TÉCNICO LISBOA

Estudo do efeito causado por células solares com fissuras no rendimento dos painéis fotovoltaicos

Rafael Mateus Figueiredo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Professor João Paulo Neto Torres
Professor Carlos Alberto Ferreira Fernandes

Júri

Presidente: Professora Célia Maria Santos Cardoso de Jesus
Orientador: Professor João Paulo Neto Torres
Vogal: Professor João Filipe Pereira Fernandes

Setembro 2021

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.

Para o meu avô Bade

Agradecimentos

A realização desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda de algumas pessoas assim como todos estes anos passados no Técnico teriam sido ainda mais penosos sem o seu suporte.

Queria agradecer a toda a minha família, em especial aos meus avós, pais e irmã por todo o apoio dado ao longo desta caminhada.

Uma palavra de agradecimento para o meu orientador, o professor João Torres pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

Um agradecimento para o Ricardo Lameirinhas por toda a assistência, preocupação e motivação dada ao longo de todo este processo.

Queria também agradecer à Leonor e ao Rodrigo pela amizade já longa e por toda a companhia e suporte dados nestes anos de vida académica.

Não podia deixar de mencionar a Ana por todos os bons conselhos ao longo dos anos.

Quero deixar também um agradecimento ao meu grupo de amigos, os *Olheiros*, pela amizade, por todas as histórias e aventuras vividas nestes anos.

Por fim, um obrigado aos restantes colegas e amigos, em especial aos da *Casa Rosinha*.

Abstract

Renewable energies are increasingly playing an important role in the world's energy supply. Technologies must be studied and improved in order to maximize their productivity. In photovoltaic modules some problems arise, which lead to a reduction in efficiency affecting energy production. This leads due to several factors, such as the weather conditions to which they are exposed or a bad installation for example. This leads to the appearance of some failures in the panels, such as *cracking*.

A practical study was made testing the effect of *cracking* on several solar cells, of different technologies, *perovskite*, *CIGS*, amorphous silicon and crystalline silicon cells. The aim was to verify the behavior of cells when induced different levels of *cracking*, recording the cell parameters along the different processes. With the results obtained, it was possible to see the negative effect of *cracking* on the performance of solar cells, with a reduction in parameters.

In parallel, an electrical model was created where it was possible to simulate the behavior of cells through the curves *I-U*, based on the ideal model *1m3p*. The results were positive, and it was possible to represent a crystalline silicon cell with some precision.

Keywords

Cracking; Solar cell; Efficiency; Model;

Resumo

As energias renováveis têm cada vez mais um papel importante no abastecimento mundial de energia. As tecnologias têm de ser estudadas e aperfeiçodas de modo a aumentar ao máximo a sua produtividade. Nos módulos fotovoltaicos surgem alguns problemas que levam a uma redução de eficiência afetando a produção de energia. Tal acontece devido a vários fatores, tais como as condições climatéricas aos quais estes são expostos ou devido a uma má instalação, por exemplo, levando ao aparecimento de algumas falhas nos painéis, como é o caso do *cracking*.

Assim, foi feito um estudo prático do efeito do *cracking* em diversas células solares, de diferentes tecnologias como células de *perovskita*, *CIGS*, sílicio amorfo e silício cristalino. O objetivo é verificar o comportamento das várias células quando induzidas a diferentes níveis de *cracking*, registando os parâmetros da célula ao longo dos diferentes processos. Com os resultados obtidos, foi possível verificar o efeito negativo do *cracking* no desempenho das células solares, havendo uma redução acentuada dos parâmetros.

Em paralelo, foi criado um modelo elétrico onde fosse possível simular o comportamento das células através das curvas *I-U*, tendo como base o modelo ideal *1m3p*. Os resultados foram positivos, tendo sido possível representar a célula de silício cristalino com alguma precisão.

