

# MÓDULO FOTOVOLTAICO ATIVADO POR POLÍMEROS CONDUTORES

**Anthony Sérgio Martins Sanches**

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla Diplomação entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e o Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Trabalho orientado por:

Prof. Dr. Luis Manuel Frólén Ribeiro

Prof. Dr. Rolando Carlos Pereira Simões Dias

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

Bragança - Portugal

2020

*Dedico esta tese especialmente à minha família que me apoiou em todos os momentos, me ensinando a nunca desistir dos meus objetivos, sempre com honra, dignidade e fé.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus acima de tudo, que me abençoou dando forças, saúde e guiou-me até aqui para realização de um sonho;

À minha família que sempre esta orando por mim, sendo um alicerce, aos meus heróis Sérgio e Giselda Sanches que nunca me deixaram faltar nada, a servir de exemplo de dignidade, humildade, sabedoria, persistência e amor. A minha adorável e amorosa irmã Giovanna Hadassa que nos momentos difíceis tinha uma palavra de carinho, Amo muito vocês;

Ao meu orientador Prof.Dr. Luis Frólén Ribeiro pela oportunidade, paciência e atenção que teve comigo, me direcionando, orientando sempre com pulso firme, dedicação, obrigado por todos os ensinamentos. Ao co-orientador Prof.Dr. Rolando Carlos Pereira Simões Dias que em todos os momentos que precisei estava lá me ensinando e motivando. Ao co-orientador Prof.Dr. Paulo Fritzen mesmo em suas férias me ajudou muito me dando um norte;

Também queria deixar um especial agradecimento ao Eng. Jorge Santos por toda ajuda prestada no laboratório FABLAB no IPB;

Ao Instituto Politécnico de Bragança que cedeu espaços e materiais para que esse projeto fosse construído, e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba pela oportunidade de participar do Programa de Dupla Diplomação;

Ao meu amigo Cleber Dallegrave muito obrigado pela ajuda provida com seus conhecimentos no decorrer desta dissertação;

E por ultimo não menos importante à minha avó Marta Martins (*in memoriam*) que me viu partir para realização de um sonho e abençoou a minha vinda para Portugal.

*“Tudo posso naquele que me fortalece.”*

*(Filipenses 4:13 )*

# Resumo

SANCHES, Anthony Sérgio Martins. **MÓDULO FOTOVOLTAICO ATIVADO POR POLÍMEROS CONDUTORES**. Tese de Mestrado - Programa de Dupla Diplomação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Instituto Politécnico de Bragança, 2020.

Esta dissertação consiste no projeto de industrialização de painéis fotovoltaico com células solares sensibilizadas por polímeros condutores PEDOT:PSS.

Procedeu-se também à caracterização dos materiais utilizados na construção do módulo fotovoltaico, e dois desenhos técnicos compõe o projeto. A atribuir o método de corte utilizado no acrílico, material escolhido para construção do módulo fotovoltaico. Foram feitos estudos da melhor forma para interligar as células sem prejudicar a composição da mesma. O primeiro estudo concluído sem a viabilidade, pois utilizamos fita adesiva de cobre. Porém não havia condução elétrica entre as células. O segundo estudo concluído com sucesso obteve a necessidade de soldadura para interligar as células.

Neste trabalho são também apresentadas, a modelação no Simulink e as curvas características J-V e curvas P-V do módulo fotovoltaico com células solares desenvolvidas com polímero condutor PEDOT:PSS. E através dos resultados simulados das curvas características, concluímos que o módulo sofre o efeito chamado de "mismatch"(descasamento). Devido a incompatibilidade de características de cada célula. E no nosso caso, a célula com a menor fotocorrente limita o desempenho das demais.

**Palavras-chave:** Módulo fotovoltaico; célula solar sensibilizada por corante; polímeros condutores; PEDOT:PSS.

# Abstract

SANCHES, Anthony Sérgio Martins. **PHOTOVOLTAIC MODULE ACTIVATED BY CONDUCTIVE POLYMERS**. Tese de Mestrado - Programa de Dupla Diplomação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Instituto Politécnico de Bragança, 2020.

This dissertation consists of the industrialization project of photovoltaic panels with solar cells sensitized by conductive polymers PEDOT: PSS. The materials used in the construction of the photovoltaic module were also characterized, and two technical drawings make up the project. To assign the cutting method used in acrylic, the material chosen for the construction of the photovoltaic module. Studies were done in the best way to interconnect the cells without harming the composition of the same. The first study concluded without feasibility, as we used copper adhesive tape. However, there was no electrical conduction between the cells. The second study completed successfully found the need for welding to connect the cells. In this work, the modeling in Simulink and the characteristic curves J-V and P-V curves of the photovoltaic module with solar cells developed with PEDOT: PSS conducting polymer are also presented. And through the simulated results of the characteristic curves, we conclude that the module suffers the effect called "mismatch". Due to the incompatibility of characteristics of each cell. And in our case, the cell with the lowest photocurrent limits the performance of the others.

**Keywords:** Photovoltaic module; dye-sensitized solar cell; conductive polymers; PEDOT:PSS.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.2	Estrutura do Documento . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>3</b>
2.1	Contexto . . . . .	3
2.2	Energias Renováveis . . . . .	4
2.2.1	Energia Solar Fotovoltaica . . . . .	4
2.3	Características das células fotovoltaicas . . . . .	6
2.3.1	1ª Geração . . . . .	6
2.3.2	2ª Geração . . . . .	6
2.3.3	3ª Geração . . . . .	8
2.4	Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica . . . . .	9
2.4.1	Efeito Fotoelétrico . . . . .	9
2.4.2	Tipos de Associações . . . . .	10
2.5	Sombreamento em módulo fotovoltaico . . . . .	11
2.6	Diodo de desvio (by-pass) . . . . .	11
2.7	Curva $I$ - $V$ ou curva característica de uma célula solar . . . . .	12
2.8	Polímeros . . . . .	16
2.8.1	Polímeros Condutores . . . . .	16
2.8.2	Polímero PEDOT . . . . .	17

<b>3</b>	<b> Materiais e Métodos Experimentais</b>	<b>18</b>
3.1	Células DSSC - PEDOT:PSS . . . . .	18
3.1.1	Dimensões das células DSSC . . . . .	19
3.1.2	Materiais utilizados para o fabrico das células . . . . .	21
3.2	Materiais utilizados para o fabrico do módulo fotovoltaico . . . . .	21
3.2.1	Características do Acrílico . . . . .	21
3.3	Método de fabrico do módulo fotovoltaico para as células DSSC . . . . .	22
3.3.1	Materiais utilizados na ligação das células DSSCs . . . . .	26
3.4	Método utilizado nas ligações das células DSSCs . . . . .	28
<b>4</b>	<b> Resultados e Discussões</b>	<b>29</b>
4.1	Características das Células DSSC . . . . .	29
4.2	Desenhos técnicos . . . . .	30
4.3	Chapa anterior . . . . .	33
4.4	Chapa posterior . . . . .	34
4.5	Instalação das células DSSCs no Acrílico . . . . .	35
4.6	Ligação das células DSSCs . . . . .	36
4.6.1	Método adotado para soldadura das células . . . . .	36
4.7	Modelação no Simulink . . . . .	38
4.7.1	Utilização de cada elemento no Simulink . . . . .	39
4.7.2	Levantamento da curva característica do módulo DSSC . . . . .	41
4.8	Discussões . . . . .	42
4.8.1	Dificuldades experimentais . . . . .	42
4.8.2	Substituição da fita . . . . .	43
4.8.3	Onde se foi além dos objetivos iniciais? . . . . .	43
<b>5</b>	<b> Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusão . . . . .	45
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	46



# Lista de Tabelas

3.1	Nomenclatura e Peso de cada célula. . . . .	20
4.1	Dados laboratoriais das Células [36] . . . . .	30

# Lista de Figuras

2.1	Processo de agrupamento: Célula - Módulo - Painel [7]. . . . .	5
2.2	Célula fotovoltaica de silício cristalizado [8]. . . . .	6
2.3	Célula fotovoltaica de filmes finos [11]. . . . .	7
2.4	Célula fotovoltaica sensibilizada por corante [14]. . . . .	8
2.5	Representação esquemática do efeito fotoelétrico [16]. . . . .	9
2.6	Representação esquemática do sombreamento e ativação do diodo bypass [18] . . . . .	11
2.7	Circuito equivalente de uma célula solar fotovoltaica [1] . . . . .	13
2.8	Curva característica I-V de uma célula ideal, e a potência produzida pela mesma célula [22] . . . . .	15
3.1	Célula DSSC - PEDOT:PSS . . . . .	19
3.2	Identificação da célula . . . . .	19
3.3	Projeções das dimensões das células em mm . . . . .	20
3.4	Identificação da posição da célula . . . . .	23
3.5	(a),(b),(c),(d) estudos de possíveis disposições . . . . .	23
3.6	Disposição final das células com linhas desenhadas representando o cátodo. . . . .	24
3.7	Representação da chapa anterior do módulo fotovoltaico em mm. . . . .	25
3.8	Representação da parte posterior de sustentação do módulo fotovoltaico em mm. . . . .	25
3.9	Cortadora laser - PORT LASER X252. . . . .	26

3.10	(a)Fita adesiva de Cobre, (b)Fio condutor de Cobre [46], (c)Ferro de soldar, (d)Cola condutora adesiva de prata, (e) Estanho para solda . . . . .	27
3.11	Modelo de células DSSC ligadas em série . . . . .	28
3.12	Célula DSSC com ponto ativo para cima. . . . .	28
4.1	(a)Desenho 3D da chapa anterior. (b)Chapa anterior de acrílico com es- pessura de 5 mm em fase final. . . . .	33
4.2	(a)Desenho 3D da chapa posterior. (b)Chapa de acrílico com espessura de 3 mm da parte posterior do módulo em fase final. . . . .	34
4.3	Instalação das Células na base de acrílico. . . . .	35
4.4	Células DSSCs interligadas através de soldadura. . . . .	36
4.5	Soldadura do fio condutor de cobre na superfície anódica da célula DSSC. . . . .	37
4.6	Soldadura do fio condutor de cobre nas células DSSCs em série. . . . .	37
4.7	Modelação através do Simulink. . . . .	38
4.8	Representação de cada elemento utilizado na modelação através do Simulink. . . . .	39
4.9	Curva $J_{sc}$ - V em vermelho, em azul a curva P - V. . . . .	41
4.10	Dados das curvas características. . . . .	42
4.11	Células DSSCs interligadas com fita adesiva de cobre. . . . .	42
4.12	Má aderência da fita adesiva de cobre. . . . .	43
4.13	(a)Células antigas (b)Avaria na célula devido ao manuseio . . . . .	44

# Siglas

**a-Si** *Amorphous Silicon* (Silício Amorfo). 6

**AM** *Air Mass* (Massa de Ar). 13

**CdTe** Telureto de Cádmio. 7

**CIGS** Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio. 7

**CIS** Disseleneto de Cobre e Índio. 7

**CPV** *Concentrated Photovoltaics* (Fotovoltaica com Concentração). 8

**DSSC** *Dye-Sensitized Solar Cell* (Célula Solar Sensibilizada por Corante). 8

**EDOT** monômero (3,4-etileno dioxitiofeno). 18

**FTO** *Fluorine doped Tin Oxide* (Óxido de Estanho dopado com flúor). 21

**GWh** gigawatt-hora. 4

**IPB** Instituto Politécnico de Bragança. 26

**m-Si** *Mono-crystalline Silicon* (Silício Monocristalino). 6

**OPV** *Organic Photovoltaics* (Fotovoltaica Orgânica). 8

**p-Si** *Poli-crystalline Silicon* (Silício Policristalino ou Multicristalino). 6

**PEDOT** Poli (3,4-etileno dioxitiofeno). 17

**PEDOT:PSS** (Poli (3,4-etilenodioxitiofeno)): Poli (4- ácido estirenosulfônico).. 18

**PSS** Solução de Poli (ácido 4-estirenosulfônico). 18

**STC** *Standard Test Conditions (Condições Padrão de Teste)*. 13

# Capítulo 1

## Introdução

Esta tese relata a construção de um módulo fotovoltaico com células sensibilizadas por polímeros condutores visando a sua industrialização. A motivação é construir um modulo mais acessível para todos, e contribuir para poder reduzir o impacto ambiental.

Este capítulo pretende contextualizar a construção de um módulo fotovoltaico ativado por polímeros condutores, explicar os objetivos deste trabalho e também apresentar sua estrutura.

## 1.1 Objetivos

Este projeto teve como objetivo a construção de um módulo fotovoltaico a utilizar células ativadas por polímeros condutores. Será realizado do modo mais simples e barato possível, para que sua aquisição seja a mais acessível.

## 1.2 Estrutura do Documento

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - São apresentados os objetivos propostos para este trabalho e a estrutura do documento.
- Capítulo 2 - Nesse capítulo é descrito a fundamentação teórica relacionada a essa dissertação. Nela é apresentada uma revisão sobre energias renováveis, tipo de células fotovoltaicas e suas associações, a função de um diodo num painel solar, a Curva I-V e os aspectos básicos sobre polímeros condutores e o polímero utilizado na célula.
- Capítulo 3 - Este capítulo apresenta os materiais que foram empregados para a realização do presente estudo e as metodologias experimentais, a instrumentação e o software utilizado.
- Capítulo 4 - São apresentadas as características das células sensibilizadas por polímeros condutores PEDOT:PSS, a análise, testes e discussão dos dados obtidos com base nas teorias apresentadas no Capítulo 2. São apresentados os desenhos técnicos do módulo, os resultados obtidos do corte na placa de acrílico assim como o encaixe das células no modulo. É apresentado também os resultados das ligações das células, assim como a simulação e a curva característica. E por fim uma discussão dos fatores cabíveis ao projeto.
- Capítulo 5 - São apresentadas as conclusões gerais e trabalhos futuros

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1 Contexto

Por muitos anos os recursos naturais do planeta foram usados pela humanidade para suprir a necessidade energética, e uma das alternativas energéticas necessárias ao desenvolvimento humano mais promissora para prover energia é o aproveitamento da energia gerada pelo Sol. O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. Em outras palavras, as fontes de energia são em última instância derivadas, em sua maioria da energia do Sol. A evaporação se dá a partir da energia do Sol, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). Os ventos são causados pela radiação solar que induz a circulação atmosférica em larga escala. Por sua vez a energia eólica é uma forma indireta de manifestação da energia solar, já que os ventos se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética, em função de um balanço diferenciado nas diferentes latitudes entre a radiação solar incidente e a radiação terrestre emitida [1].

O cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel com seus 19 anos, em 1839 realizou a primeira publicação do efeito fotovoltaico (energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade). Observou a diferença de potencial entre os eletrodos imersos em uma solução ácida diluída ao ilumina-la, possivelmente enquanto trabalhava

com seu pai, o físico Antoine César. William Grylls Adams e Richard Evans Day notaram um efeito parecido num dispositivo de estado sólido. Descobriram em 1876 que iluminar uma junção entre selênio e platina origina um efeito fotovoltaico. Notando assim que a moderna célula solar poderia produzir eletricidade a partir da luz sem partes móveis [2].

## 2.2 Energias Renováveis

Vivenciamos ciclos naturais, e as energias renováveis não são diferentes. A energia dos mares que é formada através da movimentação e gravitação do planeta. A energia geotérmica proveniente do calor armazenado e libertada pela Terra. E em particular abordada aqui a radiação irradiada pelo Sol. E essas diferentes formas de fluxos de energia que ocorre na natureza [3].

### 2.2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica está se tornando cada vez mais importante no nosso dia-a-dia, e suas tecnologias vem evoluindo com o passar do tempo. É uma tecnologia que usa propriedades exclusivas de certos semicondutores para converter diretamente a radiação solar em eletricidade [4]. Em Portugal a produção bruta de energia elétrica renovável através de energia solar fotovoltaica era de 1 gigawatt-hora (GWh) em 1995, já em 2019 foram produzidos 1.342 GWh. Pequeno aumento de 34% em 24 anos [5].

Um sistema fotovoltaico possui normalmente células fotovoltaicas<sup>1</sup> conhecidas também como células solares. As combinações das células interligadas eletricamente em arranjos maiores denomina-se um módulo fotovoltaico<sup>2</sup>. E a associação de vários módulos denomina-se um painel fotovoltaico representado na Figura 2.1 [1].

---

<sup>1</sup>Dispositivo elétrico capaz de converter a luz proveniente do sol diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico [6].

<sup>2</sup>Menor unidade de geração fotovoltaica, composto por células fotovoltaicas associadas para gerar tensão e corrente elétrica [6].

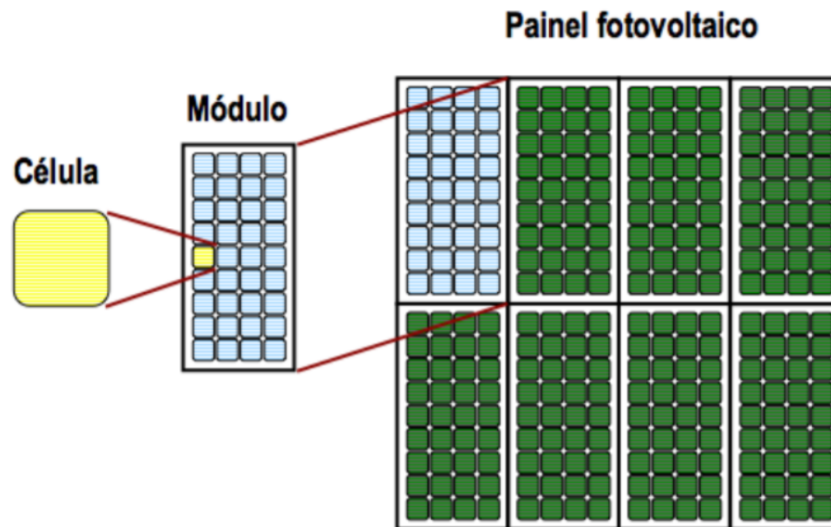


Figura 2.1: Processo de agrupamento: Célula - Módulo - Painel [7].

## Vantagens

Existem varias vantagens e benefícios que agregam valores aos sistemas fotovoltaicos. A energia fornecida por um sistema fotovoltaico é uma tecnologia ecológica, produz energia sem ruído ou poluição. Considerado pela grande maioria como a declaração sobre a proteção do meio ambiente à uma ação de produção de energia limpa "verde". A facilidade na manutenção, na limpeza é um atrativo nos dias de hoje e sua utilização protege contra futuros aumentos da taxa de energia oferecendo independência energética [4].

## Desvantagens

Atualmente a questão que mais se destaca em desvantagem é o alto custo que limitam o seu uso. Para obter uma quantidade significativa de energia exige-se uma área de instalação relativamente grande, com radiação solar disponível no local [4].

## 2.3 Características das células fotovoltaicas

A menor unidade de transformação de energia elétrica por fonte solar é uma célula fotovoltaica. Com diversas características, variando entre a técnica de fabrico empregada e material utilizado. As propriedades geométricas e estruturais interferem consideravelmente no seu funcionamento. Até ao presente momento, há três gerações de tecnologia na produção das células e conseqüentemente também dos módulos.

### 2.3.1 1ª Geração

As células de silício são divididas em dois grupos: *Mono-crystalline Silicon* (Silício Monocristalino) (m-Si) e *Poli-crystalline Silicon* (Silício Policristalino ou Multicristalino) (p-Si), fazem parte da primeira geração, representado na Figura 2.2. O seu processo de produção necessita de uma elevada quantidade de energia para obtenção do grau de pureza mais elevados. As células da 1ª geração tem representatividade de mercado mais de 85%, tendo em vista a garantia de sua solidez, confiança, melhor eficiência, com relação as células de segunda e terceira geração [1].

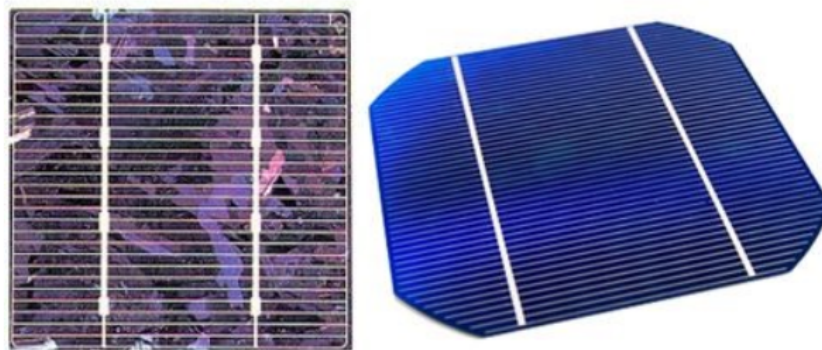


Figura 2.2: Célula fotovoltaica de silício cristalizado [8].

### 2.3.2 2ª Geração

Como vimos na primeira geração das células, dividem-se em dois grupos. Na segunda geração são três cadeias produtivas baseada em filmes (película) finos inorgânicos: *Amorphous*

*Silicon* (Silício Amorfo) (a-Si), Telureto de Cádmiu (CdTe) e Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) ou Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS). Essa geração tem uma pequena participação de mercado, apresentando menor eficiência, pouca disponibilidade dos materiais e toxicidade pois utiliza cádmio<sup>3</sup>. Em relação ao efeito de sombreamento e às variações de temperatura, estas células são mais resistentes [10]. Nos anos 90 as células fotovoltaica de película fina, Figura 2.3, surgiram como uma alternativa de baratear os custos dos módulos fotovoltaicos.

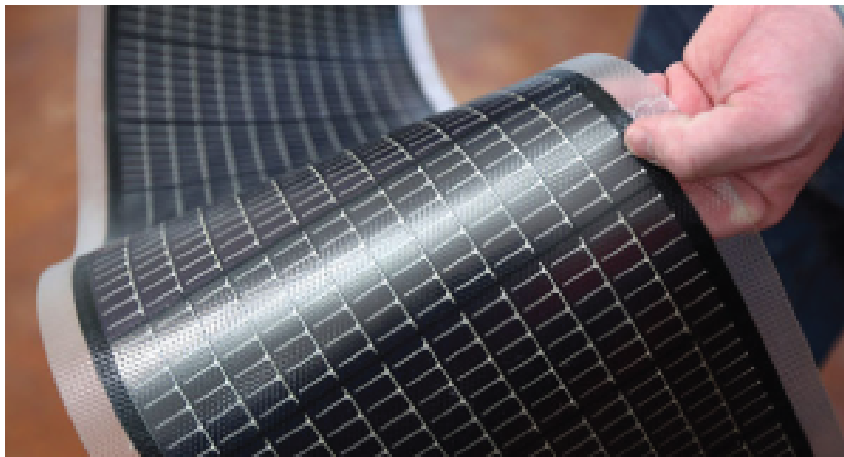


Figura 2.3: Célula fotovoltaica de filmes finos [11].

## Vantagens

Em relação a 1<sup>a</sup> geração, as células de película fina na sua fabricação utilizam muito menos energia e matéria prima. A sua construção é feita em camadas muito finas, em torno de 0,001mm, para conversão da radiação solar sendo elas transparentes e flexíveis [1].

## Desvantagens

Menor eficiência, durabilidade em torno de 10 anos em relação as células de silício cristalizado, que por sua vez são em torno de 20 anos dependendo do fabricante [1].

---

<sup>3</sup>metal de número atômico 48 na tabela periódica, de cor branca azulada, dúctil, maleável, pesado, com efeitos tóxicos nos organismos vivos, mesmo em poucas concentrações e sendo pouco abundante na crosta terrestre [9].

### 2.3.3 3ª Geração

Em fase de pesquisa e desenvolvimento, a terceira geração de células fotovoltaicas representada na Figura 2.4 tem uma pequena escala de produção em relação as outras. Porém tem atraído a atenção desde o surgimento em 1991 quando o professor suíço Michael Gratzel e sua equipa apresentaram as células fotovoltaicas orgânicas, também chamadas de "Células Gratzel"[12]. Permitem uma utilização mais eficiente da luz solar, constituída principalmente por corante, semicondutor orgânico o qual é o fator principal pela absorção de luz, geração, separação e transporte de carga. A terceira geração está dividida em três grupos: "*Dye-Sensitized Solar Cell* (Célula Solar Sensibilizada por Corante) (DSSC)", célula fotovoltaica multijunção e células fotovoltaica para concentração "*Concentrated Photovoltaics* (Fotovoltaica com Concentração) (CPV)" e por último não menos importante as células orgânicas ou poliméricas "*Organic Photovoltaics* (Fotovoltaica Orgânica) (OPV)"[13].

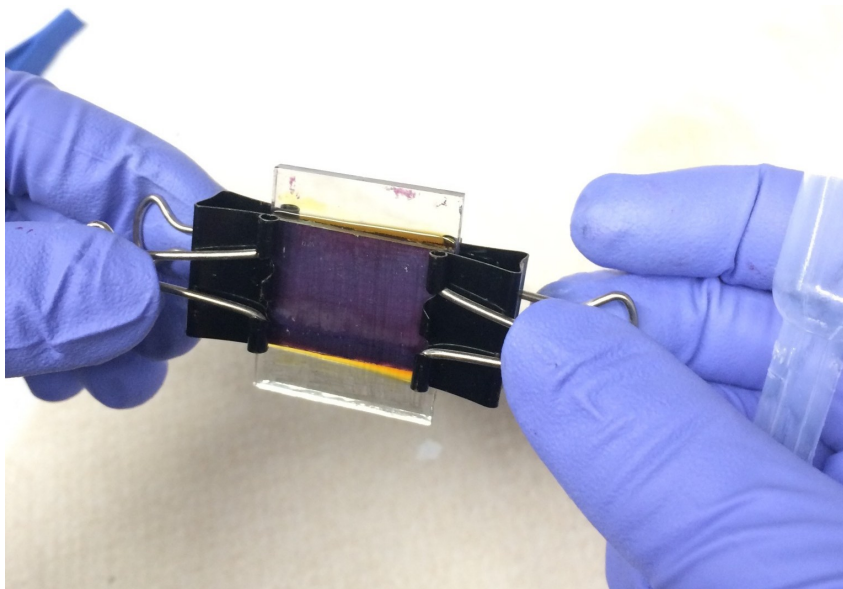


Figura 2.4: Célula fotovoltaica sensibilizada por corante [14].

#### Vantagens

O baixo custo dos materiais utilizados que são abundantes e de baixa toxicidade na fabricação das células. Possibilidade de módulos com melhor aproveitamento luminoso

semitransparente, baixo peso e melhor custo/benefício em relação as gerações anteriores [15].

### Desvantagens

O efeito fotovoltaico na célula gera uma instabilidade nos materiais utilizados para captação dos elétrons [15].

## 2.4 Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica

### 2.4.1 Efeito Fotoelétrico

Em 1887 o efeito fotoelétrico foi confirmado pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, e posteriormente explicado em 1905 por Albert Einstein. Quando um material geralmente metálico é exposto à uma alta frequência e a uma radiação eletromagnética, emite elétrons. Na Figura 2.5 podemos observar os elétrons desprendendo-se da placa quando incide luz. Este é o efeito fotoelétrico.

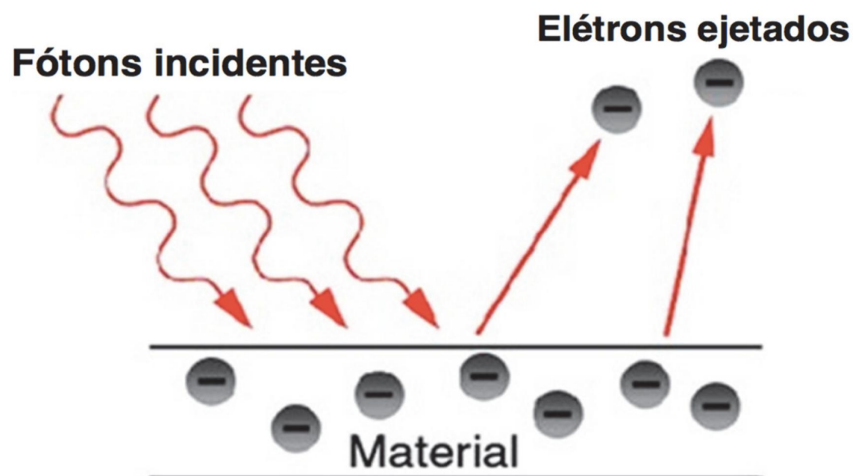


Figura 2.5: Representação esquemática do efeito fotoelétrico [16].

