



FACULDADE  
ENGENHARIA

Departamento de  
Engenharia Eletromecânica

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática**

**Marco Paulo Alves Rocha**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires  
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

**Covilhã, junho de 2020**

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

## Agradecimentos

Expresso o meu maior agradecimento ao Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires pela sua enorme dedicação e apoio durante o meu trabalho. Sinto-me profundamente agradecido pelo excelente apoio e permanente disponibilidade em me atender e orientar durante o progresso da minha dissertação. Agradeço também a oportunidade que me deu em trabalhar num tema que sempre me agradou e para o qual sempre providenciou indicações e sugestões de grande utilidade.

Agradeço também ao Sr. João Correia, técnico superior responsável pelo Laboratório de Termodinâmica e Transmissão de Calor, pela sua disponibilidade e apoio dispensado durante a construção da estrutura da bancada fotovoltaica, onde a sua ajuda foi indispensável.

Não posso deixar de agradecer todos os professores e docentes que ao longo deste percurso me transmitiram os conhecimentos necessários para a conclusão de mais uma etapa na minha vida que hoje possuo.

Aos colegas e amigos que me apoiaram durante este percurso académico pela UBI, e especialmente durante a realização deste trabalho, aqui lhes deixo um especial agradecimento pela boa disposição e palavras de motivação.

A minha namorada Samira pela ajuda, disponibilidade, motivação e paciência demonstrado ao longo deste percurso.

Por fim, agradeço a minha mãe pelo apoio incondicional e valores transmitidos ao longo de toda a minha vida. A minha tia e madrinha Maria Alice pelos conselhos e apoio. A minha amiga Dulcineia por me ter aturado durante todo o meu percurso académico.

## Resumo

O crescimento significativo da procura mundial de energia introduziu uma pressão significativa no consumo de energia via fontes de energia fóssil, com consequências ambientais reconhecidas. Nesse contexto, energias renováveis, como solar, térmica e fotovoltaica, eólica e hidráulica, emergem como alternativas energéticas inevitáveis. Esta dissertação consiste no desenvolvimento e construção de uma unidade fotovoltaica didática para uso em aulas práticas de laboratório em cursos de engenharia na Universidade da Beira Interior, onde foram também realizados um conjunto de testes experimentais que são descritos ao longo desta dissertação. Esta unidade é constituída por um módulo fotovoltaico que converte energia solar diretamente em energia elétrica, um regulador de carga que protege a bateria contra sobrecargas e descargas profundas, uma bateria que armazena a energia produzida durante períodos de maior radiação solar e um inversor, que converte a energia produzida em corrente contínua em corrente alternada. A unidade utiliza um conjunto de lâmpadas e uma resistência variável, para que várias cargas do sistema possam ser simuladas. O banco didático desenvolvido permitirá ao aluno entender as características de uma instalação fotovoltaica autónoma, com exemplos práticos sobre geração e armazenamento de energia. O sistema básico de armazenamento permitirá ao aluno entender os conceitos de armazenamento de carga e sua reutilização sem desperdiçar energia. Além disso, foi elaborado um guia de laboratório para apoiar o trabalho experimental a ser desenvolvido.

## Palavras-chave

Unidade didática, Bancada fotovoltaica, Conversão de energia

## Abstract

The significant growth in world energy demand has introduced significant pressure on energy consumption via fossil energy sources with recognized environmental consequences. In this context, renewable energies, such as solar, thermal and photovoltaic, wind and water, emerge as inevitable energy alternatives. This dissertation describes the process of developing and construction of a didactic photovoltaic unit to be used in laboratory practical classes in engineering courses at the University of Beira Interior, where a set of experimental tests were also carried out which are described throughout this dissertation. This unit consists on a photovoltaic module that converts solar energy, directly, into electrical energy, a charge regulator that protects the battery from overcharging and deep discharges, a battery that stores the energy produced during periods of higher solar radiation, and an inverter, which converts the energy produced in direct current to alternating current. The unit uses a set of lamps and a variable resistance, so that various system loads can be simulated. The developed didactic bench will allow the student to understand the characteristics of an autonomous photovoltaic installation, with practical examples about energy generation and storage. The basic storage system will allow the student to understand the charge storage concepts and its reuse without wasting energy. Additionally, a laboratory guide will be designed to support the experimental work to be developed.

## Keywords

Didactic unit, Photovoltaic bench, Energy conversion

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Relevância e enquadramento do tema . . . . .	1
1.2	O potencial fotovoltaico em Portugal . . . . .	2
1.3	Objetivos e contribuição da dissertação . . . . .	3
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Energia solar . . . . .	5
2.2.1	Propriedades da luz . . . . .	5
2.2.1.1	Radiação de um corpo negro . . . . .	6
2.2.2	Radiação solar . . . . .	7
2.2.2.1	Radiação solar incidente na Terra . . . . .	9
2.2.3	Movimento Terra-Sol . . . . .	10
2.2.3.1	Declinação solar . . . . .	10
2.2.3.2	Ângulo de incidência da radiação solar . . . . .	11
2.2.3.3	Altura do sol . . . . .	12
2.2.3.4	Ângulo de azimute . . . . .	13
2.2.3.5	Ângulo ótimo . . . . .	13
2.3	Energia solar fotovoltaica . . . . .	14
2.3.1	Tecnologia dos equipamentos fotovoltaicos . . . . .	14
2.3.1.1	Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica . . . . .	16
2.3.1.2	Modelo real de uma célula fotovoltaica . . . . .	17
2.3.2	Tipos de células . . . . .	17
2.3.2.1	Células de silício monocristalino . . . . .	17
2.3.2.2	Células de silício policristalino . . . . .	19
2.3.2.3	Células de película fina . . . . .	20
2.3.2.4	Células de perovskita . . . . .	23
2.3.2.5	Células multi junções . . . . .	24
2.3.3	Curva característica das células fotovoltaicas . . . . .	25
2.3.4	Módulos fotovoltaicos . . . . .	27
2.3.4.1	Associação de módulos fotovoltaicos em série, paralelo e mista . . . . .	28
2.3.4.2	Efeitos do sombreamento . . . . .	30
2.3.5	Tipos de sistemas fotovoltaicos . . . . .	30
2.3.5.1	Sistemas isolados . . . . .	31
2.3.5.2	Sistemas ligados à rede pública de distribuição . . . . .	32
2.4	Acumuladores de energia . . . . .	32
2.4.1	Princípio de funcionamento . . . . .	32
2.4.2	Modelo elétrico de uma bateria . . . . .	33
2.4.3	Caraterísticas da bateria . . . . .	34
2.4.3.1	Capacidade . . . . .	34
2.4.3.2	Tempo de descarga . . . . .	34
2.4.3.3	Densidade energética . . . . .	35
2.4.3.4	Ciclos de vida . . . . .	35

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

2.4.3.5	Auto-descarga	35
2.4.3.6	Profundidade de descarga	35
2.4.4	Tipos de acumuladores de energia	36
2.4.4.1	Bateria chumbo-ácido	36
2.4.4.2	Baterias alcalinas	38
2.5	Reguladores de carga	40
2.5.1	Regulador PWM	41
2.5.2	Regulador MPPT	41
2.6	Inversores DC/AC	41
2.6.1	Inversores de onda quadrada	42
2.6.2	Inversores de onda modificada ou semi-sinusoidal	42
2.6.3	Inversores de onda sinusoidal	42
2.7	Exemplos de unidades fotovoltaicas didáticas	42
2.7.1	Hampden Model H-PVIT-1	42
2.7.2	Solar Didactic	43
2.7.3	Advanced Photovoltaic Training System	43
2.7.4	AEL-SAPV	44
2.8	Nota conclusiva	45
<b>3</b>	<b>Instalação experimental e metodologias de ensaio</b>	<b>47</b>
3.1	Introdução	47
3.2	Principais componentes do sistema fotovoltaico	47
3.2.1	Módulo fotovoltaico	47
3.2.2	Acumulador de energia	48
3.2.3	Regulador de carga	49
3.2.4	Inversor de carga	50
3.3	Protótipo	51
3.4	Construção da bancada fotovoltaica	52
3.4.1	Estrutura metálica	52
3.4.2	Painel de instrumentos	53
3.4.3	Mecanismo de inclinação	53
3.5	Dimensionamento das cablagens	55
3.6	Instrumentação	58
3.7	Protocolo de ensaios	61
3.7.1	Variação da produção do módulo fotovoltaico em função da inclinação	61
3.7.1.1	Objetivos	61
3.7.1.2	Descrição do trabalho a realizar	61
3.7.2	Curvas características do módulo fotovoltaico	62
3.7.2.1	Objetivos	62
3.7.2.2	Descrição do trabalho a realizar	62
3.7.3	Curva da eficiência do inversor de carga	63
3.7.3.1	Objetivos	63
3.7.3.2	Descrição do trabalho a realizar	63
3.7.4	Comportamento do módulo fotovoltaico sobre o efeito de sombras parciais	66
3.7.4.1	Objetivos	66
3.7.4.2	Descrição do trabalho a realizar	66
3.8	Nota conclusiva	67

## **Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática**

<b>4</b>	<b>Caraterização elétrica da instalação fotovoltaica</b>	<b>69</b>
4.1	Introdução . . . . .	69
4.2	Apresentação e discussão dos resultados . . . . .	69
4.2.1	Variação da produção do módulo fotovoltaico em função da inclinação . .	69
4.2.2	Curvas caraterísticas do módulo fotovoltaico . . . . .	70
4.2.3	Curva da eficiência do inversor de carga . . . . .	72
4.2.4	Comportamento do módulo fotovoltaico sobre o efeito de sombras parciais	73
4.3	Nota conclusiva . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Conclusões gerais</b>	<b>79</b>
5.1	Perspetivas futuras . . . . .	79
	<b>Bibliografia</b>	<b>85</b>

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

## Lista de Figuras

Figura 1.1	Potencial da energia solar fotovoltaica na Europa . . . . .	2
Figura 1.2	Produção anual fotovoltaica em Portugal por região, em GWh . . . . .	3
Figura 2.1	Radiação solar com os efeitos da massa de ar (AM) . . . . .	8
Figura 2.2	Massa de ar atravessada pela radiação solar . . . . .	8
Figura 2.3	Radiação solar com os efeitos da atmosfera e seus agentes . . . . .	9
Figura 2.4	Campo magnético da Terra e seus polos geográficos . . . . .	10
Figura 2.5	Declinação solar . . . . .	10
Figura 2.6	Ângulos característicos da radiação solar na Terra . . . . .	12
Figura 2.7	Variação da altura do sol . . . . .	13
Figura 2.8	Arcos dos ângulos de azimute de inverno e verão . . . . .	13
Figura 2.9	Cristal de silício dopado com impurezas para produzir um material semi-condutor do tipo n e do tipo p . . . . .	15
Figura 2.10	Célula fotovoltaica elementar . . . . .	15
Figura 2.11	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica . . . . .	16
Figura 2.12	Circuito real da célula fotovoltaica . . . . .	17
Figura 2.13	Célula de silício monocristalino . . . . .	18
Figura 2.14	Célula de silício policristalino . . . . .	19
Figura 2.15	Célula solar de silício amorfo . . . . .	21
Figura 2.16	Célula solar de telureto de cádmio . . . . .	22
Figura 2.17	Célula solar de disseleneto de cobre índio gálio . . . . .	23
Figura 2.18	Célula de perovskita . . . . .	24
Figura 2.19	Célula fotovoltaica multi junções . . . . .	25
Figura 2.20	Curva característica de uma célula fotovoltaica . . . . .	25
Figura 2.21	Curva característica de um módulo fotovoltaico em função da radiação incidente . . . . .	26
Figura 2.22	Curva característica $I - V$ de uma célula fotovoltaica em função da temperatura . . . . .	27
Figura 2.23	Pormenor construtivo de um módulo fotovoltaico . . . . .	27
Figura 2.24	Célula, módulo e campo fotovoltaico . . . . .	27
Figura 2.25	Associação em série de módulos fotovoltaicos . . . . .	28
Figura 2.26	Associação em paralelo de módulos fotovoltaicos . . . . .	29
Figura 2.27	Associação mista de módulos fotovoltaicas . . . . .	29
Figura 2.28	Díodos de fileira e díodos de desvio . . . . .	30
Figura 2.29	Principais aplicações fotovoltaicas . . . . .	31
Figura 2.30	Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado . . . . .	31
Figura 2.31	Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico ligado à rede . . . . .	32
Figura 2.32	Modelo elétrico de uma bateria . . . . .	33
Figura 2.33	Profundidade de descarga e o ciclo de vida de uma bateria de chumbo-ácido . . . . .	36
Figura 2.34	Diferentes tipos de baterias chumbo-ácido . . . . .	38
Figura 2.35	Bancada didática Hampden Model H-PVIT-1 . . . . .	42
Figura 2.36	Bancada didática Solar Didactic . . . . .	43
Figura 2.37	Bancada didática <i>Advanced Photovoltaic Training System</i> . . . . .	44
Figura 2.38	Bancada didática <i>Stand Alone Photovoltaic Application, AEL-SAPV</i> . . . . .	44

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Figura 3.1	Módulo fotovoltaico Kioto Solar . . . . .	47
Figura 3.2	Bateria VRLA <i>Vitron Gel Deep Cycle</i> . . . . .	48
Figura 3.3	Regulador <i>BlueSolar MPPT 75/15</i> . . . . .	49
Figura 3.4	Inversor <i>Phoenix Inverter 12/180</i> . . . . .	50
Figura 3.5	Bancada de ensaios projetada no software Solidworks . . . . .	51
Figura 3.6	Projeto em Solidworks da estrutura em aço . . . . .	52
Figura 3.7	Estrutura em aço construída na oficina do departamento de Engenharia Eletromecânica na UBI. . . . .	52
Figura 3.8	a) Chapa metálica para o painel de instrumentos com os furos para a instalação dos equipamentos. b) Painel de instrumentos com o circuito a simular. . . . .	53
Figura 3.9	Detalhes sobre o mecanismo de inclinação da bancada fotovoltaica . . .	54
Figura 3.10	Mecanismo de inclinação . . . . .	54
Figura 3.11	Vista de frente da bancada fotovoltaica . . . . .	55
Figura 3.12	Vista de trás da bancada fotovoltaica . . . . .	55
Figura 3.13	Multímetros utilizados para a caracterização elétrica do sistema fotovoltaico	58
Figura 3.14	Termômetro utilizado para medir a temperatura à superfície do módulo fotovoltaico . . . . .	59
Figura 3.15	Solarímetro utilizado para medir a intensidade da radiação solar . . . . .	60
Figura 3.16	Circuito proposto para o ensaio . . . . .	61
Figura 3.17	Circuito proposto para o ensaio . . . . .	62
Figura 3.18	Circuito proposto para o ensaio . . . . .	65
Figura 4.1	Varição dos parâmetros do módulo fotovoltaico em função da inclinação	69
Figura 4.2	Curva característica do módulo fotovoltaico . . . . .	71
Figura 4.3	Curva de potência do módulo fotovoltaico . . . . .	72
Figura 4.4	Curva da eficiência do inversor de carga . . . . .	73
Figura 4.5	Módulo fotovoltaico com 4 células sombreadas . . . . .	74
Figura 4.6	Efeito do sombreamento na eficiência do módulo fotovoltaico . . . . .	75
Figura 4.7	Comparação entre a curva característica do módulo fotovoltaico sem sombreamento e com 4 células sombreadas . . . . .	76
Figura 4.8	Comparação entre a curva da potência do módulo fotovoltaico sem sombreamento e com 4 células sombreadas . . . . .	76

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Inclinação do painel face ao tipo de necessidade na instalação . . . . .	14
Tabela 2.2	Capacidade e tempo de descarga de uma bateria . . . . .	35
Tabela 2.3	Comparação das especificações de diferentes tipos de baterias . . . . .	40
Tabela 3.1	Caraterísticas do módulo fotovoltaico Kioto Solar . . . . .	48
Tabela 3.2	Caraterísticas da bateria VRLA <i>Vitron Gel Deep Cycle</i> . . . . .	49
Tabela 3.3	Caraterísticas do regulador de carga <i>BlueSolar MPPT 75/15</i> . . . . .	50
Tabela 3.4	Caraterísticas do inversor <i>Phoenix Inverter12/180</i> . . . . .	51
Tabela 3.5	Corrente máxima admissível pelos condutores . . . . .	57
Tabela 3.6	Especificações dos multímetros utilizados . . . . .	59
Tabela 3.7	Especificações do termómetro utilizado . . . . .	60
Tabela 3.8	Especificações do solarímetro utilizado . . . . .	60
Tabela 3.9	Tabela de registo dos valores da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito . . . . .	61
Tabela 3.10	Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico	63
Tabela 3.11	Tabela de registo dos valores a entrada e saída do inversor . . . . .	64
Tabela 3.12	Tabela de registo dos valores da tensão e corrente das células sombreadas	66
Tabela 4.1	Tabela de registo dos valores da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito do módulo em função da inclinação . . . . .	69
Tabela 4.2	Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico	70
Tabela 4.3	Tabela de registo dos valores de tensão e corrente à entrada e à saída do inversor de carga . . . . .	72
Tabela 4.4	Tabela de registo dos valores de tensão e corrente do módulo fotovoltaico ligado a uma carga de $4 \Omega$ . . . . .	74
Tabela 4.5	Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico	75

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

## Acrónimos

AC	Corrente alternada
AGM	Absorbent Glass Material
AM	Massa de ar
AR	Anti-refletora
CCA	Cold Cranking Amps
CdTe	Telureto de cádmio
CdS	Sulfeto de cádmio
CIGS	Disselenieto de Cobre Índio Gálio
DC	Corrente contínua
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DOD	Depth of Discharge
EVA	Etileno Acetato de Vinilo
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OTC	Oxido Transparente Condutivo
PWM	Pulse Width Modulation
RC	Reserve Capacity
STC	Condições de Teste Standard
UBI	Universidade da Beira Interior
VRLA	Valve Regulated Lead Acid
VLA	Vented Lead Acid



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Relevância e enquadramento do tema

O sol é a principal fonte de energia na Terra, fornecendo anualmente energia suficiente para atender as necessidades energéticas mundiais. Os combustíveis fósseis, como o carvão, gás natural e o petróleo, são o armazenamento dessa energia pelo planeta Terra ao longo de milhões de anos. A queima desses combustíveis é responsável pelas emissões de gases com efeito de estufa, como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), o metano ( $CH_4$ ), que constitui cerca de 10% das emissões, e o óxido nitroso ( $N_2O$ ), em menor percentagem. O metano apresenta um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 21 vezes superior em relação ao dióxido de carbono, enquanto que o óxido nitroso é de 310 vezes superior [1].

Com o desenvolvimento tecnológico e o aumento alarmante da população mundial aumenta também o consumo global de eletricidade, fazendo com que seja necessário a produção de quantidades superiores de energia. Energia essa que sendo de fontes finitas tende a esgotar-se. A situação agrava-se com o aquecimento global, consequência da utilização absurda dos combustíveis fósseis. Surge, assim, a necessidade de recorrer a fontes de energia alternativas que sejam menos agressivas para o ambiente, para suprir, em parte, a procura energética mundial. Neste contexto, as energias renováveis como a energia solar, eólica e hídrica emergem como uma parte da solução que urge tornar mais acessível e de exploração mais massiva e eficiente [2].

As tecnologias fotovoltaicas, alvo de estudo nesta dissertação, têm sofrido avanços nas últimas décadas, contribuindo para uma cota significativa na geração de eletricidade. Estudos apontam que devido à redução de custos na produção e instalação de módulos fotovoltaicos atingiu-se em 2017 uma potência instalada de aproximadamente 402,5 GW a nível global [3]. A expansão dessa tecnologia exige especialistas nas áreas de design, produção e instalação. Desde os anos de 2000, os estudos das tecnologias fotovoltaicas têm vindo a ser incorporadas no plano curricular de escolas técnicas e universidades. Contudo, o estudo apresentado aos alunos universitários acaba por ser insuficiente para uma boa perceção dos conceitos teóricos de conversão de energia solar. Explorar as atividades laboratoriais resulta num entendimento mais rico sobre o assunto tratado e permite que os alunos percebam as necessidades de proteção do meio ambiente [4, 5]. Surgiu assim, no Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, a necessidade de criação de um kit didático de energia solar fotovoltaica, que irá proporcionar ferramentas importantes e indispensáveis a quem se inicia nessa temática.

Esta dissertação descreve o processo de desenvolvimento de uma unidade fotovoltaica didática para uso em aulas práticas de laboratório em cursos de engenharia na Universidade da Beira Interior. Esta unidade consiste em um módulo fotovoltaico que converte energia solar direta-

mente em energia elétrica, um regulador de carga que protege a bateria contra sobrecargas e descargas profundas, uma bateria que armazena a energia produzida durante períodos de maior radiação solar e um inversor, que converte a energia produzida em corrente contínua em corrente alternada. A unidade utiliza um conjunto de lâmpadas e uma resistência variável, para que várias cargas do sistema possam ser simuladas. O banco didático desenvolvido permitirá ao aluno entender as características de uma instalação fotovoltaica autónoma, com exemplos práticos sobre geração e armazenamento de energia. O sistema básico de armazenamento permitirá ao aluno entender os conceitos de armazenamento de carga e sua reutilização sem desperdiçar energia. Além disso, um guia de laboratório será elaborado para apoiar o trabalho experimental a ser desenvolvido.

## 1.2 O potencial fotovoltaico em Portugal

Portugal, é um país localizado no sudoeste da Europa, cujo território situa-se no extremo Sudoeste da Península Ibérica, fazendo fronteira a norte e a leste com a Espanha, e a oeste e a sul com o Oceano Atlântico [6]. É uma localização privilegiada, que faz de Portugal um dos países, da Europa, com maior disponibilidade de radiação solar, com 2300 a 3000 horas de sol por ano, podendo atingir valores superiores a  $2200 \text{ kWh/m}^2$ , no sul do país, como se pode observar na figura 1.1 [7].

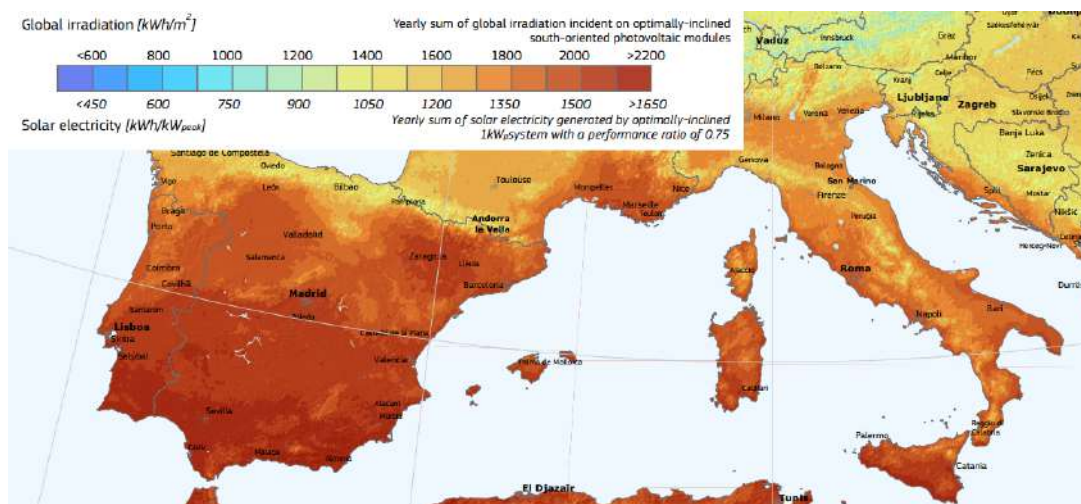


Figura 1.1: Potencial da energia solar fotovoltaica na Europa [7]

Embora, o aproveitamento e estudo da energia solar tenha crescido significativamente nos últimos anos, este ainda não atingiu os valores desejados. Segundo a DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, até Maio de 2019, Portugal tinha uma potência instalada, proveniente de fontes fotovoltaicas, de  $754 \text{ MW}$ , totalizando uma produção anual de aproximadamente  $1139 \text{ GWh}$  de energia [8].

Pela figura 1.2, nota-se que desde 2010 o uso de fontes de energia fotovoltaica, em Portugal, tem vindo a crescer de forma gradualmente, motivado pela estratégia europeia "Europa 2020", que consiste em três metas focadas nas alterações climáticas e energia: reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa em relação aos níveis de 1990, aumentar para 20% a parte da energia proveniente de fontes renováveis, aumentar em 20% a eficiência energética[8].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

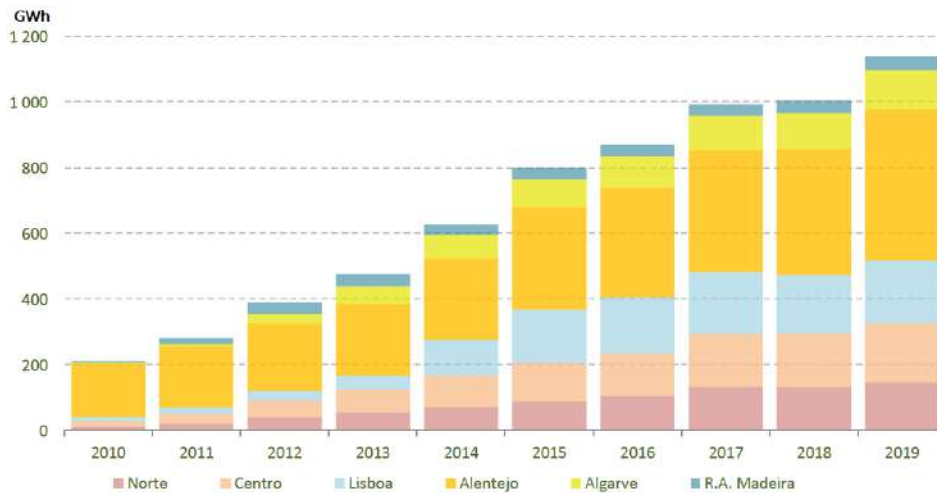


Figura 1.2: Produção anual fotovoltaica em Portugal por região, em GWh [8]

### 1.3 Objetivos e contribuição da dissertação

O principal objetivo desta dissertação traduz-se na melhoria da educação dos estudantes sobre a energia solar fotovoltaica através da implementação de uma vertente prática para consolidar os conteúdos teóricos assimilados na unidade curricular de Energias Renováveis, através da construção de uma bancada fotovoltaica didática e o seu respetivo guião laboratorial. Entretanto, pode-se citar os seguintes objetivos específicos desta dissertação:

- Projeto e construção de uma unidade fotovoltaica didática para o ensino experimental da energia solar fotovoltaica;
- Elaboração de um guia laboratorial para acompanhamento nos ensaios laboratoriais;
- Testar todos os equipamentos do sistema e resolução do respetivo guião laboratorial;

### 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos divididos em dois grupos, um grupo teórico e um prático. O grupo teórico corresponde aos capítulos 1 e 2, onde é feita a introdução ao tema desenvolvido nesta dissertação e é descrita a teoria subjacente. O grupo prático engloba os capítulos 3 e 4 e, visa descrever todo o processo de construção da bancada fotovoltaica e do guião laboratorial e sua respetiva resolução. Por fim, no capítulo 5 encontram-se as respetivas conclusões sobre o trabalho. Em anexo encontra-se informação complementar a este trabalho.

