Sistemas Fotovoltaicos

Fundamentos sobre Dimensionamento

JOAQUIM CARNEIRO · MÁRIO PASSOS

engebook

AUTORES
Joaquim Carneiro · Mário Passos

TÍTULO
Sistemas Fotovoltaicos – Fundamentos sobre Dimensionamento

EDIÇÃO
Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO
Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt

CHANCELA
Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO
Booki – Conteúdos Especializados
Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

PARCEIRO DE COMUNICAÇÃO
Renováveis Magazine – Revista Técnica

REVISÃO
Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN
Luciano Carvalho
Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

IMPRESSÃO
Outubro, 2020

DEPÓSITO LEGAL
470137/20

A cópia ilegal viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2020 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, e ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Por opção dos autores, este livro não segue o novo Acordo Ortográfico de 1990.

CDU
621.383.51 Elementos Fotovoltaicos, Células Solares e Séries de Células Solares (Baterias/Painéis)

ISBN
Papel: 9789899017207
E-book: 9789899017214

Catalogação da publicação
Família: Energias
Subfamília: Solar

ÍNDICE

PREÂMBULO IX

CAPÍTULO 1
ENQUADRAMENTO 13

1.1. Breves conceitos sobre células fotovoltaicas 16
1.2. Posição da fileira da energia fotovoltaica no Mundo e em Portugal 17

CAPÍTULO 2
CONCEITOS GERAIS DE HELIOTECNIA 21

2.1. Radiação Solar 23
2.1.1. Definições e termos correntes 25
2.1.2. Radiação directa e difusa 27
2.1.3. Massa de Ar 29
2.1.4. Equipamentos de medição da radiação solar 30
2.1.5. Aproveitamento da energia solar 32
2.2. Movimento Terra – Sol 33
2.2.1. Declinação Solar: equinócios e solstícios 34
2.2.2. Posição solar a qualquer hora do dia 37
2.3. Estimativa da radiação solar incidente sobre um plano inclinado 44
2.3.1. Superfícies orientadas 48
2.3.2. Distância entre fileiras de módulos fotovoltaicos 49

CAPÍTULO 3

TECNOLOGIA DE MATERIAIS: TIPOS DE CÉLULAS 53

3.1. Introdução 55
3.2. Tipos de células fotovoltaicas 57
3.2.1. Células de silício monocristalino 57
3.2.2. Células de silício policristalino 59
3.2.3. Células de Silício Amorfo 61
3.2.4. Células de disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) 61
3.2.5. Células de dióxido de titânio sensibilizadas por corante 66
3.2.5.1. Princípio geral do funcionamento das CSSC 68
3.2.5.2. Preparação de uma suspensão com nanopartículas de TiO_2 70
3.2.5.3. Deposição da camada de nanopartículas de TiO_2 sobre o substrato de vidro condutor 70
3.2.5.4. Sinterização da camada constituída por nanopartículas de TiO_2 72
3.2.5.5. Preparação do corante (agente sensibilizador) 72
3.2.5.6. Preparação do contra-eléctrodo 73
3.2.5.7. Montagem da célula 74
3.2.5.8. Adição do electrólito 75

CAPÍTULO 4

SEMICONDUTORES E MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA 77

4.1. Semicondutores e efeito fotovoltaico 79
4.2. Teoria de bandas de energia 80
4.2.1. Materiais condutores 80
4.2.2. Materiais isolantes 82
4.2.3. Materiais semicondutores 82
4.2.3.1. Semicondutores intrínsecos 83
4.2.3.2. Semicondutores extrínsecos 86
4.3. Modelo matemático da célula fotovoltaica 90
4.3.1. Díodo de Junção p-n no escuro 90
4.3.1.1. Função trabalho, potencial de contacto e electro-afinidade 91
4.3.1.2. Junção p-n em equilíbrio termodinâmico 94
4.3.1.3. Junção p-n com polarização constante: característica I – V da junção p-n 107
4.3.2. Díodo de Junção p – n sob iluminação 115
4.3.2.1. Célula fotovoltaica: característica I-V 118
4.3.2.2. Principais parâmetros de desempenho de uma célula fotovoltaica 120

CAPÍTULO 5
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 133

5.1. Características e associações 135
5.1.1. Características dos módulos fotovoltaicos 138
5.1.2. Associações de módulos fotovoltaicos: ligação série, paralelo e mista 141
5.1.3. Díodos de desvio e díodos de fileira 145
5.1.4. Efeitos de sombreamento nos módulos FV 146
5.1.5. Efeitos da deposição de neve nos módulos Fotovoltaicos 148

CAPÍTULO 6
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS LIGADOS À REDE E AUTÓNOMOS 151

6.1. Equipamentos eléctricos/principais componentes 153
6.1.1. Regulador MPP e conversor DC/DC 154
6.1.2. Inversores DC/AC 155
6.1.3. Dimensionamento de sistemas FV ligados à rede 157
6.1.3.1. Selecção do módulo fotovoltaico 157
6.1.3.2. Concepção do sistema fotovoltaico 157
6.1.3.3. Dimensionamento do sistema fotovoltaico 159
6.1.3.4. Dimensionamento das cablagens 162
6.1.4. Estimativa da produção de energia 164
6.2. Sistemas autónomos 168
6.2.1. Regulador de carga 170
6.2.2. Baterias de acumuladores 170
6.2.2.1. Constituição e princípio de funcionamento 171
6.2.2.2. Tipos de baterias de acumuladores 173
6.2.2.3. Características das baterias de acumuladores 174
6.2.2.4. Associação de baterias de acumuladores 177
6.2.3. Dimensionamento de sistemas FV autónomos 178
6.2.4. Dimensionamento de sistemas FV autónomos para bombagem de água 183
6.2.4.1. Avaliação da quantidade de água consumida diariamente 183
6.2.4.2. Cálculo da altura manométrica 184
6.2.4.3. Avaliação do recurso solar disponível na região 187
6.2.4.4. Selecção da bomba: potência da bomba 189
6.2.4.5. Selecção do sistema fotovoltaico: potência do gerador FV 192
6.2.4.6. Tipologia do sistema FV 193

CAPÍTULO 7

ESTUDO DE CASOS 195

7.1. Estudo de caso: sistema ligado à rede 197
7.1.2. Determinação do número de módulos por fileira 199
7.1.3. Determinação do número de fileiras em paralelo 199
7.1.4. Potência do sistema fotovoltaico 200
7.2. Estudo de caso: sistema FV autónomo 203
7.2.1. Instalação doméstica 203
7.2.1.1. Avaliação das necessidades de consumo 205
7.2.1.2. Avaliação da irradiação solar incidente 206
7.2.1.3. Determinação da potência do gerador FV 209
7.2.1.4. Dimensionamento da bateria de acumuladores 211
7.2.1.5. Selecção do regulador de carga 212
7.2.1.6. Dimensionamento das cablagens 213
7.2.1.7. Avaliação da energia produzida pelo sistema fotovoltaico 213
7.3. Estudo de caso – bombagem de água 215
7.3.1. Avaliação do valor médio do "número de horas de sol", H_S 216
7.3.2. Determinação do valor da altura manométrica, H_M 217
7.3.3. Determinação da potência da bomba (ou potência motriz) 217
7.3.4. Determinação da potência do gerador fotovoltaico, P_{FV} 217
7.3.5. Determinação da tipologia do sistema FV 217
7.3.6. Estimativa da energia produzida pelo gerador FV, considerando o efeito da temperatura e da irradiação incidente 219
7.3.6.1. Avaliação da radiação solar incidente 220
7.3.6.2. Determinação do volume de água bombeado 221

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CCXXV

ÍNDICE DE FIGURAS CCXXXIII

ÍNDICE DE TABELAS CCXLV

NOTAS BIOGRÁFICAS CCXLIX

CAPÍTULO 1

ENQUADRAMENTO

Portugal tem assistido a um considerável desenvolvimento ao longo dos últimos anos, resultado do trabalho conjunto dos muitos e diversos actores sociais ao serviço das empresas e dos cidadãos. Neste contexto, foram desenvolvidos esforços significativos com o intuito de preparar o país para um crescimento sustentado a fim de propiciar a todos os cidadãos uma melhoria da sua qualidade de vida. Se é verdade que nas últimas décadas, o modelo de desenvolvimento nacional traduziu-se maioritariamente na infra-estruturação do território, também não é menos verdade que o actual e futuro modelo de desenvolvimento deverá traduzir-se na criação de um conjunto de factores de diferenciação em relação aos restantes países visando a atracção do denominado bom investimento para Portugal.

Actualmente, Portugal detém um conjunto de ferramentas de qualidade que lhe permite aspirar a um lugar de liderança nas diversas plataformas de competitividade Europeia. Com efeito, ao nível dos equipamentos e serviços sociais, foram registados inúmeros avanços no que concerne ao número e qualidade das infra-estruturas viárias, no saneamento básico, na habitação, nos equipamentos médicos, desportivos e culturais que, no seu todo, fornecem condições de habitabilidade muito atractivas a todos aqueles que se queiram fixar em Portugal. No que tange aos factores de diferenciação, o país detém actualmente diversas universidades e centros de investigação de excelência, ordens profissionais, associações empresariais e comerciais que devidamente articuladas, podem captar recursos humanos altamente qualificados, indústrias de base tecnológica e serviços inovadores que no seu conjunto contribuem para a fixação de valor e conhecimento no território nacional.

O fomento do desenvolvimento sustentável é um dos eixos estratégicos da actual política energética portuguesa. A sua consecução passa pela adopção e implementação de diversas medidas como por exemplo, a definição e identificação de acções concretas que contribuam para a real implementação do acordo de Paris sobre alterações climáticas, a plena integração no comércio europeu de emissões e a forte promoção da eficiência energé-

da UE no que concerne ao clima e à energia. A proposta prevê uma redução de 40% das emissões de gases com efeito de estufa em relação aos níveis de 1990, um objetivo vinculativo para toda a UE de forma a que em 2030, 27% do consumo total de energia seja satisfeito a partir de fontes renováveis (pelo menos 20% até 2020).

A necessidade de satisfazer o continuo crescimento da procura de energia no futuro próximo, especialmente no domínio da electricidade, em confronto com a necessária redução das emissões de gases com efeito de estufa, impõe um investimento significativo na exploração das fontes endógenas renováveis. De entre as diversas fontes disponíveis são especialmente promissoras as que se enunciam em seguida:

- Eólica;
- Solar;
- Hidroeléctrica (mini – hídricas);
- Ondas;
- Biomassa.

Relativamente ao subsector da fileira adstrita à energia solar fotovoltaica, constata-se que a nível mundial este segmento apresenta uma significativa taxa de crescimento, conforme pode ser observado através da Figura 1.1 e Figura 1.2.

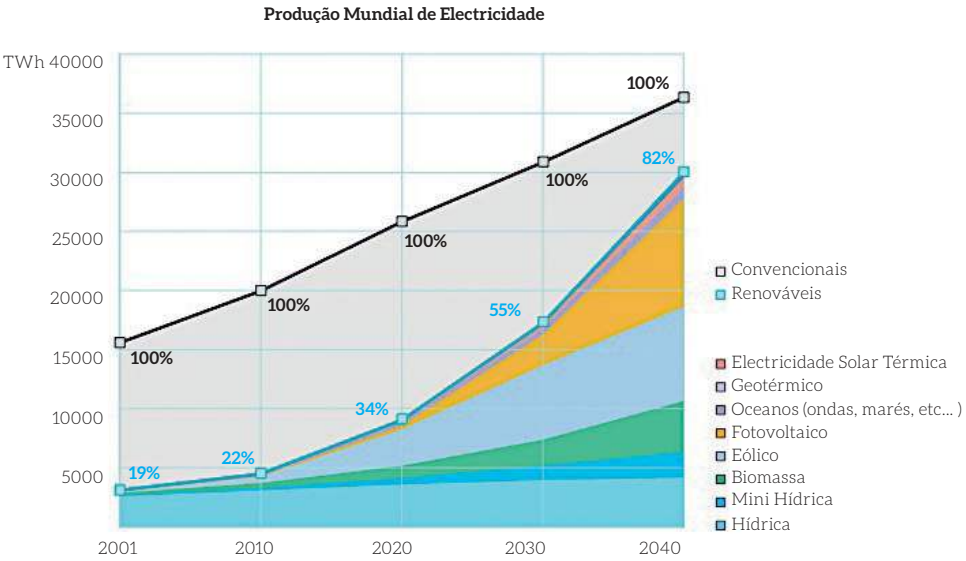

Figura 1.1. Cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040. Notar a previsão da explosão da energia solar fotovoltaica a partir de 2020, tornando-se uma das maiores fileiras, como a hídrica, a eólica e a biomassa. (*Fonte*: European Renewable Energy Council, EREC-2005; http://erec-renewables.org/publications/scenario_2040.htm).