## 2.4.2 Tipos de Associações

Existem três formas de associar as células fotovoltaicas: em série, paralelo e mista. Dependendo dos níveis de corrente ou de tensão desejada escolhe-se o tipo de associação.

### **Associação em série**

Encontra-se em série quando dois componentes ou mais estão com seus terminais associados em sequencias. Por exemplo o terminal positivo é conectado no terminal negativo do próximo componente ou dispositivo. E esse tipo de ligação possibilita obter tensões mais elevadas.

### **Associação em paralelo**

Encontra-se em paralelo quando dois componente ou mais estão interligados com seus terminais num mesmo nó. E esse tipo de ligação é utilizado para obter corrente mais elevadas.

### **Associação mista**

A associação mista nada mais é do que a junção da associação série e da associação paralelo.

## 2.5 Sombreamento em módulo fotovoltaico

O sombreamento pode ser causado por forma natural, com a obstrução ocasionadas por árvores, outras vegetações, ou até mesmo por nuvens, representado na Figura 2.6. Outra forma seria obstrução humana manuseada através da construção de torres, casas, edifícios ou qualquer outro tipo de obstrução que cause sombreamento sobre as células. Consequentemente a produção energética pode ser afetada.

## 2.6 Diodo de desvio (by-pass)

O diodo de desvio (by-pass) ou pode ser chamado também de derivação. São normalmente utilizados como proteção para evitar avarias que possam ocorrer em caso de sombreamento e o fenômeno de pontos quentes (hot-spots), representado na Figura 2.6. A ausência do diodo pode causar incêndio e danificar o módulo, pois ocorreria uma corrente inversa no sentido inverso das fileiras, caso a luz que incida no módulo não seja uniforme [17].

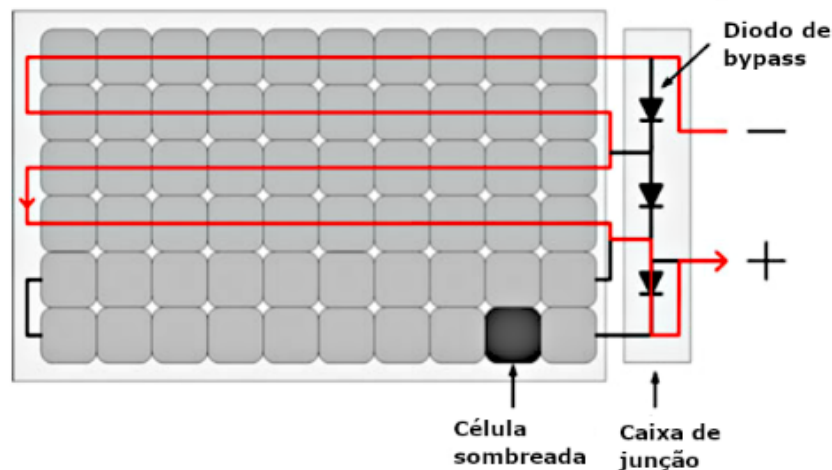


Figura 2.6: Representação esquemática do sombreamento e ativação do diodo bypass [18]

## 2.7 Curva $I-V$ ou curva característica de uma célula solar

A estrutura de uma célula solar é semelhante a de um diodo semicondutor<sup>4</sup>. Podemos considerar a corrente elétrica em uma célula solar fotovoltaica como a soma da corrente de um diodo semicondutor com a corrente gerada pela absorção dos fótons da radiação solar. Pode ser descrita pela Equação (2.1) [1] que é uma derivação da equação do diodo ideal. E devido as células terem suas dopagens, diferentes materiais, resistência em série, resistência em paralelo, tem-se a Equação (2.2) [1] que melhor descreve a curva característica [1],[19].

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.2)$$

Onde:

$I$  - corrente (A);

$I_L$  - corrente fotogerada (A);

$I_0$  - corrente de saturação reversa do diodo (A);

$q$  - carga do electrão ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$V$  - tensão nos terminais (V);

$n$  - fator de idealidade do diodo, diodo ideal  $n=1$  e diodo real  $n>1$ ;

$k$  - constante de Boltzmann ( $1,380 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  - temperatura absoluta (K);

$R_S$  - resistência em série ( $\Omega$ );

$R_P$  - resistência em paralelo ( $\Omega$ );

---

<sup>4</sup>Componente eletrônico constituído de duas camadas semicondutoras do tipo "P"(falta de electrão-lacunas) portadores positivos, camada do tipo "n"( electrão ) portadores negativos, construído por um material semicondutor silício ou germânio.

Através de um circuito equivalente simplificado, podem ser obtidas as curvas características de uma célula fotovoltaica. A Figura 2.7 representa circuito equivalente de uma célula fotovoltaica mais real.

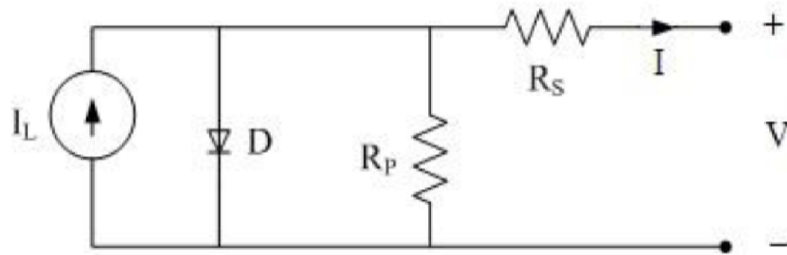


Figura 2.7: Circuito equivalente de uma célula solar fotovoltaica [1]

Para realizar o levantamento e caracterização da curva  $I-V$  é necessário algumas medidas como parâmetro para uniformizar. O padrão de ensaio de funcionamento mais utilizado adquirido pelos fabricantes é "*Standard Test Conditions (Condições Padrão de Teste)*" (STC) "temperatura da célula fotovoltaica a 25 °C, irradiância de 1.000 W/m<sup>2</sup>, coeficiente de massa de ar "*Air Mass* (Massa de Ar) (AM)" é 1,5 [20].

Além dessas grandezas anteriormente citadas há outras que são fundamentais como:

- **Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ )** - máxima tensão produzida por uma célula fotovoltaica medida entre seus terminais. É a tensão de saída de um painel quando não há nenhuma carga, conforme a tecnologia empregada na célula o valor de  $V_{oc}$  varia [20].
- **Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ )** - quando a tensão elétrica é igual a zero, e é medida a máxima corrente na célula. A corrente de curto-circuito é proveniente de outra grandeza, a ( $J_{SC}$ ) densidade de corrente de curto-circuito, pela qual se relacionam-se com a área  $A$  da junção. Dependendo do material da célula fotovoltaica, a densidade de corrente de curto-circuito varia [1].

$$I_{SC} = A \cdot J_{SC} \quad (2.3)$$

- **Ponto de máxima potência** ( $M_{PP}$  ou  $P_{MAX}$ ) - Produto entre a tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ) e a corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ) representado na Equação (2.4), e podemos notar ponto de potência máxima que a célula pode oferecer como mostra a Figura 2.8 [21].

$$P_{MAX} = I_{MP} \cdot V_{MP} \quad (2.4)$$

- **Fator de preenchimento ou Fator de forma "fill factor" (FF)** - é a relação entre máxima potência dividido pelo produto da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.5)$$

Se as perdas resistivas forem as menores possíveis, a curva I-V se assemelhara a forma retangular [21].

- **Eficiência de conversão ou rendimento** ( $\% \eta$ ) - relação entre a potência solar incidente na célula e a potência gerada por ela. Podendo assim analisar o quão eficiente é a célula em questão e o seu material utilizado para processo de conversão da energia solar em energia elétrica, representado pela Equação (2.6)

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{G \cdot A} \cdot 100\% = \frac{P_{max}}{G \cdot A} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

onde G é a irradiância ( $W/m^2$ ) solar incidente e A é área( $m^2$ ) da célula [1], [21].

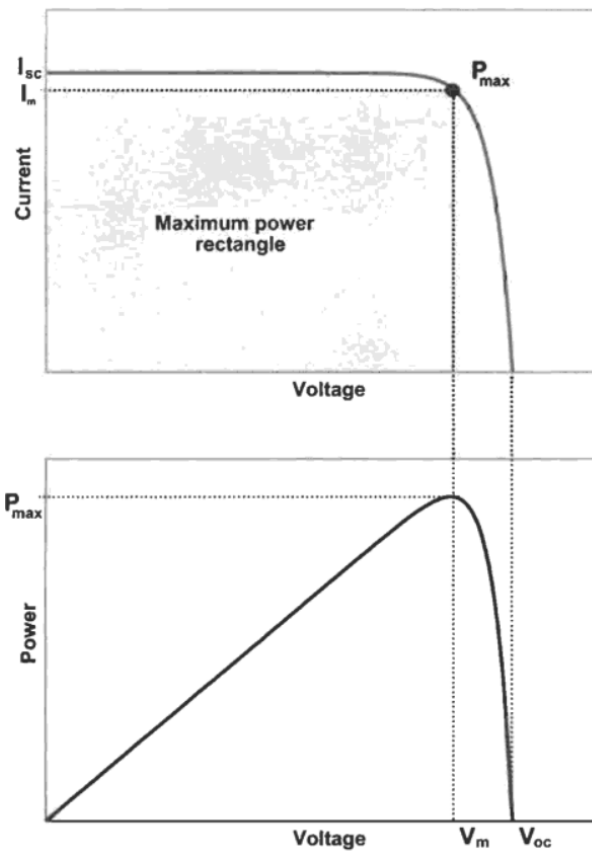


Figura 2.8: Curva característica I-V de uma célula ideal, e a potência produzida pela mesma célula [22]

## 2.8 Polímeros

Os Polímeros são formados por grandes moléculas (macromoléculas). A massa molecular na ordem de 1.000 a 1.000.000 m, composta por repetidas partes pequenas e simples unidade química em sua estrutura. E essas pequenas partes denominadas de monômeros pelo facto de se repetirem por toda a cadeia polimérica. A repetição dos números de unidades estruturais em uma macromolécula denomina-se grau de polimerização, podendo ser elas naturais como a celulose, látex, amido, entre outros. As macromoléculas podem ser encontrados de forma natural como citado acima, ou produzidas sinteticamente (produzidos em indústrias ou laboratórios), como por exemplo o náilon, teflon, polietileno entre outros [23], [24], [25].

### 2.8.1 Polímeros Condutores

Durante uma tentativa de sintetizar o poliacetileno<sup>5</sup> por ser um polímero conjugado de estrutura simples, em 1976 em Tóquio o pesquisador Hideki Shirakawa liderou a descoberta dos polímeros condutores. Foi verificado que o poliacetileno em contato com iodo faz com que sua condutividade elétrica aumentasse sensivelmente, devido ao facto de sua estrutura alternar entre ligações dupla e simples entre o carbono da cadeia polimérica, e essas características denomina-se de polímeros conjugados [26].

E, uma das características que o poliacetileno tem é [27]:

- isolante, porém torna-se condutor quando recebe dopagem com pequenas quantidades de materiais redutores ou oxidantes;
- infusibilidade;
- insolubilidade;
- uma difícil processabilidade;
- instabilidade térmica;

---

<sup>5</sup>polímero orgânico com alta condutividade elétrica.

Atualmente, um dos maiores interesse nessa área de polímeros condutores é poder desenvolver materiais que sejam capazes de juntar a atividade catalítica, propriedade magnética, alta resistência mecânica e condutividade eletrônica [28].

## 2.8.2 Polímero PEDOT

O Poli (3,4-etileno dioxitiofeno) (PEDOT) como é conhecido, é um polímero condutor classificado como polímero pseudo-capacitivo pela qual o armazenamento de carga ocorre por rápida reações de redox. Utilizados em vários dispositivos eletrônicos, capacitores, células solares entre outros [29].

Além das características citadas acima possui também:

- elevada condutividade eletrônica devido à presença de ligações duplas conjugadas [30];
- boa resistência mecânica [30];
- em estado dopado uma excelente transparência [31];
- estabilidade térmica [32];
- no estado oxidado estabilidade incomum [33];
- boa facilidade de processamento [31];
- propriedades eletrocromicas [30];
- insolubilidade em água, porém quando misturado com PSS é solúvel com alta condutividade, tem baixo custo é de fácil manuseio [30];

Este polímero é aplicado em dispositivos fotovoltaicos orgânicos [31], revestimentos antiestéticos, placas de circuito impresso, sensores [34], condensadores de eletrolitos sólidos, diodo emissor de luz, células solares entre outros [35].

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos Experimentais

Neste capítulo são apresentados todos os materiais, instrumentações utilizadas para o fabrico das DSSC, identificações, características físicas dessas células que compõe o módulo. Nos processos de fabrico do módulo fotovoltaico são apresentados: as características do material, estudo de possíveis disposições e os desenhos técnicos.

### 3.1 Células DSSC - PEDOT:PSS

Para a produção do polímero condutor PEDOT é necessário a polimerização oxidativa do monômero (3,4-etileno dioxitiofeno) (EDOT), e polimerizado junto a Solução de Poli (ácido 4-estireno sulfónico) (PSS) para obter (Poli (3,4-etilenodioxitiofeno)): Poli (4-ácido estireno sulfónico). (PEDOT:PSS) [36].

As células cedidas de DSSC PEDOT:PSS, Figura 3.1, citadas nesse capítulo foram projetadas e fabricadas com a colaboração da Universidade do Porto e todo o método de fabrico encontra-se melhor detalhada em [36].