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema abordado nesta dissertação, o enquadramento do tema e é descrita a estrutura deste trabalho.

No capítulo 2 são abordados os principais temas relacionados com a energia solar fotovoltaica. Nele é apresentada a energia solar e as suas principais características, assim como, os principais

## **Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática**

componentes de um sistema fotovoltaico autónomo. É feita também uma revisão bibliográfica, de forma a dar a conhecer o estado de conhecimento das tecnologias envolvidas nesta dissertação.

No capítulo 3 é descrito o processo de construção da bancada fotovoltaica, indicando todos os passos e decisões tomadas na elaboração do mesmo. Aborda-se também a elaboração de um guião laboratorial.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados experimentais obtidos seguindo as indicações do guião laboratorial e respetivas análises.

No capítulo 5 apresentam-se todas as conclusões resultantes do trabalho efetuado ao longo desta dissertação, bem como as perspetivas futuras sobre o tema em questão.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica

### 2.1 Introdução

Como descrito no capítulo 1, esta dissertação foca-se no projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática e seu respetivo guião laboratorial. Para o tal, é importante perceber os conceitos relacionados com a energia solar e a energia solar fotovoltaica. Sendo o sol a fonte de energia estudada nesta dissertação, torna-se importante perceber as propriedades da radiação solar e o movimento da Terra em torno do Sol, de forma a garantir o maior aproveitamento desta energia disponibilizada pelo mesmo. Serão, ainda, descritos os principais constituintes de um sistema fotovoltaico autónomo, nomeadamente, as células fotovoltaicas, as baterias, os inversores de carga e os reguladores de carga e as suas principais propriedades. Para finalizar será apresentado um conjunto de unidades fotovoltaicas didáticas presentes no mercado atual.

### 2.2 Energia solar

De acordo com as Nações Unidas, a população mundial em 2100 será de aproximadamente 9 bilhões de pessoas, refletindo num aumento de cerca de 30% da população. Este aumento acelerado da população terá como consequência um aumento na procura energética mundial. Fontes de energia como o petróleo, o carvão e o gás natural, possuem reservas suficientes para suprimir a procura energética, derivado do aumento acelerado da população mas, são fontes de combustíveis que exercem um impacto prejudicial ao equilíbrio ecológico do planeta Terra, com a libertação de gases de efeito de estufa [9]. A energia solar surge, assim, como uma das alternativas ecológicas para suprimir parte dessa procura. O sol produz energia suficiente para suportar todas as necessidades energéticas. O desafio centra-se no melhor aproveitamento possível da energia solar com tecnologias eficientes e suportáveis a nível de custos [10].

#### 2.2.1 Propriedades da luz

Em 1672 Newton apresentou um artigo, denominado a nova teoria das luzes e das cores, onde defende que a luz é uma mistura de várias cores com diferentes refrações. Para demonstrar a sua teoria Newton fez passar um feixe de luz branca através de dois prismas posicionados de forma a produzir um espectro de luz ao passar pelo primeiro prisma, recompondo-se, de volta em luz branca, ao passar pelo segundo prisma. Newton concluiu que a luz é composta por partículas que combinam para formar a luz branca [11].

A teoria de Newton foi posta em causa por François Arago, Thomas Young e Augustin Jean Fresnel, em 1800, onde defenderam que a luz é composta por ondas após terem observado efeitos de interferência nos feixes de luz [12].

Em 1860 Maxwell apresentou a teoria da radiação eletromagnética, onde defende que a luz é um amplo espectro de ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda, composta por um campo elétrico e um campo magnético [13]. Entretanto, no fim de 1800, esta teoria perdeu credibilidade após serem realizadas experiências sobre o espectro de comprimentos de onda de objetos aquecidos, onde não foi possível explicar os resultados obtidos através das equações da luz que descreviam que a luz é composta por ondas [12].

O modelo de onda não pode ser responsável por algo conhecido como efeito fotoelétrico. Este efeito é observado quando a luz focada em certos metais emite elétrons. Para cada metal existe um limite mínimo de frequência da radiação eletromagnética na qual o efeito ocorrerá. A substituição da luz com o dobro da intensidade e metade da frequência não produzirá o mesmo resultado, ao contrário do que seria esperado se a luz agisse estritamente como uma onda. Nesse caso, o efeito da luz seria cumulativo - a luz aumentaria pouco a pouco até causar a emissão de elétrons. Em vez disso, existe uma frequência mínima clara de luz que aciona a ejeção de elétrons. A implicação era que a frequência é diretamente proporcional à energia, com as frequências de luz mais altas tendo mais energia. Essa observação levou à descoberta da quantidade mínima de energia que poderia ser adquirida ou perdida por um átomo. Max Planck nomeou essa quantidade mínima de "quantum", plural "quanta", que significa quanto. Um fóton de luz carrega exatamente um quantum de energia [14, 15].

No entanto, em 1905, Albert Einstein reinterpretou a hipótese quântica de Planck e a usou para explicar o efeito fotoelétrico, no qual a luz brilhante em certos materiais pode libertar elétrons do material. Einstein argumentou em 1905 que, em certas circunstâncias, a luz não se comporta como ondas contínuas, mas sim, como partículas individuais descontínuas. Essas partículas, ou "quanta leves", cada uma carregava uma quantidade quântica fixa de energia. A energia total do feixe de luz é a soma total das energias individuais desses "quanta de luz" discretos, denominados fótons de energia [16, 17], descritas pela equação 2.1 [13, 17].

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} [eV] \quad (2.1)$$

Onde,

E - Energia do fóton (eV)

h - Constante de Planck ( $6,626(29) \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ )

f - Frequência (Hz)

c - Velocidade da luz ( $3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  - Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )

### 2.2.1.1 Radiação de um corpo negro

Um corpo negro absorve toda a radiação nele incidente, apresentando uma absorção igual a 1 ( $\alpha = 1$ ) e refletividade nula ( $\rho = 0$ ). É caracterizado também como um emissor ideal ( $\varepsilon = 1$ ), ao aquecer, começa a brilhar, emitindo radiação eletromagnética[9]. O poder emissivo espectral de um corpo negro, é a potência emitida por unidade de área no alcance de comprimento de onda,  $\lambda$ , até  $\lambda + d\lambda$ , e é caracterizada pela distribuição de Planck [13]:

$$E(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \{ \exp[\frac{hc}{\lambda KT}] - 1 \}} \quad (2.2)$$

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Onde,

E - Poder emissivo espectral ( $W.m^{-2}.\mu m$ )

c - Velocidade da luz ( $m/s$ )

h - Constante de Planck ( $J.s$ )

$\lambda$  - Comprimento de onda ( $\mu m$ )

T - Temperatura do corpo ( $K$ )

K - Constante de Boltzmann ( $1,380 * 10^{-23} J/K = 8,617 * 10^{-5} eV/K$ ) [18]

O poder emissivo total de um corpo negro, por sua vez, foi determinado experimentalmente em 1879 por Joseph Stefan e verificado teoricamente em 1884 por Ludwig Boltzmann e pode ser calculado, integrando a equação 2.2 em todos os comprimentos de ondas possíveis, a partir do zero até ao infinito, obtendo assim a equação 2.3 [19].

$$E = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

Onde,

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67032 * 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ )

T - Temperatura do corpo ( $K$ )

Esta equação é conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann e pode ser usada para calcular o poder emissivo de um corpo negro em todos os comprimentos de onda, em todas as direções por unidade de tempo e área [19].

### 2.2.2 Radiação solar

O sol é uma esfera de gás aquecida por reações nucleares no seu centro. As temperaturas internas chegam aos  $20 \times 10^6 K$ . Este comporta-se como um corpo negro, emitindo radiações a temperatura de  $6000 K$  [13]. Apesar da radiação solar ser razoavelmente constante, ao atingir a Terra torna-se altamente variável, devido à absorção e dispersão na atmosfera. Nos dias de céu limpo, a radiação solar atinge a superfície da Terra em maior quantidade, quando o sol se encontra posicionado perpendicularmente em relação a superfície da Terra, fazendo um percurso mais curto através da atmosfera. Este percurso feito pelo sol até atingir a superfície terrestre, denomina-se massa de ar (AM) [13], representado pela equação 2.4.

$$AM = \frac{1}{\cos(\varphi)} \quad (2.4)$$

Quando  $\varphi = 0^\circ$ , a massa de ar é igual a 1, ou seja, radiação AM1 está sendo recebida; quando  $\varphi = 60^\circ$ , a massa de ar é igual a 2, prevalecendo as condições de radiação AM2. Para estudos fotovoltaicos definiu-se uma condição standard com massa de ar igual a 1.5, AM1.5, com  $\varphi = 48,2^\circ$  [13]. Na figura 2.1, pode-se observar os efeitos da massa de ar sobre a radiação solar.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

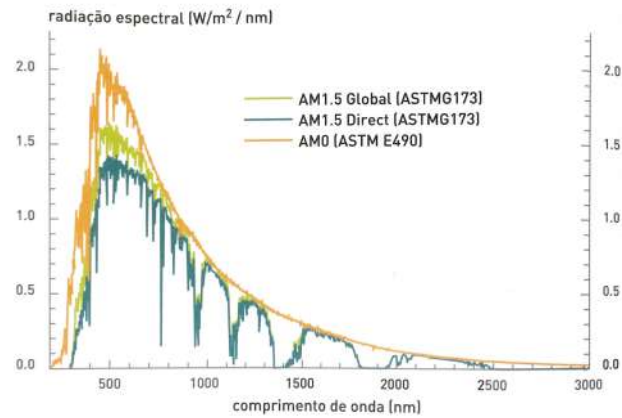


Figura 2.1: Radiação solar com os efeitos da massa de ar (AM) [2].

Estão representados três espectros da radiação diferentes:

- AM0 - Radiação na periferia da atmosfera (sem massa de ar)
- AM1.5G - Radiação direta e difusa (massa de ar com  $\varphi = 48,18^\circ$ )
- AM1.5D - Radiação direta equivalente a AM0 reduzida 28%.

O valor da massa de ar pode ser calculado em qualquer localização através da equação 2.5 [13].

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (2.5)$$

Onde,

s - Comprimento da sombra de um objeto ( $m$ )

h - Altura do objeto ( $m$ )

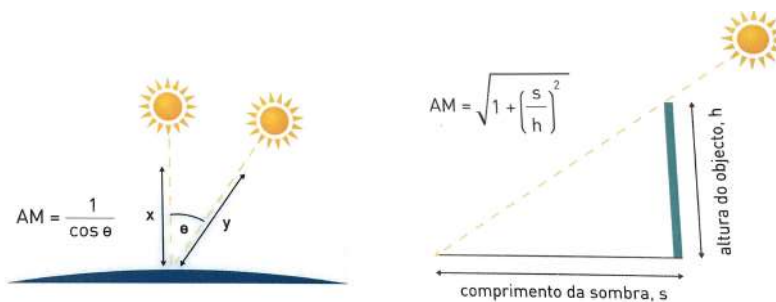


Figura 2.2: Massa de ar atravessada pela radiação solar [2].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

### 2.2.2.1 Radiação solar incidente na Terra

A radiação solar incidente na superfície da Terra, é atenuada em cerca de 30%, devido a vários fatores que passo a citar [13]:

- reflexão pela atmosfera da radiação com comprimentos de onda curtos (comprimentos de onda inferiores à  $\lambda^{-4}$ );
- absorção pelos gases presentes na atmosfera como o oxigênio, ozono, vapor de água e dióxido de carbono ( $CO_2$ );
- reflexão pelas nuvens e partículas de pó presentes no ar.

A velocidade de propagação da radiação solar é de  $3,00 \times 10^8$  m/s e apresenta comprimentos de onda,  $\lambda$ , entre os  $0,1 \mu m$  e os  $5,0 \mu m$ . A radiação incidente na superfície da Terra pode ser dividida em três componentes [2]:

- radiação direta - todos os raios de sol incidentes perpendicularmente na superfície da Terra. Esta radiação apresenta uma componente difusa de aproximadamente 10% quando o céu se encontra limpo. Esta percentagem tende a aumentar com o aumento da massa de ar e também em dias mais nublados. Entretanto, cerca de metade da radiação direta absorvida pelas nuvens acaba por ser recuperada através da radiação difusa.
- radiação difusa - luz solar proveniente da difração nas nuvens, poeiras, nevoeiros, entre outros fatores. Esta radiação se encontra na área azul do espectro devido a melhor reflexão de comprimentos de onda mais curtos. Consequência que faz com que o céu apareça azul.
- radiação albedo - resultante da inclinação de uma superfície, em relação à horizontal. Esta radiação pode ser direta ou difusa e, é reenviada em todas as direções por reflexão ou difusão.

Devido aos diversos fatores responsáveis pela redução da radiação na Terra o gráfico do espectro da radiação à superfície da Terra pode ser interpretado pela fig.2.3.

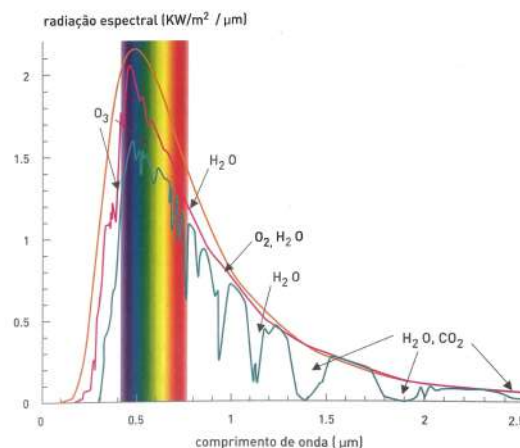


Figura 2.3: Radiação solar com os efeitos da atmosfera e seus agentes [2].

### 2.2.3 Movimento Terra-Sol

O planeta Terra ao realizar o seu movimento de translação em torno do Sol descreve uma trajetória elíptica num plano inclinado em relação ao equador. Devido a inclinação da Terra, o plano norte-sul geográfico apresenta-se desviado em relação ao plano norte-sul do campo magnético terrestre. A Terra roda em torno de si própria e completa uma rotação num dia, conclui a sua trajetória num ano e seis horas, acertando o calendário com um ano bissexto a cada 4 anos [2].



Figura 2.4: Campo magnético da Terra e seus polos geográficos [2].

#### 2.2.3.1 Declinação solar

Como dito anteriormente, o movimento de translação da Terra em torno do Sol não é perfeitamente circular, mas sim elíptico. Este movimento é o responsável por quatro posições características: dois equinócios e dois solstícios, que representam a passagem para uma nova estação do ano [9]. Os dois hemisférios são antagônicos, ou seja, aos solstícios de inverno e de verão no hemisfério sul correspondem aos solstícios de verão e de inverno no hemisfério norte, respetivamente. O mesmo se verifica com os equinócios de primavera e de outono [2]. A declinação solar trata-se do ângulo da radiação solar, ao meio dia solar, em relação ao plano do equador. Este ângulo varia entre os limites  $\pm 23,5^\circ$ , aproximadamente, dependente do dia do ano [2].

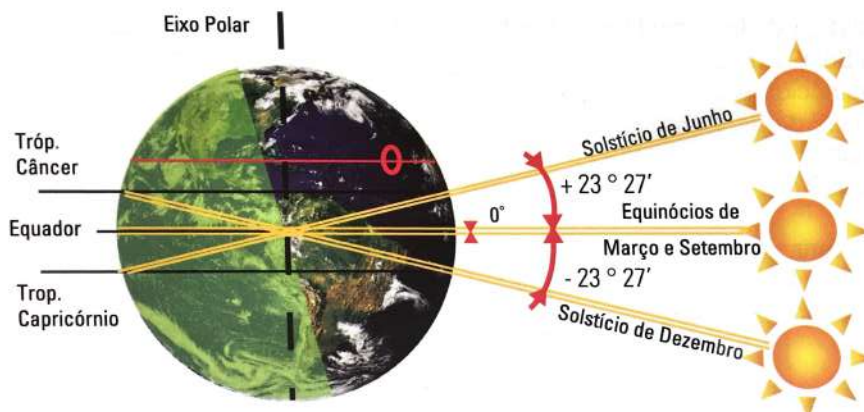


Figura 2.5: Declinação solar [9].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Portanto, para cada posição, em relação ao hemisfério norte [2]:

- Solstício de verão: hemisfério norte da Terra inclinado para o Sol (21 de junho). A declinação é máxima (+ 23,5°);
- Solstício de inverno: hemisfério norte da Terra inclinado para o lado oposto ao Sol (21 de dezembro). A declinação é mínima (- 23,5°);
- Equinócio da primavera: equador da Terra alinhado em relação ao equador do Sol (20 de março). Declinação nula;
- Equinócio de outono: equador da Terra intersecta-se com o equador do Sol (22 de setembro). Declinação nula.

O ângulo de declinação ( $\delta_s$ ), varia sazonalmente com a inclinação da Terra em relação ao seu eixo de rotação e o seu posicionamento relativamente ao Sol. Pode ser determinado com grande rigor através de fórmulas desenvolvidas em estudos astronómicos, representado pela equação 2.6 [2].

$$\delta_s = \sin^{-1}\{\sin(23,45) * \sin[\frac{360}{365} * (d - 81)]\} \quad (2.6)$$

Onde, d, representa o número do dia do ano, a partir do dia 1 de janeiro.

### 2.2.3.2 Ângulo de incidência da radiação solar

O ângulo de incidência da radiação solar ( $\theta$ ), representa o ângulo em que os raios solares atingem a superfície captadora. Este pode ser calculado através da equação 2.7 [9].

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \sin \delta_s \cdot \sin \varphi \quad (2.7)$$

Onde,

$\beta$  - inclinação do painel

$\varphi$  - latitude geográfica

$\delta_s$  - declinação solar

$\theta$  - ângulo de incidência

Da fig.2.6, pode-se observar os ângulos característicos da radiação solar ao longo do ano [2, 20]. Destacam-se:

- Latitude ( $\varphi$ ) - ângulo entre a zénite e a linha do equador terrestre;
- Altura solar ( $\alpha$ ) - ângulo entre o raio solar e a sua projeção num plano horizontal;
- Ângulo de incidência ( $\theta$ ) - ângulo entre a radiação solar e a superfície captadora;
- Ângulo zenital ( $\Theta_z$ ) - ângulo formado entre a radiação solar e a zénite;
- Ângulo azimutal da superfície ( $\gamma$ ) - ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano

horizontal e a direção Norte-Sul;

- Ângulo azimutal do sol ( $\gamma_s$ ) - ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul;
- Inclinação da superfície de captação ( $\beta$ ) - ângulo entre o plano da superfície e o plano horizontal.

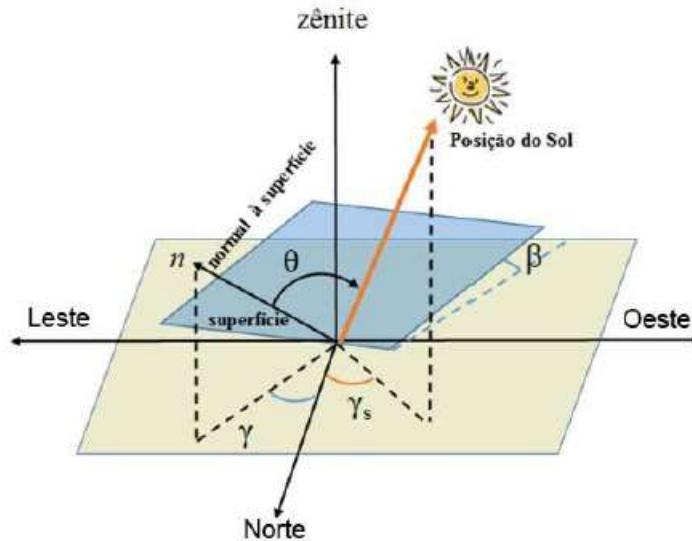


Figura 2.6: Ângulos característicos da radiação solar na Terra [20].

### 2.2.3.3 Altura do sol

Como dito anteriormente, a altura do sol ( $\alpha$ ), é o ângulo entre o raio solar e a sua projeção sobre o plano horizontal. Esta pode ser determinada com o valor do ângulo de declinação e a respetiva latitude através das equações 2.8 e 2.9, para o hemisfério norte e sul, respetivamente, podendo recorrer a equação 2.10 para maior precisão [9].

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta_S \quad (2.8)$$

$$\alpha = 90 + \varphi - \delta_S \quad (2.9)$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi) * \sin(\delta_S) + \cos(\varphi) * \cos(\delta_S) * \cos(h_S) \quad (2.10)$$

Onde,  $h_S$ , representa o ângulo horário local, em graus. Quanto maior a latitude, menor será a altura solar. Consequentemente, os raios solares incidirão de forma mais oblíqua. A altura solar é responsável pelo ângulo de inclinação dos painéis solares [9]. Pela figura 2.7 podemos ver a variação da altura solar ao longo do ano.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

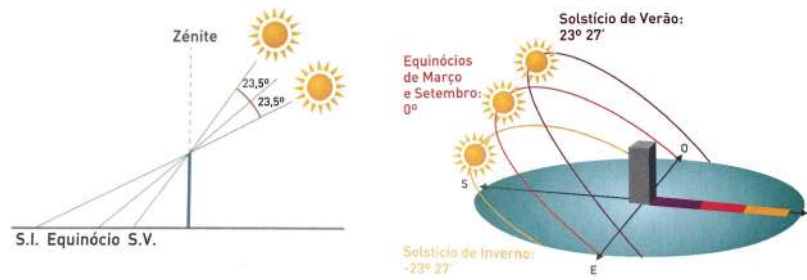


Figura 2.7: Variação da altura do sol [2].

### 2.2.3.4 Ângulo de azimute

O ângulo de azimute ( $\alpha_s$ ) representa a direção do movimento do sol. Ao meio dia solar, o Sol encontra-se orientado a Sul, no hemisfério Norte. O ângulo de azimute varia com a latitude e a estação do ano e caracteriza-se pela equação 2.11.

$$\text{azimute} = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(\delta_S) * \cos(\varphi) - \cos \delta_S * \sin(\varphi) * \cos(h_S)}{\cos(\alpha)} \right] \quad (2.11)$$

O ângulo de azimute ( $\alpha_s$ ) é importante em aplicações onde se pretende seguir o sol ao longo do dia, apresentando amplitude máxima no solstício de verão e mínima no solstício de inverno. Para maximizar a produção, deve-se orientar os painéis solares sempre a sul geográfico. Caso seja utilizada uma bússola, a orientação deve ser corrigida em  $7^\circ$  de este para oeste, uma vez que o sul observado é o sul magnético. É importante também referir que a cada desvio de  $15^\circ$ , nascente ou poente, verifica-se um avanço ou atraso de uma hora de captação solar, respetivamente [2].

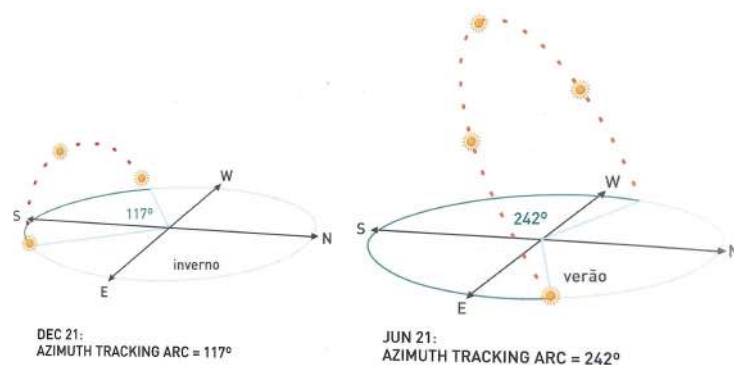


Figura 2.8: Arcos dos ângulos de azimute de inverno e verão [2].

### 2.2.3.5 Ângulo ótimo

A inclinação dos módulos fotovoltaicos é de extrema importância para otimizar a captação da radiação solar. Contudo, torna-se difícil alterar a inclinação dos mesmos ao longo do ano, devido a variação da altura solar. Define-se então um ângulo intermédio, para módulos fotovoltaicos

fixos, designado de ângulo ótimo e, pode ser calculado através da equação 2.12 [2].

$$\alpha_{otimo} = 3,7 + 0,69 * \varphi \quad (2.12)$$

Onde,  $\varphi$ , representa a latitude do local. É comum determinar a inclinação pelo tipo de utilização, como demonstra a tabela 2.1 [2].

Tabela 2.1: Orientação do painel face ao tipo de necessidade na instalação [2].

Utilização	Inclinação
Verão (hotéis de temporada)	Latitude - 15 °
Inverno (aquecimento)	Latitude + 15 °
Anual (domestico, outra não sazonal)	Latitude - 5 °

## 2.3 Energia solar fotovoltaica

### 2.3.1 Tecnologia dos equipamentos fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico foi observado em 1839, por Edmond Becquerel, ao verificar que a exposição à luz de elétrons de prata ou platina produzia uma pequena diferença de potencial [13, 21].

A história da primeira célula solar começou em 1953, quando o químico Calvin Fuller dos *Bells Laboratories*, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas. Fuller dopou uma barra de silício com uma pequena concentração de gálio com cargas positivas (silício do tipo p). No mesmo laboratório, Gerald Pearson, colega de Calvin Fuller, mergulhou a barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres (silício do tipo n). Ao expor a célula à luz solar verificaram que produzia uma corrente elétrica, produzindo, assim, a primeira célula solar, com uma eficiência de conversão de cerca de 4%. Substituindo o gálio pelo arsénio e o lítio pelo boro, Fuller apresentou a primeira célula solar na reunião anual da National Academy of Sciences em Washington, em 1954, com uma eficiência de conversão recorde de 6% [21].