Analisando a Figura 1.3, é possível descernir uma tendência crescente atinjindo em 2017 um significativo valor percentual de aproximadamente 30%.

Relativamente à fileira adstrita à energia solar fotovoltaica, as últimas estatísticas nacionais conhecidas indicam que a potência total instalada até ao ano de 2018 foi de aproximadamente 572 MW antevendo-se que triplique para perto de 1600 MW até 2021, o que corresponde à implementação de cerca de 31 novas centrais solares fotovoltaicas, de acordo com informação proferida pelo então Secretário de Estado da Energia – Economia do XXI Governo da República Portuguesa. Por outro lado, é sabido que o governo Português tem em carteira um vasto conjunto de projectos relacionados com a fileira solar fotovoltaica que poderão vir a ser implementados em 2024/2025. Contudo, estes projectos aportam investimentos que dependem da aprovação do novo plano de investimentos da REN no âmbito da 70.ª consulta pública da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) que prevê um valor entre 50 a 70 milhões de euros somente para a extensão da rede. A Figura 1.4 mostra as zonas geográficas onde se antevê a instalação de novas centrais fotovoltaicas em território continental português.

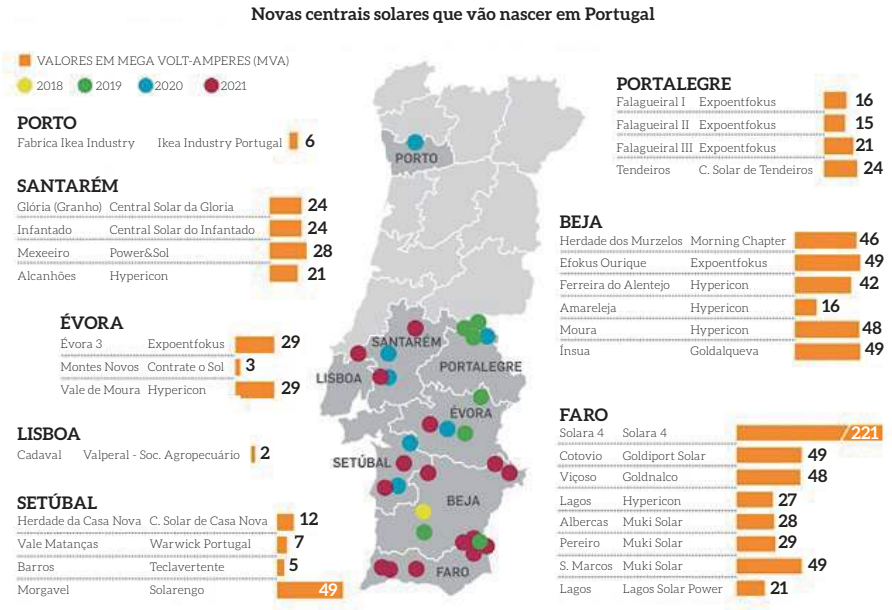

Figura 1.4. Regiões do território continental onde está previsto a instalação de novas centrais solares fotovoltaicas até ao ano de 2021. (*Fonte*: Dinheiro Vivo; https://www.dinheirovivo.pt/carreiras/renovaveis-corrida-ao-sol-portugues-ja-vale-800-milhoes-de-euros/. Acedido em 14 de Maio de 2019.)

No entanto, para que seja exequível instalar este conjunto alargado de novas centrais fotovoltaicas, é não somente necessário garantir as correspondentes ligações à rede, mas também assegurar a sua capacidade para integrar a dimensão desta fileira, conduzindo assim a acrescidos e muito mais avultados investimentos.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS GERAIS DE HELIOTECNIA

2.1. Radiação Solar

O Sol é a estrela do sistema solar que representa a fonte de energia responsável pela origem da vida e outras formas de energia na Terra. Desde há milhões de anos que o Sol irradia para o espaço luz e calor que são gerados através de reacções nucleares de fusão que ocorrem no seu interior. O Sol é uma estrela de tamanho médio com um diâmetro equatorial de $1{,}39 \times 10^9$ m.

A Figura 2.1 mostra a imagem do Sol fotografado pelo satélite *Solar & Heliospheric Observatory* (SOHO).

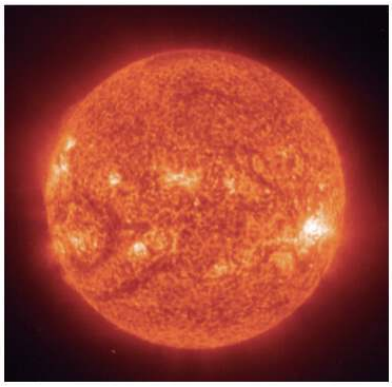

Figura 2.1. Fotografia do Sol obtida pelo satélite Solar & Heliospheric Observatory da Agência espacial Americana (*Fonte*: NASA, 11 de Outubro de 2003).

2.1.3. Massa de Ar

A massa de ar da atmosfera da Terra influencia marcadamente a radiação solar que atinge a sua superfície. Por exemplo, perante um ângulo de incidência solar baixo, o percurso dos raios solares através da atmosfera é mais longo, conduzindo assim a uma menor irradiância solar que decorre de uma maior absorção e difusão da radiação solar. A massa de ar (AM) corresponde a um múltiplo do percurso efectuado pela radiação solar na atmosfera até atingir a superfície de um dado local na Terra e num determinado momento do ano.

O valor da massa de ar em função da posição do Sol, é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} = \left(\frac{d}{z}\right) \tag{2.1}$$

onde θ é o denominado ângulo zenital (ângulo formado entre o feixe de radiação e a vertical do local), z representa o comprimento do trajecto da luz através da atmosfera, medido segundo a direção da vertical do lugar e d corresponde ao comprimento do trajeto da luz através da atmosfera, medido na direção θ. A Figura 2.7 esquematiza a variação da massa de ar (AM) de um feixe de radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre, para diferentes posições angulares, θ do Sol.

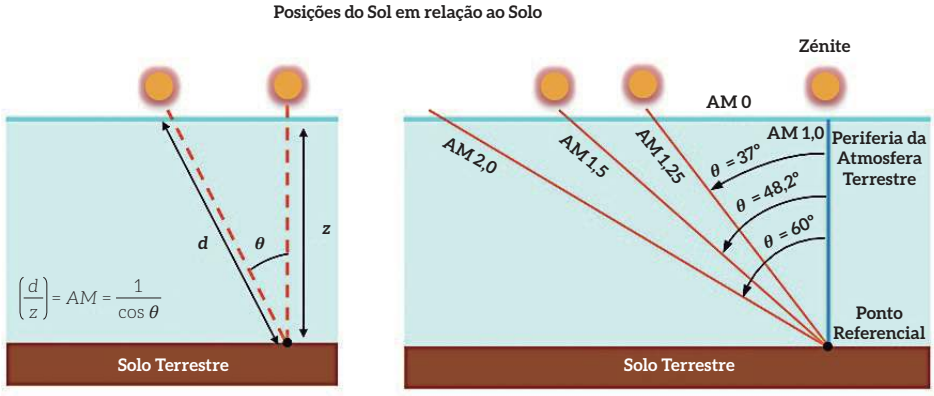

Figura 2.7. Representação esquemática da variação da massa de ar (AM) de um feixe de radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre.

A equação (2.1) dita que o valor da massa de ar é AM = 1 (ou AM1) quando $\theta = 0°$. Esta condição, ocorre no equador ao meio dia no início da Primavera ou do Outono (incidência perpendicular dos raios solares). Por outro lado, quando os raios solares não incidem perpendicularmente sobre a superfície terrestre, a luz atravessa uma espessura maior de ar (trajecto mais longo), perdendo por isso energia.

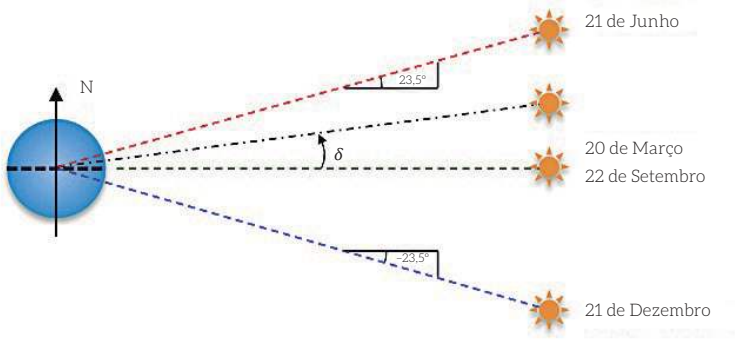

Figura 2.12. Representação esquemática da declinação solar.

Devido ao movimento da Terra em torno do Sol, o ângulo de declinação, δ varia continuamente ao longo do ano. O ângulo de declinação pode ser calculado pela expressão,

$$\sin \delta = \sin (23{,}5°) \times \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right] \tag{2.2}$$

onde d representa o dia juliano (por exemplo, $d = 1$ corresponde ao primeiro dia de Janeiro).

A posição da Terra relativamente ao Sol tem quatro posições características: *dois equinócios* e *dois solstícios*. Qualquer um deles representa a passagem para uma nova estação do ano, conforme esquematicamente representado na Figura 2.13.

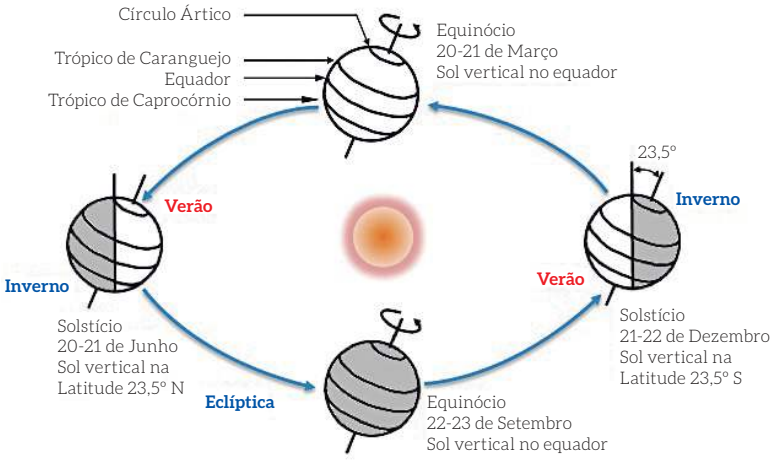

Figura 2.13. Movimento da Terra em torno do Sol e as suas quatro posições características: equinócios e solstícios nos hemisférios Norte e Sul.

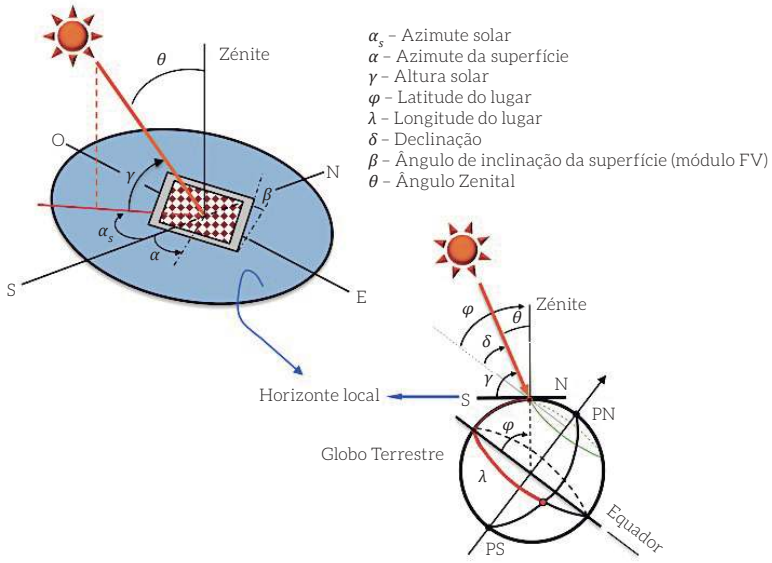

Figura 2.16. Ângulos característicos que intervêm directamente no cálculo da radiação solar.

O significado dos ângulos representados na Figura 2.16 é enunciado em seguida:

- φ – ***Latitude***, posição angular norte ou sul em relação ao equador; norte positivo: -90° ≤ φ ≤ 90°.
- δ – ***Declinação***, posição angular do Sol ao meio-dia solar (quando o Sol está sobre o meridiano local) em relação ao plano do equador; norte positivo: -23,45° ≤ δ ≤ 23,45°.
- β – ***Inclinação***, ângulo formado entre o plano de uma determinada superfície e o plano horizontal: -180° ≤ β ≤ 180°.
- α – ***Ângulo azimutal da superfície***, corresponde ao afastamento angular, em relação ao meridiano local, da projecção da normal à superfície no plano horizontal.
- γ – ***Ângulo de elevação solar*** (ou altura do sol), é ângulo formado entre o plano horizontal e a direcção dos raios solares.
- θ – ***Ângulo zenital***, é o ângulo de incidência da radiação directa sobre a superfície horizontal. Corresponde ao complemento do ângulo de elevação solar.
- α_s – ***Azimute solar***, é o ângulo entre a projecção da radiação directa sobre o plano horizontal e a linha que indica a direcção Sul. Deslocamentos angulares a Leste da direcção Sul são negativos, e a Oeste são positivos.