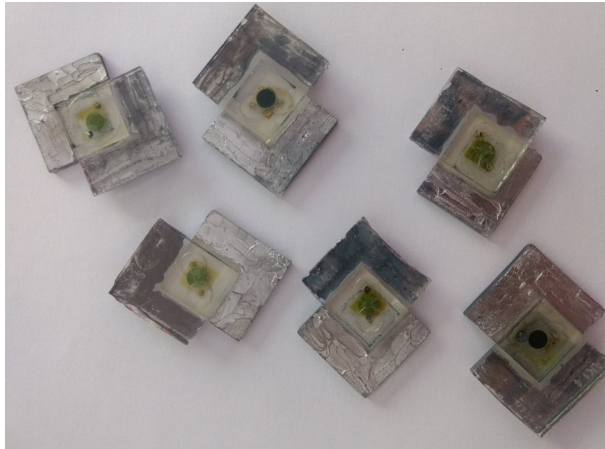


Figura 3.1: Célula DSSC - PEDOT:PSS

### 3.1.1 Dimensões das células DSSC

Para que o módulo fosse desenvolvido foram anotadas as dimensões de cada célula individualmente. Cada célula tem sua dimensão própria. O que é igual em todas as células é a área do ponto ativo que é  $A = 0.126 \text{ cm}^2$ . A identificação da célula é feita com a nomenclatura em relevo no vidro, de difícil percepção como mostra a Figura 3.2.

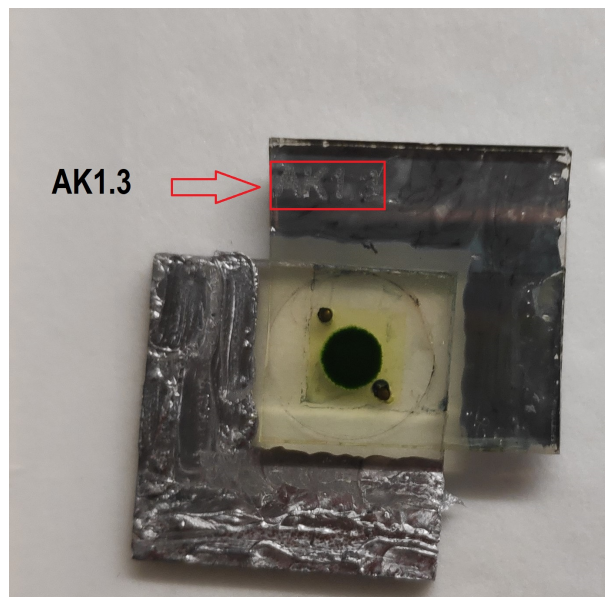


Figura 3.2: Identificação da célula

Na Figura 3.3 são apresentadas as dimensões de cada célula, e para não saturar o desenho técnico foram atribuído letras. Assim, como cada célula tem sua própria identificação. O seu peso também varia, Tabela 3.1.

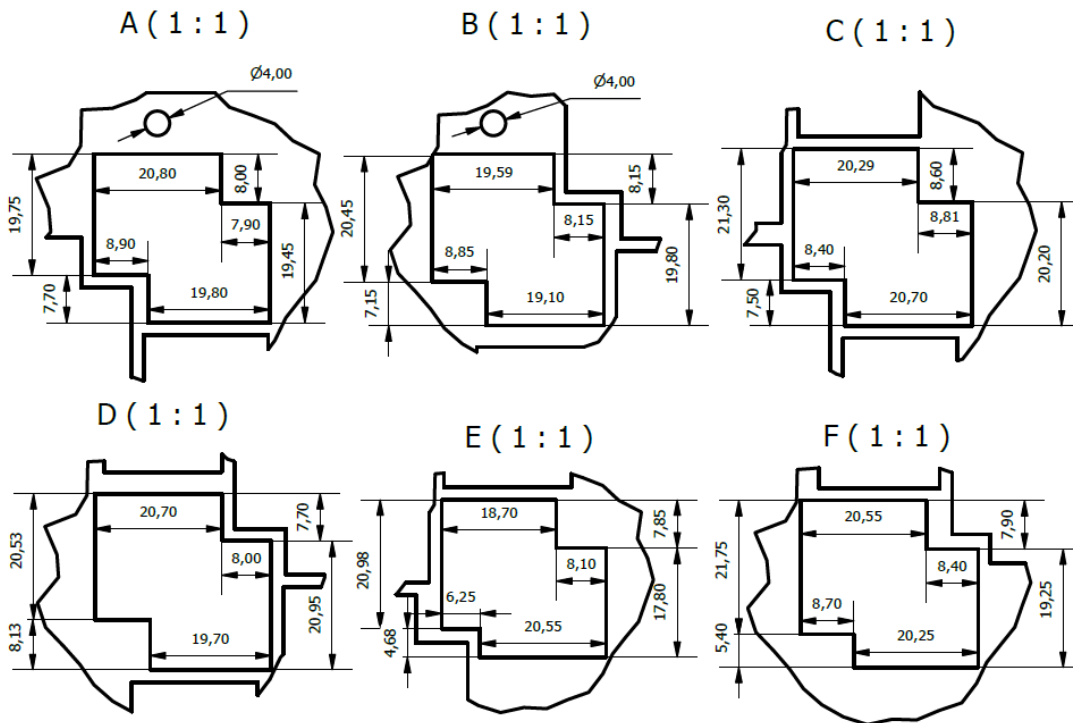


Figura 3.3: Projeções das dimensões das células em mm

Tabela 3.1: Nomenclatura e Peso de cada célula.

(DSSC) Célula	(g) Peso
A - AK 1.3	4,406
B - AK 11.5	4,225
C - AK 1.4	4,595
D - AK 4.2	4,568
E - AK 12.1	4,039
F - AK 12.4	4,276

### 3.1.2 Materiais utilizados para o fabrico das células

- Vidro - "*Fluorine doped Tin Oxide* ( Óxido de Estanho dopado com flúor) (FTO)"TEC 7 de 100 mm x 100 mm, espessura de chapa de 2.2 mm e resistência de  $7 \Omega/\text{m}$  da Greatcellsolar [37], [36];
- Eletrólitos - Eversolar® Co-200 [38], [36] e Eversolar® Co-300 [39], ambos da Everlighth Chemical Industrial Co.  
  
Composição do eletrólito: Co-200 0,165 M + Co-300 0,045 M + TBP (Tributyl phosphate- Fosfato de tributil) 0,8 M + LiClO<sub>4</sub> (Perclorato de lítio) 0,1 M;
- Fotoanodo - camada mesoporosa (30NR-D) [40], [36], camada refletora (WER2-O) [41], [36];
- Sensibilizador - YD2-o-C8 [42], [36];
- Nanopartículas de Platina Plastisol T / SP fornecido pelo Solaronix [43], [36];
- Termoplástico selante Surlyn com 25 microns de espessura fornecidas por Solaronix [36];

## 3.2 Materiais utilizados para o fabrico do módulo fotovoltaico

O material escolhido para alocar as células foi o acrílico, devido suas características.

### 3.2.1 Características do Acrílico

O acrílico se destaca entre os demais materiais devido suas propriedades, e há uma ampla gama de aplicações. Como por exemplo domos, coberturas, produtos de comunicação visual. A aplicação se dá também nas indústrias náutica, aérea e automotiva [44]. Uma das principais características e vantagens do acrílico em relação a área fotovoltaica é de possuir [45]:

- Transmissão de 92% de luz, sendo superior ao vidro e aos demais plásticos. A tornar cristalino e transparente;
- Resistência aos raios UV e as condições climáticas, com menos da metade do peso que o vidro;
- Flexibilidade, facilidade de adquirir formas: pode ser perfurado, cortado, colado, moldado;
- Durabilidade em torno de 10 anos;
- Em relação ao vidro tem melhor resistência à choque térmico;
- Resistente, duro, rígido, sem tendência à fragmentação e não estilhaça como o vidro;

### **3.3 Método de fabrico do módulo fotovoltaico para as células DSSC**

A primeira análise foi identificar a posição das células para não haver divergência nos polos. Na Figura 3.4 podemos notar fisicamente na célula (a) que ela esta posicionada com a parte posterior para cima, pois no centro da célula tem a circunferência mais clara, e os furos no vidro onde foram feito os depósitos dos eletrolitos. Diferenciando assim da célula (b) que esta com sua parte anterior para cima, pois não tem os furos nessa parte do vidro e tem a aparência mais escura no ponto ativo da célula.

A ideia inicial para o desenvolvimento do módulo é de que cada célula DSSC fique devidamente fixada no módulo. Analisado as diferentes dimensões de cada célula, algumas formas foram desenvolvidas em rascunho como mostra a Figura 3.5, e depois de uma forma mais concreta foi feita a decisão.

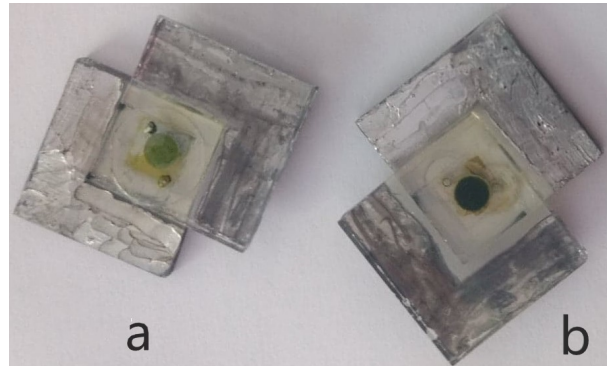
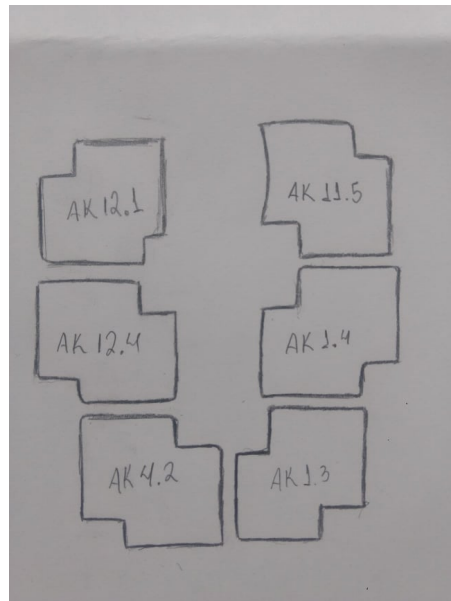
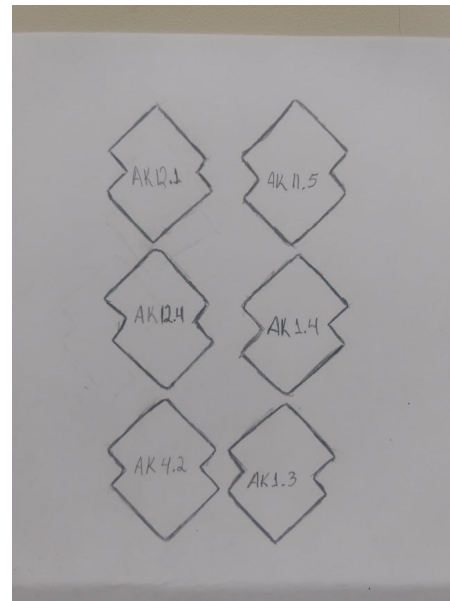


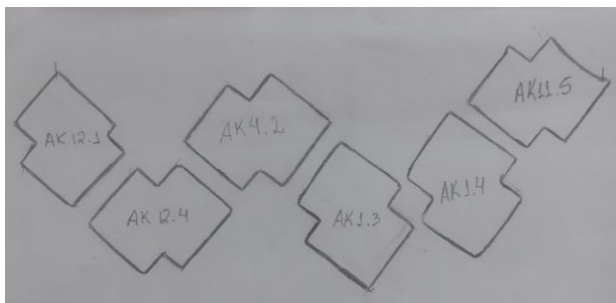
Figura 3.4: Identificação da posição da célula



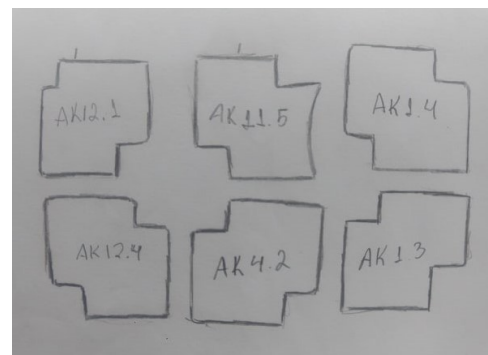
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.5: (a),(b),(c),(d) estudos de possíveis disposições

Devido a fragilidade das DSSCs, foi feito recortes em papel de consistência mais firmes e com dimensões semelhantes para o manuseio das possíveis disposições.

Visando um melhor aproveitamento do material base e otimização de espaço para alocar cada célula, foi decidido utilizar a disposição das células como indicado na Figura 3.6.

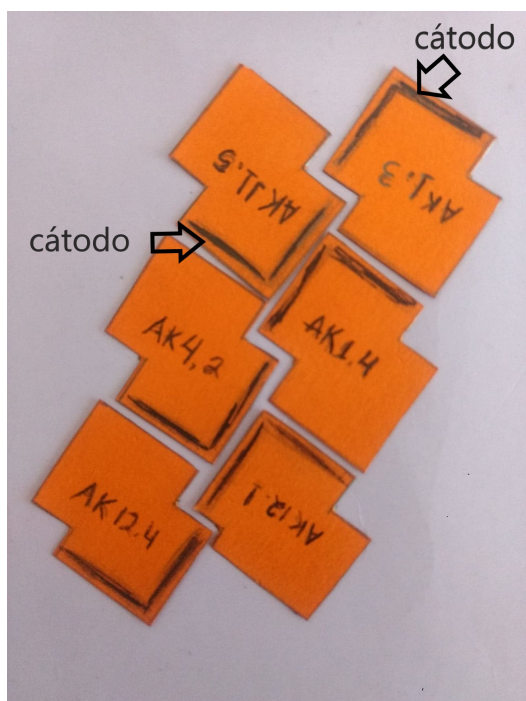


Figura 3.6: Disposição final das células com linhas desenhadas representando o cátodo.

Após notarmos e decidirmos a melhor forma, foi feito o desenho técnico no software Autodesk Inventor. Um desenho esquemático do módulo fotovoltaico está representado na Figura 3.7 com as dimensões em mm.

A ideia é utilizar o mínimo de material possível e apenas uma base para as células. Mas devido o método de corte da máquina disponibilizada para execução no acrílico não fazer cortes em relevo, foi necessário uma placa de suporte inferior para evitar que as células passassem de um lado para o outro. A espessura mínima utilizada para a placa posterior na máquina no FABLAB era de 3 mm. O esquema está representado na Figura 3.8 em mm.

