir a potência de todo o módulo para 75% [3].

Nos casos em que o sombreamento é causado por resíduos de neve, poeiras ou folhas sobre os módulos fotovoltaicos, a remoção deste tipo de sujeira é feita quase naturalmente desde que os módulos fotovoltaicos sejam posicionados com um ângulo mínimo de inclinação na ordem dos 12°. Na verdade, a existência de um ângulo mínimo de inclinação funciona como um sistema auto limpeza, já que os resíduos são facilmente removidos através da água da chuva [38].



# CAPÍTULO 4: Modelação

Neste capítulo é estudado o modelo do sistema fotovoltaico; a configuração em *Simulink* do sistema simulado; e a qualidade de energia, i.e., o comportamento harmónico representado pelo THD e a DFT.





## 4 Modelação

A conversão da energia solar disponível através dos painéis de um sistema fotovoltaico em energia elétrica, constitui um estudo teórico realizado no âmbito da computação.

Em consequência do interesse em aproveitar a energia solar convertendo em energia elétrica, tem sido incrementada a investigação no âmbito da energia fotovoltaica e nesse âmbito o estudo do comportamento de um sistema fotovoltaico é uma linha de investigação considerada importante.

Neste trabalho é estudado um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica. O sistema fotovoltaico é constituído por painéis fotovoltaicos de silício policristalino, estando os painéis fotovoltaicos ligados através de interfaces de electrónica de potência ao sistema de energia elétrica.

O funcionamento dos painéis fotovoltaicos pode ser descrito por uma curva característica corrente-tensão, definida para condições de referência (*Standard Test Conditions*, STC), i.e., temperatura de 25 °C equivalente a 298,16 K e irradiância incidente de 1000 W/m<sup>2</sup> e com o espectro de radiação AM1.5 [16].

### 4.1 Modelo Matemático

O modelo matemático da célula e do painel considerados neste trabalho é o modelo simplificado, i.e., o modelo ideal constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo.

O modelo equivalente da célula fotovoltaica é apresentado na Figura 4.1.

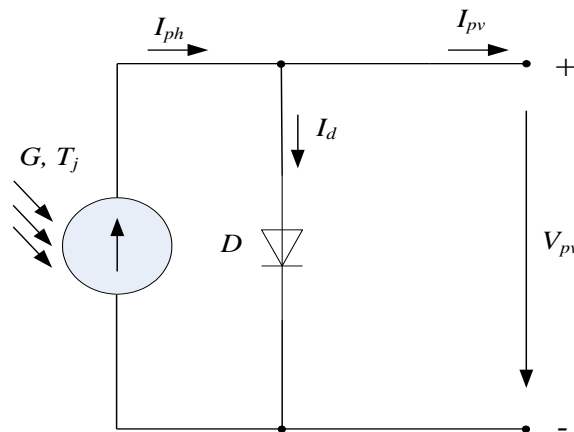


Figura 4.1: Modelo equivalente da célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é constituída por uma fonte de corrente  $I_{ph}$  ligada em paralelo a um díodo  $D$ . A fonte de corrente  $I_{ph}$  reproduz a corrente elétrica unidirecional obtida pela radiação luminosa  $G$  incidente sobre a superfície ativa da célula, i.e., a corrente fotovoltaica. A junção p-n também funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional  $I_d$  que depende da tensão  $V_{pv}$  aos terminais da célula. Aplicando a lei dos nós  $I_{pv}$  é dada por:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (4.1)$$

O potencial térmico da célula  $V_T$  é dado por:

$$V_T = \frac{K T_j}{q} \quad (4.2)$$

sendo  $K$  a constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),  $T_j$  a temperatura absoluta da célula em K,  $q$  a carga elétrica do electrão ( $1,602 \times 10^{-19}$  C).

A corrente  $I_d$  é dada por:

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_{pv}}{m V_T}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

sendo  $I_0$  a corrente inversa máxima de saturação do díodo,  $m$  o fator de idealidade do díodo ( $m = 1$  díodo ideal e  $m > 1$  díodo real). A corrente  $I_{pv}$  considerando (4.1) é dada por:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv}}{m V_T}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Considerando (4.4) em função de  $V_{pv}$  é dada por:

$$V_{pv} = m V_T \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{pv}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.5)$$

A corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  é o valor máximo da corrente de saída, i.e.,  $V_{pv} = 0$ . O valor de  $I_{sc}$  é uma característica da célula em condições STC, sendo um parâmetro fornecido pelo fabricante [16]. Pelo que é válida a expressão dada por:

$$I_{pv} = I_{ph} = I_{sc} \quad (4.6)$$

A tensão em circuito aberto  $V_{oc}$  é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, i.e.,  $I_{pv} = 0$ . O valor de  $V_{oc}$  é uma característica da célula em STC, sendo um parâmetro fornecido pelo fabricante [16], sendo em condições diferentes de STC dado por:

$$V_{pv} = V_{oc} = m V_T \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (4.7)$$

O fator de idealidade  $m$  do díodo [15] pode ser calculado pela expressão dada por:

$$m = \frac{V_{MPP}^* - V_{oc}^*}{V_T^* \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}^*}{I_{sc}^*}\right)} \quad (4.8)$$

Sendo o  $I_{sc}^*$ ,  $V_{oc}^*$ ,  $I_{MPP}^*$ ,  $V_{MPP}^*$ , o conjunto dos valores fornecidos pelos fabricantes dos painéis fotovoltaicos para as condições de referência, i.e., (*Standard Test Conditions* - STC). Os valores são obtidos com recurso a testes que permitem traçar as curvas I-V e P-V.

## 4.2 Caraterísticas de Células Fotovoltaicas

Os fabricantes dos painéis fotovoltaicos fornecem um conjunto de parâmetros caraterísticos que para além da corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  a tensão em circuito aberto  $v_{oc}$ , a potência máxima, i.e., ponto de potência máxima  $P_{MPP}$ , a corrente e tensão no ponto de potência máxima  $I_{MPP}$  e  $V_{MPP}$ , anteriormente mencionadas, também fornecem os coeficientes de variação da corrente, da tensão e da potência com a temperatura, respetivamente  $\alpha_{sc}$ ,  $\beta_{oc}$  e  $\gamma_{MPP}$  [16]. A curva I-V de um painel fotovoltaico é obtida fazendo variar a carga aos seus terminais, através da ligação de um equipamento com condensadores, sendo os condensadores carregados de forma controlada. Estando o condensador descarregado, a corrente gerada pelo painel é carregada no condensador e no instante inicial a corrente é máxima e igual a  $I_{sc}$ . Estando o condensador carregado, i.e., a tensão aos terminais do condensador é máxima e igual a  $v_{oc}$  [16], pelo que a corrente de saída da célula é nula.

O Fator de Forma dito de *Fill Factor* é o parâmetro que é calculado dado pela expressão [16] dado por:

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4.9)$$

O valor do  $FF$  tem a ver com a forma da curva I-V, o painel será tanto melhor quanto maior for a proximidade entre este parâmetro e a unidade. Os valores para o  $FF$  variam não só para as diferentes tecnologias, mas também para os painéis da mesma tecnologia, sendo neste caso a variação menos acentuada [16]. Ainda variam com o envelhecimento das células fotovoltaicas.

### Configuração do sistema simulado

O sistema fotovoltaico em estudo foi simulado em *Matlab/Simulink*. O método de iteração utilizado para a resolução das equações do sistema é o Newton Raphson, possibilitando uma boa precisão. Este é um método simples e robusto e é reconhecido como um bom método genérico para a solução de sistemas de equações. O sistema simulado é constituído pelos blocos denominados: de  $VT$ ; de  $V$ ; de  $m$  e do  $IO$ . A configuração do sistema simulado é apresentada na Figura 4.2.

