



Análise Comparativa entre Células Solares Orgânicas e Inorgânicas

Ricardo Miguel Ponte Raimundo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador(es): Prof. Carlos Alberto Ferreira Fernandes
Prof. João Paulo Neto Torres

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel Gameiro de Castro
Orientador: Prof. Carlos Alberto Ferreira Fernandes
Vogal: Prof. Jorge Manuel Torres Pereira

Novembro 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Dedicado à minha família

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos ao Professor Carlos Ferreira Fernandes e ao Professor João Neto Torres por toda o acompanhamento e disponibilidade ao longo da realização desta dissertação.

Um agradecimento especial aos meus pais e às minhas irmãs por todo o apoio, compreensão e ânimo transmitido, não só no decorrer desta dissertação como também ao longo de toda a minha vida.

Aos meus amigos, um sincero obrigado por todo o companheirismo e amizade que sempre demonstraram, em especial à Ana Filipa, Inês Cunha, Inês Figueiredo, Bernardo Matos, Francisco Rato, Frederico Mota, João Azevedo, João Ferreira, Ricardo Luz, Ricardo Cerdeira, Simon Bastos e Tiago Pereira.

Finalmente, um enorme agradecimento à minha namorada que sempre me apoiou e ajudou em todos os momentos da minha vida pessoal e académica.

Resumo

A crescente necessidade em tornar o planeta cada vez mais sustentável e a utilização excessiva de recursos finitos na produção de energia tornam extremamente importante a utilização de tecnologias que utilizem recursos renováveis para satisfazer as necessidades energéticas presentes, não comprometendo os recursos naturais necessários para a sobrevivência das gerações futuras.

Uma destas tecnologias, a tecnologia solar fotovoltaica, tem sido alvo de considerável evolução. Entre outros, os novos desenvolvimentos procuram melhorias no aumento do seu rendimento e nos materiais utilizados, sem comprometer o seu custo.

A dependência dos painéis solares fotovoltaicos de uma determinada irradiância e o facto destes funcionarem, de um modo geral, durante as horas de Sol conduziram a uma busca de novas soluções e a uma melhoria das soluções já existentes.

Entre os painéis solares fotovoltaicos, podemos distinguir os que utilizam semicondutores de materiais orgânicos e os que utilizam semicondutores de materiais inorgânicos. Este estudo irá ter como principal foco o estudo das células solares orgânicas, que têm, como principais vantagens um menor impacto ecológico, menor custo de produção e múltiplas aplicabilidades devido à sua flexibilidade e transparência.

As células solares orgânicas (OSC) serão sujeitas a vários testes, de forma a apurar: (i) as suas principais vantagens e desvantagens em relação às células tradicionais, (ii) e qual o caminho a percorrer no desenvolvimento desta tecnologia para que possa ser produzida em massa e tornar-se uma substituta das células com semicondutores inorgânicos.

Palavras-chave: Fotovoltaico, energias renováveis, sustentabilidade, semicondutores, células solares orgânicas.

Abstract

The increasing need to make the planet more sustainable and the excessive use of finite resources in the production of energy makes the renewable resources crucial in order to satisfy the present energy demands without affecting natural resources and to ensure the survival of next generations.

The evolution of photovoltaic technology has been considerable and some new approaches try to improve their efficiencies, for example with use of other types of layers without compromised their cost.

Due to the limitation of the hours of sun, in a regular day, it is necessary to develop the photovoltaic technology and to improve their characteristics in order to occupy a prominent place in the renewable energies. In solar panels we can distinguish the ones which use organic semiconductor and the inorganic semiconductors. This study has the main focus on organic solar cells which produce the lowest impact in the ecologic environment when compared with traditional solar cells.

Several tests will be performed on organic solar cells in order to understand their advantages and disadvantages when compared with the silicon cells.

Keywords: Photovoltaic, renewable energy, sustainable, semiconductors, organic solar cells.

Conteúdos

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Símbolos e Acrónimos	xix
Glossário	1
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da Tese	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Do Efeito Fotovoltaico às Células Solares Orgânicas	5
2.2 Células Solares Orgânicas	5
2.2.1 Células Solares de Perovskite	7
2.2.2 Semicondutores Orgânicos	7
2.2.3 Células de Geometria Normal	8
2.2.4 Células de Geometria Invertida	9
2.2.5 Heterojunção de Camada Única	10
2.2.6 Heterojunção de Dupla Camada	10
2.2.7 Heterojunção Bulk (BHJ)	11
2.2.8 Heterojunção Misturada com Dupla Camada Híbrida	11
2.2.9 Estrutura p-i-n	12
2.2.10 Estrutura em Série (Tandem)	12
2.3 Espectro de Radiação Solar	13
2.3.1 Espectro de Radiação Lâmpada Halogéneo	14
3 Análise do Painel	15
3.1 Características do painel solar orgânico	16
3.2 Estudo do painel solar orgânico sujeito a diferentes tipos de irradiâncias e temperaturas	17

3.2.1	Comparação entre o painel de silício e o painel orgânico para a mesma distância ao foco luminoso	20
3.2.2	Análise de células solares orgânicas com diferentes compostos	21
3.3	Simular a imersão do painel solar orgânico em água	22
3.3.1	Simulação de um meio real	24
3.4	Painel solar orgânico submetido a diferentes temperaturas	25
3.5	Funcionamento de vários tipos de células solares de amostra sob influência de radiação IV	28
3.6	Painel solar orgânico exposto à irradiância solar	33
3.7	Análise Comparativa entre as duas gerações de Células	36
4	Análise Comparativa	37
4.1	Presente e Futuro das Células Solares Orgânicas	37
4.2	Análise Económica	38
4.3	Análise de Produção	39
4.4	Análise de Degradação	42
4.5	Aplicabilidade	46
4.6	Vantagens e Desvantagens	47
5	Conclusões	51
5.1	Trabalho Futuro	53
	Bibliografia	55
A	Informações Técnicas	59
A.1	Informações técnicas do painel de silício mono-cristalino de 5W	59

Lista de Tabelas

3.1	Distâncias do eixo central das lâmpadas ao centro do painel.	17
3.2	Tabela com os fatores de não idealidade, corrente inversa de saturação e temperatura do painel.	19
4.1	Características elétricas e mecânicas das duas tecnologias.	39
4.2	Tabela de síntese.	48

Lista de Figuras

2.1	Imagem ilustrativa da estrutura básica de uma célula solar orgânica. Imagem adaptada de [8].	6
2.2	Configuração eletrônica dos átomos de carbono. Imagem adaptada de [6].	8
2.3	(a) Estrutura de uma célula com geometria normal. (b) Célula com geometria normal. Imagens adaptadas de [6].	9
2.4	(a) Estrutura de uma célula com geometria invertida. (b) Célula com geometria invertida. Imagens adaptadas de [6].	9
2.5	(a) Estrutura de dupla camada de uma célula solar orgânica. (b) Esquema correspondente do diagrama de energia representando a geração e dissociação do par elétron-buraco. Imagens adaptadas de [11].	10
2.6	(a) Estrutura BHJ de uma célula célula solar orgânica. (b) Diagrama de energia representando a geração e dissociação do par elétron-buraco. Imagens adaptadas de [6].	11
2.7	(a) Estrutura série de uma célula célula solar orgânica. (b) Diagrama de energia representando a geração de foto-corrente. Imagens adaptadas de [6].	13
2.8	Imagem ilustrativa da radiação direta, difusa e refletida. Imagem adaptada de [16].	13
2.9	Espectro de radiação do sol e de algumas fontes de iluminação. Imagem adaptada de [18].	14
3.1	Painel solar orgânico da empresa InfinityPV. Imagem adaptada de [19].	15
3.2	Exemplo do painel solar orgânico da empresa InfinityPV. Imagem adaptada de [19].	16
3.3	Esquema equivalente das medições efectuadas sobre o painel solar orgânico.	17
3.4	Painel solar orgânico durante a medição para as posições A, B e C.	17
3.5	Gráfico das Curvas $I-U$ para todas as posições testadas em laboratório.	18
3.6	Gráfico das Curvas $P-U$ para todas as posições testadas em laboratório.	18
3.7	Gráfico das Curvas $I-U$ para a posição A com e sem sombreamento.	19
3.8	Gráfico das Curvas $P-U$ para a posição A com e sem sombreamento.	20
3.9	Gráfico das Curvas $I-U$ normalizadas para o painel de silício e para o painel orgânico.	20
3.10	Gráfico das Curvas $I-U$ normalizadas para o painel de silício e para o painel orgânico.	20
3.11	Painel de silício mono-cristalino com concentrador (CPVT). Imagem adaptada de [20].	21
3.12	Gráfico das curvas $P-U$ das células solares orgânicas expostas à radiação solar.	22
3.13	Gráfico das células orgânicas contendo informação sobre a potência e o rendimento.	22
3.14	Painel orgânico sob um saco plástico transparente, para realizar a experiência.	23

3.15 Gráfico das Curvas $I-U$ do painel orgânico imerso em água.	23
3.16 Gráfico das Curvas $P-U$ do painel orgânico emerso em água.	23
3.17 Gráfico da potência gerada em função da profundidade.	24
3.18 Comparação gráfica entre as curvas $I-U$ de água limpa vs água turva.	25
3.19 Comparação gráfica entre as curvas $P-U$ de água limpa vs água turva.	25
3.20 Curva $I-U$ do painel solar orgânico para diferentes temperaturas.	26
3.21 Curva $P-U$ do painel solar orgânico para diferentes temperaturas.	26
3.22 Gráfico do fator de não idealidade a variar com a temperatura.	27
3.23 Gráfico da corrente I_{IS} a variar com a temperatura.	27
3.24 Células solares de amostra.	28
3.25 Caixa com filtro IV.	28
3.26 Curva $I-U$ das várias células de amostra.	29
3.27 Curva $I-U$ das várias células de amostra com filtro Infra-Vermelho.	29
3.28 Curva $P-U$ das várias células de amostra.	29
3.29 Curva $P-U$ das várias células de amostra com filtro Infra-Vermelho.	30
3.30 Gráfico Voc das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	31
3.31 Gráfico Isc das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	31
3.32 Gráfico Pmp das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	31
3.33 Gráfico Vmp das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	32
3.34 Gráfico Imp das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	32
3.35 Gráfico fator de forma das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.	33
3.36 Montagem painel solar no exterior.	34
3.37 Gráficos correspondentes a 4 dias de análise da irradiância solar e correspondente potência gerada pelo painel solar orgânico, de um total de 31 dias.	34
3.38 Comparação de curvas de potência para regiões geográficas diferentes.	35
3.39 Curva de potência média diária ao longo de 30 dias.	35
4.1 Previsão até 2030 da performance de várias tecnologias solares. Imagem adaptada de [25].	37
4.2 Etapas do processo de fabrico de um módulo orgânico. Imagem adaptada de [29].	40
4.3 Parte do processo de fabrico de silício poli-cristalino e mono-cristalino	41
4.4 Técnica de análise de hot-spots através de infra-vermelhos. Imagens adaptadas de [33]	42
4.5 Imagens de queimaduras provocas por fatores internos e externos. Imagens adaptadas de [33]	43
4.6 Painel solar orgânico após reparação. Imagem adaptada de [33].	44
4.7 Defeitos em painéis de silício. Imagens adaptadas de [34]	45
4.8 Exemplos de aplicações de células solares orgânicas em edifícios e estruturas.	47
4.9 Exemplo de projetos de desenvolvimento de células solares orgânicas em aplicação na indústria automóvel.	47

Lista de Símbolos e Acrónimos

BP By-pass.

CIGS Cobre-Índio-Gálio-Selênio.

CPVT Concentrated Photovoltaic Thermal.

DSSC Dye sintetize solar cells.

FF Fator de forma.

HOMO Higher occupied molecular orbital.

IV Infra-vermelho.

I_D Corrente no díodo.

I_{IS} Corrente inversa de saturação.

I_{MP} Corrente no ponto de máximo funcionamento.

I_{SC} Corrente de curto-circuito.

K Graus Kelvin

LUMO Lower unoccupied molecular orbital.

OSC Células solares orgânicas.

P3HT : PCBM *poly(3-hexylthiophene) (phenyl-C61-butyric acid methyl ester).*

PEDOT : PSS *poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate.*

P_{MP} Potência de máxima.

V_T Tensão caraterística da temperatura.

V_{MP} Tensão correspondente à potência máxima.

V_{OC} Tensão de circuito aberto.

n Fator de não-idealidade.

Capítulo 1

Introdução

O aumento do consumo de combustíveis fósseis no último século provocou não só um esgotamento dos recursos naturais, como também uma forte pegada ecológica no planeta. Com o aparecimento dos efeitos adversos originados por este consumo excessivo, muitos deles quase irreversíveis, tornou-se essencial o desenvolvimento de fontes de energia alternativas que pudessem, num futuro próximo, substituir a utilização dos combustíveis fósseis. Foram, e continuam a ser, desenvolvidos inúmeros esforços para aumentar as fontes de energia que tem como combustível os recursos renováveis, tais como o vento, o mar e o sol.

O sol, presente todos os dias, é considerado uma fonte estável de energia, ao contrário de outras fontes de energia renovável, tais como o vento ou o mar. Foi esta constatação que levou Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, a procurar possíveis aplicações provenientes da radiação solar, levando-o a descobrir o efeito fotovoltaico. Este primeiro passo permitiu a criação, pela primeira vez em 1877, do primeiro dispositivo de conversão de energia fotovoltaica. Desde então, as células solares tem vindo a ser desenvolvidas de forma a melhorar a sua estabilidade e rendimento, utilizando vários materiais e dopando as camadas p e n dos semicondutores.

Existem vários tipos de células solares, que podem ser divididas em 3 gerações. A primeira geração é aquela que, atualmente, tem um rendimento/custo mais equilibrada e onde o semicondutor de eleição é o Silício, podendo ser mono-cristalino ou poli-cristalino.

A segunda geração de células fotovoltaicas, de filmes finos, é composta por CdTe, a-Si ou CIGS depositados em vidro ou plástico. A maior desvantagem desta geração são os baixos rendimentos.

Na terceira tecnologia de células solares é dada uma maior importância à facilidade de reciclagem dos seus materiais após o seu tempo de vida útil. Nestas células são utilizados compostos orgânicos e inorgânicos abundantes na natureza, tais como, PEDOT:PSS e a prata.

O principal objetivo deste estudo é caracterizar e estudar células solares orgânicas adquiridas à empresa InfinityPV fazendo a sua comparação com as células solares de silício mono-cristalino de um coletor estacionário fotovoltaico térmico com concentrador, da empresa Solarus AB. Para esse efeito, são realizados diversos testes para que se possa compreender não só a evolução de que tem sido alvo esta tecnologia, como também para comparar as principais vantagens e desvantagens destas

tecnologias.

1.1 Motivação

As células solares orgânicas têm sofrido uma grande evolução desde que foram patenteadas, em 2005, por Yang Yang e Yan Shao da Universidade da Califórnia. Desde então, esta tecnologia já foi capaz de atingir cerca de 15% de eficiência [1], mesmo assim, bastante inferior ao máximo rendimento das células solares de silício mono-cristalino. Contudo, a análise destas células não pode ser feita somente com base no seu rendimento, sendo também necessário considerar fatores tais como: a estabilidade da célula, a sua degradação, o seu fator de forma e finalmente o seu custo.

Na necessidade de instalação de painéis fotovoltaicos em locais com dimensões reduzidas e que requeiram rendimentos elevados, a utilização de células solares orgânicas ainda não serão uma opção viável. Contudo, poderá ser considerada a sua utilização nas situações em o espaço de instalação não é uma limitação, dada a capacidade de produção de células solares orgânicas num curto espaço de tempo.

Este tipo de células devido à sua flexibilidade, transparência e baixo custo permitirão, no futuro, ganhar espaço num mercado onde as tecnologias de primeira geração detêm uma fatia de cerca de 80% [2].

A aposta no desenvolvimento neste tipo de células tem sido bastante grande e é expectável uma melhoria nas suas características elétricas. Estas células começaram a ser combinadas com materiais inorgânicos com baixas emissões de CO_2 , o que permitirá obter resultados mais satisfatórios em termos de estabilidade e rendimento.

1.2 Objectivos

O objetivo deste estudo consiste numa análise comparativa entre as células de silício do CPVT da Solarus AB e as células solares orgânicas da empresa InfinityPV. Os principais pontos desta análise serão:

- Estudo do rendimento e dos parâmetros das células orgânicas sujeitas a vários tipos de irradiância e temperatura;
- Estudo do rendimento e dos parâmetros das células orgânicas na situação em que a radiação incidente se insere na gama de infra-vermelho;
- Simulação da inserção das células solares orgânicas em água e análise dos resultados;
- Estudo diário da resposta das células solares orgânicas à exposição solar, durante um período de 30 dias numa situação real;
- Análise comparativa entre as duas gerações de células em estudo;
- Análise do custo, processo produtivo, nível de degradação e aplicabilidade das células em estudo.

1.3 Estrutura da Tese

A estrutura desta tese será basicamente a seguinte:

- O capítulo 1 contém a introdução ao assunto em estudo, a motivação e estrutura da tese;
- O capítulo 2 apresenta o estado da arte, fazendo uma breve descrição da evolução das células solares até aos dias de hoje, dando especial foco às células solares orgânicas;
- O capítulo 3 descreve as experiências efetuadas às células solares orgânicas, analisando o seu comportamento em comparação com as células de silício mono-cristalino;
- O capítulo 4 apresenta uma análise económica, produtiva, de degradação e de aplicabilidade das tecnologias estudadas;
- O capítulo 5 destina-se à conclusão e perspetiva futura do objeto de estudo da tese.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Do Efeito Fotovoltaico às Células Solares Orgânicas

A descoberta do efeito fotovoltaico foi feita pelo físico francês Alexandre-Edmund Becquerel, em 1839. Numa das suas experiências, o físico colocou dois elétrodos de prata (AgCl), dentro de uma caixa escura embebida em ácido e exposta à luz, observando uma diferença de potencial nos elétrodos [3].

Mais tarde, em 1876, William Grylls Adams e Richard Day criaram o primeiro dispositivo foto-conversor feito a partir de selênio. Todavia, o rendimento deste primeiro dispositivo não ultrapassava os 0,5%.

No ano de 1894, Charles Fritts desenvolveu um sensor de luz revestido de selênio. No entanto, devido seu baixo rendimento, de aproximadamente 1%, este dispositivo acabou por não ser utilizado como gerador de energia.

Após a descoberta, em 1950, pela Bell Labs da primeira célula solar de silício, foi possível começar a usar este tipo de células para produzir energia e alimentar dispositivos eletrônicos, tais como, satélites de comunicação utilizados pela NASA em missões espaciais.

A segunda geração de células solares, feitas de filmes finos, começou por utilizar o telureto de cádmio, com rendimentos de 15,9%, obtidas pela Universidade do Sul da Califórnia [4] em 1992.

No período em que a química orgânica teve o seu maior desenvolvimento (a partir de 1965), descobriram-se novas moléculas, que vieram trazer a possibilidade de descobrir novos compostos orgânicos. Embora a descoberta deste tipo de moléculas tenha ocorrido há algum tempo, as melhorias significativas de rendimentos e estabilidade das células orgânicas apenas ocorreram na última década [5].

2.2 Células Solares Orgânicas

As células solares orgânicas (CSO) são feitas de materiais orgânicos sensíveis à luz, com tipos específicos de hidrocarbonetos. Estes materiais possuem bandas proibidas de 1,2 eV a 3,5 eV e são

conhecidos como materiais orgânicos semicondutores ou como semicondutores conjugados, devido às suas ligações simples e duplas de carbono.

Atualmente, as CSO são dispositivos bipolares que possuem dois elétrodos e uma camada ativa de material orgânico entre eles. Os dois elétrodos têm trabalhos de saída diferentes e é esta diferença que explica o aparecimento de um campo elétrico interno e um potencial de contacto. Para que a luz incidente atinja o semicondutor orgânico, e seja absorvida, é essencial que pelo menos um dos elétrodos seja transparente. Os materiais usualmente escolhidos para este tipo de óxidos condutores transparentes são o ITO (indium tin oxide) e o FTO (fluorine doped tin oxide) [6]. Habitualmente é usado também um substrato de vidro que fornece um suporte mecânico e uma camada de anti-reflexo, permitindo reduzir as perdas de não absorção. O outro elétrodo é normalmente uma camada fina de metal, como o alumínio ou o ouro [5].

As células solares orgânicas podem ser divididas em duas categorias principais, uma que utiliza polímeros chamada de heterojunções Bulk e outra que utiliza pequenas moléculas orgânicas, sendo estas as heterojunções de dupla camada [7]. Contudo, o funcionamento externo das células orgânicas e inorgânicas é o mesmo. O fato das células orgânicas não possuírem uma constituição cristalina, tal como as células de silício, impossibilitará o aparecimento do mesmo tipo de bandas proibidas assim como já não será gerado um campo elétrico na zona de depleção, por forma a conduzir os eletrões.

Para que a células não funcionem apenas no modo fotocondutor, como detetor de radiação, mas entre no modo fotovoltaico, sendo um elemento ativo, é necessário que as partículas foto geradas sejam coletadas antes de se recombinarem. Este facto é determinante para a definição das estruturas usadas.