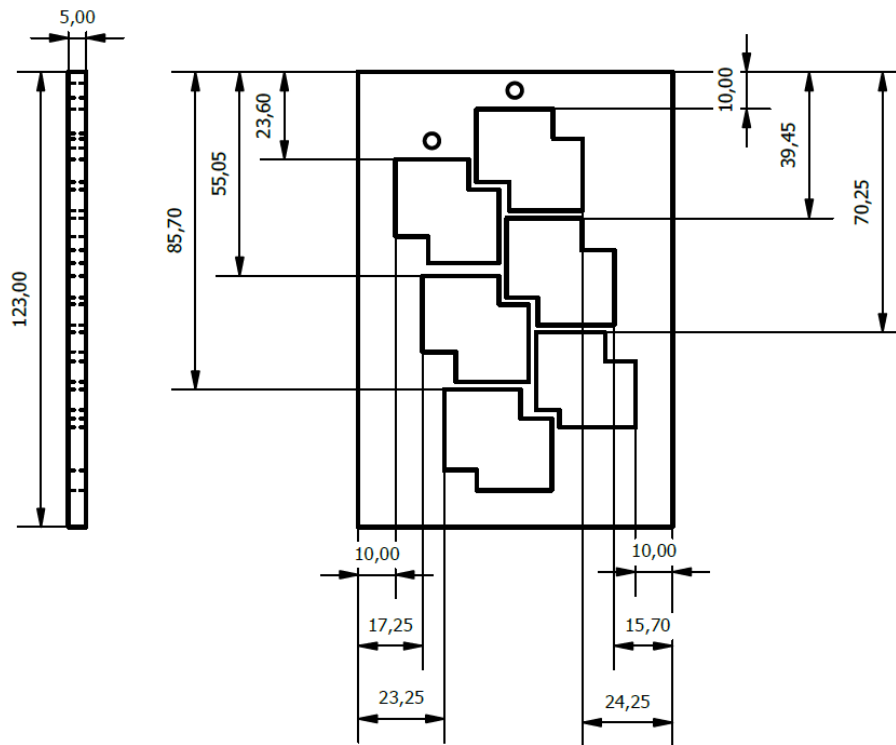


Figura 3.7: Representação da chapa anterior do módulo fotovoltaico em mm.

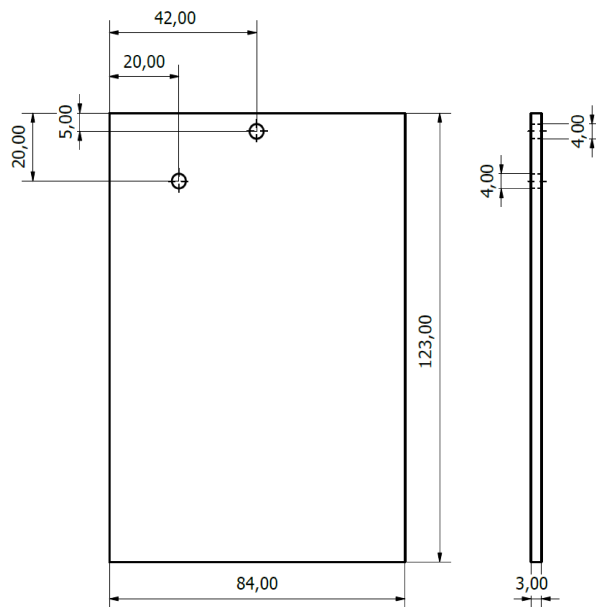


Figura 3.8: Representação da parte posterior de sustentação do módulo fotovoltaico em mm.

A próxima etapa descrita foi a execução e corte das placas de acrílico de espessura de 5 mm para parte anterior. E uma placa de espessura 3 mm, para a região de sustentação das células. As duas placas são de 150 mm x 150 mm. Os cortes realizados nas placas de acrílico foram executados na máquina cortadora laser, modelo representado na Figura 3.9, utilizadas no FABLAB do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).



Figura 3.9: Cortadora laser - PORT LASER X252.

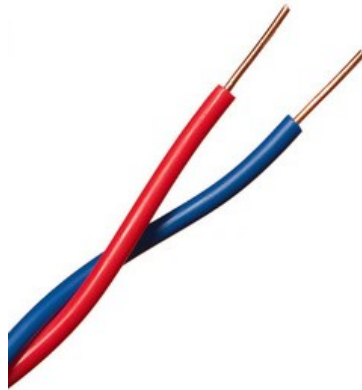
### 3.3.1 Materiais utilizados na ligação das células DSSCs

- (a) Fita adesiva de Cobre (13 mm X 5 mts) As fitas de cobre são bastante utilizadas para blindagem e proteção dos mais diferentes tipos de equipamentos. Com uma vasta aplicação na área da eletrônica, a ser utilizado como proteção de componentes, em cabos flexíveis, blindagem de equipamentos contra radiofrequência, entre outros.
- (b) Fio condutor de Cobre de espessura de 0,55 mm.
- (c) Ferro de soldar.
- (d) Cola condutora adesiva de prata, com viscosidade pastosa.

- (e) Estanho para solda.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.10: (a)Fita adesiva de Cobre, (b)Fio condutor de Cobre [46], (c)Ferro de soldar, (d)Cola condutora adesiva de prata, (e) Estanho para solda

### 3.4 Método utilizado nas ligações das células DSSCs

A solução encontrada para o método de ligação das células, foi ligar em série, Figura 3.11, por haver apenas seis células disponíveis. O terminal positivo ânodo da célula é conectado ao terminal negativo cátodo de outra célula, e assim por diante. Na Figura 3.12 demonstra a representação dos terminais na célula real.

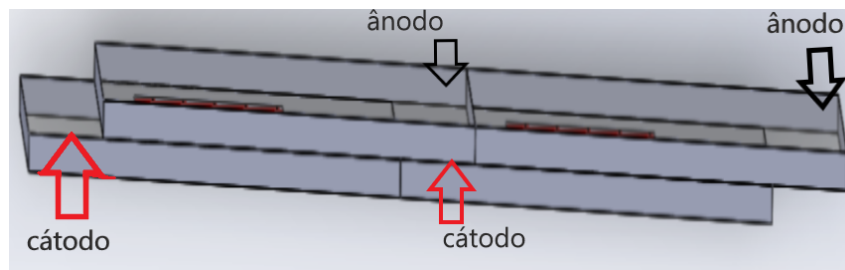


Figura 3.11: Modelo de células DSSC ligadas em série

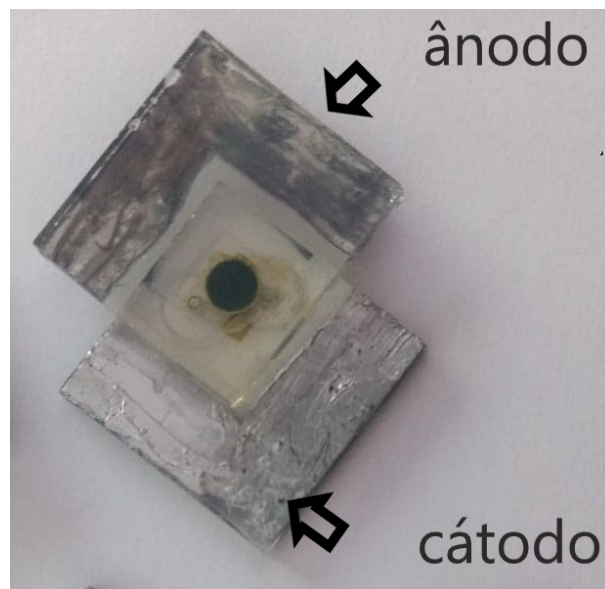


Figura 3.12: Célula DSSC com ponto ativo para cima.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta as características das células sensibilizadas por polímeros condutores PEDOT:PSS. Os desenhos técnicos do módulo, o projeto final de corte executado na chapa de acrílico, e conseqüentemente o encaixe das células no módulo. É apresentado o resultado das ligações das células, assim como a simulação e a curva característica. E por fim uma discussão dos fatores cabíveis ao projeto.

### 4.1 Características das Células DSSC

Na Tabela 4.1 são apresentados os dados adquiridos em laboratório de cada DSSC assim como a nomenclatura, seus valores de tensão, de corrente, de densidade de corrente, resistência série, a eficiência, fator de preenchimento e a potência. Vale ressaltar que cada célula utiliza um contra-eletrodo<sup>1</sup> diferente, que seguidamente destacaremos [36]:

- A - AK 1.3 PEDOT:PSS com 8% DMSO;
- B - Ak 11.5 PEDOT:PSS com 8% de DMSO (4 camadas);
- C - AK 1.4 PEDOT:PSS comercial;
- D - AK 4.2 PEDOT:PSS com 10% de etileno glicol;

---

<sup>1</sup>componente auxiliador no efeito catalítico, e na solução eletrolítica faz a regeneração dos íons. Por exemplo a platina, o carbono entre outros.

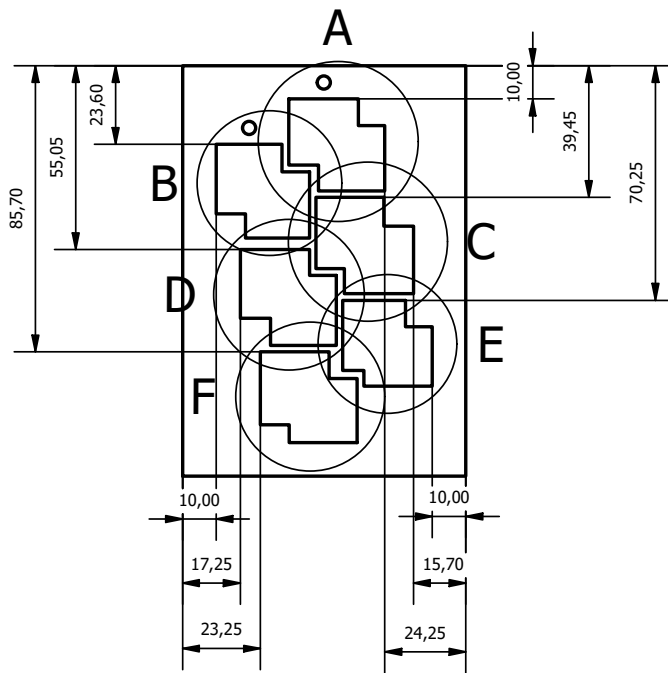
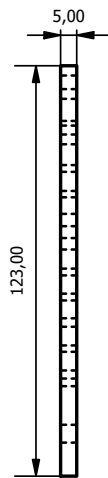
- E - AK 12.1 PEDOT:PSS;
- F - AK 12.4 Nanopartículas de platina;

Tabela 4.1: Dados laboratoriais das Células [36]

DSSC células	(V)Voc	(mA)Isc	( $\Omega$ )Rs	(mA.cm <sup>2</sup> )Jsc	(%n)Eficiência	FF	(mW)MPP	
<b>A</b>	AK 1.3	0.881	1.488	0.998	11.817	7.977	0.766	1.002
<b>B</b>	AK 11.5	0.922	1.504	1.041	10.609	6.310	0.647	0.793
<b>C</b>	AK 1.4	0.907	1.557	1.099	11.937	7.959	0.735	1.000
<b>D</b>	AK 4.2	0.908	1.527	0.895	9.796	6.502	0.731	0.817
<b>E</b>	AK 12.1	0.913	1.234	1.076	12.122	7.934	0.716	0.997
<b>F</b>	AK 12.4	0.926	1.326	1.557	12.362	8.804	0.769	1.106

## 4.2 Desenhos técnicos

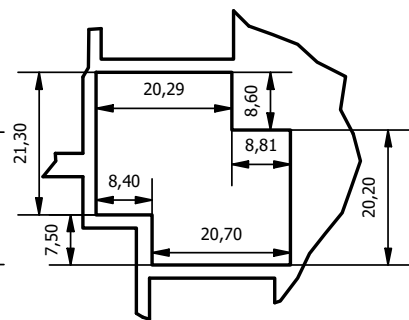
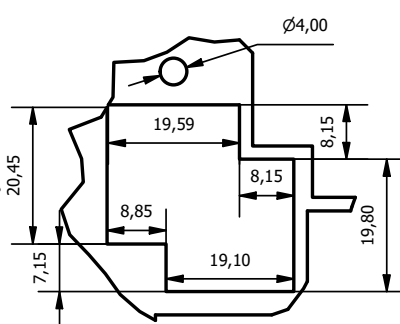
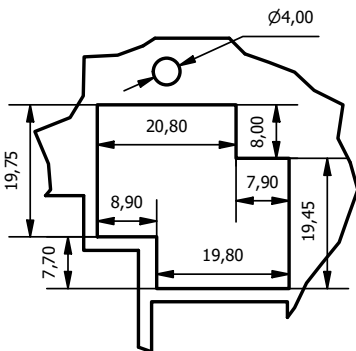
Nas duas páginas seguintes são apresentados os desenhos técnicos do projeto do módulo fotovoltaico. Na página 32 temos o desenho 1 da chapa anterior para alocar as células, e não deixar que ela se mova. Na página 33 temos o desenho 2 da chapa da parte posterior do módulo para servir de suporte e manter as células firmes. Ambos os projetos tem orifícios para a passagem dos conectores.