Palavras Chave

Cracking; Célula solar; Eficiência; Modelo;

Conteúdo

1 Introdução **1**

1.1 Motivação 2

1.2 Objetivos 2

1.3 Energias renováveis 2

1.4 Energia solar 4

1.5 Tecnologias fotovoltaicas 5

2 Problemas **7**

2.1 Falha no vidro 8

2.2 Falhas nas camadas encapsulantes 9

2.2.1 Descoloração 9

2.2.2 Delaminação 10

2.3 Falhas nas células solares 11

2.3.1 *Hotspots* 11

2.3.2 *Cracking* 12

2.4 Outros problemas 13

2.4.1 *Snail trails* 13

2.4.2 Micro arcos 13

2.4.3 Quebra da estrutura 14

2.4.4 Falha no díodo bypass 14

2.4.5 Falha na caixa elétrica 14

3 Método e resultados experimentais **15**

3.1 Método experimental 16

3.1.1 Método experimental 17

3.2 Testes e resultados experimentais 19

3.2.1 Célula de *perovskita* 19

3.2.1.A Teste 20

3.2.1.B Resultados experimentais 20

3.2.2 Painel de *perovksita* . . . 22
3.2.2.A Teste . . . 22
3.2.2.B Resultados experimentais . . . 23
3.2.3 Célula *CIGS* . . . 25
3.2.3.A Teste . . . 25
3.2.3.B Resultados experimentais . . . 25
3.2.4 Célula silício amorfo . . . 27
3.2.4.A Teste . . . 27
3.2.4.B Resultados experimentais . . . 28
3.2.5 Célula de silício cristalino . . . 29
3.2.5.A Teste . . . 30
3.2.5.B Resultados experimentais . . . 31

4 Modelo do cracking **35**
4.1 Modelo célula solar ideal . . . 36
4.2 Modelo do *cracking* . . . 37
4.3 Resultados do modelo do *cracking* . . . 38

5 Conclusão **45**
5.1 Conclusão . . . 46

Bibliography **49**

6 Anexo **53**
6.1 Valores da fonte de tensão e resistência para célula de *perovksita* . . . 54
6.2 Valores da fonte de tensão e resistência para painel de *perovksita* . . . 58
6.3 Valores da fonte de tensão e resistência para célula *CIGS* . . . 63
6.4 Valores da fonte de tensão e resistência para célula silício amorfo . . . 65
6.5 Valores da fonte de tensão e resistência para célula silício cristalino . . . 67

Lista de Figuras

1.1 Energia renovável gerada em todo o mundo [1]. 3
1.2 Percentagem de energia produzida por energias renováveis [1]. 4

2.1 Quebra no vidro devido ao aperto da braçadeira [2]. 9
2.2 Painel com vidro estilhaçado [3]. 9
2.3 Painel acastanhado devido à descoloração [4]. 10
2.4 Painel afetado pela delaminação [5]. 11
2.5 Painel afetado pelos *hotspots* [6]. 12
2.6 Painel afetado pelos *snail trails* [7]. 13
2.7 Má soldadura que leva aos micro arcos [2]. 13
2.8 Quebra da estrutura [2]. 14

3.1 Curvas I-U e P-U. 16
3.2 Circuito equivalente da montagem experimental. 17
3.3 Montagem para o estudo da célula *CIGS*. 18
3.4 Montagem para o estudo do painel de *perovskita*. 18
3.5 Célula de *perovskita* da empresa *ininityPV* [8]. 19
3.6 Célula de *perovskita* ao fim de submetida a vários *cracks*. 20
3.7 Curva *I-U* da célula de *perovskita*. 21
3.8 Curva *P-U* da célula de *perovskita*. 21
3.9 Painel de *perovskita* ao fim da indução de *cracks*. 23
3.10 Curva *I-U* do painel de *perovskita*. 23
3.11 Curva *P-U* do painel de *perovskita*. 24
3.12 Célula *CIGS* exposta aos múltiplos *cracks*. 25
3.13 Curva *I-U* da célula *CIGS*. 26
3.14 Curva *P-U* da célula *CIGS*. 26
3.15 *Cracking* efetuado na célula de silício amorfo. 27

