

Universidade do Minho
Escola de Ciências

João Pedro Costeira Vieira

**Desenvolvimento de um kit didático de
energia solar fotovoltaica**



Universidade do Minho
Escola de Ciências

João Pedro Costeira Vieira

Desenvolvimento de um kit didático de energia solar fotovoltaica

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente - Energia

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Joaquim Carneiro

Professor Doutor Vasco Teixeira

Outubro de 2017

DECLARAÇÃO:

Nome: João Pedro Costeira Vieira

Endereço Eletrónico: joacosteirav92@gmail.com Telefone: (+351 914832122)

Número de identificação civil: 14096909

Título da Tese de Mestrado: Desenvolvimento de um Kit Didático de Energia Solar Fotovoltaica

Orientadores:

Professor Doutor Joaquim Carneiro

Professor Doutor Vasco Teixeira

Ano de conclusão: 2017

Ciências e Tecnologias do Ambiente - Energia

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE, APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO QUE A TAL SE COMPROMETE

Universidade do Minho, 31 de Outubro de 2017

AGRADECIMENTOS

Todo o processo que se desenrolou a partir da realização da presente dissertação não teria sido possível sem a ajuda de diversas pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta jornada extremamente gratificante de desenvolvimento pessoal, a todas elas expresso a minha sincera gratidão.

Ao meu pai, Manuel Vieira, o meu profundo reconhecimento pela sua disponibilidade, entrega e dedicação fundamentais à elaboração desta dissertação.

Ao Doutor Joaquim Carneiro, meu orientador, o meu sincero agradecimento pelos sábios conselhos, sugestões e correções. Por ter colocado à minha disposição todas as ferramentas essenciais para a realização deste trabalho.

À minha namorada e melhor amiga Beatriz Loureiro, por ser o meu alicerce e por toda a paciência e entrega.

Ao meu colega Pedro Dias, por ser o meu fiel parceiro em toda esta jornada.

Ao Doutor Fernando Alexandre e a toda a equipa TecMinho, pelo financiamento da viagem ao University Start-Up World Cup.

À Doutora Helena Moura, por toda a ajuda e profícuos conselhos.

A todos os tutores do IdeaLab e do Laboratório de empresas, especialmente à Professora Doutora Elisabete Sá, Professora Doutora Beatriz Casais e ao Doutor António Paraíso, pela partilha dos seus valiosos conhecimentos e conselhos determinantes para o desenvolvimento do projeto enquanto ideia de negócio.

Ao meu amigo Human Shojaee e a toda a equipa da Venture Cup por serem os responsáveis por uma das melhores experiências da minha vida.

RESUMO

Nos últimos anos as energias renováveis têm ganho importância crescente no panorama energético nacional e europeu, contribuindo em larga escala para uma consecução de cenários de maior sustentabilidade. Desde o início da década tem sido tomadas medidas que visam um crescimento de práticas sustentáveis que permitam aos países um crescimento estruturado e que se possa gradualmente diminuir a utilização de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera. Portugal é um dos melhores exemplos europeus de práticas sustentáveis no que concerne à utilização de fontes de origem renovável para a produção de energia. Apesar de atualmente ter uma expressão diminuta na produção de eletricidade a nível nacional, a energia solar fotovoltaica possui um elevado potencial de crescimento, uma vez que permite a produção de eletricidade através da utilização da energia solar e os preços dos seus componentes, nomeadamente dos painéis fotovoltaicos de silício na vertente monocristalina e policristalina, tem vindo a decrescer de ano para ano.

Neste cenário, existe o interesse e a necessidade de dotar os nossos alunos portugueses de competências nos vários domínios da energia renovável, designadamente a fileira referente ao solar fotovoltaico. Neste contexto, foi concebido um kit didático de energia solar fotovoltaica que permitirá aos alunos do ensino secundário, mas também do ensino profissional e universitário, a obtenção de conhecimentos não só na área da energia, mas também na área da eletrónica e programação. A utilização deste kit permite a realização de um conjunto de experiências de forma rápida, eficaz e didática, permitindo ainda uma diminuição de material que é correntemente utilizado, na medida em que não utiliza equipamentos como multímetros para a medição de grandezas físicas como tensão e corrente elétrica. O desenvolvimento da presente dissertação tem como objetivo final a criação de uma *spin-off* da Universidade do Minho, tendo já permitido ao autor vencer um prémio de empreendedorismo nacional, participar numa competição mundial de *start-ups* em Copenhaga e receber um prémio atribuído pela organização do evento.

Palavras-Chave: Kit, Energia, Empreendedorismo, Inovação, Educação;

ABSTRACT

Over the last few years, the renewable energy sources have gained increased importance in Portugal and Europe's energy landscape, contributing in large scale to a greater sustainability. Since 2010, measures have been taken to ensure sustainable practices allowing a structured growth while decreasing fossil fuel utilization and, consequently, decreasing carbon dioxide emissions to the atmosphere. Portugal is one of Europe's best examples of sustainable practices on renewable energy utilization for electricity production. Although solar energy remains unimportant in Portugal's electricity production, the solar photovoltaic energy possesses a high growth potential, because it allows the production of electricity while using the radiation intake from the sun and, the decreased cost of manufacturing of photovoltaic system components, like silicon panels, are making photovoltaic system more accessible to the population.

The time has come to provide students with proper skills in renewable energy technologies, including solar photovoltaic energy. A solar photovoltaic didactic kit was designed and conceived to ensure that students on various levels of education like secondary, technological and university, are provided with the proper know-how in areas like energy, electronics but also programming. This equipment allows students to conduct practical experiments in a fast, effective and didactic manner. This product is also compact because it is lighter and uses less equipment than those standardized kits used in schools and universities. The goal of this master's dissertation is to create a University of Minho's spin-off company, specialized in the development of technical energy equipment for schools and STEM (*Science, Technology, Engineering and Math*) toys for children. This project already allowed the author to win an entrepreneurship award at national level, to compete in a worldwide competition of university start-ups in Copenhagen and receive an award granted by the organization of the event.

KEYWORDS: KIT, ENERGY, DIDACTIC, ENTREPRENEURSHIP, EDUCATION;

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Visão Geral da energia no Mundo.....	2
1.3 Energia solar fotovoltaica	4
1.4 Panorama Energético Nacional	5
1.5 Energia 2020	7
1.6 Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis.....	9
1.7 Objetivos e trajetória nacional para as energias renováveis	11
2. O RECURSO SOLAR.....	13
2.1 Balanço energético Sol-Terra.....	13
2.2 A atmosfera terrestre	14
2.3 Radiação Solar	17
3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	21
3.1 Semicondutores: Propriedades e funcionamento	21
3.1.1 Estrutura atômica.....	21
3.1.2 Semicondutores intrínsecos.....	22
3.1.3 Semicondutores extrínsecos.....	25
3.1.4 Junção p-n	26
3.2 Célula fotovoltaica: Parâmetros base.....	31
3.3 Produção de materiais fotovoltaicos	38

3.3.1	Células de Primeira geração	38
3.3.2	Células de Segunda geração.....	39
3.3.3	Células de Terceira geração.....	40
3.4	Associações de módulos fotovoltaicos	42
3.4.1	Ligação de módulos (ou células) em série.....	42
3.4.2	Ligação de módulos (ou células) em paralelo	43
4.	DESENVOLVIMENTO DE UM KIT DIDÁTICO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	45
4.1	Contextualização.....	45
4.2	Identificação dos Fornecedores	46
4.3	Materiais utilizados	47
4.3.1	Células fotovoltaicas	47
4.3.2	Desenvolvimento do Software Arduino.....	49
4.3.2.1	Placa de expansão multifunções v3.0	50
4.3.2.2	Microcontrolador ATmega328P	51
4.3.2.3	Sensor de corrente bidireccional INA219	54
4.3.2.4	LCD IIC 2004.....	55
4.3.2.5	Regulador de tensão 5V.....	56
4.3.2.6	Outros materiais utilizados	57
5.	EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS.....	59
5.1	Experiência 1: Medição da Irradiância de diferentes fontes de luz	59
5.2	Experiência 2: Associação de células fotovoltaicas ligadas em série	62
5.3	Experiência 3: Curva IV característica de uma célula fotovoltaica	66
6.	COMPACT ENERGY KITS	71
6.1	IdeaLab – Laboratório de Ideias de Negócio	71
6.2	Laboratório de Empresas	71
6.3	Venture Cup Portugal.....	72
6.4	University Start-Up World Cup	73
6.5	Perspetivas futuras	75
6.6	Resumo do plano de negócios desenvolvido	75
6.6.1	Sumário Executivo	75
6.6.2	Segmentos de Mercado	76

7. CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	78

LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS

EE	Espectro Eletromagnético
FV	Fotovoltaico
SC	Semicondutor
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
UE	União Europeia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Produção de energia por região em 2014 (*EU energy in figures, 2016*)

Figura 1.2 - Produção de eletricidade por combustível em 2014 (*EU energy in figures, 2016*)

Figura 1.3 - Variação das emissões de CO₂ desde 1995 até 2016, por região (*EU energy in figures, 2016*)

Figura 1.4 - Capacidade solar fotovoltaica cumulativa instalada em GW (*BP Statistical Review of World Energy, 2017*)

Figura 1.5 - Produção de Energia por setor (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*)

Figura 1.6 - Consumo final de energia em Portugal entre 1973 e 2013 (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*)

Figura 1.7 - Quota das energias renováveis no consumo final de energia para os 28 Estados-Membros da UE, Islândia e Noruega (Fonte: EUROSTAT)

Figura 2.1 - Fluxo contínuo de energia natural como energia renovável, em terawatts (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

Figura 2.2 - Os componentes do sistema climático (Booker, E e Grondelle, R., 2011)

Figura 2.3 - (b) A órbita da Terra em torno do Sol, (c) Inclinação da Terra a 23,5° (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

Figura 2.4 - Espectro solar extraterrestre comparado ao espectro emitido por um corpo negro a 5778 K (Crawley, G 2016))

Figura 2.5 - Variação da Irradiância ao longo do ano (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

Figura 2.6 - Distribuição geográfica da Irradiância (kWh/m²) (Crawley, G 2016)

Figura 2.7 - Piranómetro. (1) – Absorvedor de corpo negro. (2) Vidro protetor. (Chen, C 2011)

Figura 3.1 - (a) Estrutura diamante de uma célula cristalina de Si, (b) Estrutura atómica de uma parte de um cristal de Si (Smets, A. *et al*, 2016)

Figura 3.2 - Representação bidimensional da ligação covalente da rede cristalina de Si puro (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.3 - Quebra de ligação entre dois átomos de Si puro, resultando na criação de um elétron livre e de uma lacuna (<https://www.thenakedscientists.com/articles/features/catching-energy-sun>)

Figura 3.4 - Esquema de diagrama de bandas de energia de um semicondutor de Si (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.5 - Representação esquemática do movimento dos elétrons e das lacunas, quando o cristal é sujeito a uma diferença de potencial elétrico (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.6 - Processo de dopagem ilustrado através de um modelo bidimensional. (a) Um átomo de fosforo (P) substitui um átomo de Si na estrutura, resultando num átomo ionizado positivamente e um elétron livre. (b) Um átomo de Boro (B) substitui um átomo de Si, resultando num átomo de B negativamente ionizado e uma lacuna (Smets, A. *et al*, 2016).)

Figura 3.7 - Esquema de representação de uma junção p-n. A concentração de elétrons e lacunas é representada respetivamente pela cor azul e vermelha. O vetor campo elétrico é mostrado na parte inferior da figura. São também mostradas as forças electroestáticas e as “forças de difusão” que são exercidas nos elétrons e nas lacunas e que tendem a movimentar estes portadores de carga (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.8 - Representação esquemática da movimentação de pares elétron-lacuna através da região de depleção de um díodo de junção p-n sujeito à ação da luz (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.9 - Representação esquemática do excesso de transportadores de carga após movimentação dos pares elétron-lacuna através da região de depleção de um díodo de junção p-n. (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.10 - Representação esquemática da curva característica IV de um díodo de junção p-n sob condições de iluminação (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.11 - Exemplo de uma célula FV de silício (Goetzberger, A. Hebling, C. e Schock, H. 2003)

Figura 3.12 - Constituição interna de uma célula FV de silício (Goetzberger, A. Hebling, C. e Schock, H. 2003)

Figura 3.13 - Circuito equivalente de uma célula solar. A célula solar pode ser representada por uma fonte de corrente ligada em paralelo com o díodo da junção p-n. A fonte de corrente é a corrente fotogerada pela radiação solar incidente (Chen, C. 2011)

Figura 3.14 - Representação gráfica da curva característica corrente-tensão de uma célula FV de silício (Carneiro, 2010)

Figura 3.15 - Representação esquemática de um circuito elétrico equivalente de uma célula FV em condição de curto-circuito (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.16 - Representação esquemática do circuito elétrico equivalente para uma célula FV em condição de curto-circuito (Carneiro, J. 2010)

Figura 3.17 - Curva de potência e curva IV de uma célula FV
(<http://myelectrical.com/notes/entryid/225/photovoltaic-pv-electrical-calculations>)

Figura 3.18 - Estrutura típica de um SC de filme fino de CdTe (Chopra, K., Paulson, P. e Dutta, V. 2004)

Figura 3.19 - (a) células de uma única junção (*single-junction*); e (b) uma célula de múltipla-junção (*multi-junction*) (Smets, A. *et al.* 2016)

Figura 3.20 - Representação esquemática do símbolo utilizado para um módulo fotovoltaico (Carneiro, J. 2010b)

Figura 3.21 - Representação esquemática de n módulos PV em serie (Carneiro, J. 2010b)

Figura 3.22 - Representação esquemática da associação em paralelo de módulos PV (Carneiro, J. 2010b)

Figura 4.1 - Logo do website Banggood” (<https://www.banggood.com/>)

Figura 4.2 (a) Célula fotovoltaica de 0.8W; (b) Célula fotovoltaica de 4.5W;

Figura 4.3 - Logo da Arduino (https://www.arduino.cc/arduino_logo.png)

Figura 4.4 - (a) Placa de expansão v3.0 conectada com o (b) microcontrolador ATmega328P

Figura 4.5 -Sensor de corrente INA219

Figura 4.6 -Display do kit didático de energia solar fotovoltaica

Figura 4.7 - Regulador de tensão 5 V

Figura 5.1 - Protótipo do kit didático de energia solar fotovoltaica integrando a associação de células FV ligadas em série

Figura 5.2 - Protótipo do kit didático de energia solar fotovoltaica com célula a)

Figura 6.1 - Sessão de apresentação de trabalhos do Laboratório de empresas

Figura 6.2 - Entrega de prémio de vencedor da categoria de *GreenTech* da Venture Cup Portugal 2017, ao lado do *Senior Vice-President* da Vestas Jorge Magalhães

Figura 6.3 - Participantes no *University Start-Up World Cup*, junto com o apresentador da final Nick Hardy
(Fonte: *Venture Cup*)

Figura 6.4 - Certificado do prémio Green Initiative Award atribuído pela organização do University Start-Up World Cup

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações da célula tipo (a)

Tabela 4.2 – Especificações da célula tipo (b)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O Sol é a maior e inesgotável fonte de energia à escala da vida humana que tem sido utilizada ao longo de toda a história de vida da Terra, quer de forma direta quer de forma indireta. Os combustíveis fósseis não são mais do que o armazenamento desta energia ao longo de milhões de anos. A utilização desta forma de energia armazenada tem sido feita de forma insustentável nos últimos 100 anos, o que tem conduzido inevitavelmente à procura sistemática de fontes de energia alternativas, tais como por exemplo a energia solar, eólica, biomassa, hidroelétrica, entre outras. Com o aumento do consumo global de energia a ocorrer a um ritmo alarmante, urge a necessidade de encontrar formas de energias sustentáveis que possam ser implementadas e que permitam a redução da libertação de gases com efeito estufa, decorrentes da combustão de hidrocarbonetos. Com efeito, cerca de 80% das emissões de gases com efeito estufa na União Europeia (UE) estão relacionadas com a energia (Energia 2020: Estratégia para uma energia competitiva, sustentável e segura). A energia solar fotovoltaica (FV) surge então como alternativa viável para produção de energia elétrica através da utilização de painéis FV que convertem a energia solar em energia elétrica, utilizando um processo que será abordado mais adiante nesta dissertação. Em 2014, as energias renováveis eram responsáveis pela produção de 22,3% da eletricidade a nível mundial, sendo que 3,9% são provenientes da energia solar, eólica ou outra (*EU energy in figures*, 2016). Para 2020, Portugal estabeleceu como objetivo alcançar o valor de 31% de produção de energia (*EU energy in figures*, 2016) a partir de energias renováveis. Sendo a energia solar FV uma das energias renováveis com maior potencial de crescimento em Portugal, é fundamental que os estudantes conheçam as suas potencialidades, o seu funcionamento e as suas limitações.

O objetivo desta dissertação traduz-se na melhoria da educação dos estudantes na temática adstrita à ciência e engenharia da energia solar FV através da abordagem e reforço dos conteúdos teóricos que lhe são inerentes bem como a implementação de uma componente prática que visará a construção de um kit didático de energia solar FV que propiciará ferramentas importantes a quem se inicia nesta temática. Ao longo deste capítulo será abordado o panorama energético mundial e nacional, bem como as medidas adotadas em Portugal para fomentar a utilização de energias renováveis. No capítulo 2 será “desmistificado” o Sol como fonte energética. No capítulo 3 serão abordados os aspetos fundamentais referentes à energia solar FV, essenciais para a compreensão do tema central desta dissertação. No capítulo 4 são apresentados e explicados os componentes que integram o protótipo do kit didático de

energia solar FV. No capítulo 5 são apresentadas as fichas de experiências idealizadas bem como os resultados obtidos após a sua realização. Por fim, no capítulo 6 é abordado o desenvolvimento da presente dissertação enquanto ideia de negócio, explicando as várias fases de fortalecimento do projeto.

1.2 Visão Geral da energia no Mundo

A produção de energia no mundo tem aumentado a cada ano, com a exceção dos 28 países da UE, onde se tem verificado uma diminuição, contrariando a tendência verificada nas restantes regiões. Desde 1995 até 2014, a produção de energia na UE passou de 966 para 775 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), enquanto que na China a produção aumentou de 1064 para o 2593 milhões de tep, sendo responsável por 18,8% da produção de energia a nível mundial, contra apenas 5,6% da UE, tal como se pode constatar através da análise do gráfico representado na figura 1.1. O petróleo e os seus derivados continuam a ser o principal combustível utilizado, representando 31,2% da produção de energia, seguindo-se os combustíveis sólidos, como o carvão, com 28,8%, o gás natural com 21,2% e as energias renováveis com uma quota de 13,7% na produção de energia.

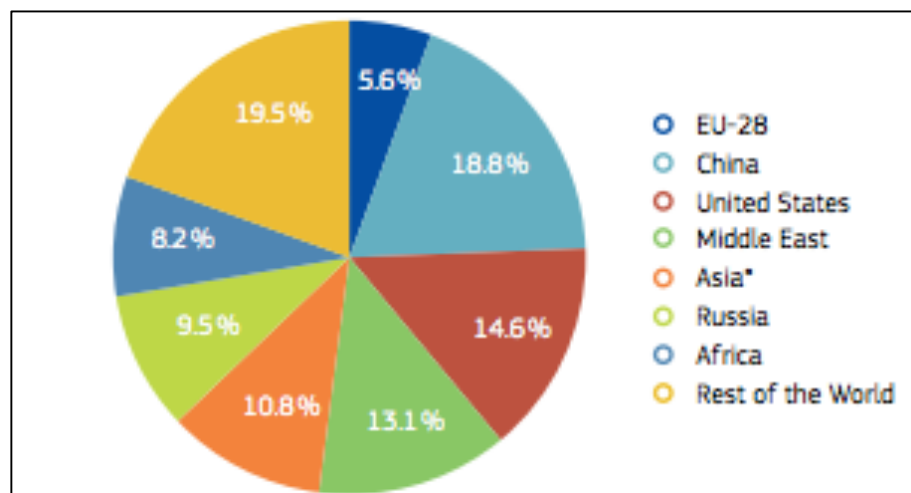


Figura 1.1 – Produção de energia por região em 2014 (*EU energy in figures, 2016*)

Relativamente à geração de eletricidade pode-se verificar, através da análise do gráfico representado na figura 1.2, que os combustíveis sólidos são responsáveis por mais de 40% do total, enquanto que o gás natural e as energias renováveis são responsáveis por 21,6% e 22,3% respetivamente. É importante realçar que a produção de eletricidade proveniente de energias renováveis tem vindo a aumentar rapidamente. Na verdade, desde 1995 até 2014, a produção de eletricidade proveniente de energias renováveis duplicou, passando de 2637 TWh (Terawatt-hora) para 5323 TWh (*EU energy in figures, 2016*). A

energia eólica e solar tem contribuído significativamente para este aumento, passando de uns meros 10 TWh para 928 TWh em menos de 20 anos.

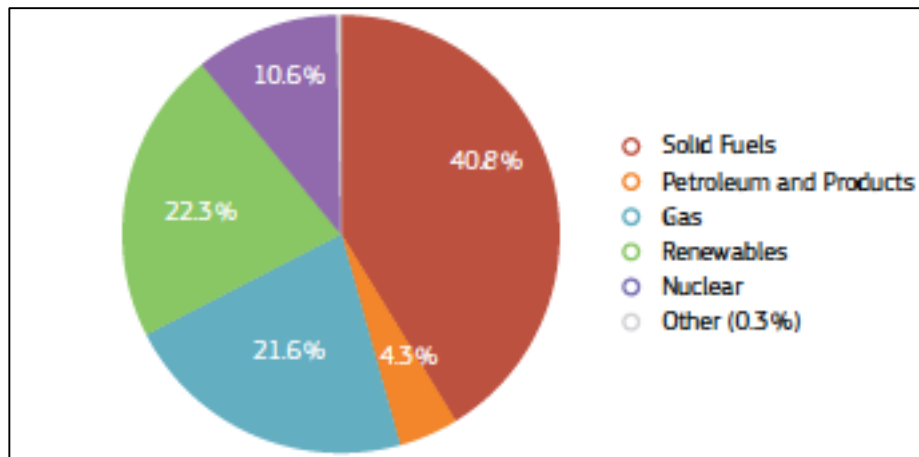


Figura 1.2 - Produção de eletricidade por combustível em 2014 (*EU energy in figures, 2016*)

Em relação às emissões de dióxido de carbono (CO₂), a China destaca-se manifestamente dos restantes países, sendo responsável por 27,4% das emissões à escala mundial, seguindo-se os Estados Unidos da América com 15,7% e a Ásia (excluindo a China) com 11,5% (*EU energy in figures, 2016*). Pode-se observar através do gráfico representado na figura 1.3 que a China triplicou as suas emissões de dióxido de carbono desde 2000, passando das 3332 milhões de toneladas para as 9114 milhões de toneladas. No sentido inverso, a UE tem vindo a diminuir as emissões, com o objetivo de atingir as metas estabelecidas para 2020, valor 20% inferior aos níveis existentes pré-1990.

As importações do petróleo e do gás natural são provenientes maioritariamente da Rússia e Noruega. No caso do gás natural, a Rússia é responsável por 37,5% das importações enquanto que a Noruega representa 31,6%. Em relação ao gás natural, a Rússia mantém a posição de liderança com 30,4%, seguida pela Noruega com 13,1%, Nigéria com 9,1% e Arábia Saudita com 8,9% (*EU energy in figures, 2016*). No que se refere às importações de combustíveis sólidos, a Rússia mantém a sua posição de liderança com 29%, seguindo-se a Colômbia com 21,2% e Estados Unidos da América com 20,5% (*EU energy in figures, 2016*).