A (1:1)

B (1:1)

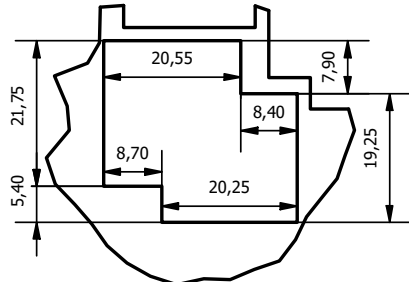
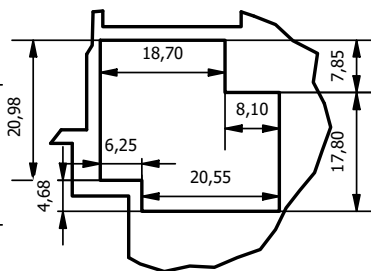
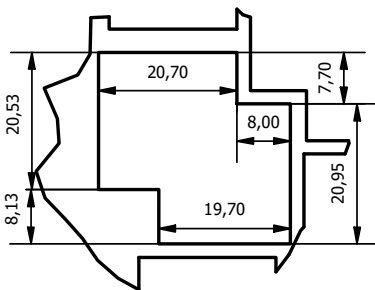
C (1:1)



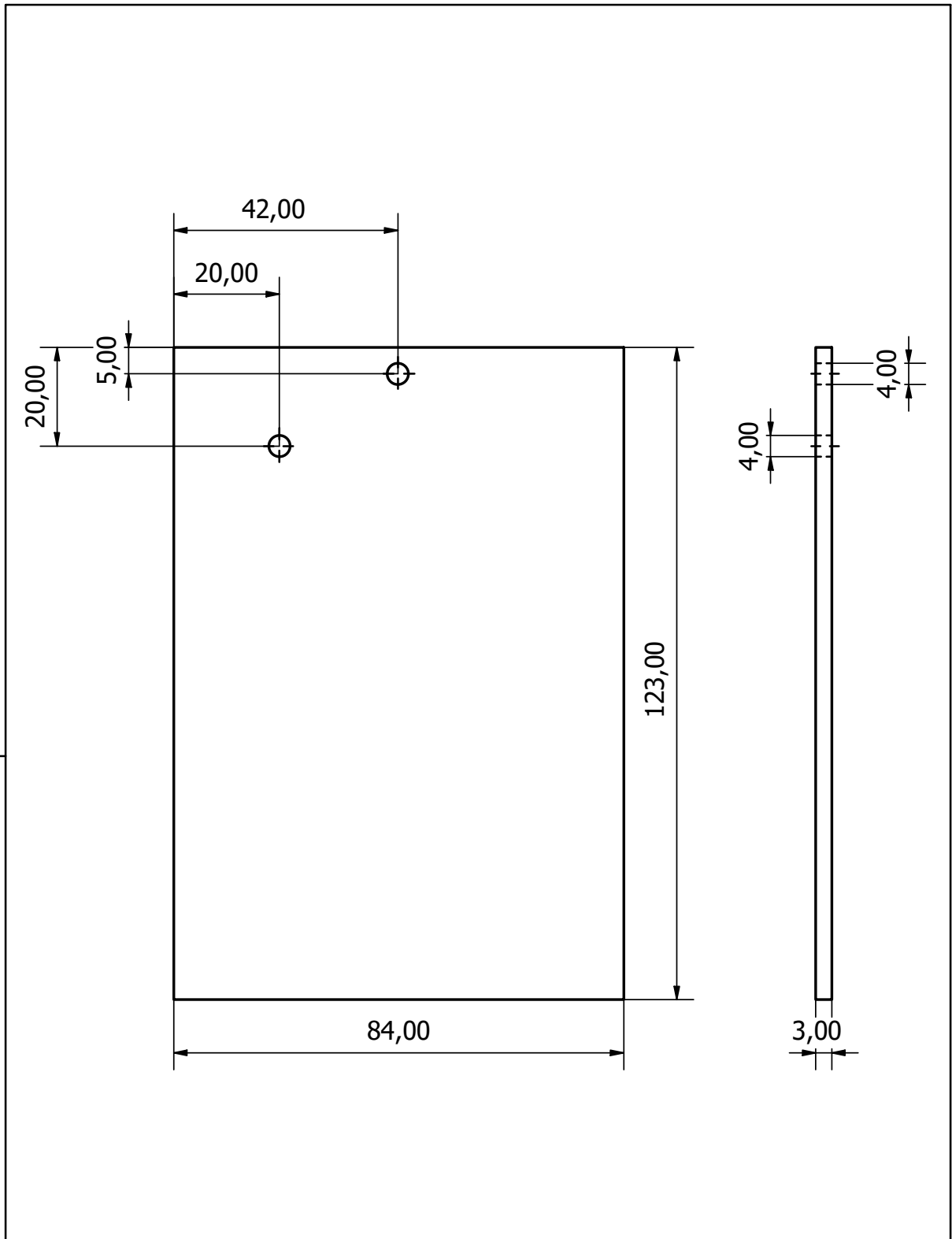
D (1:1)

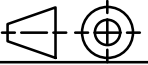

E (1:1)

F (1:1)



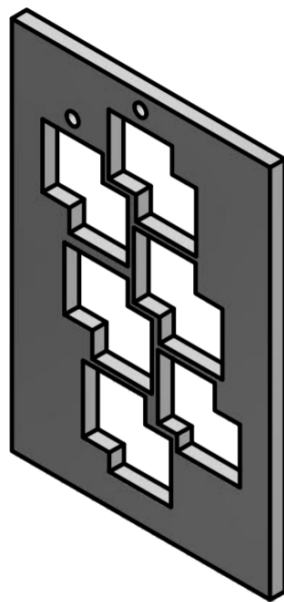
Projetado por: <b>Anthony Sérgio Martins Sanches</b>	Descrição do componente: <b>Chapa anterior</b>	Diedro: 
Revisado por: <b>Luis Frólén Ribeiro</b>	Projeto: <b>Módulo fotovoltaico</b>	Unidade: mm
Data: 10/11/2019	<b>INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA</b> Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: 1 : 2
		Folha: 1/2



Projetado por: <b>Anthony Sérgio Martins Sanches</b>	Descrição do componente: <b>Chapa posterior</b>	Diedro: 
Revisado por: <b>Luis Frölen Ribeiro</b>	Projeto: <b>Módulo fotovoltaico</b>	Unidade: <b>mm</b>
Data: <b>12/11/2019</b>	 <b>INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA</b> Escola Superior de Tecnologia e Gestão	Escala: <b>1 : 1</b>
		Folha: <b>2/2</b>

### 4.3 Chapa anterior

A chapa anterior foi projetada conforme as dimensões das células citadas no capítulo três, e a forma 3D do projeto da chapa esta representado na Figura 4.1 (a) e na Figura 4.1 (b) na forma final e real, e o peso dessa chapa é de 33 g.



(a)

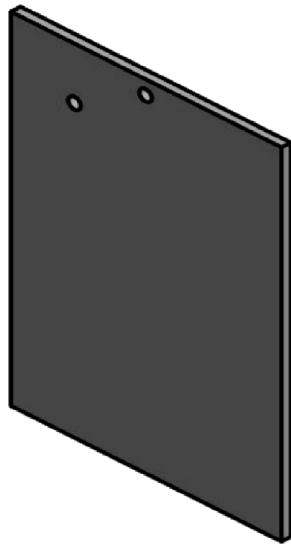


(b)

Figura 4.1: (a) Desenho 3D da chapa anterior. (b) Chapa anterior de acrílico com espessura de 5 mm em fase final.

## 4.4 Chapa posterior

O projeto da chapa posterior foi calculado referente a parte anterior da placa. Representado na Figura 4.2 (a) no formato 3D e na Figura 4.2 (b) e o peso de 34 g.



(a)



(b)

Figura 4.2: (a) Desenho 3D da chapa posterior. (b) Chapa de acrílico com espessura de 3 mm da parte posterior do módulo em fase final.

## 4.5 Instalação das células DSSCs no Acrílico

A instalação das células na base de acrílico ficaram realmente justas. Devido ao formato característico das células, abaulado em algumas de suas extremidades. Foi necessário lixar as bordas internas da base de acrílico, e devidamente encaixadas como mostra Figura 4.3.



Figura 4.3: Instalação das Células na base de acrílico.

## 4.6 Ligação das células DSSCs

O método utilizado nas ligações foi, interligar as células DSSCs em série que visa a união dos terminais através da soldadura com fio de cobre e estanho, Figura 4.4.

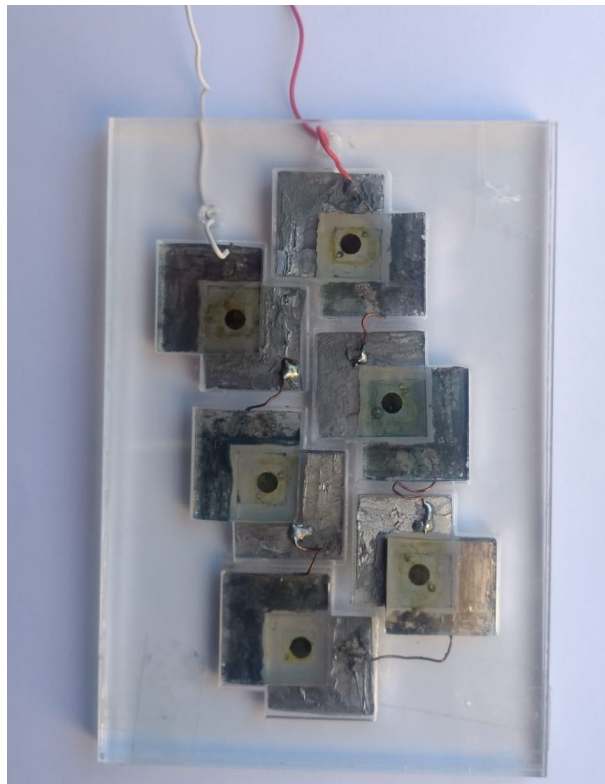


Figura 4.4: Células DSSCs interligadas através de soldadura.

### 4.6.1 Método adotado para soldadura das células

O método adotado foi soldar primeiramente o fio condutor de cobre na superfície de cada célula onde se encontra o ânodo, Figura 4.5. Na sequência encaixou-se a célula na chapa anterior. Posteriormente, executou-se a soldadura do fio condutor de cobre na superfície onde se encontra o cátodo, Figura 4.6. Esse método deve-se pelo facto do posicionamento do ânodo ficar sempre para baixo, paralelo à chapa posterior. Para não comprometer a selagem de cada célula devido à sua fragilidade, é necessário sensibilidade de manuseio.

O fio condutor de cobre foi cortado em vários fios menores, com um comprimento de 2 cm cada um, moldado num formato aleatório. Posteriormente após ter feito a soldadura, em caso de uma possível necessidade de refazer a solda, ou retirar a célula, isso danificaria a fina camada de prata em contato com o vidro. Retirando a aderência devido a alta temperatura do ferro de solda.

Em consequência a alta temperatura do ferro de solda, foi necessário então um ponto maior de solda para garantir uma melhor fixação do fio condutor de cobre. Em alguns casos, foi necessário a utilização da cola condutora adesiva de prata com viscosidade pastosa. Para auxiliar na soldadura entre o fio condutor de cobre e a fina camada de prata depositada sobre o vidro.

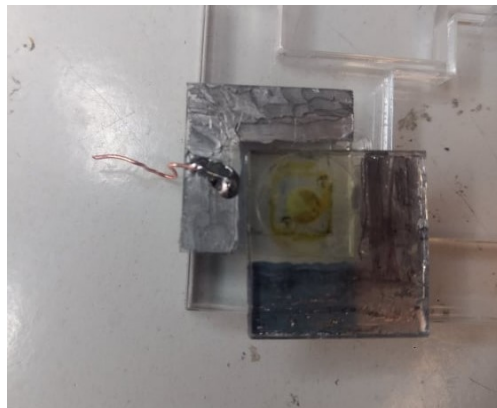


Figura 4.5: Soldadura do fio condutor de cobre na superfície anódica da célula DSSC.

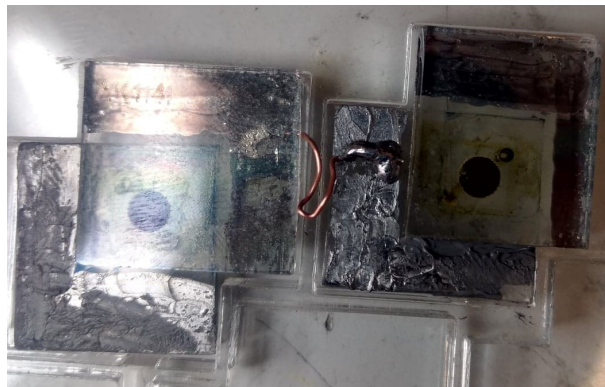


Figura 4.6: Soldadura do fio condutor de cobre nas células DSSCs em série.

## 4.7 Modelação no Simulink

A equação utilizada para a modelação é a Equação (2.2). Os parâmetros utilizados nessa modelagem foram as das condições-padrão (STC). A irradiância usada para medições de cada célula é a de  $G = 100 \text{ W/m}^2$ , distribuição espectral padrão AM 1.5 , Energy gap  $EG = 3.1 \text{ eV}$ , a Constante  $C$  de 1000, área do ponto ativo de  $0,126 \text{ cm}^2$ , temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,001 \text{ Ohm}$  para resistência variável. E cada célula está configurada com seus respectivos dados laboratoriais.

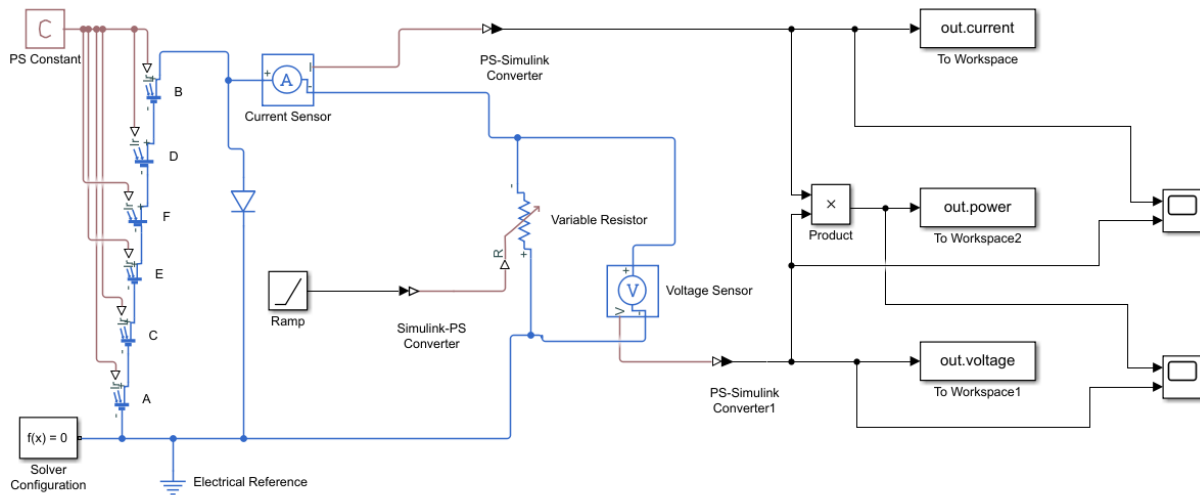


Figura 4.7: Modelação através do Simulink.