3.16 Curva *I-U* da célula de silício amorfo. 28
3.17 Curva *P-U* da célula de silício amorfo. 28
3.18 Célula de silício cristalino, modelo *AK50X50*. 29
3.19 Célula de silício cristalino ao fim de várias tentativas de indução de *cracks*. 30
3.20 Traseira da célula de silício cristalino ao fim de várias tentativas de indução de *cracks*. . . 31
3.21 Processo de indução de *cracking* na célula de silício cristalino. 31
3.22 Curva *I-U* da célula de silício amorfo. 32
3.23 Curva *P-U* da célula de silício amorfo. 32

4.1 Circuito equivalente da célula solar (modelo *1m3p*). 36
4.2 Circuito do *cracking* para *n* pontos. 38
4.3 Curva *I-U* da célula *CIGS* usando o modelo do *cracking*. 39
4.4 Curva *I-U* do painel de *perovskita* usando o modelo do *cracking*. 40
4.5 Curva *I-U* da célula de *perovskita* usando o modelo do *cracking*. 41
4.6 Curva *I-U* da célula de silicio amorfo usando o modelo do *cracking*. 42
4.7 Curva *I-U* da célula de silicio cristalino usando o modelo do *cracking*. 43

Lista de Tabelas

3.1 Parâmetros de precisão do *fitting* da célula de *perovskita*. 21
3.2 Parâmetros da célula de *perovskita* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*. . . 22
3.3 Parametros de precisão do *fitting* do painel de *perovskita*. 24
3.4 Parâmetros do painel de *perovskita* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*. . . 24
3.5 Parâmetros da célula *CIGS* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*. 26
3.6 Parametros de precisão do *fitting* da célula de sílicio amorfo. 29
3.7 Parâmetros da célula de silício amorfo com a indução dos diferentes níveis de *cracking*. . 29
3.8 Parametros de precisão do *fitting* da célula de sílicio cristalino. 33
3.9 Parâmetros da célula de silício cristalino com a indução dos diferentes níveis de *cracking*. 33

4.1 Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula *CIGS*. . . 39
4.2 Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para o painel de *perovskita*. 40
4.3 Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de *perovskita*. 41
4.4 Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de silício amorfo. 42
4.5 Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de silício cristalino. 43

6.1 Valores da fonte de tensão e resistência para a célula de *perovskita*. 54
6.1 Valores da fonte de tensão e resistência para a célula de *perovskita*. 55
6.3 Valores da fonte de tensão e resistência para o painel de *perovksita*. 58
6.3 Valores da fonte de tensão e resistência para o painel de *perovksita*. 59
6.6 Valores da fonte de tensão e resistência para célula *CIGS*. 63
6.8 Valores da fonte de tensão e resistência para célula de silício amorfo. 65
6.10 Valores da fonte de tensão e resistência para célula de silício cristalino. 67

Acrónimos

CIGS	disseleneto de cobre-índio-gálio
CIS	selenido de cobre-índio
I-U	corrente-tensão
MPP	ponto de potência máxima
P-U	potência-tensão
STC	condições standard de teste

1

Introdução

Conteúdo

1.1 Motivação 2
1.2 Objetivos 2
1.3 Energias renováveis 2
1.4 Energia solar 4
1.5 Tecnologias fotovoltaicas 5

1.1 Motivação

Atualmente, a humanidade enfrenta um grande problema com os combustíveis fósseis, colocando-se inúmeras questões sobre a sua utilização. Tudo está dependente deles e o tempo que resta até acabar toda essa energia ainda não é conhecida com precisão, havendo apenas estimativas mais ou menos otimistas. A sua utilização leva a um dos grandes problemas que o planeta terra está a enfrentar e que afeta toda a sua biodiversidade, as tão faladas alterações climáticas.