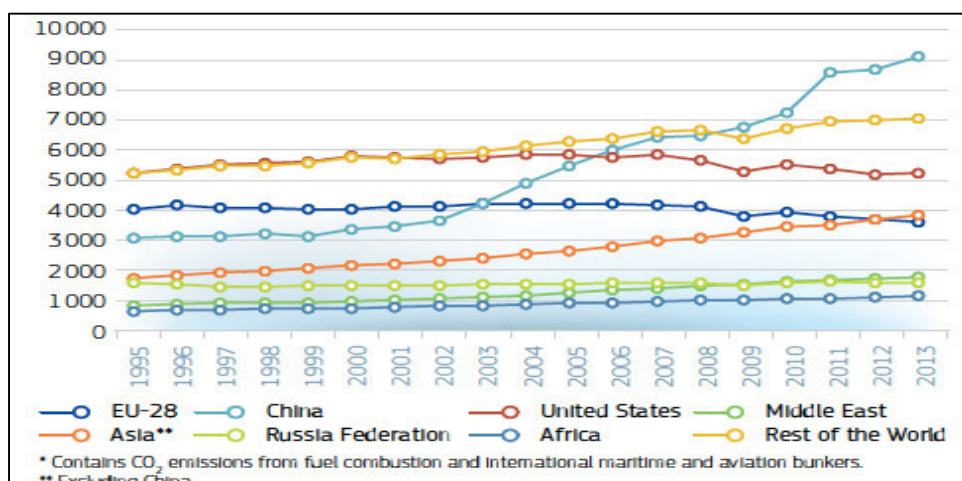


Figura 1.3 - Variação das emissões de CO₂ desde 1995 até 2016, por região (EU energy in figures, 2016)

1.3 Energia solar fotovoltaica

Em 2016, foram instalados mais 75 GW (Gigawatt) de potência global em energia solar, perfazendo um total de 301 GW em todo o mundo (BP Statistical Review of World Energy, 2017). Através da análise do gráfico mostrado na figura 1.4, é possível observar-se que o país que registou uma maior subida em termos de potência instalada foi a China (34.5 GW) e os EUA (14.7 GW), perfazendo juntos dois terços da subida registada globalmente. A China lidera também em termos de capacidade cumulativa instalada, com um total de 78.1 GW, representando 26% do total, seguida pelo Japão (42.8 GW), pela Alemanha (41.3 GW) e pelos Estados Unidos da América (40.3 GW). Apesar da quota global de energia solar se manter relativamente baixa (1.3%), tem havido um crescimento significativo no setor, já que a quota duplicou em apenas 3 anos. A energia solar começa a ter um impacto significativo no panorama energético global, já que tem contribuído com 20% do crescimento da potência energética global instalada em 2016.

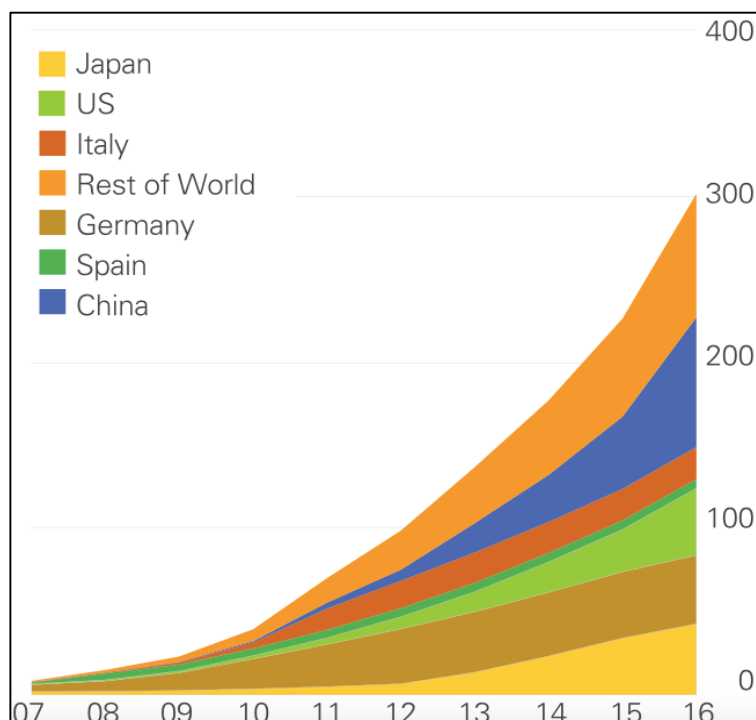


Figura 1.4 – Capacidade solar FV cumulativa instalada em GW (BP Statistical Review of World Energy, 2017)

1.4 Panorama Energético Nacional

Em 2014, Portugal produziu 5,6 milhões de tep de energia. Cerca de 52,2% é proveniente de biocombustíveis e resíduos, 23,9% dos aproveitamentos hidroelétricos, 18,5% da fileira eólica, 3,1% da geotérmica e 2,3 da fileira solar (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*). No gráfico representado na figura 1.5 é apresentada a produção de energia por setor, entre 1973 e 2014. Relativamente à oferta total de energia primária, o valor atingiu 21,1 milhões de tep em 2014. Os combustíveis fósseis representam 74,3% da oferta total de energia primária, incluindo petróleo (45,1%), gás natural (16,4%) e carvão (12,7%). As energias renováveis representam 25,4%, incluindo biocombustíveis e resíduos (12,6%), hidroelétrica (6,4%), eólica (4,9%), geotérmica (0,8%) e solar (0,6%). Os restantes 0,4% são derivados das importações de eletricidade (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*).

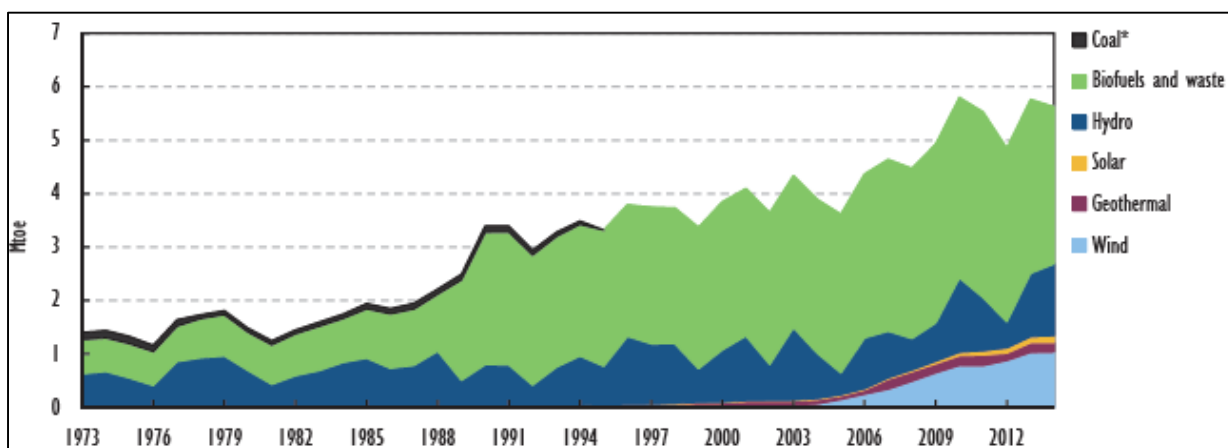


Figura 1.5 - Produção de Energia por setor (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*)

O consumo final de energia chegou aos 16,2 milhões de tep em 2013, representando cerca de 75% da oferta total de energia. Através da análise do gráfico apresentado na figura 1.6 pode-se observar que o consumo final de energia tem vindo a diminuir a partir de 2006 e que entre os anos de 2003 e 2013 o consumo de energia final caiu cerca de 18,9% (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*). A indústria e o transporte são os setores com maior consumo de energia, representando 36,7% e 33,3% do consumo de energia total, respetivamente. O setor residencial representa 16,3%, enquanto que o comércio e os serviços (incluindo agricultura e pesca) representam 13,7% (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*). Importa realçar que entre 2003 e 2013, o setor industrial reduziu o seu consumo em 26,7%. Durante o mesmo período de tempo, o consumo no setor dos transportes diminuiu 16,2%. Por outro lado, o setor residencial e comercial reduziu o seu consumo 15,3 e 3,5% respetivamente. Enfatiza-se que no setor da indústria foram incluídos os combustíveis que são usados como matéria-prima nos diferentes subsectores e que não são utilizados como combustível ou transformados noutra combustível.

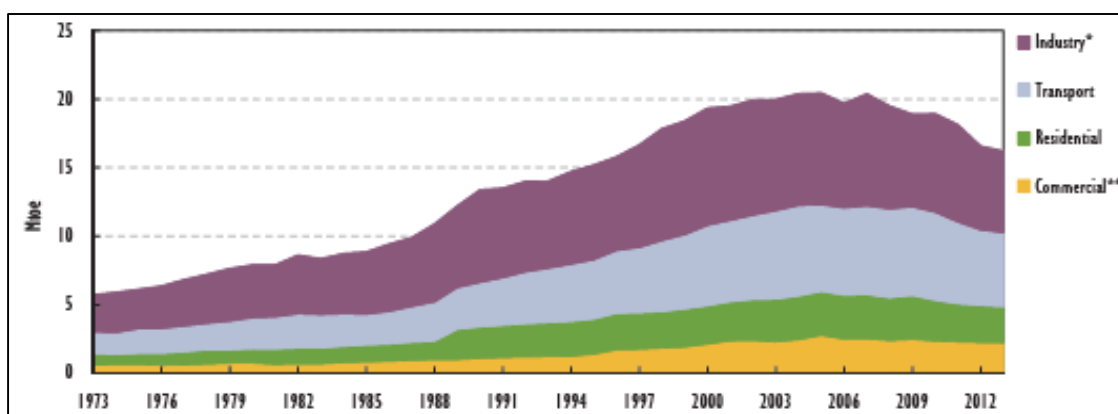


Figura 1.6 - Consumo final de energia em Portugal entre 1973 e 2013 (*Energy Policies of IEA countries: Portugal, 2016*)

1.5 Energia 2020

Em 2010, foi aprovada a nova estratégia europeia para o emprego e crescimento através do programa “Europa 2020”. As principais prioridades que nele estão consagradas são o crescimento inteligente, sustentável e inclusivo (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy, 2011*). A estratégia visa ajudar a Europa a recuperar da crise, quer a nível interno quer a nível internacional de modo a incentivar a competitividade, a produtividade, o potencial de crescimento, coesão social e a convergência económica (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy, 2011*). Por isso, a prioridade consiste na criação de condições para que os estados-membros possam crescer de forma sustentável, através da contenção da despesa e o aumento do potencial de investimento. O Conselho Europeu estipula então cinco grandes objetivos comuns que pautarão a ação dos Estados-Membros nas mais diferentes matérias estipuladas. Estes objetivos são:

- Aumentar para 75% a taxa de emprego para os cidadãos com idades compreendidas entre os 20 e os 64 anos, através de uma maior participação dos jovens, dos trabalhadores mais experientes e de uma maior articulação e integração com os migrantes legais;
- Melhorar as condições para a investigação e desenvolvimento (I&D), com o objetivo de elevar para 3% do PIB o nível de investimento conjugado dos setores público e privado neste domínio;
- Reduzir as emissões de gases com efeito estufa em 20% relativamente aos níveis de 1990. Aumentar para 20% a percentagem das energias renováveis no consumo energético final e ainda alcançar um incremento de 20% na eficiência energética;
- Melhorar os níveis de educação, principalmente através da redução da taxa de abandono escolar para cifras inferiores a 10% e aumentar para 40% a percentagem de adultos entre os 30-34 que completaram o ensino superior ou equivalente;
- Promover a inclusão social, em particular através da redução da pobreza, permitindo retirar 20 milhões de pessoas do risco de pobreza e de exclusão;

Os Estados-Membros devem então implementar as medidas necessárias para a consecução dos objetivos estabelecidos, em constante articulação com a Comissão Europeia, ultimando os objetivos nacionais e as suas limitações estruturais.

Neste cenário, foi elaborado o plano *Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*. Sendo um dos principais desafios da UE, são necessárias medidas que permitam aos Estados-Membros orientar os sistemas energéticos para uma via mais segura e sustentável. Entre 2010 e 2020

será necessário realizar investimentos no domínio da energia da ordem de mil milhões de euros, quer para diversificar os recursos existentes e substituir equipamentos quer para satisfazer as necessidades energéticas em constante evolução (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011). Não obstante a importância dos objetivos da política energética, continuam a verificar-se graves lacunas na sua execução. O mercado interno de energia continua fragmentado e não atingiu ainda o seu potencial em termos de transparência, acessibilidade e seleção (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011). Por outro lado, subsistem ainda inúmeros entraves a uma concorrência aberta e leal e a segurança do aprovisionamento interno de energia é prejudicada por atrasos nos investimentos e no progresso tecnológico (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011). Atualmente, cerca de 45% da produção de eletricidade europeia ainda tem por base fontes de energia hipocarbónicas, principalmente a energia nuclear e hidroelétrica. Algumas regiões da UE poderão ainda perder mais de um terço da sua capacidade de produção até 2020 devido ao tempo de vida útil limitado dessas instalações, o que obrigará à substituição e expansão da capacidade existente (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011).

Esta estratégia pretende reequilibrar as ações em matéria de energia a favor de uma política baseada na procura, separando o crescimento económico do consumo de energia. Os setores dos transportes e da construção devem adotar políticas ativas de poupança de energia e proceder à diversificação, privilegiando fontes de energia não poluentes. Deverão ser criadas condições de mercado que fomentem a poupança de energia e um maior investimento em fontes hipocarbónicas, a fim de explorar uma grande variedade de fontes de energias renováveis centralizadas e distribuídas, bem como tecnologias-chave para o armazenamento e a mobilidade elétrica (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011). A política energética revela-se assim um instrumento fundamental para que o cumprimento dos objetivos estipulados a fim de contribuir eficazmente para a obtenção de um crescimento inteligente e sustentável. Esta nova estratégia incide em cinco prioridades chave (*Energy 2020 – Strategy for competitive, sustainable and secure energy*, 2011) e que se enunciam em seguida:

1. Uma Europa energeticamente eficiente;
2. Um mercado energético pan-europeu e integrado;
3. Capacitação dos consumidores e garantia do mais elevado nível de segurança intrínseca e extrínseca;
4. Alargamento da liderança europeia na tecnologia e inovação energética;
5. Reforçar a dimensão externa do mercado energético da UE.

A eficiência energética é um dos objetivos centrais para 2020, afigurando-se ainda um fator fundamental para o cumprimento dos objetivos climáticos e energéticos a longo prazo. Os estados-membros deverão ser capazes de tomar medidas que dissociem o crescimento económico do consumo energético. A eficiência energética é a forma mais custo-eficiente para reduzir as emissões, melhorar a segurança energética e a competitividade, tornar o consumo de energia mais acessível e criação de emprego. Deste modo, as ações deverão abarcar domínios pertinentes da governação política, designadamente aqueles que se referem à educação e formação, com o objetivo de alterar certos padrões comportamentais. As ações deverão abranger toda a cadeia energética, desde a produção, transmissão e distribuição, até ao consumo final. Infelizmente ainda se está longe de atingir o objetivo de 20% de poupança de energia. Por isso, deverão ser explorados os setores com maior potencial de poupança de energia, designadamente os que se referem aos edifícios e aos transportes. Importa ainda reforçar-se a competitividade industrial e assegurar uma indústria mais eficiente, reforçar-se a eficiência no aprovisionamento energético e aproveitar-se ao máximo os Planos de Ação Nacionais.

1.6 Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

A Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, estabeleceu que os Estados-Membros desenvolvessem e apresentassem à Comissão Europeia um Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER). É reconhecido que Portugal apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de energias renováveis. Esse reconhecimento culminou com o crescente peso que as fontes de energia renovável (visando sobretudo a produção de energia elétrica) têm vindo a alcançar nos vários setores de atividade, nomeadamente a indústria, transporte e doméstico. Como Portugal não dispõe de grandes recursos ou reservas fósseis conhecidas, tendo inclusivamente alguns partidos políticos e autarquias recentemente criticado a potencial prospeção de hidrocarbonetos que tem sido realizada por algumas empresas (<http://www.pan.com.pt/comunicacao/noticias/item/853-pan-revogacao-imediate-empresas-petroliferas.html>; <http://www.jornalsudoeste.com/?diaria=2543>), revela-se determinante e incontornável o papel assumido pelas energias renováveis como ferramenta que permite reforçar os níveis de segurança, promovendo-se simultaneamente a diversificação das fontes energéticas e contribuindo assim para um aumento da sustentabilidade associada à produção, transporte e consumo de energia (PNAER, 2013). A geração de eletricidade proveniente de fontes de origem renovável tem sido e ainda é promovida através de tarifas subsidiadas (*Feed-in Tariff*), que garantem uma remuneração fixa, por vezes muito superior ao preço praticado no mercado grossista da energia elétrica.

Com o intuito de manter Portugal na liderança da revolução energética, nomeadamente no que diz respeito à utilização de energias renováveis, foram incorporados e aprovados na Estratégia Nacional para a Energia os objetivos referentes ao setor energético, sendo eles (PNAER, 2013):

- Garantir o cumprimento dos compromissos nacionais no contexto das políticas europeias de energia e de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020, 31% do consumo final bruto de energia, 60% da eletricidade produzida e 10% do consumo de energia no setor dos transportes rodoviários tenham origem em fontes renováveis;
- Reduzir a dependência energética do exterior, baseada no consumo e importação de combustíveis fósseis, para cerca de 74% em 2020, a partir de uma crescente utilização de recursos energéticos endógenos;
- Reduzir em 25% o saldo importador energético (cerca de 2000 milhões de euros) com a energia produzida a partir de fontes endógenas, possibilitando uma redução de importações estimada em 60 milhões de barris de petróleo;
- Consolidar o cluster industrial associado à energia eólica e criar novos clusters associados às novas tecnologias do setor das energias renováveis assegurando em 2020 um valor acrescentado bruto de 3800 milhões de euros e criando 100 mil novos postos de trabalho a acrescer aos 35 mil afetos à produção de energia elétrica com fontes de energia renovável;
- Promover o desenvolvimento sustentável, criando condições para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo País em matéria de redução de emissões de gases com efeito de estufa, através de uma maior utilização das fontes de energia renovável e da eficiência energética.

Para além destes objetivos, a política energética relativa a fontes de energia renovável contemplada no ENE 2020 inclui também uma série de medidas específicas com vista a sua promoção (PNAER, 2013):

- Criar, até 2012, um fundo de equilíbrio tarifário que contribua para minimizar as variações das tarifas de eletricidade, beneficiando os consumidores e criando um quadro de sustentabilidade económica que suporte o crescimento a longo prazo da utilização das energias renováveis;
- Desenvolver, durante 2010, no âmbito da aplicação do quadro de referência estratégico nacional e dos outros instrumentos de apoio ao desenvolvimento económico, linhas de apoio para o investimento no domínio das energias renováveis, designadamente no apoio ao solar, visando também o incremento das exportações nesses domínios;

- Atualizar o Programa de microprodução, estabelecendo metas mais ambiciosas e introduzir um Programa de miniprodução destinado a projetos com potências até 150kW ou 250kW em função das tecnologias utilizadas;
- Aprovar medidas de promoção da produção de biomassa florestal, para assegurar as necessidades de consumo já instaladas e a instalar, através do acesso a apoios públicos, da promoção da certificação da gestão florestal sustentável, avaliação e promoção das culturas energéticas, bem como da biomassa residual resultante das atividades agrícolas e agroindustriais;
- Criar, até final de 2010, um sistema de planeamento e monitorização permanente da procura e da oferta potencial de energia de forma a otimizar a gestão integrada dos recursos disponíveis, melhorando a segurança do abastecimento de energia e promovendo uma utilização mais eficiente e integrando as diferentes energias renováveis;
- Concretizar o Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), os novos empreendimentos hídricos em curso e os reforços de potência previstos, permitindo aproveitar melhor o potencial hídrico e facilitar o crescimento da energia eólica, pela introdução de um elemento estabilizador na forma de capacidade reversível nos investimentos previstos;
- Criar condições para introdução e massificação da utilização do veículo elétrico a nível nacional, potenciador do consumo de energias renováveis produzidas, posicionando ainda Portugal como país de referência ao nível do teste, desenvolvimento e produção de soluções de mobilidade elétrica;

Conforme o estipulado na Estratégia Nacional para a Energia (ENE), a base de desenvolvimento da produção nacional renovável assentará no aumento articulado da capacidade instalada hídrica e eólica. No entanto, será dado especial destaque ao desenvolvimento nas tecnologias de aproveitamento de energia solar, quer nas aplicações de grande escala quer na aposta de sistemas de mini e microprodução e sistemas de aquecimento de águas sanitárias (PNAER, 2013).

1.7 Objetivos e trajetória nacional para as energias renováveis

A meta para 2020 relativa à quota de energias renováveis no consumo final bruto de energia para Portugal é 31%. Segundo os últimos dados disponíveis, Portugal atingiu o valor de 25% em 2014 (Fonte: Eurostat). Comparativamente aos Estados-Membros da UE, Portugal assume um dos lugares cimeiros neste ranking, estando inclusivamente acima da média, que se situa nos 16%. Nota de destaque ainda para Islândia e Noruega que, apesar de não serem membros da UE, apresentam uma quota de energia renovável no consumo final de energia bastante superior a todos os restantes membros da UE. No gráfico

apresentado na figura 1.7 são mostradas as quotas de consumo final de energia proveniente de energias renováveis para os 28 membros da UE, Noruega e Islândia

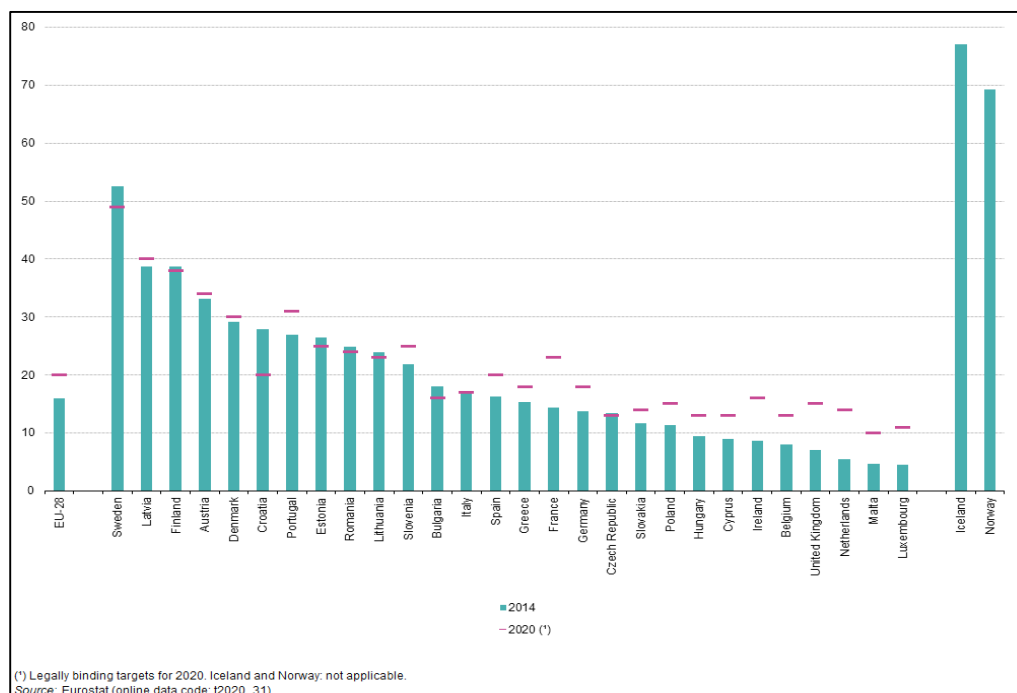


Figura 1.7 - Quota das energias renováveis no consumo final de energia para os 28 Estados-Membros da UE, Islândia e Noruega (Fonte: EUROSTAT)

Em termos setoriais, Portugal tem como objetivo atingir a quota dos 10% de energia renovável no setor dos transportes, de 30,6% no setor de aquecimento e arrefecimento e de 60% na eletricidade. No entanto, para efeito do PNAER, a quota no setor da eletricidade corresponderá a 55,3%. De acordo com os últimos dados disponíveis, em 2014 Portugal atingiu a quota dos 34% no setor do aquecimento e arrefecimento, 52,1% no setor da eletricidade e 3,4% no setor dos transportes (*EU energy in figures, 2016*). De realçar o cumprimento do objetivo no setor do aquecimento e arrefecimento antecipadamente e a evolução muito positiva no setor da eletricidade que irá permitir a curto prazo o cumprimento da meta estipulada. Relativamente ao setor dos transportes há ainda um longo caminho a percorrer uma vez que a quota atual se situa abaixo das projeções, 5,9% para 2014 (PNAER, 2013).