Ângulo Horário

A hora solar representa uma variável importante no cálculo da radiação solar na medida em que retrata o tempo especificado em todas as relações que envolvem a posição do Sol num determinado momento. O ângulo horário, *HR* converte a hora solar, *HS* no número de graus em que o Sol se movimenta aparentemente através do céu.

sítios da internet específicos. Neste contexto, é particularmente recomendável a visita e utilização do sítio da NASA com o endereço (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/).

Estimativa da irradiação solar incidente para uma superfície com inclinação qualquer

Devido à exposição ao meio ambiente, a superfície frontal dos módulos FV podem, ao longo do tempo, acumular alguma sujidade (poeiras, compostos orgânicos acumulados, entre outros). Neste sentido, a acção da sujidade assim com o tipo de acabamento da superfície (ex. vidro) dos módulos, representam factores que influenciam negativamente a capacidade do gerador FV em absorver a luz solar. A irradiação solar que incide sobre uma superfície com inclinação qualquer, $I(\beta,\alpha)$ é calculada através da expressão,

$$I(\beta,\alpha) = I(\beta_{opt}) \times [g_1 (\beta - \beta_{opt})^2 + g_2 (\beta - \beta_{opt}) + g_3] \quad (2.11)$$

em que $g_i = g_{i1} |\alpha|^2 + g_{i2} |\alpha| + g_{i3}$; $i = 1,2,3$; e α representa o **azimute** (ângulo de desvio em relação à direcção Sul) da superfície receptora e β a sua inclinação relativamente à direcção horizontal, conforme esquematizado na Figura 2.24.

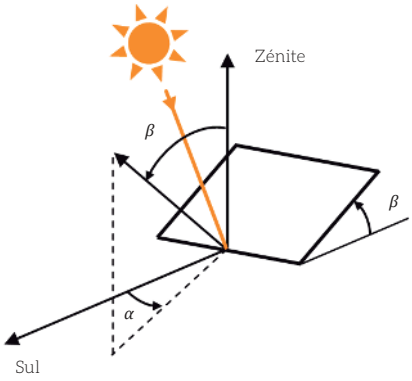

Figura 2.24. Parâmetros angulares referentes à orientação de um módulo fotovoltaico.

A tabela 2.3 apresenta os valores dos coeficientes g_i referentes a superfícies com um grau médio de sujidade que se caracterizam por uma perda de transparência óptica em cerca de 3%.

Tabela 2.3. Coeficientes para o cálculo da irradiação solar incidente sobre uma superfície qualquer.

COEFICIENTES	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
g_{1i}	$8{,}0 \times 10^{-9}$	$3{,}8 \times 10^{-7}$	$-1{,}218 \times 10^{-4}$
g_{2i}	$-4{,}27 \times 10^{-7}$	$8{,}2 \times 10^{-6}$	$2{,}892 \times 10^{-4}$
g_{3i}	$-2{,}5 \times 10^{-5}$	$-1{,}034 \times 10^{-4}$	0,9314

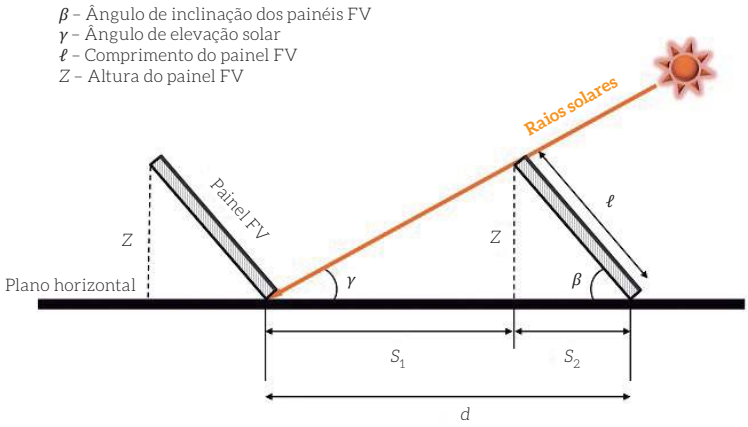

Figura 2.27. Representação esquemática da distância de separação entre painéis foto voltaicos.

A análise da Figura 2.27 permite estabelecer as seguintes relações geométricas:

$$S_1 = \frac{Z}{\tan \gamma} = \frac{\ell \sin \beta}{\tan \gamma} \qquad (2.13)$$

$$S_2 = \frac{Z}{\tan \beta} = \frac{\ell \sin \beta}{\tan \beta}$$

A distância d entre painéis é calculada pela expressão,

$$d = S_1 + S_2 \qquad (2.14)$$

Substituindo-se a equação (2.13) na equação (2.14), obtém-se:

$$d = \ell \times \left(\frac{\sin \beta}{\tan \gamma} + \cos \beta \right) \qquad (2.15)$$

Outro aspecto que importa considerar refere-se ao espaço que se dispõe para instalar um sistema fotovoltaico. Habitualmente, é frequente definir à partida um factor de utilização do espaço disponível (F) que varia entre 0 e 1 (ou seja, entre 0% e 100%). Este factor, é definido pelo quociente entre o comprimento do painel, ℓ e a distância de separação entre fileiras (d), ou seja:

$$F = \frac{\ell}{d} \qquad (2.16)$$

A Figura 2.28 representa graficamente a variação do factor de utilização do espaço disponível (F) em função do ângulo de inclinação (β) referente a um painel solar localizado na

CAPÍTULO 3

TECNOLOGIA DE MATERIAIS: TIPOS DE CÉLULAS

3.1. Introdução

As tecnologias fotovoltaicas baseiam-se essencialmente na utilização de um conjunto de materiais que permitem a transformação da radiação solar em energia eléctrica através do denominado efeito fotovoltaico. As tecnologias fotovoltaicas de primeira geração, representando o estado da arte, são completamente dominadas pela utilização do silício, nas suas configurações monocristalina (mc-Si) e policristalina (pc-Si). Com efeito, este tipo de tecnologias representa a geração que ainda hoje detém uma fatia do mercado global que corresponde a cerca de 80%.

Com efeito, durante a última década foi efectuado um significativo esforço financeiro no âmbito da investigação científica com o intuito de se desenvolverem novos materiais e técnicas de fabricação de células solares fotovoltaicas. O principal objectivo visou alcançar uma maior eficiência na conversão energética e também garantir menores custos de fabricação (optimizando a relação custo – benefício). Alguns dos novos processos de manufactura são relativamente dispendiosos, já que requerem a adopção de técnicas e equipamentos que habitualmente operam em ambiente de alto ou ultra-alto vácuo. Entre estas, destacam-se os métodos de deposição física de vapores (do inglês, *physical vapour deposition* – PVD), em particular a deposição catódica em magnetrão (do inglês, *magnetron sputtering*) e a deposição química de vapores (do inglês, *chemical vapour deposition* – CVD).

As células fotovoltaicas são fabricadas através da utilização de diferentes tipos de materiais. Normalmente, os diferentes materiais são agrupados em três grandes grupos, conforme as diferentes tecnologias de fabricação e a sua aplicação no mercado.

- Grupo das células convencionais – células e dispositivos fotovoltaicos fabricados através da utilização de silício monocristalino (mc-Si) e/ou no silício policristalino (pc-Si);

3.2. Tipos de células fotovoltaicas

3.2.1. Células de silício monocristalino

O silício representa o segundo elemento químico mais abundante da crosta terrestre (o primeiro é o oxigénio). Apesar de não ser encontrado no estado isolado e nativo, o silício aparece em alguns minerais na forma de Dióxido de Silício (SiO_2) – também conhecido como sílica (como a ametista, a ágata, o quartzo, a areia, etc.) e noutros minerais na forma de compostos, contendo silício e oxigénio. O silício é também o principal componente do vidro, do cimento, dos materiais cerâmicos e da maioria dos materiais semicondutores.

As células de silício monocristalino constroem-se a partir de barras cilíndricas (lingotes) de silício monocristalino, obtidas através do processo de Czochralski (nome o inventor). Trata-se de um método que é muito utilizado em aplicações que exijam baixos custos de natureza financeira.

Com efeito, o processo de Czochralski é utilizado em cerca de 90% dos casos onde seja necessário a obtenção de silício com um grau de pureza da ordem de 99,999%. O processo consiste em fundir o silício policristalino (pc-Si) num cadinho/reactor, sob atmosfera controlada e a uma temperatura aproximadamente igual a 1500 °C. Em seguida, uma amostra de um cristal-semente (silício monocristalino) é mergulhada no cadinho (contendo silício policristalino fundido) e, em simultâneo, é imposto um movimento de rotação. Posteriormente, mantendo o movimento de rotação, o cristal-semente é erguido lentamente com uma velocidade linear de cerca de 1 cm/hora. A Figura 3.2 apresenta em modo esquemático o processo de Czochralski usado na produção de um lingote de silício [5].

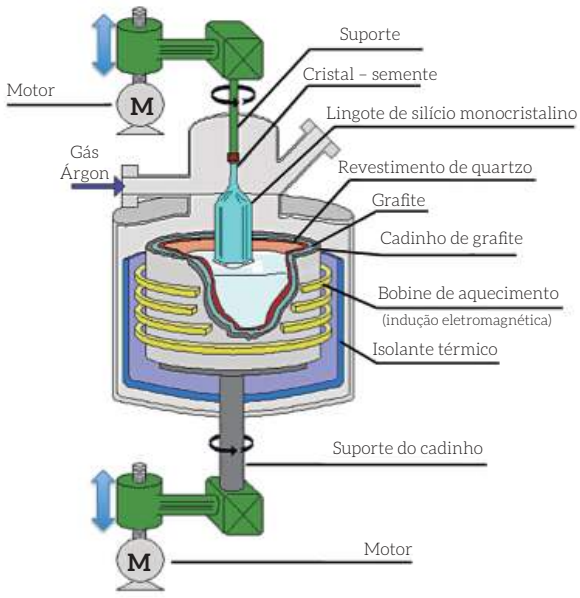

Figura 3.2. Método de Czochralski para obtenção de um lingote de mc-Si (adaptado da referência [5]).

las fotovoltaicas conseguem alcançar eficiências (em condições de operação comercial) que variam entre 12% – 14% (≈ 21% em contexto laboratorial). Uma das principais vantagens da utilização deste tipo de células, reside no facto de incorporarem na sua composição materiais com baixo impacto ambiental. Além disso, a sua exposição à acção da radiação solar não despoleta a ocorrência de qualquer tipo de processo de degradação do material. No entanto, a principal desvantagem decorre das insuficientes reservas de índio (elemento bastante caro e raro) no planeta reduzindo assim a sua aplicação comercial em larga escala.

Os módulos fotovoltaicos de CIGS são essencialmente produzidos através de uma tecnologia de deposição física de vapores (do Inglês, *Physical Vapor Deposition* – PVD) onde a variante de pulverização catódica em magnetrão (do Inglês, *magnetron sputtering*) permite a deposição de filmes finos em grande escala e com taxas de deposição elevadas (tempo de execução de ciclo de curta duração). A título exemplificativo, as Figuras 3.7 (a) e (b) mostram, respectivamente, a imagem e o esquema de um sistema pulverização catódica em magnetrão instalado no laboratório de filmes finos do Departamento de Física da Universidade do Minho. Este sistema de deposição em vácuo tem sido muito utilizado nas actividades de investigação visando o desenvolvimento e produção de novos revestimentos multicamada para fins diversos, onde também se incluem os revestimentos de CIGS.

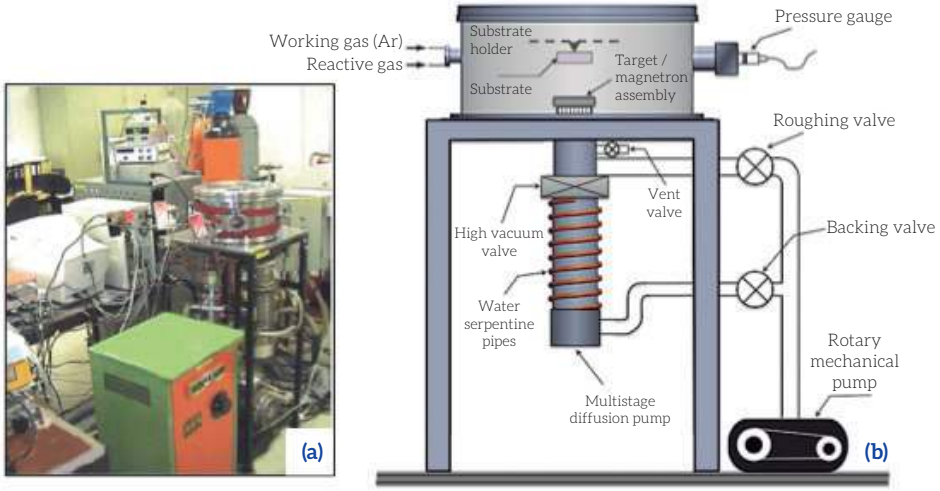

Figura 3.7. Sistema pulverização catódica em magnetrão instalado no laboratório de filmes finos do Departamento de Física da Universidade do Minho: **(a)** imagem geral do sistema de deposição; **(b)** esquema do sistema de deposição e denominação dos seus principais componentes.