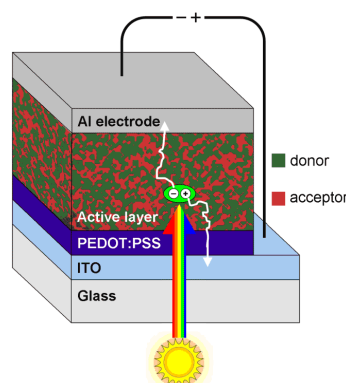


Figura 2.1: Imagem ilustrativa da estrutura básica de uma célula solar orgânica. Imagem adaptada de [8].

A excitação provocada pelo fotão vai fazer com que as cargas sejam separadas na interface dos dois materiais. De modo a que haja maior área para que este efeito ocorra, é feita a chamada heterojunção bulk, que consiste na sobreposição de várias camadas finas, intercaladas de material dador e aceitador. Consegue-se deste modo aumentar o potencial de contacto. O uso de multi-camadas de materiais distintos permite aumentar o espectro de radiação visível a que o modulo solar é sensível.

2.2.1 Células Solares de Perovskite

As células solares de perovskite são constituídas por moléculas de óxido de cálcio e titânio ($CaTiO_3$). Trata-se de uma tecnologia com cerca de 9 anos que tem vindo a obter melhorias significativas a nível de estabilidade e rendimento. O seu nome provém do mineralogista russo Lev Perovski.

A perovskite tem como base com um tipo de óxido de cerâmica em que a fórmula molecular generalizada é ABY_3 e que foi descoberta pelo mineralogista alemão Gustav Rose em 1839.

Em 2009, Miyasaka utilizou pela primeira vez a perovskite, substituindo pigmentos de DSSCs (Dye Sintetize Solar Cells), por dois tipos de halogenetos (halide-based) de perovskite. Embora tenha obtido rendimentos na ordem dos 3%, foi o primeiro passo para o desenvolvimento deste tipo de tecnologia [9].

No ano de 2012, Kim, Gratzel e Park [10] utilizaram a perovskite como a camada primária de absorção no fabrico de estruturas sólidas de células de perovskite, dando um salto evolutivo que resultou num rendimento de 9,7% para células solares de heterojunção. Após terem sido atingidos estes resultados, intensificou-se a investigação deste tipo de materiais, permitindo atingir em 2016 rendimentos na ordem dos 22,1%.

Sabendo que o máximo teórico para o rendimento de células de perovskite está na ordem dos 31,4%, existe alguma margem para desenvolver este tipo de material, melhorá-lo no sentido de garantir a estabilidade destas conversões e reduzir da melhor maneira o custo de produção já consideravelmente menor do que as células de silício mono-cristalino.

2.2.2 Semicondutores Orgânicos

Os semicondutores orgânicos podem ser classificados em duas categorias, as pequenas moléculas e os polímeros conjugados.

As pequenas moléculas têm um peso molecular superior a algumas centenas de daltons (1 dalton = 1/12 Carbono), e não contêm unidades repetidas como no caso dos polímeros que têm um peso molecular de cerca 100000 daltons. Os semicondutores feitos de pequenas moléculas têm uma fraca solubilidade na maior parte dos solventes orgânicos e a sua preparação é feita por evaporação térmica a vácuo.

Os polímeros demonstram ter uma grande decomposição e degradação quando sujeitos ao calor, isto acontece pelo facto da sua preparação não ser feita através de evaporação térmica. Habitualmente, este tipo de materiais são feitos através de outros métodos tais como, o revestimento por centrifugação, impressão, revestimento por spray ou injetado através de outras soluções, fazendo com que se tornem extremamente finos, flexíveis e de baixo custo.

O número e o tipo de eletrões de valência envolvido nas ligações químicas entre átomos consecutivos de carbono levam à classificação de compostos orgânicos de hidrocarboneto como saturados ou não saturados. Um átomo de carbono neutro tem seis eletrões com configuração eletrónica $1s^2, 2s^2, 2p^2$. Num átomo de carbono, p_x e p_y estão ocupadas por eletrões e p_z mantém-se livre, no entanto quando o átomo de carbono é excitado e forma ligações covalentes entre si, um dos eletrões de $2s$

passa a orbital $2p_z$, formando assim orbitais híbridas com o mesmo nível de energia. Dependendo do tipo de ligações de carbono, poderão ser formadas orbitais sp^3 ou sp^2 nos átomos de carbono. As orbitais híbridas sp^3 criam ligações mais fortes e estáveis de moléculas devido ao elevado nível de sobreposição de ligações com outros átomos.

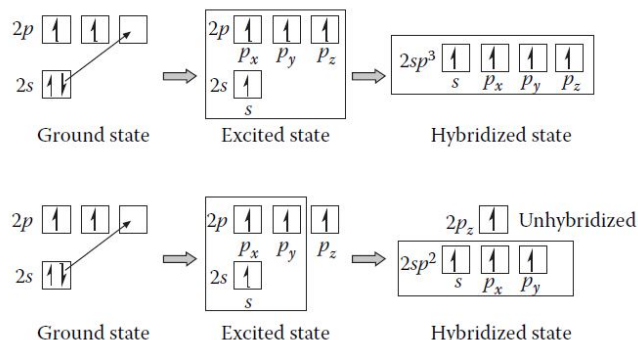


Figura 2.2: Configuração eletrônica dos átomos de carbono. Imagem adaptada de [6].

Devido à forte ligação covalente (chamadas ligações- σ) dos compostos de carbono que contêm orbitais híbridas sp^3 , estes compostos são considerados hidrocarbonetos saturados, e são perfeitos para o uso como isoladores devido às suas elevadas bandas proibidas.

Nos semicondutores orgânicos são usados hidrocarbonetos não saturados provenientes de orbitais híbridas sp^2 (chamadas ligações- π), devido às suas ligações simples e duplas, permitindo assim bandas proibidas de energia inferiores às dos hidrocarbonetos saturados.

Os hidrocarbonetos não saturados possuem ligações π (orbitais de ligação) e ligações π^* de não ligação, sendo que a energia entre estas orbitais é bastante pequena e a transição eletrônica ocorre na zona perto do visível.

Nas células de polímeros conjugados existe uma longa cadeia de átomos de carbono, portanto há uma enorme quantidade de orbitais molecular muito ocupadas (π - Higher Occupied Molecular Orbital) e de orbitais pouco ocupadas (π^* - Lower Unoccupied Molecular Orbital). A separação entre LUMO e HOMO de um semiconductor é chamada de banda proibida, sendo que a afinidade eletrônica (E_a) corresponde ao estado de energia mais baixo da banda de condução (orbital π^*) e o potencial de ionização (I_p) corresponde ao estado de energia mais alto da banda de valência (orbital π). O transporte de energia ocorre na banda proibida (entre HOMO e LUMO) na gama $1.2 - 3.5 eV$, ou seja, passa pela faixa do infravermelho até à região do ultravioleta [6].

2.2.3 Células de Geometria Normal

Neste tipo de geometria, o ITO é revestido de forma a alisar a sua superfície e melhorar o potencial do ânodo. Esta camada de revestimento deve possuir propriedades que permitam o transporte de buracos eficientemente. Este reforço do potencial no ânodo faz-se sentir na criação do campo elétrico e, por sua vez, na performance da célula. Depois do ITO segue-se uma camada de transporte de buracos, constituída por grupos de compostos tais como $MoO_3 - PEDOT : PSS$ que permitem melhorar

consideravelmente a estabilidade e o funcionamento da célula. A camada ativa de absorção de luz é depositada na camada de transporte de buracos e revestida de uma outra camada de recepção de elétrons. Esta camada é constituída por compostos como o LiF ou o $CsCO_3$ para melhorar a performance da célula. Caso a célula seja transparente, tanto o elétrodo de topo como o de base serão transparentes [6].

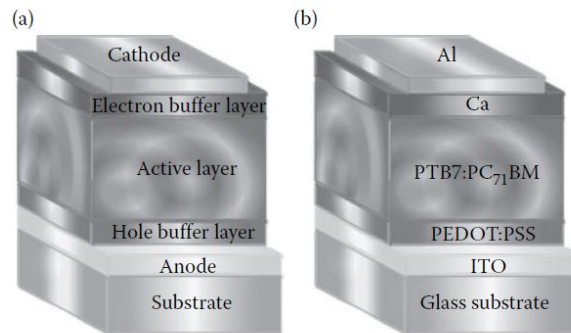


Figura 2.3: (a) Estrutura de uma célula com geometria normal. (b) Célula com geometria normal. Imagens adaptadas de [6].

2.2.4 Células de Geometria Invertida

As OSC de geometria invertida são constituídas de forma semelhante às OSC com geometria normal 2.3 normal, mas a direção de recepção das cargas da foto-geração é oposta. O ITO é usado como recetor de elétrons no cátodo e, para que seja eficiente, este possui um potencial reduzido e uma banda proibida elevada.

A camada ativa é revestida adequadamente para a deposição de um filme fino com a função de transporte de buracos, tal como na geometria normal.

A diferença de potencial entre os dois elétrodos vai permitir desenvolver um campo elétrico que direciona a foto-geração dos elétrons na direção do ITO e os buracos na direção do elétrodo de topo [6].

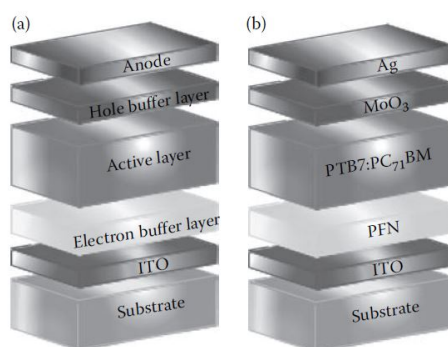


Figura 2.4: (a) Estrutura de uma célula com geometria invertida. (b) Célula com geometria invertida. Imagens adaptadas de [6].

2.2.5 Heterojunção de Camada Única

Nas OSC de camada única é utilizada apenas uma camada de material orgânico absorvente de luz entre os dois elétrodos.

Cada fóton absorvido gera um par elétron-buraco, sendo necessário uma quantidade específica de energia para que este se separe em elétron e em buraco. Para que isto suceda é impreterível que o par elétron-buraco se difunda na interface do cátodo de modo a transferir o elétron. Os buracos são deixados na região da HOMO que os transportam para o ânodo.

Devido aos pequenos comprimentos de difusão dos pares elétron-buraco nos semicondutores orgânicos, a maior parte dos pares elétron-buraco recombinam antes de chegarem ao cátodo. Os que sobrevivem atingem a interface do cátodo e dissociam-se, com os poucos buracos que chegam ao ânodo a gerar uma pequena foto-corrente.

O facto de existirem perdas muito elevadas devido à recombinação, a energia convertida mantém-se muito baixa. Este tipo de problema pode ser resolvido através da introdução de materiais dadores e aceitadores em mais do que uma camada de material orgânico [6].

2.2.6 Heterojunção de Dupla Camada

A heterojunção de camada dupla consiste numa estrutura em que material dador e aceitador é depositado um no outro, de modo a formar uma interface heterogénea.

Os materiais dadores e aceitadores são escolhidos de forma a que o aceitador tenha uma maior afinidade com os elétrões e que o dador tenha uma menor potencial de ionização. A energia da diferença de afinidade entre o dador e o aceitador oferece a força necessária para a dissociar pares elétron-buraco. Os elétrões são transferidos para o LUMO do aceitador enquanto que os buracos ficam na HOMO do dador [6].

Esta técnica foi aplicada às células solares orgânicas, levando a uma melhoria na conversão de energia.

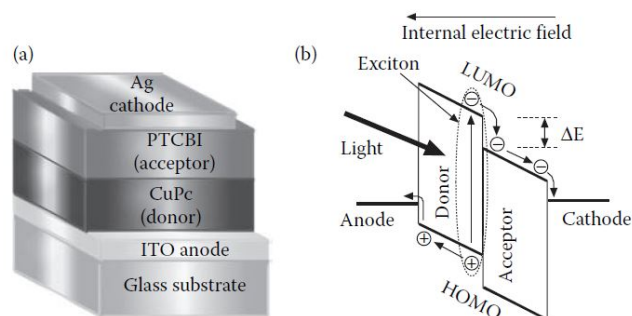


Figura 2.5: (a) Estrutura de dupla camada de uma célula solar orgânica. (b) Esquema correspondente do diagrama de energia representando a geração e dissociação do par elétron-buraco. Imagens adaptadas de [11].

2.2.7 Heterojunção Bulk (BHJ)

Esta estrutura é uma mistura entre material dador e aceitador, composta por várias interfaces com diversas ligações entre material dador e aceitador. Este conceito foi usado pela primeira vez para células solares de polímero, em 1995.

A baixa entropia nesta estrutura, permite que exista uma separação entre o material dador e o aceitador, existente na mistura. Se o comprimento da separação das camadas for da ordem do comprimento da difusão do par elétron-buraco, a maioria dos pares elétron-buraco vão ser dissociados na interface dador-aceitador. Depois da dissociação, os elétrons vão ser transportados para a fase aceitadora, no cátodo, e os buracos para a fase dadora, no ânodo[6].

Em comparação com a heterojunção de dupla camada, a heterojunção bulk vai reduzir a espessura da camada e reduzir a probabilidade de recombinação da carga, tendo como consequência um aumento da densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) [12].

Este tipo de estrutura apresenta atualmente o recorde de rendimento no que toca a células solares orgânicas [13].

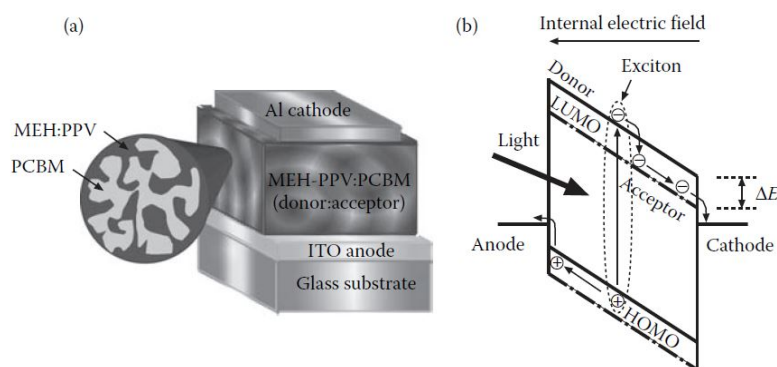


Figura 2.6: (a) Estrutura BHJ de uma célula solar orgânica. (b) Diagrama de energia representando a geração e dissociação do par elétron-buraco. Imagens adaptadas de [6].

2.2.8 Heterojunção Misturada com Dupla Camada Híbrida

Esta estrutura consiste numa camada BHJ no meio de uma camada homogênea de material aceitador e numa de material dador. Permite deste modo uma melhoria na captação do fóton e melhor transporte das cargas foto-geradas para os respetivos elétrodos. A espessura das camadas homogêneas é escolhida de modo a que esta se aproxime do comprimento de difusão dos pares elétron-buraco.

A dissociação dos pares elétron-buraco acontece não só nas camadas heterogêneas e na sua interface, como também nas camadas homogêneas. Para que haja uma eficiente absorção do fóton é necessário que o comprimento da camada heterogênea tenha uma espessura menor que o comprimento de absorção da carga, dado pela soma dos comprimentos de difusão do elétron e do buraco.

Como a distância média entre duas moléculas consecutivas é maior no caso da camada heterogênea, a mobilidade da carga será menor nesta camada do que na camada homogênea. Assim, pode-se deduzir que na camada heterogênea a baixa mobilidade da carga foto-gerada leva a uma

absorção incompleta.

Este tipo de dispositivos tem, atualmente, um rendimento 40% maior do que a heterojunção bulk ou do que a heterojunção de dupla camada.

2.2.9 Estrutura p-i-n

Este tipo de estrutura utiliza materiais com uma banda proibida grande do tipo p e do tipo n. As camadas ativas são colocadas entre estes materiais, substituindo as camadas que não contribuem para o transporte de carga.

Esta estrutura veio tentar solucionar o problema que existe na maior parte dos semicondutores orgânicos, em que, devido ao reduzido comprimento de difusão dos pares elétron-buraco, a zona ativa era mantida muito estreita. A solução inicial consistia na introdução de camadas que somente limitavam o valor da corrente elétrica, adicionando resistências em série. Na estrutura, a camada intrínseca, que pode ser de dupla camada ou BHJ, vai absorver o fóton e as camadas dopadas vão ajudar no transporte de carga.

Foi demonstrado que o rendimento destas células é cerca de duas vezes superior quando comparado com células similares, mas sem as camadas dopadas [14]. As camadas ativas podem ser construídas com alguma variedade de espessura, sem que haja o perigo de acontecerem curtos-circuitos.

A grande desvantagem destas estruturas é a dificuldade de produção de camadas orgânicas dopadas que sejam estáveis, o que vai ter uma influência direta no seu custo.

2.2.10 Estrutura em Série (Tandem)

De modo a melhorar a absorção do espectro luminoso incidente numa célula solar orgânica, foram criadas as estruturas em série. Estas estruturas consistem na colocação de várias células em cima umas das outras de modo a que os fótons não absorvidos nas primeiras sejam absorvidos nas seguintes. Desta forma, é aumentada a gama de espectro luminoso absorvido, sem que seja aumentada a resistência interna da célula.

Inicialmente, este tipo de estrutura não era adequado para sistemas poliméricos; a colocação de um filme de polímero sobre outro danificava o segundo filme, devido à solubilidade destes materiais. No entanto, este problema foi extinto com a introdução de uma camada entre os filmes, fazendo o papel de cátodo para o filme superior e de ânodo para o inferior, prevenindo a recombinação dos pares elétron-buraco na junção dos polímeros.

Era expectável que a tensão de circuito aberto deste tipo de estrutura fosse o somatório das tensões das sub-células, estando o valor da corrente da célula limitado à corrente da sub-célula de menor valor. Contudo, e devido à geração não equilibrada de portadores de carga no topo e na base das sub-células, o excesso de portadores de carga não vai contribuir para a foto-corrente, acumulando-se na célula e fazendo reduzir o V_{oc} do total das sub-células.

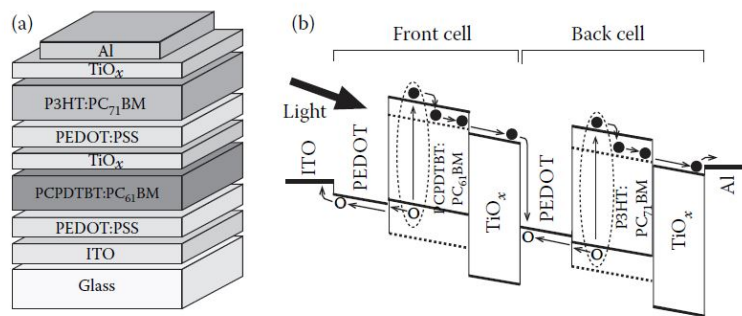


Figura 2.7: (a) Estrutura série de uma célula célula solar orgânica. (b) Diagrama de energia representando a gera o de foto-corrente. Imagens adaptadas de [6].

2.3 Espectro de Radia o Solar

O Sol emite, sob a forma de radia o, a energia criada pela fusão de átomos de Hidrog nio em Hélio no seu centro. A radia o solar que chega   superfície da Terra   apenas uma mínima parte daquela que   emitida pelo Sol e que corresponde a cerca de $10^{18} kWh/ano$.

A radia o solar que atinge a superfície da Terra varia consoante a distância geográfica da Sol   Terra, sendo que o seu valor médio corresponde a $E_o = 1,367W/m^2$. Contudo, devido   existência da atmosfera, apenas uma pequena parte dessa energia atinge diretamente a superfície da Terra; o resto da energia   absorvida, refletida e dispersa. Ao meio dia, com boas condi es climáticas e independentemente da localiza o geográfica, o nível de irradiância que atinge a Terra   aproximadamente de $1000W/m^2$.

A radia o que incide na superfície terrestre   composta por uma fra o direta, uma difusa e uma refletida. A fra o direta corresponde   radia o que atinge diretamente a superfície terrestre, a fra o difusa corresponde   radia o que passa pelas nuvens e que depois vai atingir o solo, sendo que o ângulo de incidência desta radia o   imprevisível [15].

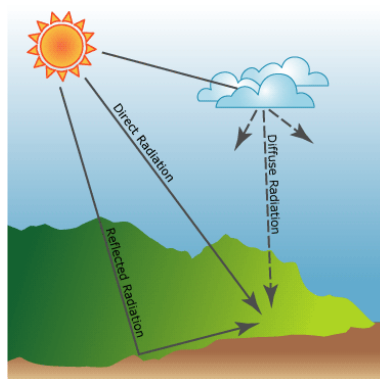


Figura 2.8: Imagem ilustrativa da radia o direta, difusa e refletida. Imagem adaptada de [16].

O espectro de radia o depende de fonte de ilumina o. Fazer-se-  uma breve referência ao espectro de radia o solar nesta sec o e na subsec o seguinte abordar-se-  as diferenças para os outros tipos de fonte de ilumina o que estará presente no estudo dos painéis solares orgânicos.