2. O RECURSO SOLAR

2.1 Balanço energético Sol-Terra

A energia proveniente do Sol e a existência de uma atmosfera com gases de efeito estufa permite a existência de vida na Terra. O Sol, com uma irradiância de 63 MW m^{-2} (Megawatt por metro quadrado), é uma fonte ilimitada de energia equivalente a um corpo negro à temperatura de 5800 K . É sabido que 90% da energia produzida pelo Sol é gerada numa zona esférica com um raio de cerca de 0.23 vezes o raio do Sol ($0.23R$). A densidade média e a temperatura nesta região são 10^5 kg/m^3 (quilograma por metro cúbico) e aproximadamente $8 \text{ a } 40 \times 10^6 \text{ K}$ (Kelvin) respetivamente. A energia gerada nesta região é devida a várias reações de fusão. Duas moléculas de hidrogénio são combinadas para formar um núcleo de hélio a 10^7 K . A massa do núcleo de hélio é inferior à massa dos quatro prótons que o originaram, sendo que esta massa perdida na reação foi transformada em energia através da relação dada por Einstein, i.e., $E=mc^2$. A energia produzida é transferida para a superfície solar por convecção. A temperatura e a densidade descem para $1,3 \times 10^5 \text{ K}$ e 70 kg/m^3 do centro até aproximadamente $0,7 R$. Na região localizada a uma distância superior a $0,7 R$ o mecanismo de transporte de energia principal é a convecção, sendo que a zona entre $0,7 R$ e R é denominada por "Zona convectiva". A camada exterior à zona convectiva é conhecida como fotosfera. O Sol tem uma temperatura de corpo negro (T) de 5777 K .

A energia solar é radiada para o espaço pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$E = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

onde ε e σ são, respetivamente, a emissividade da superfície e a constante de Stefan-Boltzmann. Na figura 2.1 é apresentado um esquema do fluxo contínuo de energia natural como energia renovável.

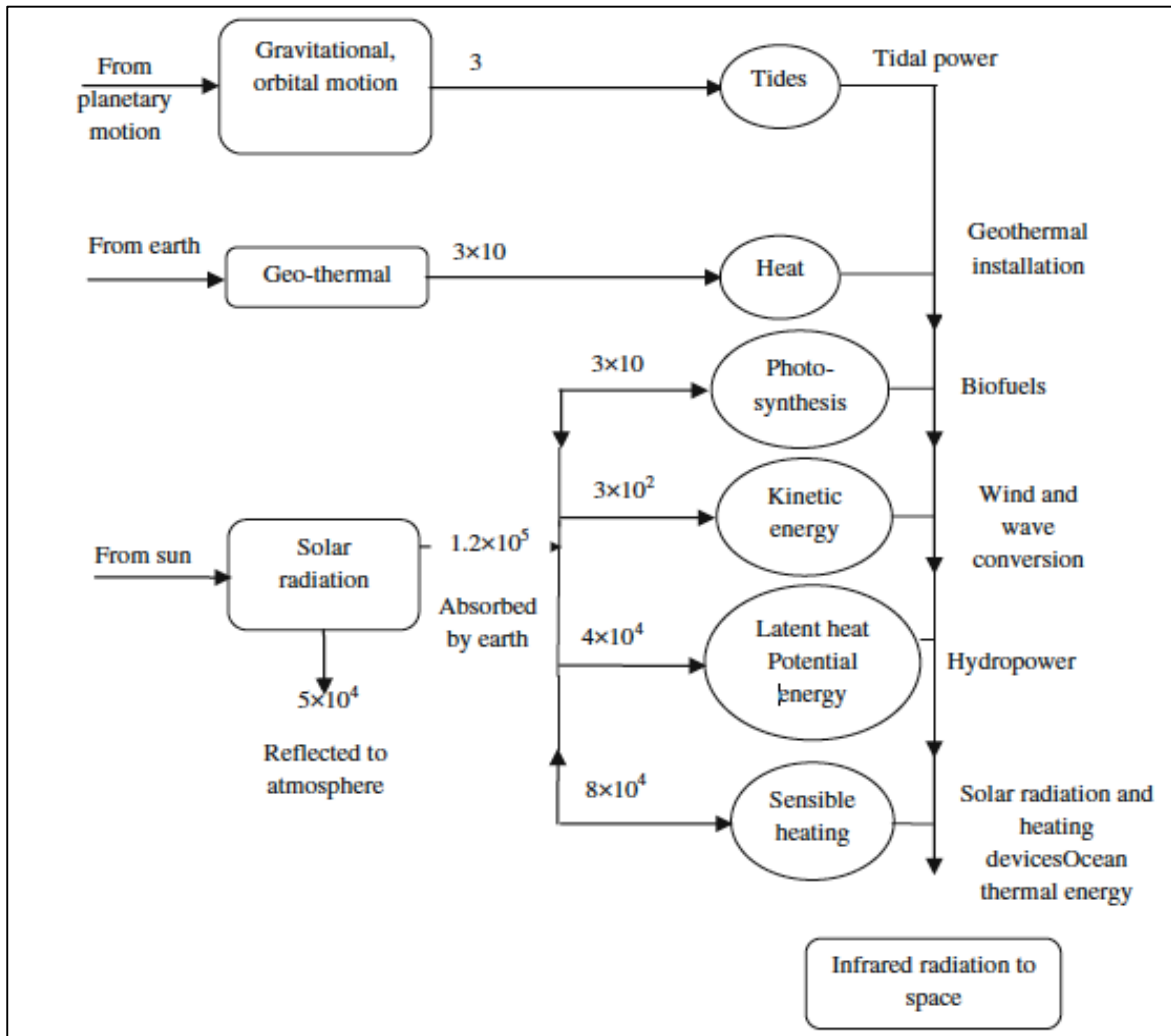


Figura 2.1 - Fluxo contínuo de energia natural como energia renovável, em terawatts (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

Estas reações acontecem há mais de 4,5 mil milhões de anos e continuarão a acontecer por mais 6.5 mil milhões de anos. A potência total radiada pelo Sol para o espaço é de aproximadamente $3,86 \times 10^{26}$ W. Como para o Sol a distância Terra-Sol é de cerca de $1,5 \times 10^{11}$ m e o raio da Terra é $R = 6,3 \times 10^6$ m, apenas 0,000000045% desta potência é intercetada (Crawley, G., 2016).

2.2 A atmosfera terrestre

A distribuição heterogénea da radiação solar pelo globo, a rotação da Terra e a geografia dos continentes e oceanos provoca um transporte horizontal de energia. As alterações climáticas decorrem de um efeito combinado entre a variação natural do clima e de efeitos induzidos pela ação humana. Os vários componentes do sistema climático são apresentados de forma geral na figura 2.2 e alguns destes processos serão explicados mais adiante nesta dissertação.

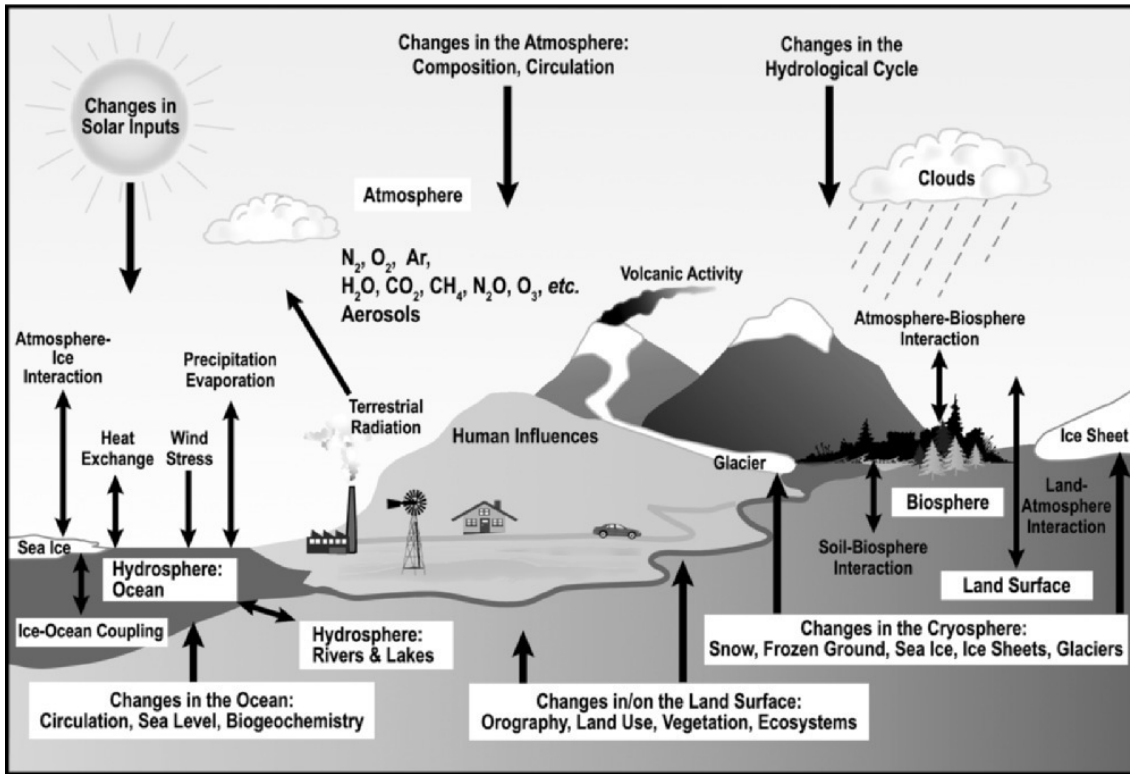


Figura 2.2 - Os componentes do sistema climático (Booker, E e Grondelle, R., 2011)

A Terra completa a sua rota elíptica e torno do Sol em um ano, como é mostrado de forma esquemática na figura 2.3a. A Terra tem uma geometria quase esférica com um diâmetro de aproximadamente 13×10^3 km. Por outro lado, a Terra apresenta uma declinação de $23,5^\circ$ e executa uma rotação completa em torno do seu eixo em 24 horas (15° por hora) (Figura 2.3b).

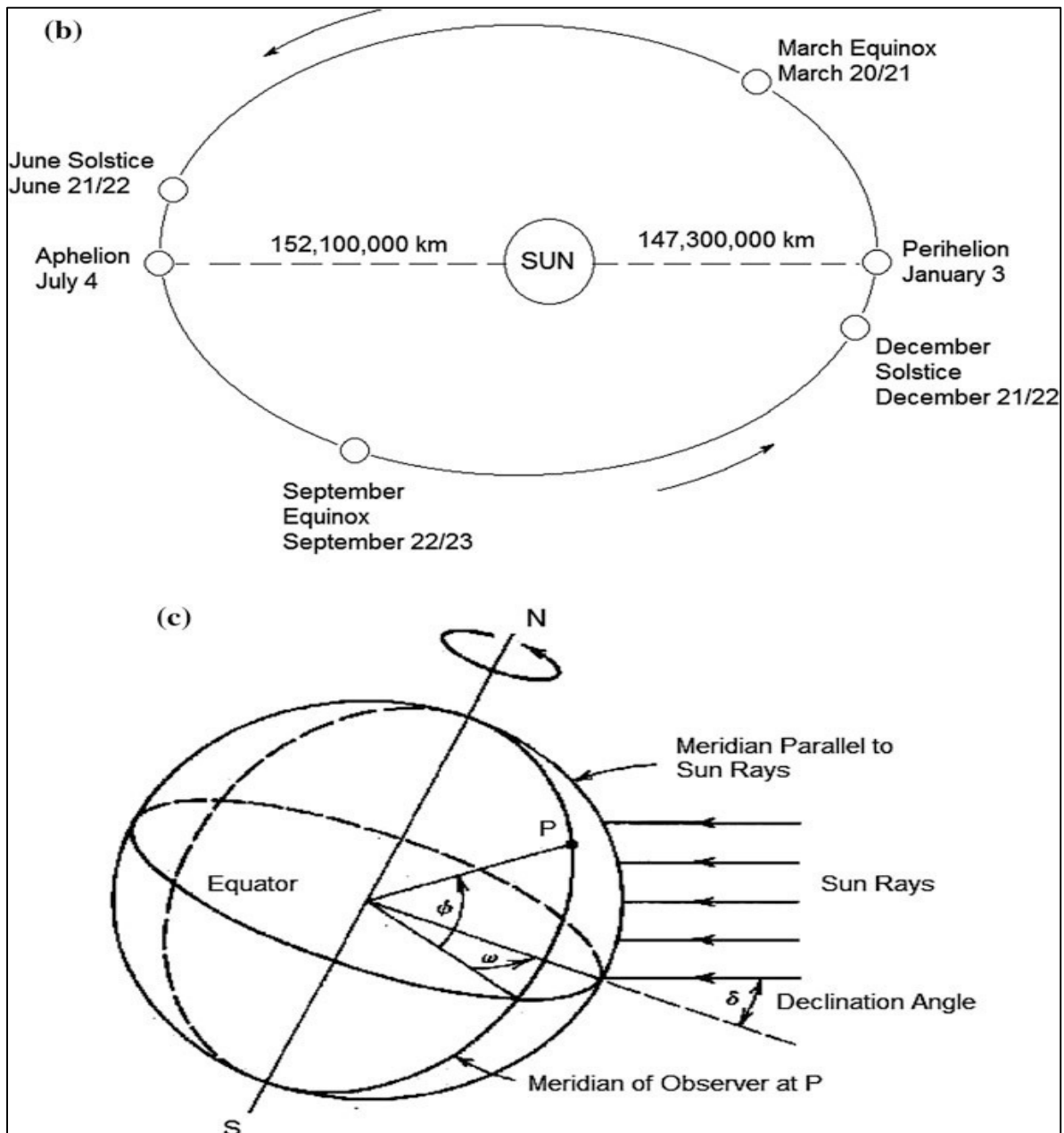


Figura 2.3 - (b) A orbita da Terra em torno do Sol, (c) Inclinação da Terra a $23,5^\circ$ (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

De acordo com a teoria da tectónica de placas, a litosfera, a camada sólida superficial constituída pela crosta e por parte do manto superior, está dividida em placas. Estas placas separam-se, aproximam-se ou deslizam entre si. Acredita-se que há 1 milhão de anos atrás, os vários gases armazenados no interior da Terra libertaram-se para formar o que atualmente se denomina por de gases de efeito estufa.

2.3 Radiação Solar

A energia solar que chega à Terra sob a forma de radiação, aquilo que vulgarmente é conhecido como luz solar, é composta por radiação maioritariamente na região visível, quase infravermelho e quase ultravioleta (Chen C 2011) do espectro eletromagnético (EE). Para que seja possível compreender-se de forma mais eficaz a natureza desta radiação, deve-se ser capaz de se perceber aquilo que é realmente a luz solar, uma onda eletromagnética ou um fluxo de fótons. Ambas as definições são importantes para a compreensão de certos mecanismos inerentes à transformação da energia solar em energia elétrica. Em 1865, um físico chamado James Maxwell (1831-1879) propôs que a luz é uma onda eletromagnética. As conclusões do seu trabalho explicam em grande parte as ondas eletromagnéticas, resultando nas equações que atualmente são conhecidas por “As equações de Maxwell”. Baseados nessas equações, Maxwell conseguiu prever a existência dessas ondas que se propagam no espaço a uma velocidade igual à velocidade da luz. Mais tarde, em 1922, Albert Einstein venceu o Prémio Nobel pelos “trabalhos prestados no âmbito da física teórica e principalmente pela descoberta do efeito fotoelétrico”. De acordo com Einstein, a interação da luz com a matéria decorre de se considerar que a luz é constituída por um fluxo de partículas individuais e indivisíveis denominadas por fótons. A energia de um fóton, E depende da sua frequência e pode ser avaliada através da seguinte equação:

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

onde, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s representa a constante de Planck e ν é a frequência da luz expressa em hertz. Baseado no conceito dos fótons e a sua interação com a matéria, Einstein fez uma derivação para a fórmula de radiação de corpo negro (Chen C 2011). O espectro solar é então a distribuição eletromagnética da luz solar (por unidade de comprimento de onda e unidade de área) em função do comprimento de onda. O espectro solar que atinge a Terra fora da atmosfera é o mesmo que a de um corpo negro à temperatura de 5778 K, tal como é mostrado na figura 2.4.

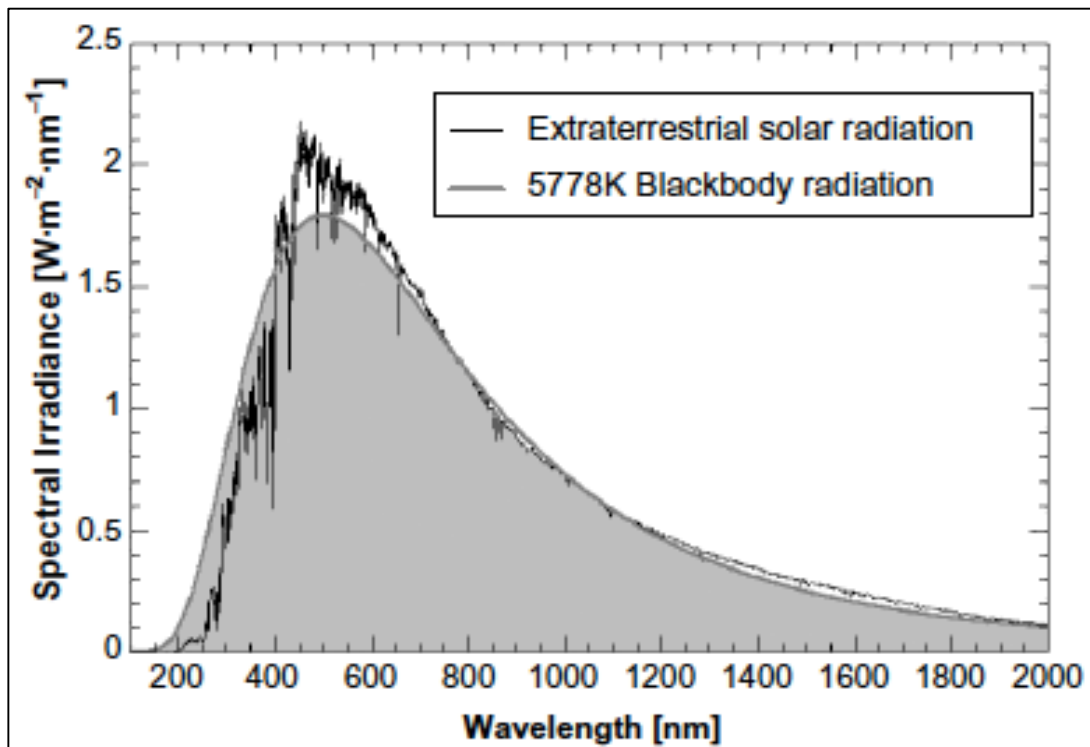


Figura 2.4 - Espectro solar extraterrestre comparado ao espectro emitido por um corpo negro a 5778 K (Crawley, G 2016))

O integral do espectro solar apresentado na figura 2.4 (ou seja, a área limitada pela curva espectral) corresponde à energia solar por unidade de área que atinge a camada externa da atmosfera. Esta magnitude é conhecida por Irradiância (I) e o seu valor médio é $1367\text{W}/\text{m}^2$ (Crawley, G 2016). Devido à órbita elíptica da Terra em torno do Sol, a distância Sol-Terra não é fixa e varia ao longo do ano, sendo a sua variação máxima de 1,7% (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016). Por isso, a Irradiância não é constante ao longo do ano são apresentadas na figura 2.5.

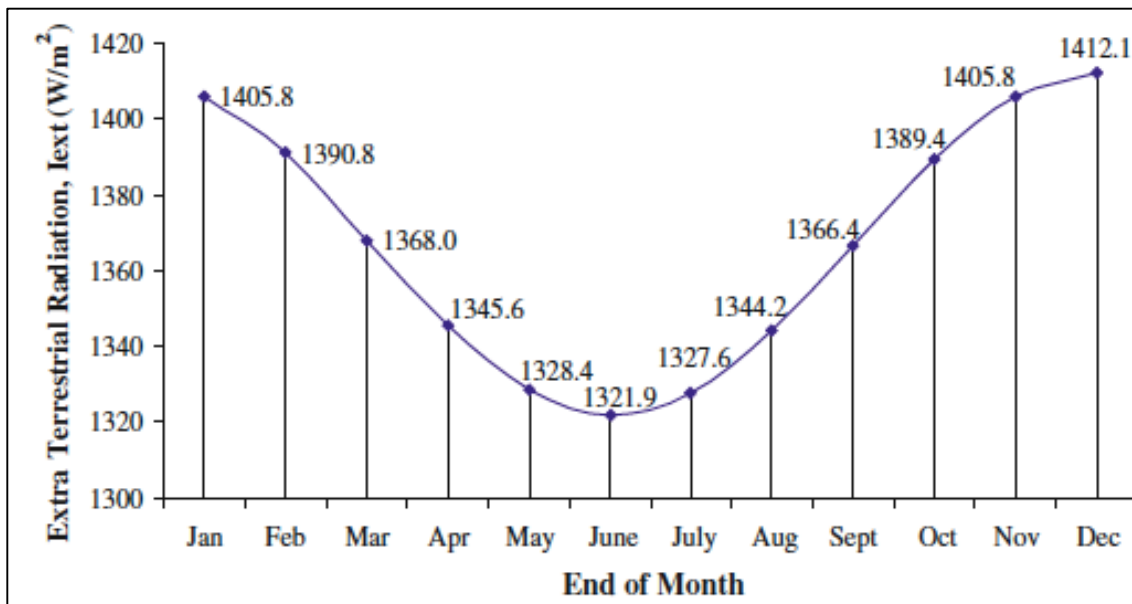


Figura 2.5 - Variação da Irradiância ao longo do ano (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016)

Para além das variações de Irradiância ao longo do ano, a sua distribuição ao longo do globo também não é uniforme, apesar de ser o recurso energético distribuído de forma mais uniforme à escala global (Crawley, G 2016). Na figura 2.6 é apresentada a distribuição geográfica da Irradiância solar.