A energia solar é uma das mais abundantes e fácil para ser usada na geração de energia. Para a sua captação, os sistemas fotovoltaicos, com perspetiva de vida de aproximadamente vinte e cinco anos, estão a tornar-se cada vez mais como uma opção muito atraente e viável. Portanto, é importante ter um melhor entendimento de quais são os limites desta tecnologia e de encontrar novas formas de superá-los. Como tal, é muito notável conhecer os problemas que afetam os sistemas fotovoltaicos. Entre eles, destacamos as condições climatéricas, uma má fabricação ou mau uso e transporte dos painéis como sendo os principias motivos que influenciam negativamente os sistemas fotovoltaicos. Esses fatores poderão causar falhas nos painéis, como por exemplo o *cracking*, *hotspots*, delaminação ou quebra do vidro. Estes problemas podem levar a perdas de energia, diminuindo o desempenho do sistema. Para além disso, o aumento da degradação do material assim como o aumento do risco de segurança para o ser humano, leva ao decréscimo de vida útil do painel. É relevante entender melhor as causas desses problemas e como as superar de modo a melhorar o desempenho do painel fotovoltaico.

1.2 Objetivos

Esta dissertação pretende estudar de que maneira o *cracking* afeta o desempenho de algumas células solares. Os testes serão feitos com a finalidade de comparar a eficiência das células saudáveis e das células degradadas, depois de terem sido submetidas a uma degradação de modo a verificar como é que o comportamento delas se altera e de que modo o seu funcionamento é afetado. Por fim idealizou-se um modelo elétrico com o qual fosse possível representar o comportamento das células solares testadas.

1.3 Energias renováveis

A utilização das energias renováveis tem vindo a aumentar em todo o globo, figura 1.1, pois existe cada vez mais uma preocupação ecológica assim como um desenvolvimento tecnológico. Tudo isto faz com que estejam a ter cada vez mais um papel importante na produção de energia em todo o globo. Os benefícios que oferecem, em detrimento dos desvantagens da energia convencional, estão a ser

cada vez mais apreciados. O facto de os diferentes recursos, como o sol, o vento e a água serem abundantes, infinitos e estarem acessíveis a todos e em toda a parte torna estas energias cada vez mais atrativas e com grande potencial.

Outro aspeto positivo das energias renováveis é que a sua produção, na maioria dos casos, é feita com recurso a sistemas modulares. Com estes sistemas existe uma maior facilidade em aumentar a produção consoante a evolução do consumo. A energia tanto pode ser produzida por pequenos produtores, como por uma produção centralizada que, apesar de ter um investimento inicial mais elevado que as energias convencionais, os seus custos de manutenção são muito mais baixos, juntando ainda o facto do preço pago pelo combustível nestas energias ser nulo e a tendência dos custos das tecnologias baixarem com a sua evolução. Atualmente, estima-se que cerca de 28% da energia consumida mundialmente seja proveniente de energias renováveis [1, 9], visível na figura 1.2.

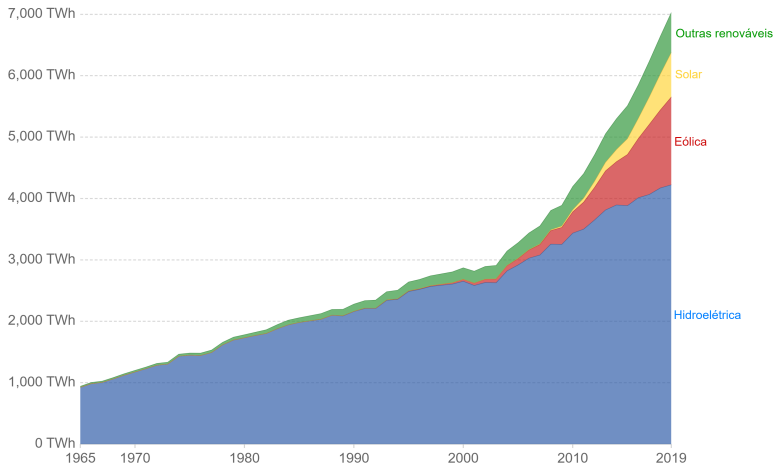

Figura 1.1: Energia renovável gerada em todo o mundo [1].