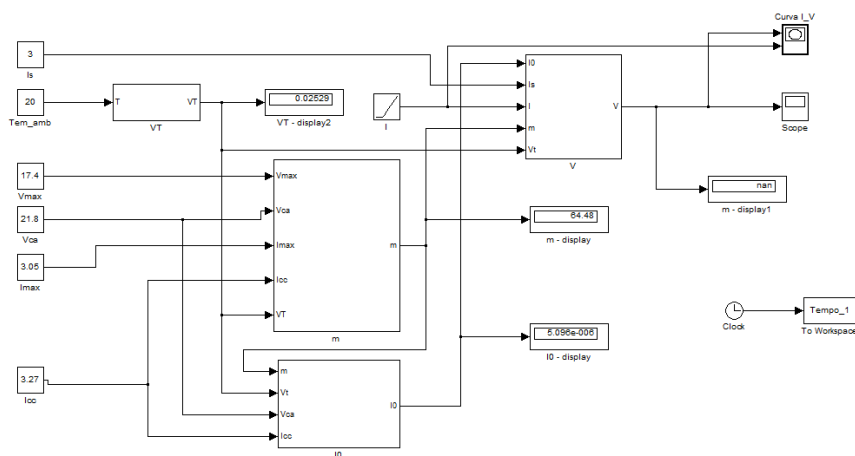


Figura 4.2: Configuração em *Simulink* do sistema simulado.

As configurações dos blocos mais importantes são seguidamente descritas.

### Potencial térmico da célula

Alguns dos parâmetros numéricos utilizados correspondem a constantes características da junção  $p-n$  para o silício monocristalino. O potencial térmico da célula é um bloco com uma entrada e uma saída. A entrada é a temperatura da célula  $T_j$  indicada por  $T$ . A saída é o potencial térmico da célula  $V_T$  indicado por  $VT$ . O bloco do potencial térmico corresponde à modelação através de (4.2) é apresentado na Figura 4.3.

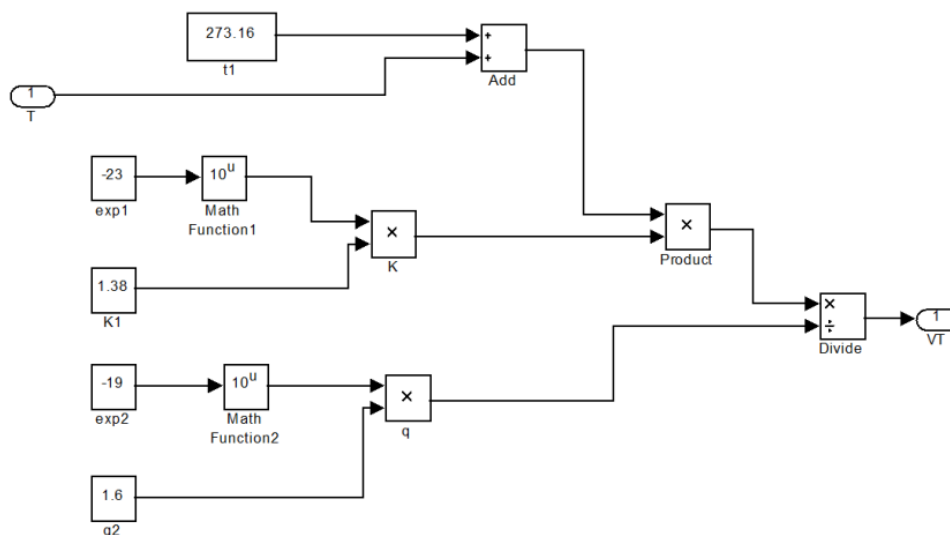


Figura 4.3: Configuração em *Simulink* do bloco do  $V_T$ .

### Tensão aos terminais da célula

É um bloco com cinco entradas e uma saída. As entradas são a corrente inversa máxima de saturação do diodo  $I_0$  indicada por  $I_0$ , a fonte de

corrente  $I_{ph}$  indicada por  $I_s$ , a corrente  $I_{pv}$  indicada por  $I$ , a fator de idealidade do diodo  $m$  indicado por  $m$  e o potencial térmico da célula  $V_T$  indicado por  $V_t$ . A saída é a tensão aos terminais da célula  $V_{pv}$  indicado por  $V$ . O bloco da tensão aos terminais da célula corresponde à modelação através de (4.5) é apresentado na Figura 4.4.

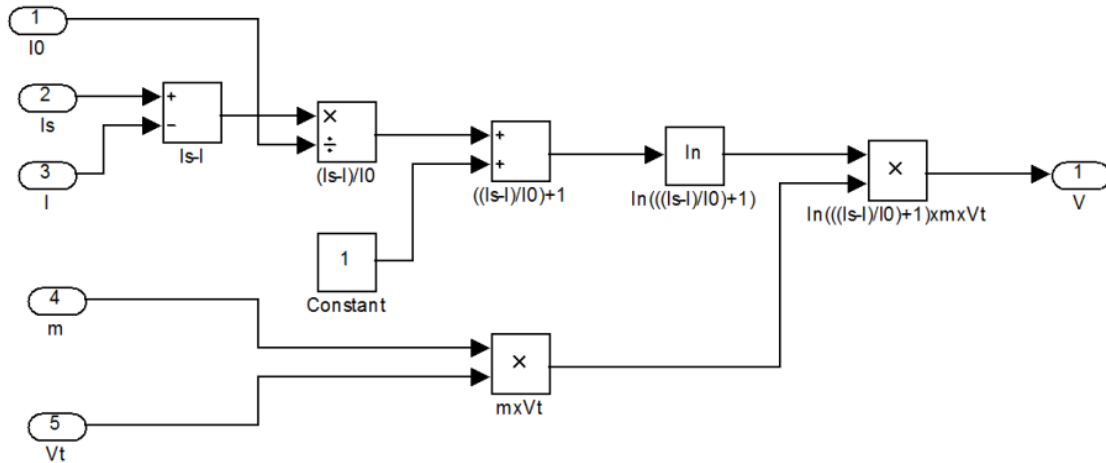


Figura 4.4: Configuração em *Simulink* do bloco  $V_{pv}$ .

### 4.3 Qualidade de Energia

A qualidade de energia, nomeadamente a qualidade da onda de tensão e de corrente está relacionada com as características técnicas da eletricidade num dado ponto da rede. Os principais parâmetros elétricos e os indicadores de qualidade da energia estão descritos nas normas EN 50160-2001, IEC 61000-4-7, IEEE Standard 519-1992 e IEEE Standard 1547-2003, sendo agrupados segundo as aplicações [16].

A versão portuguesa da Norma Europeia EN 50160 define a tensão harmónica  $U_h$  como a tensão sinusoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da tensão de alimentação [1, 2].

A norma indica que, em períodos semanais, 95% dos valores eficazes médios (em 10 minutos) de cada tensão harmónica não devem exceder os valores que estão indicados na Tabela 4.1 [2].

Tabela 4.1: Valores máximos das tensões harmónicas

<b>Harmónicas ímpares</b>				<b>Harmónicas pares</b>	
<b>Não múltiplas de 3</b>		<b>Múltiplas de 3</b>			
Harmónica	$U_h$ (%)	Harmónica	$U_h$ (%)	Harmónica	$U_h$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
...		...		...	
25	1,5	21	0,5	24	0,5

A mesma norma estabelece que o THD para a tensão não deve ultrapassar o valor de 8% [2]. A interface de eletrónica de potência utilizada para ligar um sistema fotovoltaico a rede deve ter a tensão e a frequência de saída compatíveis com a frequência e tensão da rede [39].