A natureza é composta por materiais classificados como semicondutores. Estes possuem uma camada de valência totalmente preenchida por elétrons e uma camada de condução vazia, sem elétrons, comportando-se como um material isolante à temperatura de zero Kelvin. Entre as duas camadas existe uma camada, denominada de bandgap, representada por  $E_g$ , podendo atingir até 3 eV [2]. O bandgap é a distância entre a camada de valência de um elétron e a camada de condução. Este representa a energia mínima necessária para excitar um elétron até à camada de condução [22].

Tomando o exemplo de um átomo de silício, figura 2.9, este possui 4 elétrons na camada de valência que se ligam aos átomos vizinhos formando uma rede cristalina. Se a esta rede forem adicionados átomos com 5 elétrons de valência, processo denominado por dopagem, haverá um elétron em excesso que pode ser transportado para a camada de condução com pouca energia, a esse processo chama-se dopagem do tipo n. Se à mesma rede cristalina de silício, forem adicionados átomos com apenas 3 elétrons de valência, haverá um elétron em falta, ficando

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

assim com uma carga positiva, denominada de buraco ou lacuna, podendo deslocar com pouca energia um elétron vizinho para esta região, este processo é denominado de dopagem do tipo p [2, 13].

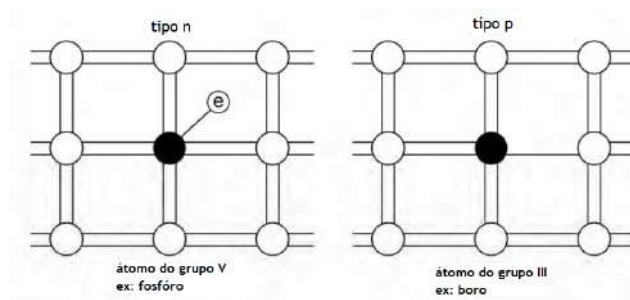


Figura 2.9: Cristal de silício dopado com impurezas para produzir um material semiconductor do tipo n e do tipo p [13].

A junção das duas camadas de silício dopadas forma uma junção do tipo p-n. Os elétrons livres no silício do tipo n migram para o tipo p, provocando um aumento de elétrons no tipo p e falta de elétrons no tipo n. Ao alcançar o equilíbrio, o campo elétrico criado, impede que mais elétrons livres possam migrar para o tipo p [2, 13]. Se esta junção for exposta a fótons com energia superior ao bandgap do material, geram-se pares elétrons-lacuna, originando uma corrente elétrica contínua [2, 9], como se pode observar na figura 2.10.

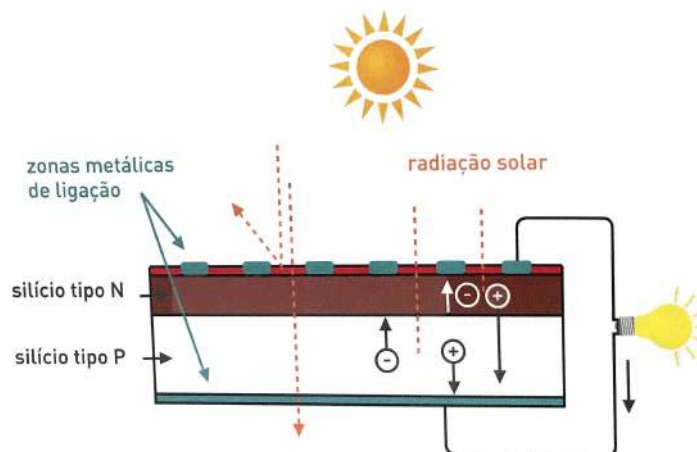


Figura 2.10: Célula fotovoltaica elementar [2].

O efeito fotovoltaico é caracterizado pela produção de uma corrente elétrica, produzida pela absorção de luz. É importante referir que, cerca de 55% da energia correspondente à radiação solar não é aproveitada pelos sistemas fotovoltaicos, uma vez que a sua energia é inferior ao bandgap das células, ou então demasiado elevada [2].

### 2.3.1.1 Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica

O esquema de uma célula fotovoltaica pode ser representada como sendo uma fonte de corrente ligada em paralelo com o díodo de junção p-n [9], como se pode observar na fig.2.11.

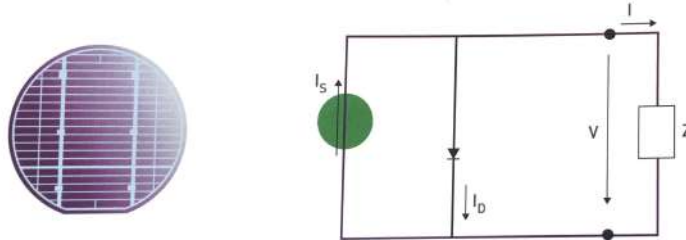


Figura 2.11: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [9].

A fonte de corrente,  $I_S$ , representa o feixe de radiação solar incidente, sendo esta uma corrente unidirecional constante para uma dada radiação incidente. A corrente,  $I_D$ , representa a troca de elétrons na junção p-n e, pode ser representada por um díodo, devido à corrente interna unidirecional que depende da tensão  $V$  aos terminais da célula [9]. Dito isto, a corrente no díodo pode ser representada pela equação 2.13.

$$I_D = I_0 * (e^{\frac{V}{mV_t}} - 1) \quad (2.13)$$

Onde,

$I_D$  - Corrente unidirecional (A)

$I_0$  - Corrente inversa máxima de saturação do díodo (A)

$V$  - Tensão aos terminais da célula (V)

$m$  - Fator de idealidade do díodo (díodo ideal  $m = 1$ , díodo real  $m > 1$ )

$V_t$  - Potencial térmico (V)

O potencial térmico [9], pode ser calculado através da equação 2.14.

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (2.14)$$

Onde,

$K$  - Constante de Boltzman ( $1,380 * 10^{-23} J/K$ )

$T$  - Temperatura absoluta da célula (K)

$q$  - Carga elétrica do elétron ( $1,6 * 10^{-19} C$ )

A corrente na carga, é dada por [9]:

$$I = I_S - I_D \quad (2.15)$$

Substituindo, a equação 2.13 na equação 2.15, obtêm-se:

$$I = I_S - I_0 * (e^{\frac{V}{mV_t}} - 1) \quad (2.16)$$

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

### 2.3.1.2 Modelo real de uma célula fotovoltaica

O circuito real da célula fotovoltaica, contém uma resistência em série e uma resistência em paralelo, que representam as perdas de tensão e corrente, respectivamente. A resistência em série ( $R_S$ ), simboliza as perdas por efeito de Joule da própria célula, enquanto que a resistência em paralelo ( $R_p$ ), representa as perdas derivadas do processo de fabrico e caracterizam as correntes parasitas que circulam na célula devido a pequenas imperfeições na estrutura do material [9]. O esquema que representa uma célula fotovoltaica pode ser vista na fig. 2.12, onde a corrente que chega à carga é expressa pela equação 2.17 [9].

$$I = I_S - I_0 * \left( e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_S * I}{R_p} \quad (2.17)$$

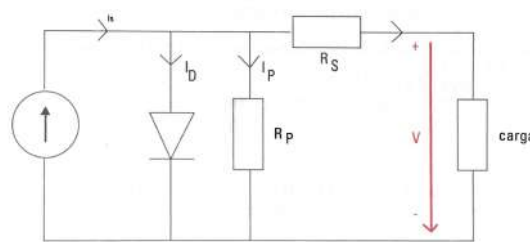


Figura 2.12: Circuito real da célula fotovoltaica [9].

### 2.3.2 Tipos de células

As células solares empregues em tecnologias fotovoltaicas encontram-se divididas em três gerações. A primeira geração é dividida em duas categorias, as de silício monocristalino e as de silício policristalino. Estas duas tecnologias encontram-se bem estabelecidas no mercado mundial, apresentando as melhores eficiências presentes no mercado. As células de segunda geração, mais conhecidas por células de película fina, apresentam menor eficiência e têm baixa participação no mercado mundial, se comparadas com as tecnologias de primeira geração que representam aproximadamente 85% do mercado fotovoltaico mundial. A terceira geração é composta por células multijunções, células orgânicas, polímeros, entre outras tecnologias atualmente em desenvolvimento. Estas células tendem a apresentar alta eficiência e baixo custo. Uma das preocupações para as células de terceira geração é eliminar os materiais tóxicos e prejudiciais e concentrar em materiais não tóxicos e abundantes na natureza. Estas células ainda se encontram em desenvolvimento e não contam com produção em larga escala [2, 9, 13].

#### 2.3.2.1 Células de silício monocristalino

O silício monocristalino é o material base utilizado em praticamente todos os equipamentos eletrónicos atuais. No ramo fotovoltaico este é utilizado para fabricar células fotovoltaicas devido à sua capacidade de absorver a radiação. As células de silício são denominadas células de primeira geração e apresentam o melhor rendimento entre as células atualmente comercializadas, a rondar os 18%, em 2018 e, representando cerca de 32,2% das células produzidas a nível global [23, 24]. Contudo, a produção das células exige um gasto exorbitante de energia devido à elevada pureza exigida ao silício. O silício é encontrado na natureza em forma de dióxido de

silício. Este passa por um processo para separar o oxigênio não desejado, aquecendo e fundindo o dióxido de silício juntamente com pó de carvão criando o silício metalúrgico, com 98% de pureza. Ainda assim, para as células solares exige-se um nível de pureza de 99,9999% (6N), motivando uma procura de novos processos de purificação e cristalização para reduzir a energia gasta na produção e, conseqüentemente, reduzir os custos. São vários os processos utilizados na produção do silício, destacando, assim, o método de Czochralski e o método de fusão de zona [25].

O método de Czochralski, nomeado segundo o seu inventor, o químico polaco Jan Czochralski, consiste na extração lenta do cristal de silício, a uma temperatura de aproximadamente 1420 °C. Os cristais produzidos têm 30 cm de diâmetro e vários metros de comprimento. Estes são, posteriormente, cortados em barras hexagonais, laminados em pastilhas com 0,3 mm de espessura e dopados para formar a junção p-n. Para finalizar o processo as células são equipadas com uma pista elétrica e uma camada anti-reflexo, na parte frontal.

O método de fusão de zona consiste em passar silício policristalino de grau eletrônico puro por uma bobina de aquecimento de radiofrequência, que cria uma zona fundida onde o lingote de cristal cresce. Utiliza-se uma semente de cristal na outra extremidade para iniciar o crescimento. Uma vez que, a maior parte das impurezas são mais solúveis na zona fundida do que no cristal, esta fica livre de impurezas. Este processo pode ser repetido até que se atinge a pureza necessária, desprezando o extremo onde se formam as impurezas [25]. Entretanto, devido à dificuldade em criar lingotes de silício e o custo da produção ser elevado, as células produzidas pelo método de fusão de zona são geralmente utilizadas para uso laboratorial, predominando o método de Czochralski para uso comercial [25].

A grande vantagem do silício monocristalino encontra-se na alta eficiência das suas células solares, ocupando menos espaço físico e produzindo mais energia elétrica. Apresenta, também, um tempo de vida útil elevado, de aproximadamente 25 anos, produzindo mais de 80% do seu potencial original. As elevadas temperaturas necessárias para a produção e o desperdício no corte do silício fazem com que o preço das células solares seja elevado [26].

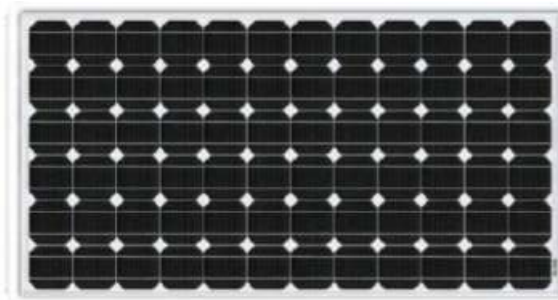


Figura 2.13: Célula de silício monocristalino

Em 1998, num estudo realizado pela Universidade de New South Wales, na Austrália, foram conseguidas eficiências de conversão de 24.4%, para células de silício monocristalino. Uma melhor eficiência das células dá-se devido à utilização de camadas finas de dióxido de silício para encobrir a célula quase completamente e, a partir de um processo de fabrico que permite formar uma superfície com textura hexagonal, denominada de "honeycomb". A textura permite reduzir as perdas por reflexão e aumenta substancialmente a espessura ótica efetiva da célula,

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

fazendo com que a luz solar seja encurralada dentro da célula por reflexão interna total. O óxido utilizado reduz as recombinações ao longo da superfície da célula, melhorando assim a tensão de circuito aberto [27].

### 2.3.2.2 Células de silício policristalino

As técnicas para a produção do silício policristalino são menos críticas e, portanto, menos dispendiosas que as técnicas utilizadas para a produção do silício monocristalino. Estas células, ao contrário das células de silício monocristalinas, utilizam métodos gasosos, fazendo reagir o silício (Si) com o cloreto de hidrogénio (HCl), resultando em gases da família dos silanos. Gases como o silano (SiH<sub>4</sub>) ou o triclorossilano (SiHCl<sub>3</sub>) passam por sucessivas destilações até atingirem o grau de pureza necessário. Existem duas técnicas muito utilizadas para a produção do silício policristalino a partir de fontes gasosas, o método do reator Siemens e, o método de reator de leito fluidizado (FBR - Fluidized Bed Reactor) [25].

O método do reator Siemens consiste em obter o triclorossilano por hidrocloração do silício metalúrgico, à temperatura de 350 °C, sem ser necessário o uso de um catalisador. O triclorossilano possui alta taxa de deposição, baixo ponto de ebulição, de aproximadamente 31,8 °C, e alta volatilidade, que facilitam a sua purificação, removendo, quase por completo, a presença do boro e do fósforo. Este passa então por duas etapas de destilação fracionada, removendo primeiro os resíduos mais pesados, e na segunda destilação os resíduos mais leves. O triclorossilano de alta pureza, é então diluído com hidrogénio de alta pureza e introduzido no reator de decomposição. É depositada na superfície de bastões de silício policristalino, em forma de U, aquecidos por resistência elétrica, à temperatura de 1100 °C. Os bastões de silício policristalinos são, por fim, cortados em pequenos pedaços. É um processo dispendioso, que consome muita energia e ocasiona grandes perdas de cloro e silício. Este processo é o mais utilizado para produção do silício policristalino, sendo o responsável para a produção de 85% das células solares de silício policristalino [25, 28].

O método do reator de leito fluidizado consiste em utilizar um catalisador para transformar o triclorossilano em silano. O silano, é posteriormente, tratado com um reator idêntico ao reator Siemens. A escolha do silano dá-se pela utilização de temperaturas bem mais baixas, eficiência de conversão superior em relação ao triclorossilano e por não se formar um produto corrosivo. Este processo apresenta algumas desvantagens devido ao alto custo de produção, onde são necessários processos adicionais para transformar o triclorossilano em silano e devido ao desperdício, fazendo com que sejam necessárias instalações paralelas de reciclagem. Cada reciclagem de clorossilanos gera apenas uma pequena percentagem de silano [25, 28].

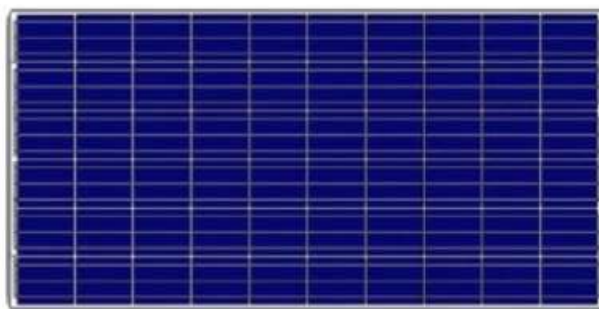


Figura 2.14: Célula de silício policristalino

Em 2004, num estudo realizado pelo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, na Alemanha, apresentaram a primeira eficiência de conversão acima dos 20% para células de silício policristalinas, registando uma eficiência de conversão de 20.3%. O principal obstáculo, no fabrico de células policristalinas de alta eficiência, é a prevenção da degradação da célula ao longo da sua vida útil, causada pelas elevadas temperaturas impostas aos processos de fabrico. O uso da oxidação na passivação da superfície traseira da célula e de um processo de contacto por laser, reduz significativamente as temperaturas de fabrico, prevenindo, assim, a degradação dos condutores. As excelentes propriedades óticas da superfície traseira, combinada com uma superfície frontal com uma textura em plasma, permite que a luz solar seja encurralada no interior da célula com maior eficiência [29].

### 2.3.2.3 Células de película fina

Nas células de película fina os semicondutores, como o silício amorfo, seleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe), são aplicados em camadas finas num substrato de vidro. Estas são denominadas células de segunda geração e utilizam métodos como a disposição por vaporização, processos de disposição catódica e banho eletrolítico para a produção das células [30]. Estas células apresentam temperaturas de fabrico situadas entre os 200 °C e os 500 °C, temperaturas muito inferiores às temperaturas necessárias para a produção de células de silício cristalino. As baixas temperaturas, associadas ao menor consumo de material e uma elevada capacidade de automatização da produção em larga escala, proporcionam menores custos de produção.

As células de película fina, ao contrário das células cristalinas, não apresentam um tamanho standard, podem-se cortar os substratos em vários tamanhos e revestir com o material semiconductor. Na parte frontal da célula, orientada para a luz, o contacto elétrico é formado por uma camada de metal óxido, denominada de camada OTC (Óxido Transparente Condutivo). Esta camada fortemente condutora e transparente, pode ser formada pelo óxido de zinco (ZnO), o óxido de estanho (SnO<sub>2</sub>) ou ainda o óxido de índio e estanho (ITO). Na parte posterior o contacto elétrico é criado por um revestimento metálico opaco [2, 9].

Quando se fala em células de película fina, é normal falar em módulo monolítico, onde se diz que a célula é formada por uma fita extensa e estreita de material semiconductor sobre um substrato de vidro. Ao associar uma folha de vidro, revestida por células ligadas em serie, encapsuladas com um material composto, Espuma Vinílica Acetinada (EVA) e protegida por uma segunda camada de vidro, estamos, assim, na presença de um modulo fotovoltaico [2, 9].

As células de película fina apresentam uma baixa eficiência mas possuem algumas vantagens, que passo agora a citar, face as células cristalinas:

- Melhor aproveitamento da radiação difusa e para baixos níveis de radiação;
- Coeficiente de temperatura mais favorável, apresentando melhor desempenho em climas com elevadas temperaturas;
- Menor sensibilidade ao efeito do sombreamento.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

### Células de silício amorfo

O silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) é produzido através de um reator plasmático por um processo de vaporização química (DVC) do silano gasoso ( $\text{SiH}_4$ ), processo este que requer baixas temperaturas,  $200\text{ }^\circ\text{C}$  a  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , aproximadamente. Este é dopado por uma mistura de gases para a produção das camadas do tipo p ou do tipo n (ex:  $\text{B}_2\text{H}_6$  para dopagem do tipo p e  $\text{PH}_3$  para dopagem do tipo n). Neste tipo de células a junção p-n, por si só, não consegue gerar energia elétrica devido à reduzida extensão da difusão do material. Surge, então, a necessidade de adicionar uma terceira camada, denominada de camada intrínseca, i, entre as camadas p e n. Esta camada aumenta a durabilidade do portador de carga criando, assim, uma nova estrutura, a junção p-i-n [31].

As células de silício amorfo, baixam consideravelmente a sua eficiência durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devido ao efeito de Staebler-Wronski [32], até atingir um valor estável. Este efeito defende que a densidade de defeitos do silício amorfo hidrogenado (aSi:H) aumenta com a exposição à luz, causando um aumento na corrente de recombinação e reduzindo a eficiência de conversão da luz solar em eletricidade. Estas células apresentam eficiências entre 5% a 8%, em condições estáveis [9, 32].

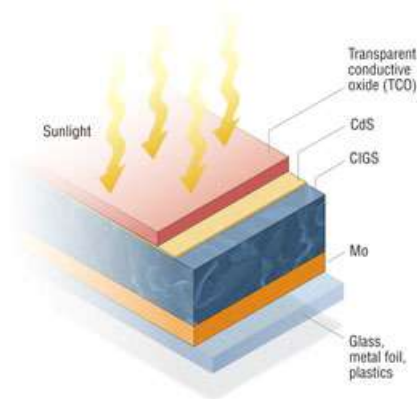


Figura 2.15: Célula solar de silício amorfo [33].

Em 2015, num estudo realizado pelo *Institute of Energy and Climate Research*, conseguiu-se eficiências de conversão de 11%, em condições iniciais, reduzindo para 10,3%, após 1000 horas expostas a luz. Tal eficiência foi alcançada, após aplicar uma camada anti-refletora no vidro onde se incide a luz. Esta camada anti-refletora, reduz as perdas por refração, o que resulta num aumento da corrente de curto-circuito e, conseqüente, aumento da eficiência da célula [34].

### Células de telureto de cádmio (CdTe)

As células solares de telureto de cádmio, CdTe, são a segunda tecnologia fotovoltaica mais comum, depois do silício cristalino, representando, atualmente, cerca de 5% do mercado mundial. Essas células apresentam algumas vantagens, como a alta absorção e processos de fabrico de baixo custo, fornecendo uma alternativa de baixo custo às tecnologias convencionais à base de silício. O telureto de cádmio apresenta um bandgap de aproximadamente  $1,45\text{ eV}$ , bandgap esse que combina com o espectro solar e é quase ideal para converter energia solar em energia elétrica usando apenas uma junção simples [35].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

As células solares de CdTe mais comuns consistem numa simples junção p-n, contendo uma camada CdTe, do tipo p, combinada com uma camada de sulfeto de cádmio (CdS), do tipo n. Para concluir as células solares adiciona-se um óxido condutor transparente de alta qualidade, normalmente óxido de estanho dopado com flúor, e um contacto elétrico posterior, geralmente uma pasta de metal ou carbono com cobre [35].

Para melhorar a eficiência dos módulos recorre-se a processos de deposição por vaporização. Este processo é feito em vácuo, onde as camadas de CdS e CdTe são depositadas à temperaturas de  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente. O CdS absorve uma pequena proporção da luz visível na parte azul do espectro e permite que a restante radiação passe para a camada CdTe. O contacto metálico na face oposta é então revestido utilizando um processo de deposição catódica [31].

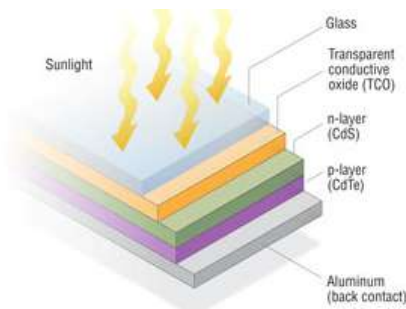


Figura 2.16: Célula solar de telureto de cádmio [35]

Células solares de CdTe com eficiências de 19 % foram registadas pela *First Solar*. Este valor foi conseguido com um aumento da corrente de curto-circuito e do fator de forma da célula. O estudo comprova também que a tensão de circuito aberto de células de CdTe não está limitado a aproximadamente  $850\text{ mV}$  e já apresenta dispositivos excedendo os  $900\text{ mV}$ , levando os investigadores a sugerir que eficiências próximas dos 22% podem ser alcançadas num futuro próximo [36].

### Células de disselenieto de cobre índio gálio (CIGS)

Desde o início do desenvolvimento da tecnologia de CIGS têm-se obtido excelentes resultados, devido às suas propriedades óticas e eletrónicas favoráveis. Estas células apresentam algumas vantagens como um elevado índice de absorção da radiação solar e um bandgap ajustável que permite uma deposição em tandem da célula [37]. Estas células são compostas pelo molibdénio, que faz o contacto no fundo da célula, o CIGS, que é o semiconductor do tipo p que absorve a luz solar, o CdS, que é o semiconductor do tipo n, o OTC, que é o óxido condutor transparente, utilizado como contacto frontal e o AR, a camada anti-refletora. Para finalizar adiciona-se uma grade de contactos metálicos para que se possa obter a corrente da célula [38].

São varias as técnicas utilizadas para a produção das células, destacando a co-evaporação em três estágios. Numa primeira fase,  $(\text{In}, \text{Ga})_2\text{Se}_3$  é formado a partir de índio, gálio e um fluxo de selénio. De seguida, cobre é evaporado até que o filme se torne levemente rico em cobre, formando, assim, a fase  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})_3\text{Se}_5$ . Numa ultima fase a composição estequiométrica  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  é alcançada. É extremamente importante controlar a temperatura para promover a mudança de fase e cristalização [38].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

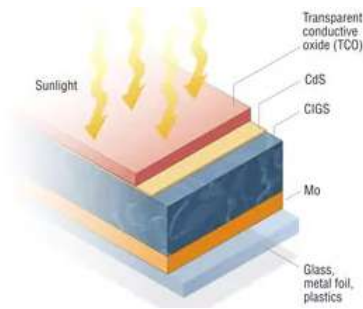


Figura 2.17: Célula solar de disseleneto de cobre índio gálio [39].

Uma eficiência recorde para as células de CIGS foi atingida pela Solar Frontier Kabushiki Kaisha, empresa japonesa, e certificada pelo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). Foi observado um aumento da tensão de circuito aberto, de  $36,1 \text{ mV}$ , se comparado com células testadas anteriormente. Este aumento da tensão de circuito aberto, deu-se devido a um tratamento de fluoreto de potássio que melhora a qualidade da camada absorvente da luz solar e, substituindo a camada de CdS por uma camada mais ecológica. Como resultado, foi obtida uma eficiência de  $22,8\%$ , em ambiente controlado, para células de CIGS [40].

### 2.3.2.4 Células de perovskita

Uma camada de silício precisa de uma espessura de aproximadamente  $200 \mu\text{m}$  para absorver a quantidade de luz ideal. Atualmente, existem diversos materiais mais eficientes com apenas alguns micrômetros de espessura, fazendo com que sejam mais atraentes no preço e gastem menos energia no fabrico. Algumas dessas tecnologias encontram-se bem estabelecidas no mercado, como o caso do CdTe, que recentemente atingiu eficiências idênticas as células de silício cristalino e, o CIGS, partilhando cerca de  $5\%$  do mercado mundial fotovoltaico. Contudo, essas novas tecnologias dependem de materiais raros, o telúrio e o gálio. Essa deficiência de materiais instiga a investigação a novos materiais. Materiais orgânicos como polímeros sintetizados de ingredientes simples podem ser utilizados como camada absorvente de luz solar nas células fotovoltaicas. Dentre as novas tecnologias, a perovskita apresenta ser uma das mais promissoras [41].