O espectro solar pode ser expresso como energia em função do tempo e da área, ou, por outras palavras, por densidade de fluxo de energia. Habitualmente, o espectro de radiação solar ilustra-se em função da frequência ν multiplicada pela constante de Planck λ . O valor máximo da irradiância encontra-se na região do infra-vermelho, na vizinhança de 1,4eV (880nm, 340THz).

O espectro medido no exterior da atmosfera terrestre é chamado de AM 0 (Air Mass 0), correspondendo-lhe o valor máximo de intensidade de radiação de $1353W/m^2$. Este valor é habitualmente referido como a constante solar. Para medições no solo em que se considera uma incidência perpendicular dos raios luminosos é considerado o AM 1, naturalmente, obtendo-se valores de irradiância inferiores ao AM 0.

O espectro de radiação AM 1.5 corresponde à radiação solar que incide sobre o solo com um ângulo de 48° , sendo este escolhido como o espectro standard para a caracterização das células solares [17].

2.3.1 Espectro de Radiação Lâmpada Halogéneo

O espectro de radiação de uma fonte luminosa artificial possui uma gama de comprimentos de onda de feixes luminosos inferior ao espectro de radiação solar. Este facto pode ser negativo, caso a camada ou as camadas que absorvem o feixe de luz não sejam sensíveis aos comprimentos de onda da radiação incidente. Outra situação relevante prende-se com a reduzida energia disponível em cada fóton emitido destas fontes, ou seja, caso possa não ser suficiente para desencadear o processo de libertação do eletrão-buraco.

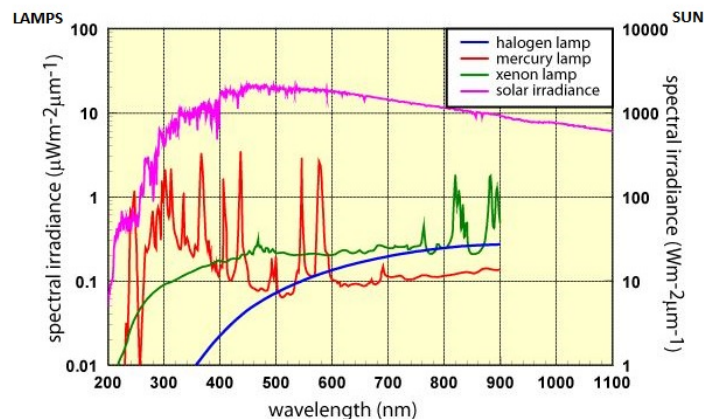


Figura 2.9: Espectro de radiação do sol e de algumas fontes de iluminação. Imagem adaptada de [18].

A análise deste tema é importante, dado que alguns dos testes efetuados foram realizados com fontes de luz artificial, nomeadamente de halogéneo, fazendo com que as células solares absorvam menos energia e, deste modo, produzam menos corrente. Na figura 2.9 está ilustrado o espectro de radiação solar e o espectro de algumas fontes de luz artificial e são notórias as diferenças observadas.

Capítulo 3

Análise do Painel

O painel solar orgânico estudado foi adquirido à empresa InfinityPV, uma empresa dinamarquesa que desenvolve semicondutores orgânicos para diferentes tipos de aplicações. Esta tecnologia inovadora está a dar os primeiros passos na sua industrialização, para que seja possível uma produção em larga escala, podendo vir a substituir, num futuro próximo, os painéis solares de silício mono-cristalino em várias aplicações. Deste modo, é imprescindível um estudo de: (i) características elétricas dos painéis, de forma a analisar o estado atual, e (ii) enquadramento desta tecnologia, percebendo quais os desenvolvimentos já efetuados e os caminhos que ainda faltam percorrer para que esta seja uma tecnologia capaz de substituir ou complementar as tecnologias atualmente existentes.

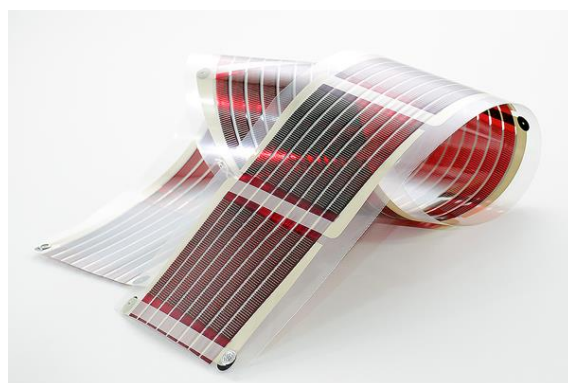


Figura 3.1: Painel solar orgânico da empresa InfinityPV. Imagem adaptada de [19].

3.1 Características do painel solar orgânico

O painel estudado tem cerca de $0,2556m^2$ de área útil, mais precisamente 1,065m de comprimento por 0,24m de largura, possuindo centenas de micro centímetros de espessura. Este painel possui de 224 células solares ligadas em série e foi adquirido à empresa InfinityPV, assim como outras 6 amostras de material semelhante mas com características elétricas diferentes. O painel solar orgânico será utilizado para o estudo comparativo, contudo as amostras serão utilizadas para realizar testes com e sem um filtro IV, de modo a perceber o tipo funcionamento de cada uma delas sob a influência de radiação infravermelha. O painel solar orgânico possui uma tensão de circuito aberto de 130 V por cada metro de módulo, uma corrente de curto-circuito de 60 mA e segundo a informação disponibilizada, produz cerca de 5,2Wp, em condições STC.

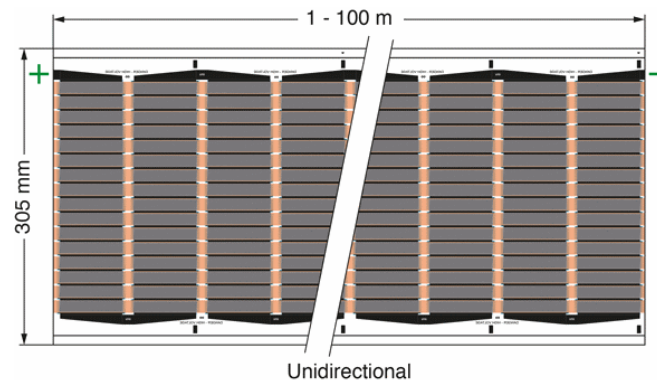


Figura 3.2: Exemplo do painel solar orgânico da empresa InfinityPV. Imagem adaptada de [19].

Este painel é constituído por materiais orgânicos existentes em abundância na natureza. Devido à forma como é fabricado, em impressão sobre plástico, o painel é extremamente leve, flexível e semi-transparente o que permite uma aplicabilidade maior em superfícies que tenham como objetivo deixar passar a radiação solar ou em superfícies que não sejam totalmente planas, tais como, fachadas de edifícios ou tejadilhos de automóveis.

A escolha deste painel teve como base as suas características inovadoras e o facto de ser uma tecnologia emergente com bastante potencial de aplicabilidade. Sendo uma tecnologia recente, ainda não existem estudos suficientes que permitam conhecer todas as características destas células, o que permite uma análise livre de informações adicionais que pudessem levar a testes repetidos ou direcionados para estudos já existentes.

O esquema equivalente das medições efetuadas sobre no painel solar orgânico nas secções a jusante encontra-se na figura 3.3, sendo composto por um painel solar orgânico, um amperímetro, um voltímetro e uma bateria de resistências em série inseridas numa *breadboard*, a utilização destas resistências ao invés da utilização de um reóstato variável deveu-se ao facto de não ser possível encontrar todas os pontos das curvas características com o reóstato variável.

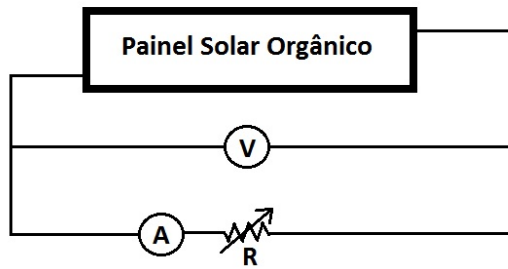


Figura 3.3: Esquema equivalente das medições efectuadas sobre o painel solar orgânico.

3.2 Estudo do painel solar orgânico sujeito a diferentes tipos de irradiâncias e temperaturas

Para analisar o comportamento das OSC, variando a irradiância num ambiente de temperatura quase constante, procedeu-se a uma análise das curvas de corrente-tensão ($I-U$) da figura 3.5 e potência-tensão ($P-U$) da figura 3.6. Os resultados desta análise permitirão compreender de que modo, as correntes de fugas traduzidas no modelo por resistências paralelas, e os contactos, traduzidos no modelo por resistência série, afetam o sistema em estudo. Com este objetivo, o painel solar orgânico foi sujeito a uma iluminação constante, fazendo-se variar a distância da fonte luminosa ao painel.

A fonte luminosa utilizada é composta por duas lâmpadas de halogéneo de 400W/lâmpada, que foram colocadas em 3 posições diferentes, de forma a variar a intensidade luminosa que incide sobre o painel. A tabela 3.1 define as distâncias ao centro do painel orgânico.

Posição	A	B	C
d (m)	1,3	1,63	1,94

Tabela 3.1: Distâncias do eixo central das lâmpadas ao centro do painel.

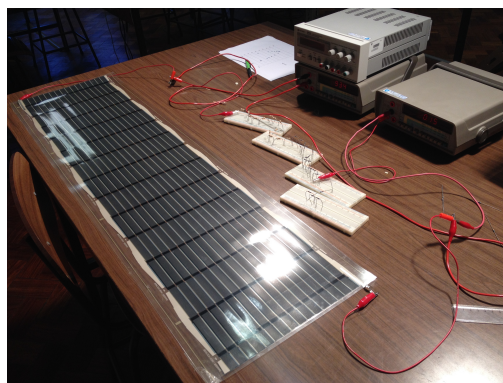


Figura 3.4: Painel solar orgânico durante a medição para as posições A, B e C.

Tal como se esperava, pelo conhecimento prévio do decréscimo da radiação de uma fonte com

o quadrado da distância a que se encontra o painel, ($G \propto \frac{I}{d^2}$), a radiação incidente no painel foi decrescendo à medida que se afastou a fonte luminosa. Esta conclusão é retirada da análise da curva $I-U$ 3.5, verificando-se um decréscimo da corrente de curto-circuito e um decréscimo da tensão de circuito aberto.

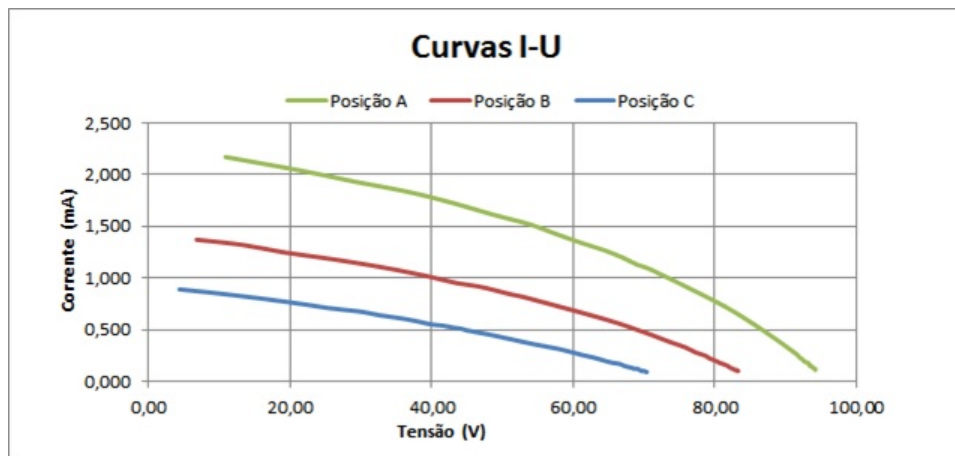


Figura 3.5: Gráfico das Curvas $I-U$ para todas as posições testadas em laboratório.

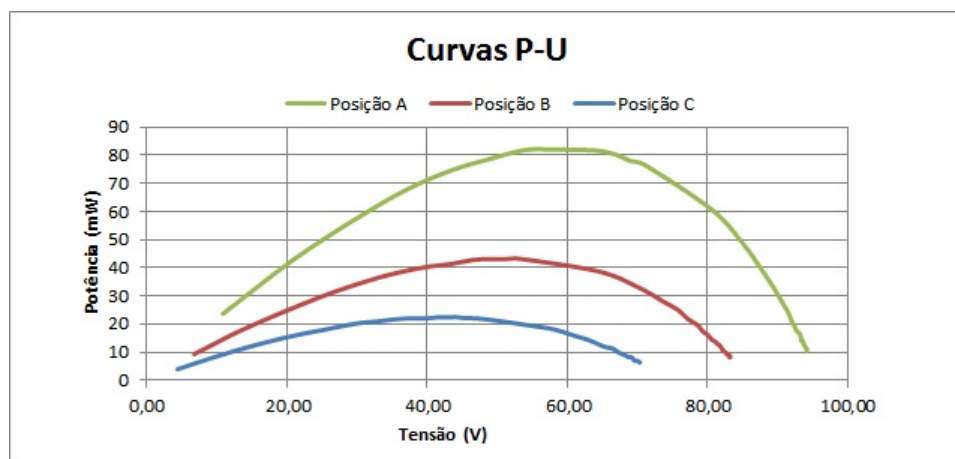


Figura 3.6: Gráfico das Curvas $P-U$ para todas as posições testadas em laboratório.

A redução da I_{SC} evidenciada pela curva $I-U$ (figura 3.5), deve-se à diminuição da temperatura das células do painel orgânico associada ao afastamento da fonte luminosa, esta relação está explicitada na equação da corrente de uma célula de silício 3.1.

$$I = I_S - I_D = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

O decréscimo do V_{OC} acontece devido à diminuição da radiação incidente, pela dispersão da radiação e consequente perda de energia na deslocação até à superfície do painel.

Na figura 3.6, observa-se a diminuição da potência gerada pelo painel. As potências máximas observadas são as seguintes: 82,08mW, 43,17mW e 22,49mW para as posições A, B e C, respetivamente. Deste modo, existe uma variação de potência máxima da posição A para a B de 47,4% e, uma variação

de potência máxima de 47,9% da B para C. Esta variação deve-se essencialmente, à perda de energia que chega ao painel, devido ao afastamento da fonte luminosa.

	n	$I_{IS}(\mu A)$	T (°C)
A	6,247	172,6	29,6
B	6,659	175,6	27,9
C	6,156	141,3	27

Tabela 3.2: Tabela com os fatores de não idealidade, corrente inversa de saturação e temperatura do painel.

Através da equação (3.1), chegou-se ao valor dos fatores de não idealidade e da corrente de saturação I_{IS} que se encontram indicados na tabela 3.2.

Os fatores de não idealidade compreendidos entre 6.156 e 6.257 são bastante superiores ao esperado, este facto deve-se à rápida degradação das células após o seu fabrico.

Para provar que a corrente de curto circuito diminui com a temperatura e que a tensão de circuito aberto aumenta com a radiação incidente, realizou-se um teste em que sobre o painel é colocado um plástico suficientemente transparente para que cause algum sombreamento ao painel.

Colocou-se o foco luminoso na posição A, e obtendo-se os resultados das figuras 3.7 e 3.8 demonstrativos da influência do sombreamento nas características do painel.

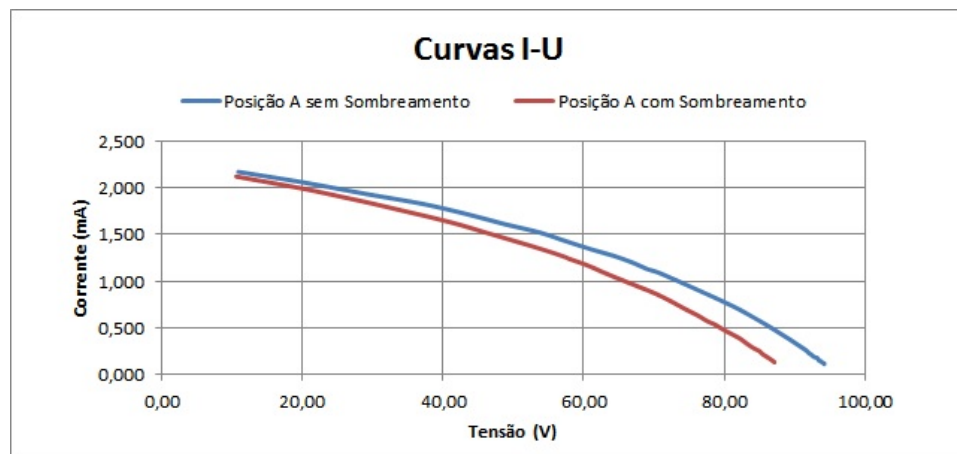


Figura 3.7: Gráfico das Curvas $I-U$ para a posição A com e sem sombreamento.

O facto das curvas características $I-U$ do painel orgânico apresentarem uma distribuição quase linear, tem como consequência uma curva de potência que se mantém constante durante algumas variações de carga, situação muito interessante para os casos em que a radiação solar sofre uma quebra devido às condições atmosféricas. Trata-se de uma eventual vantagem a ser explorada face ao painel de silício, onde o ponto de funcionamento máximo é dado por um ou dois picos.

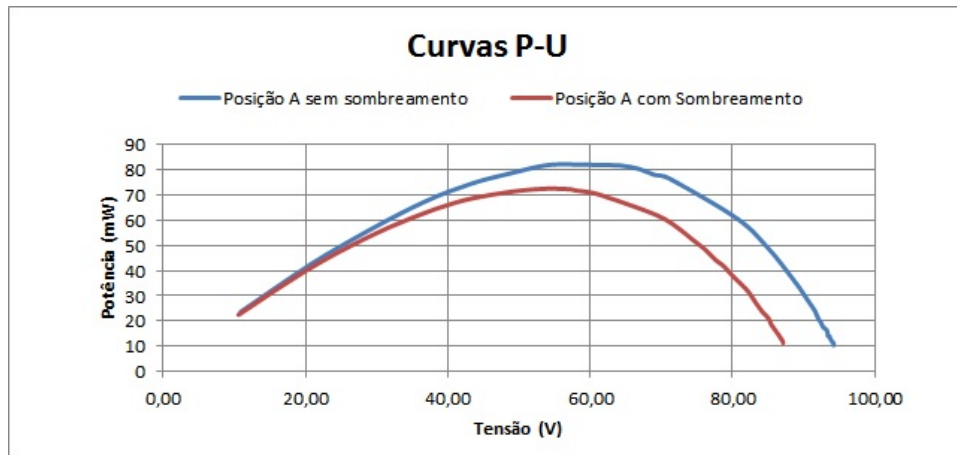


Figura 3.8: Gráfico das Curvas $P-U$ para a posição A com e sem sombreamento.

3.2.1 Comparação entre o painel de silício e o painel orgânico para a mesma distância ao foco luminoso

De modo a que seja feita a devida comparação entre as células de silício mono-cristalino e as células solares orgânicas, realizou-se um teste em que, para a mesma distância, foram calculadas as curvas características e feita a respetiva normalização.

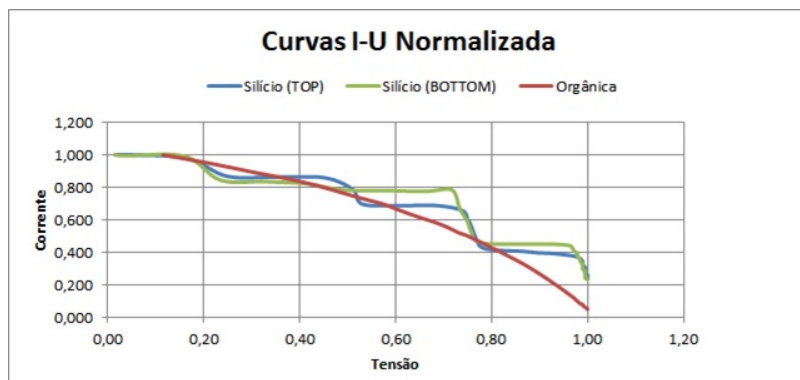


Figura 3.9: Gráfico das Curvas $I-U$ normalizadas para o painel de silício e para o painel orgânico.

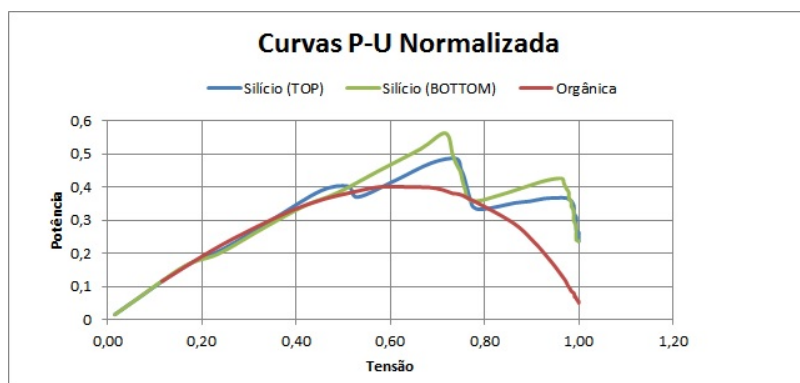


Figura 3.10: Gráfico das Curvas $I-U$ normalizadas para o painel de silício e para o painel orgânico.