A interface eletrónica terá, ainda, de cumprir os padrões estabelecidos nas IEEE 1547, IEC 61727 e EN 61000-3-2 que lidam com questões como a qualidade da energia, deteção de ilhamento, a quantidade de corrente injetada na rede e distorção harmónica.

Os limites de correntes harmónicas que podem ser injetados na rede elétrica, assim como os diferentes limites de THD [39] são apresentados na Tabela 4.2.



Tabela 4.2: Limites de correntes harmônicas (adaptado de [39]).

	<b>IEC 61727</b>		<b>IEE 1547</b>	
<b>Potência Nominal</b>	<b>10kW</b>		<b>30kW</b>	
Limite de corrente Harmónica	Componentes Harmónicas	THD	Componentes Harmónicas	THD
	3-9	4%	3-9	4%
	11-15	2%	11-15	2%
	17-21	1,5%	17-21	1,5%
	23-33	0,6%	23-33	0,6%
			(>)35	0,3%
THD Máxima	5%		5%	

Neste trabalho é avaliada a qualidade da onda de corrente e a qualidade da onda de tensão, nomeadamente são avaliadas as harmônicas presentes na corrente injetada na rede elétrica, na medida em que o sistema fotovoltaico injeta a energia produzida sobre uma rede considerada com potência de curto-circuito não infinita, sobre a qual não se tem o controlo da qualidade da forma da onda de tensão. Assim, neste trabalho a qualidade da energia é então definida pela qualidade da onda de corrente injetada na rede, sendo a onda de tensão utilizada para observar o conteúdo harmónico que eventualmente não resulta da ligação do sistema de estudo a rede. Contudo, visto que, é de admitir uma potência de curto-circuito não muito elevada não é possível considerar os conteúdos harmónicos injetados via corrente elétrica de forma conclusiva como não tendo tido influência sobre a onda de tensão.

O ponto de entrega é o ponto da rede onde se faz a entrega da energia elétrica à instalação do cliente ou a outra rede. No ponto de entrega, os operadores da rede devem assegurar de forma continuada aos consumidores que utilizem o sistema trifásico, uma tensão sinusoidal de amplitude e frequência constantes e desfasamento de 120° entre fases.

Desvios relativamente a esta forma de onda pura, ou a sua ausência, implicam uma redução da qualidade da onda de tensão, i.e., a presença de harmónicas na corrente e em consequência uma redução da qualidade da energia.

A presença de harmónicas é avaliada pelo valor do THD. O THD deve ser mantido tão baixo quanto possível, melhorando assim, a qualidade da onda de corrente ou da onda de tensão injetada na rede [2], sendo as harmónicas reconhecido como um problema que afeta a qualidade da onda de corrente ou da onda de tensão injetada na rede pelos modernos sistemas fotovoltaicos.

O THD surgiu como consequência da necessidade de quantificar numericamente as harmónicas presentes na tensão ou na corrente num dado ponto da rede. É uma grandeza adimensional que caracteriza um sinal deformado [2].

O THD pode ser expresso em percentagem da componente fundamental desse sinal [2], sendo dado por:

$$\text{THD (\%)} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{H=2} X_H^2}}{X_F} \quad (4.10)$$

sendo  $H$  o índice da harmónica do sinal,  $X_H$  o valor eficaz da harmónica  $H$  (excluindo a componente fundamental), e  $X_F$  o valor eficaz da componente fundamental do sinal. Os máximos valores admissíveis para o THD são dados pelas normas internacionais, podendo ser aplicado à tensão e à corrente. No caso deste trabalho, o THD é a grandeza utilizada para caraterizar o conteúdo harmónico da onda de corrente injetada na rede [2].

O THD está associado ao espectro harmónico, nomeadamente à Transformada Discreta de Fourier (*Discret Fourier Transform*, DFT). O espectro harmónico é um elemento da análise da qualidade da energia, na medida em que não é mais que a decomposição de um sinal nas suas componentes harmónicas, representadas na forma de um gráfico de barras, no domínio da frequência [2]. O comportamento harmónico computado pela DFT [16] é dado por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi kn/N} x(n) \quad \text{para } k = 0, \dots, N-1 \quad (4.11)$$

A fase correspondente a cada uma das harmónicas [2] é dada por:

$$\angle(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\Im X(k)}{\Re X(k)}\right) \frac{180}{\pi} \quad \text{para } k = 0, \dots, N-1 \quad (4.12)$$

em que  $x(n)$  é o sinal de entrada e  $X(k)$  são a amplitude e a fase das diferentes harmónicas, i.e., componentes sinusoidais de  $x(n)$  [2].



# CAPÍTULO 5: Casos de Estudo

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações, cuja formulação que descreve o comportamento do painel fotovoltaico foi estudada nos capítulos anteriores a simulação de uma célula de silício monocristalino, a validação dos resultados da simulação com os resultados experimentais de um painel de silício monocristalino e a avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico de silício policristalino ligado à rede elétrica.



## 5 Casos de Estudo

Neste capítulo são apresentados três conjuntos de ensaios. Os modelos do comportamento dos sistemas simulados foram formulados nos capítulos anteriores, e o método de iteração utilizado para a solução das equações que traduzem o comportamento do sistema fotovoltaico no âmbito deste trabalho foi método de *Newton Raphson*, com um passo de iteração de 0,001 ms.

O primeiro conjunto de ensaios foi efetuado usando o *Matlab/Simulink*. O ensaio consiste em observar o comportamento da célula fotovoltaica mediante simulação. O segundo conjunto de ensaios consiste em validar o resultado da simulação, em *Simulink*, de um painel fotovoltaico mediante comparação entre a curva I-V nas condições STC do painel simulado com a curva obtida experimentalmente utilizando um painel de silício monocristalino. O terceiro conjunto de ensaios consiste na avaliação a qualidade de energia de um sistema fotovoltaico, constituído por painéis de silício policristalino, ligado à rede elétrica.

### 5.1 Primeiro Conjunto de Ensaios

Neste subcapítulo a célula fotovoltaica foi simulada no intervalo de 0 s a 10 s. O objetivo deste ensaio é observar o comportamento da célula fotovoltaica, mediante simulação, fazendo variar a irradiância luminosa ou fazendo variar a temperatura. A irradiância luminosa  $G$  incidente sobre a célula de silício monocristalino tem valores compreendidos entre  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $250 \text{ W/m}^2$ . A corrente gerada por uma célula fotovoltaica depende da irradiância que sobre ele incide, enquanto que a tensão

praticamente não varia [16]. A influência da irradiância na curva I-V da célula fotovoltaico é apresentada na Figura 5.1 [17].

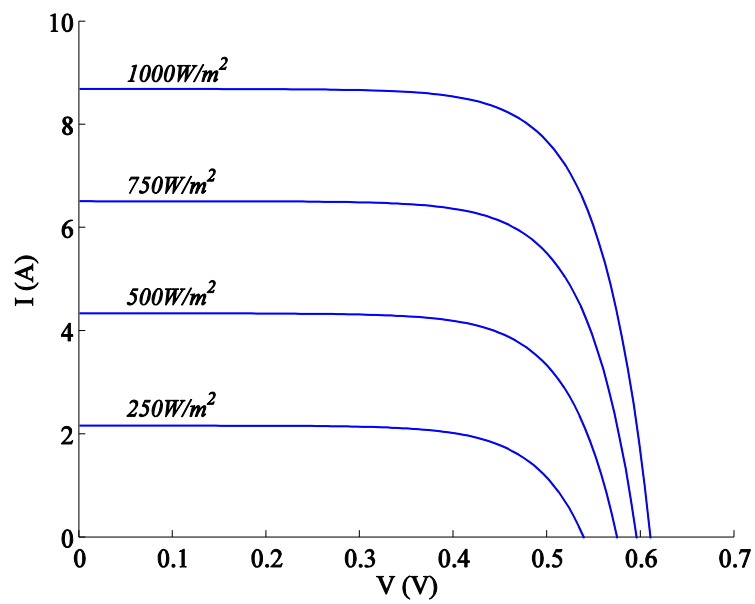


Figura 5.1: Influência da irradiância na curva I-V.