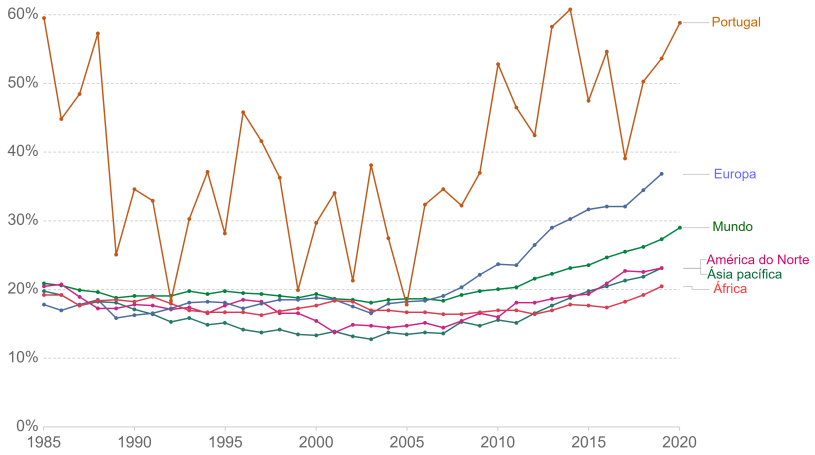

Figura 1.2: Percentagem de energia produzida por energias renováveis [1].

1.4 Energia solar

Relativamente à análise energia solar ou energia solar fotovoltaica, esta é gerada diretamente através da conversão da luz solar em eletricidade. Essa conversão acontece devido ao conhecido efeito fotoelétrico, descoberto por *Edmond Becquerel* em 1839. Os fotões dos raios, ao atingirem as células são capturadas pelos eletrões. Quando uma certa quantidade de energia é recebida, eles ficam excitados fazendo-os subir para um nível superior de energia, rompendo as suas ligações, o que os permite circular livremente no material. Uma junção p-n é necessária para que esse processo funcione. A junção p é carregada positivamente, a qual se denomina de buracos e a junção n é carregada negativamente com eletrões. Quando as ligações são quebradas e os eletrões se movem no material, o par eletrão-buraco é formado passando pela junção p-n criando corrente. [10].

Esta energia, para além de todas as vantagens referidas em relação aos problemas ambientais, não precisa de ser extraída nem transportada para ser refinada. Para além disto, quando comparada com as outras duas energias renováveis mais usadas no mundo, a eólica e a hídrica, vemos que pode ser aplicada em qualquer parte, mesmo nas zonas urbanas sem qualquer poluição sonora ou mesmo visual comparando com a eólica. Quanto à hídrica, existe um grande impacto na natureza, havendo a necessidade de construções no rio, abate de parte da floresta, altos custos de manutenção e em caso de seca a produção baixa drasticamente. Por fim, alguns exemplos onde a energia solar já é muito usada sem ser na geração de eletricidade para a rede, é o caso dos veículos espaciais, onde os painéis estão sempre virados para o sol a gerar energia para os alimentar constantemente. Ou no caso da rega das plantações ou consumo doméstico em zonas mais rurais, através da alimentação de bombas de água. Existe, também, na dessalinização (transformação de água do mar em água potável), assim como em telecomunicações para alimentar os equipamentos eletrónicos em zonas isoladas. [11].