A perovskita (óxido de cálcio e titânio,  $\text{CaTiO}_3$ ), é um mineral relativamente raro e apresenta propriedades como a supercondutividade, uma propriedade excitante para o ramo fotovoltaico. Este material é fabricado de forma simples e é considerado o futuro das células solares, uma vez que, a sua estrutura distinta o torna perfeito para aplicações fotovoltaicas eficientes e de baixo custo. Uma célula solar de perovskita contém um composto estruturado de perovskita, mais precisamente, um material híbrido orgânico-inorgânico de chumbo ou um material baseado em estanho, como camada ativa de captação da luz. Estes materiais são baratos e relativamente fáceis de fabricar [41].

As células possuem excelentes propriedades, como amplo espectro de absorção, rápida separação de carga, longa distância de transporte de elétrons, entre outras. Uma das principais vantagens destas células é o facto de reagirem com diferentes comprimentos de onda da luz, o que faz com que possam transformar mais radiação solar em eletricidade, comparando com as outras células [42]. Em menos de 5 anos, conseguiram eficiências a rondar os  $22\%$ , valor muito promissor se comparado com outras tecnologias que levaram mais de 30 anos para alcançar essa

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

mesma eficiência [43]. Contudo, existem alguns entraves ao desenvolvimento desta tecnologia. A toxicidade de alguns dos componentes, como o cobre, e a sua rápida deterioração na presença da humidade são alguns dos obstáculos que tendem a dificultar a comercialização destas células.

As células são de película fina construídas com camadas de materiais impressos ou revestidos por tinta líquida ou depositado em vácuo [44]. Esta é constituída pela camada de perovskita, colocada entre uma camada transportadora de eletrões (ETL, do inglês *Electron Transport Layer*), e uma camada transportadora de lacunas (HTL, do inglês *Hole Transport Layer*). Uma das camadas, HTL ou ETL, é depositada sobre um elétrodo condutor transparente e sobre a outra camada é depositada um metal (ouro, prata ou alumínio), completando assim a célula fotovoltaica [45].

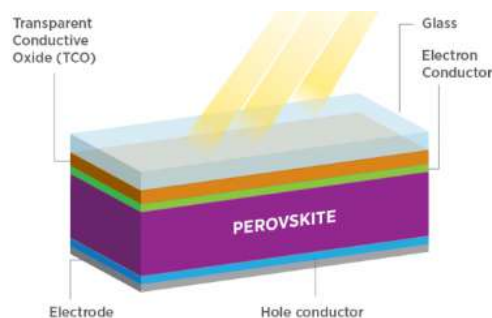


Figura 2.18: Célula de perovskita [46].

Em 2015, num estudo realizado pela Korea Research Institute of Chemical Technology, investigadores apresentaram uma solução para a formação do mineral perovskita, através do iodeto de formamidínio de chumbo ( $FAPbI_3$ ), em detrimento do convencional iodeto de metil amónio de chumbo ( $MAPbI_3$ ). Segundo o estudo, o  $FAPbI_3$  apresenta um bandgap que lhe permite mais absorção da luz solar em relação ao  $MAPbI_3$ , permitindo uma eficiência de conversão de potência certificada de 20.1%, em condições AM1.5G (Standard) [47].

### 2.3.2.5 Células multi junções

As células de primeira e segunda geração, estão limitadas pela teoria de máxima eficiência de conversão para uma célula fotovoltaica, denominada teoria de Shockley-Queisser. Esta teoria, defende que a máxima eficiência de conversão para uma célula fotovoltaica é de 33.7%, assumindo uma única junção p-n com um bandgap de  $1.34 eV$ , utilizando um espectro AM1.5 [48, 49]. Para ultrapassar esse limite imposto pela teoria de Shockley-Queisser, células solares multi junções, têm vindo a ser estudadas.

Para um maior aproveitamento de energia presente no fóton utilizam-se diferentes materiais semicondutores, com o intuito de guiar cada fóton para o material com o bandgap semelhante. Como se pode observar na figura 2.19, uma célula de tripla junção apresenta três camadas com diferentes bandgap. A camada de topo absorve a radiação de maior energia, que corresponde à cor vermelha representada no espectro da figura 2.19, produzindo uma tensão de saída mais elevada. As camadas do meio e da base absorvem radiações mais fracas fazendo diminuir a tensão de circuito aberto. O material deve ser transparente para que a luz solar possa chegar às células com menor bandgap. A maioria das células são formadas monoliticamente, ou seja, por camadas sobrepostas e ligadas em série [50].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

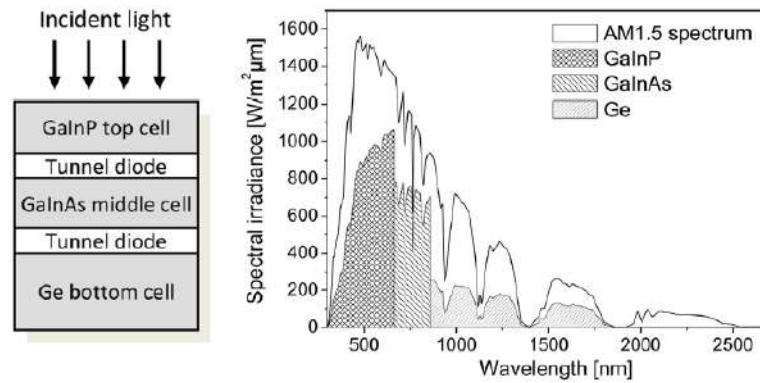


Figura 2.19: Célula fotovoltaica multi junções [51].

Em 2016, investigadores de Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, na Alemanha, conseguiram atingir uma eficiência de conversão de 46.1 %, para células fotovoltaicas de tripla junção. Estes valores foram atingidos utilizando diferentes materiais semicondutores do grupo III e V da tabela periódica. Foram utilizadas três sub células, fosfeto de índio e gálio (GalnP), arseneto de índio e gálio (GaInAs) e germânio (Ge), empilhadas umas em cima da outra, conectadas em série por díodos túnel. Desta forma, cada sub célula absorve a luz de uma faixa espectral mais próxima do seu bandgap, reduzindo, assim, as perdas em forma de calor [51].

### 2.3.3 Curva caraterística das células fotovoltaicas

A curva caraterística de uma célula fotovoltaica é importante para que se possam estabelecer as melhores condições de funcionamento possíveis. Esta curva é conhecida como a caraterística  $I - V$  e apresenta a mesma forma para qualquer célula fotovoltaica [52].

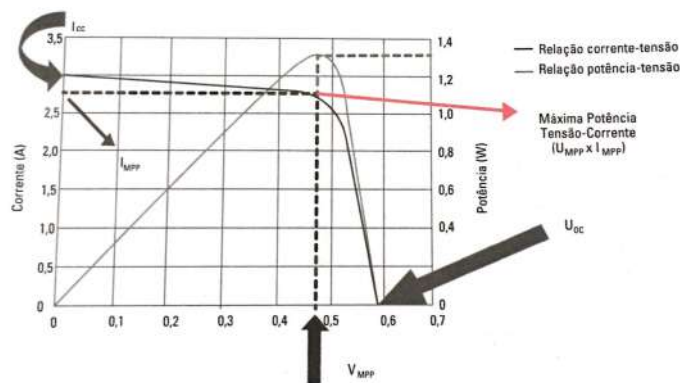


Figura 2.20: Curva caraterística de uma célula fotovoltaica [9].

Como se pode observar pela fig.2.20, a corrente mantém-se aproximadamente constante, com valor próximo da corrente de curto-circuito,  $I_{CC}$ , onde  $V = 0 V$  até um determinado valor de resistência na carga fazendo com que a corrente diminua. Por sua vez, para um valor de resistência elevado, o painel comporta como uma fonte de tensão constante, cujo valor é igual à tensão de circuito aberto,  $V_{CA}$ . O ponto de potência máxima, considerado o ponto de funcionamento ótimo, encontra-se entre essas duas regiões e pode ser visto na fig.2.20, como sendo o ponto com coordenadas  $I_{MPP}$  e  $V_{MPP}$  [9, 52]. O ideal é que este sistema funcione sempre próximo do ponto de potência máxima para que haja maior eficiência. A eficiência é importante para avaliar a qualidade dos módulos fotovoltaicos e relaciona a energia produzida pelo módulo

e a radiação solar nele incidente [9], e pode ser expressa pela equação 2.18.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_R} * 100 \quad (2.18)$$

Onde,  $P_{MPP}$ , representa a potência máxima produzida pelo módulo fotovoltaico e,  $P_R$  representa a radiação incidente na superfície do módulo fotovoltaico e pode ser calculada através da equação 2.19.

$$P_R = G * P_{AM} \quad (2.19)$$

Na equação 2.19, G representa a radiância em  $W/m^2$  que pode ser medida através de um piranómetro.  $A_M$  representa a área, em  $m^2$ , do módulo fotovoltaico onde incide a radiação solar.

Outro fator importante a ter em conta é o fator de forma (FF). Este expressa a qualidade de uma célula solar ao comparar a potência máxima obtida com a tensão em circuito aberto e a corrente de curto-circuito. A corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto são a corrente e a tensão máximas, respetivamente, de uma célula solar. No entanto, em ambos os pontos operacionais, a energia da célula solar é zero. O FF é um parâmetro que define a razão da potência máxima da célula solar para o produto de  $V_{CA}$  e  $I_{CC}$  [9], tal como descrita pela equação 2.20.

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{I_{CC} * V_{CA}} \quad (2.20)$$

É necessário o uso de um sistema de controlo, para que o painel se mantenha a funcionar no ponto de potência máxima, uma vez que, o bom funcionamento do painel é afetado por condições ambientais, mais concretamente a temperatura e a radiação solar incidente.

A alteração da radiação incidente no módulo fotovoltaico afeta consideravelmente o desempenho do mesmo, diminuindo a intensidade de corrente produzida com a diminuição da radiação. Isso só acontece porque a corrente produzida é diretamente proporcional aos fotões incidentes no painel [2, 9], como se pode observar pela fig.2.21.

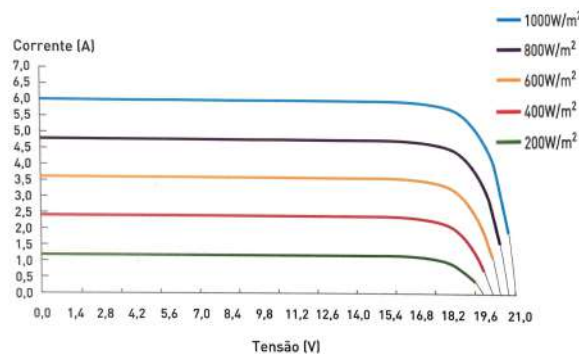


Figura 2.21: Curva caraterística de um módulo fotovoltaico em função da radiação incidente [2]

A temperatura das células fotovoltaicas, assim como a radiação, afeta a eficiência dos módulos fotovoltaicos, afetando diretamente a tensão de circuito aberto,  $V_{CA}$  do painel, diminuindo assim a potência fornecida pelos módulos. Esta diminuição da temperatura dá-se devido ao facto de a mobilidade dos portadores de carga diminuir com o aumento da temperatura [2, 9].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

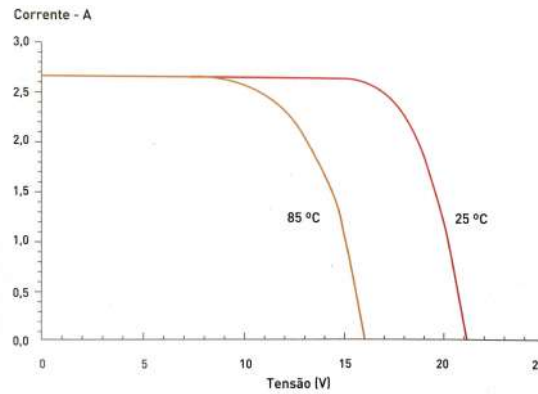


Figura 2.22: Curva característica  $I - V$  de uma célula fotovoltaica em função da temperatura [2]

### 2.3.4 Módulos fotovoltaicos

Uma vez que a tensão máxima de uma célula ronda os  $600 \text{ mV}$  e a corrente ronda os  $30 \text{ mA/cm}^2$ , estas são raramente utilizadas de forma individual. São preferencialmente conectadas em série e/ou paralelo para obter a tensão e corrente desejada, formando assim um módulo fotovoltaico.

A construção dos módulos deve permitir resistir as condições ambientais adversas. As células são encapsuladas com diferentes camadas de material: vidro de alta transparência e temperado, EVA e filme de fluoreto de polivinilo (Tedlar) ou vidro, dando rigidez ao módulo para que este possa durar vários anos. De seguida, é colocada uma caixilharia em alumínio para facilitar a instalação [9], como se pode observar pela fig 2.23.

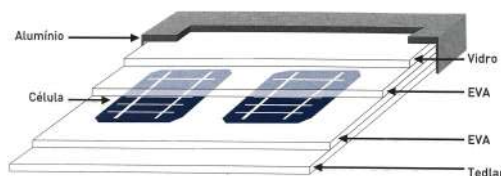


Figura 2.23: Pormenor construtivo de um módulo fotovoltaico [2]

O agrupamento dos módulos fotovoltaicos com as mesmas características, em série, paralelo ou misto, permite obter diferentes valores de tensão e corrente. Este agrupamento é denominado de campo fotovoltaico.

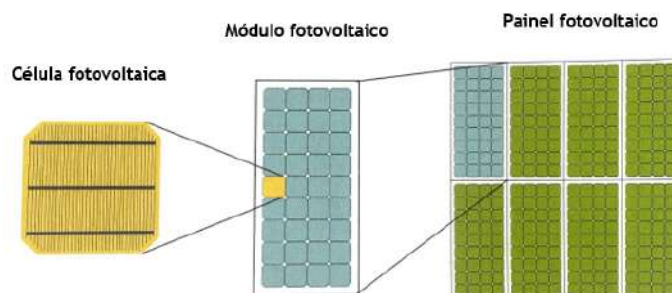


Figura 2.24: Célula, módulo e campo fotovoltaico [2].

### 2.3.4.1 Associação de módulos fotovoltaicos em série, paralelo e mista

O objetivo da ligação de módulos fotovoltaico é o aumento da potência máxima de um campo fotovoltaico. Existem, nesse sentido, três possibilidades de se realizar a associação de módulos através de interligação em série, paralelo e mista [9].

Os módulos fotovoltaicos ligados em série são designados normalmente por fileiras. Para uma correta interligação estes devem ser da mesma potência e marca de forma a evitar perdas de energia ao longo do sistema. Este agrupamento permite obter valores mais elevados de tensão, mantendo constante a corrente das células, como se pode observar pela fig.2.25 [9].

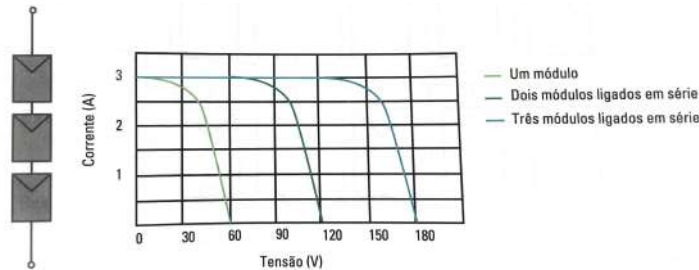


Figura 2.25: Associação em série de módulos fotovoltaicos [9]

Pela análise da fig.2.25 podemos concluir que:

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n = V * n \tag{2.21}$$

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{2.22}$$

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n = V_T * I_T \tag{2.23}$$

- $n$  - Número de módulos associados em série
- $V$  - Tensão de funcionamento de cada módulo (V)
- $I$  - Corrente de funcionamento de cada módulo (A)
- $V_T$  - Tensão total da associação em série dos módulos (V)
- $I_T$  - Corrente total da associação em série dos módulos (A)
- $P_T$  - Potência total da associação em série dos módulos (W)

Para a associação de módulos em paralelo a intensidade de corrente aumenta para a mesma tensão ao longo dos módulos [2], como se pode observar pela fig.2.26.

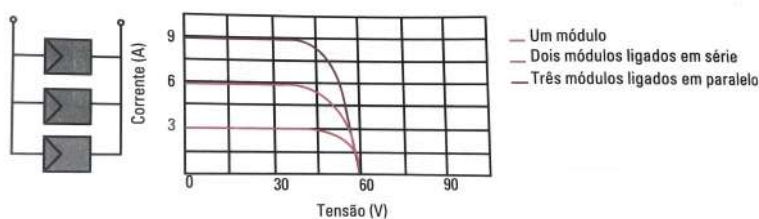


Figura 2.26: Associação em paralelo de módulos fotovoltaicos [9]

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Pela análise da fig.2.26 podemos concluir que:

$$V_T = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.24)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n * I \quad (2.25)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n = V_T * I_T \quad (2.26)$$

$n$  - Número de módulos associados em paralelo

$V$  - Tensão de funcionamento de cada módulo ( $V$ )

$I$  - Corrente de funcionamento de cada módulo ( $A$ )

$V_T$  - Tensão total da associação em paralelo dos módulos ( $V$ )

$I_T$  - Corrente total da associação em paralelo dos módulos ( $A$ )

$P_T$  - Potência total da associação em paralelo dos módulos ( $W$ )

A associação mista dos módulos permite aumentar os valores de tensão e corrente. Nesta ligação as fileiras devem ter o mesmo número de módulos fotovoltaicos, obrigatoriamente com as mesmas características [9], como se pode observar pela figura 2.27.

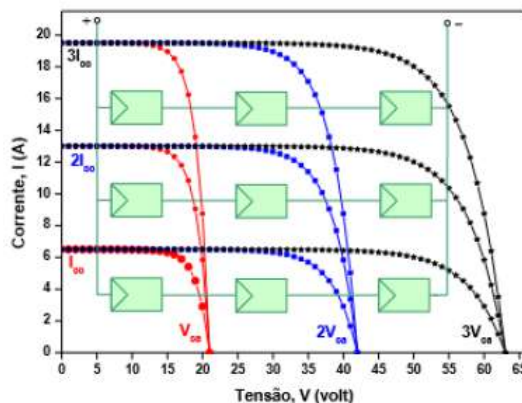


Figura 2.27: Associação mista de módulos fotovoltaicas [53]

Pela análise da fig.2.27 podemos concluir que:

$$V_T = V * n \quad (2.27)$$

$$I_T = I * m \quad (2.28)$$

$$P_T = V_T * I_T \quad (2.29)$$

Onde,

$n$  - Número de módulos associados em série

$m$  - Número de módulos associados em paralelo

$V$  - Tensão de funcionamento de cada módulo ( $V$ )

$I$  - Corrente de funcionamento de cada módulo ( $A$ )

$V_T$ - Tensão total da associação mista dos módulos ( $V$ )

$I_T$ - Corrente total da associação mista dos módulos ( $A$ )

$P_T$ - Potência total da associação mista dos módulos ( $W$ )

#### 2.3.4.2 Efeitos do sombreamento

Numa célula ou num módulo sombreado a fonte de corrente extingue-se e comporta-se como uma carga, dissipando a corrente de entrada, provocando, assim, o aquecimento da célula dando origem à criação de pontos quentes, podendo danificar a célula ou o módulo em questão. Este fenómeno, denominado sombreamento, afeta a curva característica do módulo fotovoltaico. Isto significa que o ponto de potência máxima será desviado, havendo assim uma redução de potência relativamente a um módulo fotovoltaico que não se encontra sombreado. O sombreamento apresenta consequências graves, tanto na eficiência como na segurança do módulo fotovoltaico. Uma célula fotovoltaica sombreada comporta-se como uma resistência atravessada por uma corrente produzida pelas outras células, podendo produzir uma tensão inversa elevada, originando o aparecimento de pontos quentes, que pode danificar o módulo fotovoltaico. Para evitar o aparecimento de pontos quentes a corrente deve ser desviada da célula fotovoltaica. São introduzidos díodos *bypass*, que desviam a corrente evitando que correntes inversas percorram as células ou os módulos, mantendo a fileira em produção, embora reduzida [2, 9].

São também utilizados díodos de fileira, para módulos ligados em paralelo, prevenindo curtos-circuitos e correntes inversas entre fileiras, caso apareça alguma avaria na fileira do sistema fotovoltaico. Segundo a norma CEI 60364-7-712, secção 712.512.1.1, a tensão dos díodos de fileira deve ser o dobro da tensão de circuito aberto em STC [9].

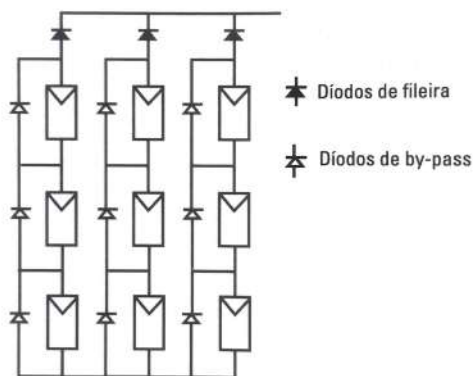


Figura 2.28: Díodos de fileira e díodos bypass [9]

#### 2.3.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Um sistema de energia solar fotovoltaico, também conhecido como sistema de energia solar ou simplesmente sistema fotovoltaico, é um sistema capaz de gerar energia elétrica através da radiação solar. Existem dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos: sistemas isolados (*Off-grid*) e sistemas ligados à rede pública de distribuição (*Grid-tie*).

Os sistemas isolados são utilizados em locais remotos ou onde o custo de se conectar a rede elétrica é elevado. São utilizados em casas de campo, refúgios, iluminação exterior, teleco-

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

municações, para bombear água, entre outros. Já os sistemas ligados à rede, substituem ou complementam a energia elétrica convencional disponível na rede elétrica.

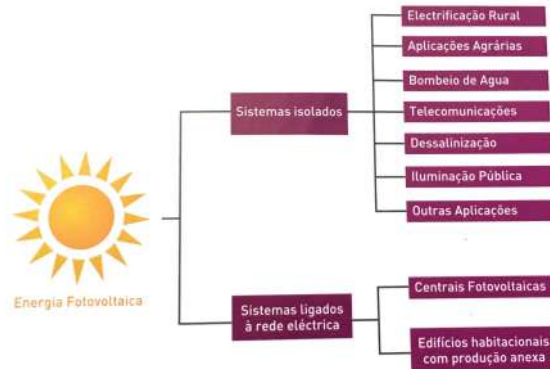


Figura 2.29: Principais aplicações fotovoltaicas [2]

### 2.3.5.1 Sistemas isolados

Um sistema fotovoltaico isolado é projetado para alimentar um conjunto de cargas, que operam isoladas da rede elétrica ao longo do ano. Este tipo de sistema exige um estudo prévio da intensidade da radiação solar disponível para que o investimento, principalmente nas baterias, não seja insuficiente e nem se torne exagerado. Os sistemas isolados para instalação doméstica são os principais exemplos deste tipo de sistemas. São compostos por módulos fotovoltaicos, reguladores de carga, baterias de acumuladores e inversores, para alimentar cargas de corrente contínua e cargas de corrente alternada conforme o esquema da figura 2.30, ou então, instalações para alimentar apenas cargas de corrente contínua, dispensando o inversor, o que torna o sistema mais barato e mais eficiente, devido à supressão das perdas do inversor. Podemos encontrar casos de sistemas fotovoltaicos isolados sem armazenamento de energia. Nestes casos, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é consumida de imediato. Este tipo de sistema é muito usual em instalações de bombeamento de água e têm a vantagem de ser mais barato, uma vez que não utilizam baterias para o armazenamento de energia [2, 9, 13].



Figura 2.30: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado

### 2.3.5.2 Sistemas ligados à rede pública de distribuição

Para os sistemas ligados à rede, a legislação atualmente em vigor promove essencialmente o autoconsumo, com possibilidade de entregar o excedente da energia produzida à rede (Decreto-Lei n° 162/2019 de 25 de Outubro). Neste contexto, em ambiente doméstico, será necessário a implementação de dois contadores de energia: contador de injeção na rede (contador de venda) e o contador de recepção (contador de compra). Estes sistemas são mais baratos e mais simples para potências idênticas aos sistemas isolados, pelo simples facto de dispensarem o uso de baterias de acumuladores, sendo constituídos apenas pelos módulos fotovoltaicos e pelos inversores, como ilustrado na figura 2.31 [2, 9, 13].

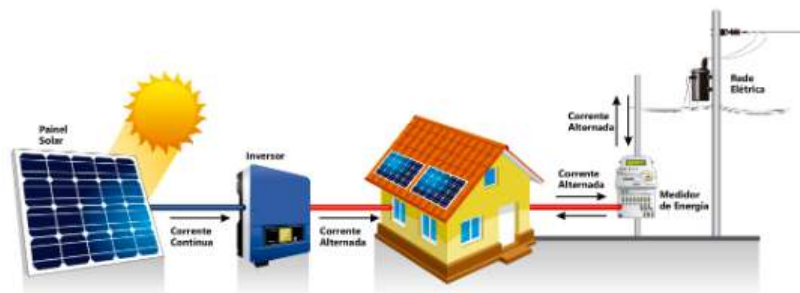


Figura 2.31: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico ligado à rede

## 2.4 Acumuladores de energia

O desenvolvimento das energias renováveis tem vindo a crescer consideravelmente nos últimos anos. São fontes inesgotáveis e as tecnologias para conversão de energia estão cada vez mais acessíveis. Contudo, são fontes muito instáveis, independentemente da procura. Surge, assim, uma necessidade de desenvolver tecnologias para acumular a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos. Dentre essas tecnologias, destacam-se as baterias de acumuladores de energia elétrica. Vários estudos estão sendo realizados no âmbito de garantir o melhor sistema de acumulação de energia, permitindo que essa energia seja depois disponibilizada nas horas de maior procura, quando a energia é mais cara [54] ou quando a fonte de energia (o sol, neste caso) não está disponível.

### 2.4.1 Princípio de funcionamento

Um acumulador de energia, na sua forma mais simplificada é constituído por um vaso e dois eléctrodos interligados por um eletrólito, constituindo assim o circuito interno. A associação de vários acumuladores em série forma uma bateria de acumuladores.

Reações de oxidação-redução no interior da bateria permitem armazenar ou fornecer energia elétrica. Transformam energia elétrica em energia química durante a carga e depois transformam essa energia química em energia elétrica durante a descarga. Ao carregar as baterias ocorre um aumento da diferença de potencial aos terminais da bateria, fenómeno muito importante para efeitos de controlo de carga e descarga da bateria. A corrente no interior de cada acumulador resulta do movimento de iões de um eléctrodo para outro. Durante a descarga as

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

matérias ativas vão-se esgotando, abrindo a reação química, até que a bateria se descarregue completamente. Ao inverter o sentido da corrente elétrica, inverte-se também a reação química no interior da bateria, passando assim para o estado de carregamento [55].