Ao comparar as curvas $I-U$ do painel orgânico com o de silício mono-cristalino verificou-se que no

painel orgânico, figura 3.9, existe um crescimento da corrente quase linear à medida que a carga vai sendo reduzida. Este comportamento pode ser explicado pelo tipo material e pelo tipo de junções de que o painel é feito, que permite absorver um maior número de comprimentos de onda e originar uma maior corrente para valores de tensão inferiores. Deste modo, é possível garantir uma curva $P-U$ com uma maior estabilidade no seu ponto de funcionamento máximo. O painel de silício mono-cristalino representado na figura 3.11 é composto por duas superfícies de absorção de radiação solar, uma delas localizada no topo do painel (Top) e outra localizada na parte inferior (Bottom).



Figura 3.11: Painel de silício mono-cristalino com concentrador (CPVT). Imagem adaptada de [20].

A parte inferior recebe radiação proveniente da reflexão da radiação do concentrador. Este painel apresenta "degraus" na curva $I-U$ que se devem à presença de díodos by-pass (BP). Os "degraus" são tanto mais acentuados quanto maior a variação de radiação incidente entre grupos de células. A influência do concentrador do painel de silício é notório, levando a um acréscimo de corrente para cada valor de carga aplicada, aquando da comparação entre as curvas Top e Bottom, associadas às células da parte superior do recetor (não sujeitas à concentração) e as associadas às células da parte inferior do recetor (que recebem a radiação concentrada).

3.2.2 Análise de células solares orgânicas com diferentes compostos

As células solares orgânicas podem ser compostas por diferentes estruturas orgânicas. Embora não seja possível saber ao certo quais os componentes específicos de cada uma das células, é possível fazer uma análise do desempenho destas células num ambiente real, expostas à irradiância solar e colocadas no plano horizontal. Deste modo, efetuou-se uma experiência utilizando 6 tipos diferentes de células, especificadas com os seguintes termos: A1, A2, A3, B1, B2, B3.

Foi feita uma análise ao ponto de potência máxima de cada célula para um dia típico de Verão, entre as 8 horas e as 20h desse dia, com intervalos de 2 horas.

Ao analisar o gráfico de funcionamento das células, da figura 3.12, é notório que existe uma discrepância significativa de rendimentos entre o conjunto de células A1, A2, A3 e B2 e o conjunto B1 e B3. O primeiro conjunto tem uma gama de eficiências, no seu ponto de funcionamento máximo, entre os 4,91-5,97%, sendo que a célula A1 apresenta o melhor desempenho, em termos de rendimento, do conjunto de todas as células. No entanto, o conjunto das células com rendimentos inferiores, entre

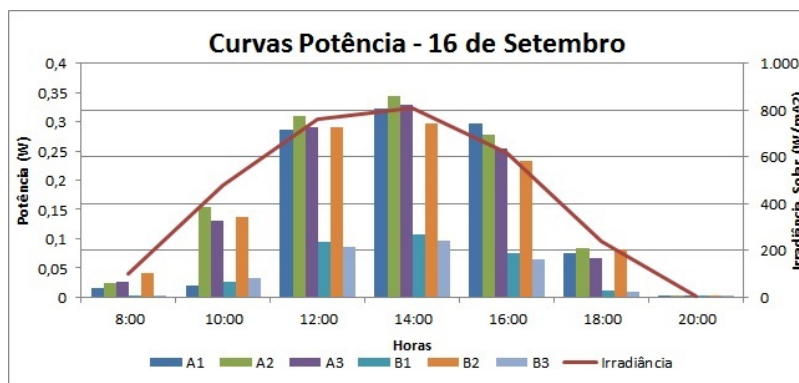


Figura 3.12: Gráfico das curvas $P-U$ das células solares orgânicas expostas à radiação solar.

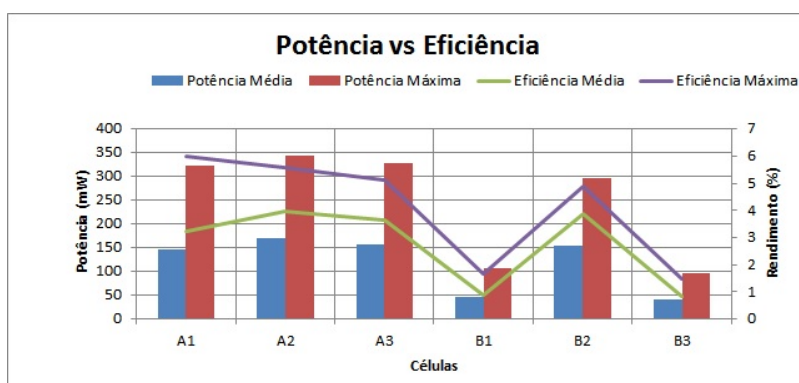


Figura 3.13: Gráfico das células orgânicas contendo informação sobre a potência e o rendimento.

1,48-1,66% no ponto de funcionamento máximo, perde entre 44,8-47,2% de rendimento no resto das horas do dia em análise. A célula A3 é aquela que tem melhores desempenhos, com uma rendimento de conversão máxima de 5,1% e uma potência máxima de 344,6 mW, apresenta também uma variação de potência de cerca de 52,3% e uma variação de rendimento de 28,4%.

As variações de desempenho apresentadas podem dever-se à variação da concentração de dopantes nas células solares. Mais à frente será analisado o funcionamento destas células, introduzindo um filtro IV, permitindo assim retirar mais conclusões sobre o funcionamento de cada tipo de célula.

3.3 Simular a imersão do painel solar orgânico em água

Simulou-se a imersão do painel orgânico em água, para que fosse possível observar o comportamento do painel orgânico e compreender quais as mais valias da aplicação deste tipo de células em ambientes aquáticos (lagos ou rios).

Para realizar a experiência, manteve-se a distância do foco luminoso constante, a cerca de 2,03m, e fez-se variar a quantidade de água na superfície do painel.

Foram feitas quatro experiências diferentes, uma apenas com o plástico transparente e outras três com 2,5, 5 e 7,5 litros de água no interior do plástico.

A presença de água induz alterações quer na temperatura do sistema, quer na intensidade de radiação incidente. É pois de admitir que a inclusão de água poderá ter um peso significativo no desem-



Figura 3.14: Painel orgânico sob um saco plástico transparente, para realizar a experiência.

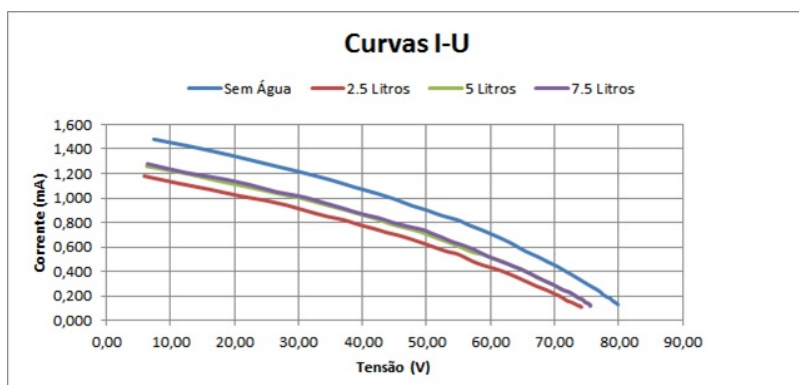


Figura 3.15: Gráfico das Curvas $I-U$ do painel orgânico imerso em água.

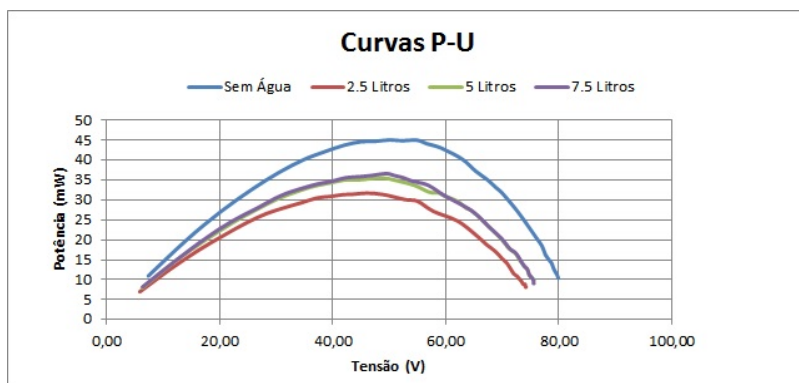


Figura 3.16: Gráfico das Curvas $P-U$ do painel orgânico emerso em água.

penho do painel, sobretudo para grandes quantidades de líquido. Se para fracos fluxos, a temperatura na superfície do painel não vai sofrer grandes alterações devido à volumetria do plástico utilizado, apesar das modificações na reflexão da radiação incidente poderem ser significativas. Os resultados apresentados na figura 3.15 mostram que $I(U)$ praticamente não se altera, mas que $P(U)$ sofre decréscimo de 33% no ponto de potência máxima 3.16.

Aumentando a volumetria de água (5 litros) no plástico, verifica-se uma variação no funcionamento do painel, onde a temperatura irá ter um papel essencial. A razão reside no facto da corrente de curto-circuito ser diretamente proporcional ao aumento da temperatura do painel.

Ao aumentar a quantidade de água na superfície do painel, ocorrem os fenómenos de reflexão e

de refração, provocando um aumento no valor de corrente gerada pelo painel. Este aumento deve-se sobretudo ao fenómeno de refração e à queda da temperatura do painel.

Ao fazer a comparação entre o painel sem água à superfície e o painel com 5 litros de água, verifica-se uma quebra na potência coletada, que está relacionada basicamente com o fenómeno de reflexão.

Ao atingir-se um total de 7.5 litros, não se verificou uma grande variação em relação ao observado para 5 litros. Pode-se assim concluir que, desde que a água permaneça limpa, existe alguma vantagem elétrica na inserção deste tipo de painéis em superfícies aquáticas.

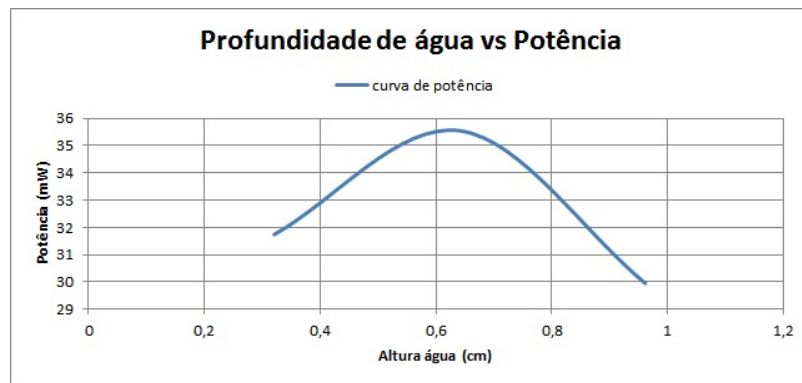


Figura 3.17: Gráfico da potência gerada em função da profundidade.

Seguidamente estudou-se a relação da potência coletada no painel em função da profundidade de água, sendo de realçar o facto de não existir uma relação linear entre estas duas variáveis. Existem fatores de reflexão, refração e de temperatura que variam independentemente do aumento ou redução da água sobre a superfície do painel.

O ponto de potência máxima (cerca de 35.5 mW) acontece para uma inserção de 5 litros de água, e a uma profundidade de aproximadamente 0,64cm.

Embora haja alguma margem de manobra para inserir este tipo de painéis em superfícies aquáticas, é necessário ter em conta que a variação de potência pode ser nalguns casos muito significativa, se a intenção for colocá-los em profundidade. Os painéis devem ser colocados próximos da superfície, ou então devem ser considerados para colocação ao ar livre onde não exista acumulação de água das chuvas.

3.3.1 Simulação de um meio real

De forma a simular a inserção de um painel orgânico num meio aquático real, ou seja, onde a água existente fosse composta por matéria orgânica e poluição, realizou-se uma experiência onde a água na superfície do painel é tornada turva, permitindo assim uma aproximação à situação real.

Foram obtidos os resultados apresentados nas figuras (3.18 e 3.19), que permitem analisar, para uma dada quantidade de água, o efeito da sua composição. Os resultados ilustram o efeito do sombreamento das partículas inseridas na água, da dispersão da radiação pela refração no meio aquático e da temperatura da água no painel.

Verificou-se uma diminuição da corrente de curto circuito na ordem dos 11,75% e uma diminuição da

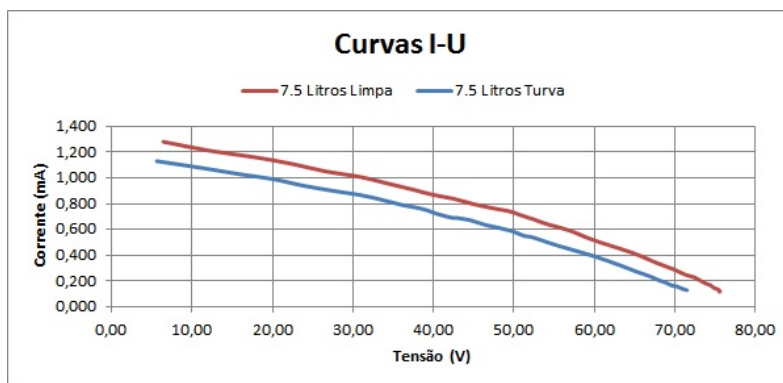


Figura 3.18: Comparação gráfica entre as curvas $I-U$ de água limpa vs água turva.

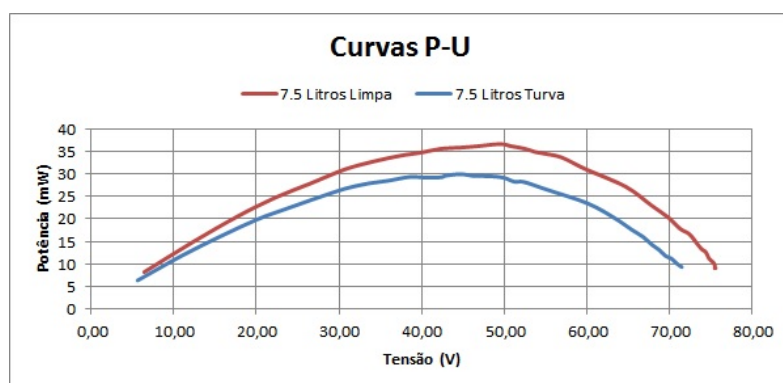


Figura 3.19: Comparação gráfica entre as curvas $P-U$ de água limpa vs água turva.

tensão de circuito aberto de 5,42%. A potência máxima diminuiu cerca de 18,24%. A curva de potência da água turva e com 7,5 litros, aproximou-se da curva de potência na situação de água limpa com 2,5 litros, o que permite concluir que ao tingir a água, (i) anulamos o efeito da refração da radiação sobre o painel, que permitia melhorar a curva de potência com mais de 5 litros de água, (ii) e aumentamos a reflexão.

Em resumo, o teste permitiu concluir que este tipo de painéis pode ser utilizado em locais onde a água está o mais limpa possível, não sendo aconselhado, aos olhos dos resultados obtidos, a utilização destes painéis em locais de água parada, tais como charcos, pequenos lagos sem corrente ou em piscinas com falta de reciclagem de água.

3.4 Painel solar orgânico submetido a diferentes temperaturas

Com o intuito de perceber as potencialidades da instalação do painel solar orgânico em vários locais, estudou-se as temperaturas para as quais se obteriam melhores desempenhos. Inseriu-se o painel orgânico no interior de uma estufa, existente no laboratório de eletrônica, em que a única abertura tinha como função permitir a passagem de radiação de uma lâmpada de filamento.

A estufa estava termicamente isolada, permitindo deste modo fazer variar a temperatura no seu interior. Fez-se então variar a temperatura desde os 10°C até aos 50°C. Em seguida, retiraram-se as curvas características para as temperaturas estudadas.

Nas figuras 3.20 e 3.21 estão ilustradas as curvas características para os valores de temperatura considerados os mais relevantes, isto é, curvas para as quais se começa a notar uma diferença acentuada entre os dados obtidos. Entre os 10°C e os 40°C os valores oscilam com variações muito pequenas; somente a partir dos 40°C é notória uma variação relevante dos valores da corrente e da tensão. Assim sendo, procedeu-se à cálculo do fator de não idealidade (n) e da corrente inversa de saturação I_{IS} , para se entender de que maneira foram afetados pela variação da temperatura no painel.

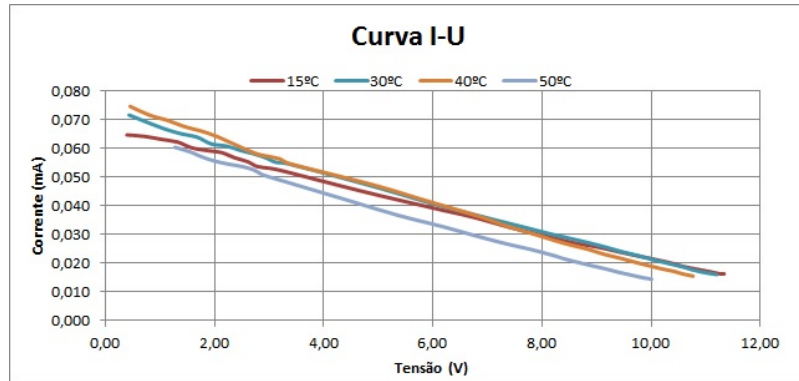


Figura 3.20: Curva $I-U$ do painel solar orgânico para diferentes temperaturas.

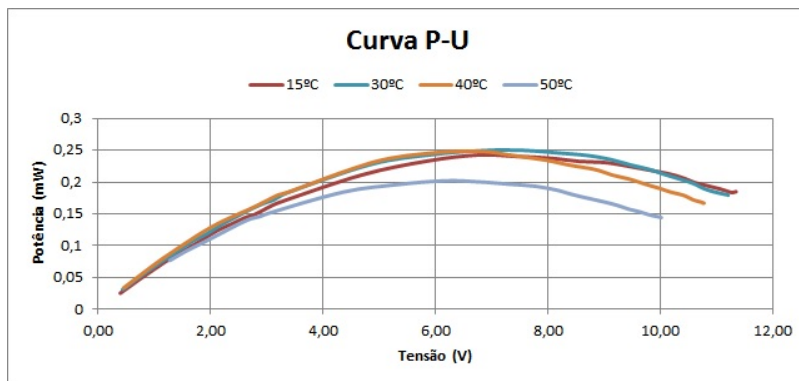


Figura 3.21: Curva $P-U$ do painel solar orgânico para diferentes temperaturas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a tensão de circuito aberto V_{OC} , vai diminuindo com o aumento da temperatura; algo que já seria de esperar numa célula de silício mono-cristalino e que também acontece neste tipo de células orgânicas. Contudo, a maior diferença observada nesta experiência dá-se na situação em que se aumenta a temperatura de 40°C para 50°C. Nestas condições, existe uma redução de cerca de 5% da potência obtida.

Tendo em conta que:

$$I = I_{SC} - I_{IS} e^{\frac{U_D}{n v T}} + I_{IS} \quad (3.2)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (3.3)$$

Obtém-se por diferenciação de 3.2, desprezando I_{IS} face a I_{SC} e escolhendo 2 pontos (A,B),

$$\frac{(I - I_{SC})_A}{(I - I_{SC})_B} = e^{\frac{U_{DA} - U_{DB}}{XnV_T}} \quad (3.4)$$

$$n = \frac{U_{DA} - U_{DB}}{XV_T \ln \left(\frac{(I - I_{SC})_A}{(I - I_{SC})_B} \right)}, \quad (3.5)$$

com $X=224$ (nº de células).

A corrente inversa de saturação, I_{IS} é obtida a partir da equação 3.2.

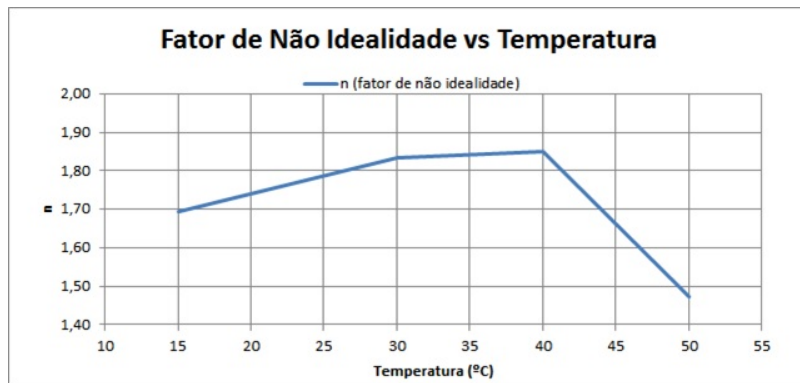


Figura 3.22: Gráfico do fator de não idealidade a variar com a temperatura.

Os resultados obtidos na figura 3.22, indicam que o fator de não idealidade está compreendido entre 1 e 2, ou seja, embora as curvas $I-U$ não tenham a forma usual das associadas a uma célula de silício mono-cristalino, a equação do díodo consegue aproximar-se da equação que descreve o funcionamento das células solares. Nota-se também que a altura em que esta equação está mais próxima da equação para uma célula de silício mono-cristalino situa-se entre os 30°C/40°C.