A influência da irradiância na curva P-V da célula fotovoltaico é apresentada na Figura 5.2 [17].

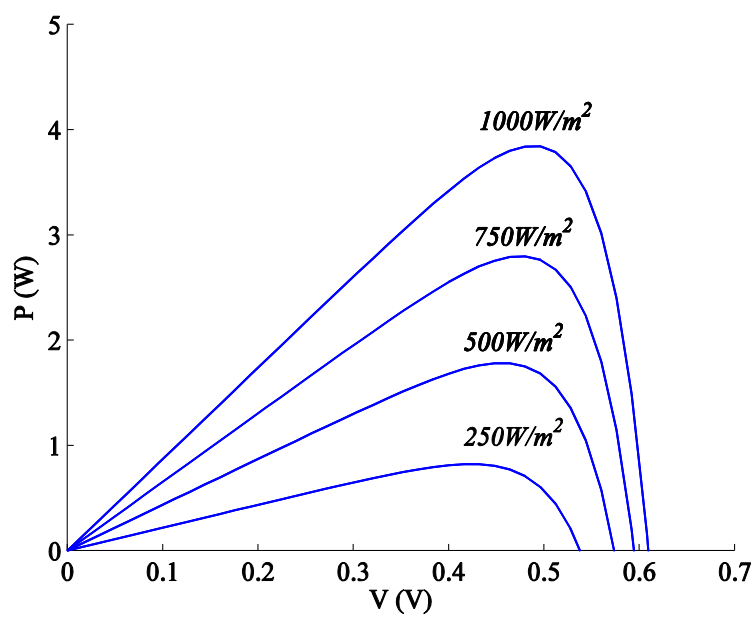


Figura 5.2: Influência da irradiância na curva P-V.



A temperatura da célula  $T_j$  tem valores compreendidos entre  $0\text{ }^\circ\text{C}$  e  $75\text{ }^\circ\text{C}$ . O aumento da temperatura da célula afeta principalmente a tensão de circuito aberto, que irá diminuir à medida que a temperatura aumenta [16]. A influência da temperatura na curva I-V da célula fotovoltaica é apresentada na Figura 5.3 [17].

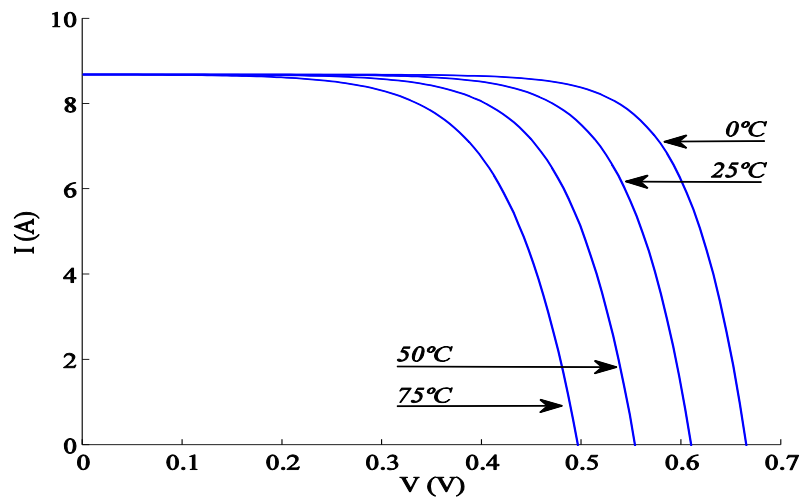


Figura 5.3: Influência da temperatura na curva I-V.

A influência da temperatura na curva P-V da célula fotovoltaica é apresentada na Figura 5.4 [17].

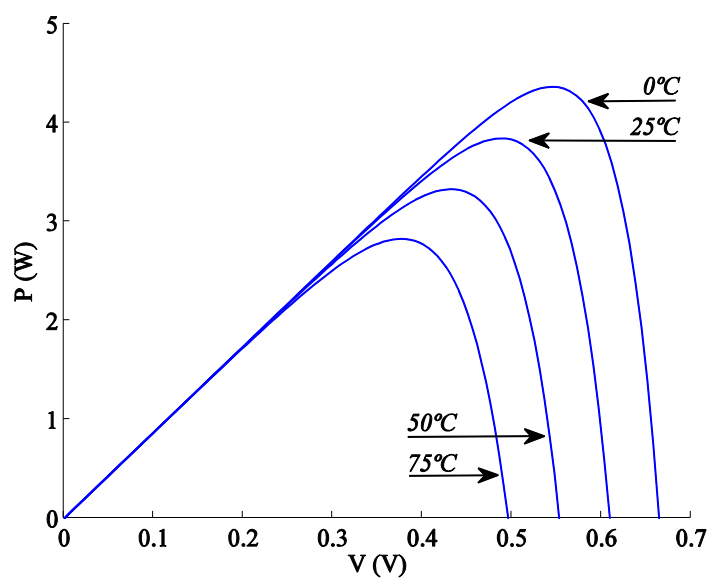


Figura 5.4: Influência da temperatura na curva P-V.

A observação das curvas permite concluir que estas apresentam um comportamento coerente com os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento do sistema levavam a prever.

## 5.2 Segundo Conjunto de Ensaio

Neste subcapítulo é feita a validação dos resultados da simulação com os resultados experimentais para o painel fotovoltaico de silício monocristalino. O objetivo do segundo conjunto de ensaios é fazer uma comparação entre as curvas características obtidas experimentalmente e as curvas obtidas mediante simulação computacional nas condições STC. O painel faz parte de um sistema fotovoltaico localizado no Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia (LNEG) em Lisboa sendo as coordenadas  $38^{\circ}46'18.50''N$ ,  $9^{\circ}10'38.50''W$ . O painel de silício monocristalino Isofotón M-55 L está assente numa estrutura metálica orientada a sul com uma inclinação de  $45^{\circ}$  com a horizontal, apresentado na Figura 5.5.



Figura 5.5: Painel fotovoltaico Isofotón M-55 L do sistema do LNEG

O painel fotovoltaico utilizado para fazer testes foi o Isofotón M-55 L, de silício monocristalino, de 53 W de potência de pico, cujos parâmetros estão indicados na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Parâmetros do painel fotovoltaico Isofotón M-55 L

Silício Monocristalino	Painel Fotovoltaico Isofotón M-55 L
Potência Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ )	53 W
Corrente de Curto-circuito ( $I_{SC}$ )	3,27 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$ )	21,8 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{m\acute{a}x}$ )	3,05 A
Tensão de Máxima Potência ( $V_{m\acute{a}x}$ )	17,4 V
NOCT (800W/m <sup>2</sup> , AM 1.5, 20°C)	47°C

Os resultados experimentais, i.e., foi traçado a curva característica I-V do painel usando um traçador de curvas características PVPM 6020C da PVE Photovoltaik Engineering, apresentado na Figura 5.6.