A Figura 3.8 apresenta a estrutura de uma célula fotovoltaica baseada na tecnologia de CIGS.

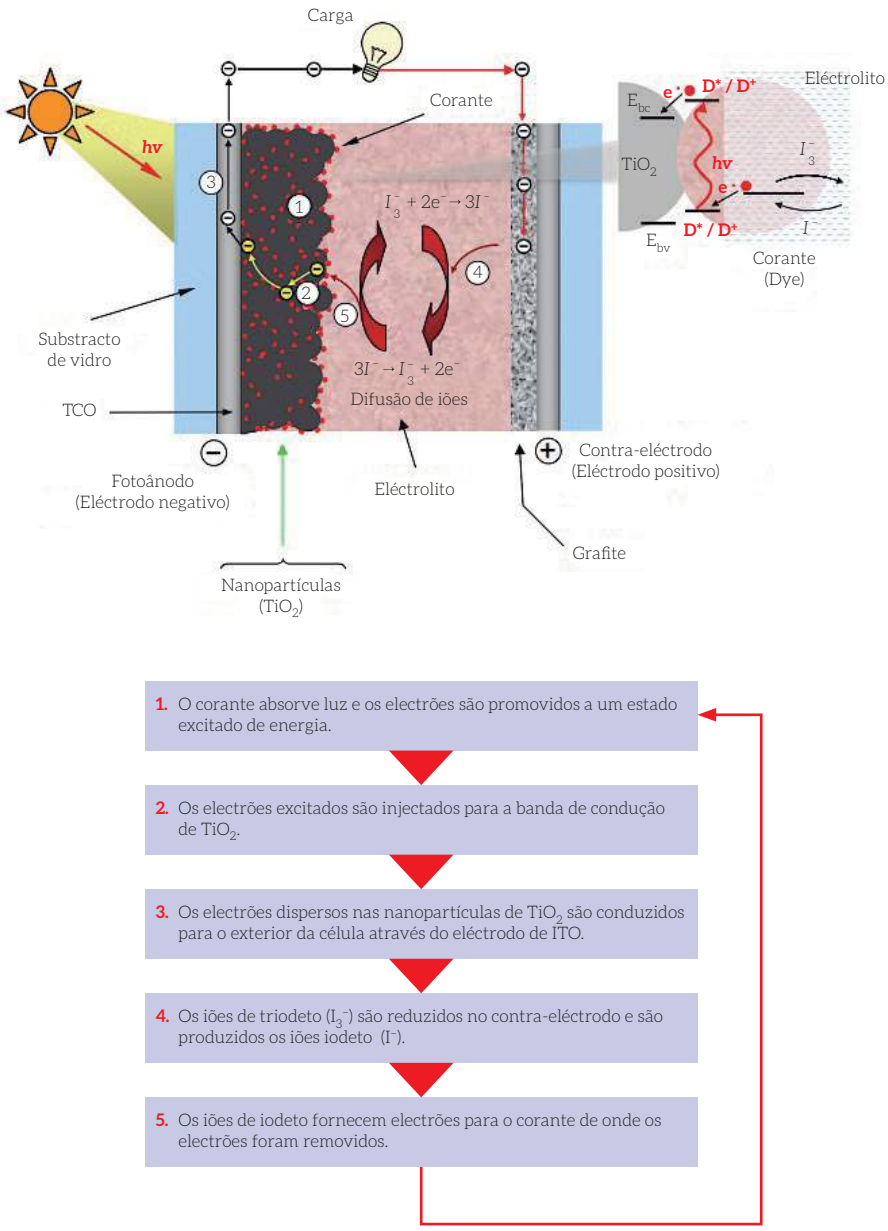

Figura 3.11. Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma célula de Grätzel.

Com o intuito de se descrever um exemplo referente à *fabricação laboratorial* de células solares fotovoltaicas *sensibilizadas por corante*, será sumariamente apresentado o conjunto das etapas que são usualmente executadas no laboratório de filmes finos do Departamento de Física da Universidade do Minho.

CAPÍTULO 4

SEMICONDUTORES E MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

4.1. Semicondutores e efeito fotovoltaico

As tecnologias subjacentes ao aproveitamento da energia solar para a produção de electricidade baseiam-se fundamentalmente na utilização de materiais semicondutores (SC). Estes materiais permitem que se processe a conversão da radiação solar em energia eléctrica. O efeito fotovoltaico consiste no aparecimento de uma diferença de potencial eléctrico (produzida pela absorção de luz) nas extremidades de uma estrutura constituída por um material semicondutor.

A descoberta do efeito fotovoltaico ocorreu em 1876 por Adams e Day e a devida compreensão científica deste fenómeno físico só foi possível após Max Planck ter estabelecido a teoria quântica no ano de 1900. No entanto, importa realçar que a descoberta do efeito fotovoltaico é por vezes atribuída a Edmond Becquerel, quando em 1839 este cientista observou que a ocorrência de algumas reacções químicas induzidas pela luz produzia correntes eléctricas. Na verdade, a observação deste efeito despoletou na comunidade o interesse e a motivação necessária para investigar o mesmo tipo de fenómeno em sólidos, o que se veio a confirmar com a descoberta de Adams e Day.

Numa período mais recente, a *"corrida ao espaço"* funcionou como uma ferramenta impulsionadora da indústria fotovoltaica. Por outro lado, o choque petrolífero de 1973 renovou e aumentou substancialmente o interesse em aplicações terrestres das tecnologias fotovoltaicas. Acreditava-se então, que a energia solar fotovoltaica poderia contribuir de modo significativo para satisfazer a procura mundial de energia eléctrica. Com efeito, este pressuposto permitiu a implementação de inúmeros programas de investigação científica visando ultrapassar duas barreiras tecnológicas fundamentais: os custos de produção e a eficiência do processo de conversão de energia.

4.2.3.1. Semicondutores intrínsecos

Os semicondutores intrínsecos são *semicondutores puros*, cuja condutividade eléctrica é determinada pelas suas propriedades condutoras intrínsecas (próprias). Por exemplo, os elementos puros tais como o **silício** (Si) ou o germânio (Ge) são materiais semicondutores intrínsecos. Estes elementos têm a estrutura cúbica do diamante com *ligações covalentes fortemente direccionais*, conforme esquematizado na Figura 4.5.

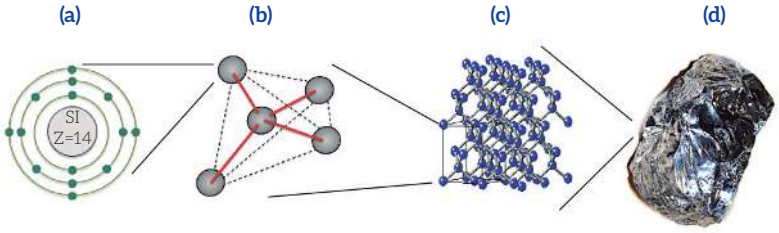

Figura 4.5. Silício: **(a)** Estrutura atómica; **(b)** tetraédrica; **(c)** cristalina e **(d)** silício puro.

No silício, os átomos estão ligados de forma tetraédrica na rede cristalina por pares de electrões em orbitais ligantes híbridas sp^3. Nesta estrutura, cada átomo de silício contribui com **quatro** electrões de valência. Na prática, a estrutura cristalina só é conseguida quando o cristal de silício é sujeito à temperatura do zero absoluto (0 K ou -273 °C).

A 0 K, todas as ligações covalentes estão completas (permitindo que o átomo tenha estabilidade química e molecular); por isso, o material comporta-se como um isolante já que, não havendo electrões livres, não é possível estabelecer-se uma corrente eléctrica através do cristal. A Figura 4.6 representa esquematicamente o modelo de bandas de energia para o Si a 0 K bem como o modelo bidimensional da ligação covalente da sua rede cristalina à temperatura do zero absoluto.

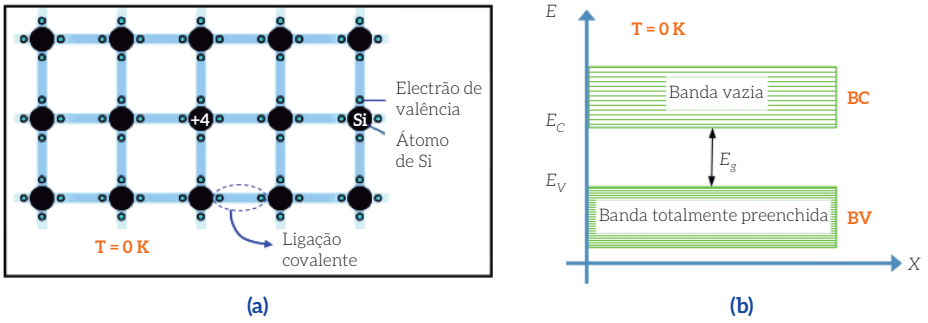

Figura 4.6. Si intrinseco à temperatura do zero absoluto (T = 0 K): **(a)** Modelo das ligações covalentes e **(b)** modelo das bandas de energia.

Para temperaturas substancialmente elevadas, ambos os semicondutores comportam-se como se fossem intrínsecos e a energia de Fermi assume o valor $E_F = ½\ E_g$, ou seja posiciona-se no centro da banda proibida. Neste contexto, a função trabalho também não é uma característica do material e, por isso, é habitual invocar uma outra grandeza característica do material que se denomina por electro-afinidade (χ) e que corresponde à diferença de energia entre o nível zero e o nível E_C, ou seja, pela análise da Figura 4. 13 (a) e (b) é possível estabelecer as seguintes expressões:

Semicondutor tipo-*n*: $\chi = \phi_n - (E_{Cn} - E_F)$ (4.7)

Semicondutor tipo-*p*: $\chi = \phi_p + (E_F - E_{Vp}) - E_g$ (4.8)

4.3.1.2. Junção *p-n* em equilíbrio termodinâmico

Considere-se um díodo de junção *p-n* caracterizado por um perfil abrupto da densidade de impurezas (dopantes) na junção (Figura 4.14 (a)) e em que para o caso de um semicondutor fortemente extrínseco em equilíbrio termodinâmico, corresponde uma determinada variação da densidade de electrões e de lacunas na região vizinha da junção (Figura 4.14 (b)).

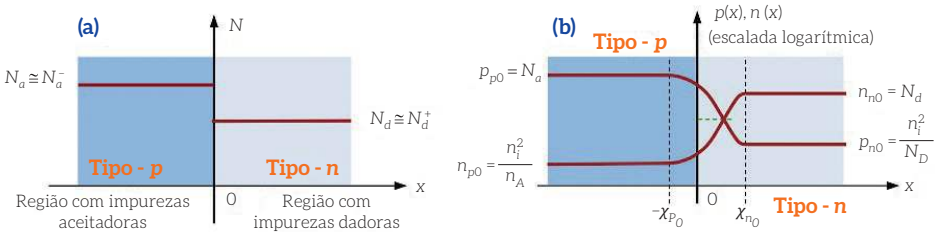

Figura 4.14. Perfil abrupto da densidade de impurezas numa junção *p-n* **(a)** e **(b)** Variação da densidade de electrões e de lacunas na junção *p-n* em equilíbrio termodinâmico (*Fonte*: adaptado da referência [11]).

Em regiões bastante afastadas da junção, as densidade dos portadores de carga maioritários, electrões no lado *n* (n_{n_0}) e lacunas no lado *p* (p_{p_0}) são aproximadamente iguais às densidades das impurezas dadoras e aceitadoras ionizadas, ou seja $n_{n_0} = N_d^+$ e $p_{p_0} = N_a^-$, respectivamente e que para o caso onde os dopantes estejam totalmente ionizados, verificar-se-á que $N_d^+ \cong N_d$ e $N_a^- \cong N_a$.