1.5 Tecnologias fotovoltaicas

Existe uma grande variedade de tecnologias fotovoltaicas, assim como uma diversidade de materiais usados. Pode-se, assim, fazer-se uma divisão em três gerações de tecnologias, em que a grande diferença está no material usado. De uma maneira geral, pode considerar-se a primeira geração aquela onde o silício é o material preponderante. A segunda geração é a das tecnologias mais conhecidas por *thin film*, onde se usam camadas finas do material fotossensível, como é o caso do silício amorfo ou o telureto de cádmio. Na terceira geração também são usadas tecnologias *thin film* mas com pouca expressão no mercado e que ainda estão a ser aprimoradas, como é o exemplo das células orgânicas ou células de *perovksita*.

A primeira geração refere-se à das células de silício. A sua conversão de energia tem eficiências com máximo de 25%. É um material abundante e não tóxico, que requer pouca manutenção e tem uma vida expectável a rondar os vinte e cinco anos tendo assim um valor a rondar os 90% de mercado fotovoltaico. Existem as células de silício monocristalino fabricadas através do processo de *Czochralski*, usado também na produção de circuitos integrados. Para além das células de silício monocristalino, foram criadas também as células de silício policristalino, onde a diferença está no processo de cristalização na sua fabricação. Estas células, apesar de terem uma eficiência mais baixa quando comparadas com as monocristalinas, têm custos de produção mais baixos visto ser menos pura, necessitando de menos energia. Assim, têm uma contruibuição menor para o efeito de estufa no planeta. [11–13]

A segunda geração surgiu com o aparecimento das então chamadas células *thin film*. Numa tentativa de reduzir ainda mais os custos de produção, apareceram estas células que necessitam de menos material para absorver a mesma quantidade de luz solar, quando comparadas com células cristalinas, têm um processo de produção menos demorado e ainda a possibilidade de serem flexíveis. Contudo a sua eficiência ronda os 12%, tendo também uma esperança de vida de vinte e cinco anos. [11, 13]

Uma das primeiras a surgir, foi a célula de silício amorfo. A grande vantagem em relação às células existentes era ter uma maior *band gap* permitindo, assim, uma melhor absorção no espectro visível. Apesar disso têm uma eficiência mais baixa, por volta de 9% e uma degradação inicial alta. [14]

Com o desenvolvimento da tecnologia, acabaram por aparecer as células de telúrio de cádmio. Estas células tornaram-se desde logo muito atrativas devido ao processo de produção ser eficiente, terem um preço bastante atrativo e o telúrio ser facilmente adquirido. Acrescentando a isto, tem a *band gap* ideal, que leva a um grande coeficiente de absorção. Porém, tem um grande ponto negativo, no que se refere à toxicidade do cádmio, sendo este o maior impedimento para um maior desenvolvimento da tecnologia. [11, 15]

Por fim, surgiram as células de disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e as de selenido de cobre-índio (CIS). Estas células também têm um grande coeficiente de absorção e têm a maior eficiência entre as células *thin film*, nas células de pequena área de laboratório. Um dos problemas advém da sua

pequena dimensão, visto que quando se compara a eficiência em larga escala, esta é menor, devido à dificuldade que existe em criar uniformidade nas camadas. Outro ponto negativo é que ocorre uma grande degradação devido à água, alterando a natureza do índio. Por fim, a existência de cádmio numa das camadas, com a sua toxicidade é outro entrave na tecnologia. [16]

A grande diferença entre a primeira e segunda geração com a terceira, é que nesta em vez de a maior preocupação ser a diminuição dos custos é a de que estas tecnologias querem ultrapassar o limite de *Shockley–Queisser*. Este limite traduz a máxima eficiência na conversão elétrica de uma célula. Por exemplo, caso uma célula esteja exposta a energia solar nas condições standard de teste (STC), com 1000 w/m^2, apenas 337 w/m^2 poderiam ser usados para serem convertidos, dando uma eficiência de 33,7%. [17]