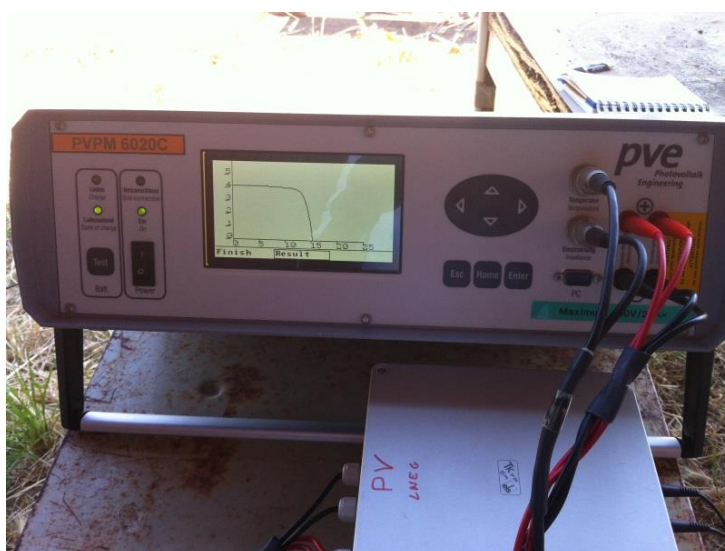


Figura 5.6: Traçador de curvas características PVPM 6020C.

A irradiância e a temperatura ambiente foram obtidas usando uma célula fotovoltaica calibrada também de silício monocristalino ISET sensor 00644, tendo incorporada uma sonda de temperatura PT 100.

A célula fotovoltaica calibra de silício monocristalino ISET sensor 00644 é apresentada na Figura 5.7.

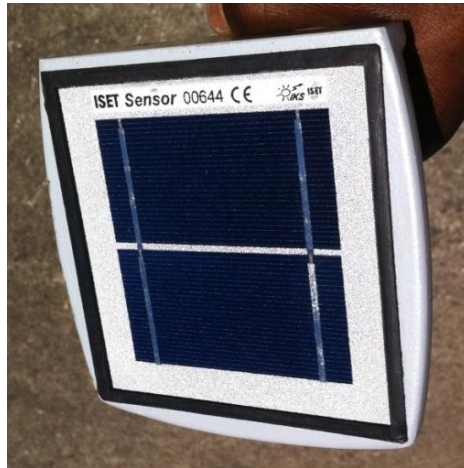


Figura 5.7: Célula fotovoltaica calibrada ISET sensor 00644.

Para a validação da curva característica obtida experimentalmente para STC foi simulado o modelo do painel formulado nos capítulos anteriores, no intervalo de 0 s a 10 s. As curvas I-V obtidas experimental e por simulação computacional são apresentadas na Figura 5.8.

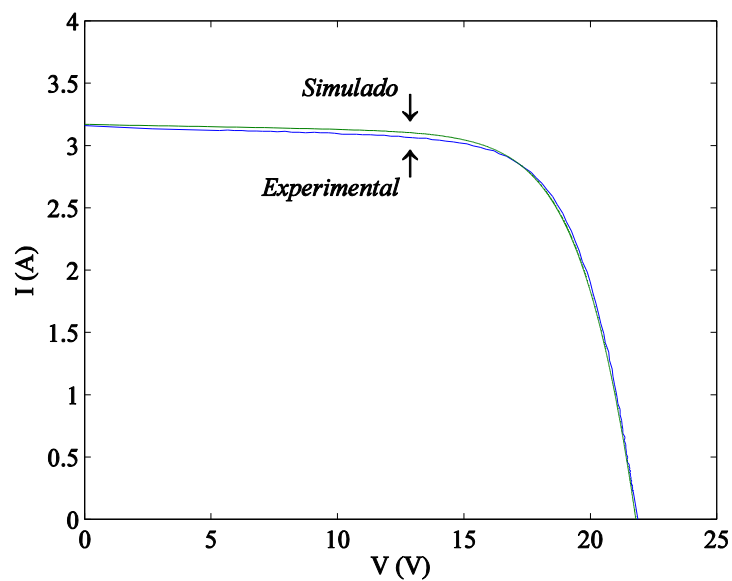


Figura 5.8: Curvas I-V experimental e simulada do Isotón M-55 L.

As curvas P-V obtidas experimental e por simulação computacional são apresentadas na Figura 5.9.

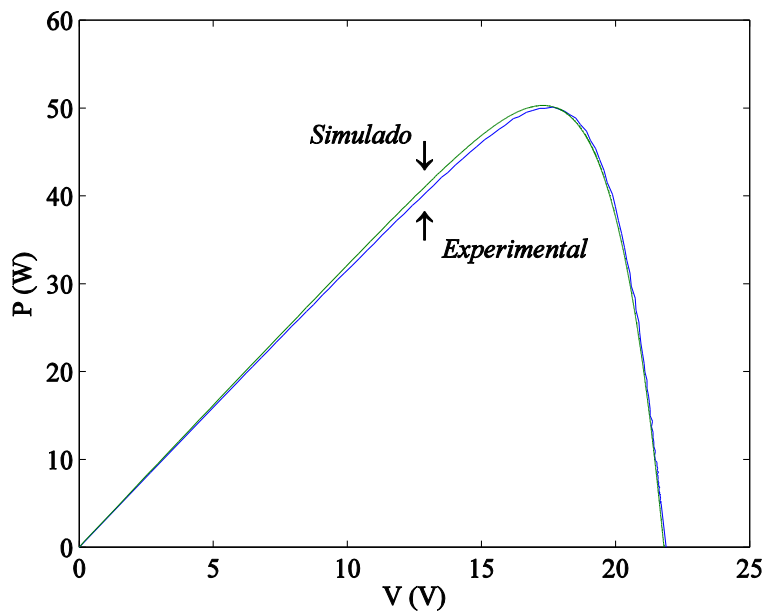


Figura 5.9: Curvas P-V experimental e simulada do Isotófon M-55 L.

Na Figura 5.8 e Figura 5.9 é observado que o modelo segue o comportamento do sistema real com ligeiras diferenças, devido ao facto de se utilizar o modelo simplificado, i.e., o modelo ideal constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo. Existe pouca diferença entre os valores experimentais e simulados para a tensão e para a corrente, no entanto o modelo é capaz de representar o comportamento real do painel fotovoltaico em condições STC.

A observação das curvas permite concluir que estas apresentam um comportamento coerente com os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento do sistema levavam a prever.

### 5.3 Terceiro Conjunto de Ensaio

Neste subcapítulo é feita a avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico de silício policristalino ligado à rede elétrica. O objetivo do terceiro conjunto de ensaios é fazer uma avaliação de qualidade de energia, nomeadamente do comportamento harmónico representado pelo THD e pela DFT.

O sistema também faz parte de um sistema fotovoltaico localizado no LNEG em Lisboa. O sistema fotovoltaico é constituído por uma matriz fotovoltaica, tendo 18 painéis de silício policristalino de 225 W de potência de pico cada um. Os módulos estão ligados numa configuração de duas *strings* em paralelo, i.e., cada uma das *strings* tem 9 painéis em série, ligados através de interfaces de eletrónica de potência ao sistema de energia elétrica. O sistema de silício policristalino Solar LDK-225P-20 está assente numa estrutura metálica orientada a sul com uma inclinação de  $45^\circ$  com a horizontal, apresentado na Figura 5.10.



Figura 5.10: Sistema de silício policristalino Solar LDK-225P-20.