Contudo, para as regiões próximas da junção tal situação não se verifica já que, tratando-se de cargas móveis, os electrões no lado *n* ao atravessarem a junção para o *p* passam de portadores de carga maioritários para minoritários (e o mesmo ocorre para o caso das lacunas) e por isso, o seu perfil de densidade, varia ao longo da região de depleção. Deste

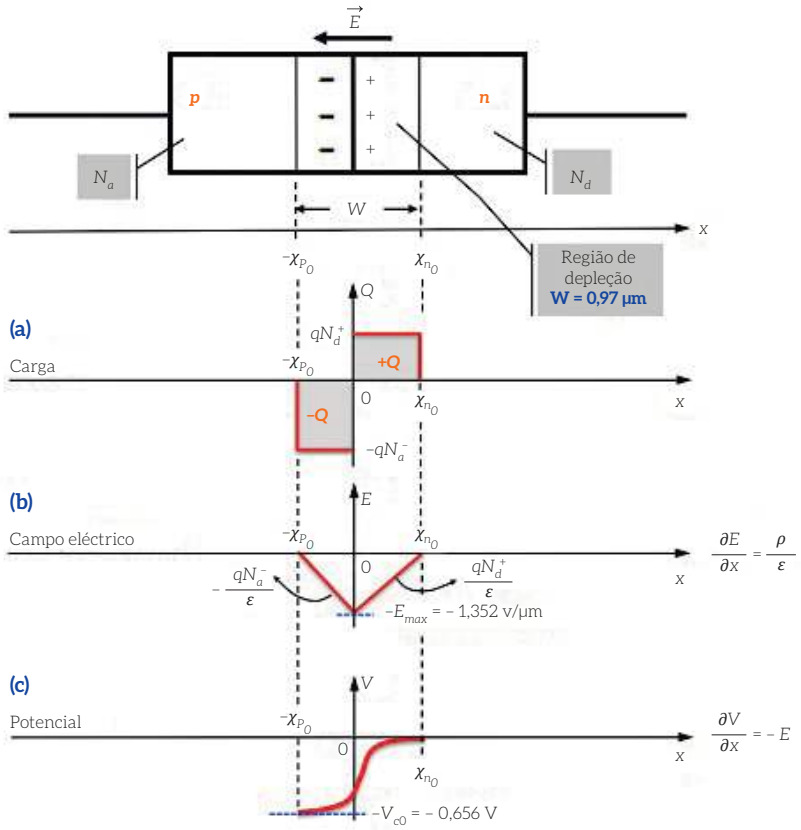

Figura 4.15. Evolução espacial referente a **(a)** densidade de carga $\rho(x)$; **(b)** campo eléctrico $E(x)$ e **(c)** potencial eléctrico $V(x)$ usando a hipótese de depleção total.

- **Comparação dos valores do potencial de contacto,**

Para o Si intrínseco a energia de Fermi (E_{Fi}) é igual a metade do seu hiato de energia, ou seja:

$$E_{Fi} = \frac{1}{2} E_g \Rightarrow E_{Fi} = 0{,}5 \times 1{,}12 = 0{,}56\ eV,$$

pelo que,

$$\begin{cases} E_F - E_{Fi}\Big|_n = kT \ln = \dfrac{n_{n0}}{n_i} \Leftrightarrow E_F - E_{Fi}\Big|_n = (1{,}381 \times 10^{-23} \times 300) \ln \dfrac{10^{15}}{10^{10}} = 4{,}77 \times 10^{-20}\ J\ (= 0{,}298\ eV) \\ E_F - E_{Fi}\Big|_p = -kT \ln = \dfrac{p_{n0}}{n_i} \Leftrightarrow E_F - E_{Fi}\Big|_p = -(1{,}381 \times 10^{-23} \times 300) \ln \dfrac{10^{16}}{10^{10}} = -5{,}72 \times 10^{-20}\ J\ (= -0{,}358\ eV) \end{cases}$$

Atendendo a que este valor é muito inferior a 0,7 V, então a equação do diodo de Shockley pode ser aplicada na sua forma simplificada, ou seja, pode ser usada a equação (4.44),

$$I_D = I_g\, e^{\frac{V}{m U_T}} \rightarrow I_g = I_D\, e^{-\frac{V}{m U_T}}$$

Se $m = 1$: $I_g = 1 \times 10^{-3}\, e^{-\frac{700}{26}} = 2{,}03 \times 10^{-15}\ A$

Se $m = 2$: $I_g = 1 \times 10^{-3}\, e^{-\frac{700}{2 \times 26}} = 1{,}42 \times 10^{-9}\ A$

Constata-se a o factor de idealidade tem uma profunda influência sobre a corrente de fuga.

4.3.2. Díodo de Junção *p – n* sob iluminação

No âmbito das aplicações a sistemas fotovoltaicos importa estudar o comportamento de um díodo quando sujeito à acção de luz que incida sobre a sua superfície. Com efeito, quando a luz atinge a superfície de um díodo (sem estar sujeito a polarização), os fotões com energia igual ou superior à energia da banda proibida (do inglês, *band gap*, E_g) são absorvidos e geram-se pares electrão – lacuna (e^-/h^+), conforme mostrado esquematicamente na Figura 4.22.

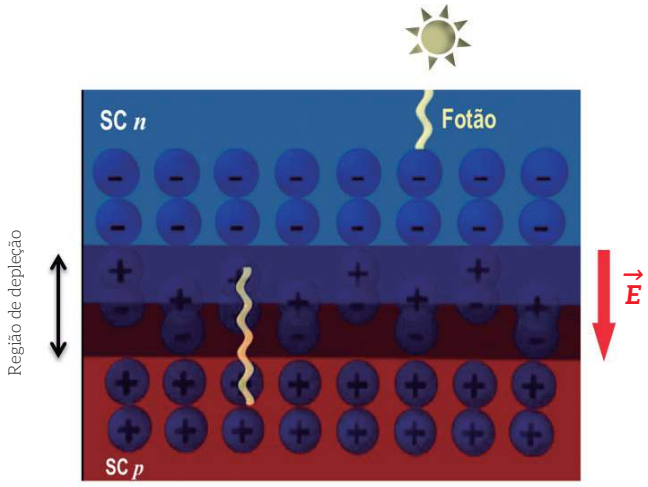

Figura 4.22. Representação esquemática de um diodo de junção *p-n* sujeito à acção da luz e sem polarização externa. SC-*n* e SC-*p* são as designações adoptadas para um semicondutor do tipo-*n* e do tipo-*p*, respectivamente.

A absorção da luz aumenta drasticamente a geração dos pares e^-/h^+ para além da geração de portadores (minoritários) que advêm da excitação térmica, conforme representado na Figura 4.23 (a).

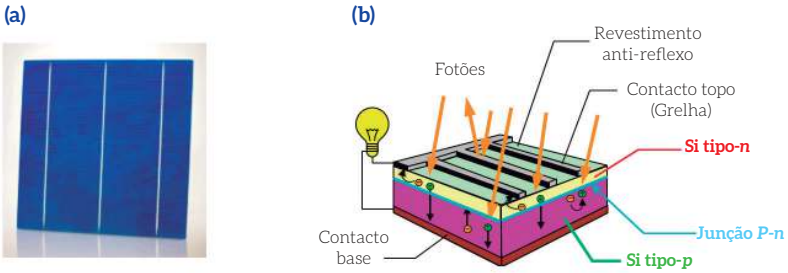

Figura 4.25. Célula fotovoltaica típica de silício policristalino: **(a)** imagem real da superfície; **(b)** constituição interna da célula fotovoltaica de Si (*Fonte:* adaptado da referência [14]).

A célula apresenta uma forma geométrica aproximadamente quadrada com cerca de 15 cm de largura e coberta superficialmente por um revestimento anti-reflexo de nitreto de silício. Os elementos que constituem uma célula fotovoltaica típica de silício podem ser resumidamente descritos da seguinte maneira:

- **Contactos frontais:** grelha metálica que actua como terminal negativo;
- **Revestimento anti-reflexo:** este revestimento reduz a reflexão dos fotões incidentes para valores inferiores a 5%. Sem a incorporação deste revestimento a célula reflectiria cerca de um terço da radiação incidente;
- **Região tipo-*n*:** silício dopado com impurezas dadoras (por exemplo, o fósforo) contendo excesso de electrões (transportadores maioritários). A espessura desta camada é cerca de 300 nm;
- **Região tipo-*p*:** silício dopado com impurezas aceitadoras (por exemplo, o boro) contendo excesso de lacunas (transportadores maioritários). A espessura desta camada é cerca de 250 μm;
- **Contacto base:** contacto metálico localizado na parte inferior da célula, constituindo o seu terminal positivo.

A curva característica *I*-*V* de uma célula fotovoltaica pode ser obtida através de um esquema elétrico simplificado que referente ao circuito equivalente do dispositivo (ver Figura 4.26). A corrente gerada pela luz, I_L é representada no circuito por um gerador em paralelo com um díodo que representa a junção *p*-*n*.

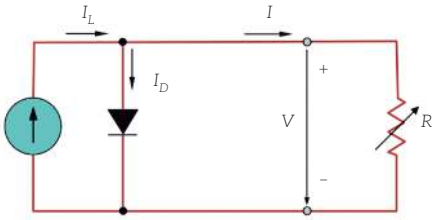

Figura 4.26. Representação esquemática do circuito eléctrico equivalente para uma célula fotovoltaica.

volvido substituindo a equação (4.52) na equação (4.47). Neste caso, deve ter-se o cuidado de se desprezar o termo adicional já que $e^{V/mu_T} >> 1$. Deste modo, a corrente eléctrica I que circula através do circuito externo ao dispositivo pode ser reescrita na seguinte forma:

$$I = I_{CC}^{R}\left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{ca}^{R}}{m\,U_T^{R}}\right)\right] \tag{4.53}$$

Para as situações em que o circuito externo contenha uma carga com resistência eléctrica não nula ou de valor infinito, o valor da diferença de potencial V entre os terminais da célula está compreendido entre 0 e V_{ca}. Nestas condições, a célula fotovoltaica deverá fornecer uma intensidade de corrente I que obedece à lei de Ohm, ou seja, $I = V/R$. A potência eléctrica, P de uma célula fotovoltaica é calculada pela expressão,

$$P = V \times I \tag{4.54}$$

A equação (4.54) pode ser reescrita de forma a se contemplar a curva característica *corrente - tensão* da célula fotovoltaica. Com efeito, atendendo a que $I_L = I_{CC}$, é possível substituir a equação 4.5 na equação 4.10 de modo a se obter:

$$P = V\left\{I_{CC} - I_g\left[\exp\left(\frac{V}{m\,U_T}\right) - 1\right]\right\} \tag{4.55}$$

A Figura 4.30 mostra a representação gráfica da equação (4.55), ou seja, de uma típica curva de potência para uma célula solar fotovoltaica, à qual está sobreposta a curva característica *corrente – tensão*.

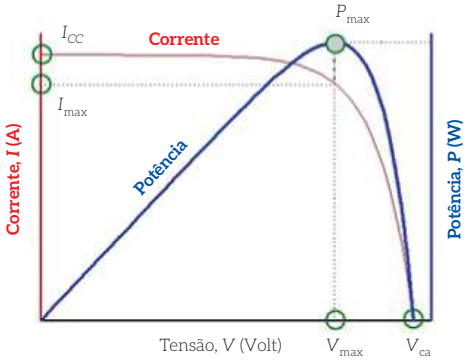

Figura 4.30. Representação gráfica do "andamento" da curva de *potência* para uma célula fotovoltaica de silício à qual, para melhor compreensão, foi sobreposta a curva característica *I-V*.

EXERCÍCIO

Considere-se a célula fotovoltaica de silício policristalino considerada no exercício anterior. Pretende-se traçar as curvas *I-V* e *P-V* em função das seguintes condições:

a) Temperatura da célula (-10, 25, 50 e 70°C), considerando a radiação incidente constante e igual à da radiação em condições *STC* (G^R = 1000 W/m^2);

b) Radiação incidente (1000, 800, 500 e 200 W/m^2), considerando a temperatura constante e igual à da temperatura em condições *STC* (T^R = 25°C).