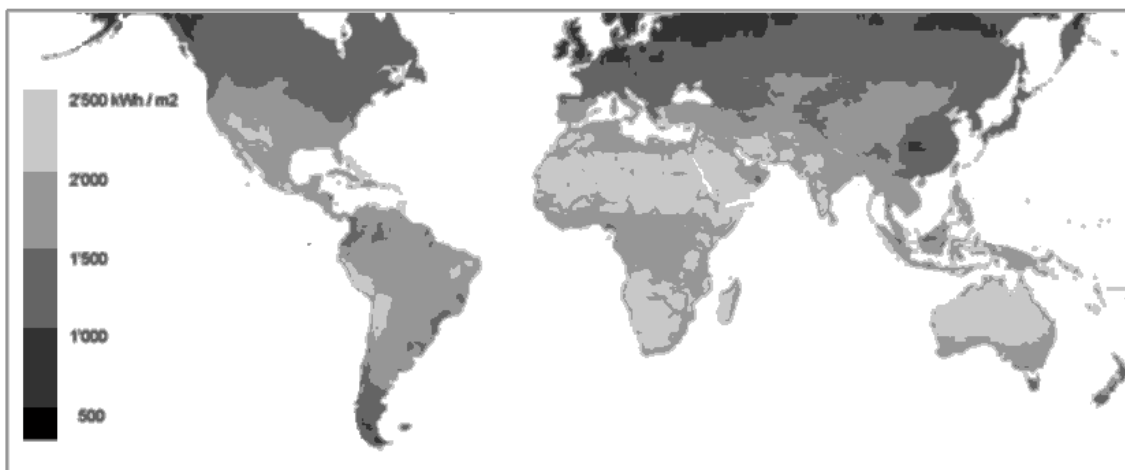


Figura 2.6 - Distribuição geográfica da Irradiância (kWh/m²) (Crawley, G 2016)

A radiação solar pode ser convertida em formas de energia útil através de vários processos, no entanto é necessário compreender que, ao contrário do que acontece no espaço onde a radiação solar é praticamente constante, a radiação que atinge a superfície da Terra varia de acordo com o dia do ano, hora do dia, latitude e estado da atmosfera. A radiação que atinge a superfície é sempre uma mistura de luz direta e luz difusa, sendo que para aplicações práticas estes dois tipos de luz comportam-se de

maneira diferente. Em engenharia solar, as superfícies que capturam ou redirecionam a radiação solar são denominadas por coletores solares (Foster, R., Ghassemi, M. e Cota, A. 2009). A radiação solar pode ser convertida em calor ou eletricidade, utilizando tecnologias térmicas e FV, respetivamente.

Os sistemas solares térmicos são amplamente utilizados na geração de calor para água quente, cozinhar, aquecimento, entre outras aplicações. Os equipamentos FV são usados para converter a radiação solar em eletricidade, através de processos que serão apresentados mais adiante nesta dissertação. Nesta fase, importa perceber que, ao contrario do que acontece nos concentradores solares onde apenas a luz solar direta é utilizada, nos sistemas solares térmicos ou FV ambas as formas de radiação são utilizadas, sendo que que a radiação difusa tem um papel muito importante (Chen, C 2011). Importa referir que a informação obtida sobre a radiação solar é recolhida através de um aparelho denominado por piranómetro (Figura 2.7). Este equipamento integra uma parte central constituída por um absorvedor de corpo negro coberto por um vidro. Este aparelho gera uma tensão elétrica proporcional à radiação recebida pelo absorvedor ao longo de todo o hemisfério.



Figura 2.7 - **Piranómetro**. (1) – Absorvedor de corpo negro. (2) Vidro protetor. (Chen, C 2011)

3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 Semicondutores: Propriedades e funcionamento

3.1.1 Estrutura atômica

A descoberta do efeito FV através da utilização de materiais semicondutores (SC) que permitem a transformação da radiação solar em energia elétrica, remonta a 1876 por Adams e Day, apesar da compreensão cabal do seu fenómeno físico só ter sido possível com o estabelecimento da teoria quântica em 1900 pelo físico Alemão Max Planck (Carneiro, J 2010). Alguns autores referem que o efeito FV foi observado pela primeira vez por Becquerel (Goetzberger, A., Hebling, C. e Schock, H, 2003). A primeira célula solar operacional foi produzida com silício cristalino (c-Si), que é de longe o tipo de material mais utilizado para aplicações FV. Para que se possa melhor compreender como é que as células FV baseadas em materiais SC funcionam será, neste trabalho, utilizado o exemplo do silício (Si).

O numero atômico do silício é 14, o que significa que 14 eletrões estão a “orbitar” o seu núcleo atômico. No seu estado fundamental, dois eletrões estão localizados na primeira camada, ambos na orbital 1s. Em seguida, oito eletrões estão situados na segunda camada, dois na orbital 2s e seis na orbital 2p. Por fim, os quatro eletrões remanescentes estão localizados na terceira camada, a mais externa. Apenas estes quatro eletrões interagem com outros átomos, formando ligações químicas. Estes são denominados por eletrões de valência.

Uma ligação covalente ocorre quando dois átomos de Si partilham eletrões de valência. Atendendo a que os átomos de Si têm quatro eletrões de valência, podem-se ligar covalentemente a quatro átomos de Si. Na sua forma cristalina, cada átomo de Si está ligado a quatro átomos de Si vizinhos, tal como ilustrado esquematicamente na figura 3.1.

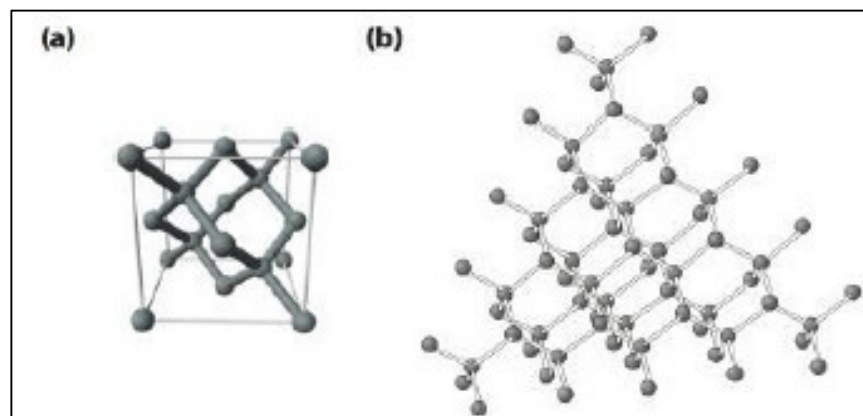


Figura 3.1 - (a) Estrutura diamante de uma célula cristalina de Si, (b) Estrutura atômica de uma parte de um cristal de Si

(Smets, A. *et al*, 2016)

Todas as ligações têm o mesmo comprimento e os ângulos entre as ligações são iguais a $109,5^\circ$ (Smets, A. *et al*, 2016). A estrutura em diamante da célula unitária do silício representa a estrutura real do silício monocristalino. Apesar da figura 3.1 (a) mostrar a estrutura cristalina do átomo de silício sem a presença de nenhum átomo vizinho, na realidade existem sempre impurezas no semiconductor. Quando a concentração de impurezas no semiconductor é insignificante, este é denominado por semiconductor intrínseco.

3.1.2 Semicondutores intrínsecos

Os SC intrínsecos são SC puros em que a sua condutividade elétrica é determinada pelas suas propriedades intrínsecas. No caso do silício, os átomos formam uma estrutura tetraédrica na rede cristalina ligada através de pares de elétrons em orbitais ligantes híbridas sp^3 . Num cristal ideal de Si à temperatura de 0 K (-273°C), todos os elétrons de valência formam ligações covalentes com átomos vizinhos, não havendo então qualquer elétron livre presente na estrutura, permitindo que o átomo tenha estabilidade química e molecular. Atendendo a que não existem elétrons livres, o material comporta-se como um isolador, não sendo possível estabelecer-se uma corrente elétrica através do cristal. Esta situação encontra-se representada esquematicamente na figura 3.2.

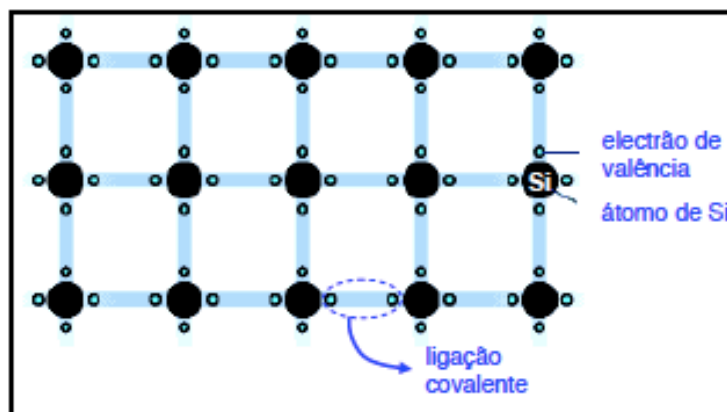


Figura 3.2 - Representação bidimensional da ligação covalente da rede cristalina de Si puro (Carneiro, J. 2010)

A temperaturas superiores a 0 K, as ligações começam a quebrar devido à absorção de energia térmica. Este processo provoca a criação de elétrons móveis e lacunas. A sua representação bidimensional encontra-se esquematizada na figura 3.3.

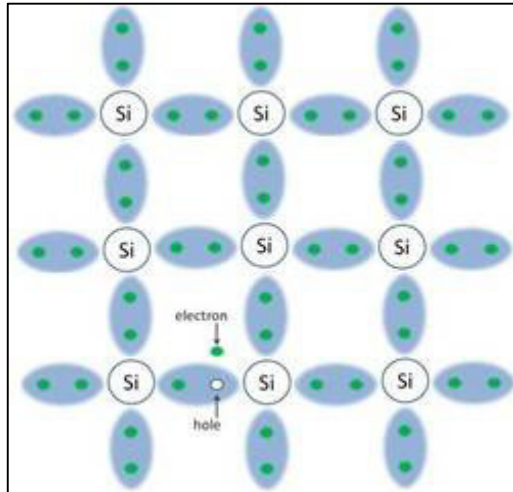


Figura 3.3 - Quebra de ligação entre dois átomos de Si puro, resultando na criação de um elétron livre e de uma lacuna (<https://www.thenakedscientists.com/articles/features/catching-energy-sun>)

Quando uma ligação é quebrada e se forma uma lacuna, um elétron de valência de uma ligação vizinha pode “transitar” para esta posição vazia e restaurar a ligação. A consequência desta transferência é que ao mesmo tempo que o elétron de uma ligação vizinha “transita” para a lacuna formada está, por sua vez, a deixar uma posição vazia na sua ligação inicial. Uma vez que a quebra de ligações covalentes conduz à formação de pares elétron-lacuna, em SC intrínsecos a concentração de elétrões é igual a concentração de lacunas (Smets, A. *et al*, 2016).

Quando um grande número de átomos se juntam para formar um sólido, e dependendo da sua condução elétrica, estes podem ser divididos em três tipos de diferentes categorias: os designados materiais condutores, SC e isoladores. Um material isolador à temperatura de 0 K tem a sua banda de valência completamente preenchida e a sua banda de condução totalmente vazia. Num sólido semiconductor a 0 K, a banda de valência também se encontra totalmente preenchida e a sua banda de condução completamente vazia. Contudo, para este caso, a diferença reside na circunstância de que a separação entre a banda de valência e a banda de condução ser bastante mais pequena para um semiconductor face a um material isolador. Esta região de separação é denominada por hiato de energia proibida (em Inglês, *band gap*).

Como já anteriormente foi referido, a condutividade elétrica depende muito da temperatura; quanto maior o valor da temperatura maior será a condutividade elétrica. Quando um elétron é excitado para a banda de condução são criados dois transportadores de carga, um elétron carregado negativamente e uma lacuna carregada positivamente (deficiência de um elétron), conforme esquematicamente representado na Figura 3.4.

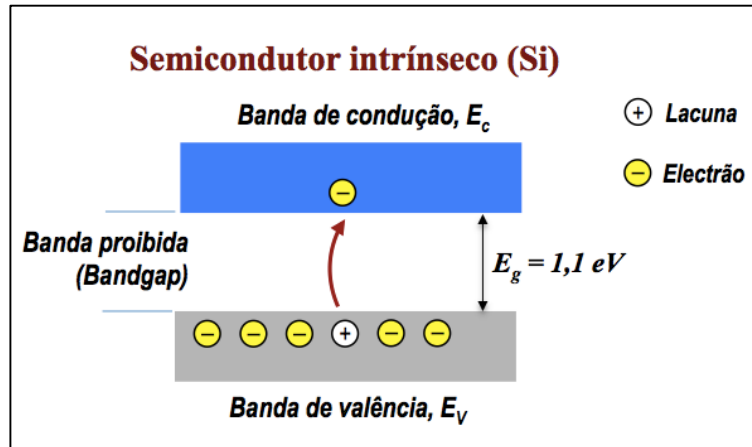


Figura 3.4 - Esquema de diagrama de bandas de energia de um semicondutor de Si (Carneiro, J. 2010)

Na presença de uma diferença de potencial elétrico, tanto os elétrons quanto as lacunas transportam corrente elétrica. A representação esquemática deste processo é mostrada na figura 3.5. No átomo “1” ocorreu uma quebra de ligação covalente, sendo o elétron libertado subsequentemente atraído para o polo positivo (+) deixando no seu átomo original uma lacuna. Um elétron de valência do átomo “2” poderá preencher a lacuna deixada pelo primeiro elétron do átomo “1”. Da mesma forma, um elétron de valência do átomo “3” poderá ocupar a lacuna deixada pelo elétron do átomo “2” e assim sucessivamente (Carneiro, J. 2010).

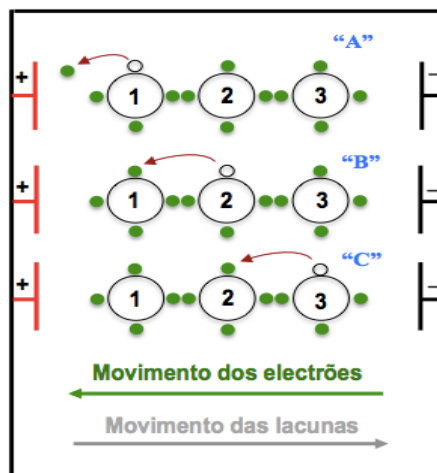


Figura 3.5 - Representação esquemática do movimento dos elétrons e das lacunas, quando o cristal é sujeito a uma diferença de potencial elétrico (Carneiro, J. 2010)

3.1.3 Semicondutores extrínsecos

A concentração de elétrons e lacunas pode ser controlada através de um processo denominado por “dopagem” (Em Inglês, *doping*), aumentando assim a condutividade do semicondutor através da introdução controlada de impurezas. A dopagem do Si significa que alguns átomos de outros elementos substituem os alguns átomos de Si na sua estrutura cristalina. A substituição pode de ser efetuada por átomos com três ou cinco elétrons de valência. Os elementos mais utilizados para a dopagem de c-Si são o Boro (B) e o fósforo (P), com números atômicos de 5 e 15, respetivamente. Este processo é facilmente perceptível através da observação da figura 3.6. Com a adição de um átomo de fósforo à estrutura de c-Si, quatro dos cinco elétrons de valência de fósforo poderão rapidamente formar ligações com átomos vizinhos de Si.

Atendendo a que o quinto elétron de valência não consegue formar uma ligação torna-se fracamente ligado ao núcleo do átomo de fósforo, sendo por isso facilmente libertado na eventualidade de absorver energia térmica (energia disponível para a estrutura de c-Si situado à temperatura ambiente). Uma vez livre, o elétron move-se livremente através de toda a estrutura. Desta forma, o átomo de fósforo que substituiu o átomo de silício na estrutura cede um elétron livre. Os átomos de impurezas que aumentam a concentração de elétrons livres denominam-se por átomos “doadores”. Os SC que possuam na sua rede cristalina átomos de impurezas do grupo V (como o fósforo) designam-se por SC extrínsecos de tipo-n (tipo negativo), uma vez que os principais portadores de carga são elétrons.

Por outro lado, o átomo de Boro só dispõe de três elétrons de valência e por conseguinte não consegue formar ligações com os 4 átomos de silício vizinhos quando substitui um átomo de silício na estrutura cristalina. No entanto, pode facilmente “aceitar” um elétron de uma ligação Si-Si próxima. A energia térmica da estrutura de c-Si à temperatura ambiente é suficiente para permitir que um elétron de uma ligação vizinha Si-Si se ligue ao átomo de Boro e complete assim a ligação com os quatro átomos de silício vizinhos. Os átomos de impurezas que aumentam a concentração de lacunas são denominados por átomos “aceitadores”. Por sua vez, quando o semicondutor possui na sua rede cristalina átomos do grupo III (como o Boro) designam-se por SC extrínsecos de *tipo-p* (tipo positivo), uma vez que os principais portadores de carga são as lacunas.

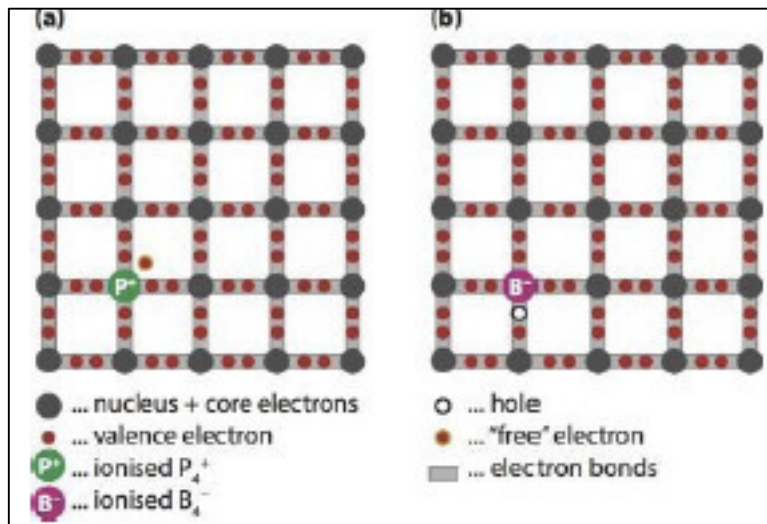


Figura 3.6 - Processo de dopagem ilustrado através de um modelo bidimensional. **(a)** Um átomo de fósforo (P) substitui um átomo de Si na estrutura, resultando num átomo ionizado positivamente e um elétron livre. **(b)** Um átomo de Boro (B) substitui um átomo de Si, resultando num átomo de B negativamente ionizado e uma lacuna (Smets, A. *et al*, 2016)

3.1.4 Junção p-n

A fim de ser possível produzir-se uma célula FV eficiente, é necessária a associação de várias camadas de SC tipo-n e tipo-p, formando aquilo que se designa por junção p-n. A conversão de energia solar em energia elétrica consiste em dois passos fundamentais. O primeiro, refere-se à absorção de luz com comprimento de onda adequado, de modo a serem gerados pares elétron-lacuna. A absorção de luz subentende o processo de absorção de fótons de modo a excitar os elétrons da banda de valência até a banda de condução. Os elétrons fluem através do material tipo-n e as lacunas através do material tipo-p. Quando se combinam os dois tipos de SC é formado um diodo de junção p-n que utiliza fótons para a produção de eletricidade DC (do inglês, *Direct Current*, corrente contínua). Mesmo numa situação em que não exista a aplicação externa de uma diferença de potencial aplicada ao longo da junção, é possível produzir-se corrente elétrica desde que a célula seja iluminada (Foster, R., Ghassemi, M. e Cota, A. 2009). Quando se estabelece a associação entre os SC tipo-n e tipo-p, existe inicialmente uma grande diferença na concentração de elétrons entre as regiões n e p, originando-se uma corrente de difusão de elétrons da região n (onde a concentração de elétrons é superior), através da junção, até à região p. O termo junção é atribuído à região de interface entre as duas regiões n e p. De igual modo, a diferença na concentração de lacunas provoca uma corrente de difusão de lacunas da região p para a região n. Atendendo a que os íões formados na junção são fisicamente maiores e mais pesados do que os elétrons e as lacunas, estes tendem a permanecer nas respetivas posições na rede cristalina de silício (Carneiro, J. 2010). Esta região é designada por “zona de depleção”. Uma representação esquemática

desta região é mostrada na figura 3.7. As regiões fora da zona de depleção são designadas por “regiões quase-neutras” (em inglês, *quasi-neutral*).

A adoção de uma estratégia que vise o incremento da eficiência de uma célula FV, pode consistir na modificação dos materiais constituintes a fim de ser possível a absorção de energia na região visível do EE. O EE entre o infravermelho e o ultravioleta cobre um intervalo compreendido entre 0,5 e 2,9 eV (elétron-volt). Por exemplo, a luz vermelha tem uma energia de aproximadamente 1,7 eV e a luz azul tem uma energia de 2,7 eV (Foster, R., Ghassemi, M. e Cota, A. 2009). Muitos dos SC mais eficazes possuem banda de energia proibida compreendida entre 1,0 e 1,6 eV. A banda de energia proibida do c-Si é de 1.1 eV.

Os sistemas FV atuais convertem 7-22% da energia luminosa em energia elétrica. Cerca de 55% da energia contida na radiação solar não pode ser usada pelos sistemas FV uma vez que a sua energia é inferior ao valor da banda de energia proibida ou então é demasiado energética. Em condições de iluminação, os fótons com energia igual ou superior à energia da banda proibida são absorvidos e geram pares elétron-lacuna. A absorção da luz aumenta drasticamente a geração de pares elétron-lacuna, para além da geração proveniente da excitação térmica.

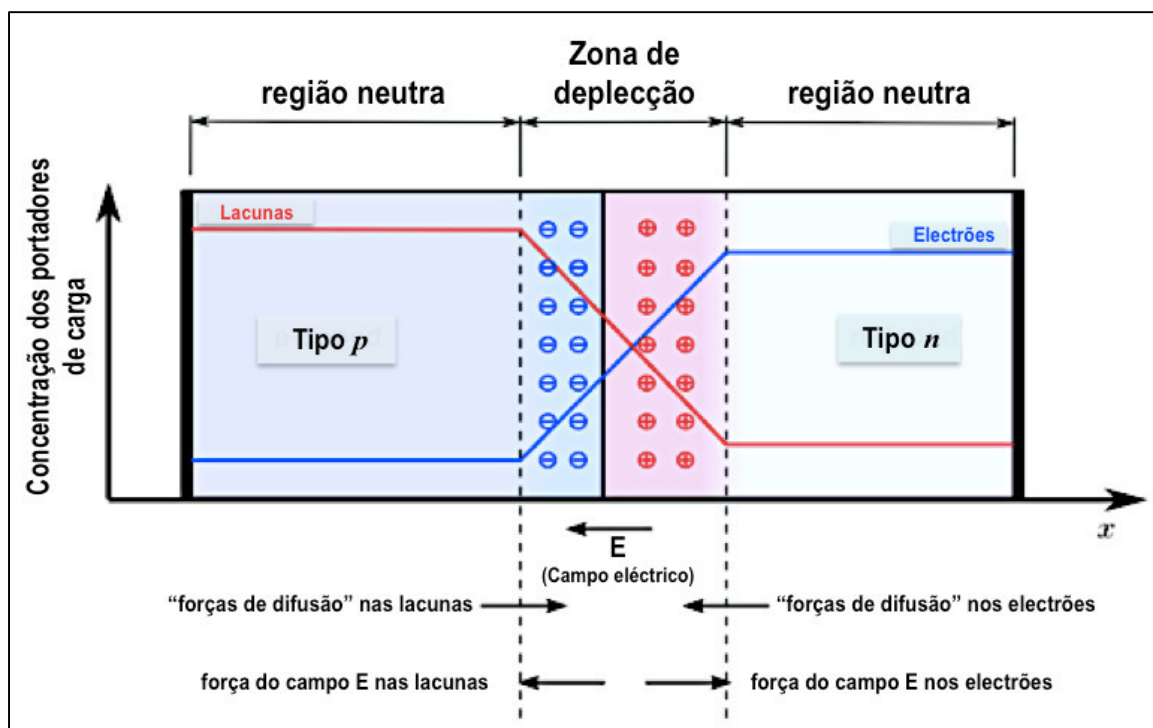


Figura 3.7 - Esquema de representação de uma junção p-n. A concentração de elétrons e lacunas é representada respetivamente pela cor azul e vermelha. O vetor campo elétrico é mostrado na parte inferior da figura. São também mostradas as forças electrostáticas e as “forças de difusão” que são exercidas nos elétrons e nas lacunas e que tendem a movimentar estes portadores de carga (Carneiro, J. 2010)

Na presença de um campo elétrico, os elétrons (fotogerados no SC de tipo p) irão mover-se para a região do SC do tipo n, enquanto as lacunas (fotogeradas no SC de tipo n) irão deslocar-se para a região do SC de tipo p, tal como se encontra representado na figura 3.8, dando origem à designada corrente gerada pela luz, I_L , adicionada à corrente gerada pela emissão térmica, I_0 . Quando não é estabelecido um contato elétrico externo entre a região tipo-n e a região tipo-p, a junção encontra-se em Circuito Aberto.