### 4.7.1 Utilização de cada elemento no Simulink

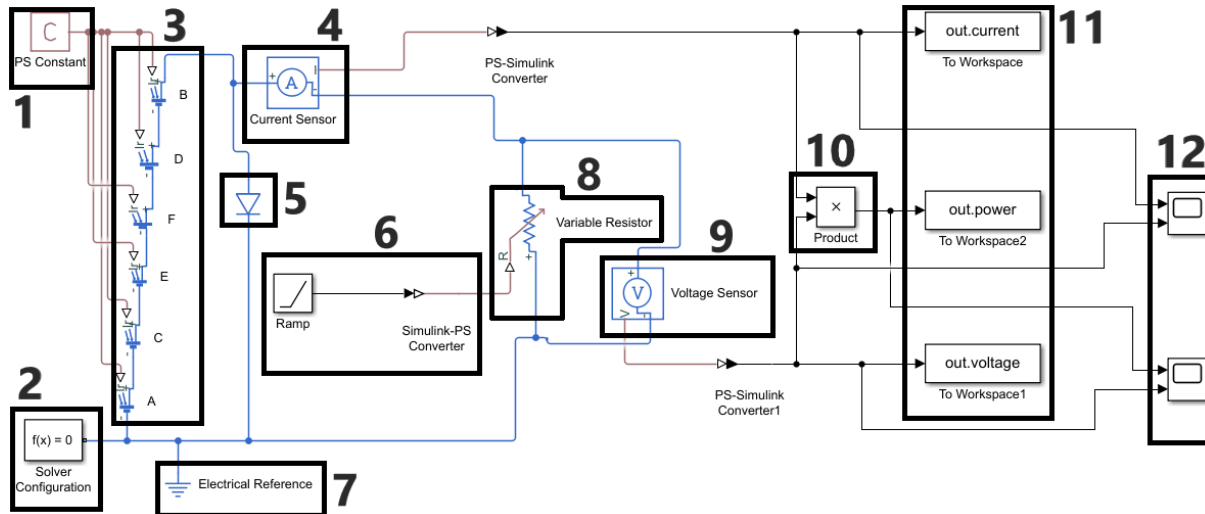


Figura 4.8: Representação de cada elemento utilizado na modelação através do Simulink.

- 1- PS Constant- este bloco cria uma constante de sinal físico:  $y = \text{constante}$ , aceita valores positivos e negativos. Utilizado como intensidade de radiação solar setado em 1000.
- 2- Solver Configuration- define a configuração do solucionador para usar na simulação.
- 3- Células Solares - este bloco modela as células solares colocada em série.
- 4- Current Sensor- o bloco representa um sensor de corrente ideal, ou seja, um dispositivo que converte a corrente medida em qualquer ramal elétrico em um sinal físico proporcional à corrente. A conexão I é uma porta de sinal físico que emite o valor atual.
- 5- Diode- este bloco representa um diodo. Utilizado para proteção do sistema.
- 6- Ramp- este bloco emite um sinal de rampa começando no tempo especificado. E o slope/declive está definido em 1.

- 7- Electrical Reference- esse bloco é o referencial elétrico do sistema.
- 8- Variable Resistor- modela um resistor linear variável. A relação entre a tensão  $V$  e a corrente  $I$  é  $V = I * R$  onde  $R$  é o valor numérico apresentado na porta física do sinal  $R$ . O parâmetro de resistência mínima evita valores de resistência negativa. As conexões + e - conservam portas elétricas correspondentes aos terminais positivo e negativo do resistor, respectivamente. A corrente é positiva e flui de positivo para negativo e a tensão através do resistor é dada por  $V (+) - V (-)$  E a resistência mínima  $R \geq 0$  e está configurado em 0,001 Ohm.
- 9- Voltage Sensor- O bloco representa um sensor de tensão ideal, ou seja, um dispositivo que converte a tensão medida entre quaisquer conexões elétricas num sinal físico proporcional à tensão. As conexões + e - conservam portas elétricas através das quais o sensor é conectado ao circuito. A conexão  $V$  é uma porta de sinal físico que emite o valor da tensão.
- 10- Product- esse bloco multiplica as entradas.
- 11- To Workspace- grava a entrada em séries temporais especificadas, matriz ou estrutura em um espaço de trabalho. Para simulação baseada em menu, os dados são gravados no espaço de trabalho base do MATLAB.
- 12- Scope- esses blocos são dispositivos de saída que permitem verificar o comportamento do sistema. O osciloscópio produz gráficos a partir de dados do modelo, e não existem parâmetros a serem configurados.

## 4.7.2 Levantamento da curva característica do módulo DSSC

E através do Simulink foram levantadas as curvas características, como representado na Figura 4.9. Ao analisarmos o formato do gráfico podemos notar que a curva P-V em azul tem características condizentes com a teoria, mesmo em seu ponto de máxima potência 0,6111 mW ter formato mais pontiagudo e não um formato mais ameno e abaulado. Isso se dá pelo número reduzido de dados. Ao analisarmos a curva Jsc-V em vermelho, notamos que ela adota um formato praticamente linear. Com o início da curva decaindo seu valor, representado na Figura 4.10 no eixo Y de 0,1104 mA.cm<sup>2</sup> que é seu máximo para média de 0,09796 mA.cm<sup>2</sup>. Isso se dá pelo facto das células estarem em série e com diferentes correntes, diferentes resistências, pois a corrente elétrica da associação será limitada pela menor corrente. E essa situação de incompatibilidade de características é chamado de efeito "*mismatch*"(descasamento).

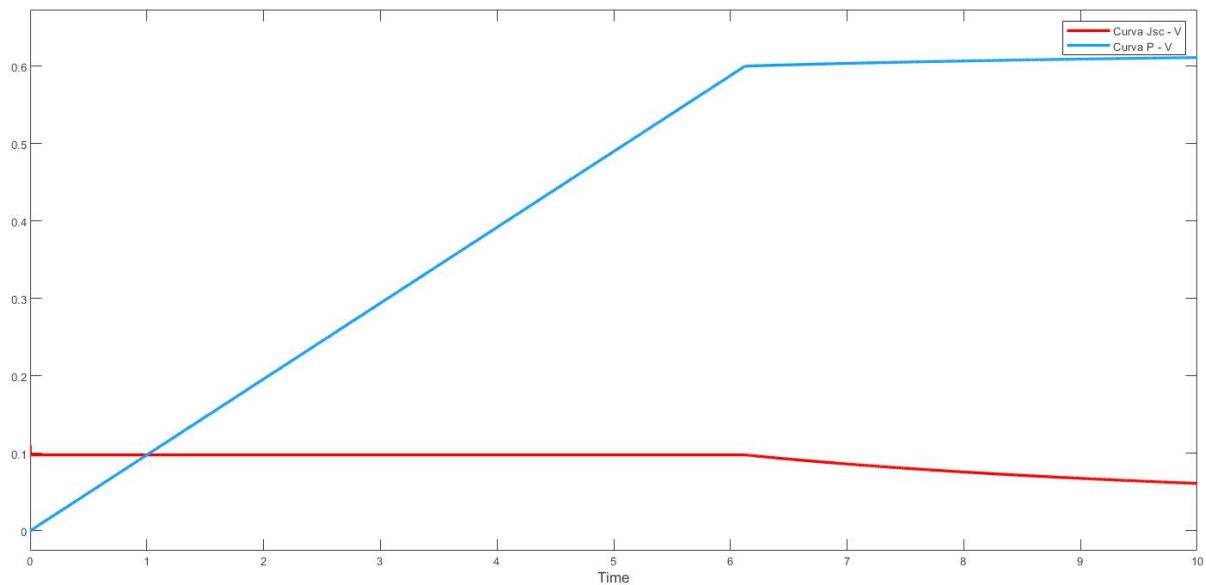


Figura 4.9: Curva Jsc - V em vermelho, em azul a curva P - V.

Data Statistics for: Curva Jsc - V				Data Statistics for: Curva P - V				
Select statistics to display on the figure:				Select statistics to display on the figure:				
	X		Y		X		Y	
min	0	<input type="checkbox"/>	0.06111	<input type="checkbox"/>	min	0	9.796e-05	<input type="checkbox"/>
max	10	<input type="checkbox"/>	0.1104	<input type="checkbox"/>	max	10	0.6111	<input type="checkbox"/>
mean	5	<input type="checkbox"/>	0.0897	<input type="checkbox"/>	mean	5	0.4187	<input type="checkbox"/>
median	5	<input type="checkbox"/>	0.09796	<input type="checkbox"/>	median	5	0.4898	<input type="checkbox"/>
mode	0	<input type="checkbox"/>	0.06111	<input type="checkbox"/>	mode	0	9.796e-05	<input type="checkbox"/>
std	2.887	<input type="checkbox"/>	0.01226	<input type="checkbox"/>	std	2.887	0.2017	<input type="checkbox"/>
range	10		0.04932		range	10	0.611	

Figura 4.10: Dados das curvas características.

## 4.8 Discussões

### 4.8.1 Dificuldades experimentais

A princípio o método utilizado nas ligações foi interligar as células DSSCs em série com uma fita adesiva de cobre com aderência bilateral. A utilização da fita é devido o método não exigir altas temperaturas nas superfícies onde há prata, mas não foi eficaz, Figura 4.11.

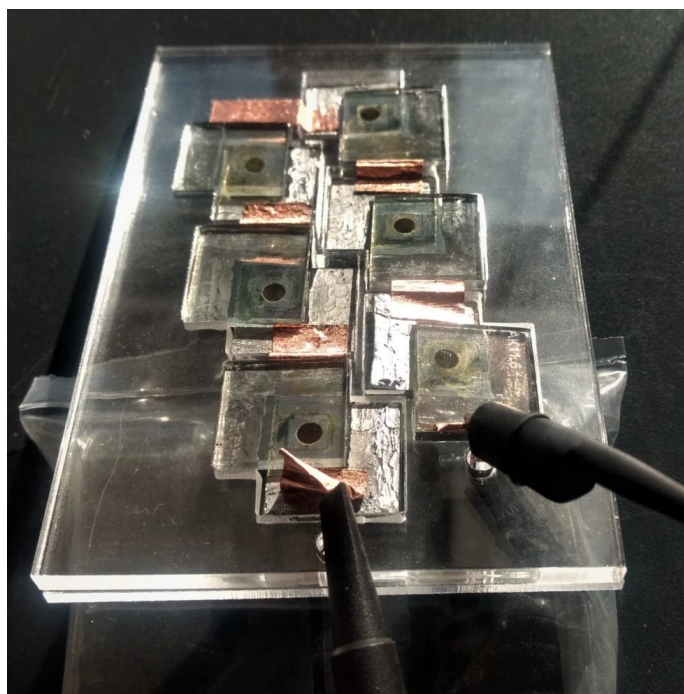


Figura 4.11: Células DSSCs interligadas com fita adesiva de cobre.

### 4.8.2 Substituição da fita

Notou-se que, depois de ter passado duas semanas a fita estava com má aderência, devido a má qualidade e com isso prejudicando o contato e continuidade entre as células. Foi necessário buscar a alternativa de soldadura. E foi possível notar que, ao retirar a fita adesiva de cobre, ela retirou pequenas parcelas de prata anteriormente depositadas na célula, Figura 4.12.

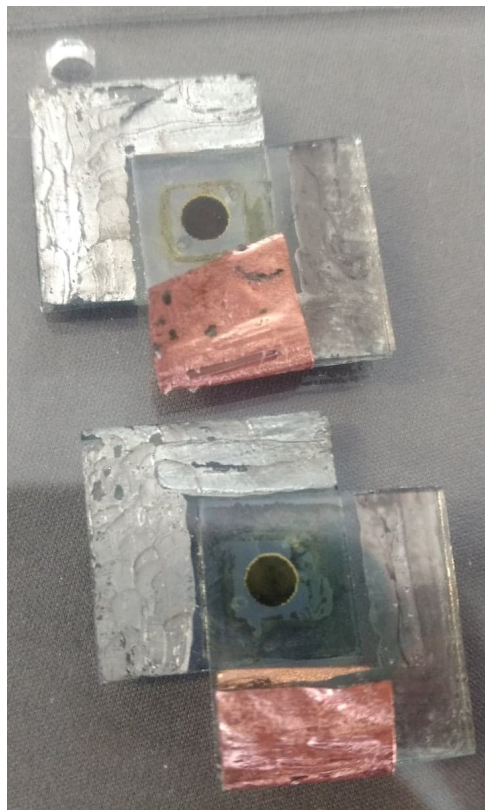


Figura 4.12: Má aderência da fita adesiva de cobre.

### 4.8.3 Onde se foi além dos objetivos iniciais?

O objetivo inicial era trabalhar com células ativadas por corante natural. E com formato diferente como representado na Figura 4.13(a) desenvolvido no IPB e algumas no Parque de Ciência e Tecnologia da Universidade do Porto - UPTEC. Essas células já sofriam algumas degradações dado que foram desenvolvidas em 2015.

Notou-se que as antigas células tenham uma selagem mais frágil tendo uma fuga maior de eletrólito, causando assim uma baixa eficiência devido a tecnologia utilizada. E esse problema foi solucionado com uma produção de novas células desenvolvidas no âmbito de [36] e utilizada nesse trabalho.

Um dos objetivos era colocar uma moldura no módulo e colocar um vidro temperado para proteção climática, e não sofrer avarias devido a chuva, sol, granizo, neve, etc,. Com isso percebemos que haveria a necessidade de retirar o ar que ali estaria, entre o vidro temperado e as células. E ao trabalhar com as células nesse projeto com uma grande minúcia e cuidado, ainda assim não foi possível preservar a integridade física de uma das células, que descolou devido ao manuseio, Figura 4.13(b). Porém por não haver células para reposição, foi decidido não colocar a moldura pelo risco de descolar durante a retirada do ar.