RESOLUÇÃO

O potencial térmico varia com a temperatura e, nas hipóteses admitidas para o modelo de um diodo de junção *p-n*, a corrente de fuga I_g também varia com a temperatura de acordo com a equação (4.61). Admitiu-se também que a corrente de *curto-circuito* é invariante com a temperatura. Nestas condições, para uma temperatura $T \neq T^R$ (por exemplo T = 70°C) o potencial térmico tem o valor,

$$U_T^{(T=70\,^\circ C)} = \frac{KT}{q} = \frac{1{,}38\times10^{-23}\,(70+273{,}15)}{1{,}6\times10^{-19}} = 29{,}6\times10^{-3}\ V$$

O factor de idealidade equivalente do diodo é $m' = m$ =2,29, já que se trata apenas de uma célula fotovoltaica. A corrente de fuga, I_g é calculada através da equação (4.61),

$$I_g(T) = I_g^R\left(\frac{T}{T^R}\right)^3 \exp\left[\frac{E_g}{m'}\left(\frac{1}{U_T^R}-\frac{1}{U_T}\right)\right] \Leftrightarrow$$

$$I_g(T) = 0{,}148\times10^{-3}\times\left(\frac{T}{298{,}16}\right)^3 \exp\left[\frac{1{,}12}{2{,}29}\left(\frac{1}{25{,}72\times10^{-3}}-\frac{1}{U_T(T)}\right)\right]$$

a) Para o caso de irradiância constante (G^R = 1000 W/m^2) e temperatura variável, a curva característica *I-V* calcula-se através da equação (4.47) onde, nesta situação, a corrente de fuga I_g deve ser substituída por $I_g(T)$, ou seja:

$$I = I_{CC}^R - I_g(T)\left[\exp\left(\frac{V}{m\,U_T(T)}\right)-1\right] \Leftrightarrow I = 5{,}55 - I_g(T)\left[\exp\left(\frac{V}{2{,}29\times U_T(T)}\right)-1\right]$$

CAPÍTULO 5

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

5.1. Características e associações

A potência máxima alcançada através da utilização de apenas uma única célula fotovoltaica não excede, regra geral, o valor de 3 W, o que é manifestamente insuficiente para a maioria das aplicações reais. Por esta razão, as células fotovoltaicas são agrupadas (ligadas em série) de modo a formarem *módulos* fotovoltaicos, como mostrado esquematicamente na Figura 5.1.

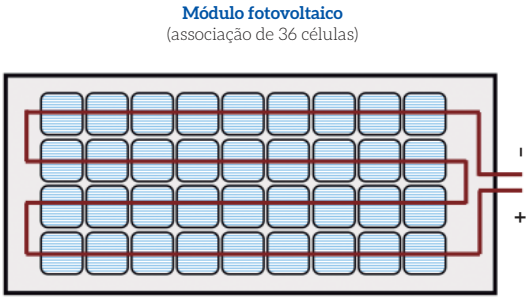

Figura 5.1. Representação esquemática referente à associação de várias células fotovoltaicas (de silício cristalino) visando o aumento da potência total.

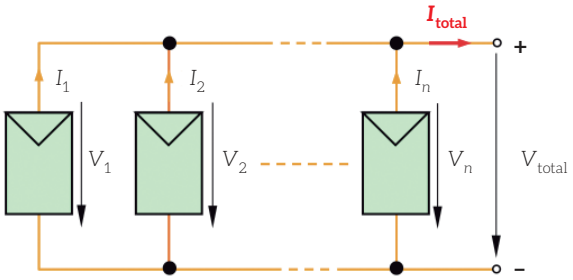

Figura 5.8. Representação esquemática da associação em paralelo de *n* módulos fotovoltaicos.

Para este tipo de ligação, obtêm-se intensidades de corrente mais elevadas, mantendo-se no entanto a tensão estipulada do módulo. Neste caso, é possível escreverem-se as seguintes relações:

$$I = I_1 = I_2 = \ldots I_n \Rightarrow I_T = I_1 + I_2 + \ldots + I_n = n \times I \tag{5.4}$$

$$V_T = V = V_1 = V_2 = \ldots = V \tag{5.5}$$

A Figura 5.9 mostra a representação gráfica das curvas características de *corrente – tensão* (de acordo com a equação (4.47)) referentes à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

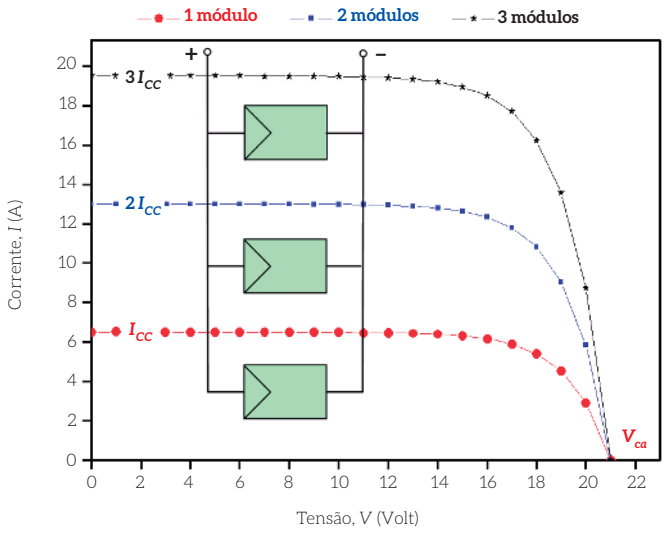

Figura 5.9. Representação das curvas *I-V* relativas à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos.

Para este caso, a tensão de circuito aberto da associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos mantém-se essencialmente inalterada, como pode ser aferido pela análise da Figura 5.9. No entanto, a corrente de *curto-circuito* atinge um valor que é três vezes supe-

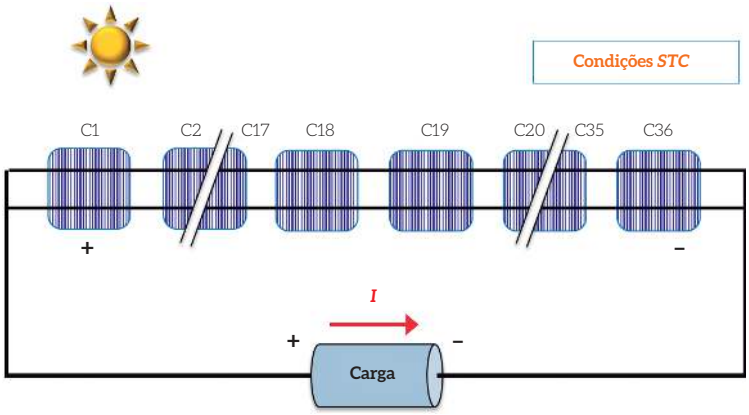

Figura 5.13. Representação esquemática de um um conjunto de células fotovoltaicas capazes de produzirem corrente eléctrica para alimentar uma carga externa.

Na eventualidade de ocorrer o sombreamento de uma determinada célula (ver Figura 5.14), por exemplo através da queda de uma folha sobre a célula C36, esta célula passará a estar inversamente polarizada (a tensão inversa pode ter um valor elevado), actuando assim como uma "resistência eléctrica". Nesta situação, ocorre conversão de energia eléctrica em calor que eleva a temperatura (pontos quentes) para valores que, em alguns casos, podem provocar danos irreversíveis na célula.

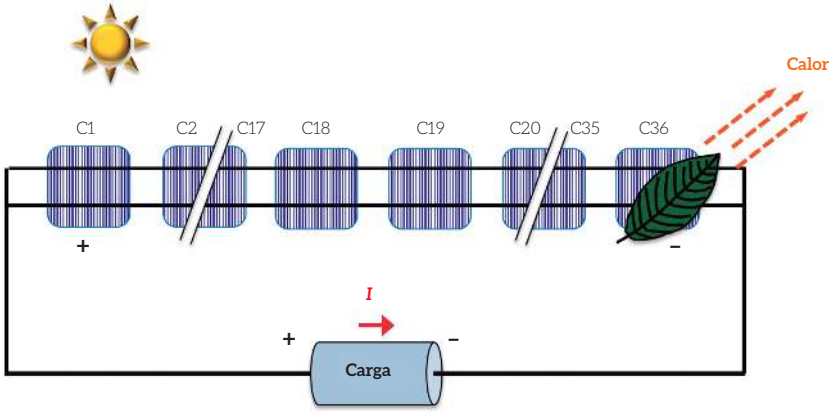

Figura 5.14. Representação esquemática de uma célula fotovoltaica sombreda.

CAPÍTULO 6

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS LIGADOS À REDE E AUTÓNOMOS

6.1. Equipamentos eléctricos/principais componentes

Em termos económicos, o desenvolvimento das nações está intimamente associado ao consumo e ao preço da energia. Na verdade, as oscilações que ocorrem no preço da energia repercutem-se directamente em todos os subsectores das actividades económicas com grande impacto nos cidadãos e nas empresas, onde são exemplos os sectores dos transportes, dos bens alimentares ou da saúde. Neste contexto, os países do ocidente terão de saber gerir a longa e árdua transição para um modelo energético menos dependente do petróleo e dos combustíveis fósseis. É com este diagnóstico de crescentes preocupações geoestratégicas, de constantes alterções dos preços do petróleo (e todos os seus derivados) e da crescente imposição da limitação das emissões de gases com efeito de estufa (Acordo de Paris, 12 de Dezembro de 2015), torna-se impreterível a crescente utilização de outras fontes de energia renováveis como por exemplo, a energia eólica e a solar fotovoltaica. Com efeito, em 2016, mais de metade (53,6 %) do consumo interno bruto de energia da União Europeia (UE-28) teve origem em fontes importadas a países terceiros e com o actual ritmo de crescimento a dependência deverá atingir os 70% dentro de 20 a 30 anos [19].

Para sistemas FV ligados à rede pública de distribuição de electricidade, o gerador fotovoltaico entrega à rede a máxima potência que, em cada instante, pode produzir. Entre o módulo FV e a rede existem equipamentos de regulação e interface que optimizam as condições de geração e adaptam-nas às condições de recepção impostas pela rede. Em termos esquemáticos, a situação pode ser descrita conforme se mostra na Figura 6.1.

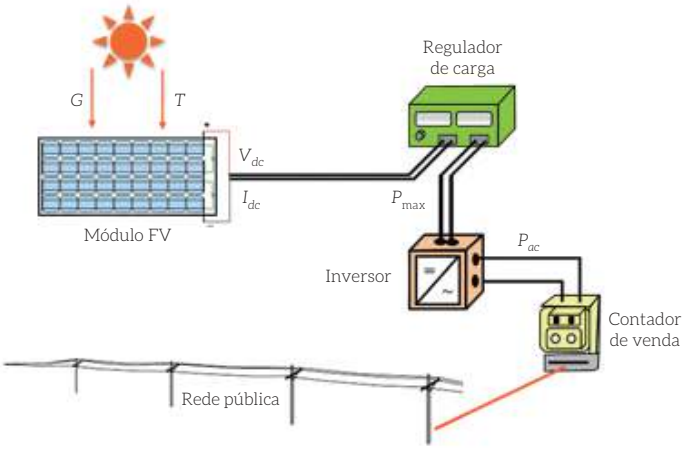

Figura 6.1. Esquema de um gerador fotovoltaico e dos respectivos equipamentos de interface com a rede eléctrica.

No estudo que se segue, apenas será efectuada uma descrição muito sumária dos equipamentos de regulação e interface. O estudo detalhado destes componentes (os circuitos eléctricos e todos os outros parâmetros relativos à sua construção ou montagem) não se insere no âmbito deste texto, na medida em que o presente estudo tem como principal objectivo facultar ao leitor informação simples que o habilite efectuar o dimensionamento do sistema gerador (*potência do sistema FV, tensão de saída, corrente de saída, número de módulos que integram com o sistema, etc.*) e, o mais importante, estimar a energia produzida pelo sistema FV face à intensidade da luz incidente no local da instalação. Neste conexo, considerando apenas os componentes mostrados na Figura 6.1, apresenta-se em seguida uma breve descrição acerca dos equipamentos de regulação e interface com a rede eléctrica.

6.1.1. Regulador MPP e conversor DC/DC

Através da análise da tensão da bateria, os reguladores conseguem efectuar o controlo do seu estado de carga. Além disso, o regulador tem ainda a função de interromper o fornecimento de energia às cargas externas sempre que é atingida a profundidade de descarga máxima da bateria. Por outro lado, se a tensão do gerador fotovoltaico baixar, por exemplo devido à diminuição da intensidade da luz solar, os reguladores poderão não conseguir realizar de forma adequada o aproveitamento da energia produzida pelo gerador FV. Com efeito, devido à diminuição da tensão do gerador FV, o desvio que ocorre relativamente ao ponto óptimo de funcionamento à máxima potência (do Inglês, *Maximum Power Point* – MPP) ficará fora do alcance do regulador.

A potência máxima de um gerador fotovoltaico (módulo ou painel) varia com as condições ambientais, designadamente com a temperatura e a irradiância da luz incidente, tendo estes parâmetros uma influência directa na intensidade de corrente e tensão nos termi-

6.1.4. Estimativa da produção de energia

A intensidade da radiação solar incidente é avaliada através de medições que usualmente são realizadas sobre um plano horizontal. No entanto, a literatura da especialidade refere que um plano inclinado fixo (que globalmente maximize a radiação solar absorvida), deve ter uma inclinação aproximadamente igual à latitude do lugar. Recorrendo-se a ferramentas informáticas que são frequentemente disponibilizadas de forma gratuita na Internet, é possível obter-se para um dado local à superfície da Terra uma série de indicadores importantes, tais como:

- Irradiação (global) incidente num plano horizontal (diária e mensal);
- Ângulo óptimo da inclinação dos painéis FV;
- Irradiação (global) incidente num plano com orientação igual à do ângulo óptimo (diária e mensal);
- Temperaturas médias diárias e mensais, entre outros.