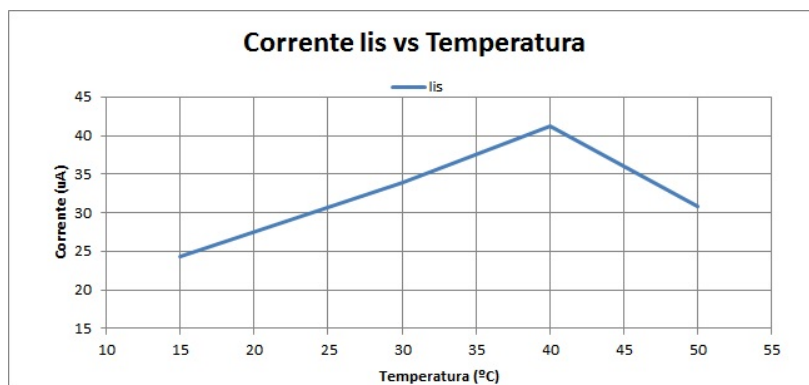


Figura 3.23: Gráfico da corrente I_{IS} a variar com a temperatura.

A evolução da corrente I_{IS} com a temperatura (figura 3.23), mostra que esta cresce linearmente até aos 40°C. Contudo, a partir dos 40°C, a corrente I_{IS} começa a diminuir; a explicação para este fenómeno pode estar relacionada com as alterações sofridas nos dopantes nestas células partir dos 40°C, tendo em conta, que a introdução de dopantes pode ter um efeito de redução da corrente I_{IS} . Os

valores obtidos para a corrente I_{IS} são uma ordem de grandeza superiores às obtidas com as células de silício mono-cristalino. A razão pode residir numa menor concentração de dopantes nas células solares orgânicas.

3.5 Funcionamento de vários tipos de células solares de amostra sob influência de radiação IV

As células orgânicas não seguem um modelo standard e podem ser melhoradas mediante a introdução de dopantes no seu processo de fabrico. Para perceber qual a influência que estes dopantes podem ter nestas células e de que maneira o espectro de radiação absorvido pode atingir a gama do infravermelho, foram analisados 6 células orgânicas com diferentes densidades de material dopante.

As células utilizadas para fazer esta experiência são as da figura 3.24 e têm 6 denominações diferentes: A1, A2, A3, B1, B2, B3.

Foi utilizada uma caixa (figura 3.25), com uma única abertura, onde se coloca o filtro infravermelho. Para cada célula foi feito um teste sem filtro e um teste com filtro, para a mesma irradiância solar. O filtro utilizado nesta experiência corresponde a um passa da banda de 1000/25 nm.

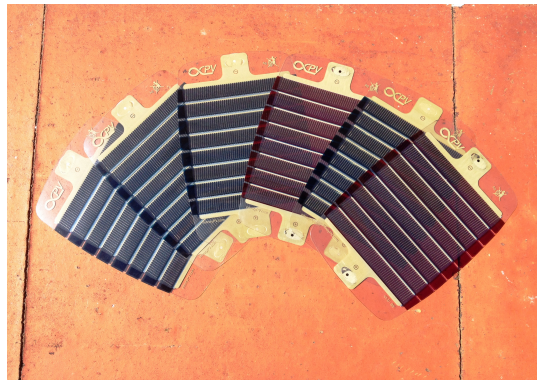


Figura 3.24: Células solares de amostra.



Figura 3.25: Caixa com filtro IV.

As dimensões reduzidas da abertura onde se coloca o filtro, não permitem que a radiação solar que

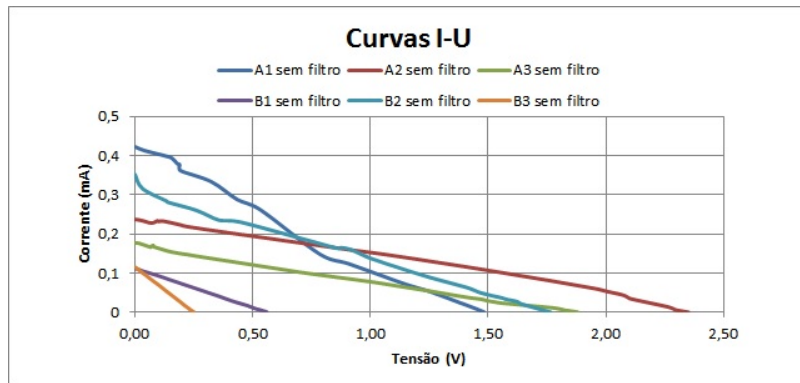


Figura 3.26: Curva *I-U* das várias células de amostra.

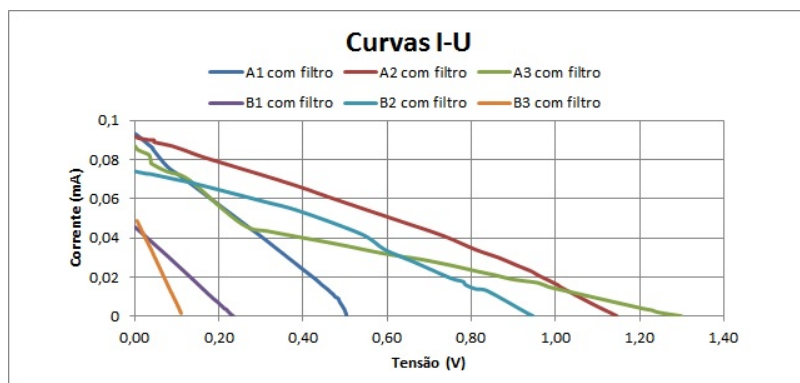


Figura 3.27: Curva *I-U* das várias células de amostra com filtro Infra-Vermelho.

atinge a célula se espalhe em toda a sua superfície. Assim sendo, os valores obtidos para a corrente e para a tensão nesta experiência são apenas uma pequena fração.

A curva *I-U* destas células quando expostas à radiação solar, com e sem filtro, apresentam-se nas figuras 3.26 e 3.27, respetivamente.

Os gráficos 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34 foram construídos com base nos resultados obtidos para cada célula e permitem ter uma perceção mais rápida, quer do funcionamento de cada célula, quer das variações no momento da introdução do filtro IV.

De modo a ser possível perceber a variação dos parâmetros dos vários tipos de células à análise

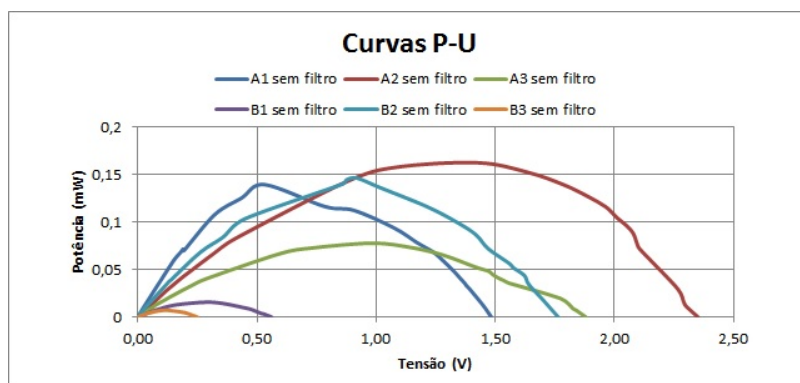


Figura 3.28: Curva *P-U* das várias células de amostra.

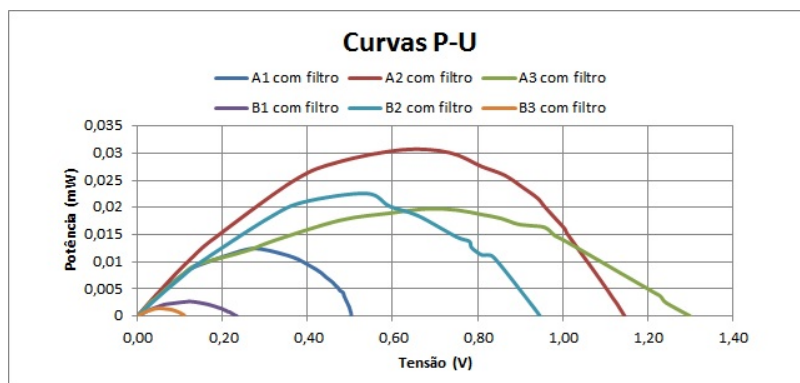


Figura 3.29: Curva $P-U$ das várias células de amostra com filtro Infra-Vermelho.

das curvas características de cada uma das células, retiraram-se os valores da tensão de circuito aberto (V_{OC} , figura 3.30), corrente de curto-circuito (I_{SC} , figura 3.31), potência máxima (P_{MP} , figura 3.32), tensão no ponto de potência máxima (V_{MP} , figura 3.33) e corrente no ponto de potência máxima (I_{MP} , figura 3.34), com e sem a utilização do filtro de IV.

Ao analisar as figuras 3.26 e 3.27, podem observar-se várias diferenças entre as 6 células. Estas podem estar relacionadas com os vários tipos de dopantes ou mesmo de métodos de fabrico, podendo diferir de célula para célula. Segundo a empresa InfinityPV, as células solares orgânicas são compostas dos seguintes elementos - Prata, PEDOT:PSS, OZn e P3HT:PCBM, a análise feita neste momento, tem apenas em conta as consequências de fatores externos ao processo de fabrico.

Verificando o modo como a corrente I_{SC} varia em cada célula, pela curva característica $I-U$ (figura 3.26), pode concluir-se que a célula A1 é aquela que produz uma corrente superior na ausência de filtro IV; no entanto, após a introdução do filtro, existe uma quebra acentuada na corrente I_{SC} , dando a entender que estaremos possivelmente na presença da célula mais sensível a variações de temperatura, pois ao limitar o espectro de radiação incidente, a uma gama entre os [975-1025]nm, está também a provocar-se uma quebra acentuada na temperatura da célula. Este fenómeno é acompanhado por uma diminuição acentuada de V_{OC} , não só porque a radiação incidente é inferior, como também devido à gama do espectro que este tipo de célula absorve estar localizada essencialmente fora da gama IV definida pelo filtro. De acordo com este raciocínio, a potência máxima da célula A1 vai sofrer uma quebra muito grande após a aplicação do filtro (cerca de 91%). A célula B2 tem um funcionamento semelhante à célula A1.

A célula A3 que pode ser considerada a mais equilibrada em termos de funcionamento, antes e depois da aplicação do filtro IV. A célula demonstra alguma sensibilidade a variações de corrente I_{SC} , cerca de 50% de redução em relação a análise sem o filtro (figura 3.31), mas apenas sofre uma redução de 30% no seu V_{OC} (figura 3.30), mantendo esta tendência em relação à potência máxima obtida (74,6%) (figura 3.32). É possivelmente uma célula constituída de camadas que permitem absorver com mais facilidade feixes de luz na gama do IV.

A célula A2 é aquela que permite um maior valor de potência máximo, resultando de uma capacidade superior de absorver fótons da gama do filtro IV. Neste caso verificam-se as menores quebras de V_{OC} , cerca de 51% e de I_{MP} (figura 3.34) (a 2ª quebra mais baixa de todas as células) com 57%. A tensão

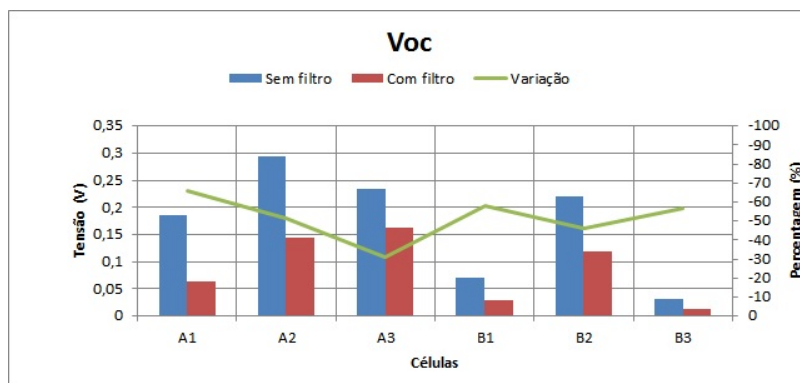


Figura 3.30: Gráfico Voc das células de amostra com e sem filtro com a respectiva variação.

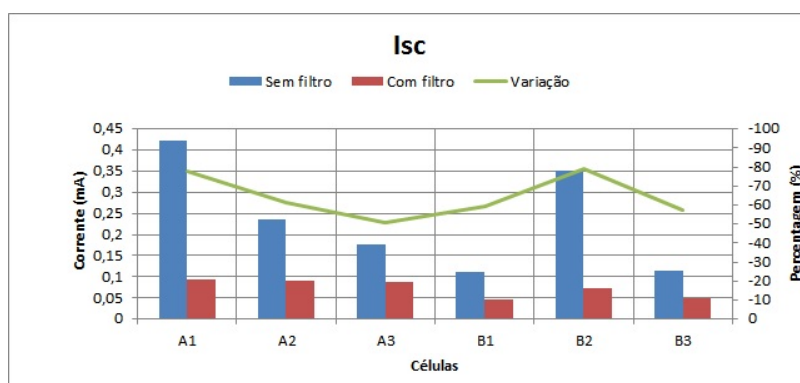


Figura 3.31: Gráfico Isc das células de amostra com e sem filtro com a respectiva variação.

V_{MP} tem uma quebra um pouco mais acentuada (figura 3.32). Em relação à potência coletada, o valor de P_{MP} da célula A2 maior, quer antes quer depois da introdução do filtro IV. A célula A2 é aquela que apresenta maior estabilidade no ponto de máxima potência (MPP), (figura 3.29).

As células B1 e B3 são as que produzem resultados menos entusiasmantes. B3 é a célula com menor V_{OC} , P_{MP} e V_{MP} antes e após a introdução do filtro, B1 é a célula com menor I_{SC} e I_{MP} . Isto sugere que, serão as células cuja a dopagem foi menos intensiva e/ou que não se revelou efetiva. Possivelmente o processo de fabrico destes 2 tipo de células pode ter sido de algum modo negligenciado.

O fator de forma é um dos parâmetros cruciais na análise do desempenho das células solares. Entre

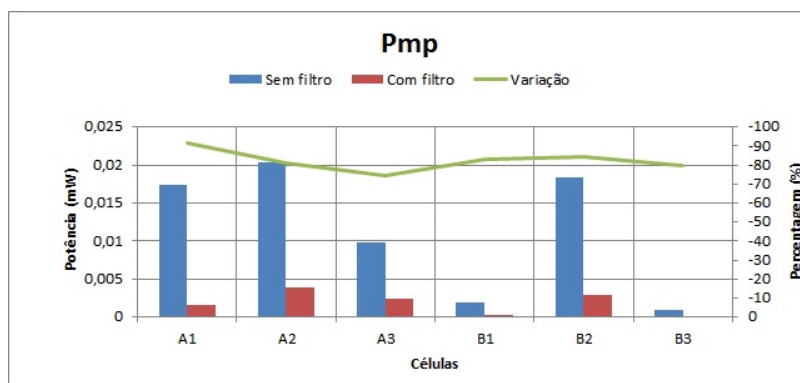


Figura 3.32: Gráfico Pmp das células de amostra com e sem filtro com a respectiva variação.

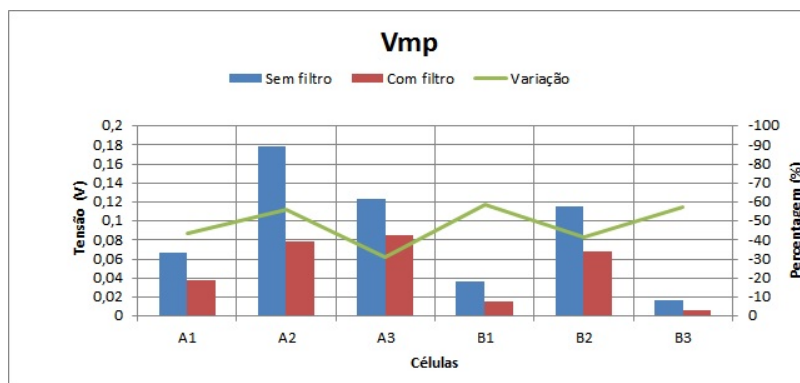


Figura 3.33: Gráfico Vmp das células de amostra com e sem filtro com a respectiva variação.

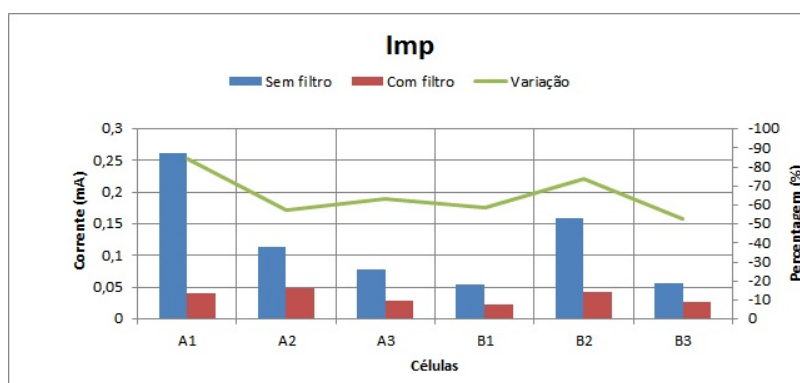


Figura 3.34: Gráfico Imp das células de amostra com e sem filtro com a respectiva variação.

os parâmetros mensuráveis associados à variação do FF destacam-se a resistência série, associada aos contactos, a resistência paralela (shunt), associada às fugas, a corrente de recombinação e a corrente inversa de saturação. Estes parâmetros dependem das propriedade "Bulk" dos materiais, da interface das camadas com os elétrodos e da variação na mobilidade dos portadores de carga [21].

Numa célula ideal a resistência série é nula e o fator de forma é dado por:

$$FF = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (3.6)$$

Os valores tipicamente obtidos, para células solares orgânicas, situam-se entre os 50-70% [22], embora sofram uma quebra para valores abaixo dos 25% (figura 3.35), quando a curva $I-U$ tende para uma reta. Isto acontece devido à degradação da célula e dos seus componentes orgânicos, minutos após o seu fabrico.

As células utilizadas nesta experiência foram fabricadas na Dinamarca e há alguns meses. A degradação das células era previsível no momento das experiências, tendo efeitos acentuados no seu desempenho e respetivo fator de forma 3.35.

Os motivos que levaram as células a sofrerem esta variação deve-se; (i) a uma redução na extração de carga, devido à deterioração da interface polímero/eléctrodo, (ii) a quebra na mobilidade dos portadores de carga ao longo do tempo, (iii) devido às impurezas dos materiais.

Ao analisar o gráfico da figura 3.35, verifica-se que antes de se inserir o filtro IV, somente uma

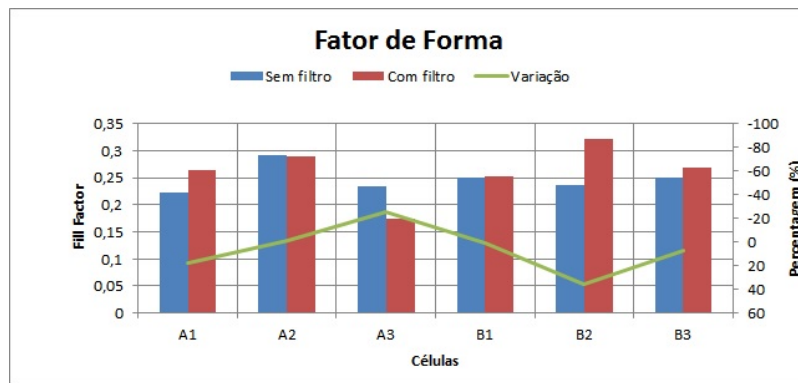


Figura 3.35: Gráfico fator de forma das células de amostra com e sem filtro com a respetiva variação.

das células atinge perto dos 30% de FF, algo que pode ser ilustrativo da variação da degradação do FF mediante o tipo de material de que são constituídas as camadas orgânicas. Assumindo que os elétrodos foram fabricados com os mesmos materiais e após colocar o filtro IV, os fatores de forma aumentaram ligeiramente para quase todas as células. A célula A2 sofre uma ligeira redução no FF e a célula A3 tem uma variação de cerca de 25%. No geral, as células sofrem um aumento do fator de forma após a inserção do filtro IV, podendo ser indicativo de que existe uma redução das correntes de fuga nos contactos, consequência da redução da energia produzida pela absorção de comprimentos de onda superiores.

3.6 Painel solar orgânico exposto à irradiância solar

A experiência descrita neste ponto tem como objetivo analisar de que forma o painel solar orgânico reage numa situação em que é exposto à radiação solar, sendo que o painel é colocado no plano horizontal e direcionado para o Sol. Esta análise é importante, pelo facto de terem sido pouco estudadas e por estarem associadas a uma tecnologia bastante recente.

As medições foram realizadas de 2 em 2 horas num horário compreendido entre as 8h e as 20h, durante 30 dias não obrigatoriamente consecutivos. A experiência foi realizada em Lisboa, tendo igualmente sido realizada uma medição diária numa localidade do concelho de Ourém.

Foram registados os valores de corrente e tensão para o ponto de máxima potência do painel, para cada hora. Seguidamente foram obtidos os valores de irradiância através dos web sites [23, 24]. Tiveram-se em conta as dimensões do painel e foram calculadas os respetivos rendimentos máximas para cada hora, de acordo com os dados retirados do sites.