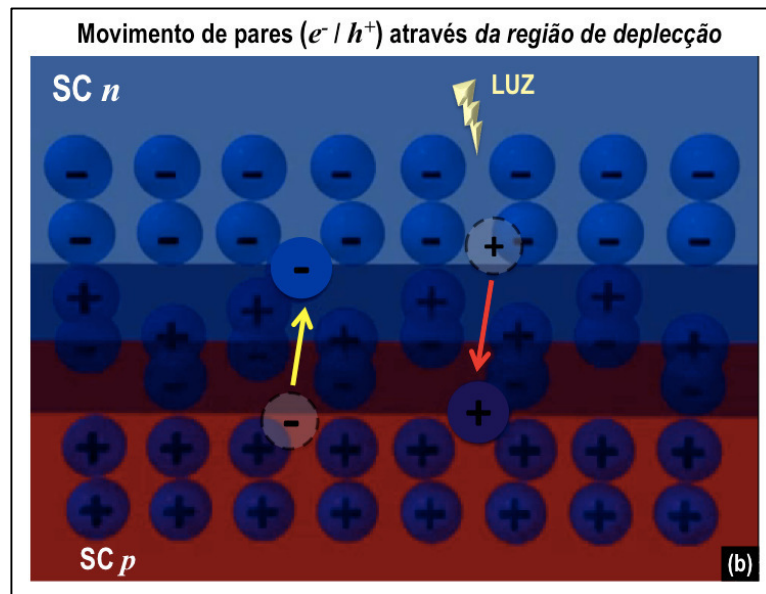


Figura 3.8 - Representação esquemática da movimentação de pares elétron-lacuna através da região de depleção de um diodo de junção p-n sujeito à ação da luz (Carneiro, J. 2010)

Caso seja aplicado um fio condutor para ligar a região do SC do tipo-n à região do SC do tipo-p, verifica-se que o excesso de elétrons (no SC tipo-n) irão movimentar-se através do fio condutor de modo a se combinarem com o excesso de lacunas existentes no SC tipo-p. Nestas circunstâncias, é gerada uma corrente elétrica I , conforme representado esquematicamente na figura 3.9.

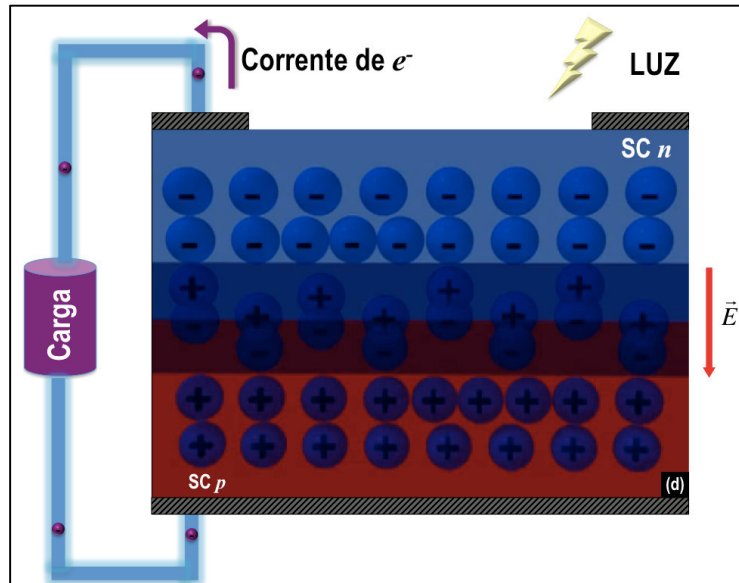


Figura 3.9 - Representação esquemática do excesso de transportadores de carga após movimentação dos pares elétron-lacuna através da região de depleção de um diodo de junção p-n. (Carneiro, J 2010)

A corrente elétrica, I que circula através do circuito externo ao diodo pode ser calculada através da equação 3.1.

$$I = I_g \left[\exp\left(\frac{V}{mU_T}\right) - 1 \right] - I_L \quad (3.1)$$

onde:

- I_g – Corrente de geração ou corrente de fuga do diodo;
- m – Fator de idealidade do diodo (diodo ideal: $m=1$; diodo real > 1);
- V – Diferença de potencial elétrico aplicado aos terminais do diodo;
- U_T – Potencial térmico ($U_T = KT/q$);
- I_L – Corrente fotogerada;

Quando o fio é ligado entre os dois elétrodos da *junção p-n* iluminada, apenas uma fração da corrente fotogerada irá fluir pelo circuito externo. A diferença de potencial eletroquímico entre as regiões *tipo-n* e *tipo p* vai ser diminuída pela queda de potencial ao longo do ligação.

Uma vez que, segundo a equação 3.1, enquanto a diferença de potencial é sempre positiva, a corrente é sempre negativa, tal como se encontra representado na figura 3.10, através da curva característica IV em condições de iluminação (vermelho) e no escuro (azul).

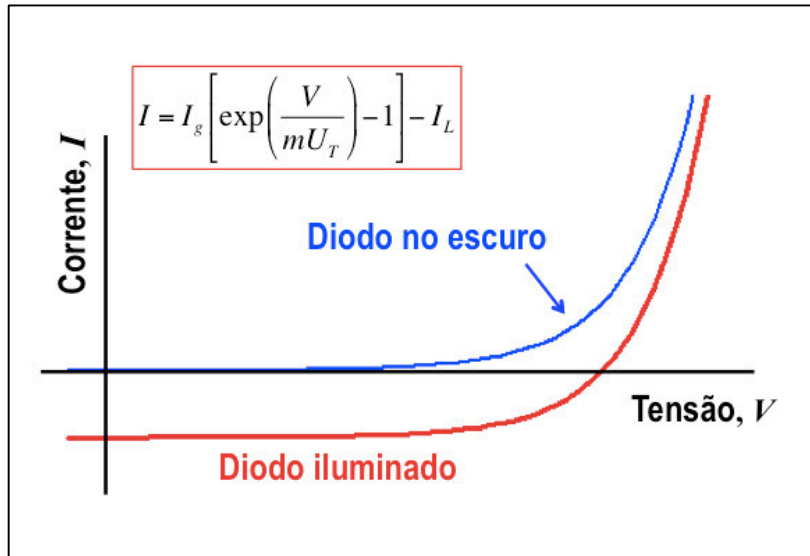


Figura 3.10 - Representação esquemática da curva característica IV de um diodo de junção p-n sob condições de iluminação (Carneiro, J 2010)

Sendo o diodo um dispositivo passivo que consome energia, esta consideração faz todo o sentido. Neste caso, considerando a célula solar como uma bateria, a direção da corrente deve ser invertida. Portanto, uma melhor forma de exprimir a equação da célula solar seria através da equação 3.2, onde corrente e tensão são sempre positivos (Chen, C. 2011)

$$I = I_{SC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Entretanto, importa enunciar a tensão de circuito-aberto que é definida como correspondendo à tensão quando a corrente é nula, ou seja:

$$I_{SC} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

donde,

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right) \quad (3.4)$$

Uma vez que I_{sc} é muito maior que I_0 , a equação 3.4 pode ser simplificada para a seguinte expressão:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (3.5)$$

Onde:

- . V_{oc} – Tensão de circuito aberto;
- . k_B – Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/ K);
- . T – Temperatura absoluta da célula (em Kelvin);
- . q – carga elétrica do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);
- . I_{sc} – Corrente de curto circuito;
- . I_0 – Corrente de geração;

3.2 Célula fotovoltaica: Parâmetros base

Por convenção, assume-se que, para aplicações em células FV, a corrente fornecida pela célula tem valor positivo. A figura 3.11 mostra um exemplo típico de uma célula FV, onde as linhas verticais e horizontais são linhas metálicas condutoras.

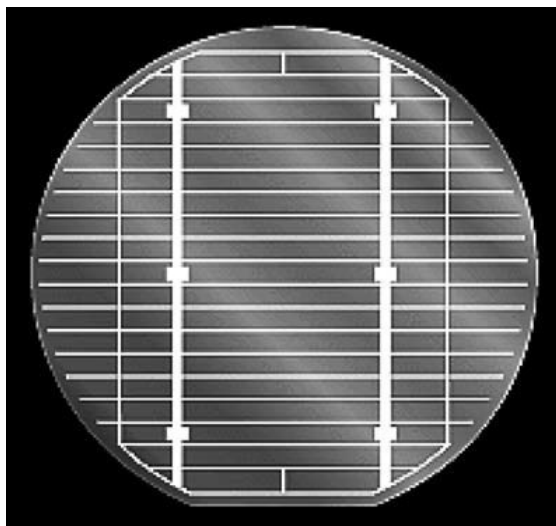


Figura 3.11 - Exemplo de uma célula FV de silício (Goetzberger, A. Hebling, C. e Schock, H. 2003)

Por outro lado, a figura 3.12 mostra esquematicamente a constituição interna de uma célula FV de silício.

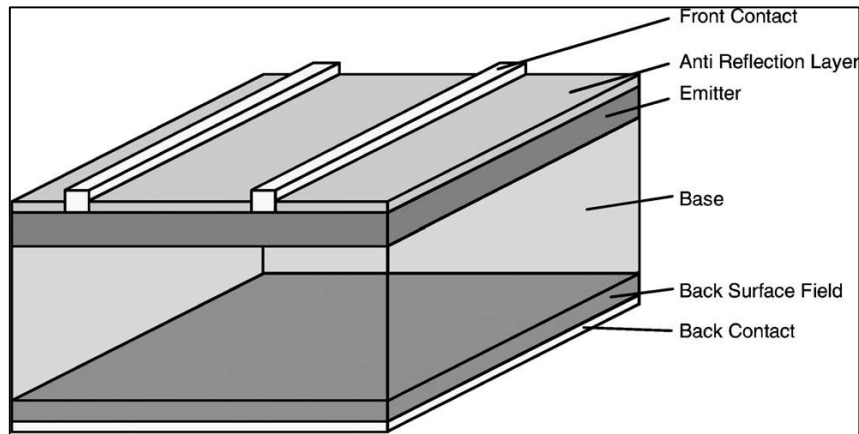


Figura 3.12 - Constituição interna de uma célula FV de silício (Goetzberger, A. Hebling, C. e Schock, H. 2003)

Os principais elementos constituintes de uma célula FV podem ser sucintamente descritos da seguinte forma (Carneiro, J. 2010):

- **Contactos frontais:** grelha de contacto metálica que funciona como terminal negativo (-)
- **Revestimento anti-reflexo:** revestimento que reduz a reflexão dos fótons incidentes abaixo de 5%. Sem este revestimento a radiação refletiria cerca de um terço da radiação;
- **Região tipo-n:** silício dopado por exemplo com átomos de fósforo contendo excesso de eletrões (transportadores maioritários). A espessura desta camada é de cerca de 300nm;
- **Região tipo-p:** silício dopado por exemplo com átomos de boro contendo excesso de lacunas (transportadores maioritários). A espessura desta camada é de cerca de 250 μm ;
- **Contacto base:** contato metálico localizado na parte inferior da célula, constituindo o terminal positivo da célula (+);

Uma célula solar pode ser representada como uma fonte de corrente ligada em paralelo com o diodo de *junção p-n*, tal como se encontra representado esquematicamente na figura 3.13

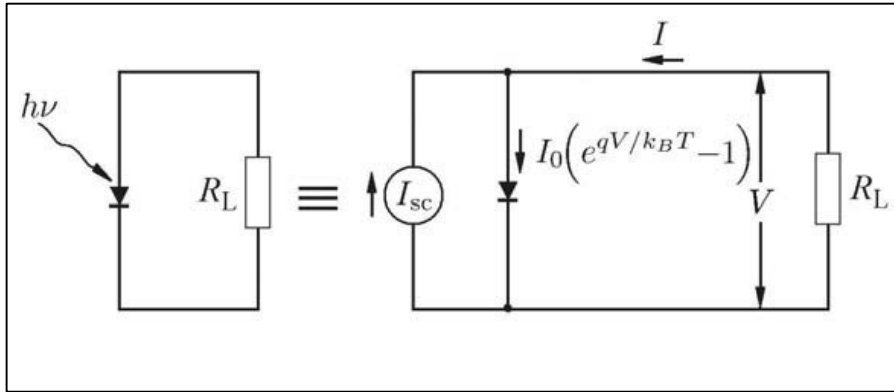


Figura 3.13 - Circuito equivalente de uma célula solar. A célula solar pode ser representada por uma fonte de corrente ligada em paralelo com o díodo da junção p-n. A fonte de corrente é a corrente foto gerada pela radiação solar incidente (Chen, C. 2011)

As curvas características tensão-corrente de uma célula FV advêm do esquema simplificado representado na figura 3.13. Aplicando a lei dos nós a esse circuito simplificado é possível escrever a equação 3.6, que corresponde à denominada curva IV (da nomenclatura inglesa I – corrente e V - tensão).

$$I = I_L - I_g \left[\exp\left(\frac{V}{mU_T}\right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

A figura 3.14 mostra a representação gráfica de uma curva típica *corrente-tensão* dada pela equação 3.6.

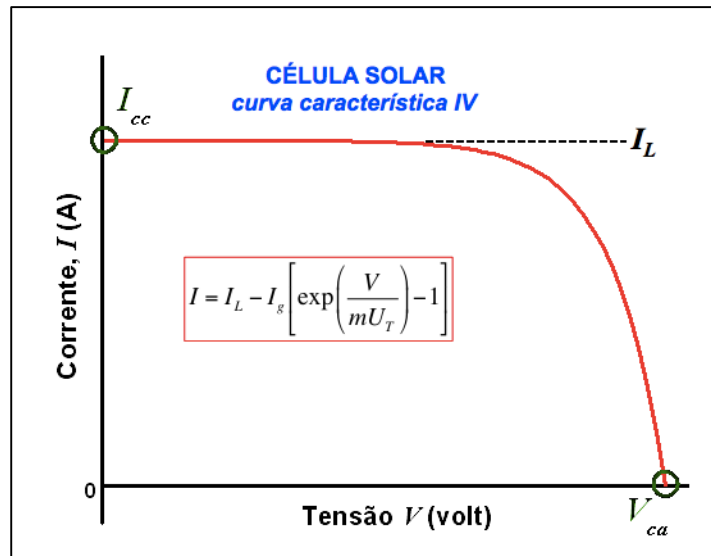


Figura 3.14 - Representação gráfica da curva característica corrente-tensão de uma célula FV de silício (Carneiro, 2010)

Os parâmetros base para compreender as curvas características de uma célula FV são os seguintes:

- **Corrente (I):** A corrente geral que flui através da célula FV é dada pela equação $I = I_D - I_L$, sendo que I_D é a corrente de diodo no escuro e I_L é a corrente foto-gerada;
- **Corrente de curto circuito (I_{sc}):** A corrente de curto circuito é a corrente foto-gerada quando a tensão no circuito é zero, i.e., ambos os terminais da célula FV estão ligados entre si;
- **Tensão de circuito aberto (V_{oc}):** A tensão de circuito aberto é a tensão ao longo da célula solar quando não há corrente a fluir no circuito, i.e., existe uma resistência “infinita” entre os terminais da célula solar.

Na figura 3.15 encontra-se representado o circuito elétrico equivalente para uma célula FV em condição de curto-circuito. Em situação de curto-circuito, a tensão é zero e a corrente foto-gerada é igual ao valor mais elevado da corrente, uma vez que a corrente de diodo no escuro é nula. A corrente de curto-circuito é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

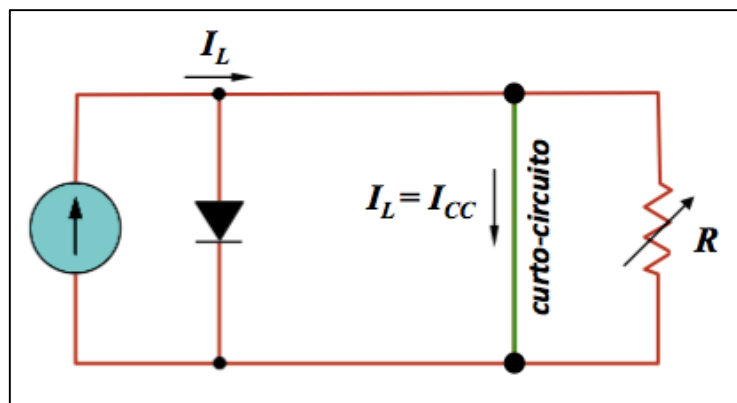


Figura 3.15 - Representação esquemática de um circuito elétrico equivalente de uma célula FV em condição de curto-circuito (Carneiro, J. 2010)

Quando os dois terminais da célula são isolados (correspondente a um interruptor aberto) e a sua resistência da carga externa tem valor muito elevado (infinito), está-se a operar em condições de circuito aberto. Nesta situação verifica-se que a tensão de circuito aberto representa o valor mais elevado da tensão nos terminais da célula. Uma vez mais, o seu valor é uma característica da célula sendo também um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura. Nesta condição, a corrente que flui através do circuito externo é nula. Na figura 3.16 encontra-se representado um circuito elétrico equivalente para uma célula FV em condição de circuito aberto.

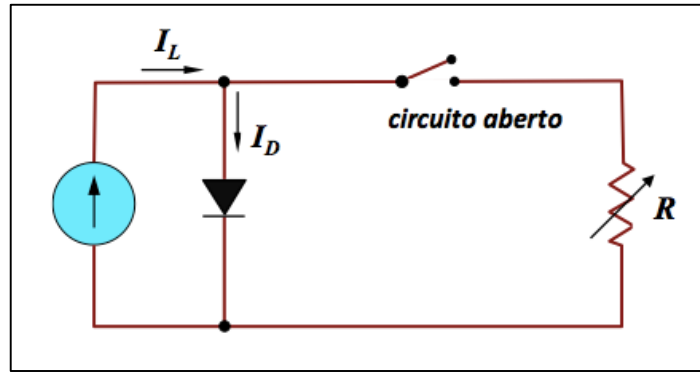


Figura 3.16 - Representação esquemática do circuito elétrico equivalente para uma célula FV em condição de curto-circuito (Carneiro, J. 2010)

Atendendo a que, em condições de circuito aberto a corrente que flui através do circuito externo é nula, é possível calcular a tensão de circuito aberto através da equação 3.7.

$$V_{OC} = mU_T \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_g}\right) \quad (3.7)$$

Uma vez que o valor referente a V_{oc} é normalmente fornecido pelo fabricante, é possível manipular a equação 3.7 de modo a obter o valor de I_g (equação 3.8).

$$I_g = I_{sc} e^{-\frac{V_{oc}}{mU_T}} \quad (3.8)$$

Estes parâmetros são obtidos através das designadas condições de referência, ou condições nominais de teste (do Inglês, *standard test conditions* – *STC*). Em condições STC, os parâmetros são obtidos a uma temperatura $T^R = 25^\circ\text{C}$ e com utilização de luz incidente de intensidade $G^R = 1000 \text{ W/m}^2$.

A potência de saída de uma célula FV é determinada pelo produto entre a tensão (V) e a corrente (I) (equação 3.9). Este produto é sempre menor que o produto entre a corrente de curto circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}), sendo que o maior valor possível para a potência de uma célula FV corresponderia ao produto entre I_{sc} e V_{oc} .

$$P = V \times I \quad (3.9)$$

Tal como foi anteriormente referido, a tensão de circuito aberto é a diferença de potencial entre os terminais de uma célula solar iluminada sob condições de iluminação padrão. Nesta situação a corrente é nula. A corrente de curto circuito é a corrente de uma célula FV sob condições de iluminação padrão quando a carga tem resistência nula. Por outro lado, define-se corrente e tensão máxima, I_{max} e V_{max} , respetivamente, como sendo os valores de corrente e tensão para os quais a sua multiplicação produz o valor mais elevado, ou seja, a potência máxima, P_{max} . Através da análise do gráfico da figura 3.17 é possível entender mais facilmente este conceito.

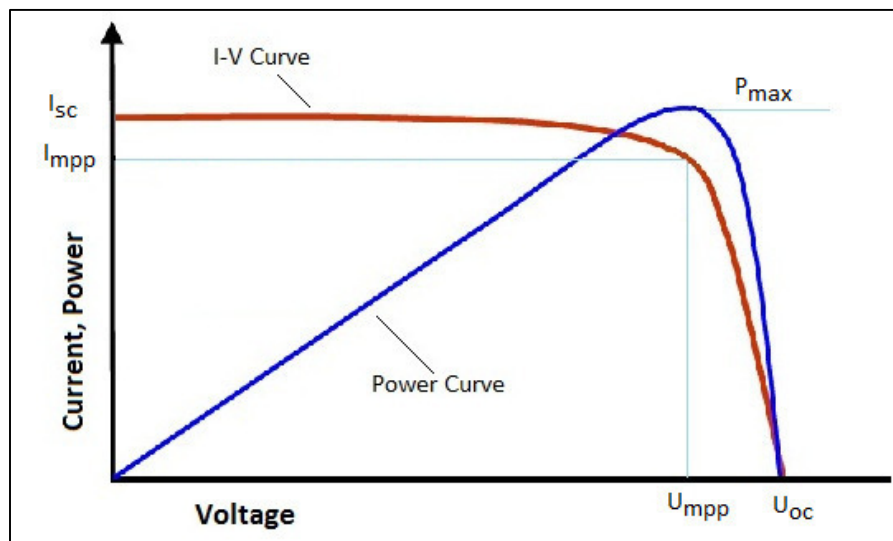


Figura 3.17 - Curva de potência e curva IV de uma célula FV (<http://myelectrical.com/notes/entryid/225/photovoltaic-pv-electrical-calculations>)

Para além dos parâmetros já descritos ao longo deste trabalho, é importante referir que normalmente também é utilizado um outro parâmetro de desempenho designado por fator de forma (do Inglês, *fill factor*). Este parâmetro fornece uma ideia do “grau de proximidade” entre os valores de V_{max} e V_{oc} e também entre I_{max} e I_{sc} . O fator de forma é calculado através da equação 3.10. O valor do fator de forma sob condições ideais é unitário, qualquer desvio do valor ideal é devido a defeitos e resistência dos contatos (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016).