### 2.4.2 Modelo elétrico de uma bateria

O modelo elétrico de uma bateria, basicamente, é composto por uma fonte de tensão ideal,  $V_i$ , e por uma resistência interna,  $R_i$ , representada na figura 2.32. A tensão nos bornes é influenciada pelo sentido da corrente da bateria [9]. Durante a carga, a tensão da bateria é dada por:

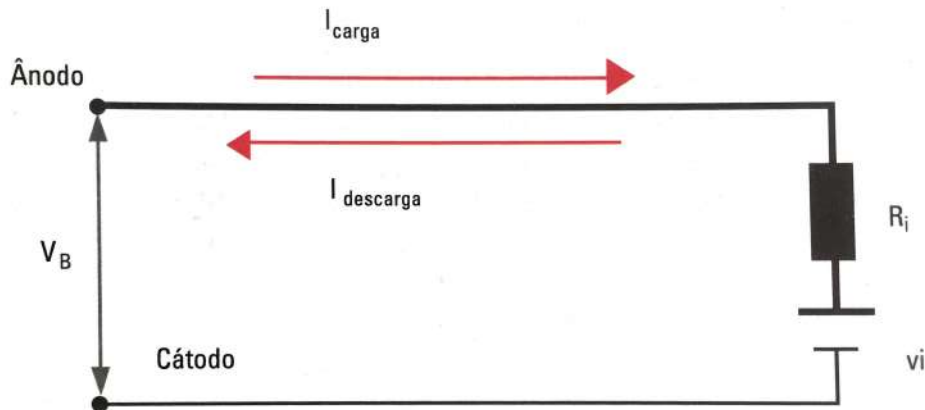


Figura 2.32: Modelo elétrico de uma bateria [2]

$$V_B = V_{OC} + R_i * I_{CARGA} \quad (2.30)$$

Sendo a corrente da carga:

$$I_{CARGA} = I_{GERADA} - I_{CONSUMIDA} \quad (2.31)$$

Para a descarga, obtém-se:

$$V_B = V_{OC} - R_i * I_{DESCARGA} \quad (2.32)$$

Sendo a corrente de descarga:

$$I_{DESCARGA} = I_{CONSUMIDA} - I_{GERADA} \quad (2.33)$$

Pela análise das equações anteriores, pode-se obter uma equação que caracteriza o processo de carga e descarga de uma bateria:

$$V_B = V_{CA} - R_i * (I_{GERADA} - I_{CONSUMIDA}) \quad (2.34)$$

Onde,

$V_B$  - Tensão da bateria (V)

$V_{OC}$  - Tensão de circuito aberto da bateria (V)

$R_i$  - Resistência interna da bateria ( $\Omega$ )

$I_{CARGA}$  - Corrente de carga da bateria (A)

$I_{DESCARGA}$  - Corrente de descarga da bateria (A)

$I_{GERADA}$  - Corrente gerada pela bateria (A)

$I_{CONSUMIDA}$  - Corrente consumida pela carga ligada a bateria (A)

### 2.4.3 Caraterísticas da bateria

Os processos eletroquímicos de uma bateria são o foco de discussão para caraterizar o desempenho de uma bateria. No entanto, os materiais do elétrodo desempenham, também, um papel fundamental na caraterização do desempenho. A taxa à qual a energia flui é modelada por fatores práticos associados à construção da bateria bem como a seleção de outros materiais utilizados na sua construção, incluindo o tipo e quantidade de eletrólito. Para análise ao funcionamento de uma bateria é necessário ter presente alguns conceitos elétricos específicos, como a capacidade, tempo de descarga, densidade energética, ciclo de vida, auto-descarga, profundidade de descarga, tensão e corrente, entres outros. [2, 9, 55].

#### 2.4.3.1 Capacidade

A capacidade de uma bateria, expressa em Ah, carateriza a quantidade de carga armazenada pela bateria em STC. O seu valor é obtido através do produto da corrente de descarga pelo tempo de descarga. Este depende da corrente utilizada, da tensão de descarga e da temperatura. O teste mais comum indicado para avaliar a capacidade de uma bateria é feito com um valor constante para a corrente de descarga e a capacidade é calculada através da equação 2.35 [9, 55].

$$C_n = I_n * t_n \quad (2.35)$$

Onde,

$C_n$  - Capacidade da bateria (Ah)

$I_n$  - Corrente de descarga (A)

$t_n$  - Tempo de descarga (h)

#### 2.4.3.2 Tempo de descarga

O tempo de descarga, como o próprio nome indica, é o tempo considerado no processo de descarga da bateria, geralmente expresso em horas. É usado para caraterizar diferentes tipos de baterias, como por exemplo:

- C10 - baterias estacionarias;
- C20 - baterias de arranque;
- C100 - baterias para uso em sistemas fotovoltaicos;

Existe uma relação direta entre o tempo de descarga e a capacidade da bateria, traduzida pela equação 2.35. Esta pode ser melhor percebida pela análise da tabela 2.2.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 2.2: Capacidade e tempo de descarga de uma bateria [2]

Bateria	Capacidade em Ah/ Descarga a 1,75 V/ elemento a 25 °C				
	10h	8h	5h	3h	1h
150 Ah	150 Ah	144 Ah	129 Ah	106 Ah	72 Ah
C10	15 A x 10h	18 A x 8h	25,8 A x 5h	35,3 A x 3h	72 A x 1h

Pela análise da tabela 2.2, conclui-se que [9, 55]:

- Quanto maior for a corrente de descarga, menor será a energia fornecida pela bateria;
- Quanto menor for o tempo de descarga, menor será a carga fornecida pela bateria e, como consequência, menor será a sua eficiência;
- Quanto mais tempo levarem os processos de carga e descarga, maior será a durabilidade da bateria.

### 2.4.3.3 Densidade energética

A densidade energética de uma bateria é a quantidade de energia que esta pode fornecer por unidade de volume, para uma taxa de descarga específica [9], e é descrita pela equação 2.36.

$$Densidade = \frac{Energia (Wh)}{Volume (m^3)} \quad (2.36)$$

### 2.4.3.4 Ciclos de vida

O ciclo de vida é uma característica especificada pelo fabricante para determinadas condições de utilização e indica o número de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada antes que a sua capacidade nominal seja inferior a 80% da sua capacidade inicial [9, 55].

### 2.4.3.5 Auto-descarga

A auto-descarga é causada pelas reações químicas internas e assemelha-se a uma pequena carga ligada à bateria, fazendo com que a bateria se descarregue com o passar do tempo. Baterias de lítio perdem aproximadamente 8% da sua capacidade no primeiro mês, reduzindo para 2% nos meses seguintes. As baterias de chumbo-ácido possuem menor taxa de auto-descarga, inferior a 5% ao mês, podendo chegar aos 2% para sistemas bem dimensionados. A temperatura é um fator importante no aumento da auto-descarga de uma bateria, podendo duplicar a cada aumento de 10 °C na temperatura da bateria. As baterias devem ser armazenadas a baixas temperaturas, para reduzir o efeito de auto-descarga [9, 55].

### 2.4.3.6 Profundidade de descarga

A profundidade de descarga, (do inglês, *Depth of Discharge (DOD)*), é um parâmetro de extrema importância que determina a vida útil de uma bateria de chumbo-ácido.

Teoricamente, uma bateria pode ser descarregada até que a tensão nos seus terminais atinja 0 V, permitindo que toda a energia armazenada seja fornecida à carga. Contudo, estas descargas

profundas criam cristais de sulfato de chumbo que afetam a capacidade da bateria. Assim, como forma de proteger as baterias e garantir uma longa vida útil, estabelece-se um valor limite de descarga que evita que seja retirada toda a carga presente nas baterias.

A profundidade de descarga é, então, a porcentagem de carga retirada da bateria numa determinada descarga, considerando que 0 % da profundidade de descarga se dá quando não se descarrega nada da bateria, ou seja, quando a bateria permanece 100 % carregada e, 100 % de profundidade de descarga dá-se quando retiramos toda a carga da bateria até atingir o potencial de carga estabelecido [9, 55].

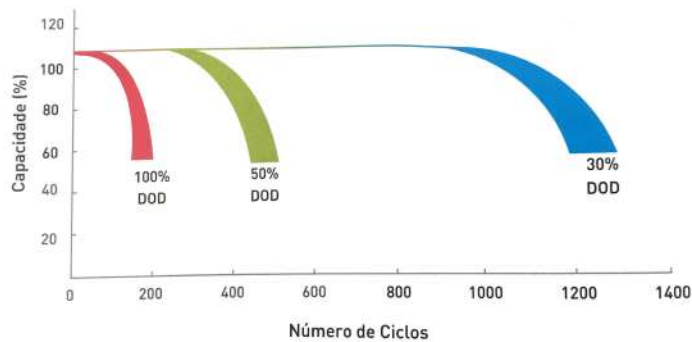


Figura 2.33: Profundidade de descarga e o ciclo de vida de uma bateria de chumbo-ácido [2]

### 2.4.4 Tipos de acumuladores de energia

Atualmente, são várias as tecnologias de baterias de acumuladores, utilizadas em sistemas fotovoltaicos, com diferentes materiais e com características distintas. Sendo assim, torna-se relevante conhecer as principais características para que se possa fazer a melhor escolha para as exigências do sistema a aplicar.

Para uso em sistemas fotovoltaicos, normalmente, são utilizadas baterias de ciclo profundo (em inglês, *deep cycle*), que apresentam períodos longos de descarga e aguentam cargas sobre condições irregulares [2, 9].

#### 2.4.4.1 Bateria chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos devido ao baixo custo e bom nível de desempenho. Neste tipo de baterias o eletrólito é um ácido, nomeadamente o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), e os elétrodos são constituídos por placas de chumbo imersos no eletrólito. Estas baterias, de um modo geral, apresentam um tempo de carga elevado uma vez que devem ser carregadas com correntes baixas. É importante evitar a sobrecarga e a descarga total das baterias de chumbo-ácido, visto que podem limitar o ciclo de vida da mesma. São ainda muito sensíveis a variações de temperatura, sendo que altas temperaturas aumentam a capacidade e diminuem o tempo de vida útil, enquanto que baixas temperaturas diminuem a capacidade [55].

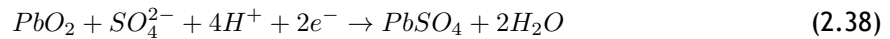
Nas baterias de chumbo-ácido durante o processo de descarga o elétrodo negativo, o ânodo, fornece elétrons à carga, enquanto que o elétrodo positivo, o cátodo, aceita elétrons da carga.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

O eletrólito fornece iões a ambos os elétrodos, completando assim o circuito interno da bateria de acumuladores. No processo de descarga, a reação no ânodo pode ser representada pela equação 2.37.



O anião livre na solução reage com o chumbo, formando o sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ), com a libertação de dois eletrões. Por outro lado, no cátodo, o anião sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) reage com o dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) formando, assim, o sulfato de chumbo e água, como se pode ver na equação 2.38



A água derivada da reação, provoca uma diminuição da concentração de ácido sulfúrico e, conseqüente, diminuição da densidade do eletrólito. Realizando a reação química inversa, isto é, o processo de carregamento, o sulfato de chumbo presente em ambos os elétrodos retornará ao seu estado inicial, seguido da formação do ácido sulfúrico e consumo de água. Aumenta-se, assim, a diferença de potencial com o aumento da concentração do ácido sulfúrico.

### Baterias de chumbo-ácido ventiladas (*Vented Lead Acid - VLA*)

As baterias de chumbo-ácido ventiladas são as mais comuns entre as baterias de acumuladores de chumbo-ácido. Estas baterias apresentam a desvantagem de necessitarem de manutenção em intervalos de tempo regulares, devido à perda constante de água. Dentre estas baterias destacam-se as baterias de chumbo-ácido estacionárias, com boas prestações ao nível da capacidade e ciclos de vida [2].

Nas baterias de chumbo-ácido ventiladas, o oxigénio e o hidrogénio produzidos durante o processo de funcionamento da bateria são libertados através de pequenos orifícios no topo da bateria. Resulta numa perda de água que deve ser compensada em intervalos de tempo regulares [56].

### Baterias de chumbo-ácido estanques (*Valve Regulated Lead Acid - VRLA*)

Nas baterias chumbo-ácido estanque do tipo VRLA, as placas não se encontram totalmente submersas no ácido, o que permite que o oxigénio produzido nas placas positivas chegue às placas negativas onde recombina, reduzindo assim as perdas de água. Se a corrente durante o carregamento for alta, a pressão do oxigénio aumenta fazendo atuar uma válvula de segurança que liberta oxigénio para a atmosfera [2, 56].

As baterias para uso em sistemas fotovoltaicos apresentam alguns elementos chaves, como por exemplo: elevada densidade energética, elevada vida útil, baixo custo inicial e capacidade para fazer vários ciclos. As mais utilizadas são de chumbo-ácido por serem uma tecnologia estável, madura e, devido ao baixo custo para aplicações que requerem alta capacidade de armazenamento. Contudo, apresentam baixa densidade energética e ciclos de vida curtos e requerem frequente manutenção. Essas baterias têm vindo a sofrer adaptações de modo a melhorar o seu desempenho. Neste sentido, surgem as baterias de chumbo-ácido sem manutenção ou reguladas por válvula (VRLA), com sistema de recombinação de gases que evita a perda de água. Podem ser com eletrólito absorvido em micro fibras de vidro (AGM) ou gel [57].

- **Baterias AGM (*Absorbent Glass Material*)** - Utilizam um separador especial de micro fibras de vidro muito poroso que absorve todo o ácido. Os poros vazios oferecem um atalho ao oxigênio formado na placa positiva, permitindo a sua recombinação na placa negativa. Essas baterias foram projetadas para correntes elevadas, ou seja, apresentam um curto tempo de descarga. Apresentam também baixa quantidade de ácido, o que os torna sensíveis a perdas de água, especialmente a altas temperaturas [2, 56].
- **Baterias de gel** - O ácido sulfúrico é misturado com a sílica, passando a ter a consistência de um gel. O gel é introduzido nas células antes de secar. Ao secar, o gel forma fendas microscópicas que permitem a passagem de gases entre as placas positivas e negativas, permitindo assim as recombinações. O gel providencia um meio melhor para a condução de calor, das placas para as paredes das células, portanto, o calor produzido durante o processo de carregamento é dissipado de forma mais eficiente. A profundidade de descarga máxima para essas baterias é de 50%. Devem ser acompanhadas de um controlador de carga adequado às suas características [2, 56].

Na figura 2.34 podemos observar exemplos de diferentes tipos de baterias de chumbo-ácido.

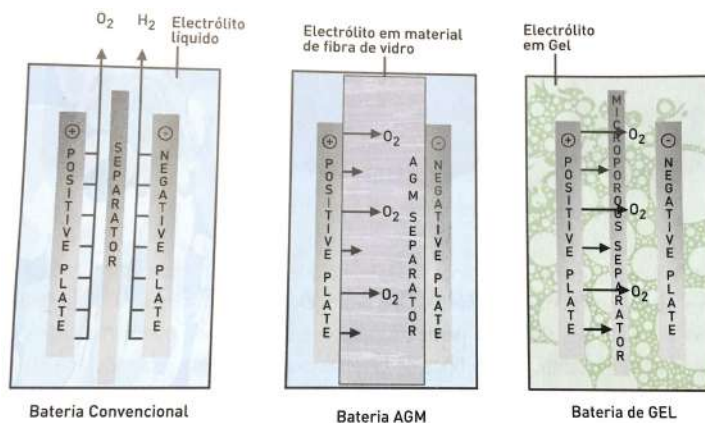


Figura 2.34: Diferentes tipos de baterias chumbo-ácido [2]

No Noroeste da China, no Tibete, baterias do tipo VRLA estão sendo utilizadas em sistemas fotovoltaicos isolados, para fornecer eletricidade às residências. Como exemplo, o sistema fotovoltaico de Zheng Qi County, com uma potência instalada de 20 kW, com 110 baterias GMFU 2 V 600 Ah VRLA, ligados em paralelo. As baterias são controladas mantendo uma profundidade de descarga entre os 5% e 10%, ou seja, as baterias são carregadas quase na sua totalidade. Fornecem energia durante 5 horas por residência, aproximadamente. Sendo o Tibete uma região de muito sol, as baterias trabalham com um estado de carga muito elevado, podendo ser carregadas adequadamente quase todos os dias. Os testes demonstraram que as capacidades das baterias vão diminuindo gradualmente devido aos ciclos diários de funcionamento. Foi também evidente que todas as baterias sofreram de sulfatação, mas ainda apresentam um período de vida útil superior a 5 anos [58].

#### 2.4.4.2 Baterias alcalinas

As baterias alcalinas apresentam uma solução aquosa alcalina como eletrólito, normalmente o hidróxido de potássio (KOH) ou o hidróxido de sódio NaOH. Os materiais dos eletrodos são menos

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

reativos com eletrólitos alcalinos do que com eletrólitos ácidos. Além disso, o mecanismo de carga-descarga no eletrólito alcalino envolve apenas o transporte de íons de oxigênio ou hidróxido de um eletrodo para o outro. Portanto, a composição ou concentração do eletrólito não muda durante a carga e a descarga.

### Baterias de íons de lítio

As baterias de íão de lítio, funcionam através do movimento de íons de lítio entre os eletrodos positivo e negativo. Durante o processo de carregamento, os íons migram do eletrodo positivo para o eletrodo negativo através do eletrólito ficando, assim, o eletrodo negativo com excesso de lítio. Ao descarregar os íons movem-se na direção oposta. O eletrodo positivo destas baterias é constituído por compostos a base de lítio, tais como o fosfato de lítio e ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ) e o óxido de lítio e manganês ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). O eletrodo negativo, normalmente, é composto por grafite [59].

Estas baterias apresentam muitos pontos vantajosos, são leves, fornecem muita energia, apresentam um tempo de vida útil longo, aproximadamente 10 anos, funcionam numa vasta gama de temperaturas, entre os  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  a até  $+80\text{ }^\circ\text{C}$ . Embora apresentem muitas vantagens, o investimento inicial constitui, ainda, um enorme obstáculo para a aplicação desta tecnologia no ramo fotovoltaico [59].

Em 2016, o Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra, publicou um estudo sobre o reaproveitamento de baterias de íão de lítio, de veículos elétricos, em sistemas fotovoltaicos. Através de simulações realizadas no MATLAB-Simulink, para simular o sistema de acumulação de um sistema fotovoltaico, foram feitas simulações em baterias de dois carros elétricos dos mais vendidos, o Nissan Leaf e o Citroen C0. Demonstraram uma redução de energia consumida proveniente da rede pública de distribuição, no primeiro ano, de 82.1% e 78.8%, respetivamente. No décimo ano apresentaram valores de 79.7% e 69.9%, respetivamente. Verificaram também que o retorno do investimento para as baterias da Nissan Leaf e da Citroen C0 eram de 9.53 anos e 6.11 anos, respetivamente. Valores muito abaixo do tempo de vida útil estimado para as baterias, de 13.2 anos e 11.5 anos, respetivamente. Os resultados comprovam que a reutilização de baterias de veículos elétricos em sistemas fotovoltaicos apresenta grandes benefícios técnicos e económicos [60].

Como dito anteriormente, um dos principais problemas dos sistemas fotovoltaicos são as baterias de chumbo-acido, devido ao curto tempo de vida útil, especialmente em comparação com outros componentes do sistema. A tecnologia das baterias tem sofrido várias evoluções, mas a indústria fotovoltaica continua utilizando maioritariamente baterias de chumbo-acido, devido ao custo inicial e reciclagem controlada. As baterias de íão de lítio apresentam assim como uma alternativa às tradicionais baterias VRLA, devido ao seu elevado tempo de vida útil e densidade energética. Contudo, as baterias de íão de lítio são muito caras e só a indústria fotovoltaica não é suficiente para proporcionar um desenvolvimento dessas baterias e conseqüente redução do preço. Será necessário o desenvolvimento de indústrias paralelas, como os veículos elétricos e as bicicletas elétricas [61].

### Bateria de níquel-cádmio (NiCd)

As baterias de níquel-cádmio, normalmente são seladas e apresentam um eletrodo positivo de hidróxido de níquel e um eletrodo negativo de hidróxido de cádmio. Estas baterias, ao contrário

das baterias de chumbo-ácido, não apresentam sulfatações, uma vez que as reações de oxidação e redução dão-se com os elétrodos sem a adição de um eletrólito, o que aumenta o ciclo de vida das baterias [2].

As baterias de níquel-cádmio são robustas e demonstram ser uma excelente alternativa às baterias de chumbo-ácido. Apresentam um ciclo de vida superior, maior densidade energética e baixa necessidade de manutenção, se comparados com as baterias de chumbo-ácido. Estas oferecem varias vantagens no ramo fotovoltaico, sendo muito confiáveis para aplicações em ambientes hostis. Aguentam sobrecargas elevadas e são pouco sensíveis à temperatura, podendo funcionar até - 50 °C [2, 62].

As desvantagens consistem no investimento inicial muito elevado, aproximadamente, 3 à 4 vezes superior por kWh, necessidade de descarga total de tempo em tempo, para prevenir o efeito de memória que vicia a bateria impedindo-a de trabalhar na máxima capacidade, e o facto destas baterias serem constituídas por cádmio, material muito tóxico, o que vem gerando muita pressão mundial para serem banidos do mercado [2, 62].

#### Bateria de níquel-hidretos metálicos (NiMH)

As baterias de níquel-hidretos metálicos apresentam-se como uma alternativa viável às baterias de NiCd devido ao seu desempenho aprimorado, apresentando uma densidade energética entre 25% à 30% superiores. Estas são ecológicas devido à ausência de substâncias tóxicas tais como o cádmio, chumbo e o mercúrio [62].

As baterias NiMH apresentam auto-descarga elevada, aproximadamente 2% ao dia, tornando-as ineficientes para armazenamento de energia a longo prazo. Com muito menos desvantagens do que as baterias de chumbo-ácido e NiCd, maior densidade de energia, menor impacto ambiental e custos mais baixos quando comparadas à tecnologia de iões de lítio, as baterias de NiMH tornam-se possíveis candidatos para aplicações de integração de energia renovável [13, 62, 63].

Tabela 2.3: Comparação das especificações de diferentes tipos de baterias [2, 64]

Especificações	Chumbo-ácido	NiCd	NiMH	ião de lítio
Energia específica [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	90-250
Ciclo de vida (80% DOD)	200-300	1000	300-500	500-2000
Tempo de recarregamento (h)	8-16	1-2	2-4	1-4
Auto-descarga/mês	5%	20%	30%	<5%
Tensão por célula [V]	2	1,2	1,2	3,2-3,7
Toxicidade	Muito alta	Muito alta	Baixa	Baixa

## 2.5 Reguladores de carga

Um sistema fotovoltaico com acumuladores de energia armazena a energia produzida nos períodos de muito sol para posteriormente ser utilizada nos períodos de pouco sol, ou à noite. Neste caso, é necessário ter um controlo sobre os períodos de carga e descarga das baterias. Este controlo é realizado pelo regulador de carga, dispositivo este que, apesar do baixo custo, comparado com o resto do sistema, é muito fundamental para proteger a vida útil da bateria e

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

melhorar a eficiência do sistema. O regulador de carga trabalha em duas zonas distintas, a zona de carga, onde tem como função garantir a carga suficiente da bateria, evitando sobrecargas e a zona de descarga, garantindo uma descarga ideal, evitando descarregar a bateria além da profundidade de descarga estipulada para a bateria.

### 2.5.1 Regulador PWM

O regulador PWM (*Pulse Width Modulation*), regula a tensão de carga da bateria mantendo constante o valor da corrente. Este controlo é feito através de uma sequência de pulsos curtos para a bateria. O regulador PWM dispensa muita energia, uma vez que, ao baixar a tensão de entrada na bateria, resulta numa diminuição do valor da potência. Este regulador é uma boa solução para pequenos sistemas onde a temperatura das células concentra-se entre os  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13].

### 2.5.2 Regulador MPPT

O regulador MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é mais sofisticado e dispendioso que o regulador PWM. Este converte a tensão de entrada mais elevada, proveniente do módulo fotovoltaico, numa tensão mais baixa necessária para alimentar a bateria. Sendo a corrente um parâmetro importante no carregamento da bateria, à medida que reduz o valor da tensão, aumenta proporcionalmente o valor da corrente, garantindo que o sistema funciona no ponto de máxima potência. É aconselhado para sistemas com elevada potência e para sistemas onde a temperatura das células encontra-se abaixo dos  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou acima dos  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou ainda em sítios onde a radiação solar é muito baixa [9, 13].

## 2.6 Inversores DC/AC

Os inversores são utilizados em sistemas fotovoltaicos autónomos, quando é necessário converter corrente contínua, produzida pelo módulo fotovoltaico, para alimentar aparelhos elétricos convencionais de corrente alternada. Estes inversores podem ser classificados em função da onda de tensão de saída e devem apresentar as seguintes características:

- Corrente alternada sinusoidal, com tensão e frequência estabilizados;
- Excelente eficiência de conversão ;
- Elevada tolerância perante flutuações de tensão da bateria;
- Proteção contra curto-circuitos ;
- Baixo consumo em modo standby, com deteção automática de presença de carga;
- Baixa distorção harmónica;
- Proteção contra sobre tensões ;
- Capacidade de sobrecarga.

### 2.6.1 Inversores de onda quadrada

Os inversores de onda quadrada são mais baratos que os restantes, com grande conteúdo harmónico indesejado que gera ruídos e perdas de potência. Estes, costumam ser utilizados com pequenas cargas indutivas ou resistivas, como pequenos aparelhos eléctricos, mas não são indicados para motores.

### 2.6.2 Inversores de onda modificada ou semi-sinusoidal

Os inversores de onda modificada, apresentam a melhor qualidade/preço, em relação aos restantes inversores, pelo que a sua utilização encontra-se muito generalizada. Este tipo de inversores apresenta uma onda próxima da sinusoidal pura, podendo alimentar quase todos os tipos de aparelhos, não sendo recomendado para aparelhos electrónicos delicados. Apresentam uma distorção harmónica à volta dos 90% e rendimentos superiores a 90%.