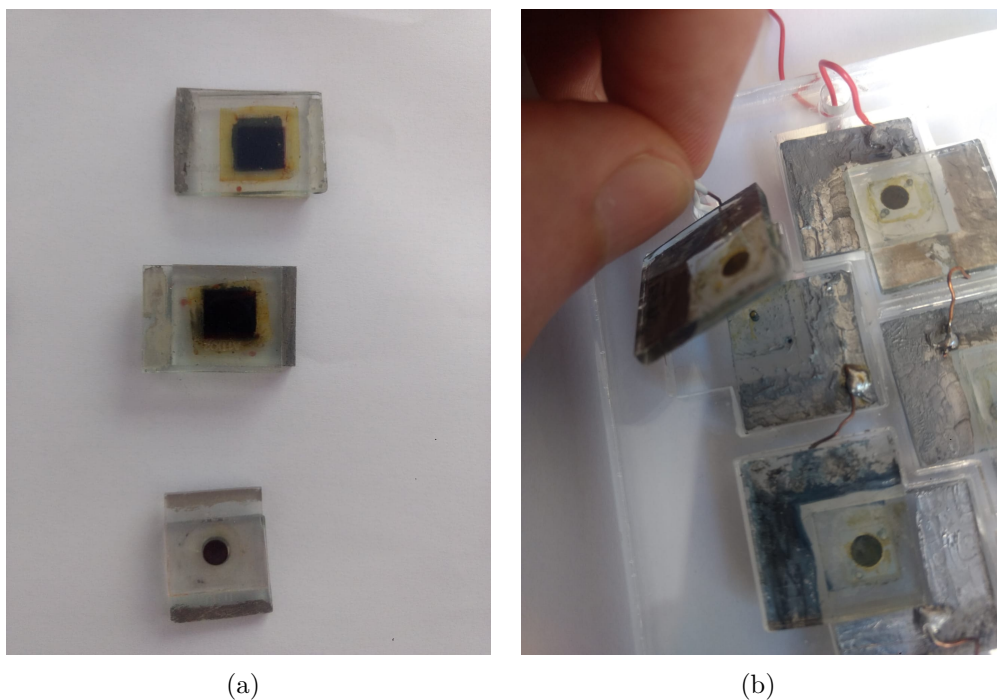


Figura 4.13: (a)Células antigas (b)Avaria na célula devido ao manuseio

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusão

O módulo foi construído mas durante o processo uma das 6 células ficou irremediavelmente danificada, não sendo possível confirmar experimentalmente o trabalho. E tendo em vista o número reduzido para teste, foi decidido não colocar vidro temperado de proteção externa, pelo risco de descolar as células durante a retirada do ar. As dificuldades experimentais foram soldar as extremidades das células garantindo a fixação do fio de cobre e também a continuidade elétrica. A fina camada de prata depositada nas extremidade das células foi a maior adversidade. Quando soldava-se, a alta temperatura retirava pequenas parcelas de prata. A alternativa para garantir contato e continuidade sem danificar o material foi, utilizar uma cola condutora adesiva de prata. Possibilitando executar a ligação série entre as células nas chapas de acrílico. Foi desenvolvido o módulo de acrílico, com dimensões individuais de cada célula e com as limitações de corte da máquina laser.

Notou-se através do levantamento da curva característica  $J_{sc}$ -V, que o ponto de potência máxima está muito abaixo do ponto de potência máxima da curva P-V. No nosso caso ocorre que, a célula com a menor fotocorrente limita o desempenho das demais, reduzindo a eficiência global do módulo. E essa situação de incompatibilidade de características é

chamado de efeito "*mismatch*" (descasamento). Para uma produção em alta escala de módulos fotovoltaicos sensibilizados por polímeros condutores PEDOT:PSS, seria necessário atenção com a seleção das células. Igualdade das células com as mesmas características, corrente, tensão, resistência, para não haver o efeito "*mismatch*", ocorrido aqui.

Esse trabalho rendeu uma apresentação na "IV feira de ciências" promovida pelo Centro de Ciência Viva de Bragança, e participação como orador no 11º PubhD Bragança, ambos apoiado pelo centro de Ciência Viva, IPB, Fundação "la Caixa", Banco BPI e município de Bragança.

## 5.2 Trabalhos futuros

- Aplicar uma moldura no módulo para fixação;
- Aplicar o vidro de proteção e retirar o ar, somente depois de ter melhorado a selagem da célula;
- Aplicar uma selagem mais resistente na célula;
- Aumentar a área do ponto ativo da célula;
- Reduzir a espessura do vidro da célula;
- Melhorar a fixação do metal condutor depositado nos terminais;
- Padronizar o tamanho das células, uma produção maior de células com mesmas características;
- Realizar testes com o módulo em diferentes ângulos azimutal;
- Utilizar um sistema óptico, lentes, espelhos para a concentração de radiação solar, fazendo com que obtenha elevadas correntes elétricas;

# Bibliografia

- [1] M. A. G. João Tavares Pinho, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*, Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro, Brasil: Março, 2014, vol. 1, pp. 47–530.
- [2] P. R. Wolfe, «What is photovoltaics?», em *The Solar Generation: Childhood and Adolescence of Terrestrial Photovoltaics*. IEEE, 2018, ISBN: 9781119425618. DOI: 10.1002/9781119425618.ch2. endereço: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8360687>.
- [3] M. Kaltschmitt, W. Streicher e A. Wiese, *Renewable energy: Technology, economics and environment*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] J. P. Dunlop, *Photovoltaic systems*. American Technical Publishers, Incorporated, 2012.
- [5] *Observatório da energia*, 2020. endereço: <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/energia-em-numeros/portugal/1995/2019/stacked-bar/gwh/1870-1871-1883-1887> (acedido em 30/10/2020).
- [6] M. G. Villalva, *Energia solar fotovoltaica*, 2ªEd. Saraiva Educação SA, 2015, p. 224, ISBN: 9788536509785. endereço: <https://books.google.com.br/books?id=M4diDwAAQBAJ>.
- [7] J. A. Carneiro, «Módulos fotovoltaicos: Características e associações», 2010. endereço: <http://hdl.handle.net/1822/16961>.
- [8] *Célula de silício cristalizado*, fev. de 2017. endereço: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/> (acedido em 22/08/2019).

- [9] S. Satarug, S. H. Garrett, M. A. Sens e D. A. Sens, «Cadmium, environmental exposure, and health outcomes», *Environmental health perspectives*, vol. 118, n° 2, pp. 182–190, 2009.
- [10] A. R. e E. Vicente, «Avaliação de técnicas para redução dos efeitos de sombreamento em painéis fotovoltaicos», jan. de 2018. DOI: 10.17648/coen-2018-89456.
- [11] *Desenvolvimento de células solares*, ago. de 2015. endereço: <https://worldindustrialreporter.com/mitsubishi-chemicals-3m-team-up-to-develop-solar-cell-window-films/> (acedido em 22/08/2019).
- [12] B. Padmanabhan, D. Vasileska, D. K. Schroder e D. Mamaluy, «Modeling of solar cells», tese de doutoramento, Arizona State University, 2008.
- [13] M. Grätzel, «Dye-sensitized solar cells», *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, n° 2, pp. 145–153, 2003.
- [14] *O futuro dos painéis fotovoltaicos*, mai. de 2017. endereço: [https://www.solsticioenergia.com/2017/05/11/o-futuro-dos-paineis-fotovoltaicos/img\\_5878-e1452032406651/](https://www.solsticioenergia.com/2017/05/11/o-futuro-dos-paineis-fotovoltaicos/img_5878-e1452032406651/) (acedido em 29/08/2019).
- [15] A. F. Nogueira, J. R. Durrant e M. A. De Paoli, «Dye-sensitized nanocrystalline solar cells employing a polymer electrolyte», *Advanced Materials*, vol. 13, n° 11, pp. 826–830, 2001.
- [16] L. Davidovich, «The quantum of light and quantum optics», *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 37, n° 4, pp. 4205–1, 2015.
- [17] E. Díaz-Dorado, A. Suárez-García, C. Carrillo e J. Cidrás, «Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes», em *SPEEDAM 2010*, jun. de 2010, pp. 134–139. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542226.
- [18] *Diodos de bypass e hotspots dos módulos fotovoltaicos*, 2019. endereço: <https://www.canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/176-diodo-de-bypass-e-hotspot-modulos-fv> (acedido em 29/12/2019).

- [19] K. Branker, M. J. M. Pathak e J. Pearce, «A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity», *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, vol. 15, n° 9, pp. 4470–4482, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.104. endereço: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02120492>.
- [20] C. Breyer e A. Gerlach, «Global overview on grid-parity», *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, n° 1, pp. 121–136, 2013.
- [21] A. Hemami, «Electronic power converters in wind turbines and solar photovoltaic systems», em. set. de 2017, pp. 617–644, ISBN: 9781315275062. DOI: 10.4324/9781315275062-21.
- [22] A. McEvoy, T. Markvart, L. Castañer, T. Markvart e L. Castaner, *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.
- [23] R. F. Fernandes, «Polímero», *Revista de Ciência Elementar*, vol. 2, n° 1, 2014.
- [24] L. Akcelrud, «Electroluminescent polymers», *Progress in Polymer Science*, vol. 28, n° 6, pp. 875–962, 2003.
- [25] M. d. G. M. M. Antonio Francisco Marques, *Ciências da natureza/ química*, Cultura Acadêmica. São Paulo, Brasil, 2016, vol. 5, p. 276, ISBN: ISBN 978-85-7983-824-8.
- [26] R. Colucci, «Desenvolvimento de um compósito contendo polímero condutor (pedot: Pss) e material ormosil (gptms) com aplicação na fabricação de dispositivos eletroluminescentes», 2016.
- [27] M.-A. De Paoli e R. Menescal, «Polímeros orgânicos condutores de corrente elétrica; uma revisão», *Química Nova*, vol. 9, n° 2, pp. 133–140, 1986.
- [28] R. Farchioni e G. Grosso, *Organic electronic materials: Conjugated polymers and low molecular weight organic solids*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 41.
- [29] A. V. Volkov, K. Wijeratne, E. Mitraka, U. Ail, D. Zhao, K. Tybrandt, J. W. Andreasen, M. Berggren, X. Crispin e I. V. Zozoulenko, «Understanding the capacitance of pedot: Pss», *Advanced Functional Materials*, vol. 27, n° 28, p. 1700329, 2017.

- [30] E. Raphael, «Estudo de eletrólitos poliméricos à base de agar para aplicação em dispositivos eletrocromáticos», tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2010.
- [31] H. J. Lee, J. Lee e S.-M. Park, «Electrochemistry of conductive polymers. 45. nanoscale conductivity of pedot and pedot: Pss composite films studied by current-sensing afm», *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 114, n° 8, pp. 2660–2666, 2010.
- [32] H.-B. Bu, G. Götz, E. Reinold, A. Vogt, R. Azumi, J. L. Segura e P. Bäuerle, «“click”-modification of a functionalized poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(pedot) soluble in organic solvents», *Chemical Communications*, vol. 48, n° 21, pp. 2677–2679, 2012.
- [33] C. Lei, P. Wilson e C. Lekakou, «Effect of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(pedot) in carbon-based composite electrodes for electrochemical supercapacitors», *Journal of Power Sources*, vol. 196, n° 18, pp. 7823–7827, 2011.
- [34] E. Nasybulin, S. Wei, I. Kymissis e K. Levon, «Effect of solubilizing agent on properties of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(pedot) electrodeposited from aqueous solution», *Electrochimica acta*, vol. 78, pp. 638–643, 2012.
- [35] A. Blacha, P. Koscielniak, M. Sitarz, J. Szuber e J. Zak, «Pedot brushes electrochemically synthesized on thienyl-modified glassy carbon surfaces», *Electrochimica Acta*, vol. 62, pp. 441–446, 2012.
- [36] A. Bzainia, «Preparation and ionic transport properties of conductive polymers for dye-sensitized solar cells.», 2019. endereço: <http://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/ns000290/authentication/index.php?url=https%3a%2f%2fsearch.ebscohost.com%2flogin.aspx%3fdirect%3dtrue%26AuthType%3dip%2cshib%2cuid%26db%3dedsrca%26AN%3drcaap.com.ipb.10198.19585%26lang%3dpt-pt%26site%3ded-live%26scope%3dsite>.
- [37] *Greatcellsolar*, 2017. endereço: <https://http://www.greatcellsolar.com/shop/tec7-glass-plates-100mm-x-100mm-1.html> (acedido em 29/10/2019).

- [38] *Everlight chemical industrial co. produtcs eversolar® co-200*, 2011. endereço: <http://eversolar.ecic.com.tw/prod/b4d64aeda05a433984f21811b791ad5c> (acedido em 29/10/2019).
- [39] *Everlight chemical industrial co. products eversolar® co-300*, 2011. endereço: <http://eversolar.ecic.com.tw/prod/6309326123cd429b8f9514f5f9999744> (acedido em 29/10/2019).
- [40] *30 nr-d*, 2011. endereço: <http://www.greatcellsolar.com/shop/30-nr-d.html> (acedido em 29/12/2019).
- [41] *(wer2-o)*, 2011. endereço: <http://www.greatcellsolar.com/shop/wer2-o-reflector-titania-paste.html> (acedido em 29/12/2019).
- [42] *Eversolar® yd2-o-c8*, 2011. endereço: <http://eversolar.ecic.com.tw/prod/43e613555f954378bae1c6bf1284309b> (acedido em 29/12/2019).
- [43] *Platisol*, 2011. endereço: <https://shop.solaronix.com/platisol-t-sp.html> (acedido em 29/12/2019).
- [44] *Características do acrílico*, 2015. endereço: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/belmetal/chapas-acrilico.pdf> (acedido em 29/11/2019).
- [45] *Acrílico*, 2011. endereço: <https://www.indac.org.br/caracteristicas-do-acrilico/> (acedido em 29/12/2019).
- [46] *Fotografia ilustrativa utilizada de um fio condutor*. endereço: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/solid-conductor-2-core-jumper-wires-60395885980.html>.