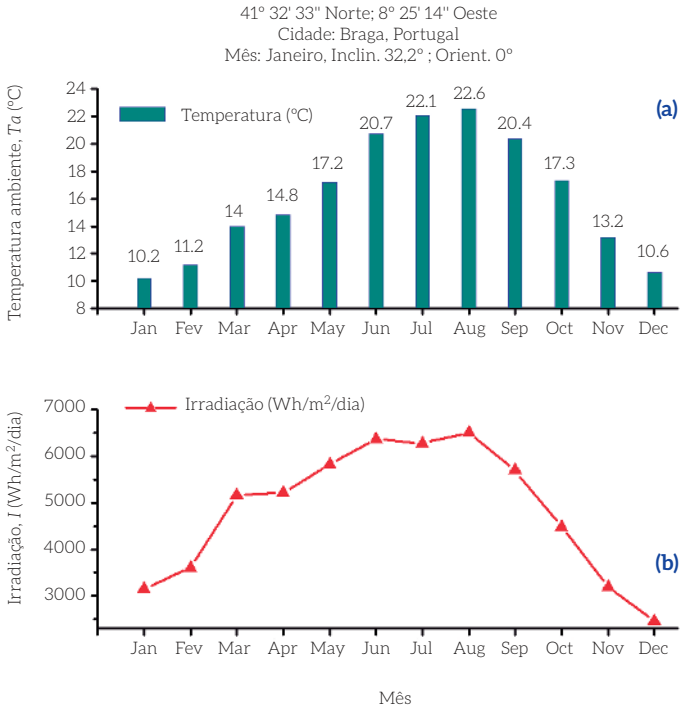

Figura 6.8. Utilização do do simulador solar *"Sunbird"* para estimar a evolução mensal de: **(a)** temperatura média ambiente e **(b)** irradiação solar média mensal.

No capítulo 2 mencionou-se que os dados referentes ao recurso solar existente numa dada região podem ser obtidos a partir de sítios da Internet que disponibilizam software específico para estimar a quandidade de energia produzida por um determinado sistema foto-

A fim de se conseguir realizar a reacção química inversa (i.e. o carregamento da célula electroquímica), é necessário utilizar-se uma fonte de electrões. Por esta via, o sulfato de chumbo presente em ambos os eléctrodos retornará ao seu estado original (i.e. formando *Pb* no eléctrodo negativo e PbO_2 no eléctrodo positivo), seguido da formação de H_2SO_4 e consumo de água. Desta forma, a concentração do ácido sulfúrico aumenta e por consequência ocorre também um aumento da diferença de potencial da célula electroquímica.

A Figura 6.13 apresenta um esquema simplificado do conjunto de reacções químicas que sucedem numa bateria de chumbo-ácido.

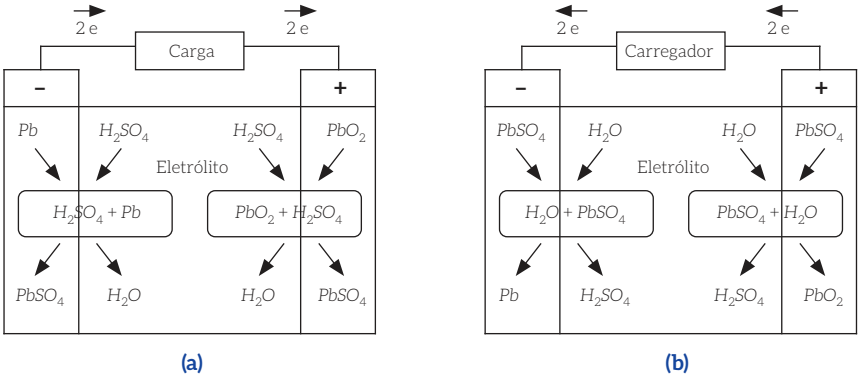

Figura 6.13. Diagrama simplificado de um acumulador de chumbo-ácido: **(a)** processo de descarga e **(b)** processo de carregamento (*Fonte*: adaptado da referência [20]).

As baterias comerciais (ver Figura 6.14) são usualmente construídas através da associação em série de várias unidades básicas (acumuladores ou células electroquímicas) que normalmente têm uma diferença de potencial de 2 V.

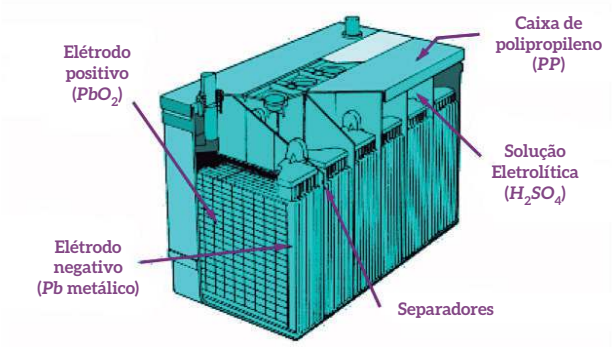

Figura 6.14. Esquema de uma bateria comercial de chumbo/óxido de chumbo (chumbo-*ácido*) 2 V. (*Fonte*: adaptado da referência [21]).

$$E_{hidra}\,(Wh) = \frac{(1000 \times 9{,}81 \times H_m \times V)}{3600} \Leftrightarrow E_{hidra}\,(Wh) = 2{,}725\, H_m\, V \qquad (6.38)$$

A Figura 6.19 corresponde a um exemplo referente à configuração de um sistema FVB usado para efectuar o abastecimento de água a animais de uma quinta rural de pequena dimensão.

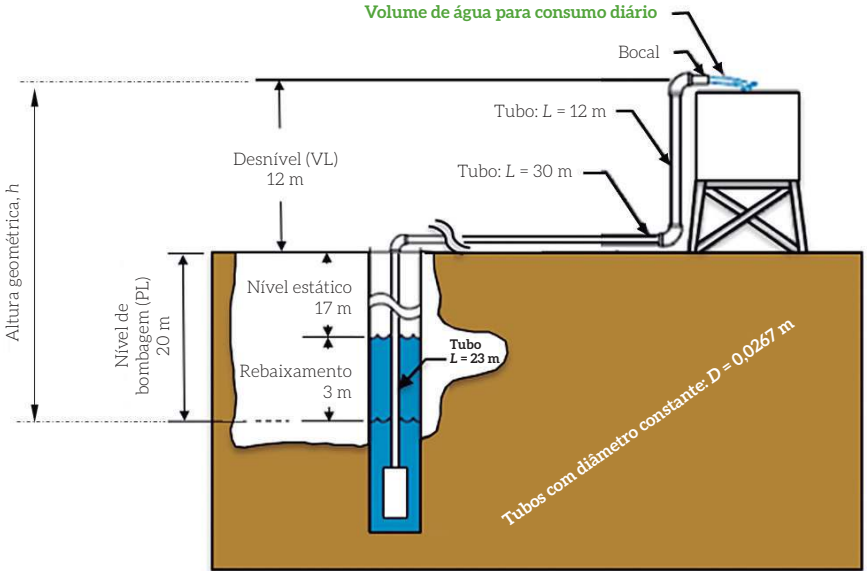

Figura 6.19. Exemplo de uma configuração típica de um sistema fotovoltaico para bombagem de água e respectivas dimensões geométricas.

A Figura 6.10 identifica a altura geométrica, *h* que corresponde à soma do **desnível** (do inglês: *Vertical Lift*, VL – é a altura do reservatório relativamente ao solo) com o **nível de bombagem** (do inglês: *Pumping Level*, PL).

O nível de bombagem, é a distância que decorre da soma do **nível estático da água** (do inglês: *Standing water level*) com o **rebaixamento** (do inglês: *Drawdown*). O nível estático da água corresponde à distância do topo do poço até à superfície da água (no poço), para a condição em que não esteja a ocorrer bombeamento. Por outro lado, o rebaixamento corresponde ao decréscimo do nível estático da água quando é bombeada do poço. Deste modo, verifica-se a seguinte relação:

$$h = VL + PL \qquad (6.39)$$

onde todas as grandezas que intervêm na equação (6.39) devem ser expressas em *metros*. Importa realçar que no processo de dimensionamento, a altura total que deve ser considerada, é a denominada altura manométrica (do inglês: *total dynamic head*, H_m).

CAPÍTULO 7

ESTUDO DE CASOS

7.1. Estudo de caso: sistema ligado à rede

O estudo de caso apresentado nesta sub-secção refere-se ao dimensionamento de um sistema FV para ligação à rede, com potência de pico P_{FV} = 19,4 kW. Considera-se que a energia produzida pelo sistema é totalmente injectada na rede eléctrica pública de distribuição de electricidade.

O sistema está instalado sobre a cobertura do edifício de um centro comercial localizado na cidade de Moura (latitude $\varphi \approx 38°$ N). Os módulos FV estão orientados a Sul com uma inclinação fixa. A Figura 7.1 mostra o esquema da planta do centro comercial onde está instalado o sistema fotovoltaico.

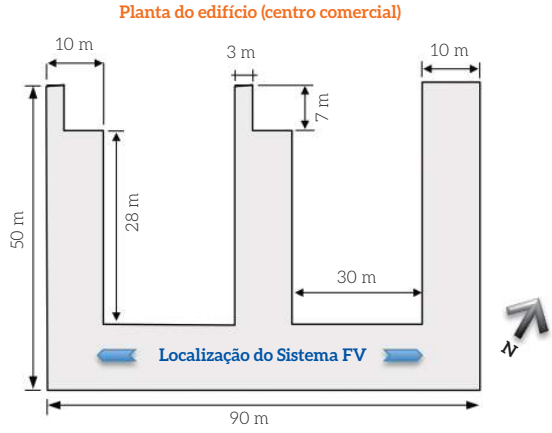

Figura 7.1. Representação esquemática da planta do edifício do centro comercial.

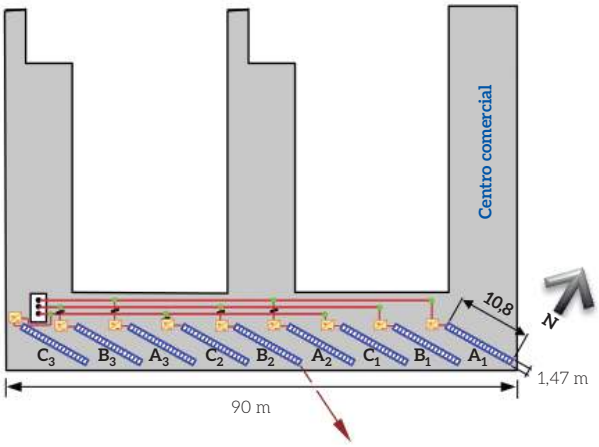

Figura 7.3. Esquema da ligação do sistema FV localizado sobre a cobertura do edifício de um centro comercial na cidade de Moura.

7.2. Estudo de caso: sistema FV autónomo

7.2.1. Instalação doméstica

Este estudo de caso diz respeito ao dimensionamento de um sistema fotovoltaico autónomo, a ser instalado sobre a cobertura de uma pequena casa localizada na cidade de Braga, conforme mostrado esquematicamente na Figura 7.4.

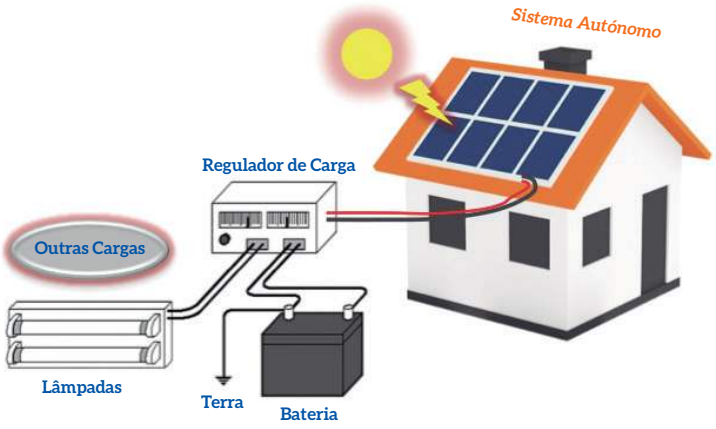

Figura 7.4. Representação esquemática de um sistema FV autónomo colocado sobre a cobertura de uma casa.

Número de fileiras em paralelo

O número de fileiras de módulos, N_F é calculado pela equação (6.30), ou seja:

$$N_F = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{max} \times I_{max}} = \frac{1460}{2 \times 14{,}7 \times 7{,}48} = 6{,}64 \rightarrow 7 \textit{ fileiras}$$

Configuração do sistema

Nesta fase já é possível realizar-se o seguinte balanço:

- Número de módulos em série: $\boldsymbol{N_S = 2}$
- Número de fileiras em paralelo: $\boldsymbol{N_F = 7}$
- Número total de módulos: $\boldsymbol{(N_S \times N_F) = 14}$

Atendendo às limitações impostas pelas dimensões geométricas da cobertura da casa, o posicionamento possível do sistema FV corresponde ao que está esquematizado na Figura 7.10.