### 2.6.3 Inversores de onda sinusoidal

Os inversores de onda sinusoidal apresentam um sinal a saída sinusoidal pura. Estes, são indicados para aparelhos electrónicos delicados e são os mais utilizados relativamente aos modelos anteriores, mesmo em aplicações mais simples e apresentando um custo relativamente superior. Um inversor é considerado de onda sinusoidal se a distorção harmónica total da tensão de saída for inferior a 5%, quando este alimenta cargas lineares desde 20% até 100% da sua capacidade.

## 2.7 Exemplos de unidades fotovoltaicas didáticas

### 2.7.1 Hampden Model H-PVIT-1

A instalação fotovoltaica desenvolvida pela *Hampden Engineering Corporation*, consiste numa estrutura em aço com quatro módulos fotovoltaicos montados na parte traseira da estrutura. Os módulos são montados de forma a aproveitar ao máximo a exposição solar. Na parte frontal da estrutura encontram-se todos os componentes que podem ser facilmente acessados. A instalação é constituída por quatro módulos fotovoltaicos de  $130 W_p / 12 V$ , um regulador de carga MPPT, quatro baterias de chumbo-ácido Gel de  $12 V$ , um inversor de carga de  $400 W / 12 V$  e cargas AC e DC para simularem o consumo de energia. O kit ainda é constituído por um painel de controlo que permite configurar o sistema e fazer diagnósticos dos equipamentos ligados à rede [65].



Figura 2.35: Bancada didática Hampden Model H-PVIT-1 [65].

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

### 2.7.2 Solar Didactic

A unidade didática desenvolvida pela Solar Didactic tem por objetivo auxiliar no processo de treinamento e desenvolvimento de pessoas ligadas a centros de formação profissional, escolas técnicas e universidades. Para isso, cada kit dispõe de uma metodologia de ensino técnico composta por manuais. O kit é constituído por uma bancada em alumínio e MDF. Possui um suporte para computadores, instrumentos de medição e outras ferramentas. Possui também um quadro onde se encontram localizados os equipamentos para operação do sistema fotovoltaico. Além da bancada o kit ainda é constituído por dois módulos fotovoltaicos de  $265 W_p$  cada, um inversor de carga autónomo de  $500 W$ , um regulador de carga, duas baterias e cargas AC e DC, representadas por lâmpadas.

Os módulos fotovoltaicos encontram-se instalados numa estrutura de fixação triangular com possibilidade de ajuste da inclinação. Esta estrutura encontra-se montada sobre uma estrutura com rodízios, o que permite modificar a orientação azimutal dos módulos e garante maior mobilidade a bancada [66].



Figura 2.36: Bancada didática Solar Didactic [66]

### 2.7.3 Advanced Photovoltaic Training System

A *Advanced Photovoltaic Training System* trata-se de uma unidade didática versátil, desenvolvida pela *Bedo Innovating Education*, para providenciar experiências práticas, sobre condições reais, relacionadas com sistemas fotovoltaicos autónomos e ligados à rede. O sistema é constituído por uma estrutura vertical, com quatro rodas para facilitar a deslocação, um módulo fotovoltaico, um inversor para sistemas isolados de  $230 V$ , um inversor para sistemas ligados à rede de  $230 V$ , um regulador de carga de  $12 / 24 V$ ,  $6 A$ , cargas indutivas, resistivas e capacitivas, baterias para o armazenamento e lâmpadas de halogéneo para simular a radiação solar. O kit inclui ainda um painel de controlo com os esquemas dos circuitos das duas instalações, com bornes que permitem ligar instrumentos de medição [67].



Figura 2.37: Bancada didática *Advanced Photovoltaic Training System* [67]

#### 2.7.4 AEL-SAPV

A unidade didática *Stand Alone Photovoltaic Application*, *AEL-SAPV*, foi projetado pela EDIBON, para estudar a produção de energia elétrica através da tecnologia fotovoltaica. Esta aplicação fornecerá ao usuário o conhecimento e as habilidades essenciais sobre a operação do módulo fotovoltaico e os componentes que participam da produção de energia elétrica a partir da energia solar. Para esse fim, a unidade inclui um manual específico, explicando, no nível teórico, os aspectos relativos aos componentes deste sistema, como o controlador de carga e o inversor de corrente. O tema abrange desde a colocação e orientação dos painéis solares para produzir a energia elétrica máxima até a obtenção da curva característica do módulo solar. Além disso, é fornecido um conjunto de módulos incluídos e opcionais para colocar em prática todos os conceitos teóricos anteriormente estudados no manual, como a alimentação de cargas AC e DC a partir da energia solar. O sistema é constituído por um módulo fotovoltaico de  $96\text{ W}$ , um inversor de onda sinusoidal, um regulador de carga, uma bateria de  $72\text{ Ah}$ , lâmpadas de halógeno, cargas com  $12\text{ V}_{DC}$  e um conjunto com três lâmpadas para experiências em ambiente fechado [68].



Figura 2.38: Bancada didática *Stand Alone Photovoltaic Application*, *AEL-SAPV* [68]

## 2.8 Nota conclusiva

No decorrer deste capítulo, foi-nos permitido perceber o Sol como fonte principal de energia e a sua importância para o planeta Terra. O estudo do seu movimento e posicionamento em relação ao planeta Terra permite-nos tirar o máximo aproveitamento da energia disponibilizada pelo mesmo. Em relação à energia solar fotovoltaica foram estudadas várias tecnologias e materiais empregues no fabrico das células fotovoltaicas, onde se destacaram as células de silício monocristalino. Este capítulo permitiu-nos, ainda, ficar a conhecer os principais conceitos da energia solar fotovoltaica, mais precisamente, os componentes de um sistema fotovoltaico autónomo, suas características e importância.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

## Capítulo 3

### Instalação experimental e metodologias de ensaio

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo será descrito todo o processo responsável pela construção da bancada fotovoltaica didática, desde a elaboração do prototipo até à construção física da própria bancada, com destaque para os materiais utilizados, as dimensões da bancada e os respetivos dimensionamentos. Serão, ainda, descritos os principais componentes utilizados, nomeadamente, o módulo fotovoltaico, o inversor de carga, o regulador de carga e a bateria. Este capítulo engloba, ainda, a instrumentação utilizada no projeto, para que fosse possível fazer as medições necessárias para a resolução do guião laboratorial. Para concluir o capítulo, será apresentada a elaboração do guião laboratorial, um dos principais objetivos desta dissertação, projetado de forma a tirar o máximo aproveitamento da bancada fotovoltaica desenvolvida.

#### 3.2 Principais componentes do sistema fotovoltaico

##### 3.2.1 Módulo fotovoltaico

Como já referido anteriormente, atualmente, existem diversas tecnologias focadas na produção de módulos fotovoltaicos, onde as tecnologias de silício monocristalino tendem a dominar o mercado. Para este trabalho utilizou-se um módulo fotovoltaico policristalino da Kioto Solar, como ilustrado na figura 3.1.



Figura 3.1: Módulo fotovoltaico Kioto Solar

O módulo apresenta 60 células, de dimensões  $156 \times 156 \text{ mm}^2$ , em que a cada vinte células encontra-se um diodo by-pass que reduz a possibilidade de criação de hot-spots. Pela tabela 3.1 pode-se consultar a informação referente às principais características do módulo fotovoltaico utilizado.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.1: Características do módulo fotovoltaico Kioto Solar

Parametro	Valor
Potência ( $P_{mpp}$ )	250 $Wp$
Tensão no ponto potência máxima ( $U_{mpp}$ )	30,56 $V$
Corrente no ponto de potência máxima ( $I_{mpp}$ )	8,21 $A$
Tensão de circuito aberto ( $U_{OC}$ )	37,84 $V$
Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ )	8,85 $A$
Rendimento ( $\eta$ )	15,12%
Área por $kWp$	6,61 $m^2$

### 3.2.2 Acumulador de energia

Foi utilizada uma bateria VRLA de chumbo-ácido da *Vitron Gel Deep Cycle* de 12  $V$  e 60  $Ah$  de capacidade, representada na figura 3.2. Estas baterias apresentam características muito valorizadas no ramo fotovoltaico, tais como:

- maior tempo de vida útil;
- melhor capacidade para trabalhar em ciclos;
- podem ser armazenadas durante um longo período de tempo, sem recarregar;
- média de descarga menor que 2% por mês, a uma temperatura de 20 °C. A descarga duplica a cada aumento de temperatura de 10 °C;
- tempo de descarga de 20 horas, para uma corrente de 2  $A$  quando carregada a 100%.



Figura 3.2: Bateria VRLA *Vitron Gel Deep Cycle*

Na tabela 3.2, encontram-se as principais características da bateria utilizada no projeto. O parâmetro CCA (*Cold Cranking Amps*), descrito na tabela 3.2, mede a corrente máxima de descarga, que uma bateria completamente nova pode fornecer durante 30 segundos, em condições frias (0 °F / -18 °C), mantendo a tensão aos terminais de cada célula igual ou superior a 1,20  $V$ .

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.2: Características da bateria VRLA *Vitron Gel Deep Cycle*

Parametro	Valor
Capacidade	60 Ah
Tensão	12 V
Dimensões	229 × 138 × 227 mm <sup>3</sup>
Peso	20 kg
CCA (-18 °C)	300 A
RC (27 °C)	80 min

O parâmetro RC (Reserve Capacity), por sua vez, representa a capacidade de reserva da bateria. Mede o tempo durante o qual uma bateria completamente carregada consegue fornecer 25 A de corrente, num ambiente à 27 °C, até ser descarregada até aos 10,5 V.

Os dois parâmetros, CCA e RC, apresentam-se como elementos importantes na escolha da bateria. Enquanto que o CCA ajuda a perceber a quantidade máxima de carga que uma bateria pode fornecer durante um curto período de tempo, o parâmetro RC ajuda a perceber o quanto a bateria pode fornecer de energia durante um longo período de tempo.

### 3.2.3 Regulador de carga

Foi empregue um regulador de carga *BlueSolar Charger Controller MPPT 75/15*, fabricado pela Vitron Energy, representado na figura 3.3, cujo as características podem ser consultadas na tabela 3.3.



Figura 3.3: Regulador *BlueSolar MPPT 75/15*

Este regulador, apresenta características muito interessantes, que serão descritas de seguida:

- MPPT ultra rápido - permite otimizar a energia produzida, especialmente em dias nublados, até 30% em comparação com reguladores PWM e até 10%, se comparados com reguladores MPPT mais lentos.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

- Apresenta uma saída dedicada à carga - ao conectar as cargas nessa saída previne-se a sobre-descarga, onde o regulador desconecta as cargas assim que a bateria atinja um nível de tensão de descarga pré-estabelecido.
- Controlo inteligente da bateria - o algoritmo de controlo da bateria monitoriza o estado de carga da bateria e, se necessário, aumenta o nível de desconexão das cargas, ou seja, desconecta as carga cada vez mais cedo, até que haja energia suficiente para recarregar a bateria até próximo dos 100%. A partir desse ponto o nível de desconexão das cargas é controlado para que seja possível atingir um nível de carga próximo dos 100%, pelo menos uma vez por semana.

Tabela 3.3: Características do regulador de carga *BlueSolar MPPT 75/15*.

Parametro	Valor
Tensão da bateria	12 / 24 V (Seleção automática)
Corrente de carga nominal	15 A
Potência máxima do PV	200 W
Corrente máxima de curto circuito do painel	15 A
Tensão máxima de circuito aberto	75 V
Máxima eficiência	98%
Auto consumo	10 mA

### 3.2.4 Inversor de carga

Como visto anteriormente, o inversor é o responsável pela conversão da tensão DC, de saída dos módulos fotovoltaicos, para uma tensão AC sinusoidal com frequência necessária. No nosso caso de estudo, o inversor terá que ter capacidade para transformar a tensão DC dos módulos numa tensão de  $230 V_{AC}$ , com uma frequência de  $50 Hz$ . A capacidade nominal do inversor deve ser maior que a capacidade do sistema, com o intuito de impedir possíveis sobrecargas. Foi então escolhido um inversor *Phoenix Inverter 12/180* de onda sinusoidal pura, da *Victron Energy*, que pode ser visto na figura 3.4. As principais propriedades encontram-se descritas na tabela 3.4.



Figura 3.4: Inversor *Phoenix Inverter 12/180*.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.4: Características do inversor *Phoenix Inverter12/180*.

Parametro	Valor
Potência aparente a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	180 VA
Potência ativa a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	175 / 150 W
Potência de pico	350 W
Tensão de saída/frequência (AC)	110 V <sub>AC</sub> ou 230 V <sub>AC</sub> $\pm 3\%$ / 50 Hz ou 60 Hz $\pm 0,1\%$
Gama de tensão de entrada	10,5 - 15,5 V
Máxima eficiência	87%
Temperatura	-40 $^{\circ}\text{C}$ a 50 $^{\circ}\text{C}$

### 3.3 Protótipo

Para a construção da bancada fotovoltaica foram considerados alguns fatores importantes, que viriam a condicionar a construção da mesma. Esta foi projetada para ensaios em ambiente exterior, aproveitando, assim, diretamente a energia proveniente do sol. Para isso, foram utilizadas quatro rodas, duas giratórias e com travão, para facilitar a movimentação e posicionamento da bancada. A bancada deverá apresentar alguma robustez, uma vez que suportará o módulo fotovoltaico e os restantes equipamentos do sistema.

Para a construção da bancada foi utilizado um perfil de aço com 3 mm de espessura e dimensões  $30 \times 30\text{ mm}$ , com capacidade para suportar todos os equipamentos. Para o painel de ligações foi utilizada uma chapa de aço de 3 mm de espessura e dimensões  $58 \times 1731\text{ mm}$ .

Foi também necessário desenvolver um mecanismo simples que permitisse variar a inclinação do módulo fotovoltaico, permitindo obter medições com 6 ângulos diferentes,  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$  e  $60^{\circ}$ . O mecanismo é simples e consiste na aplicação de dois braços, com vários furos, ligados diretamente ao módulo fotovoltaico e à bancada. Este permite variar o ângulo de inclinação entre o módulo e a superfície da bancada. Após varias pesquisas e depois de ter em conta todos os fatores, anteriormente expostos, necessários para a construção da bancada desenvolveu-se o protótipo no software Solidworks, representado pela figura 3.5.



Figura 3.5: Bancada de ensaios projetada no software Solidworks

### 3.4 Construção da bancada fotovoltáica

#### 3.4.1 Estrutura metálica

A estrutura metálica da bancada fotovoltáica tem como função suportar todos os equipamentos pertencentes ao sistema, o que faz com que na sua construção sejam tomadas medidas e precauções para que esta seja capaz de suportar os respetivos componentes.

Para tal, foi utilizado um perfil em aço, com secção quadrada com  $3\text{ mm}$  de espessura e dimensões  $30 \times 30\text{ mm}$ . O aço foi cortado com as dimensões exatas para depois serem soldadas através do processo de soldadura MIG/MAG, dando, assim, forma à estrutura de suporte da bancada de ensaios. A estrutura metálica foi, posteriormente, soldada sobre quatro rodas, duas direcionais e com travão e duas rodas fixas sem travão, providenciando, assim, a mobilidade necessária para a deslocação da bancada. Esta foi polida e limada para eliminar possíveis irregularidades no aço e, de seguida, aplicou-se uma tinta primário para proteger o aço de possíveis corrosões. Pela figura 3.6 e 3.7 pode-se observar o projeto da estrutura em Solidworks e a estrutura em aço construída na oficina do departamento de Engenharia Eletromecânica na UBI.



Figura 3.6: Projeto em Solidworks da estrutura em aço



Figura 3.7: Estrutura em aço construída na oficina do departamento de Engenharia Eletromecânica na UBI.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

### 3.4.2 Painel de instrumentos

O painel de instrumentos recria o esquema de um sistema fotovoltaico autônomo e inclui todos os atuadores necessários para o seu funcionamento. Este é composto pelo módulo fotovoltaico, o regulador de carga, o inversor de carga, a bateria e as cargas em corrente contínua e corrente alternada.

Para a construção do painel de instrumentos foi utilizado uma chapa em aço com 3 mm de espessura e dimensões 590 × 1791 mm. Nesta foram executados os furos necessários para a instalação dos equipamentos pertencentes ao painel de instrumentos, através de corte por jato de água, realizado na FabLab da Universidade da Beira Interior. Para finalizar colou-se um papel autocolante com o circuito do sistema fotovoltaico a simular.

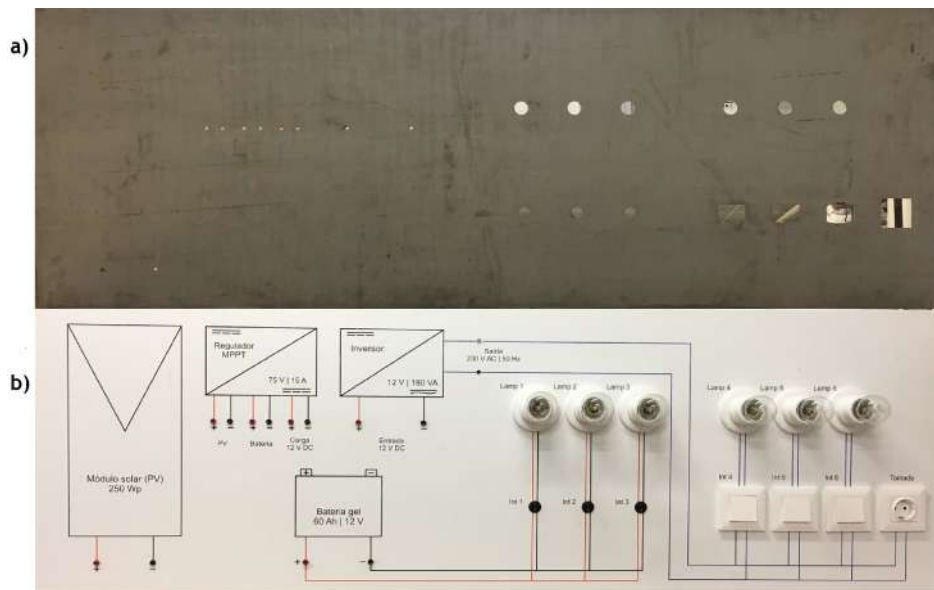


Figura 3.8: a) Chapa metálica para o painel de instrumentos com os furos para a instalação dos equipamentos. b) Painel de instrumentos com o circuito a simular.

### 3.4.3 Mecanismo de inclinação

Após a construção da bancada e do painel de instrumentos tornou-se o nosso principal foco a instalação segura de todos os componentes constituintes do sistema. O mecanismo de inclinação liga o módulo fotovoltaico à estrutura metálica, permitindo que se possa alterar os ângulos de incidência da radiação solar em relação ao módulo. Este tentou-se que fosse o mais simples possível de modo a que se possa alterar os ângulos sem nenhuma dificuldade. É constituído por um braço que liga o módulo à estrutura metálica, que contém vários furos que permitem alterar o ângulo do módulo em relação à posição do sol, desde os 10° até um ângulo máximo de 60°. Para fixar o braço à estrutura metálica fixou-se um parafuso à estrutura, que permite o encaixe do braço como se pode ver pela figura 3.9. Para completar o mecanismo de inclinação adicionaram-se duas dobradiças fixas ao módulo e à estrutura metálica, que permitissem a articulação do módulo fotovoltaico. De realçar que este mecanismo é constituído por dois braços instalados no módulo como se pode ver pela figura 3.10. Pelas figuras 3.11 e 3.12 pode-se ver imagens da bancada finalizada e com os respetivos instrumentos de medição.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática



Figura 3.9: Detalhes sobre o mecanismo de inclinação da bancada fotovoltaica



Figura 3.10: Mecanismo de inclinação

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltáica didática



Figura 3.11: Vista de frente da bancada fotovoltáica



Figura 3.12: Vista de trás da bancada fotovoltáica

### 3.5 Dimensionamento das cablagens

Os cabos num sistema elétrico precisam ser validados por um conjunto de condições, com a intenção de simular casos extremos, que possam pôr em risco a estabilidade do sistema. É importante ter em atenção três critérios essenciais: tensão máxima admissível, corrente máxima admissível e minimização das perdas na linha.

Em corrente contínua torna-se importante dimensionar as cablagens devido a correntes paralelas

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

de sentido inverso e aquecimento por efeito de Joule ( $P_J = R \times I^2$ ), dois fatores que podem pôr em risco a integridade do sistema. Os cabos DC estabelecem a ligação entre:

- o módulo fotovoltaico e o regulador de carga;
- o regulador de carga e a bateria;
- a bateria e as cargas DC;
- a bateria e o inversor.

Estes cabos devem ser capazes de transportar uma corrente 1,25 vezes superior à corrente de curto-circuito do módulo, sob condições STC, respeitando a Norma Europeia IEC 60364-7-712.

$$I_{cabo} = 1.25 \times I \quad (3.1)$$

Onde,

$I_{cabo}$  - Corrente que o cabo deverá suportar

$I$  - Corrente nominal que passa pelo cabo

Após o cálculo da corrente que o cabo deverá suportar, procede-se à escolha da secção do mesmo, através da corrente máxima admissível pelo cabo. Este deverá ser igual ou superior à corrente que o cabo deverá suportar.

$$I_{cabo} \leq I_Z \quad (3.2)$$

onde,

$I_Z$  - Corrente máxima suportada pelo cabo

Escolhida a secção do cabo, esta deve ser confirmada através da queda de tensão admissível. As quedas de tensão em DC permitidas em sistemas fotovoltaicos são as seguintes:

- Quedas de tensão entre o módulo FV e o regulador/inversor - 3% ou 1% para sistemas ligados à rede;
- Quedas de tensão entre o regulador e baterias - 1%;
- Quedas de tensão entre o regulador e o inversor - 1%;
- Quedas de tensão entre o inversor e baterias - 1%;
- Quedas de tensão entre o inversor/regulador e as cargas - 3%.

A equação 3.3, permite determinar a secção do cabo PV/regulador, admitindo uma queda de tensão de 1%, imposta pela norma alemã VDE 0100 Parte 712.

$$S_{cabo} = \frac{2 \times L_{cabo} \times I_{SC}}{0,01 \times U_{MPP} \times \sigma} \quad (3.3)$$

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

onde,

$S_{cabo}$  - Secção do cabo (m)

$L_{cabo}$  - Comprimento do cabo (m)

$U_{MPP}$  - Tensão de máxima potência (V)

$\sigma$  - Condutividade elétrica do material (Cobre - 56; Alumínio - 43)

O resultado obtido pela equação 3.3, deve ser aproximado para secções normalizadas de cabos. Uma vez determinada a secção do cabo, podem ainda ser obtidas as perdas totais da instalação, através da equação 3.4.

$$P_M = \frac{2 \times N \times L_{cabo} \times I_{SC}}{S_{cabo} \times \sigma} \quad (3.4)$$

onde,

$P_M$  - Perdas entre o PV/Regulador (W)

$N$  - Número de fileiras do gerador

No trabalho desenvolvido, apesar das normas mencionadas acima sobre as quedas de tensão permitidas, teve-se em conta os dois primeiros critérios para o dimensionamento dos cabos, as tensões e correntes máximas admissíveis, desprezando assim as perdas nos cabos. Dito isto, foi escolhido o cabo por onde passa a corrente mais elevada de todo o sistema fotovoltaico, o cabo entre o inversor e a bateria. Pela equação 3.1, obtêm-se:

$$I_{cabo} = 1,25 \times 29.17 \Leftrightarrow I_{cabo} = 36,46A \quad (3.5)$$

A corrente que circula nos cabos entre a bateria e o inversor é calculada, tendo em conta, a potência de pico do inversor e a tensão de funcionamento da bateria. Neste caso, obtêm-se uma potência de pico de 350 W a 12 V. Pela fórmula da potência consegue-se saber o valor da corrente que circula nos cabos, assim sendo:

$$I_{Inv/Bat} = \frac{350}{12} \Leftrightarrow I_{Inv/Bat} = 29.17A \quad (3.6)$$

O cabo entre o inversor e a bateria terá então, que suportar uma corrente igual ou superior a 36,4 A. Foram empregues cabos unifilares de secção de 6 mm<sup>2</sup> em todas as cablagens DC, como forma de simplificar a instalação. Para a ligação às cargas foram utilizados cabos de secção de 1,5 mm<sup>2</sup> e 2.5 mm<sup>2</sup>, para as lâmpadas e tomadas, respetivamente.

Tabela 3.5: Corrente máxima admissível pelos condutores [69].

Secção do condutor [mm <sup>2</sup> ]	Corrente máxima admissível [A]
1 x 1,5	17,5
1 x 2,5	24
1 x 4	32
1 x 6	41

### 3.6 Instrumentação

Para que se possa prosseguir para a caracterização elétrica da instalação fotovoltaica, é necessário fazer medições de uma série de variáveis essenciais para o bom funcionamento do sistema. Optou-se por não utilizar instrumentos de medição incorporados no quadro de ligações, o que garante maior versatilidade sobre os equipamentos utilizados e as medições a serem feitas. Para tal, utilizaram-se, nas medições efetuadas no âmbito do estudo experimental do presente trabalho, dois multímetros da marca *FLUKE*, representados na figura 3.13 . Os dois multímetros foram utilizados, maioritariamente, para medição de tensões, correntes e resistências. As especificações dos dois multímetros utilizados encontram-se descritas na tabela 3.6.

Foi também necessário fazer o registo das temperaturas à superfície do módulo fotovoltaico. Para tal, foi utilizado um termómetro digital Fluke 54 II, que funciona à base de microprocessadores e foram projetados para usar termopares externos dos tipos J, K, T (utilizado neste projeto), E, R, S e N como sensores de temperatura. Este termómetro pode ser observado na figura 3.14 e as especificações encontram-se descritas na tabela 3.7.

Utilizou-se, ainda, um solarímetro AMPROBE SOLAR-100, para medir a intensidade da radiação incidente sobre o módulo fotovoltaico, representado pela figura 3.15. Este instrumento faz a medição da radiação em duas unidades distintas,  $W/m^2$  ou  $Btu/m^2$ , permitindo medir até  $2000 W/m^2$ . Na tabela 3.8 pode ser consultada as especificações do solarímetro utilizado.