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \Rightarrow P_{max} = (V_{oc} \times I_{sc}) \times FF \quad (3.10)$$

Outro parâmetro importante que normalmente é fornecido pelos fabricantes de células FV é a denominada *eficiência* (ou rendimento) da célula FV. Nas condições STC, a eficiência é dada pela equação 3.11.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{I \times A} = \frac{\text{Potência máxima}}{\text{Radiação solar incidente} \times \text{Área da célula}} \quad (3.11)$$

Apenas uma fração da radiação solar total incidente na célula FV é convertida em eletricidade, sendo que o restante é convertido em energia térmica. Uma parte desta energia térmica acaba por aumentar a temperatura da célula FV e a parte remanescente desta energia é dissipada pela parte frontal e traseira da célula FV (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016). A ocorrência de valores elevados de temperatura para a célula FV prejudica o seu desempenho elétrico. Por unidade de área, o balanço energético pode ser descrito através da equação 3.12.

$$\alpha \tau I = \eta I + U_L (T_c - T_a) \quad (3.12)$$

em que:

- τ corresponde à transmitância na cobertura da célula FV;
- α representa a absorvidade da célula FV;
- η é a eficiência elétrica da célula FV;
- U_L representa o coeficiente de perda, que é a soma entre o coeficiente de perda pela parte frontal e o coeficiente de perda pela parte traseira;
- T_c é a temperatura da célula;
- T_a é a temperatura ambiente.

O coeficiente de perda pela parte frontal é determinado tendo em conta o efeito dos fenômenos de transferência de energia por convecção e por radiação, enquanto que o coeficiente de perda pela parte traseira inclui o efeito combinado de transferência de calor por condução e convecção através da superfície traseira da célula para o ambiente exterior (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016).

3.3 Produção de materiais fotovoltaicos

As tecnologias de células FV são categorizadas em gerações de acordo com a sua evolução e tecnologia inerente (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016). Atualmente, as atividades de investigação e desenvolvimento (I&D) nesta área científica e tecnológica inserem-se maioritariamente na melhoria e redução dos custos de produção para cada uma das gerações de células FV. Na sua grande maioria, o mercado é coberto pela primeira geração de células FV.

A primeira célula FV foi inventada em 1954, usando silício cristalino. Atualmente, o silício cristalino continua a representar entre 80-90% do mercado total mundial. Este material apresenta diversas vantagens, entre as quais são enfatizadas as seguintes (Chen, C. 2011):

- a) O silício é o segundo elemento mais abundante da Terra, correspondendo a cerca de 27% da crosta terrestre;
- b) A sua banda proibida é quase perfeita para o espetro solar;
- c) O silício é muito estável quimicamente;
- d) O silício não é um material tóxico;
- e) Devido à indústria da microeletrónica, a produção e processamento de silício ultrapuro está bem desenvolvida;
- f) Após mais de 50 anos de investigação e desenvolvimento, a eficiência de das células de silício (24,7% em protótipos de investigação) está perto do seu limite teórico. Os módulos produzidos em massa, são limitados pelos custos diretamente associados, atingem uma eficiência de 20%;

3.3.1 Células de Primeira geração

A primeira geração de células FV é baseada na tecnologia de *wafers* de silício. Nesta categoria estão incluídos o silício monocristalino, multicristalino e amorfo (a-Si). As células FV de silício monocristalino advêm de um lingote de um único cristal, desenvolvido em laboratórios de alta tecnologia. Para módulos comerciais com aplicações terrestres, as eficiências estão compreendidas entre 15-20%. As células de silício multicristalino (ou policristalino) são provenientes da execução de processos de recristalização originando o aparecimento de múltiplos cristais de silício. As suas eficiências são inferiores às do silício monocristalino, normalmente entre situadas entre 13-15%.

3.3.2 Células de Segunda geração

As células de segunda geração incluem as células FV de silício amorfo. No silício amorfo, onde não existe uma estrutura geométrica definida para a célula, as eficiências rondam os 5-10%, sendo que em laboratório já foram atingidas eficiências da ordem dos 15% (Britt, J. e Ferekides, C. 1993). Esta tecnologia ainda procura alcançar uma maior recetividade no âmbito da sua utilização em grande escala, devido a algumas desvantagens tais como o seu tempo de vida reduzido (10 anos, comparando aos 20-25 do silício monocristalino), mas continua a ser utilizada em pequenas aplicações como por exemplo em relógios e máquinas de calcular (Foster, R., Ghassemi, M. e Cota, A. 2009). Para além de serem mais baratas, esta geração de células FV tem a particularidade de não necessitarem de ações de processamento a elevadas temperaturas, ao contrário das células de primeira geração. A segunda geração de células FV inclui ainda tecnologias como telureto de cádmio (CdTe), arseneto de gálio (GaAs), Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS) e silício microamorfo. Esta tecnologia é produzida através da deposição de filmes finos dos materiais referidos sobre a superfície de substratos como silício, vidro ou cerâmicas (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016).

Os SC produzidos à base de filmes finos (do Inglês, *Thin-film*) são constituídos por várias camadas de diferentes materiais na forma de filmes finos. Geralmente, estas células solares consistem num substrato, um óxido condutor transparente (TCO), uma camada “janela” (em Inglês, *window layer*), uma camada absorvedora e um contacto metálico. Cada um destes materiais tem propriedades físicas e químicas diferentes e cada um afeta o desempenho da célula. A estrutura de um SC de filme fino está representada esquematicamente na figura 3.18. Um dos melhores exemplos deste tipo de SC é o CdTe, tido como um material absorvedor ideal para células FV multicristalinas de alta eficiência e baixo custo. As células FV baseadas neste conceito atingiram uma eficiência de 16,5%, apesar da eficiência máxima teórica ser de 29% (Chopra, K., Paulson, P. e Dutta, V. 2004).

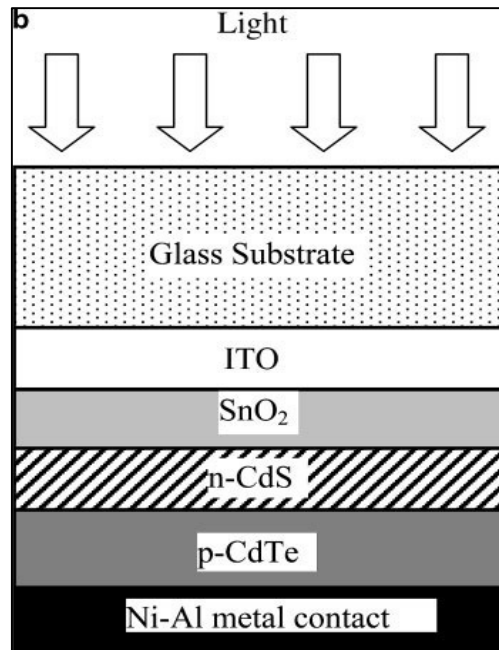


Figura 3.18 - Estrutura típica de um SC de filme fino de CdTe (Chopra, K., Paulson, P. e Dutta, V. 2004)

Comparando os vários tipos de células de filme fino concluiu-se que o SC com melhor relação entre a eficiência e o seu limite teórico é o GaAs, apesar do seu custo por watt-pico ser superior. Os SC de filme fino são dispositivos muito importantes já que oferecem a possibilidade de reduzir significativamente a quantidade utilizada de material ativo e, por conseguinte, conduzindo a uma otimização da relação custo/benefício. A célula de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) apresenta ainda um enorme potencial de utilização em aplicações que requeiram potências instaladas da ordem dos milhões de watt (Chopra, K., Paulson, P. and Dutta, V. 2004).

3.3.3 Células de Terceira geração

As células FV de terceira geração utilizam materiais orgânicos de pequenas moléculas e polímeros. As tecnologias de terceira geração estão essencialmente dirigidas para a melhoria da eficiência de conversão de energia e do coeficiente de absorção de energia, face às células solares de segunda geração. Todos os sistemas FV que têm potencial de conversão de energia para além do limite de Shockley e Queisser são denominados como de terceira geração (Vitoretì, A *et al.* 2016). O limite de Shockley e Queisser corresponde à máxima eficiência teórica de uma célula FV baseada numa junção p-n. Este cálculo foi desenvolvido em 1961 por William Shockley e Hans Queisser e estabeleceu um valor máximo de eficiência de uma célula FV de aproximadamente 33,7%, assumindo uma única junção p-n com uma banda proibida de 1,4 eV (usando o espectro solar AM 1.5).

Outra definição útil é aquela que considera as células de terceira geração como sendo todas as células baseadas na utilização mais eficiente da luz solar quando comparadas com as células baseadas em apenas única banda proibida. O aumento da eficiência pode ser alcançado através da fabricação de células solares com múltiplas junções, melhorando os coeficientes de absorção de luz (Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam, 2016). Um dos materiais mais promissores para a terceira geração de células solares é a perovskite ou as perovskites híbridas orgânicas/inorgânicas ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). A razão para o sucesso da perovskite decorre do facto deste material possuir propriedades específicas para ser um excelente absorvedor: banda proibida adequada, possui um elevado coeficiente de absorção, propriedades excelentes para o transporte de portadores de carga elétrica e aparente tolerância aos defeitos. As células FV baseadas neste conceito atingiram uma eficiência de 12,1% (Chen, Q. *et al.* 2014)

Outra tecnologia de SC emergente refere-se à tecnologia dos pontos quânticos, (em Inglês, *quantum dots*) deve-se principalmente às suas propriedades óticas que são dependentes do tamanho das nanopartículas (Vitoreti, A *et al.* 2016; Nozik, A *et al.* 2010). Nesta tecnologia, os pares elétron-lacuna estão confinados em três dimensões e por isso possuem propriedades diferentes da dos SC habituais. A aplicação dos pontos quânticos, também conhecidos como nanocristais ou nanopartículas, em dispositivos FV permite um aumento de eficiência através da múltipla excitação para uma ampla porção de fótons no espectro solar (Nozik, A *et al.* 2010).

Em resumo, as células FV de multijunção têm como objetivo aumentar a eficiência da célula, e de preferência com produção a baixo custo. Nestes casos, são combinados vários materiais que possuem bandas proibidas com diferentes valores de modo a maximizar a eficiência final. A célula de topo possui a maior banda proibida e deverá absorver os fótons com comprimentos de onda mais baixos (i.e. de maior energia). Os fótons com energias menores do que a energia da banda proibida deverão atravessar a célula de topo e serem posteriormente absorvidos pelas células mais abaixo, com bandas proibidas de menor energia. A célula de baixo tem a banda proibida de menor energia e deverá absorver a luz com comprimentos de onda mais longos (vermelho e quase infravermelho). A figura 3.19 corresponde à representação esquemática de células solares FV do tipo multi-junção.

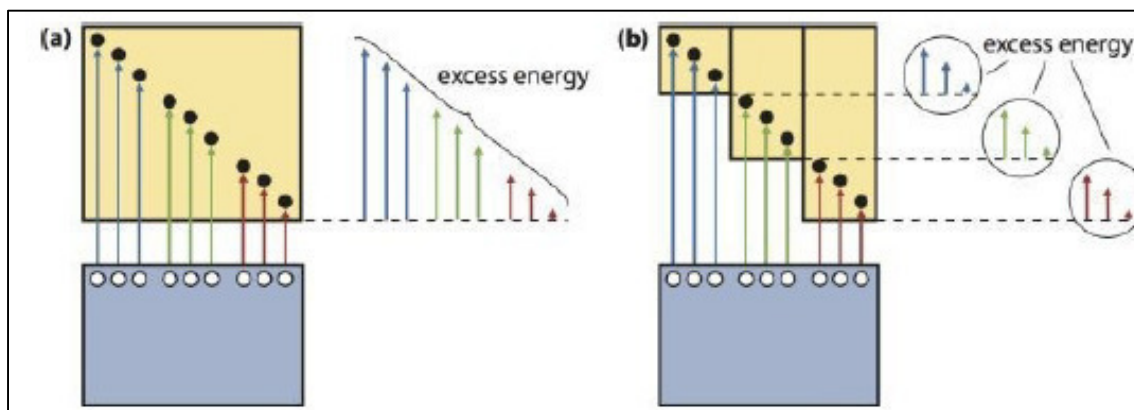


Figura 3.19 - (a) células de uma única junção (*single-junction*); e (b) uma célula de múltipla-junção (*multi-junction*) (Smets, A. et al. 2016)

3.4 Associações de módulos fotovoltaicos

3.4.1 Ligação de módulos (ou células) em série

De modo a atingir a potência máxima desejada para um painel FV é necessário efetuar-se a associação de vários módulos FV (por sua vez resultam da associação de várias células FV), já que a utilização de apenas um módulo é insuficiente para a maioria das aplicações práticas. Existem duas possibilidades de associação: a ligação em série e a ligação em paralelo. Para fins de melhor esclarecimento referente à temática das associações de módulos, serão utilizadas representações esquemáticas, onde a representação de um módulo FV se encontra esquematizada na figura 3.20.

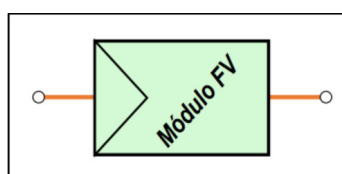


Figura 3.20 - Representação esquemática do símbolo utilizado para um módulo FV (Carneiro. J. 2010b)

A associação de vários módulos FV em série designa-se por *fileiras*. Em aplicações práticas, recomenda-se a utilização de módulos do mesmo tipo de modo a minimizar as perdas de potência do sistema. A figura 3.21 refere-se à representação esquemática da associação em série de n módulos FV.

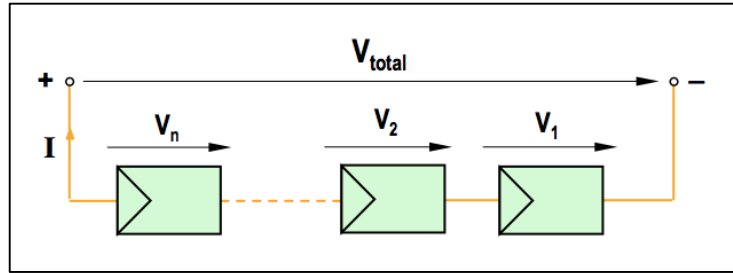


Figura 3.21 - Representação esquemática de n módulos FV em série (Carneiro, J. 2010b)

Através da associação em série de módulos FV é possível obter-se tensões mais elevadas no sistema enquanto que a corrente se mantém inalterada, de acordo com as seguintes relações:

$$V_1 = V_2 = V_n = V \rightarrow V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n \cdot V \quad (3.13)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \quad (3.14)$$

Em resumo, na associação de módulos FV em série, a corrente de curto-circuito do sistema mantém-se inalterada, enquanto que a tensão de circuito-aberto é igual à soma das tensões de circuito-aberto dos módulos interligados.

3.4.2 Ligação de módulos (ou células) em paralelo

A ligação em paralelo de módulos FV é amplamente utilizada em sistemas autónomos, sempre que se pretenda obter correntes mais elevadas e manter-se a tensão estipulada. Na figura 3.22 esquematiza a associação em paralelo de módulos FV.

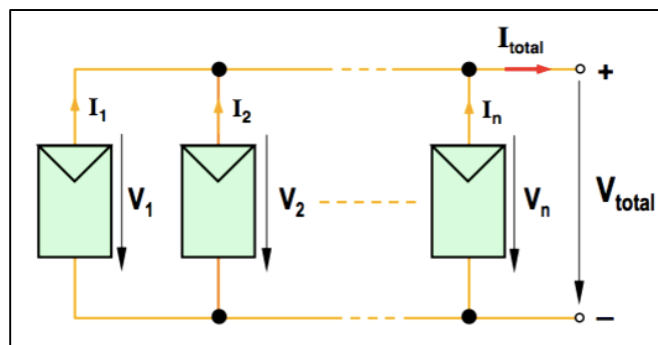


Figura 3.22 – Representação esquemática da associação em paralelo de módulos FV (Carneiro, J. 2010b)

Nestas condições, é possível obter intensidades de corrente mais elevadas, mantendo-se a tensão estipulada no módulo, de acordo com as seguintes relações:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \rightarrow I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n \cdot I \quad (3.15)$$

$$V_{total} = V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (3.16)$$

Nesta condição, enquanto a tensão de circuito-aberto permanece inalterada, a corrente de curto-circuito é igual a soma das correntes de curto-circuito dos módulos interligados.

No próximo capítulo desta dissertação serão propostas experiências de aplicação que permitirão efetuar a validação destes pressupostos, bem como a sua compreensão num contexto prático e didático. As experiências serão realizadas com recurso ao protótipo de um kit didático de energia solar FV, totalmente concebido, desenvolvido e construído pelo autor deste trabalho, que permitirá validar a sua funcionalidade e fiabilidade.

4. DESENVOLVIMENTO DE UM KIT DIDÁTICO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

4.1 Contextualização

A realização desta dissertação de mestrado decorre da ambição do autor em aplicar os conhecimentos obtidos durante o seu percurso académico ao desenvolvimento de produtos com carácter comercial e eventualmente culminando na criação de uma empresa *spin-off* da Universidade do Minho dedicada ao desenvolvimento de equipamentos didáticos e educativos. O ensino de ciência e engenharia assumem um papel muito significativo nas sociedades contemporâneas, servindo de base para os desenvolvimentos tecnológicos que ocorrem atualmente. Apesar desta importância ser amplamente reconhecida, tem-se verificado haver uma diminuição do interesse pelas carreiras científicas, o que conduz inevitavelmente à crescente diminuição das inscrições dos estudantes em cursos de natureza científica e tecnológica (Riopel, M e Smyrniou, Z. 2016). Com efeito, a fração do número de estudantes inscritos em cursos de ciência e tecnologia nas universidades tem vindo a diminuir nos últimos quinze anos, dando origem a uma crescente lacuna entre a procura e a oferta de emprego em diversos sectores (Riopel, M e Smyrniou, Z. 2016). Através de visitas a várias escolas do ensino secundário do concelho de Braga, foi possível constatar que os equipamentos científicos existentes são, na maioria dos casos, obsoletos ou até mesmo inexistentes.

O programa curricular da disciplina de Física e Química A do 10º ano do ensino secundário inclui uma atividade laboratorial, no domínio “Energia e sua conservação”, denominada “AL 3.1 - Radiação e potência elétrica de um painel fotovoltaico”. O objetivo geral da atividade laboratorial é determinar a influência da irradiância e da diferença de potencial elétrico no rendimento de um painel FV. Para isso, é sugerida a montagem de um circuito com um painel FV, um amperímetro e uma resistência variável à qual se associa um voltímetro. Utilizando uma lâmpada como simulador de radiação solar, iluminar o painel FV a uma certa distância e com incidência perpendicular, variar a resistência, calcular a potência fornecida e elaborar um gráfico da potência em função da diferença de potencial elétrico fornecida (tensão de saída do painel).

Neste contexto, o desenvolvimento de equipamentos que sejam capazes de motivar e proporcionar uma aprendizagem de conteúdos relacionados com as diversas temáticas da ciência e tecnologia é absolutamente essencial. O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um equipamento didático de energia solar FV que permita aos alunos proceder à realização de experiências em contexto

de sala de aula. Este equipamento deverá ser compacto, permitindo aos estudantes uma aprendizagem dos conteúdos lecionados com recurso à utilização do mínimo material possível, permitindo assim uma poupança de recursos por parte das escolas e uma otimização da gestão das salas de aula e correspondentes recursos materiais.

Através da sua utilização deste equipamento e das correspondentes fichas de experiências que são disponibilizadas aos alunos, estes ficarão mais habilitados para adquirirem conhecimentos de índole científico e técnico em áreas como a física e eletrónica, alinhados com os objetivos estabelecidos pelo ministério da educação, mas também obterem competências comportamentais associadas ao desenvolvimento do espírito crítico, da colaboração e trabalho em equipa, a criatividade e capacidade de correlação e resolução de problemas.

Ao longo deste capítulo serão descritos os materiais e o software utilizado no desenvolvimento e construção do kit, assim como a descrição das experiências práticas que podem ser realizadas com este kit de energia solar FV.

4.2 Identificação dos Fornecedores

Durante a fase de conceção do protótipo para o kit didático de energia solar FV foi efetuado um levantamento dos potenciais fornecedores de alguns materiais e componentes indispensáveis para a construção do kit. Após uma cuidadosa ponderação que visou a otimização da razão custo/qualidade-benefício e do tempo de entrega associado, optou-se por um website denominado por *Banggood* (<https://www.banggood.com/>). Este website, fundado em 2006, sustenta o seu negócio no comércio eletrónico (*e-commerce*), pelo que atualmente oferece uma vasta gama de produtos com preços bastantes competitivos, na grande maioria dos casos sem custos de envio associados e ainda com um tempo de fornecimento relativamente curto (7-25 dias úteis), podendo-se ainda optar por um envio prioritário com um custo adicional de cerca de 2 Euros. Considerando-se que através deste website seria possível obter de uma forma segura, acessível e célere a grande maioria dos componentes necessários à construção do protótipo do kit solar FV, optou-se por selecionar a *banggood* como sendo a principal empresa fornecedora. Salvo menção em contrário, todos os materiais descritos neste capítulo foram obtidos a partir de encomendas realizadas no website anteriormente mencionado. Por questões de facilitação de consulta e identificação, a figura 4.1 apresenta o logotipo da empresa e correspondente endereço Web.



Figura 4.1 - Logo do website Banggood”(<https://www.banggood.com/>)

4.3 Materiais utilizados

4.3.1 Células fotovoltaicas

A primeira tarefa visando a construção do kit solar FV consistiu na encomenda das células solares FV que constituem o componente mais importante no âmbito da construção do protótipo. Optou-se pela seleção de dois tipos de células FV com especificações e dimensões diferentes. Tal procedimento justifica-se pelo facto de haver necessidade de se atender às necessidades e aos objetivos de aprendizagem estipulados nas experiências práticas a realizar. De modo a proceder à associação de células eletricamente ligadas em série, optou-se por utilizar células solares de dimensões mais reduzidas, não só por questões estéticas mas também para garantir uma maior facilidade do seu manuseamento. O tipo de célula utilizada para a realização desta experiência está ilustrada na figura 4.2-a. Para as restantes experiências, foi utilizada uma célula FV de dimensão superior e com especificações diferentes. A figura 4.2-b ilustra a célula FV utilizada.

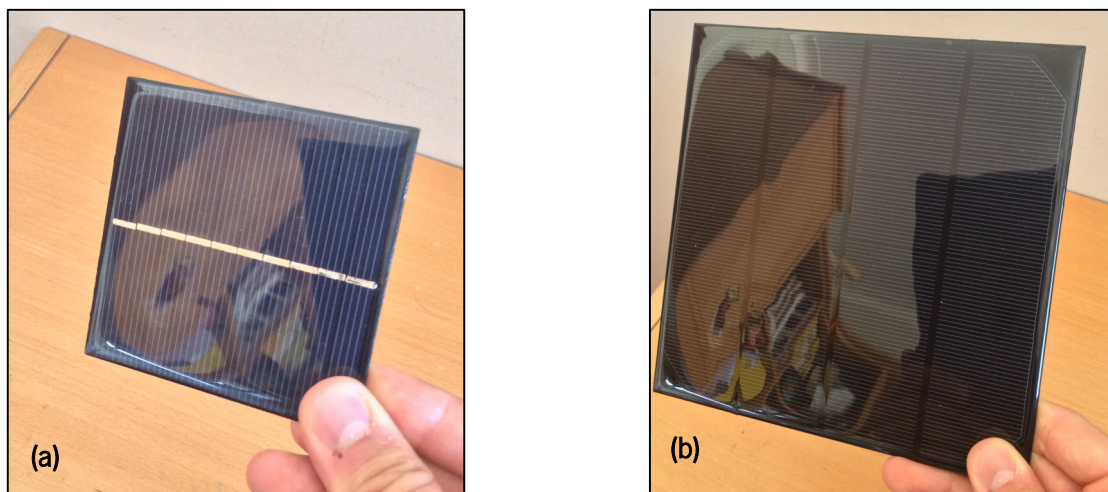


Figura 4.2 (a) Célula FV de 0.8W: (b) Célula FV de 4.5W:

A tabela 4.1 faculta informação referente às células FV (célula (a)) utilizada para realizar a experiência referente à associação de células eletricamente ligadas em série.