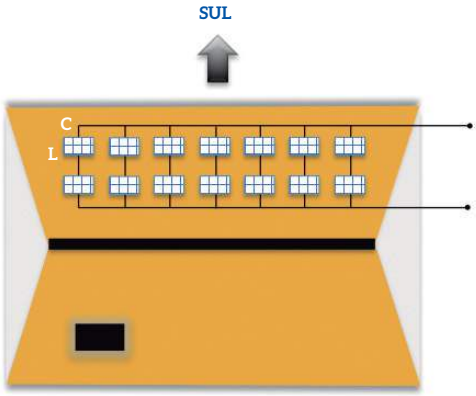

Figura 7.10. Configuração adoptada: o sistema FV é constituído por 7 fileiras em paralelo e por 2 módulos associados em série (*C* e *L* referem-se ao comprimento e largura do módulo, respectivamente).

Adoptando esta configuração, é importante determinar a tensão de trabalho (ou *tensão de serviço*), a corrente de trabalho (ou *corrente de serviço*) e a potência de trabalho (ou *potência de serviço*). Estas grandezas são calculadas da seguinte forma:

- Tensão de serviço: $V_{FV} = (N_S \times V_{max}) = (2 \times 14{,}7) = 29{,}4$ V
- Corrente de serviço: $I_{FV} = (N_F \times I_{max}) = (7 \times 7{,}48) = 52{,}36$ A
- Potência de serviço: $P = (V_{FV} \times I_{FV}) = (29{,}4 \times 52{,}36) =$ **1539,4 W**

NOTAS BIOGRÁFICAS

JOAQUIM CARNEIRO

Nasceu em 1966 em Luanda, Angola. Frequentou o ensino secundário na Escola Secundária de Ponte da Barca, terra do seu saudoso pai que também adoptou como sua.

Doutorado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e Licenciado em Física e Química pela Universidade do Minho (UMinho). Foi vice-director do Núcleo de Investigação em Tecnologias de Energias Renováveis da UMinho (NITER-UM), coordenador do Grupo de Revestimentos Funcionais (GRF) do Centro de Física (CF) da UMinho, coordenador departamental do programa SOCRATES/ERASMUS, membro do Concelho Científico da Escola de Ciências da UMinho e membro da Comissão Directiva do Centro de Física onde desenvolve actualmente a sua actividade de investigação científica centrada nas áreas da engenharia de superfícies, nanotecnologia, revestimentos funcionais, energia e materiais fotocatalíticos.

Exerceu o cargo de Chefe de Departamento de Políticas de Investigação e de Pós-graduação do ISPTEC/SONANGOL (Sociedade Nacional de Combustíveis de Angola), Luanda. É Professor responsável pela leccionação de Unidades Curriculares de Física a diversos cursos de Mestrado Integrado em Engenharia e de Energias Renováveis do Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente, ministrados na UMinho. É Professor visitante na Jiangsu University of Science and Technology, China. Orientou cerca de meia centena de alunos em diversos trabalhos académicos tais como projectos individuais, projectos de estágio, mestrados e doutoramentos.

É autor de mais de 100 artigos científicos publicados em revistas científicas internacionais com revisão por pares e factor de impacto, 6 capítulos de livros e 1 patente. Proferiu mais de 20 palestras convidadas em conferências científicas internacionais. É membro do Conselho Editorial de diversas revistas científicas internacionais onde se realçam o *International Journal of Photoenergy*, *Coatings*, *Global Journals™*, *Current Smart Materials*

e *Solids*, sendo também Editor convidado de diversos números especiais com ênfase para as edições *Recent Aspects of Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering and Emerging Applications—Coatings*, *Advanced Functional Coatings for Photocatalytic and Self-Cleaning Applications—ChemEngineering*, *Optical Coatings and Coatings for Optics and Photonics—Coatings* e *State of the Art on Coatings, Thin Films, Nano Materials and Structures: Production and Applications— Coatings*.

Participou e liderou diversos projectos de investigação científica com financiamento nacional e europeu (FCT, ADI, FP6, FP7, QREN), tendo também coorganizado e participado em diversas conferências e comités técnico-científicos nacionais e internacionais nas áreas dos revestimentos funcionais, nanotecnologia e nanomateriais. É Perito Técnico Avaliador em painéis internacionais para avaliação de projectos de Investigação e Inovação Industrial da Comissão Europeia – EUREKA platform for R&D-performing entrepreneurs in Europe, sendo ainda Perito Avaliador de projectos de investigação científica da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Foi mentor científico de uma *spin-off* académica e sócio fundador de 2 empresas de base tecnológica. Foi distinguido internacionalmente com o prémio Janus concedido pelo Instituto de Estudos Avançados (IEA-USP) e galardoado com o prémio nacional Magconcept atribuído pelo Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação (IAPMEI).

Foi membro da Comissão de Honra do Presidente da República Portuguesa (2005–2015), Deputado da Assembleia Municipal de Ponte da Barca (2013–2017) e Deputado da Comunidade Intermunicipal CIM Alto Minho (2013–2017).

MÁRIO PASSOS

Nasceu em 1966, iniciou o seu percurso escolar na escola primária da Freguesia de Nine, do concelho de V. N. de Famalicão, terra dos seus pais, prosseguiu os estudos básicos nas escolas EB 2,3 Júlio Brandão e D. Sancho I, do mesmo concelho enquanto o ensino secundário foi realizado na Escola Secundária Carlos Amarante, em Braga.

Licenciou-se no ano de 1991, no curso de Física e Química, pela Universidade do Minho (UMinho), durante o qual foi monitor no departamento de Física, onde ministrou as unidades práticas de Electrónica e Electricidade e Magnetismo. Nesse ano, ingressou no Departamento de Química, no grupo disciplinar de Química Física da UMinho, iniciando, assim, a sua carreira académica como assistente estagiário. Em 1994, realizou as suas Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica e iniciou as suas Provas de Doutoramento, na mesma universidade, UMinho, em cooperação com o Instituto John Innes Centre Research Park, Norwich, em Inglaterra, tendo concluído o seu Doutoramento em Ciências no ano de 1998, tornando-se Professor Auxiliar.

Nesse período, desenvolveu a sua actividade de investigação nas áreas da construção de eléctrodos modificados por filmes poliméricos condutores e na síntese, caracterização e estudo comportamental de complexos metálicos. Efectuou dezenas de comunicações nacionais e internacionais, nomeadamente em Inglaterra, Espanha e França e publicou vários artigos científicos em revistas nacionais e internacionais onde se destacam o *Journal of Electroanalytical Chemistry*, o *Journal of the Chemical Society*, *Chemical Communications* e o *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1*. Participou, ainda, em projectos de investigação científica nacional, designadamente no âmbito da Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT. Foi responsável pela leccionação de diversas unidades curriculares, nomeadamente aos cursos de Física e Química, Química Controlo da Qualidade, Geologia e diversas Engenharias na UMinho. Orientou múltiplos estágios e participou em diversos

júris. Foi, ainda, Presidente da Comissão de Estágio da Licenciatura de Física e Química e secretário da Comissão Coordenadora de Estágios da mesma universidade. Integrou, também, o Grupo de Missão para a Qualidade do Ensino/Aprendizagem e participou na organização de Palestras, Seminários e Congressos.

Em 1999, envolveu-se na política local do concelho de Vila Nova de Famalicão, tendo participado ativamente, como coordenador, nas eleições autárquicas de dezembro de 2001. No ano seguinte, 2002, tornava-se, a primeira vez, Presidente da Comissão Politica de secção de Vila Nova de Famalicão. Desde essa data pertenceu, também, a diversas Comissões Políticas da Distrital de Braga. Em 2004, é convidado pelo XV Governo Constitucional da República Portuguesa, para Delegado Regional de Braga do Instituto Português da Juventude. Neste período, implementou e desenvolveu diversos programas, direccionados aos jovens e ao tecido associativo do distrito de Braga, em temáticas como a empregabilidade, a inovação, o empreendedorismo, o associativismo, o voluntariado, entre outras.

Torna-se, entretanto, Professor Convidado, da Cooperativa de Ensino Superior e Politécnico Universitário - CESPU.

Em 2009, é eleito Vereador, da Câmara Municipal de Vila Nova de Famalicão, onde se encontra até à presente data, tendo exercido funções em cerca de dez pelouros da governação autárquica. Desde cedo foi dirigente de associações de natureza ambiental e social no concelho de Vila Nova de Famalicão.

Sistemas Fotovoltaicos

Fundamentos sobre Dimensionamento

Sobre a obra

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) são uma das fileiras das energias renováveis mais importantes em Portugal e no mundo. A obra, além de versar aspectos de índole geral sobre SFV, contém informação sobre materiais semicondutores e as suas propriedades optoelectrónicas e apresenta, com detalhe, metodologias de cálculo adstritas ao dimensionamento de SFV autónomos, SFV ligados à rede e SFV para bombagem de água, através da resolução numérica de casos de estudo específicos.

Sobre os autores

Joaquim Carneiro

Nasceu em 1966. Frequentou o ensino secundário na Escola Secundária de Ponte da Barca. Doutorado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e Licenciado em Física e Química pela Universidade do Minho (UMinho). Foi vice-director do Núcleo de Investigação em Tecnologias de Energias Renováveis da UMinho, coordenador do Grupo de Revestimentos Funcionais (GRF) do Centro de Física (CF) da UMinho, membro do Conselho Científico da Escola de Ciências da UMinho e membro da Comissão Directiva do Centro de Física onde desenvolve actualmente a sua actividade de investigação científica centrada nas áreas da engenharia de superfícies, nanotecnologia, revestimentos funcionais, energia e materiais fotocatalíticos. Exerceu o cargo de Chefe de Departamento de Políticas de Investigação e de Pós-graduação do ISPTEC/SONANGOL (Sociedade Nacional de Combustíveis de Angola), Luanda. É Professor responsável pela leccionação de Unidades Curriculares de Física a diversos cursos de Mestrado Integrado em Engenharia e de Energias Renováveis do Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente, ministrados na UMinho. É Professor visitante na Jiangsu University of Science and Technology, China. É autor de mais de 100 artigos científicos publicados em revistas internacionais com revisão por pares e factor de impacto, 6 capítulos de livros, 1 patente e membro do Conselho Editorial de revistas científicas internacionais. Participou e liderou diversos projectos de investigação científica com financiamento nacional e europeu (FCT, ADI, FP6, FP7, QREN), tendo também coorganizado e participado em diversas conferências e comités técnico-científicos nacionais e internacionais. Foi membro da Comissão de Honra do Presidente da República Portuguesa (2005–2015), Deputado da Assembleia Municipal de Ponte da Barca (2013–2017) e Deputado da Comunidade Intermunicipal CIM Alto Minho (2013–2017).

Mário Passos

Nasceu em 1966. Viveu na freguesia de Nine, em V. N. de Famalicão, onde frequentou o 1º ciclo. Realizou o ensino básico no mesmo concelho e o ensino secundário em Braga. Licenciou-se em 1991, no curso de Física e Química, pela Universidade do Minho (UM), onde foi monitor no departamento de Física. Ingressou no Departamento de Química, no grupo de Química Física da UM, iniciando, assim, a sua carreira académica. Realizou as Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica e as Provas de Doutoramento em Ciências, em cooperação com o Instituto John Innes Centre, Norwich, Inglaterra, tornando-se Professor Auxiliar na mesma universidade, UM. Nesse período, a sua actividade de investigação centrou-se nas áreas da construção de eléctrodos modificados por filmes poliméricos condutores e na síntese, caracterização e estudo comportamental de complexos metálicos. Efectuou dezenas de comunicações e publicou vários artigos científicos em revistas nacionais e internacionais. Foi responsável pela leccionação de diversas unidades curriculares, nomeadamente aos cursos de Física e Química, Química, Geologia, e diversas Engenharias. Orientou múltiplos estágios e participou em diversos júris. Foi, ainda, Presidente da Comissão de Estágio da Licenciatura de Física e Química e secretário da Comissão Coordenadora de Estágios da UM. Em 1999, envolveu-se activamente na política local do concelho de Vila Nova de Famalicão. Em 2004, é convidado pelo XV Governo Constitucional da República Portuguesa, para Delegado Regional de Braga do Instituto Português da Juventude e, em 2009, é eleito Vereador da Câmara Municipal de Vila Nova de Famalicão, até à presente data, tendo exercido funções em cerca de dez pelouros da governação autárquica. Torna-se, entretanto, Professor Convidado, da Cooperativa de Ensino Superior e Politécnico Universitário – CESPU.

Parceiro de Comunicação

renováveismagazine
revista técnico-profissional de energias renováveis

Também disponível em formato *e-book*

ISBN: 978-989-901-720-7

www.**engebook**.pt

engebook