O sistema fotovoltaico utilizado para fazer testes foi o Solar LDK-225P-20, de silício policristalino, de 225 W de potência de pico. Os parâmetros dos painéis fotovoltaicos apresentados na Figura 5.10 estão indicados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros do painel fotovoltaico Solar LDK-225P-20

<b>Painel Fotovoltaico Solar LDK-225P-20</b>	
Potência Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ )	255 W
Corrente de Curto-circuito ( $I_{SC}$ )	8,24 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$ )	36,7 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{m\acute{a}x}$ )	7,53 A
Tensão de Máxima Potência ( $V_{m\acute{a}x}$ )	29,9 V
NOCT (800W/m <sup>2</sup> , AM 1.5, 20°C)	45°C

Para avaliar o comportamento harmônico da onda de tensão e da onda de corrente injetada no sistema de energia elétrica, à saída da interface de eletrônica de potência, foi utilizado um analisador de qualidade de energia FLUKE 435 *Power Quality Analyzer* e respectivas pontas de prova e pinça amperimétrica FLUKE i30s para a intensidade da corrente até 30 A. O analisador de qualidade de energia FLUKE 435 *Power Quality Analyzer* é apresentado na Figura 5.11.



Figura 5.11: Analisador de qualidade de energia FLUKE 435.



A pinça amperimétrica FLUKE i30s e o esquema de ligações efetuados na experiência são apresentados na Figura 5.12.



Figura 5.12: Pinça amperimétrica FLUKE i30s e ligações.

O espectro harmónico da onda de tensão de fase computado pela DFT é apresentado na Figura 5.13.

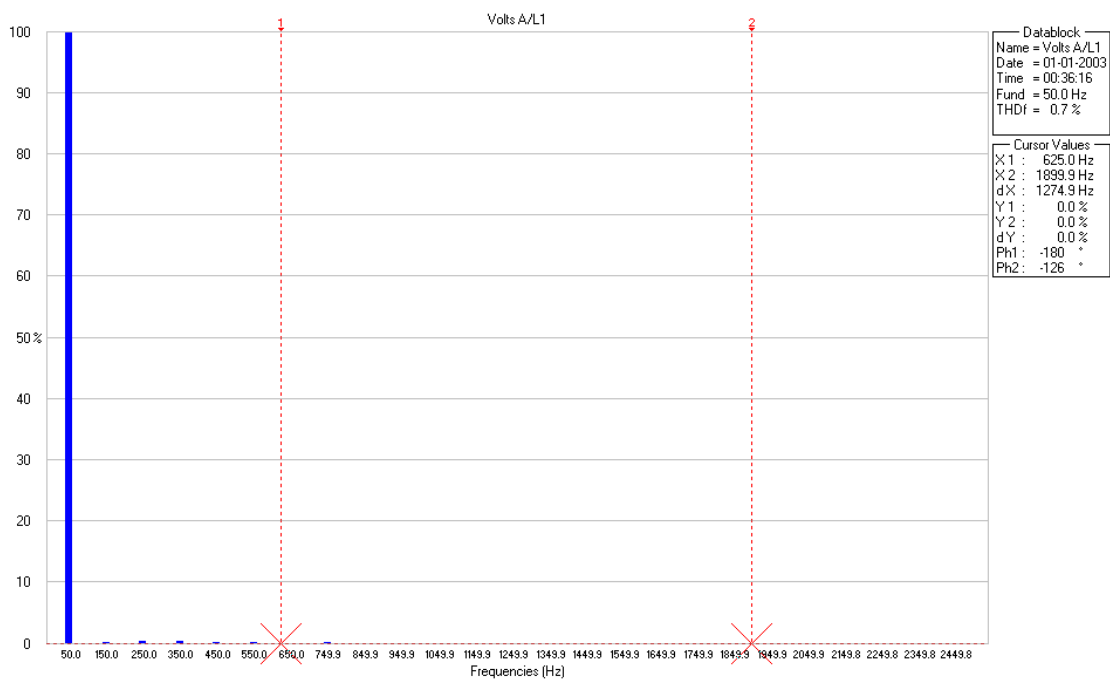


Figura 5.13: Espectro harmónico da onda de tensão de fase.



Na Figura 5.13 a harmónica dominante é a fundamental, enquanto que as amplitudes das harmónicas de ordem ímpar, sendo a 3ª, a 5ª e a 7ª são praticamente desprezíveis. O valor do THD é de 0,7 % inferior ao valor de 8 % estabelecido pela Norma EN 50160. O espectro harmónico da onda de tensão no neutro computado pela DFT é apresentado na Figura 5.14.

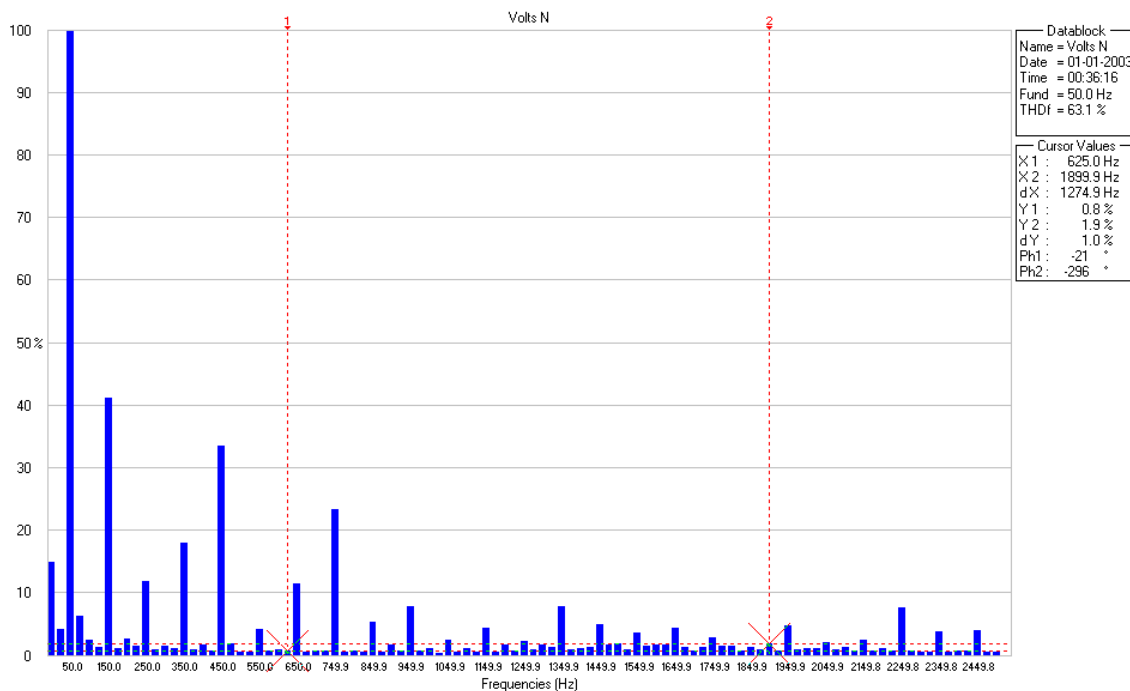


Figura 5.14: Espectro harmónico da onda de tensão no neutro.

Na Figura 5.14 a harmónica dominante é a fundamental, havendo também harmónicas de ordem superior e inter-harmónicas com amplitudes consideráveis. As harmónicas de ordem superior com amplitudes consideráveis são de ordem ímpar, sendo a 3ª, a 5ª, a 7ª, a 9ª, a 11ª fundamentalmente. O valor do THD é de 63,1 %.

O espectro harmónico da corrente na fase computado pela DFT é apresentado na Figura 5.15.