Célula (a):

Tabela 4.1 – Especificações da célula tipo (a)

<u>Potência</u>	<u>0,8W</u>
<u>Tensão de circuito aberto</u> <u>(V_{oc})</u>	<u>5V</u>
<u>Corrente de curto-circuito(I_{sc})</u>	<u>160mA</u>
<u>Dimensões</u>	<u>80x80x3mm</u>
<u>Peso</u>	<u>23g</u>
<u>Preço</u>	<u>2,42 Euros</u>

A tabela 4.2 apresenta as especificações referentes à célula do tipo (b).

Célula (b):

Tabela 4.2 – Especificações da célula tipo (b)

<u>Potência</u>	<u>4,5W</u>
<u>Tensão de circuito aberto</u> <u>(V_{oc})</u>	<u>6V</u>
<u>Corrente de curto-circuito(I_{sc})</u>	<u>750mA</u>
<u>Dimensões</u>	<u>165x165mm</u>
<u>Peso</u>	<u>104g</u>
<u>Preço</u>	<u>7,50 Euros</u>

4.3.2 *Desenvolvimento do Software Arduino*

Um dos principais objetivos referentes à construção do kit didático de energia solar FV traduz-se na redução da dimensão dos espaços destinados à realização das experiências (na verdade, muitas vezes as escolas não dispõem de espaços laboratoriais e as mesas das salas de aula, pequenas por natureza, são utilizadas como bancadas de experiências), na redução do número dos componentes e dos materiais utilizados nas experiências e também na portabilidade das experiências, apenas alcançada no pressuposto de que se consiga construir sistemas compactos. Neste contexto, e atendendo a que este kit foi desenvolvido para ser utilizado maioritariamente por estudantes do ensino secundário em contexto de sala de aula, é importante que o kit seja de fácil e rápido manuseamento. Analisando os kits semelhantes existentes no mercado para a realização de experiências relacionadas com energia solar FV, verificou-se que são amplamente utilizados os multímetros para obtenção de medidas como a tensão e a corrente elétrica do sistema experimental. Este tipo de componentes são extremamente fiáveis e precisos, no entanto ocupam algum espaço e requerem a utilização de fios de ligação, o que atrasa a realização das experiências. Este aspeto é manifestamente importante já que se pressupõe que as experiências são realizadas em contexto de sala de aula e inevitavelmente sujeitas a um tempo letivo razoavelmente limitado.

Tendo em conta que o principal objetivo do desenvolvimento deste equipamento é proporcionar aos alunos a melhor experiência de aprendizagem possível, optou-se por utilizar uma ferramenta de hardware e software denominada por “Arduino”. O Arduino é uma plataforma *open-source* de eletrónica e é amplamente utilizada para diversos projetos nas áreas da eletrónica e da robótica. O logótipo da Arduino é mostrado na figura 4.3. Na verdade, esta plataforma foi criada no “Ivrea Interaction Design Institute” a fim de ser utilizada como uma ferramenta de prototipagem fácil (<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>). A versatilidade do Arduino permite que possa ser utilizado quer por iniciantes no ramo da eletrónica e programação, mas também por utilizadores mais avançados.

Entre as várias vantagens do Arduino enfatizam-se as seguintes (<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>):

- Preço reduzido dos seus componentes;
- Transversalidade do seu software, operando nos vários sistemas operativos;
- Ambiente simples de programação;

- Software *Open-Source*;
- Hardware *Open-Source*.



Figura 4.3 - Logo da Arduino (https://www.arduino.cc/arduino_logo.png)

Neste trabalho, os componentes referentes ao hardware utilizado para a construção do protótipo do kit solar FV são os que em seguida se enunciam:

- Placa de expansão multifunções v3.0 para Arduino Nano;
- Microcontrolador ATmega328P da *Geekcreit* compatível com Arduino Nano;
- Sensor de corrente bidirecional INA219;
- LCD IIC 2004 da *Geekcreit* compatível com Arduino Nano;
- Regulador de tensão 5V.

Descreve-se agora, com algum detalhe, as funções/características referentes a cada um dos componentes que integram o hardware do protótipo do kit solar FV construído.

4.3.2.1 Placa de expansão multifunções v3.0

A utilização da placa de expansão proporciona uma maior facilidade de ligações ao microcontrolador, uma vez permite ligar vários componentes tais como sensores, relés, condensadores, potenciômetros e outras placas de desenvolvimento devido à maior presença de pontos de acesso (pinos). A figura 4.4 corresponde a uma fotografia da placa de expansão que foi utilizada e ligada ao microcontrolador, ATmega328P. O preço médio deste dispositivo é de cerca de 2,50 Euros.

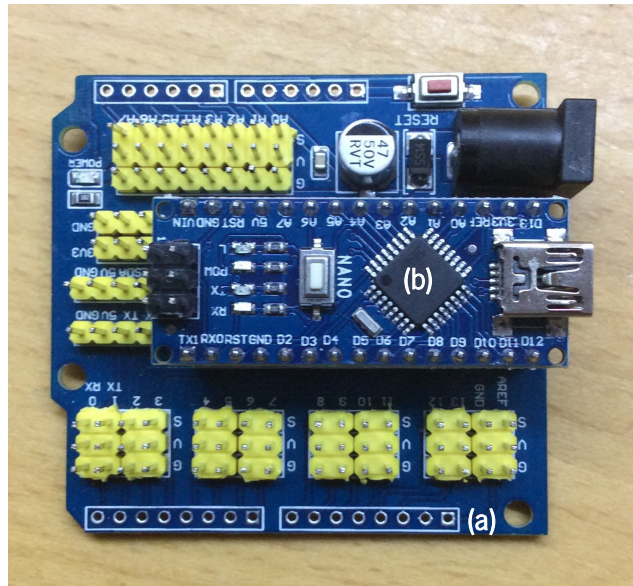


Figura 4.4 – (a) Placa de expansão v3.0 conectada com o (b) microcontrolador ATmega328P

4.3.2.2 Microcontrolador ATmega328P

As especificações deste componente são as que se enunciam em seguida:

- Fabricante: *Geekcreit®*;
- Tensão de operação (nível lógico): 5V;
- Tensão de entrada (recomendado): 7V – 12V;
- Tensão de entrada (limites): 6V – 20V;
- Pinos de E/S digitais: 14 (dos quais 6 fornecem saída PWM);
- Pinos de entrada analógica: 8;
- Corrente DC por pino de E/S: 40 mA
- Memória Flash: 32KB (ATmega328) dos quais 2 KB utilizados pelo bootloader;
- SRAM: 2KB (ATmega328);
- EEPROM: 1KB (ATmega328);
- Velocidade de Relógio: 17MHz;
- Preço \approx 2,99 Euros.

Um microcontrolador é um circuito integrado que pode ser programado para desempenhar funções específicas. É utilizado para executar linhas de programação (vulgarmente denominado por código) que controla uma ou várias funções do dispositivo ao qual se encontra ligado. São amplamente utilizados em motores de automóveis, dispositivos eletrónicos (câmaras, micro-ondas, VCRs, telemóveis, entre outros) e dispositivos de teste/medição tais como por exemplo, multímetros e osciloscópios (<http://meseec.ce.rit.edu/eecc250-winter99/250-2-9-2000.pdf>).

No âmbito deste trabalho, este dispositivo é responsável pelo tratamento e análise do sinal recolhido através do sensor INA219 e posterior visualização no display LCD.

Em seguida, apresentam-se as linhas de programação que foram desenvolvidas pelo autor dirigidas especificamente para a realização deste trabalho. O código desenvolvido tem por função comandar o microprocessador de forma a que este execute o conjunto das tarefas que são necessárias para efetuar a apresentação no LCD dos dados obtidos. Pese embora a aparente simplicidade do código apresentado, este esconde por detrás uma biblioteca de funções anteriormente já desenvolvida por outros programadores e projetistas de circuitos como é o caso do display e do sensor de corrente aqui utilizados. Enunciam-se alguns exemplos:

- FastIO.h;
- I2CIO.h;
- LCD.h;
- LiquidCrystal.h;
- Wire.h;
- Adafruit_INA219.h;

```
#include <FastIO.h>
```

```
#include <I2CIO.h>
```

```
#include <LCD.h>
```

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```

#include <LiquidCrystal_SR.h>

#include <LiquidCrystal_SR2W.h>

#include <LiquidCrystal_SR3W.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_INA219.h> // You will need to download this library

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

Adafruit_INA219 sensor219; // Declare and instance of INA219

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

void setup(void)

{

    Serial.begin(115200);

    lcd.begin(20,4);

    sensor219.begin();

}

void loop(void)

{

    float busVoltage = 0;

    float resistance = 0;

    busVoltage = sensor219.getBusVoltage_V();

    current = sensor219.getCurrent_mA();

    float current = 0; // Measure in milli amps

    float power = 0;