Figura 3.13: Multímetros utilizados para a caracterização elétrica do sistema fotovoltaico

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.6: Especificações dos multímetros utilizados

FLUKE 177 True RMS Multimeter			
Função	Alcance	Resolução	Precisão
Tensão <sub>AC</sub>	600 V	0,1 V	± 1,0%
	1000 V	1 V	± 2,0%
Tensão <sub>DC</sub>	600 V	0,1 V	± 0,09%
	1000 V	1 V	± 0,15%
Corrente <sub>AC</sub>	10 A	0,01 A	± 1,5%
Corrente <sub>DC</sub>	10 A	0,01 A	± 1,0%
Resistência	50 MΩ	0,01 MΩ	± 1,5%
Frequência	99,99 kHz	0,01 kHz	± 0,1%

FLUKE 116 True RMS Multimeter			
Função	Alcance	Resolução	Precisão
Tensão <sub>AC</sub>	600 V	0,1 V	± 0,5%
Tensão <sub>DC</sub>	600 V	0,1 V	± 1,0%
Corrente <sub>AC</sub>	600 μA	0,1 μA	± 1,5%
Corrente <sub>DC</sub>	600 μA	0,1 μA	± 1,0%
Resistência	40 MΩ	0,01 MΩ	± 5%
Frequência	50 kHz	0,01 kHz	± 0,1%



Figura 3.14: Termômetro utilizado para medir a temperatura à superfície do módulo fotovoltaico

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.7: Especificações do termómetro utilizado

Alcance	Tipo J: $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tipo K: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tipo T: $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tipo E: $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tipo N: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tipo R e S: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+1767\text{ }^{\circ}\text{C}$
Resolução do mostrador	$0,1\text{ }^{\circ}\text{C} / ^{\circ}\text{F} / \text{K} < 1000\text{ }^{\circ}$ $1,0\text{ }^{\circ}\text{C} / ^{\circ}\text{F} / \text{K} \geq 1000\text{ }^{\circ}$
Precisão da medição	Tipo J, K, T, E, N: $\pm [0,05\% + 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}]$ abaixo de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : acrescente $0,15\%$ da leitura para os tipos J, K, E, N; acrescente $0,45\%$ da leitura para o tipo T tipo R, S: $\pm [0,05\%$ da leitura $+ 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}]$
Diferença de tensão máxima	$1\text{ V}$



Figura 3.15: Solarímetro utilizado para medir a intensidade da radiação solar

Tabela 3.8: Especificações do solarímetro utilizado

Alcance	$1999\text{ W}/\text{m}^2$
Precisão	$\pm 10\text{ W}/\text{m}^2$ ou $\pm 5\%$ à temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,38\text{ W}/\text{m}^2 / ^{\circ}\text{C}$ a partir dos $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura / humidade	$5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / abaixo dos $80\%$

### 3.7 Protocolo de ensaios

#### 3.7.1 Variação da produção do módulo fotovoltaico em função da inclinação

Se nenhuma carga (por exemplo, uma resistência elétrica) for ligada ao módulo fotovoltaico quando exposto a radiação, será obtida uma tensão de circuito aberto, mas sem que ocorra qualquer fluxo de corrente elétrica. Do mesmo modo, se os terminais do módulo fotovoltaico forem ligados entre si (condição de curto-circuito) uma corrente bastante elevada, a denominada corrente de curto-circuito, irá ser produzida, mas com uma tensão nula. Em qualquer dos casos não é produzida qualquer potência.

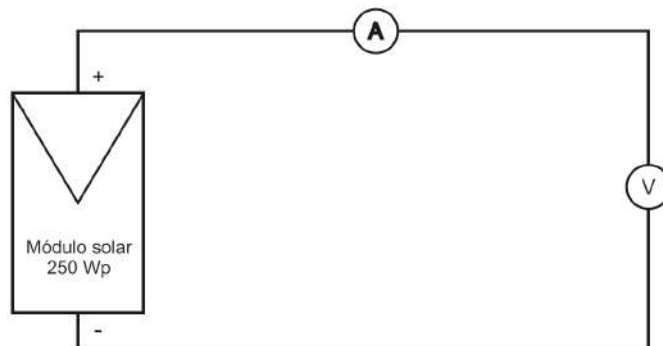


Figura 3.16: Circuito proposto para o ensaio

##### 3.7.1.1 Objetivos

- Estudar a produção de energia do módulo relativamente a posição do painel e da radiação solar incidente
- Determinar os valores de inclinação para o qual a corrente é máxima

##### 3.7.1.2 Descrição do trabalho a realizar

Para a realização desta experiência, liga-se aos terminais do módulo fotovoltaico um multímetro para registar os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. De seguida, com o módulo orientado a sul, vai-se variando a inclinação do módulo desde o ângulo mínimo,  $10^\circ$ , até ao ângulo máximo,  $60^\circ$ . Em cada posição mede-se os valores de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, registando os valores na tabela 3.9.

Tabela 3.9: Tabela de registo dos valores da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito

Ângulo	Tensão [V]	Corrente [A]	Radiação [ $W/m^2$ ]	Temperatura [C]
$10^\circ$				
$20^\circ$				
$30^\circ$				
$40^\circ$				
$50^\circ$				
$60^\circ$				

### 3.7.2 Curvas características do módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico exposto a radiação solar produz nos seus terminais uma tensão equivalente à tensão de circuito aberto, se a este não estiver ligada nenhuma carga. De igual modo, se os terminais do módulo forem ligados entre si, gera-se uma corrente de curto-circuito com tensão nula. Em qualquer dos casos, a potência gerada é zero. Ao adicionar uma resistência variável aos terminais do módulo fotovoltaico, é possível obter valores de tensão e corrente geradas pelo módulo fotovoltaico e, assim, construir a respetiva curva característica  $I \times V$ , descrita anteriormente no capítulo 2.

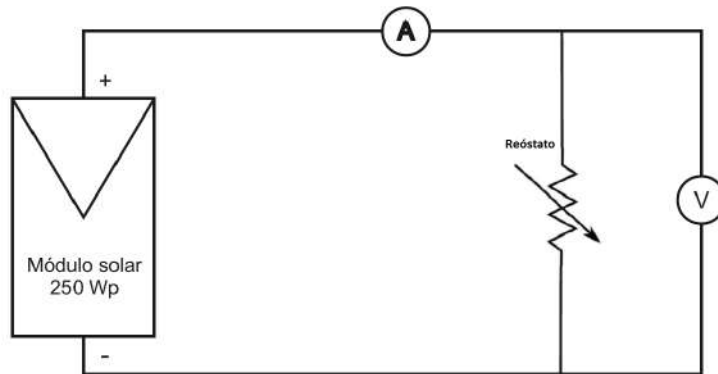


Figura 3.17: Circuito proposto para o ensaio

#### 3.7.2.1 Objetivos

- Medir a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico
- Medir a corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico
- Medir tensões e correntes para várias cargas
- Identificar a tensão e corrente máxima e calcular a potência máxima do módulo fotovoltaico
- Obter os índices de qualidade do módulo fotovoltaico através da eficiência e do fator de forma do mesmo

#### 3.7.2.2 Descrição do trabalho a realizar

Para a realização do trabalho o aluno deverá seguir o circuito da figura 3.17, disponibilizado para esta experiência. A fim de obter a curva característica, deve-se variar a resistência de carga do sistema através de um reóstato com uma resistência máxima de  $30 \Omega$ , ligado diretamente à saída do módulo fotovoltaico. Este, deve ser variado desde o ponto de resistência mínima ( $R = 0 \Omega$ ), até ao ponto de maior resistência ( $R = 30 \Omega$ ). Os valores de tensão e corrente serão medidos pelo voltímetro e amperímetro, respetivamente, e registados na tabela 3.10.

Para obter os índices de qualidade devem ser utilizadas as equações 2.18 e 2.20, para calcular a eficiência e o fator de forma, respetivamente.

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 3.10: Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico

Resistência [ $\Omega$ ]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]

### 3.7.3 Curva da eficiência do inversor de carga

Os sistemas solares fotovoltaicos geram corrente contínua enquanto que praticamente todos os aparelhos elétricos domésticos estão preparados para a corrente alternada. Os inversores são aparelhos destinados a converter essa corrente contínua em corrente alternada. Constam de um circuito eletrónico, à base de transístores ou tiristores, que se encarrega de converter a corrente contínua em corrente alternada e um transformador para elevar a tensão (de 12 V, 24 V para 220 V). Os inversores criam uma onda de forma quadrada que se pode filtrar para obter uma forma de onda sinusoidal idêntica à da rede elétrica.

#### 3.7.3.1 Objetivos

- Medir a tensão de entrada e saída do inversor de carga
- Medir a frequência de saída do inversor em vazio
- Verificar a forma de onda do inversor em vazio
- Construir a curva de eficiência do inversor

#### 3.7.3.2 Descrição do trabalho a realizar

Em primeiro lugar, as ligações deverão respeitar o esquema apresentado na figura 3.18. De seguida, com um voltímetro em corrente contínua, deve medir a tensão à entrada do inversor, tendo em conta a tensão nominal de 12 V. Com um voltímetro em corrente alternada, deve medir a tensão de saída do inversor, tendo em conta a tensão nominal de 230 V. Com a ajuda do multímetro meça a frequência de saída tendo em conta a frequência nominal de 50 Hz. A fim de comparar os valores experimentais com os valores disponibilizados pelo fabricante, estas medições devem ser feitas em vazio, ou seja, com carga igual à zero.

Para a construção da curva de eficiência do inversor deve-se fazer várias medições com diferentes valores de carga. Com os valores de tensão e corrente obtidos, calcular as respetivas potências de entrada e saída do inversor, e as respetivas eficiências, através das equações 3.7, 3.8 e 3.9. Por fim, represente graficamente a eficiência do inversor em função da carga.



## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

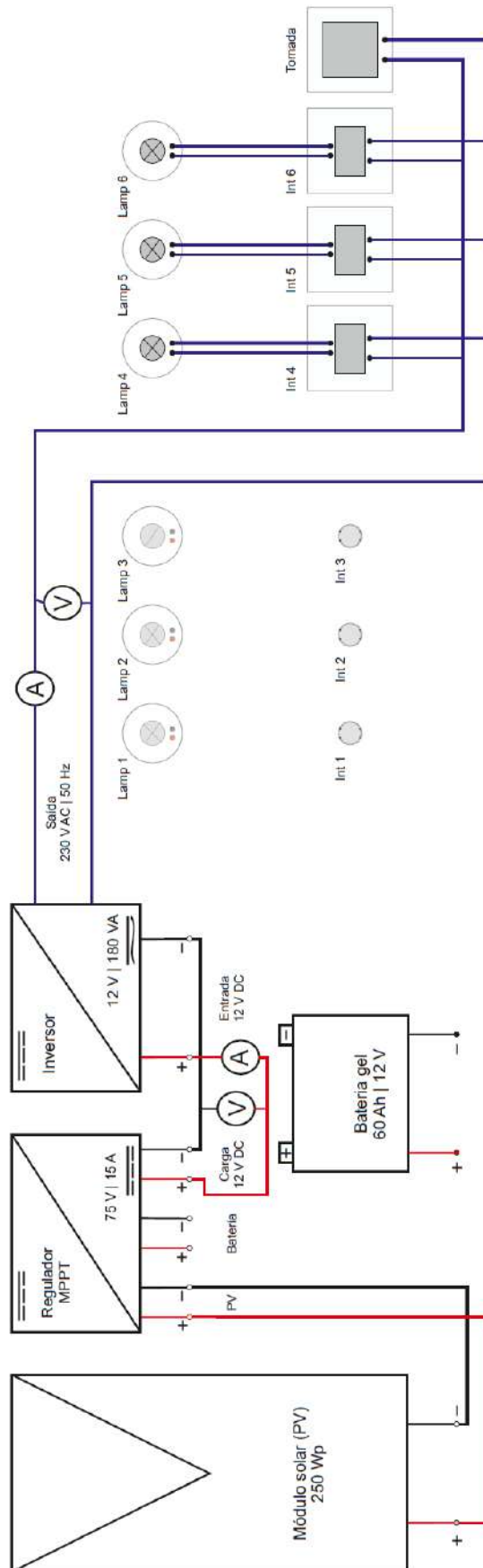


Figura 3.18: Circuito proposto para o ensaio

### 3.7.4 Comportamento do módulo fotovoltaico sobre o efeito de sombras parciais

Num módulo fotovoltaico todas as células que o compõem são seleccionadas com o objetivo de que todas tenham características o mais parecidas possíveis. Se existirem células com diferentes características, o comportamento do módulo será deficiente e o seu rendimento baixo. Partindo do princípio que todas as células são semelhantes, a possibilidade de que uma delas não gere a mesma intensidade, se não estiver danificada, deve-se ao facto de existirem sombras totais ou parciais sobre ela. Quando uma célula estiver a trabalhar nestas condições, verifica-se um efeito de tendência para a inversão. As células sombreadas em vez de se comportarem como um gerador de energia, fazem-no como um recetor que dissipa uma determinada potência, notando-se um aumento da temperatura da célula.

#### 3.7.4.1 Objetivos

- Observar o comportamento do painel quando existem sombras parciais
- Medir a tensão e corrente do módulo para diferentes situações de sombreamento
- Calcular a potência gerada para diferentes situações de sombreamento
- Observar o aumento da temperatura nas células cobertas
- Construir a curva característica do módulo com as células sombreadas e comparar com a curva característica do módulo com todas as células descobertas

#### 3.7.4.2 Descrição do trabalho a realizar

A fim de realizar esta experiência, o aluno deverá começar por fazer a leitura da temperatura nas células no início da experiência e cobrir 4 células utilizando pedaços de papel, previamente cortados com as medidas das células. De seguida, de acordo com o circuito da figura 3.17 liga-se o módulo diretamente à resistência variável ajustada à carga ao qual foi calculada a potência máxima no ensaio 3.7.3. De seguida, fazem-se as medições da tensão e corrente à saída do módulo, de modo a preencher a tabela 3.12. Registam-se também os valores da temperatura nas células cobertas, repetindo o processo para três células, duas células, uma célula e zero células cobertas.

Tabela 3.12: Tabela de registo dos valores da tensão e corrente das células sombreadas

	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Temperatura [C]
0 células				
1 célula				
2 células				
3 células				
4 células				

### 3.8 Nota conclusiva

Ao longo deste capítulo foram descritos os principais componentes utilizados para a construção da bancada fotovoltaica, nomeadamente, o módulo fotovoltaico utilizado, a bateria, o regulador de carga e o inversor de carga. Focou-se, também, numa descrição simples e detalhada de todo o processo abrangente, desde o protótipo à construção. O tamanho do módulo fotovoltaico utilizado, de  $1666\text{ mm} \times 992\text{ mm}$ , condicionou o tamanho final da bancada, de  $1730\text{ mm} \times 1630\text{ mm}$ , com uma altura de  $955\text{ mm}$ , contabilizando as rodas. No que diz respeito à instrumentação utilizada, estes demonstraram ser de grande utilidade, não sendo possível cumprir todos os nossos objetivos sem a implementação dos mesmos.



# Capítulo 4

## Caraterização elétrica da instalação fotovoltaica

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada, de forma detalhada, a caraterização elétrica da instalação fotovoltaica, onde constarão os resultados dos vários ensaios propostos no capítulo 3. Estes serão apresentados sob a forma de gráficos e tabelas para melhor percepção dos mesmos. Os resultados serão avaliados e será apresentada uma breve discussão dos mesmos.

### 4.2 Apresentação e discussão dos resultados

#### 4.2.1 Variação da produção do módulo fotovoltaico em função da inclinação

Como visto anteriormente no capítulo 2, a posição dos módulos fotovoltaicos e função da inclinação da radiação solar condiciona a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Este ensaio serve para analisar e perceber os diferentes valores da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito do módulo ao alterarmos a inclinação do módulo face à radiação incidente.

Tabela 4.1: Tabela de registo dos valores da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito do módulo em função da inclinação

Ângulo	Tensão [V]	Corrente [A]	Radiação [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
10°	35,2	5,3	672	30,3
20°	35,2	6,1	748	30,7
30°	35,1	6,9	828	33,3
40°	35,0	7,5	916	35,3
50°	34,9	8,0	951	35,8
60°	34,6	8,1	967	37,6

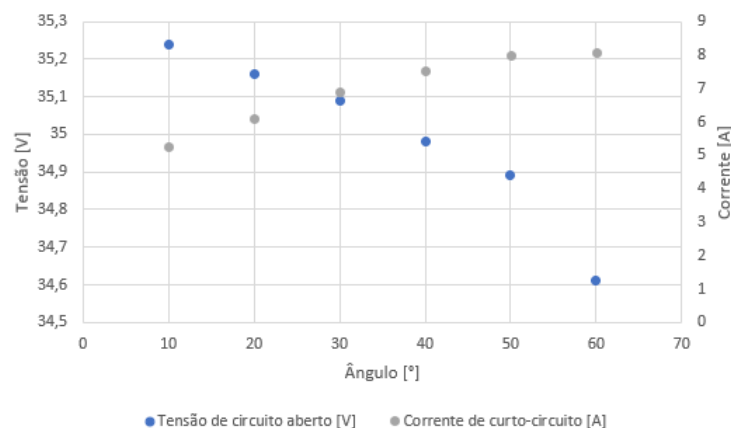


Figura 4.1: Variação dos parâmetros do módulo fotovoltaico em função da inclinação

Pela análise da tabela 4.1 e da figura 4.1, pode-se observar um aumento considerável da radiação incidente no módulo fotovoltaico e na corrente de curto-circuito, à medida que se foi variando a inclinação do mesmo, dos 10° aos 60°. Este aumento da radiação incidente afeta consideravelmente o desempenho do módulo fotovoltaico, registrando uma corrente de curto-circuito máxima de 8,08 A, correspondente a uma inclinação de 60°. Este valor, embora inferior ao valor da corrente de curto circuito fornecida pelo fornecedor, vai de encontro com as expectativas, que previa que a corrente de curto-circuito máxima ocorresse no intervalo de inclinação entre os 50° e os 60°, visto que, as medições foram feitas na estação de inverno, onde a altura solar é menos elevada do que na estação de verão, pelo que é necessário uma inclinação mais elevada para que se possa ter um bom aproveitamento da energia solar.

A tensão de circuito aberto, ao contrário da corrente de curto-circuito, manteve-se praticamente constante, registrando uma diminuição de apenas 0,63 V, ao variar a inclinação do módulo dos 10° aos 60°. Esta diminuição da tensão de circuito aberto prevê-se ter sido forçada pelo aumento da temperatura do módulo, que afeta diretamente a tensão de circuito aberto.

#### 4.2.2 Curvas características do módulo fotovoltaico

Para que se possa tirar o maior aproveitamento do módulo fotovoltaico é importante estabelecer as melhores condições de funcionamento, para isso recorre-se a construção da curva de características IV do módulo fotovoltaico. Este ensaio tem como principal objetivo localizar o ponto de máxima potência do módulo e avaliar a qualidade do mesmo através do cálculo da eficiência e do fator de forma.

Tabela 4.2: Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico

Resistência [ $\Omega$ ]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	Radiação [ $W/m^2$ ]
0,2	0,1	7,3	0,8	38,6	885
2,1	11,4	6,7	76,4	39,6	916
4,2	27,2	6,6	178,5	40,1	971
6,3	28,9	5,0	143,5	40,6	981
7,8	30,3	3,8	116,4	39,0	920
10	31,4	3,0	95,3	40,6	955
12,3	31,5	2,6	80,4	39,6	903
14,6	31,9	2,2	69,4	40,5	900
16,6	32,0	1,9	60,8	39,3	900
18,5	32,2	1,7	55,3	40,7	903
20,5	32,3	1,6	50,4	41,3	883
22,3	31,8	1,4	44,8	40,4	808
24,3	32,7	1,4	44,1	36,3	738
26,3	33,1	1,3	41,6	34,8	688
28,1	33,1	1,2	39,1	34,6	752
29,9	33,3	1,1	37,3	36,4	859
31,1	33,4	1,1	35,7	38,0	895

Para obter os índices de qualidade, deve-se utilizar as equações 4.1 e 4.5, para calcular a eficiência ( $\eta$ ) e o fator de forma ( $FF$ ), respetivamente.

$$\eta = \frac{P}{P_R} \times 100 \quad (4.1)$$

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

$$\eta = \frac{178,50}{1586,72} \times 100 \iff \eta = 11,3\% \quad (4.2)$$

Onde,  $P$ , representa a radiação produzida pelo módulo fotovoltaico e,  $P_R$  representa a radiação incidente na superfície do módulo fotovoltaico e pode ser calculada através da equação 4.3.

$$P_R = G \times A_M \quad (4.3)$$

$$P_R = 971 \times (1,659 \times 0.985) \iff P_R = 1586,7 \text{ W} \quad (4.4)$$

$G$  representa a radiância, em  $W/m^2$  e, pode ser medida através de um piranómetro.  $A_M$  representa a área, em  $m^2$ , do módulo fotovoltaico onde incide a radiação solar. O fator de forma, por sua vez, compara a potência máxima obtida, relacionando a tensão e a corrente máxima com a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto, tal como descrito na equação 4.5.

$$FF = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (4.5)$$

$$FF = \frac{6,6 \times 27,2}{8,9 \times 37,8} \iff FF = 0,5 \quad (4.6)$$

Como dito anteriormente, é importante que o sistema funcione sempre próximo do ponto de potência máxima para que haja maior eficiência. Foi, então, calculada a eficiência do módulo fotovoltaico, de 11,3%, para o ponto onde a potência é máxima, através da equação 4.1. Este valor encontra-se, precisamente, 4% abaixo do valor da eficiência disponibilizada pelo fornecedor. Este valor, embora inferior, é considerado aceitável, uma vez que, os ensaios foram realizados em ambiente exterior, onde não se pode controlar as condições ambientais, ao contrário, dos ensaios em condições STC, realizados pelo fabricante do módulo fotovoltaico. Calculou-se, também, o fator de forma do módulo fotovoltaico, de 0,5. Este valor encontra-se um pouco abaixo dos valores disponíveis na literatura para células de silício policristalino, normalmente entre 0,7 e 0,8 [9].

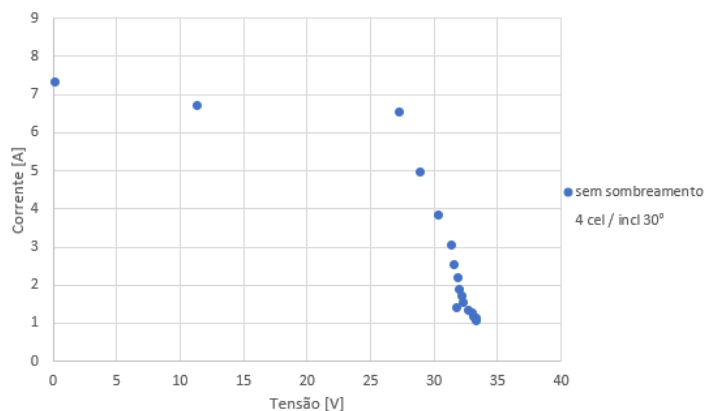


Figura 4.2: Curva característica do módulo fotovoltaico

Através da análise do gráfico da figura 4.2, é possível observar que à medida que a resistência da carga adicionada ao sistema vai aumentando a corrente diminui e, por consequência, a ten-

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

são vai aumentando até eventualmente atingir o seu valor de tensão de circuito aberto, onde a corrente é nula. Nota-se, também, que a corrente sofre pequenas alterações até determinado valor da resistência na carga, aproximadamente  $4 \Omega$  diminuindo drasticamente o valor da corrente para valores altos da resistência. A tensão, por sua vez, aumenta drasticamente para valores de resistência da carga baixa, até aproximadamente  $4 \Omega$ , sofrendo apenas pequenas alterações quando a resistência é mais elevada, a partir dos  $6 \Omega$ , aproximadamente. O ponto de potência máxima registou-se para valores de tensão igual a  $27,2 V$  e corrente igual a  $6,6 A$ , correspondendo a uma potência máxima de  $178,5 W$ .

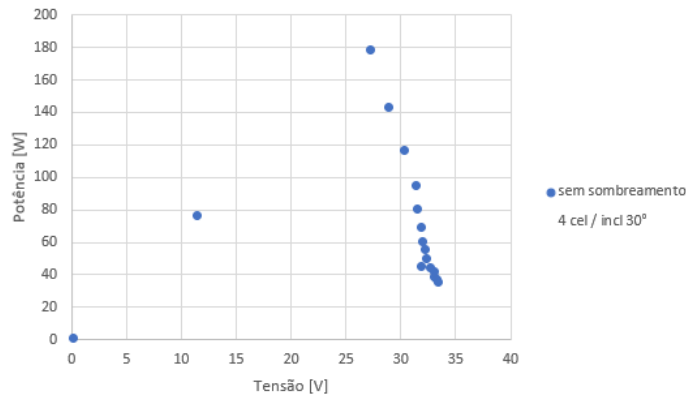


Figura 4.3: Curva de potência do módulo fotovoltaico

### 4.2.3 Curva da eficiência do inversor de carga

O inversor de carga serve para converter a corrente contínua, gerada pelo módulo fotovoltaico, em corrente alternada, posicionando-se como um dos principais elementos do sistema fotovoltaico. Torna-se, assim, importante perceber o funcionamento do inversor com diferentes cargas. O principal objetivo deste ensaio é construir e analisar a curva de eficiência do inversor de carga, conectado com diferentes tipos de carga.