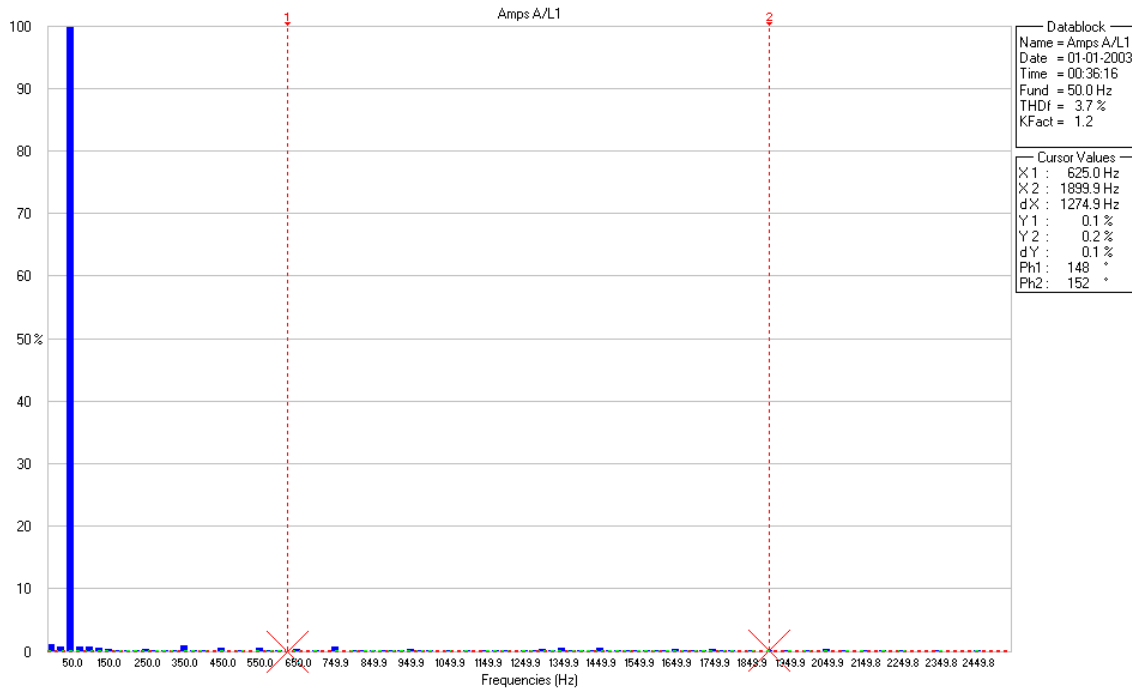


Figura 5.15: Espectro harmónico da corrente na fase.

Na Figura 5.15 a harmónica dominante é a fundamental, enquanto que as amplitudes das harmónicas de ordem ímpar, sendo a 3<sup>a</sup>, a 5<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup> são praticamente desprezíveis. O valor do THD é de 3,7 % inferior ao valor de 8 % estabelecido pela Norma EN 50160.

O espectro harmónico da corrente no neutro computado pela DFT é apresentado na Figura 5.16.

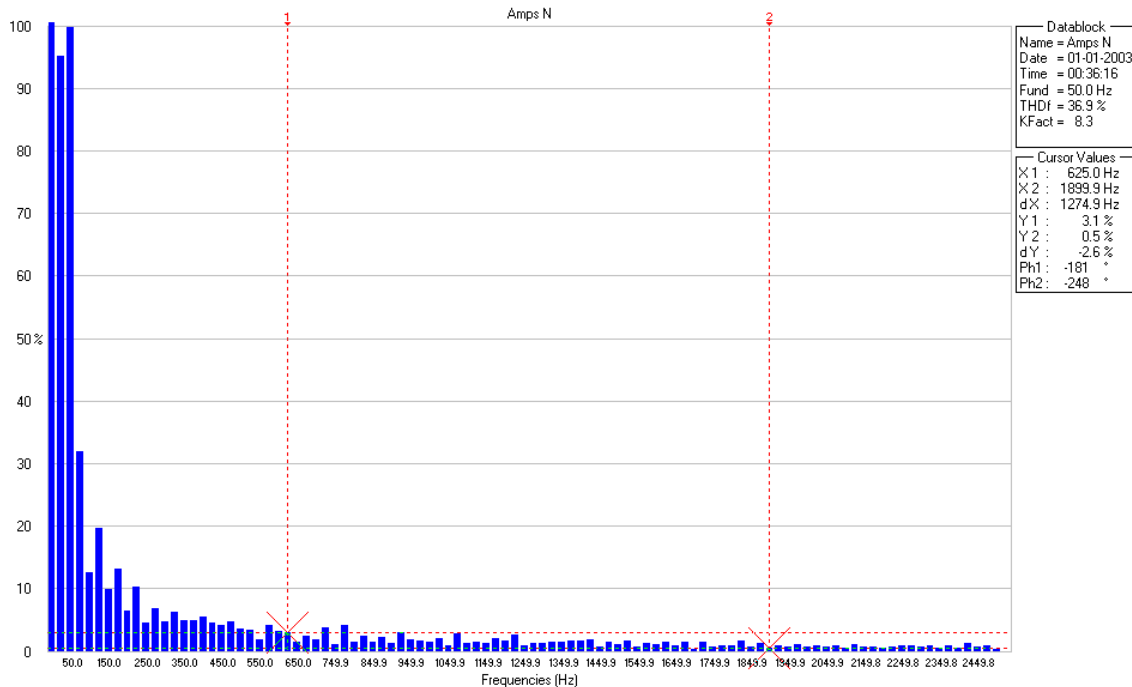


Figura 5.16: Espectro harmónico da corrente no neutro.

Na Figura 5.16 a harmónica dominante é a fundamental, havendo também harmónicas de ordem superior e inter-harmónicas com amplitudes consideráveis. As harmónicas de ordem superior com amplitudes consideráveis são de ordem ímpar, sendo a 3<sup>a</sup>, a 5<sup>a</sup>, a 7<sup>a</sup>, a 9<sup>a</sup>, a 11<sup>a</sup> fundamentalmente. O valor do THD é de 36,9 %.

A observação das curvas permite concluir que estas apresentam um comportamento coerente com os estudos teóricos e o conhecimento do comportamento do sistema levavam a prever.



# CAPÍTULO 6: Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões dos ensaios realizados por simulação e experimentação.



## **6 Conclusões e Trabalhos futuros**

### **6.1 Conclusões**

Após análise detalhada das simulações e testes efetuados no capítulo 5, levaram a concluir que para o primeiro conjunto de ensaios, que consistiu na variação da irradiância e da temperatura, foi verificado que o comportamento da célula fotovoltaica foi o esperado. Com o aumento da irradiância a corrente e a potência de saída da célula aumentam, a tensão de circuito aberto varia muito pouco (desprezável), a corrente de curto-circuito varia linearmente, e a corrente inversa de saturação também varia. No entanto, no que diz respeito à temperatura, não acontece o mesmo, pois quanto maior for a temperatura a tensão e a potência de saída da célula decrescem, a tensão de circuito aberto decresce, a corrente de curto-circuito varia muito pouco (desprezável), e a corrente inversa de saturação varia.

O segundo conjunto de ensaios consistiu na validação dos resultados da simulação por comparação com os resultados obtidos experimentalmente nas condições STC. Da comparação entre as curvas características obtidas experimentalmente e as curvas obtidas mediante simulação computacional, foi verificado que o modelo segue o comportamento do sistema real com ligeiras diferenças devido ao facto de ser utilizado o modelo simplificado, i.e., o modelo ideal constituído por uma fonte de corrente ligada em paralelo a um díodo.

O terceiro conjunto de ensaios consistiu na avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica. O ensaio teve em conta os limites referidos na versão portuguesa da Norma Europeia EN 50160 que impõe o limite de 8% de THD de tensão e nos limites

internacionais de correntes harmónicas que podem ser injetados na rede eléctrica. Foi verificado que o conteúdo harmónico da tensão e da corrente no neutro revela poluição harmónica considerável pois tem THD de corrente e de tensão superior aos limites estabelecidos pelas normas.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

No âmbito de continuidade desta dissertação, poderia ser feito o estudo sobre sistemas de eletrónica de potência que ligados a rede eléctrica reduziam o conteúdo harmónico existente na rede eléctrica de modo a contribuir na qualidade da energia eléctrica da rede.