    power = busVoltage * (current/1000); // Calculate the Power

    resistance = busVoltage/(current/1000); // Calculate resistance

```

```
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("Voltage: ");  
lcd.print(busVoltage);  
lcd.print(" V");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Current: ");  
lcd.print(current);  
lcd.print(" mA");  
lcd.setCursor(0,2);  
lcd.print("Power: ");  
lcd.print(power);  
lcd.print(" W");  
lcd.setCursor(0,3);  
lcd.print("Resist: ");  
lcd.print(resistance);  
lcd.print(" ohm");  
delay(2000);  
}
```

4.3.2.3 Sensor de corrente bidireccional INA219

As especificações deste componente são apresentadas em seguida:

- Tensão de alimentação: 3 a 5,5 V
- Medição de tensões num intervalo entre 0 a 26 V;
- Corrente máxima de operação de ± 3.2 A com resolução de 0,8m A;
- Medições de corrente, tensão e potência;

- Interface I2C;
- Temperatura de operação: -40 °C a 125 °C;
- Preço ≈ 3,68 Euros.

O sensor de corrente INA219, muito utilizado em aplicações de Arduino, é um dispositivo que mede corrente elétrica com tensão DC entre 0 e 26 V. Entre as suas várias aplicações é possível destacarem-se aquelas correspondentes aos servidores, carregadores de bateria, equipamentos de teste, equipamentos de telecomunicações, computadores, entre outros (http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_INA219.pdf).

No âmbito da realização deste trabalho, o sensor de corrente INA219 foi utilizado para medir corrente e tensão à saída das células FV. A figura 4.5 refere-se a uma ilustração do medidor de corrente que foi utilizado.

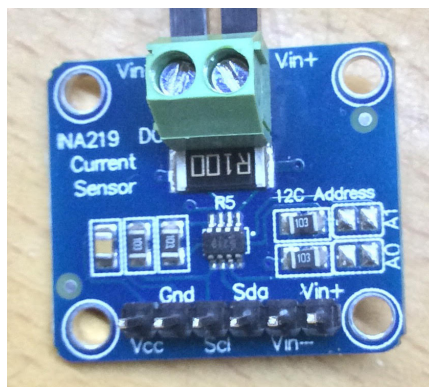


Figura 4.5 –Sensor de corrente INA219

4.3.2.4 LCD IIC 2004

O LCD IIC 2004 é um display com 4 linhas e 20 caracteres por linha com contraste regulável através de um potenciómetro. As especificações deste componente são aquelas que em seguida se enunciam:

- Fabricante: *Geekreit®*
- Tensão de alimentação: 5 V;
- Interface I2C;
- Ajuste de contraste: Potenciómetro;

- Formato do display: 20 Caracteres x 4 linhas;
- Texto branco e cor de fundo azul;
- Tamanho: 9,8 x 6,0 x 1,2 mm;
- Preço \approx 1,99 Euros.

Através da programação do microcontrolador, é possível escolher a informação que aparecerá no display. Para o caso referente ao protótipo do kit didático de energia solar FV, o LCD IIC 2004 permite ao utilizador efetuar a leitura dos valores de corrente, tensão, potência e resistência elétrica. A figura 4.6 refere-se à imagem do display utilizado no protótipo do kit didático de energia solar FV.



Figura 4.6 –Display do kit didático de energia solar FV

4.3.2.5 Regulador de tensão 5V

As especificações deste componente são as que em seguida se enunciam:

- Tensão de entrada: 6 V – 20 V
- Tensão de saída: 5 V;
- Corrente de saída máxima: 2000 mA;
- Eficiência de conversão: 95%;
- Tamanho: 35x40x15mm;
- Preço \approx 5,82 Euros.

O regulador de tensão com as especificações acima apresentadas, apesar de não ter sido utilizado nas experiências descritas mais adiante nesta dissertação, foi introduzido no protótipo do kit didático de energia solar FV pelo facto de permitir alcançar uma maior versatilidade do mesmo. Por exemplo, através da sua utilização é possível obter uma tensão de saída constante de 5 V para o sistema, permitindo

carregar, por exemplo, a bateria de um telemóvel através da sua saída de USB. Na figura 4.7 encontra-se ilustrado o regulador de tensão que foi usado no protótipo do kit didático de energia solar FV.

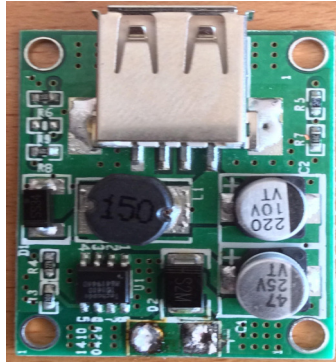


Figura 4.7 – Regulador de tensão 5 V

4.3.2.6 Outros materiais utilizados

Para além do hardware previamente descrito, foram ainda utilizados outros componentes eletrónicos ou de suporte que permitiram a construção eficaz do protótipo do kit de energia solar FV. Entre outros, enunciam-se os seguintes:

- Lâmpada de halogéneo 50 W;
- Condensador 4700 μF ;
- Potenciómetro multi-volta de 100 Ω ;
- Cabos de ligação;
- Breadboard;
- Suporte de acrílico.

Após a conclusão das tarefas anteriormente descritas, ou seja, a identificação, aquisição e compreensão do modo de funcionamento de todos os componentes necessários bem como das estruturas de suporte essenciais para a construção do kit de energia solar FV, foi necessário testar a eficácia do seu funcionamento. De modo a aferir o seu desempenho e facilidade de utilização pelos estudantes, foram idealizadas 3 experiências práticas para o uso do sistema. No próximo capítulo serão descritas as experiências, na forma de um protocolo experimental a ser fornecido aos alunos, bem como o correspondente protocolo referente à resolução das experiências a ser fornecido aos professores. Importa enfatizar que o preço final do produto desenvolvido foi de apenas 75 Euros. Este aspeto é extremamente importante já que torna este sistema extremamente competitivo face a produtos concorrentes do

mercado e, por conseguinte, dotando-o de um elevado potencial comercial já que poderá ser amplamente adquirido e utilizado por centenas de escolas secundárias nacionais e estrangeiras.

5. EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS

5.1 Experiência 1: Medição da Irradiância de diferentes fontes de luz

Informação prestada aos alunos

A luz emitida por um corpo pode ser caracterizada através da sua irradiância solar (W/m^2) e da sua cor (comprimento de onda ou frequência). A irradiância solar à superfície da Terra varia de acordo com a localização geográfica, não tendo um valor constante em todo o planeta. Para além do Sol, existem muitas outras fontes de luz que utilizamos no nosso dia-a-dia, tais como candeeiros ou lanternas. Todas essas fontes de luz emitem radiação, que pode ser medida com recurso a um fotorradiómetro ou um piranómetro.

Tarefas a realizar pelos alunos

O aluno deverá efetuar a medição da irradiância de diversas fontes de luz, entre elas o Sol, fazendo variar a distância à fonte, de modo a completar a tabela abaixo apresentada. À exceção do Sol, deverão ser realizadas medições com três distâncias diferentes. Após as medições deverá ser efetuada uma discussão e interpretação dos resultados obtidos e aferidas qual a génese da diferença entre os valores obtidos para cada uma das fontes de luz utilizadas.

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Fonte de luz	Irradiância (W/m^2) à distancia	Irradiância (W/m^2) à distancia	Irradiância (W/m^2) à distancia
Sol			
Sombra			
Lâmpada de halogéneo de 50W			
Lâmpada de halogéneo de 58W			

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

É possível observar-se que _____
_____.

Experiência 1- Ficha do professor

Resultados experimentais

A realização desta experiência prática foi efetuada com recurso a um fotoradiômetro com as seguintes especificações:

- Alcance UV 1 (Baixa iluminação): $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ – $9999 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;
- Alcance UV 2 (Elevada iluminação): $0.01 \text{ mW}/\text{cm}^2$ – $40 \text{ mW}/\text{cm}^2$;
- Resolução: $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ e $0,01 \text{ mW}/\text{cm}^2$;
- Precisão: $4\% \pm 1$ dígito (a $23^\circ \pm 5^\circ\text{C}$);
- Comprimento de onda: 290 – 370 nm;
- Ponto de calibração: 365 nm;
- Amplitude de temperatura: 0 – 50 °C;
- Dimensões: 145 x 55 x 40 mm;
- Peso: 135 g

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Fonte de luz	Irradiação (W/m^2) à distancia	Irradiação (W/m^2) à distancia	Irradiação (W/m^2) à distancia
Sol	64,45		
Sombra	26,0		
Lâmpada de halogéneo de 50W	3,8 (30 cm da fonte)	8,1 (20 cm da fonte)	33,5 (10 cm da fonte)
Lâmpada de halogéneo de 58W	0,05 (30 cm da fonte)	0,10 (20 cm da fonte)	0,20 (10 cm da fonte)

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

Os resultados esperados para a Irradiância solar deveriam corresponder a cerca de 1000 W/m^2 . A enorme diferença dos experimentalmente obtidos deve-se à circunstância de que neste trabalho foi utilizado um fotoradiômetro que apenas mede comprimentos de onda entre os 290 nm e os 370 nm, e, por conseguinte, situados na região do UV. Uma vez que a radiação solar cobre um espectro muito mais amplo, não foi possível obter uma medição total da Irradiância, situação que não aconteceria se tivesse sido um aparelho adequado (como por exemplo um piranômetro) e que o Departamento de Física não dispunha. As diferenças de valores entre as lâmpadas de halogéneo devem-se sobretudo ao facto da lâmpada de 50W ter um alcance de luminosidade mais concentrado e a lâmpada de 58W ter um alcance mais amplo. Pese embora os resultados serem de apenas radiação UV, é possível constatar que à medida que a distância à fonte de iluminação vai aumentando, a Irradiância vai diminuindo cada vez mais, ou seja existe uma proporcionalidade inversa.

5.2 Experiência 2: Associação de células fotovoltaicas ligadas em série

Informação prestada aos alunos

Nos últimos anos, a utilização da energia solar fotovoltaica tem vindo a crescer muito constituindo atualmente uma alternativa sustentável de produção de energia com emissões nulas de CO₂. Um sistema fotovoltaico poderá ser instalado na cobertura de uma habitação de modo a converter a energia solar em eletricidade e assim satisfazer as necessidades energéticas de uma determinada família. A potência de uma célula, módulo ou painel fotovoltaico é medida em Watts (W), sendo calculada através do produto entre a tensão (V) e a corrente (I) que produz. De modo a assegurar que o sistema funciona adequadamente, é necessário encontrar o balanço correto entre tensão e corrente. Para o efeito, os módulos FV poderão ser ligados em série, em paralelo ou com uma configuração mista dependendo das necessidades do sistema a alimentar. Os alunos deverão descobrir através desta experiência qual o efeito na tensão e corrente do sistema da ligação de células FV ligadas em série.

Tarefas a realizar pelos alunos

Utilizando o protótipo do kit didático de energia solar fotovoltaica, os alunos devem medir a tensões de circuito aberto e as correntes de curto-circuito para cada uma das três células individualmente, e registar os valores obtidos na tabela 1 mostrada abaixo. Em seguida, deverão ligar em série a primeira célula com a segunda e logo depois associar a terceira célula em série com as anteriores. Os valores obtidos deverão ser utilizados para preencher as tabelas abaixo. Comente os resultados obtidos.

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

	Célula 1	Célula 2	Célula 3
Tensão de circuito aberto (V)			
Corrente de curto-circuito (mA)			

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

	Célula 1	Célula (1+2)	Célula (1+2+3)
Tensão de circuito aberto (V)			
Corrente de curto-circuito (mA)			

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

É possível observar-se que _____
_____.

Experiência 2- Ficha do professor

Resultados experimentais:

Esta experiência foi realizada com recurso à utilização do protótipo do kit didático de energia solar fotovoltaica e usando como fonte de iluminação uma lâmpada de halógeno com a potência de 50 W. Foram utilizadas 3 células do tipo *célula a)* descrita no capítulo 4 da presente dissertação. A figura 5.1 refere-se a uma fotografia do protótipo do kit didático construído que contempla um arranjo de 3 células FV eletricamente em série.

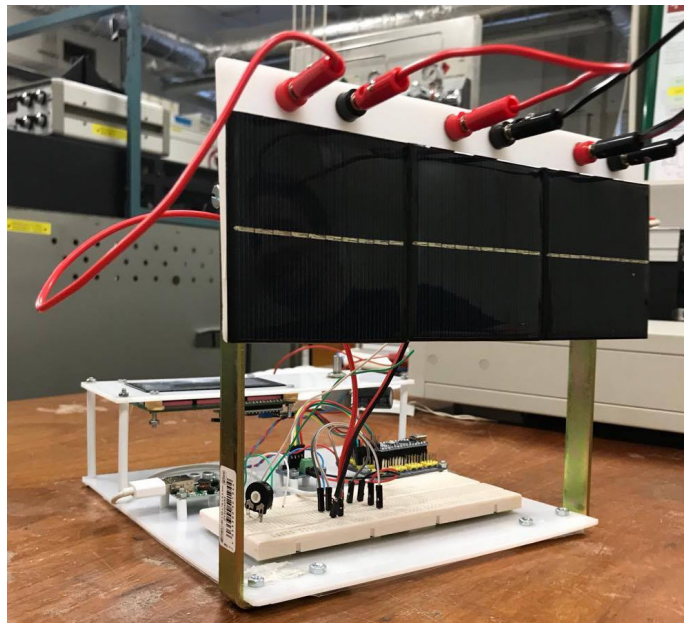


Figura 5.1 – Protótipo do kit didático de energia solar FV integrando a associação de células FV ligadas em série

Os valores experimentalmente obtidos para as tensões de circuito aberto e corrente de curto-circuito para cada uma das células individuais e ligadas em série são apresentados nas tabelas seguintes.

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

	Célula 1	Célula 2	Célula 3
Tensão de circuito aberto (V)	5,28	5,32	5,26
Corrente de curto-circuito (mA)	152,1	155,2	153,6

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

	Célula 1	Célula (1+2)	Célula (1+2+3)
Tensão de circuito aberto (V)	5,28	10,58	15,84
Corrente de curto-circuito (mA)	152,1	154,7	153,4

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

Através dos resultados experimentais é possível constatar que as tensões de circuito aberto e das células individuais correspondem aproximadamente ao valor de tensão de circuito aberto fornecido pelo fabricante (5 V). Ao associar as células eletricamente ligadas em série seria expectável, que a tensão de circuito aberto do sistema fosse igual à soma das tensões individuais de cada uma das células, tal como foi anteriormente descrito na secção 3.4 desta dissertação. Esse pressuposto foi comprovado com sucesso como se pode observar através da análise da tabela 2.

No que concerne à corrente de curto-circuito das células individuais, também se constatou que os valores obtidos são muito próximos dos valores reportados pelo fabricante (160 mA). Por outro lado, também se observa que após se ter efetuado a ligação em série a corrente de curto circuito do sistema praticamente se mantém inalterada, tal como foi devidamente explicado no âmbito do desenvolvimento da secção 3.4 deste trabalho. Contudo, importa realçar que as pequenas diferenças registadas nos valores da corrente de curto circuito ocorrem pela circunstância de estarem localizadas a distâncias ligeiramente diferentes da fonte de luz. Com efeito, a célula central está ligeiramente mais próxima da fonte de luz do que as restantes duas que estão localizadas na extremidade do sistema, conforme se pode observar na figura 5.1. Tal comportamento permite afirmar que distância e o ângulo de incidência da luz sobre uma superfície coletora estão diretamente relacionados com o número de fótons que incidem sobre essa superfície e, por consequência, capazes de transmitirem diferentemente a energia suficiente aos eletrões para gerarem corrente elétrica.

5.3 Experiência 3: Curva IV característica de uma célula fotovoltaica

Informação prestada aos alunos

Se nenhuma carga (por exemplo, uma resistência elétrica) for ligada à célula fotovoltaica sob iluminação, será obtida uma tensão de circuito aberto mas sem que ocorra qualquer fluxo de corrente elétrica. Se os terminais do célula solar fotovoltaica forem ligados entre si (condição de curto-circuito) uma corrente bastante elevada, a denominada curto-circuito irá ser produzida, mas com uma tensão nula. Em qualquer dos casos não é produzida qualquer potência. Contudo, se for adicionada uma carga com resistência variável é possível produzir obter-se a curva IV característica da célula fotovoltaica. O objetivo desta experiência é compreender a influência da variação da resistência de carga sobre os valores de tensão e corrente da célula fotovoltaica.

Tarefas a realizar pelos alunos

Nesta experiência o kit didático de energia solar fotovoltaica integra apenas uma célula do tipo b). A fim de se obter a curva característica IV, o aluno deverá variar a resistência de carga do sistema através da utilização do potenciômetro. Para o efeito, o potenciômetro deve ser rodado desde o seu ponto mínimo (para a esquerda) até que sejam executadas 10 voltas completas para a direita (ponto de resistência máxima) e simultaneamente ler-se (no display do LCD IIC 2004) e registrar-se na tabela 3 os valores obtidos. Após completar a tabela, o aluno deverá efetuar a representação gráfica da curva característica IV através do uso dos valores de tensão (V) e da corrente (mA) obtidos experimentalmente.

Nota: Os valores de resistência obtidos no leitor são apresentados em Ohm (Ω)

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Voltas	Tensão (V)	Corrente (mA)	Resistência (Ω)
Carga mínima			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

É possível observar-se que _____
_____.

Experiência 3 - Ficha do professor

Resultados experimentais:

Nesta experiência o kit didático de energia solar fotovoltaica integra apenas uma célula do tipo b) com as especificações que anteriormente foram apresentadas na secção 4.3. A célula fotovoltaica foi exposta à ação de uma fonte de luz emitida por uma lâmpada de halógeno de 50 W. Na figura 5.2 é mostrada uma fotografia do protótipo do kit didático de energia solar fotovoltaica com a célula a) integrada no sistema. Os valores obtidos de tensão e corrente permitiram construir o gráfico 1.

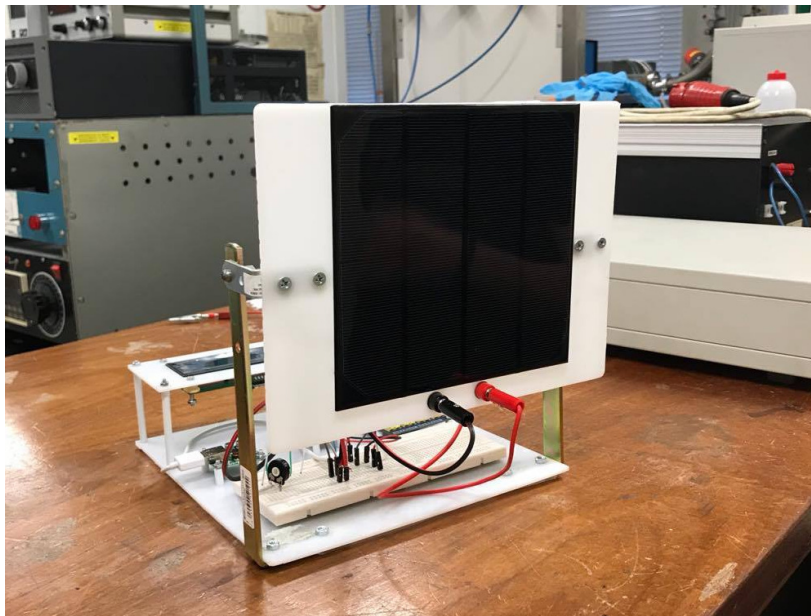


Figura 5.2 – Protótipo do kit didático de energia solar FV com célula a)

TABELA DE REGISTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Voltas	Tensão (V)	Corrente (mA)	Resistência (Ω)
Carga mínima	0,08	66,7	1,21
1	0,72	66,2	10,87
2	1,55	65,7	23,6
3	2,09	65,3	32
4	2,59	61,5	42,11
5	3,06	59,8	51,17
6	3,57	57,4	62,19
7	4,06	56,4	72
8	4,49	55,3	83,46
9	4,87	53,8	90,53
10	4,93	48,7	101,23

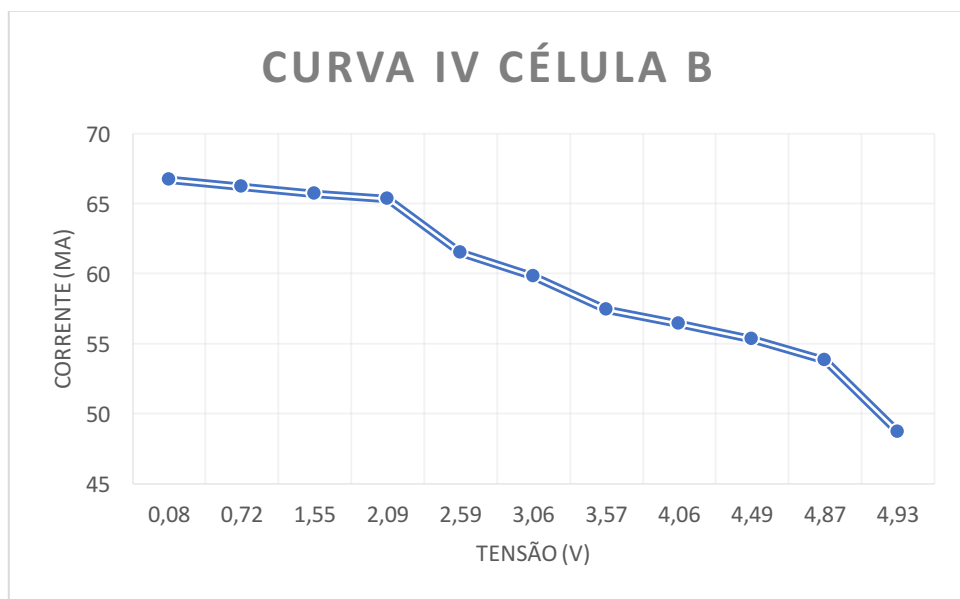


Gráfico 1 - Curva característica IV obtida experimentalmente

Discussão e interpretação dos resultados experimentais

Através da análise do gráfico é possível observar que à medida que a resistência da carga adicionada ao sistema vai aumentando a corrente vai diminuindo e, por consequência, a tensão vai aumentando até eventualmente atingir o seu valor de tensão de circuito aberto. Com efeito, a evolução desta curva experimental é semelhante à representação gráfica que está apresentada na figura 3.14 da secção 3.2 e que é governada pela equação 3.6.

6. COMPACT ENERGY KITS

6.1 *IdeaLab* – Laboratório de Ideias de *Negócio*

O desenvolvimento da presente dissertação deu início a um processo que tem como objetivo final a criação de uma empresa spin-off denominada por *CEK - Compact Energy Kits*, vocacionada e especializada no desenvolvimento de equipamentos didáticos no âmbito das energias renováveis e brinquedos CTEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática). Para o efeito, e em resposta a um repto endereçado pelo Professor Joaquim Carneiro, eu próprio e o meu colega Pedro Dias do Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente – Energia, submetemos uma candidatura conjunta a um programa denominado por *IdeaLab*, criado pela *TecMinho*. O *IdeaLab* – Laboratório de Ideias de Negócio permite a jovens empreendedores desenvolver as suas ideias de negócio através do fornecimento de instrumentos e metodologias relacionadas com a criação e desenvolvimento de negócios inovadores, de forma a facilitar a análise, o planeamento e a implementação de produtos ou serviços comercializáveis. A página Web da *TecMinho* pode ser consultada no seguinte endereço:

(http://www.tecminho.uminho.pt/showPage.php?url=emp_idealab.html&zid=497).

Através de uma série de *workshops* sobre *Voice of the Customer*, *Mercado*, *Estratégia*, *Finanças* e *Elevator Pitch*, assim como um serviço de *coaching* prestado por um mentor especializado, foi possível desenvolver a ideia de negócio que culminou com a criação do primeiro plano de negócios.

6.2 Laboratório de empresas

Após a participação no *IdeaLab*, os promotores do projeto foram convidados a participar no *Laboratório de Empresas* da *TecMinho*. Este programa representou uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento e criação de empresas, funcionando de uma forma semelhante ao *IdeaLab* mas com a componente uma empresarial muito mais acentuada. Através de uma série de *workshops* sobre temáticas diversas, por exemplo, *Formalizar e Constituir Empresas*, *Gerir uma PME*, *Análise económica e Tipos de Financiamento*, *Marketing*, *Imagem e Comunicação*, *Marketing Digital* e *Técnicas de Vendas e Negociação Comercial*, foi possível a aquisição de conhecimentos nas mais variadas áreas inerentes ao negócio e ao mundo empresarial. Para além dos *workshops*, a equipa teve acesso a diversas sessões de mentoria na presença de um *business coach*. Através da participação neste programa foi possível enriquecer o projeto de forma substancial através da aquisição de conhecimentos e metodologias bastante importantes para um empreendedor. Na figura 6.1 refere-se a uma fotografia da equipa a apresentar o projeto numa das sessões do laboratório de empresas.



Figura 6.1 – Sessão de apresentação de trabalhos do Laboratório de empresas

6.3 *Venture Cup* Portugal

Em Junho de 2017, após todo um processo de fortalecimento da ideia de negócio em programas de incubação da Universidade do Minho, o projeto participou num concurso de *start-ups* denominado por *Venture Cup*. A *Venture Cup* é uma organização sem fins lucrativos que organiza competições de *start-ups* a nível mundial. No dia 29 de Junho, a equipa da *Venture Cup* organizou uma sessão de *pitch* training, onde foi possível apresentar o projeto a um júri, obtendo-se um *feedback* positivo e conselhos importantes visando a melhoria da apresentação. O concurso decorreu no dia 30 de Junho na *Casa da Música*, na cidade do Porto. Os participantes foram divididos por três categorias: *GreenTech*, *HealthTech* e *ICT & Services*. Cada equipa participante efetuou uma apresentação em forma de *Pitch*, de 4 minutos, perante um júri. O projeto venceu a categoria de *GreenTech* e os promotores foram convidados a participar na maior competição mundial de *start-ups* universitárias denominada por *University Start-Up World Cup*, em Copenhaga. A figura 6.2 mostra uma fotografia referente ao instante da entrega do prémio de vencedor da categoria *GreenTech* pela mão do *Senior Vice-President* da *Vestas*, Jorge Magalhães.



Figura 6.2 – Entrega de prémio de vencedor da categoria de *GreenTech* da *Venture Cup Portugal 2017*, ao lado do *Senior Vice-President* da *Vestas* Jorge Magalhães

6.4 *University Start-Up World Cup*

Entre 18 e 22 de Setembro de 2017, o projeto participou na *University Start-up World Cup* em Copenhaga. Durante cerca de 5 dias a equipa teve a oportunidade de participar em diversas atividades organizadas pela *Venture Cup*, desde *flash mentoring*, sessões de *brainstorming* sobre tópicos relevantes para o futuro da tecnologia e inovação, participação numa das maiores feiras de alta tecnologia dos países nórdicos *HighTech Summit*, *pitch training*, *networking* com as restantes equipas provenientes de mais de 40 países de todo o mundo e estabelecimento de contactos com várias personalidades adstritas ao ecossistema empreendedor Nórdico, abrindo-se assim portas para eventuais parcerias e cooperação. Para além das referidas atividades, o projeto participou nas semifinais da competição. A produtiva semana culminou com a final do concurso onde foram premiados os vencedores de cada categoria, bem como o vencedor final do concurso. Apesar do projeto não ter sido laureado com o prémio da categoria, importa realçar que todos os prémios foram bem entregues e que as equipas e as ideias premiadas são motivo de orgulho para os respetivos promotores e países participantes. A figura 6.3 ilustra uma fotografia de todos os participantes do *University Start-Up World Cup*.



Figura 6.3 – Participantes no *University Start-Up World Cup*, junto com o apresentador da final Nick Hardy (Fonte: *Venture Cup*)

Foi após terminar o *University Start-Up World Cup* que a equipa recebeu com entusiasmo a noticia de ter sido laureada pela organização com o prémio *Green Initiative Award*, cujo certificado é apresentado na figura 6.4.



Figura 6.4 - Certificado do prémio *Green Initiative Award* atribuído pela organização do University Start-Up World Cup

6.5 Perspetivas futuras

Após a concretização de todas as ações e tarefas que foram desenvolvidas no período temporal inferior a 1 ano e após a entrega da presente dissertação de mestrado, os próximos objetivos passam pela criação formal da empresa e pela obtenção do estatuto de *spin-off* da Universidade do Minho. Existem fortes perspetivas para que seja possível desenvolver um número acrescido de produtos semelhantes ao que foi desenvolvido na presente dissertação de modo a se poder obter alcançar um alargamento da oferta disponível para o mercado. Uma outra grande expectativa passa pela implementação de ações que acelerem uma entrada a curto prazo no mercado nacional de modo a se poder dar um contributo acrescido à melhoria do ensino da ciência e tecnologia nas escolas secundárias, de formação profissional e até eventualmente nas universidades portuguesas, Nos próximos meses serão realizados testes piloto com o protótipo do kit didático de energia solar FV nas escolas secundárias da região de Braga, de modo a aferir a recetibilidade por parte de alunos, professores e outros responsáveis das escolas. A adoção desta estratégia, não só permitirá identificar eventuais inconformidades existentes no sistema desenvolvido, mas também permitirá melhorar o equipamento com o intuito de se produzirem melhores e mais conteúdos pedagógicos associados à temática das energias renováveis. A entrada no mercado está prevista acontecer no ano de 2018.

6.6 Resumo do plano de negócios desenvolvido

6.6.1 Sumário Executivo

A *Compact Energy Kits* nasceu da vontade dos promotores em aliar o seu gosto e interesse pelas energias renováveis com a necessidade crescente de melhorar a educação tecnológica e dotar as crianças e jovens de material com interesse didático e que lhes permita objetivamente alcançar uma melhor aprendizagem. Acreditamos que podemos fazer com que as crianças e jovens possam aprender, quer em contexto de sala de aula com os nossos *CEK-Solar* e *CEK-Wind*, mas também em casa com o nosso *CEK-Solar Car*. O nosso maior ponto forte refere-se ao robusto conhecimento técnico e científico sobre as energias renováveis que nos permite estar um passo à frente da nossa concorrência direta, fazendo com que sejamos capazes de produzir vários kits que irão permitir uma melhor aprendizagem e ajudarão também os pais e professores a incentivar as crianças e jovens a serem mais ativos e criativos. A nossa equipa é constituída por João Costeira e Pedro Dias, ambos licenciados em Ciências do Ambiente pela Universidade do Minho e a frequentar o mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente – Energia. Contamos também com o apoio de vários elementos ligados à Física, Engenharia Eletrónica e Engenharia Mecânica. Nos próximos anos pretendemos introduzir novos produtos, não só no setor das energias

renováveis, mas também nas fileiras científicas em geral, sendo que a base do nosso negócio refere-se a produtos sob a forma de kits didáticos, ou seja, pretende-se que sejam as próprias crianças e jovens a construir o produto, com ajuda contínua de folhetos ou manuais contendo informação e conhecimento científico devidamente contextualizado e relevante.

6.6.2 Segmentos de Mercado

Os nossos kits *CEK-Solar* e *CEK-Wind* serão especialmente dirigidos às escolas secundárias, podendo ser adaptados para o ensino universitário e profissional. No que concerne ao segmento do ensino secundário, está identificado um universo de aproximadamente 600 escolas secundárias, cada uma delas com necessidade para adquirirem aproximadamente 6 kits. Por outro lado, através de um estudo de mercado efetuado ao nível das escolas secundárias do concelho de Braga, também foi possível constatar que existe uma enorme receptividade para com este tipo de produtos. Todos os professores com os quais conversamos, manifestaram um grande interesse pela ideia. Foram acordadas ainda experiências piloto a serem realizadas em três escolas do concelho de Braga a fim de se aferir a receptibilidade por parte dos alunos e professores e compreender quais os aspetos a melhorar de modo a se poder oferecer o melhor produto possível. Pretendemos ainda estabelecer uma relação muito próxima com escolas de modo a ser possível estarmos sempre a par das suas necessidades e assim podermos satisfazê-las com o fornecimento dos nossos produtos e conteúdos pedagógicos. Os alunos e professores não serão apenas utilizadores, mas também influenciadores. Na verdade, só a implementação de uma estratégia desta natureza será possível criar uma relação de confiança e duradoura no tempo.

7. CONCLUSÕES

Concluída a escrita da presente dissertação de mestrado e avaliando todos os resultados obtidos, não é ousado afirmar que todas as expectativas foram suplantadas em larga escala e que todo o progresso alcançado permitiu a aquisição de novos conhecimentos em diversas áreas (ênfatisa-se o conhecimento adquirido em vários aspetos da eletrónica e programação), culminando com o desenvolvimento de um produto com potencial comercial elevado. Do ponto de vista técnico e científico, foram utilizadas tecnologias e materiais modernos, permitindo obter-se uma substancial economia em termos de material utilizado, concebendo-se um kit de energia solar FV que permitirá aos futuros utilizadores a aquisição de conhecimentos científicos em áreas como a energia, eletrónica e eventualmente programação. Os resultados obtidos com a realização das fichas de experiência sugeridas, corresponderam às expectativas e permitiram aferir que é possível alcançar bons resultados em menos tempo através da utilização do protótipo deste kit didático, quando comparados os resultados esperados do uso de outros sistemas existentes no mercado que, para além de serem bastante mais dispendiosos, compreendem outro tipo de problemas como por exemplo o peso e algumas dificuldades de utilização em contexto real de sala de aula onde as dimensões das mesas existente são, na generalidade das situações, manifestamente insuficientes. É possível afirmar que, com a implementação de tarefas que visem uma melhoria em termos de design e com a realização de ações de marketing apropriadas, o kit didático de energia solar apresenta grande potencial de ser utilizado em larga escala não só no sistema de ensino nacional, mas também ao nível europeu.

Do ponto de vista empresarial, todo o processo inerente ao desenvolvimento da presente dissertação de mestrado foi bastante gratificante para o autor em termos de desenvolvimento de competências científicas, técnicas e comportamentais. A obtenção de um prémio e a participação num grande concurso de empreendedorismo internacional constituiu um aspeto extremamente importante e motivador já que contribuiu para fomentar a procura permanente de aquisição de competências, condição absolutamente incontornável para o sucesso de uma actividade empresarial que eventualmente venha a ser encetada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Booker, E e Grondelle, R (2011). *Environmental Physics: Sustainable Energy and Climate Change*, 3ª Edição. John Willey & Sons.

BP Statistical Review of World Energy 2017. Consultado em 31/10/2017, disponível em <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy/solar-energy.html>

Britt, J. e Ferekides, C. (1993). Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied Physics Letters*, 62(22), pp.2851-2852.

Carneiro, J. (2010). Semicondutores – Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica. Consultado a 31/10/2017, disponível em https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores_Modelo%20matem%C3%A1tico%20da%20c%C3%A9lula%20fotovoltaica.pdf

Carneiro, J. (2010b). Módulos fotovoltaicos, características e associações. Consultado em 31/10/2017, disponível em https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf

Chen, C. (2011). *Physics of solar energy*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.

Chen, Q., Zhou, H., Hong, Z., Luo, S., Duan, H., Wang, H., Liu, Y., Li, G. and Yang Y. (2014). Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells via Vapor-Assisted Solution Process. *Journal of the American Chemical Society*, 136(2), pp.622-625.

Chopra, K., Paulson, P. e Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(23), pp.69-92

Crawley, G (2016). *Solar Energy, Volume 2* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy, 2011. Consultado em 31/10/2017, disponível em

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_energy2020_en_0.pdf

Energy Policies of IEA countries: Portugal. (2016). Paris: OECD Publishing. Consultado em 31/10/2017, disponível em

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Portugal_2016_Review.pdf

Estratégia Nacional para a Energia 2020 - ENE 2020

EU energy in figures. (2016). Luxembourg: Publications Office of the European Union. Consultado em 31/10/2017 disponível em

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/PocketBook_ENERGY_2015%20PDF%20final.pdf

Foster, R., Ghassemi, M. e Cota, A. (2009). *Solar energy – Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton: CRC Press.

Goetzberger, A. Hebling, C. e Schock, H. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40(1), pp 1-46

Nozik, A., Beard, M., Luther, J., Law, M., Ellingson, R. e Johnson, J. (2010). Semiconductor Quantum Dots and Quantum Dot Arrays and Applications of Multiple Exciton Generation to Third-Generation Photovoltaic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 110(11), pp.6873-6890.

Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) 2013. Consultado em 31/10/2017, disponível em <https://poseur.portugal2020.pt/Content/docs/Poseur/PNAEE.pdf>

Riopel, M. and Smyrniou, Z. (2016) *New developments in science and technology education*. Springer

Romero, M. e Steinfeld, A (2012). Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels. *Energy & Environmental Science*. Sci. 5, 9234–9245

Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Swaii, R. and Zeman, M. (2016). *Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*.

Tiwari, G., Tiwari, A. e Shyam (2016). *Handbook of solar energy*, 1ª Edição. Springer.

Vitoreti, A., Corrêa, L., Raphael, E., Patrocínio, A., Nogueira, A. e Schiavon, M. (2016). Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. *Química Nova*.

[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Share_of_renewables_in_gross_inland_energy_consumption,_2014_\(%25\)_YB16.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Share_of_renewables_in_gross_inland_energy_consumption,_2014_(%25)_YB16.png). (Consultado em 31/10/2017)

http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_INA219.pdf (Consultado em 31/10/2017)

<http://meseec.ce.rit.edu/eecc250-winter99/250-2-9-2000.pdf> (Consultado em 31/10/2017)

<http://myelectrical.com/notes/entryid/225/photovoltaic-pv-electrical-calculations> (Consultado em 31/10/2017)

<http://www.jornalsudoeste.com/?diaria=2543> (Consultado em 31/10/2017)

<http://www.pan.com.pt/comunicacao/noticias/item/853-pan-revogacao-imediate-empresas-petroliferas.html> (Consultado em 31/10/2017)

https://www.arduino.cc/arduino_logo.png (Consultado em 31/10/2017)

<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#> (Consultado em 31/10/2017)

<https://www.banggood.com/> (Consultado em 31/10/2017)

<https://www.thenakedscientists.com/articles/features/catching-energy-sun> (Consultado em 31/10/2017)