Tabela 4.3: Tabela de registo dos valores de tensão e corrente à entrada e à saída do inversor de carga

Potência [W]	Te [V]	Ts [V]	Ie [A]	Is [A]	Pe [W]	Ps [W]	f [Hz]	$\eta$ [%]
0	13,7	236,8	0,2	0,006	2,7	1,0	0	36,3
4	13,6	236,4	0,5	0,03	7,3	5,5	50,0	74,5
6	13,5	236,2	0,7	0,05	9,5	7,6	50,5	80,4
8	13,5	236,0	0,8	0,06	11,3	9,4	50,5	83,3
10	13,4	235,9	1,0	0,07	13,4	11,2	50,5	83,8
12	13,3	235,6	1,2	0,08	16,0	13,9	50,5	86,6
14	13,3	235,5	1,4	0,09	18,3	15,5	50,5	84,7
16	13,2	235,3	1,5	0,1	20,4	17,3	50,5	84,5
18	13,1	235,2	1,7	0,1	22,6	18,9	50,5	83,8
20	13,0	235,0	2,1	0,1	26,7	21,4	50,5	80
22	13,0	234,8	2,3	0,1	29,2	23,0	50,5	78,8
24	12,9	234,6	2,5	0,1	32,0	24,8	50,5	77,6
26	12,8	234,3	2,8	0,2	35,3	26,9	50,5	76,3
28	12,7	234,1	2,9	0,2	37,6	28,5	50,5	75,9
30	12,6	233,9	3,1	0,2	39,1	30,0	50,5	76,6
33	12,5	233,6	3,4	0,2	42,6	32,5	50,5	76,4
35	12,4	233,4	3,6	0,2	44,8	34,0	50,5	75,9
37	12,4	233,2	3,8	0,2	47,4	35,7	50,5	75,3

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

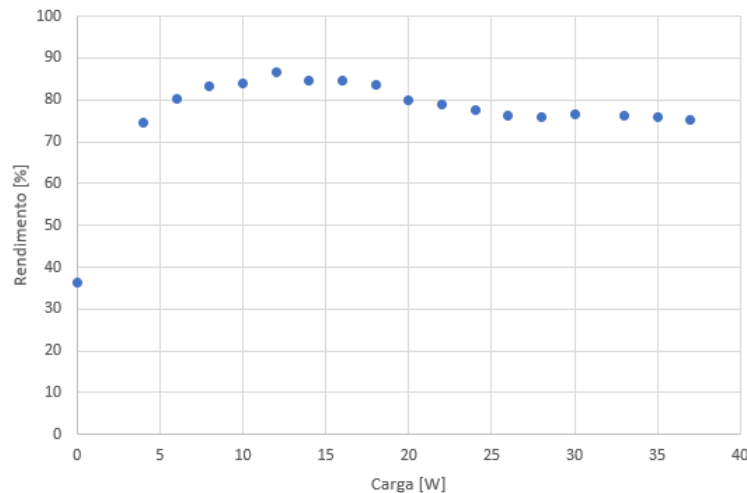


Figura 4.4: Curva da eficiência do inversor de carga

O ensaio realizado em vazio serve para comparar os valores obtidos com os valores disponibilizados pelo fornecedor do mesmo. Dito isto, verificou-se que a tensão de entrada registada de  $13,7\text{ V}$  encontra-se dentro da gama de tensões aceitáveis, entre  $10,5\text{ V}$  e  $15,5\text{ V}$ , a tensão de saída de  $236,8\text{ V}$ , encontra-se ligeiramente acima dos valores fornecidos, de  $230\text{ V}_{AC} \pm 3\%$ . Verificou-se também que o inversor, em vazio, consome  $2,7\text{ W}$ ,  $0,1\text{ W}$  acima dos  $2,6\text{ W}$  indicados pelo fornecedor.

Pelo gráfico da figura 4.4, pode-se observar que a eficiência do inversor de carga aumenta até à carga de  $12\text{ W}$ , onde registou-se uma eficiência máxima de aproximadamente  $86,6\%$ , aproximadamente  $1,4\%$  abaixo dos  $88,0\%$  registados pelo fornecedor. A partir dos  $12\text{ W}$ , já mencionados, verificou-se uma diminuição da eficiência do inversor, à medida que foi-se aumentando a carga, até aproximadamente  $76,3\%$ , correspondendo a uma carga de  $84\text{ W}$ , acabando depois por se estabilizar entre os  $75\%$  e  $76\%$ .

Optou-se por fazer os testes com cargas baixas, uma vez que o inversor entrava em modo de sobrecarga, ao ligarmos cargas superiores a  $80\text{ W}$ , cargas muito abaixo da potência nominal do inversor, de  $175\text{ W}$ .

### 4.2.4 Comportamento do módulo fotovoltaico sobre o efeito de sombras parciais

Como visto anteriormente, a corrente gerada por uma célula fotovoltaica é proporcional à quantidade de radiação recebida por ela. Se uma célula encontra-se em condição de sombreamento, recebendo menos radiação, a corrente que esta é capaz de gerar é menor se comparada com as outras células que compõem o módulo fotovoltaico. Foi visto também que os módulos fotovoltaicos são constituídos de células fotovoltaicas agrupadas em série para que se possa obter a tensão desejada do módulo. Logo, quando uma célula apresenta uma corrente menor, por estar sombreada, todas as células do módulo serão forçadas a conduzir a mesma corrente de saída.

Quanto menor a radiação solar incidente na célula, menor será a corrente de curto circuito. Se a corrente de saída do módulo é maior que a corrente de curto circuito da célula sombreada, este passa a operar na região de polarização inversa, para poder conduzir a mesma corrente

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

que as restantes células constituintes do módulo fotovoltaico.

A partir do momento que a célula entra em polarização inversa, esta passa a comportar-se como uma resistência, ou seja, para a consumir potência ao invés de gerar. Essa potência consumida é convertida em calor, fazendo aumentar a temperatura da célula podendo danificar o módulo. Para resolver esse problema os módulos fotovoltaicos são equipados com diodos de bypass para protegê-los da criação de pontos quentes.

O módulo fotovoltaico em estudo nesta dissertação, encontra-se equipado com um diodo bypass a cada 20 células, totalizando um total de 3 diodos. Quando o módulo funciona sem sombreamento das células o diodo opera como um circuito aberto. Se sombreada, a célula passa a consumir potência como se fosse uma carga, permitindo que o diodo entre num estado de polarização direta atuando como um curto circuito em paralelo com a célula sombreada, prevenindo o consumo de energia desta.

O principal objetivo deste ensaio passa por perceber o comportamento do módulo fotovoltaico sob efeito de sombras parciais. A primeira parte do ensaio consistiu-se em ligar o módulo fotovoltaico à resistência variável com uma carga de  $4 \Omega$ , carga ao qual foi registada a potência máxima no ensaio 4.2.2. De seguida, sombreou-se uma, duas, três e quatro células, como se pode observar na figura 4.5, registando os valores na tabela 4.4. A segunda parte do ensaio teve como objetivo a construção da curva característica do módulo fotovoltaico com quatro células sombreadas.



Figura 4.5: Módulo fotovoltaico com 4 células sombreadas

Tabela 4.4: Tabela de registo dos valores de tensão e corrente do módulo fotovoltaico ligado a uma carga de  $4 \Omega$

N° células sombreadas	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Temperatura [C]
0	27,1	6,7	180,8	39,3
1	18,8	4,6	87,3	41,2
2	18,8	4,6	86,8	42,3
3	9,5	2,3	22,0	43,5
4	9,5	2,3	21,9	44,2

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

Tabela 4.5: Tabela de registo dos valores da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico

Resistência [ $\Omega$ ]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Temperatura [C]	Radiação [ $W/m^2$ ]
0,2	0,2	8,6	2,1	41,2	1050
1,8	8,0	4,4	35,3	41,6	1100
3,8	9,3	2,1	19,0	42,1	1080
5,9	12,9	1,8	23,2	41,8	1098
8,2	16,8	1,8	30,1	41,9	1100
9,8	18,6	1,8	33,5	39,1	1108
12,2	20,4	1,5	30,5	39,9	1113
14,8	20,5	1,3	26,2	41,3	1119
17,3	20,6	1,1	22,6	42,7	1122
19,3	20,78	0,99	20,5722	41,8	1118
21,9	20,8	0,9	19,1	41,5	1126
24	21,0	0,8	17,6	40,9	1127
26,5	21,6	0,8	16,9	40,8	1136
28,8	22,3	0,7	16,3	40,9	1126
29,6	22,7	0,7	16,1	41,8	969

Como se pode ver pelo gráfico da figura 4.6, quando o módulo não se encontra sombreado conseguimos obter uma potência máxima de 180,8 W, ao sombrear uma ou duas célula a potência baixa drasticamente, atingindo aproximadamente 87 W. O mesmo acontece quando o módulo encontra-se com três ou quatro células sombreadas, a potência baixa drasticamente para 22 W aproximadamente. Nota-se que ao sombrear uma ou duas células o módulo apresenta o mesmo comportamento, ou seja, com uma ou duas células sombreadas a potência de saída do módulo é de aproximadamente 87 W. Isto porque, devido à instalação do diodo de bypass a cada 20 células, ao sombrear uma célula fotovoltaica o diodo entra em condução, isolando todas as 20 células pertencentes desse conjunto e, como se pode observar pela figura 4.5, as duas primeiras células sombreadas encontram-se no conjunto das primeiras 20 células protegidas por um dos 3 diodos de bypass do módulo fotovoltaico.

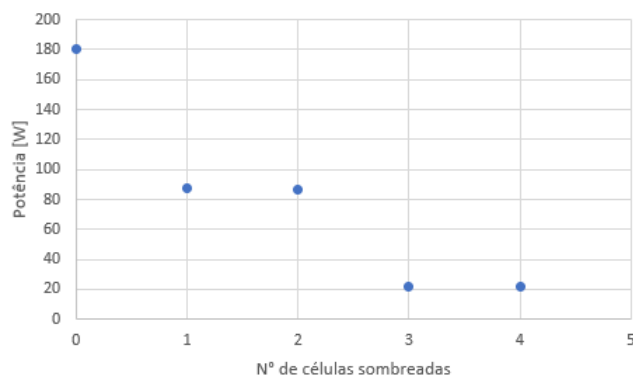


Figura 4.6: Efeito do sombreamento na eficiência do módulo fotovoltaico

Ao analisarmos o gráfico da figura 4.7, podemos observar que embora a corrente de curto circuito do módulo sombreado, de 8,6 A, seja superior à corrente de curto-circuito do módulo sem sombreamento, de 7,3 A, este apresenta um ponto de potência máxima muito inferior, de 35,3 W, se comparado com a curva característica do gráfico sem sombreamento onde a potência máxima atinge os 178,5 W. Podemos observar também que o ponto de potência máxima da curva com as 4 células sombreadas encontra-se na parte do gráfico onde os diodos bypass estão em condução. Os diodos bypass encontram-se em condução, ou seja, 40 células do módulo fotovoltaico não estão contribuindo para a energia produzida, até que se atinja uma corrente

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

mínima, aproximadamente 2 A, que permita que as células sombreadas entrem em condução em simultâneo com as células não sombreadas do módulo fotovoltaico.

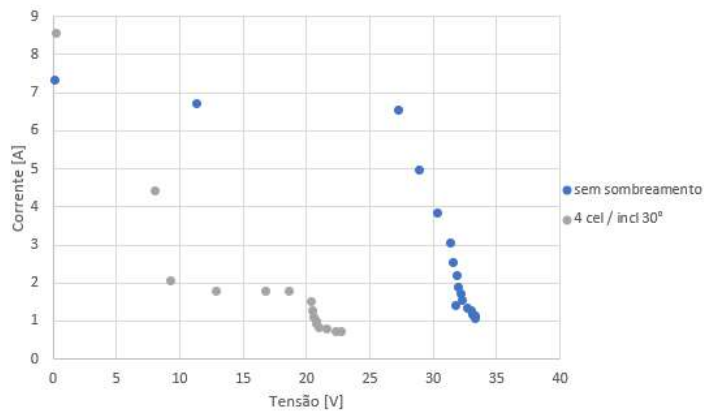


Figura 4.7: Comparação entre a curva característica do módulo fotovoltaico sem sombreamento e com 4 células sombreadas

Em relação ao gráfico da potência, figura 4.8, pode-se observar dois picos de potência, em relação ao módulo com células sombreadas. Estes dois picos podem ser nomeados de ponto de potência máxima local e ponto de potência máximo global, em que o máximo global se encontra na área do gráfico onde os díodos de bypass se encontram em condução. O primeiro pico representa a área do gráfico onde apenas as células não sombreadas contribuem para a geração de energia do módulo, enquanto que o segundo pico representa a área do gráfico onde as células sombreadas entram em condução em simultâneo com as células não sombreadas.

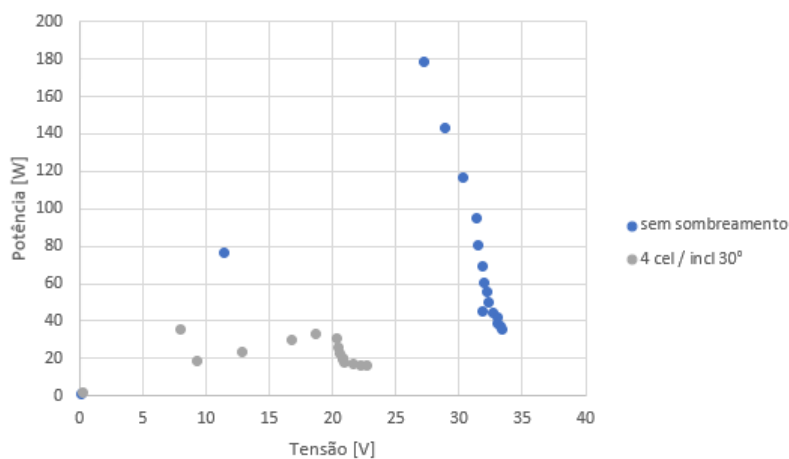


Figura 4.8: Comparação entre a curva da potência do módulo fotovoltaico sem sombreamento e com 4 células sombreadas

Em relação à temperatura, notou-se um pequeno aumento da temperatura das células à medida que se foi aumentando o número de células sombreadas, mas infelizmente não se podem tirar conclusões mais profundas, uma vez que as experiências foram feitas em ambiente exterior, acabando por sofrer forte influência do vento.

### 4.3 Nota conclusiva

No decorrer deste capítulo foi feita uma análise e discussão dos resultados obtidos com a resolução do guião laboratorial. De forma geral, os resultados obtidos foram muito satisfatórios, ficando muito próximos dos dados fornecidos pelos fornecedores. Os gráficos obtidos após o preenchimento das tabelas assemelham-se aos gráficos encontrados na literatura que foi utilizada como apoio nesta dissertação. Em suma, a bancada fotovoltaica e a resolução do respetivo guião laboratorial constituirá de uma ferramenta importante para uma melhor perceção dos conceitos relacionados com a energia solar fotovoltaica.



# Capítulo 5

## Conclusões gerais

Como referido diversas vezes ao longo da redação desta dissertação, o nosso principal objetivo passou-se pelo projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática e respetivo guião laboratorial, para suprir a lacuna experimental na unidade curricular de Energias Renováveis, na Universidade da Beira Interior.

O trabalho realizado foi composto por diversas fases, onde inicialmente fez-se um estudo detalhado das bancadas fotovoltaicas didáticas já existentes no mercado. Posteriormente, passou-se para a fase de projeto, onde utilizou-se o software Solidworks para a execução do desenho 3D da bancada. Para finalizar, passou-se à fase da construção, instalação dos equipamentos e respetivos testes.

Concluindo a escrita da presente dissertação e após avaliar todos os resultados obtidos, não é ousado afirmar que todas as expectativas e objetivos definidos no início do projeto foram superados, onde todo o processo permitiu a aquisição de conhecimentos em diversas áreas, enfatizando o conhecimento adquirido em vários aspetos de eletrónica e projeto. Do ponto de vista técnico e científico, foram utilizadas tecnologias e materiais modernos, tendo como resultado a construção de uma bancada fotovoltaica didática que permitirá aos alunos da unidade curricular de Energias Renováveis, na Universidade da Beira Interior, assimilar conhecimentos práticos sobre os sistemas fotovoltaicos autónomos e os seus componentes, assim como, conhecimentos na área de eletrónica.

A realização do guião laboratorial permitiu-nos familiarizar com os diversos equipamentos constituintes do sistema, ficando, assim, a conhecer melhor cada um dos equipamentos. Os resultados obtidos com a realização do guião corresponderam às expectativas geradas inicialmente e permitiu-nos aferir que é possível alcançar bons resultados práticos através da bancada fotovoltaica didática construída, indo de acordo com os resultados encontrados na literatura utilizada nesta dissertação. É importante referir que no ensaio 4.2.2 poderiam ser feitas mais medições para cargas inferiores a  $4 \Omega$ , que nos permitiriam analisar melhor a performance do módulo fotovoltaico para as cargas nesse intervalo.

### 5.1 Perspetivas futuras

O presente conceito da bancada fotovoltaica didática encontra-se concluído. Porém, existem sempre aspetos que podem ser melhorados ou implementados. São então apresentadas algumas melhorias que podem vir a ser implementadas no futuro e instigar a continuidade do projeto.

Uma das principais melhorias a ser implementada, passaria pela instalação de placas de aquisição de dados capazes de fazer a leitura das tensões, correntes e temperaturas, que com o

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

auxílio de um programa devidamente projetado seria capaz de apresentar os dados sob a forma de gráficos.

Outra das melhorias passaria pelo mecanismo de inclinação, que demonstrou ser complexo para ser manuseado por apenas uma pessoa.

Para suprir a escassez de luz solar em algumas épocas do ano, seria interessante construir um conjunto de luzes artificiais como forma de simular a radiação, podendo, assim, fazer as experiências dentro do laboratório.

O guião laboratorial, elemento fulcral para o bom aproveitamento da bancada fotovoltaica didática, poderá ser melhorado através da implementação de outros ensaios experimentais.

Para concluir, seria interessante a implementação de uma vertente eólica, ficando com a possibilidade de simular um módulo híbrido ao conjugar a energia solar fotovoltaica com a energia eólica.

## Bibliografia

- [1] E. R. d. Sousa Neto, “Fluxos de óxido nitroso (n<sub>2</sub>o), metano (ch<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (co<sub>2</sub>) a partir de um solo cultivado com cana-de-açúcar sob diversos tratos culturais,” Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2012. 1
- [2] J. L. Morais, *Sistemas fotovoltaicos, da teoria a prática*. Publindustria, 2009. 1, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 20, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40
- [3] I. Pvpvs, “2018 snapshot of global photovoltaic markets,” *2018 SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS*, 2018. 1
- [4] Y. Vagapov, A. Anuchin, and M. Pushchin, “Modelling of a photovoltaic array using analog system lab kit pro board,” in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2018, pp. 1791-1794. 1
- [5] W. Shyr, “A photovoltaic systems laboratory activity plan for taiwanese senior high schools,” *World Transactions on Engineering and Technology Education*, vol. 6, no. 1, p. 185, 2007. 1
- [6] Localização geográfica de portugal. [Online]. Available: <https://www.ue.missaoportugal.mne.pt/pt/portugal/sobre-portugal/dados-gerais> 2
- [7] (2012) O potencial fotovoltaico em portugal. [Online]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_pdfs/PVGIS\\_EU\\_2012\\_solar\\_A1.pdf](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/PVGIS_EU_2012_solar_A1.pdf) 2
- [8] D. G. de Energia e Geologia. 2, 3
- [9] M. n. S. d. O. Filipe Alexandre de Sousa Pereira, *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica*. Publindustria. 5, 6, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 71
- [10] M. E.Mackay, *Solar Energy, An Introduction*, 1st ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2015. 5
- [11] “Newton’s theory of Light.” [Online]. Available: <http://www.thestargarden.co.uk/Newtons-theory-of-light.html> 5
- [12] “Properties of Light | PVEducation.” [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/properties-of-light> 5, 6
- [13] M. E. R. C. Stuart R.Wenham, Martin A.Green, *Applied Photovoltaics*, 2nd ed. London, UK: Earthscan, 2007. 6, 7, 8, 9, 14, 15, 17, 31, 32, 40, 41
- [14] “Planck’s Quantum Theory | Introduction to Chemistry.” [Online]. Available: <https://>

//courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/plancks-quantum-theory/ 6

- [15] Planck, "Distribution of energy in the normal spectrum," *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, vol. 2, 1900. 6
- [16] "Einstein on the Photoelectric Effect - David Cassidy." [Online]. Available: <https://history.aip.org/history/exhibits/einstein/essay-photoelectric.htm> 6
- [17] Einstein, "Generation and transformation of light," *Annalen der Physik*, vol. 17, 1905. 6
- [18] *Solar Energy: An Introduction*. Oxford University Press, 2015. 7
- [19] "Blackbody Radiation - Neutrium." [Online]. Available: <https://neutrium.net/heat{ }transfer/blackbody/> 7
- [20] *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. 11, 12
- [21] A. M. Vallêra and M. C. Brito, "Meio século de história fotovoltaica," *Gazeta de Física*, vol. 1, no. 2, 2006. 14
- [22] "Band Gap | PVEducation." [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/band-gap> 14
- [23] I. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, "Photovoltaics report," •. 17
- [24] I. Markit, "Predictions for the pv industry in 2019," •. 17
- [25] C. C. R. Pinto, "Estudo de um processo de formação de fitas de silício por cvd para aplicações fotovoltaicas," Ph.D. dissertation, Universidade de Lisboa, 2008. 18, 19
- [26] (2013) Solar photovoltaic cell basics. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/solar-photovoltaic-cell-basics> 18
- [27] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, and F. Ferrazza, "19.8% efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 14, pp. 1991-1993, 1998. 19
- [28] L. M. N. Pereira, "Produção e caracterização de silício policristalino e sua aplicação a tfts," Ph.D. dissertation, Universidade Nova de Lisboa, 2008. 19
- [29] O. Schultz, S. Glunz, and G. Willeke, "Accelerated publication: Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 12, no. 7, pp. 553-558, 2004. 20
- [30] "Célula solar de película fina | Célula fotovoltaica." [Online]. Available: <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/celula-solar-de-pelicula-fina> 20

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

- [31] *Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. 21, 22
- [32] D. Staebler and C. Wronski, "Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous si," *Applied physics letters*, vol. 31, no. 4, pp. 292-294, 1977. 21
- [33] "Best Thin Film Solar Panels - Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS? - Energy Informative." [Online]. Available: <https://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs/> 21
- [34] A. Lambertz, F. Finger, R. E. Schropp, U. Rau, and V. Smirnov, "Preparation and measurement of highly efficient a-si: H single junction solar cells and the advantages of  $\mu\text{c-siox}$ : H n-layers," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 8, pp. 939-948, 2015. 21
- [35] "Cadmium Telluride | Department of Energy." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride> 21, 22
- [36] M. Gloeckler, I. Sankin, and Z. Zhao, "Cdte solar cells at the threshold to 20% efficiency," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1389-1393, 2013. 22
- [37] "Copper Indium Gallium Diselenide | Department of Energy." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/copper-indium-gallium-diselenide> 22
- [38] R. d. M. C. Lima, R. A. d. Medeiro, M. G. Fonseca, N. G. Dhere, O. Shinde, E. Schneller, W. A. Pinheiro, C. L. Ferreira, and L. R. Cruz, "Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 22, 2017. [Online]. Available: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762017000500419&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000500419&nrm=iso) 22
- [39] "Copper Indium Gallium Diselenide | Department of Energy." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/copper-indium-gallium-diselenide> 23
- [40] R. Kamada, T. Yagioka, S. Adachi, A. Handa, K. F. Tai, T. Kato, and H. Sugimoto, "New world record Cu(In, Ga)(Se, S)<sub>2</sub>thin film solar cell efficiency beyond 22%," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, June 2016, pp. 1287-1291. 23
- [41] S. Battersby, "News feature: The solar cell of the future," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 1, pp. 7-10, 2019. [Online]. Available: <https://www.pnas.org/content/116/1/7> 23
- [42] "Perovskite Solar | Perovskite-Info." [Online]. Available: <https://www.perovskite-info.com/perovskite-solar> 23
- [43] "Novas células solares de perovskita, mineral considerado o futuro da tecnologia fotovoltaicaNOCTULA - Consultores em Ambiente | Serviços de consultoria ambiental." [Online]. Available: <https://noctula.pt/novas-celulas-solares-de-perovskita-mineral-considerado-o-futuro-da-tecnologia-fotovoltaica/> 24

- [44] “Perovskite Solar Cells | Department of Energy.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells> 24
- [45] E. Raphael, M. N. Silva, R. Szostak, M. A. Schiavon, and A. F. Nogueira, “CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE,” *Química Nova*, vol. 41, pp. 61 - 74, 01 2018. [Online]. Available: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422018000100061&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422018000100061&nrm=iso) 24
- [46] “Perovskite Solar Cells | Department of Energy.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells> 24
- [47] W. S. Yang, J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo, and S. I. Seok, “High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange,” *Science*, vol. 348, no. 6240, pp. 1234-1237, 2015. 24
- [48] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells,” *Journal of applied physics*, vol. 32, no. 3, pp. 510-519, 1961. 24
- [49] A. Kolodziej, “Staebler-wronski effect in amorphous silicon and its alloys,” *Opto-electronics Review*, vol. 12, pp. 21-32, 03 2004. 24
- [50] F. Bensebaa, “Chapter 5 - clean energy,” in *Nanoparticle Technologies*, ser. Interface Science and Technology, F. Bensebaa, Ed. Elsevier, 2013, vol. 19, pp. 279 - 383. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123695505000057> 24
- [51] S. P. Philipps, F. Dimroth, and A. W. Bett, “High-efficiency iii-v multijunction solar cells,” in *McEvoy’s Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2018, pp. 439-472. 25
- [52] “Painéis Fotovoltaicos.” [Online]. Available: [https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro\\_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html](https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html) 25
- [53] J. Carneiro, “Módulos fotovoltaicos características e associações,” eLECTROMAGNETISMO B 2º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil 1º Semestre (2010). 29
- [54] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Energy storage systems—characteristics and comparisons,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1221-1250, 2008. 32
- [55] T. B. R. David Linden, *Handbook of batteries*, 3rd ed., 1995. 33, 34, 35, 36
- [56] D. Spiers, “Batteries in pv systems,” in *Practical Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2012, pp. 721-776. 37, 38
- [57] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, “Energy storage systems for advanced power applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744-1756, 2001. 37

## Projeto e construção de uma bancada fotovoltaica didática

- [58] S. Hua, Q. Zhou, D. Kong, and J. Ma, “Application of valve-regulated lead-acid batteries for storage of solar electricity in stand-alone photovoltaic systems in the northwest areas of china,” *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 1178-1185, 2006. 38
- [59] C. Zhang, Y.-L. Wei, P.-F. Cao, and M.-C. Lin, “Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3091-3106, 2018. 39
- [60] A. Assunção, P. S. Moura, and A. T. de Almeida, “Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy,” *Applied energy*, vol. 181, pp. 120-131, 2016. 39
- [61] B. Diouf and R. Pode, “Potential of lithium-ion batteries in renewable energy,” *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 375-380, 2015. 39
- [62] N.-K. C. Nair and N. Garimella, “Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 11, pp. 2124-2130, 2010. 40
- [63] R. C. Ambrosio and E. A. Ticianelli, “Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio,” *Quim. Nova*, vol. 24, no. 2, pp. 243-246, 2001. 40
- [64] “Secondary (Rechargeable) Batteries - Battery University.” [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries) 40
- [65] *H-PVIT-1, Photovoltaic installers Trainer*. 42
- [66] *Bancada didática para ensino e treinamento de sistemas fotovoltaicos*. 43
- [67] *Advanced Photovoltaic Training System*. 43, 44
- [68] *Stand-Alone Photovoltaic Application, with SCADA*. 44
- [69] “Catálogo baixa tensão.” 57