# Bibliografia

Nesta parte da dissertação é apresentada a bibliografia usada



## Bibliografia

- [1] Melicio R., Um modelo integrado de sistemas eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável, Lisboa: Tese de Mestrado do Instituto Superior Técnico, 2004.
  
- [2] Melício R., Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede eléctrica, Tese de doutoramento, Universidade da Beira Interior, 2010.
  
- [3] Cotar A. e Jardas D., Photovoltaic systems, REA Kvarner d.o.o., Rijeka, 2012.
  
- [4] Roriz L., Rosendo J., Lourenço F. e K. Calhau, Energia solar em edifícios, Amadora: Edições Orion, 2010.
  
- [5] “<http://pveducation.org/>,” [Online]. Available: <http://pvcdrom.pveducation.org/MANUFACT/FIRST.HTM>. [Acedido em 11 Março 2013].
  
- [6] “<http://www.insiders-guide-solar-panels.com/>,” [Online]. Available: <http://www.insiders-guide-solar-panels.com/Solar-Energy-History.html>. [Acedido em 11 Março 2013].

- [7] Ambientebrasil R., “<http://www.ambientebrasil.com.br/>,” [Online]. Available:  
[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia\\_solar/historico\\_das\\_celulas\\_fotovoltaicas\\_e\\_a\\_evolucao\\_da\\_utilizacao\\_de\\_energia\\_solar.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html). [Acedido em 07 Novembro 2012].
- [8] “<http://www.eere.energy.gov/>,” [Online]. Available:  
[http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf). [Acedido em 13 Março 2013].
- [9] NASA, “<http://www.nasa.gov/>,” NASA, [Online]. Available:  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>. [Acedido em 28 Fevereiro 2013].
- [10] NASA, “<http://www.nasa.gov/>,” NASA, [Online]. Available:  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1959-004A>. [Acedido em 13 Março 2013].
- [11] NASA, “<http://www.nasa.gov/>,” NASA, [Online]. Available:  
<http://science.nasa.gov/missions/nimbus/>. [Acedido em 14 03 2013].
- [12] NASA, “<http://www.nasa.gov/>,” NASA, [Online]. Available:  
<http://science.nasa.gov/missions/oao/>. [Acedido em 14 Março 2013].

- [13] “<http://www.solarimpulse.com/en/>,” [Online]. Available: <http://www.solarimpulse.com/en/airplane/solar-aviation/>. [Acedido em 14 Março 2013].
- [14] “<http://www.fiddlersgreen.net/>,” [Online]. Available: <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/NASA-Pathfinder.html>. [Acedido em 18 Março 2013].
- [15] Castro R. M., Energias renováveis e produção descentralizada: introdução a energia fotovoltaica, Lisboa: Secção de Energia do Instituto Superior Técnico, 2002.
- [16] Viana S., Modelação de micro-sistemas híbridos fotovoltaicos/eólicos para produção descentralizada, Tese de doutoramento: Instituto Superior Técnico, 2010.
- [17] Rodrigues E.M.C, Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S., Simulation of solar cell considering single-diode equivalent circuit model. 2011. International Conf. Renew. Energies Power Quality - ICREPQ'11. Las Palmas de Gran Canaria, Espanha, 13-15.
- [18] Luque H. S. A., Handbook of photovoltaics science and engineering, John Wiley and Sons, 2003.
- [19] Sergey K., Yury K., Bogdan M., e Zenon O., Photovoltaic systems, Modern Electric Power Systems 2010, Wroclaw, Poland, 2010.

- [20] Energética E. d. P., Plano nacional de energia 2030 geração de energia elétrica a partir de outras fontes, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2006-2007.
- [21] TPOFRIO, “<http://www.topfrio.pt/>,” TPOFRIO, [Online]. Available: <http://www.topfrio.pt/default.aspx?id=14>. [Acedido em 13 Fevereiro 2013].
- [22] Renovaveis S. E., “<http://www.ffiolar.com/index.php?lang=PT&page=inicio>,” [Online]. Available: <http://www.ffiolar.com/index.php?lang=PT&page=sistemas-autonomos>. [Acedido em 13 Fevereiro 2013].
- [23] Eudora, “<http://www.eudorasolar.com.br/>,” [Online]. Available: [http://www.eudorasolar.com.br/paginas/solar\\_residencial\\_v2.html](http://www.eudorasolar.com.br/paginas/solar_residencial_v2.html). [Acedido em 13 Fevereiro 2013].
- [24] Sol B., Os fotovoltaicos vieram para ficar, Edição 440, China, 2009.
- [25] International Renewable Energy Agency, Renewable energy technologies: Cost analysis series volume 1: power sector solar fotovoltaics, Germany: Innovation and Technology Centre, 2012.

- [26] Solar B. S. E. E., “<http://www.blue-sol.com/energia-solar/>,” Blue Sol Educacional Energia Solar, [Online]. Available: <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>. [Acedido em 2013 Fevereiro 2013].
- [27] L. Hebe Solar Co., “<http://www.hebesolar.com/>,” Hebe Solar Co., Ltd., [Online]. Available: <http://www.hebesolar.com/monocrystalline-silicon-solar-cells.html>. [Acedido em 21 Fevereiro 2013].
- [28] “<http://www.m0ukd.com/>,” [Online]. Available: [http://www.m0ukd.com/Solar\\_Panels/index.php](http://www.m0ukd.com/Solar_Panels/index.php). [Acedido em 21 Fevereiro 2013].
- [29] “<http://macariobatista.blogspot.pt/>,” [Online]. Available: <http://macariobatista.blogspot.pt/2010/09/agua-corre-pro-mar.html>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].
- [30] IRENA, Renewable energy technologies: Cost analysis series volume 1: Power sector solar photovoltaics, Germany: IRENA Innovation and Technology Centre, 2012.
- [31] From universities j. a. o. r. o., “<http://www.sciencedaily.com/>,” [Online]. Available: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/02/080206154631.htm>. [Acedido em 23 Fevereiro 2013].

- [32] Lynn P. A., Electricity from sunlight: An Introduction to photovoltaics, United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2010.
- [33] Greenpro, Alternar, Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projecto e instalação, Europa: Comissão Europeia, 2004.
- [34] “<http://solargis.info/index.html>,” [Online]. Available: [http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Portugal-en.png](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Portugal-en.png). [Acedido em 19 Março 2013].
- [35] “<http://www.alternative-energy-tutorials.com/>,” [Online]. Available: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/solar-panel-orientation.html>. [Acedido em 19 Março 2013].
- [36] R. Ramabadrán e R. G. Salai, “Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules,” Department of EEE, SSN College of Engineering, Tamilnadu, India, 2009.
- [37] “<http://www.azsolarcenter.org/>,” [Online]. Available: <http://www.azsolarcenter.org/tech-science/technical-papers/how-not-to-do-it/how-not-to-install-pv.html>. [Acedido em 26 Março 2013].



- [38] Carneiro J., Electromagnetismo b. módulos fotovoltaicos características e associações, Universidade do Minho Escola de Ciências Departamento de Física Campus de Azurém, Guimarães, 2010.
- [39] Miss M. M. R. Sangita R Nandurkar, “Design and Simulation of three phase Inverter for grid connected Photovoltaic systems,” Department of Electrical Engineering Fr.C.Rodrigues Institute of Technology, Vashi, Navi Mumbai, India, 2012.