Pela análise dos resultados, verifica-se que as potências obtidas para cada hora, são em média cerca de 18 a 19 vezes superiores aquelas que foram obtidas em laboratório, situando-se na ordem de 1-1.5 W em média, por dia. Isto pode ser explicado, pelo facto do espectro solar abranger uma gama de comprimentos de onda muito superior aos de uma lâmpada de halogéneo. Para além disso, para cada comprimento de onda emitido através da lâmpada de halogéneo, existe um comprimento de onda do espectro solar com bastante mais energia. Este fenómeno pode ser observado através destas experiências e pela visualização do gráfico da figura 2.9.

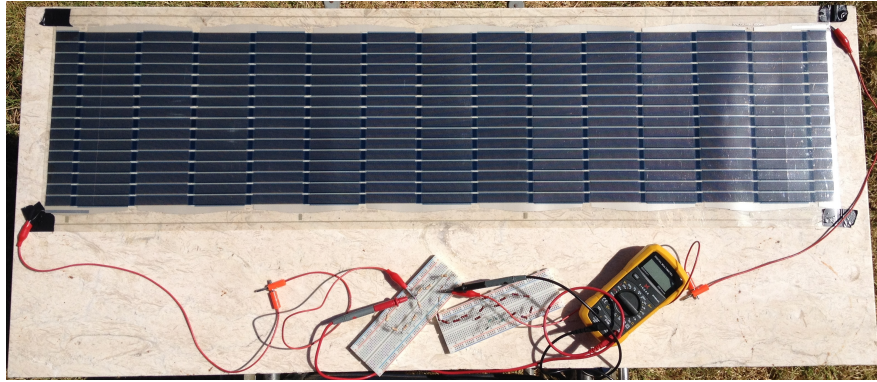
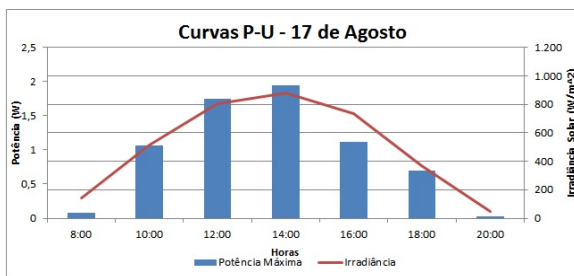
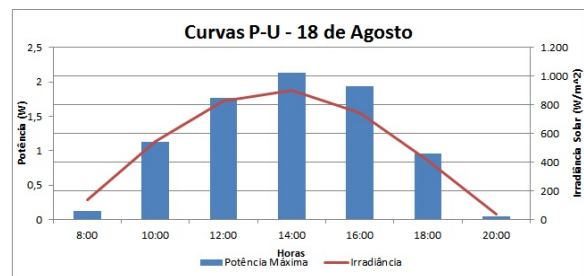


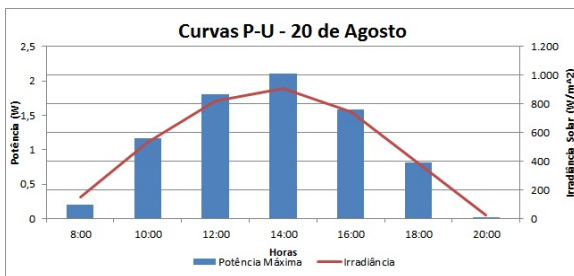
Figura 3.36: Montagem painel solar no exterior.



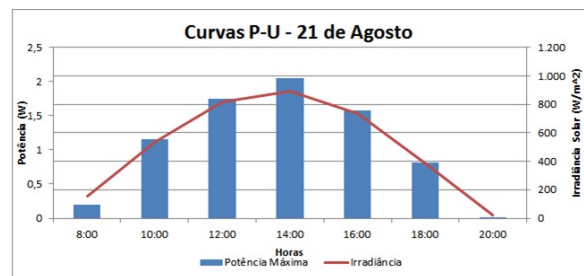
(a) Curva $P-U$ e de irradiância solar de dia 17 de Agosto.



(b) Curva $P-U$ e de irradiância solar de dia 18 de Agosto.



(c) Curva $P-U$ e de irradiância solar de dia 20 de Agosto.



(d) Curva $P-U$ e de irradiância solar de dia 21 de Agosto.

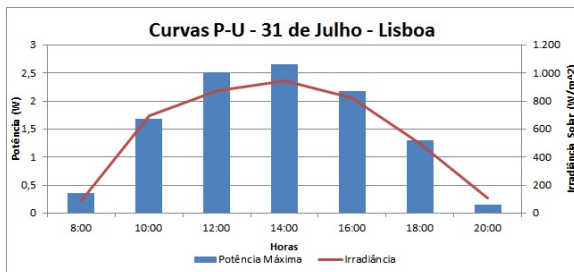
Figura 3.37: Gráficos correspondentes a 4 dias de análise da irradiância solar e correspondente potência gerada pelo painel solar orgânico, de um total de 31 dias.

Na figura 3.37 estão representados 4 dias de análise do painel solar orgânico, de um total de 31 dias. Estes dias foram escolhidos para amostra por serem uniformes em termos de radiação solar (dias com ausência de nuvens), consequentemente aproximam-se mais de um dia típico de Verão. Estes 4 dias possuem rendimentos máximos diários a rondar os 0.74-0.87%, o que significa que os valores referenciados para este tipo de células têm em conta condições climáticas ideais, com céu totalmente limpo e com muito pouca poluição. Tendo em conta os valores de ordem de 4% dados pelo fabricante para os rendimentos deste tipo de células, os baixos valores obtidos sugerem como causa a influência de temperatura dos painéis.

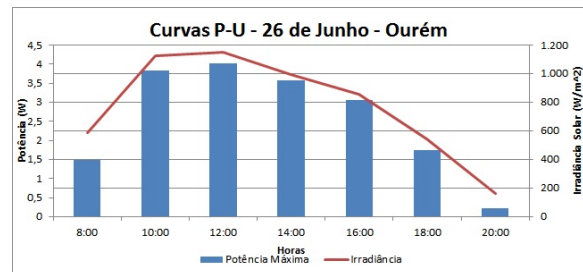
As figuras 3.37, mostram rendimentos médios de 0,8% de energia, o que equivale a dizer que cada painel gera em média 1,18 W por hora, com o céu limpo e num mês de verão com cerca de 129,9 W por hora de energia solar incidente. Considerando uma média diária de 12h de exposição solar, um painel orgânico destas dimensões (cerca de $1m^2$) produziria 14,6 W.

A análise de curvas de distribuição de energia coletada ao longo do tempo (por dia, por mês) não é tarefa simples dado o número elevado de parâmetros em jogo. Naturalmente que é de esperar que as condições climáticas (chuva, presença de nuvens, temperatura, vento) sejam determinantes nos valores obtidos, mas uma certa prudência é aconselhável para a análise do problema.

Ao analisar as características dos dois gráficos (da figura 3.38), verifica-se o seguinte; (i) no dia 31 de Julho obteve-se uma potência média de 1,55 W por hora com uma radiação média incidente de 147,56 W por hora, (ii) no dia 26 de junho obteve-se uma potência média de 2,56 W por hora com uma radiação média incidente de 198,23 W por hora. Os rendimentos foram 1,05% para o dia 31 de Julho e 1,29% para o dia 26 de Junho, isto demonstra que parte da energia emitida pelo sol, foi sendo perdida à medida que a radiação solar se aproximou da superfície terrestre, de forma mais acentuada em Lisboa do que em Ourém, o que faz supor que a razão esteja associada à poluição urbana.



(a) Curva *P-U* e de irradiância para uma zona urbana com um grau significativo de poluição atmosférica.



(b) Curva *P-U* e de irradiância para uma zona rural com um grau muito reduzido de poluição atmosférica.

Figura 3.38: Comparação de curvas de potência para regiões geográficas diferentes.

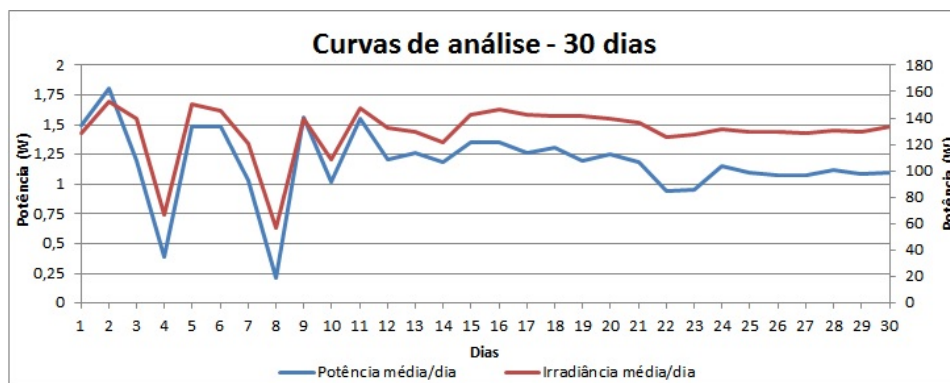


Figura 3.39: Curva de potência média diária ao longo de 30 dias.

O gráfico da figura 3.39 representa a variação da potência incidente e da potência gerada ao longo de 30 dias. Este gráfico permite visualizar, de uma forma mais clara, o modo como o painel se comporta com as variações de irradiância solar. As grandes quebras, no dia 4 e no dia 8, devem-se a períodos muito nublados, em que a conversão de energia foi bastante reduzida, e que as rendimentos médios diários foram 0,58% e 0,37%, respetivamente.

3.7 Análise Comparativa entre as duas gerações de Células

O objetivo principal desta secção consiste em perceber até que ponto uma célula solar orgânica pode ser um substituto adequado às células solares de silício, tendo em conta a limitação em termos de rendimento.

Para isso, é preciso perceber quais as grandes vantagens que se podem retirar das células solares orgânicas. As células solares orgânicas utilizadas para realizar as experiências, são constituídas por várias camadas comprimidas, tendo uma camada foto-ativa e duas camadas de elétrodos. Estas camadas são impressas em rolos, tal como nos jornais, só que em substratos finos de plástico. Os materiais que as constituem possuem um desenho específico de modo a absorver determinados comprimentos de onda, conferindo às células a possibilidade de serem leves, flexíveis e finas.

Outro fato relevante sobre estas células é a capacidade de poderem ser utilizadas para aplicações diferenciadas, dada a sua adaptabilidade, cor e semi-transparência. Estas características podem vir a ser muito úteis para profissionais ligados à área da arquitetura e construção civil. Do ponto de vista do fabricante o facto de serem impressas com facilidade, em quantidade e dimensão, por via do seu processo de fabrico R2R (roll to roll), representa uma mais valia no processo de produção. Do ponto de vista do comprador existe uma maior facilidade de escolha do design que mais lhe convém. O processo de fabrico a baixas temperaturas e em quantidade permite obter um custo de produção bastante mais reduzido do que as associadas a tecnologias fotovoltaicas tradicionais e assim é assegurado um tempo de retorno de investimento menor. Finalmente, a energia desperdiçada na produção das películas solares, consequência do processos de fabrico a baixas temperaturas e à utilização de materiais orgânicos para o seu fabrico, permite obter um produto de reduzida pegada ambiental e que inclusive pode ser reciclado ou incinerado.

As células solares orgânicas têm outras características muito interessantes associados à sua utilização em torno de ambientes aquáticos, especialmente importante para a limpeza e remoção de calor. A sua flexibilidade permite a sua aplicação em locais que não sejam completamente planos. Esta característica não é suficiente para se poder afirmar que uma tecnologia é melhor que a outra, contudo, o mais importante nesta experiência é o fato das células solares orgânicas terem a capacidade de isolamento dos contactos metálicos e permitirem uma aplicação em superfícies que não sejam completamente planas. O fator que mais contribui para esta situação, é a flexibilidade da células, permitindo concluir que existe uma certa aptidão para este tipo de meio, algo que não seria possível com células solares de silício mono-cristalino.

A sua flexibilidade permite a sua utilização em locais como piscinas, parques aquáticos, lagos ou qualquer outros meios aquáticos. Resolvem-se vários problemas: (i) limpeza, (ii) meios com razoável transparência e onde a incidência de luz seja mais eficaz, (iii) arrefecimento, conduzindo a um aumento de rendimento, (iv) custos associados, tema que será abordado no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Análise Comparativa

Neste capítulo, será realizada uma análise ao desempenho das células solares orgânicas, comparando-as com as células de silício mono-cristalino. Pretende-se compreender quais as principais vantagens da aquisição de células solares orgânicas, tendo em conta o seu rendimento, os custos associados à compra, os métodos de produção, as formas de degradação e aplicabilidade destes materiais.

4.1 Presente e Futuro das Células Solares Orgânicas

Antes de se proceder a uma análise do custo das tecnologias em estudo, é necessário perceber qual o seu estado de comercialização e qual é a perspetiva futura de uma tecnologia emergente, como é o caso das células solares orgânicas.

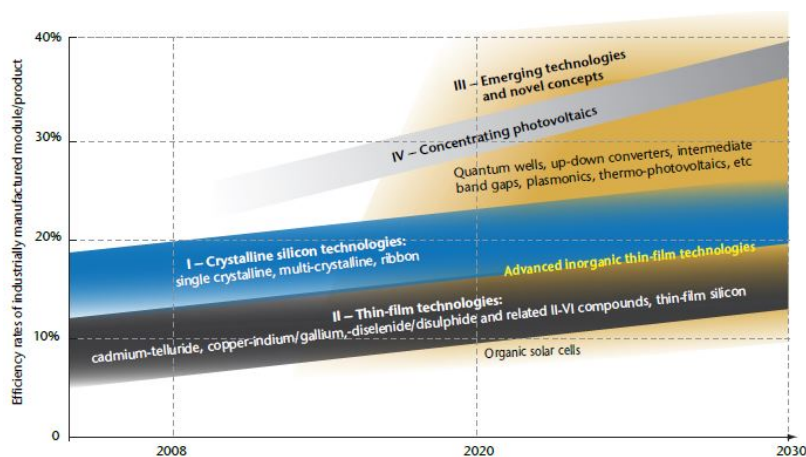


Figura 4.1: Previsão até 2030 da performance de várias tecnologias solares. Imagem adaptada de [25].

Em 2010, a agência internacional de energia lançou *Solar Photovoltaic Energy* [25], onde é feita uma primeira análise à evolução de várias tecnologias solares, incluindo a tecnologia solar de células orgânicas. Por esta altura, já era possível apontar algumas vantagens (baixo custo) e desvantagens (performance moderada e ainda em fase de demonstração) deste tipo de tecnologia. Foi feita uma previsão até 2030, tal como pode ser observado na figura 4.1, onde se verifica que em 2018 os rendi-

mentos para células solares orgânicas não ultrapassariam os 10%, apesar de, com base em dados de empresas produtoras deste tipo de tecnologia, os rendimentos obtidos ultrapassam este valor.

Por exemplo, a Raynergy Tek afirma que em 2016 o rendimento das suas células atingiu os 11,51% usando uma camada livre de halogéneo [26]. A Heliatek, congratula-se de ter obtido o recorde de rendimento para esta tecnologia, atingindo os 13,2% para células opacas, embora nas células semi-transparentes (30% de transparência) esteja na ordem dos 6% [27]. As células solares orgânicas têm um potencial de desenvolvimento bastante elevado, podendo competir com as células solares de silício, em mercados semelhantes, abrindo-se um leque de possibilidades e de aplicações com esta tecnologia emergente.

4.2 Análise Económica

A empresa ASCA afirma que está numa fase de desenvolvimento, que lhes permite, caso fosse necessário, produzir cerca de 800 m²/min de painel, o que corresponde a cerca de 1 milhão de m² de painéis solares orgânicos por ano e, garantindo um tempo de vida útil das células até 20 anos. A Heliatek prevê um tempo de vida útil até 20 anos, tal como a ASCA, e um tempo de retorno de investimento inferior a 3 meses. De referir que, nenhuma destas empresas disponibilizou os custos de aquisição de um painel solar orgânico.

Atendendo aos custos de aquisição de um painel solar orgânico à empresa InfinityPV, (a única que disponibilizava preços ao cliente particular), é de referir que os valores não se enquadram com o alegado baixo custo produtivo publicitado por todas as empresas que produzem esta tecnologia. Em suma, embora os custos de produção possa ser inferiores ao de silício mono-cristalino, nesta fase de comercialização das células orgânicas ainda não terá acontecido o "breakeven", para as empresas que se dedicam ao R&D e comercialização desta tecnologia. Infelizmente, estes fatores fazem aumentar significativamente o preço de um painel orgânico para o cliente particular, que pretende usar esta tecnologia para uma aplicação muito específica e usufruir das características únicas destas células.

O painel solar de silício mono-cristalino usado para comparação, foi escolhido com base na potência máxima produzida no ponto de funcionamento máximo. A escolha, atendeu ao leque de opções existentes no mercado, sendo apoiada um critério chave para a sua definição. A informação técnica do painel de silício escolhido encontra-se em apêndice A.

A partir das características técnicas da tabela 4.1, é possível uma análise comparativa do comportamento das células orgânicas e de silício mono-cristalino numa base preço/rendimento.

<i>Tipo</i>	Silício Mono-cristalino	Orgânica
<i>Modelo</i>	MM005-12/1	infinityPV foil Unidirectional Versão C
$P_{MP}(W)$	5	5,2
$V_{MP}(V)$	16,8	inf. indisponível
$I_{MP}(A)$	0,28	inf. indisponível
$V_{OC}(V)$	21,2	130
$I_{SC}(A)$	0,3	0,06
$\eta(\%)$	≈ 8.2	≈ 4
$n^{\circ} \text{células}$	36	224
<i>Peso(kg)</i>	0,8	0,22-0,45
<i>Tamanho(mm)</i>	180x340x23	1050x0,305
<i>Custo/unidade</i>	14,5	175
<i>Custo/Wp</i>	2,9	33,65

Tabela 4.1: Características elétricas e mecânicas das duas tecnologias.

4.3 Análise de Produção

Um estudo comparativo dos dois tipos de tecnologias em estudo requer uma análise dos métodos de produção, de modo a compreender qual delas necessita de mais energia e tempo no processo de fabrico. Este ponto de análise é importante e deve ser tido em consideração, não só por parte de investidores para o desenvolvimento e melhoramento destas tecnologias, como por parte das empresas que pretendem adquirir células solares. Com efeito, a pegada ambiental dos processos de fabrico é um fator muito importante quando se pensa na aquisição de um produto que extrai energia diretamente de uma fonte sustentável e inesgotável, como é o Sol.

As células solares orgânicas, produzidas pela empresa InfinityPV, são fabricadas a partir do método R2R (roll to roll) em linha, que consiste num processo de fabrico através da utilização de uma impressora industrial, com um rolo de substrato de plástico que servirá como base para a impressão dos compostos das células. Inicialmente, o elétrodo de prata frontal é imprimido sobre o substrato de plástico flexível, juntamente com umas marcas indicadoras para que seja feito o ajuste nos processos seguintes de impressão e de revestimento. Seguidamente, é feita uma impressão serigráfica rotativa, de forma similar à utilizada na indústria têxtil, para imprimir etiquetas, sobrepondo o polímero altamente condutor PEDOT:PSS ao elétrodo frontal. O ZnO é moldado sob a forma de 16 riscas com uma largura de 13 mm e, é colocado no topo das células. Após a inserção de 3 camadas (Ag, PEDOT:PSS e ZnO) está concluída a criação do substrato flexível. Em seguida, a máquina vai dar início à moldagem e posterior revestimento do substrato flexível, com uma camada ativa de P3HT-PCBM dissolvido em clorobenzeno. Finalmente, é realizada uma impressão serigráfica rotativa, de uma camada de PEDOT:PSS, de modo a cobrir toda a camada ativa e a ligação entre os barramentos das células adjacentes. O layout do módulo é finalizado com a impressão dos elérodos de prata posteriores, de modo a cobrir a camada de PEDOT:PSS e fazer a ligação com o barramento do elétrodo frontal. As impressões são normalmente secadas, através de ar quente a 140°C com o apoio de lâmpadas de infravermelhos [28]. Na figura 4.2 apresenta-se uma imagem de um módulo após cada fase do processo de fabrico.

A maquinaria que permite a impressão das células solares orgânicas deve ser bastante robusta e eficiente, caso contrário, as falhas podem provocar danos bastante significativos. Um circuito aberto numa

só célula, poderá levar à inexistência de energia extraída; um curto-circuito provocará uma redução na performance do painel, uma vez que originará uma resistência em série adicional.

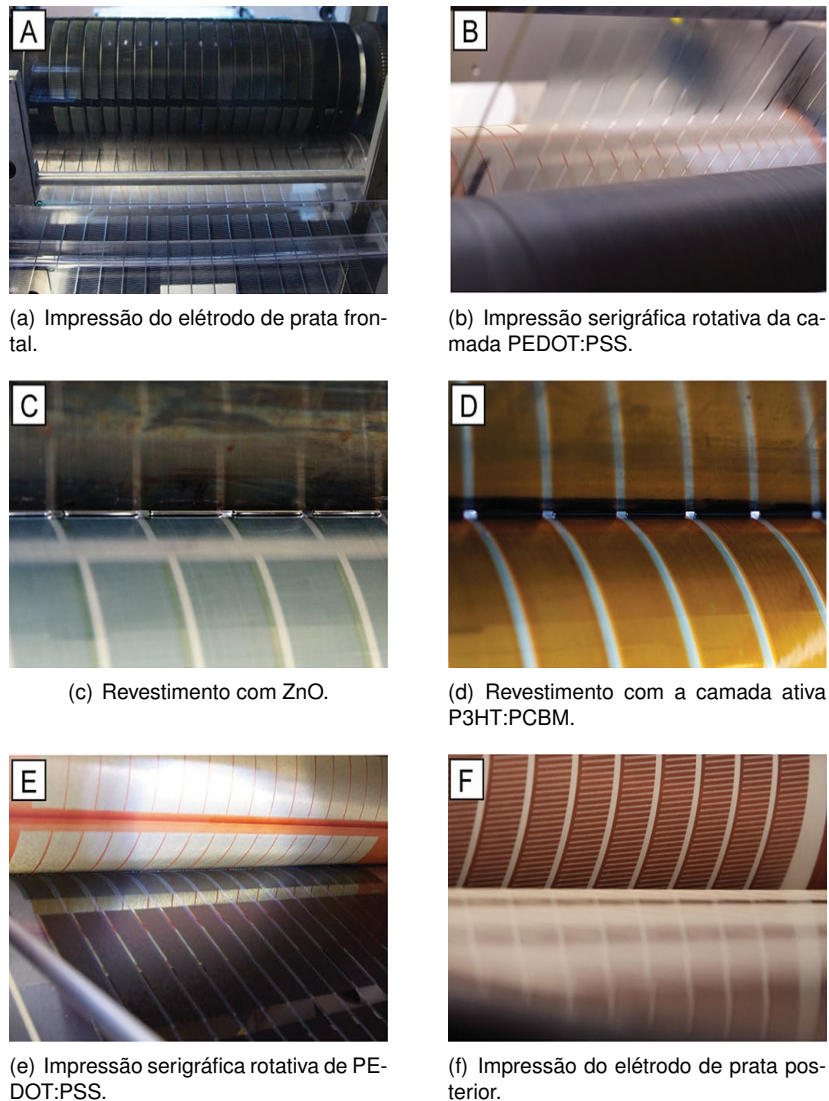


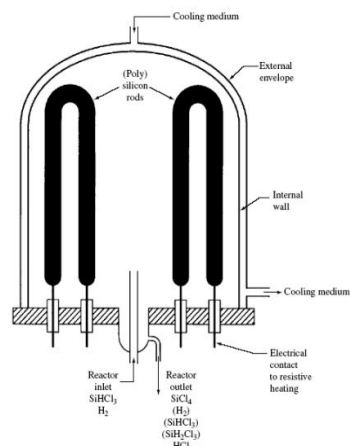
Figura 4.2: Etapas do processo de fabrico de um módulo orgânico. Imagem adaptada de [29].

Os processos de fabrico deste tipo de células permitem usar um processo semi-manual, produzindo cerca de 100 m/min ou um processo automatizado, produzindo entre 2-300 m/min. Quer isto dizer que, em termos de velocidade de produção, esta tecnologia provou estar pronta para competir no mercado das energias renováveis.

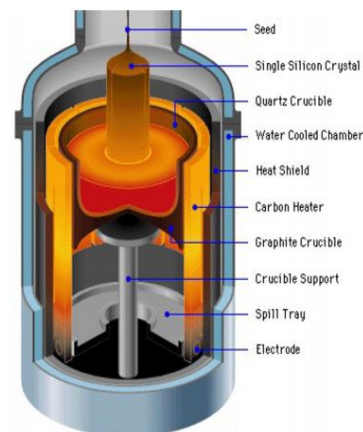
As células de silício mono-cristalino têm como matéria prima o silício, o segundo elemento mais abundante da terra, sendo observado na forma de silicatos e óxidos. A sua produção passa por vários processos de purificação, sendo que o primeiro passo para obter este elemento começa com a purificação de quartzo em fornos de arco. O quartzo entra num forno de arco, que é aquecido a temperaturas de 2100K, liquidifica e mistura-se com carbono, dando origem a uma reação termo-elétrica. Deste processo resulta um elemento de silício com graus de impureza entre 98-99%, chamado de silício metalúrgico (mg-Si), muito usado na indústria da iluminação. Em seguida, o mg-Si é inserido

num reator de combustão juntamente com ácido clorídrico (HCl); da reação destes elementos, resulta a substância $SiHCl_3$ (Triclorossilano), que irá ser a base para a criação de silício poli-cristalino. Finalmente, o $SiHCl_3$ é inserido noutra reator juntamente com Hidrogénio, à temperatura de 1400 K, passando por um processo de deposição química de vapor (CVD- Chemical Vapour Deposition), onde o silício ultra puro se vai depositar em varetas de silício, dando origem a lingotes de silício poli-cristalino.

O silício mono-cristalino pode ser obtido através de dois métodos: o método de Czochralski (CZ) e o método de fusão de zona. Somente se fará alusão ao primeiro por ser o método mais comum. O método de CZ consiste na vagarosa extração do cristal cilíndrico de silício, utilizando um cadinho feito de quartzo que contém silício poli-cristalino fundido e alguns elementos dopantes, tais como o Boro e o Fosforo, de modo a criar uma camada p ou n, respetivamente. Uma semente de cristal de silício é inserida no silício poli-cristalino líquido de forma rotativa e o cadinho de quartzo começa a descer de forma progressiva e bastante controlada, à temperatura de 1415°C, numa atmosfera inerte (habitualmente de Árgon). Este processo dá origem a um lingote de silício mono-cristalino, que vai solidificando segundo a orientação da rotação da semente do cristal de silício. Os lingotes podem ter entre 200-300kg e podem chegar a ter comprimentos de 2m [30].



(a) Reator de Siemens para o fabrico de silício poli-cristalino (imagem adaptada de [31])



(b) Câmara do método de Czochralski para o fabrico de silício mono-cristalino imagem adaptada de [32])

Figura 4.3: Parte do processo de fabrico de silício poli-cristalino e mono-cristalino

As bolachas de silício, que irão dar origem a painéis fotovoltaicos, são pedaços de lingotes cortados através de lâminas ou fios de corte com diamante. As bordas das bolachas são arredondadas e a superfície é polida de forma a remover possíveis irregularidades.

Todo o processo produtivo de uma bolacha de silício mono-cristalino é bastante dispendiosa e morosa. Sendo que são necessárias elevadas temperaturas para permitir que se possam atingir os níveis de fusão e de pureza dos materiais adequados, e são necessárias câmaras de reação e de combustão com características elétricas e térmicas muito específicas.

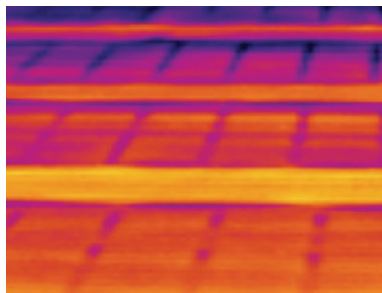
Deste modo, é possível concluir que o processo produtivo de uma célula solar orgânica, é bastante menos dispendioso a nível energético, não só por se tratar de uma produção muito mais rápida mas também por ser feita a temperaturas consideravelmente mais baixas. Em resumo, as células orgânicas

são capazes de competir de uma forma bastante sólida, sendo por isso uma tecnologia significativamente mais viável em termos produtivos.

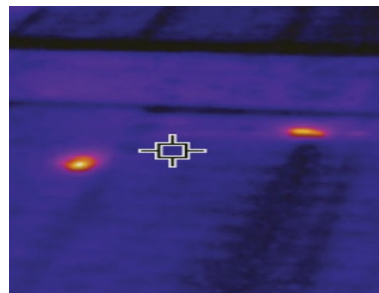
4.4 Análise de Degradação

A degradação de uma célula solar é um fator que influencia diretamente a aquisição desta tecnologia, qualquer que seja a sua aplicação. Os métodos de produção e as características dos elementos das células solares orgânicas e das células de silício mono-cristalino diferem completamente, o que conduz a processos de degradação bastantes distintos.

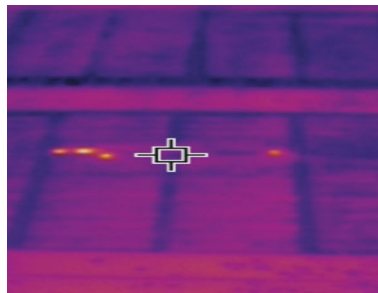
As células solares orgânicas podem estar sujeitas a pequenos furos e riscos no momento da instalação, assim como ao impacto de dejetos de pequenas e grandes aves. No caso em que o painel é afetado por elementos externos, o painel pode permitir a penetração de água e oxigênio ao longo das horas de funcionamento, originando danos nas camadas intermédias, degradação da camada ativa, dissolução do PEDOT:PSS e oxidação dos elétrodos de prata.



(a) Imagem do painel através de infra-vermelhos.



(b) Aparecimento de um hot-spot no eletrodo de prata e outro hot-spot no interior da célula.



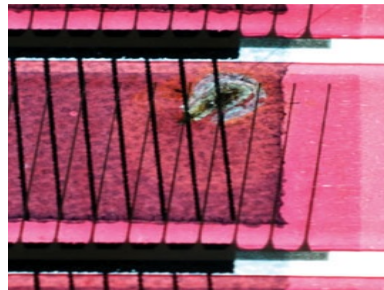
(c) Aparecimento de 4 hot-spots no interior das células.

Figura 4.4: Técnica de análise de hot-spots através de infra-vermelhos. Imagens adaptadas de [33]

Com o intuito de encontrar "hot-spots" nos painéis orgânicos, são utilizadas técnicas de imagens através de infravermelhos, identificando assim pequenas zonas com temperaturas mais elevadas e que são suscetíveis de iniciar uma queimadura na célula. Estas zonas aparecem devido a pequenos buracos nas camadas intermédias, fazendo reduzir a distância entre as redes de elétrodos de prata e fazendo sobrepor o eletrodo frontal e traseiro criando um curto-circuito. A corrente começa a acumular numa zona de baixa resistência, aquecendo aquela zona da célula e dando origem a um pequeno

incêndio.

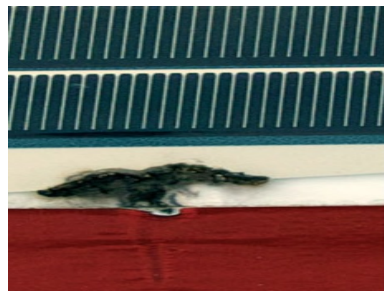
A zona da junção dos elétrodos, na borda lateral do painel, é também suscetível de criar pequenos incêndios devido à delaminação e posterior entrada de água pelas bordas. As tensões elevadas a que o painel está sujeito, propiciam a criação de arcos elétricos ou faíscas, entre o elétrodo e as estruturas subjacentes, despoletando pequenos incêndios e queimaduras consequentes. Estes processos estão claramente identificados na figura 4.4.



(a) Queimadura provocada por curto-circuito nas células.



(b) Queimadura provocada por curto-circuito nas células.



(c) Queimadura na zona dos elétrodos provocadas pela penetração de água e consequentes faíscas.



(d) Queimaduras provadas por tempestades.

Figura 4.5: Imagens de queimaduras provocadas por fatores internos e externos. Imagens adaptadas de [33]

Fenómenos atmosféricos, tais como tempestades e relâmpagos, podem ser determinantes na destruição parcial dos painéis orgânicos. As tempestades seguidas de chuva intensa, provocam sérios danos nos painéis, dada a impossibilidade de os desligar durante o seu funcionamento. A penetração de água e o consequente aparecimento de faíscas vão novamente dar início a um processo combustivo, que irá criar queimaduras e danificar o painel. Os relâmpagos irão provocar arcos elétricos, devido ao aumento do potencial criado entre o painel e o raio. O arco irá queimar algumas zonas do painel. Um estudo sobre os efeitos das queimaduras sobre os parâmetros elétricos dos painéis foi feito, tendo-se concluído que teriam um impacto relativamente baixo na corrente I_{SC} , na tensão V_{OC} e no FF [33].

O painel solar orgânico tem uma enorme vantagem em relação ao de silício mono-cristalino, que se prende com o facto de poderem ser reparadas faixas de painel, mesmo que se encontrem num módulo completo. Deste modo, é apenas necessário cortar a zona degradada e refazer as ligações com o novo pedaço de painel. Isto só é possível por se tratar de um substrato de plástico leve e flexível.

As células solares de silício podem sofrer de vários defeitos ao longo da sua vida útil. É necessário fazer uma avaliação segundo a norma IEC61215 para que o produto antes de ser comercializado possa

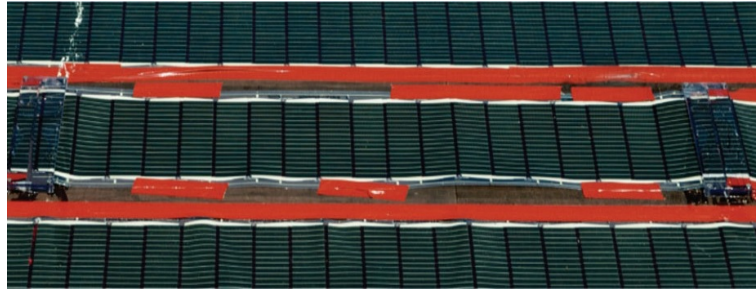


Figura 4.6: Painel solar orgânico após reparação. Imagem adaptada de [33].

garantir as condições de segurança e operacionalidade indispensáveis.

A radiação UV e a água, combinadas com temperaturas acima dos 50°C, dão origem a uma alteração química da estrutura da EVA (material adesivo entre o vidro e as células), provocando uma mudança na transmitância de luz e conseqüente redução da potência geral. A reação visível deste efeito é dado pelo aparecimento de uma tonalidade amarelada ou acastanhada na junção entre as células (a cor original desta junção deveria ser branca).

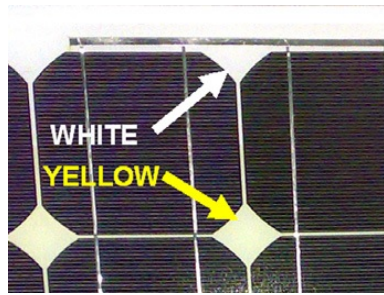
A perda de aderência entre as diferentes camadas dos módulos PV e subsequente destacamento da região entre o encapsulamento, as células e o vidro da frente, provocam um aumento da reflexão dos feixes luminosos e penetração de água dentro da estrutura modular. Na pior situação, ou seja, na perda de aderência nas bordas do módulo, poderá ocorrer um risco elétrico do painel e de toda a instalação, assim como a corrosão dos metais usados nas estruturas do módulo e o aumento da resistência interna.

Outro defeito verificado em painéis de silício acontece quando existe uma falha de aderência entre o painel e o EVA. Este fenómeno dá-se numa pequena área e é provocado por uma reação química onde alguns gases são libertados, provocando o aparecimento de bolhas. Como consequência disto, existirá uma dissipação de calor menos eficiente, sobreaquecendo a célula e reduzindo o seu tempo de vida útil. Por norma, as bolhas aparecem no centro das células mas em algumas situações só são identificadas com técnicas óticas, usando radiação infravermelha.

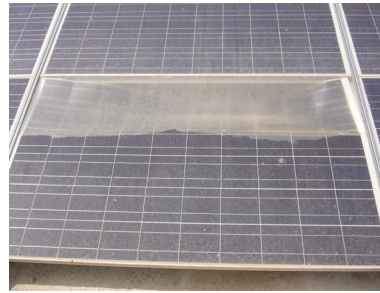
Dada a tentativa de reduzir os custos de produção, a manufatura das células de silício tem vindo a reduzir as suas dimensões. Este facto conduz no entanto a um aumento da fragilidade e suscetibilidade das células, dando origem a possíveis fraturas, durante a manipulação, laminação e armazenamento. Quando se trata de micro-fraturas, são necessárias técnicas óticas para as detetar. As micro-fraturas têm uma influência muito grande, quer na consistência da célula, quer na possível redução do caminho de recombinação da carga.

Finalmente, o aparecimento de "hot-spots" pode ser consequência de diferentes situações, nomeadamente, do sombreamento parcial, da incompatibilidade entre células ou de falhas na ligação entre células. Para evitar o funcionamento reversivo das células sombreadas, são usados díodos by-pass (BP). Contudo, nem sempre os díodos são adequados, levando ao aquecimento excessivo e provocando danos irreversíveis nas células.

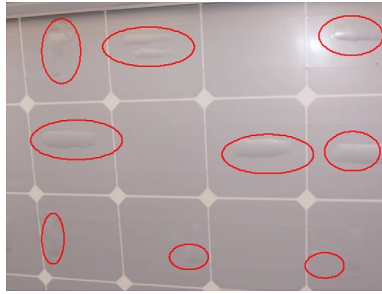
Nas situações em que o "hot-spot" é causado por um curto-circuito ou por uma falha na interligação das células, poderão existir danos nas células ou no encapsulamento. Este fenómeno, poderá aconte-



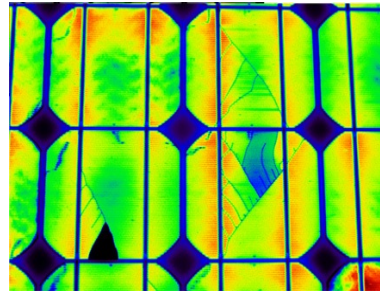
(a) Módulo de silício com tom amarelado na junção entre células.



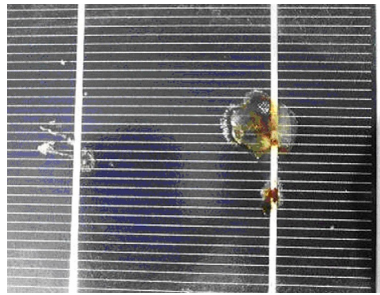
(b) Módulo de silício com delaminação e consequente destacamento.



(c) Módulo de silício com bolhas visíveis na sua superfície.



(d) Módulo de silício com fissuras visíveis.



(e) Módulo de silício com hot-spot na sua superfície.

Figura 4.7: Defeitos em painéis de silício. Imagens adaptadas de [34]

cer num curto período de funcionamento da instalação. Este tipo de defeitos é muitas vezes causado por problemas no processo de fabrico da célula ou do módulo, sendo necessário realizar uma análise térmica de forma a detetar pequenos aquecimentos que poderão dar origem a queimaduras das células de silício. No entanto, esta análise poderá ser realizada durante o período de normal funcionamento do painel.

Embora não seja possível prever a ocorrência de defeitos em ambas as tecnologias, é possível analisar e inferir que ao ocorrer uma substituição de uma parte de um painel orgânico, a sua reparação passará pela substituição parcial deste. Quando ao painel de silício, a substituição de uma célula danificada é impraticável, sendo necessária a substituição da totalidade do painel. Facilidade de reparação e diminuição de custos serão dois pontos a assinalar em favor das células orgânicas neste estudo comparativo das duas tecnologias.

4.5 Aplicabilidade

As células solares orgânicas têm um "breakeven" muito mais tardio do que as de silício monocristalino. As suas possíveis aplicações são muito mais abrangentes do que as de silício, o que a médio prazo pode influenciar positivamente, quer o seu desenvolvimento, quer a sua comercialização a larga escala.

Em 2012, foi desenvolvida em Frankfurt pela empresa Opvius a primeira instalação de OPV ligada à rede. Possuía uma capacidade de cerca de 0,2 kW e tinha como o objetivos estudar as suas capacidades estáticas e mecânicas e analisar as suas características de operação e de estabilidade durante a geração de energia. Após 4 anos de operação, o sistema demonstrou obter resultados mais satisfatórios do que era esperado inicialmente [35].

A mesma empresa desenvolveu em 2015, numa cobertura do Edifício da African Union, em Addis Ababa na Etiópia, um sistema OPV com cerca de 1800 células semi-transparentes, em 450 módulos e ocupando cerca de 500 m^2 , permitindo alimentar o sistema de luzes LED do edifício [36].

A Heliatek, empresa que trabalha no R&D e comercialização das células solares orgânicas, instalou um sistema de produção de energia elétrica numa central de biogas de Bergheim-Paffendorf, na Alemanha, combinando assim 2 energias verdes. A instalação tem uma capacidade de 5,4 kWp e foi instalada verticalmente no perfil de aço da central, sem necessidade de ventilação ou suporte mecânico considerável, isto só foi possível dada a flexibilidade e leveza desta tecnologia [37].

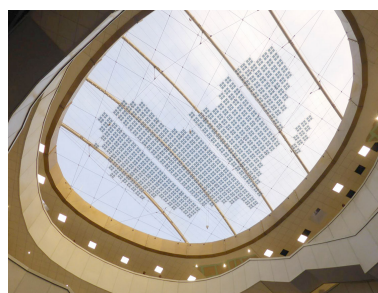
Em 2017, a Heliatek desenvolveu outro projeto piloto, criando a maior instalação BIOPV na cidade de La Rochelle, em França. Com capacidade de produção de 22,5kWp e ocupando cerca de 500 m^2 , sendo que cada tira de painel tinha 2, 4 e 5,7 metros. O sistema foi instalado por 6 pessoas e demorou cerca de 8 horas até estar concluído [38].

Todavia, as aplicações destas tecnologias não se extinguem por aqui, o mercado de veículos elétricos poderá tirar vantagem das características das células solares orgânicas, graças à sua variedade de cor, flexibilidade, adaptabilidade e resistência a temperaturas elevadas. Empresas como a Opvius, fazem referência ao mercado automóvel, sendo que esta em específico possui um caso de estudo, foram inseridas células solares orgânicas no deflector de vento de um camião, com intuito de limitar as descargas nas baterias do veículo, aumentando assim o seu tempo de vida [39].

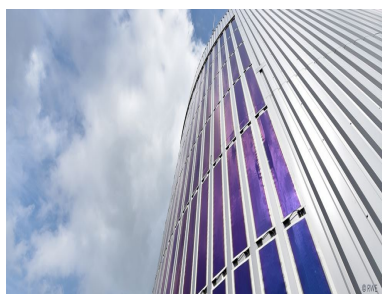
A empresa Heliatek está numa fase testes para o desenvolvimento de tejadilhos de veículos, de forma a proporcionar a ativação da ventilação (enquanto o carro está estacionado), melhorar a performance do ar-condicionado e reduzir os picos de perda de energia da bateria aumentando o seu tempo de vida útil. Futuramente, os carros elétricos poderão vir a ser totalmente revestidos de células orgânicas, protegendo o carro de radiação UV, produzindo energia, que proporciona um aumento da vida útil da bateria, e melhorando a autonomia dos veículos elétricos.



(a) Primeira instalação ligada à rede elétrica utilizando OPVs em Mainova, Frankfurt (2012).



(b) Instalação de OPVs no edifício da African Union, na Etiópia (2015).



(c) Instalação de OPVs numa central de biogás em Bergheim-Paffendorf, na Alemanha (2016).

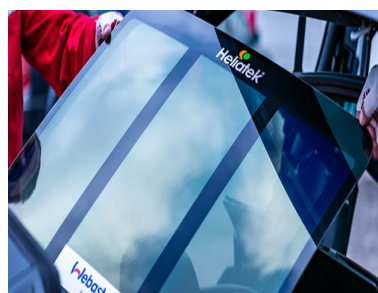


(d) Maior instalação de OPVs, na cidade de La Rochelle em França(2017).

Figura 4.8: Exemplos de aplicações de células solares orgânicas em edifícios e estruturas.



(a) Células solares orgânicas no defletor de vento de um camião [39].



(b) Tejadilho em teste para geração de energia através de OPVs[40].

Figura 4.9: Exemplo de projetos de desenvolvimento de células solares orgânicas em aplicação na indústria automóvel.

4.6 Vantagens e Desvantagens

As células solares contidas neste estudo, não podem ser analisadas com base num só parâmetro, se assim fosse o custo delas seria preponderante na sua escolha, posto isto, é apresentada nesta secção uma tabela que faz uma pequena síntese deste capítulo, permitindo assim uma análise mais concreta, das reais vantagens e desvantagens das células solares de silício e das células solares orgânicas.

É perceptível pela análise da tabela 4.2, que existem vários pontos favoráveis no que toca às células solares orgânicas, começando pela capacidade de adaptação a estruturas menos ortodoxas, passando pela facilidade de manutenção e substituição parcial e terminando na compatibilidade dos seus com-

		Células Solares	
		Orgânicas	Silício
Económico	Custo por Watt (€)	33,65	2,9
	Custo por m ²	546,45	236,92
	Investimento em R&D	Elevado Melhoria de performance Melhoria estabilidade	Baixo Tecnologia muito estudada
	Custo de aquisição	Grandes aplicações-Baixo Pequenas aplicações-Elevado	Reduzido para todas as aplicações
Produtivo	Tipo de produção	Pequeno laboratório	Fábricas metalúrgicas
	Método	Roll-to-Roll Rápido Baixas temperaturas	Método de Czochralski Demorado Altas temperaturas
	Energia despendida	Reduzida	Elevada
	Reciclagem	Fácil Por incineração Reciclagem de plásticos	Difícil Centro de reciclgem em França 78 milhões ton de painéis, 2050
Degradação	Fatores de degradação	Furos Riscos Delaminação Hot-spots	Amarelamento Delaminação Bolhas Fissuras Hot-spots
	Reparação	Fácil	Difícil, opta-se por substituição
	Substituição	Depende da área afetada Reprodução do mesmo material Montagem rápida	Custo de um painel de silício Montagem rápida Problemas de compatibilidade
	Vida útil	20-25 anos	25-30 anos
Aplicabilidade	Aplicações	Fachadas de habitações Instalações públicas Centros comerciais Indústria automóvel Aplicações offshore Eletrónica	Satélites Bombagem de águas Iluminação pública Telhados de habitações Telecomunicações Dessalinização de água Monitorização do tempo
	Montagem	Rápida Fácil manuseamento	Demorada Manuseamento pouco prático
	Implementação	Fácil	Fácil

Tabela 4.2: Tabela de síntese.

ponentes no momento em que existe uma avaria (em qualquer que seja a secção da instalação). No entanto, o preço de um painel orgânico, para uma instalação que requeira um determinada potência, ainda não é capaz de competir com uma tecnologia bem estudada, como é o caso da tecnologia das células solares de silício. Estando todo o planeta bastante atento à ação da pegada ecológica, criada nos dias de hoje, e na repercussão que a geração de energia atual poderá ter nas gerações futuras, e sendo sabido que em 2050 existirão cerca de 78 milhões de toneladas de painéis de silício, que necessitarão de ser reciclados e que para isso será necessária a construção de infraestruturas capazes de fazer esta reciclagem, as células solares orgânicas poderão ser uma alternativa real, dado que podem ser recicladas da mesma forma que qualquer plástico, permitindo assim usar infraestruturas já existentes. Desta forma, não só o processo produtivo de uma célula solar de silício tem um peso significativo no custo de fabrico, como poderá ter algum impacto negativo no meio ambiente.

Finalmente, as maiores vantagens das células solares de silício mono-cristalino prendem-se com o custo de aquisição, dada a atual produção em massa existente, dada a sua capacidade de conversão de energia, que é bastante mais elevada que a das células solares orgânicas, e dados todos os estudos já feitos sobre esta tecnologia, que poderão permitir uma evolução ainda maior nas suas capacidades elétricas. Todavia, as células solares orgânicas estão a ser objeto de estudo de uma forma cada vez mais intensiva, graças às suas características únicas, isto poderá querer dizer que dentro de poucos anos observar-se-á uma massificação desta tecnologia, fazendo com que mais empresas entrem na sua comercialização e levando a uma redução do preço por Watt para o cliente final.

Capítulo 5

Conclusões

A busca por componentes eletrónicos ecologicamente sustentáveis e com um papel ativo na geração de energia veio trazer a possibilidade de descobrir novos métodos de fabrico, novos materiais e uma nova forma de olhar para todas as potencialidades que a natureza nos oferece. Este novo olhar sobre tecnologias renováveis seria visto há meio século atrás como uma excentricidade, face a soluções que permitiriam tirar melhor proveito do fim para que foram construídos. Contudo, e felizmente, a realidade atual mostrou-nos um cenário bem diferente.

A presente dissertação teve como base de estudo as células solares orgânicas, tendo em conta o facto de estarem associadas a uma tecnologia de fabrico emergente com grandes potencialidades, aliada a uma forte componente ecológica e com grande capacidade de produção em massa. Foi objetivo fundamental deste trabalho uma análise comparativa entre estas células e as células convencionais de silício monocristalino numa base que teve em conta o binómio custo - rendimento energético.

O estudo efetuado tem uma componente experimental e outra de simulação numérica tendo em conta a informação fornecida pelos fabricantes ou aquela associada a uma colheita de dados sobre clima e radiação proveniente de estações meteorológicas. As fontes de energia são de facto fortemente dependentes das condições ambientais e meteorológicas do local de instalação, que são muitas das vezes circunstanciais. O facto dos resultados obtidos serem função de um elevado número de variáveis, que na maioria das vezes interagem entre si, torna o estudo complexo e a análise dos resultados não determinística. Os desempenhos dos dois tipos de células são bastante distintos. Em termos quantitativos as células solares convencionais de silício monocristalino apresentam valores coletados de energia superiores aos associados às células orgânicas.

Para os caso de células de silício monocristalino, as características estacionárias de potência-tensão apresentam diversos máximos relativos na presença de sombreamentos associados a condições adversas de radiação. O mesmo não acontece com as células orgânicas que nas mesmas situações têm características $P(U)$ com apenas um máximo. A diversidade de picos de potência no caso das células de silício torna a busca do ponto de potência máxima (Maximum Power Point Tracking, MPPT) mais complexo: quer nas ferramentas de simulação numérica numa análise teórica, quer nos processos de controlo mecânico de rastreio em painéis solares não estacionários. As características mecânicas das

células orgânicas representa uma mais-valia que está associada a uma grande facilidade de moldagem a ambientes muito diversos, como é, por exemplo, a utilização de células orgânicas em meios aquáticos. Através da simulação da imersão do painel em água, os estudos efetuados permitiram concluir que o painel orgânico é bastante sensível a mudanças de temperatura, melhorando o seu desempenho à medida que a temperatura da célula se reduz com a introdução de um meio líquido mais frio. Os resultados obtidos mostram que a temperatura de funcionamento ideal das células solares orgânicas está compreendida entre os 15-40°C, obtendo-se uma perda de potência de 0,5% por cada grau Celsius acima dos 40°C.

Outro fator que influencia o rendimento do painel está relacionado com a capacidade refrativa do meio líquido, obtendo-se os melhores resultados para uma profundidade de 0,64cm de água. Ao simular o funcionamento num meio quase real, com a inserção de partículas suspensas, verificou-se uma diminuição no rendimento energético de aproximadamente 18% no ponto de funcionamento máximo (Maximum Power Point, MPP).

A análise das amostras das células solares orgânicas permitiu concluir também que existem várias combinações possíveis de elementos orgânicos em termos quantitativos, numa situação muito semelhante à criada pela dopagem com Boro e Fósforo das camadas p e n das células solares de silício monocristalino.

Ao aferir a influência da radiação IV nas células solares orgânicas das amostras, verificou-se uma variação diferenciada dos parâmetros elétricos para cada uma das células utilizadas, o que permite concluir que a estrutura das células solares orgânicas tem uma relação muito estreita com o seu funcionamento em ambientes reais. Para analisar o comportamento do painel orgânico no ponto de funcionamento máximo, quando exposto à radiação solar, foram efetuadas 7 medições por dia (das 8 às 20 horas) durante 31 dias. Qualitativamente, os resultados obtidos foram os esperados, embora quantitativamente os resultados obtidos para os valores de pico de potência estivessem um pouco aquém dos 5 W, de acordo com os dados cedidos pelo fabricante, sugerindo condições reais muito distintas das condições de teste.

Relativamente à tecnologia de fabrico, pode concluir-se que a tecnologia Roll-to-Roll representa um método bastante adequado e eficaz, tendo em conta a versatilidade, rapidez e qualidade de reprodução de painéis de células orgânicas. No entanto, serão necessários mais projetos para que se possa comprovar efetivamente todas as potencialidades desta tecnologia. Pode, no entanto, assinalar-se como ponto a favor das células orgânicas o facto de requererem tecnologias menos dispendiosas a nível energético e mais inovadoras. As células solares orgânicas estão ainda numa fase embrionária do desenvolvimento e da sua comercialização. Seguramente, na sua história muita coisa ainda está para ser contada.

5.1 Trabalho Futuro

Este trabalho foi realizado com base em células solares orgânicas da empresa InfinityPV. Serão necessários estudos relativos a outras células orgânicas, com outros compostos e desenvolvidos por outras empresas para que se possa analisar mais aprofundadamente todas as suas potencialidades. Esta tecnologia está, ainda, numa fase inicial do seu desenvolvimento, sendo necessário melhorar a seu rendimento, resistência a fenómenos atmosféricos adversos e estabilidade em termos de degradação dos seus compostos. Se assim acontecer, poderá vir a ser uma tecnologia com capacidade competitiva em relação aos módulos de conversão de energia fotovoltaica existentes atualmente. Aumentando a concorrência na venda de células solares orgânicas, com a criação de novas empresas de desenvolvimento desta tecnologia, existirá uma natural redução do custo de venda ao público, provocando assim uma comercialização em larga escala. Contudo, isto só será possível se os desempenhos das células solares orgânicas melhorarem significativamente.

Bibliografia

- [1] X. Che, Y. Li, Y. Qu, and S. R. Forrest. High fabrication yield organic tandem photovoltaics combining vacuum- and solution- processed subcells with 15% efficiency. *Nature Energy*, 3:422–427, May 2018. DOI:10.1038/s41560-018-0134-z.
- [2] N. Yeh and P. Yeh. Organic solar cells: Their developments and potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21(428):421–431, Feb. 2013. DOI:10.1016/j.rser.2012.12.046.
- [3] A. W. Copeland, O. D. Black, and A. B. Garrett. The photovoltaic effect. *Chemical Reviews*, 1: 177–226, June 1942. DOI: 10.1021/cr60098a004.
- [4] P. P. Kumavat, P. Sonar, and D. S. Dalal. An overview on basics of organic and dye sensitized solar cells, their mechanism and recent improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (26):1262–1287, May 2017. DOI:10.1016/j.rser.2017.05.011.
- [5] M. M. Rhaman and M. A. Matin. Organic solar cells: Historical developments and challenges. *Proceedings of 2015 3rd International Conference on Advances in Electrical Engineering*, 16(7): 2016–2023, Oct. 2015. DOI:10.1002/adfm.200600489.
- [6] P. Kumar. *Organic Solar Cells: Device Physics, Processing, Degradation, and Prevention*. CRC Press Taylor and Francis Group, 2017. ISBN:978-1-4987-2327-5.
- [7] V. Shrotriya, G. Li, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, and Y. Yang. Accurate measurement and characterization of organic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 16(7):2016–2023, Oct. 2006. DOI:10.1002/adfm.200600489.
- [8] E. Verploegen and M. Toney. Effects of thermal annealing on the morphology of polymer–fullerene blends for organic solar cells. *Science Highlight*, jan 2011.
- [9] H. Tang, S. He, and C. Peng. A short progress report on high-efficiency perovskite solar cells. *Nanoscale Research Letters*, 12(410), 2017. DOI: 10.1186/s11671-017-2187-5.
- [10] H.-S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im, K.-B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, J.-H. Yum, J. E. Moser, M. Gratzel, and N.-G. Park. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Scientific Reports*, 2(591): 7, August 2012. DOI: 10.1038/srep00591.

- [11] C. W. Tang. Two-layer organic photovoltaic cell. *America Institute of Physics*, 48(183), 1986. DOI: 10.1063/1.96937.
- [12] J. Xue, B. P. Rand, S. Uchida, and S. R. Forrest. A hybrid planar-mixed molecular heterojunction photovoltaic cell. *Advanced Materials*, 17(5):66–71, 2005. DOI:10.1002/adma.200400617.
- [13] Y. Liu, J. Zhao, Z. Li, C. Mu, W. Ma, H. Hu, K. Jiang, H. Lin, H. Ade, and H. Yan. Aggregation and morphology control enables multiple cases of high-efficiency polymer solar cells. *Nature Communications*, Nov 2014. DOI: 10.1038/ncomms6293.
- [14] J. Rostalski and D. Meissner. Monochromatic versus solar efficiencies of organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61(8):87–95, 2000. DOI:10.1016/S0927-0248(99)00099-9.
- [15] *Energia Fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projecto e instalação*, 2004.
- [16] Modeling solar radiation. <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>, 2018.
- [17] W. Tress. *Organic Solar Cells: Theory, Experiment, and Device Simulation*, volume 208 of 856. Springer International Publishing Switzerland, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10097-5-11.
- [18] Spectral irradiance. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/spectral-irradiance>, 2018. Acesso: 2018-08-30.
- [19] Infinitypv foil. <https://infinitypv.com/products/opv/foil>, 2018. Acesso: 2018-07-20.
- [20] *The Power Collector*. Solarus, Nobelvägen 2, Gävle.
- [21] V. Singh. Degradation of fill factor in p3ht:pcbm based organic solar cells. *Current Applied Physics*, August 2017. Doi:10.1016/j.cap.2017.08.010.
- [22] B. Qi and J. Wang. Fill factor in organic solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(23): 8972, April 2013. Doi:10.1039/C3CP51383A.
- [23] Meteo técnico. <https://meteo.tecnico.ulisboa.pt>, 2018.
- [24] Helioclim-3 real time and forecast + meteo data. <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-real-time-and-forecast>, 2018.
- [25] P. Frankl, S. Mowak, et al. Solar photovoltaic energy. Technology roadmap, International Energy Agency, October 2010.
- [26] World record of 13,2% opv cell efficiency. <https://www.heliatek.com/en/solar-films/technology>, 2018. Acesso: 2018-08-30.
- [27] Raynergy tek sets world record solution processed single junction opv pce 11.51% using halogen-free ink formulation. <http://www.raynergytek.com/news.asp>, 2018. Acesso: 2018-08-29.

- [28] M. Hösel, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, and F. C. Krebs. Fast inline roll-to-roll printing for indium-tin-oxide-free polymer solar cells using automatic registration. *Energy Technology*, 1(5): 102–107, 2013. DOI: 10.1002/ente.201200029.
- [29] F. C. Krebs, N. Espinosa, M. Hösel, R. R. Søndergaard, and M. Jørgensen. 25th anniversary article: Rise to power - opv-based solar parks. *Advanced Materials*, 1:1–11, 2013. DOI: 10.1002/adma.201302031.
- [30] P. Siffert and E. F. Krimmel. *Silicon Evolution and Future of a Technology*. Springer, 2nd edition, 2003. ISBN: 978-3-642-07356-4.
- [31] A. Ciftja, T. A. Engh, and M. Tangstad. Refining and recycling of silicon: A review. *Norwegian University of Science and Technology*, February 2008.
- [32] B. Haave. N-type czochralski silicon ingots : Oxygen-related defects in the last solid fraction. Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, June 2016.
- [33] M. Hösel, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, , and F. C. Krebs. Failure modes and fast repair procedures in high voltage organic solar cell installations. *Materials Views*, 2014. DOI: 10.1002/aenm.201301625.
- [34] M. Munoz, M. Alonso-Garcia, N. Vela, and F. Chenlo. Early degradation of silicon pv modules and guaranty conditions. *Solar Energy*, 85:2264–2274, 2011. DOI: 10.1016/j.solener.2011.06.011.
- [35] Opv sail in shape of african continent, african union peace and security building in addis ababa. <http://www.opvius.com/energy-generating-shade-sail-in-shape-of-african-continent.html>, 2015.
- [36] Grid-connected opv system, mainova ag in frankfurt, germany. <http://www.opvius.com/grid-connected-opv-system.html>, 2012.
- [37] First time installation of organic solar film on biogas plant with innogy. <https://www.heliatek.com/en/applications/pilot-projects>, 2016.
- [38] Worlds largest biopv installation with heliasol in la rochelle, france. <https://www.heliatek.com/en/applications/pilot-projects>, 2017.
- [39] Opv enforced wind deflector for truck, jmk logistik gmbh, germany. <http://www.opvius.com/opv-wind-deflector-for-trucks-288.html>, 2018.
- [40] Automotive. <https://www.heliatek.com/en/applications/automotive>, 2018.

Apêndice A

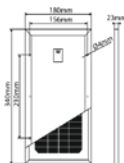
Informações Técnicas

A.1 Informações técnicas do painel de silício mono-cristalino de 5W

5W - 21,2V - Monocristallino



Dimensioni



Articolo	Potenza	Tensione Voc	Corrente Isc	EAN Code
----------	---------	--------------	--------------	----------

MM005-12/1	5Wp	21.2V	0.3A	
------------	-----	-------	------	--

Confezione: Scatola da 1pz., Imballo: Scatola da 10 scatole

Caratteristiche Elettriche

Tensione operativa (Vmp): 16.8V
 Corrente operativa (Imp): 0.28A
 Efficienza modulo: 8.2%
 Tolleranza di potenza: $\pm 3\%$

Caratteristiche meccaniche

Tipo pannello: con cornice
 Cornice: alluminio anodizzato
 Parte frontale: vetro
 Spessore vetro: 3.2mm
 Incapsulamento: EVA
 Lato posteriore: TPT
 Scatola di giunzione: IP65
 Larghezza: 180mm
 Lunghezza: 340mm
 Spessore: 23mm
 Peso: 0.8Kg

Celle

Tipo cella: Mono
 Numero di celle: 36
 Dimensioni cella: 62.5 x 25mm

Caratteristiche massime

Classe: A
 Classe di resistenza al fuoco: C
 Corrente sovraccarico max: 1A
 Temp. operativa: -40 / 85°C
 Temp. Immagazzinamento: -40 / 85°C
 Capacità di carico: 2400Pa
 Diametro di resistenza: 25mm (80Km/h)
 I parametri elettrici si riferisco a condizioni standard di irraggiamento:
 Irr 1000W/mq, AM 1,5, temperatura 25 °C

Cavi di collegamento non inclusi.