Com a terceira geração apareceram as células orgânicas. Estas células continuam a ser do tipo *thin film* e são compostas por semicondutores orgânicos, como pequenas moléculas ou alguns polímeros. Têm um custo de produção menor que as alternativas, já que são maioritariamente feitas de plástico, tornando o processo de fabricação mais rápido e menos complexo. O facto de serem feitas com plástico dá-lhes uma grande flexibilidade e transparência. Contudo, degradam-se rapidamente e têm um índice de eficiência mais baixo que as células de silício. [15]

Atualmente, uma das células mais promissoras é a célula de *perovskita*, pois demonstra potencial para ter uma alta eficiência na conversão de energia e com custos também reduzidos. A tecnologia usada nestas células deriva da sensibilização por corante, método usado em algumas tecnologias desta geração. De uma maneira geral, pode considerar-se comp sendo uma tecnologia híbrida com materiais tanto orgânicos como inorgânicos, com o corante a ser posto na camada superior para aumentar a absorção de energia solar. No entanto, as células de *perovskita* só começaram a chamar a atenção com a mudança do seu material condutor, onde a sua eficiência subiu de 4% para 18%. [18] Atualmente já existem células de *perovskita* com eficiência a rondar os 25%. [19] Em contrapartida, na maioria destas células, o chumbo é um dos seus constituintes e a sua elevada toxicidade durante todo o processo tanto de fabricação, como de instalação é o seu ponto negativo. Para além disso, as células de *perovskita* degradam-se rapidamente devido a radiação ultravioleta e à humidade. [20]

2

Problemas

Conteúdo

2.1 Falha no vidro 8

2.2 Falhas nas camadas encapsulantes 9

2.3 Falhas nas células solares 11

2.4 Outros problemas 13

Este capítulo vai mostrar diferentes tipo de problemas que afetam as células solares e os painéis fotovoltaicos. Apesar desta dissertação ter como objetivo estudar o efeito do *cracking* na eficiência das células solares, é importante conhecerem-se outros problemas que afetam os painéis solares. É preciso, então, perceber que existe um problema ou uma falha quando a saúde humana é posta em risco ou quando deixa de haver um bom funcionamento do sistema, comprometendo o seu rendimento. Estas falhas podem surgir em qualquer componente ou camada da célula levando a diferentes problemas e a diferentes tempos de degradação. Na maioria dos casos, a situação climatérica do local onde está instalado o sistema é a principal causa dos defeitos. Chuva, neve, vento, granizo, descargas atmosféricas são alguns exemplos, assim como a proximidade da zona marítima ou de uma zona mais seca.

2.1 Falha no vidro

O maior problema que acontece com o vidro dos painéis solares, é a sua rutura. Esta acontece devido a diferentes fatores, tais como má fabricação do vidro, mau transporte, má manutenção, má montagem do painel ou má aplicação do painel no local de exposição solar, fatores ambientais, entre outros. O maior risco adjacente a isto é a segurança para o ser humano, podendo expor materiais tóxicos caso existam na constituição das células solares assim como material cortante. Em termos da construção do painel, é comum as braçadeiras levarem à quebra do vidro, ou por terem sido escolhidas braçadeiras erradas, por serem postas em sítios menos corretos ou devido a uma má aplicação, com parafusos muito apertados. Estas situações levam à diminuição do rendimento do sistema, pois à partida vai existir menos radiação solar a ser absorvida pelas células devido ao facto do vidro estalado bloquear essa passagem. Outra situação que não está ligada à rutura do vidro, mas aparece sobre ele e também afeta o rendimento do painel, é o caso da acumulação de sujidade, poeira ou até mesmo excrementos de animal. Para além da diminuição do *output* do painel, vai haver um aumento da temperatura do mesmo, aumentando a velocidade de degradação de todos os seus componentes assim como levando ao aparecimento de outros problemas que irão ser referidos posteriormente, como é o caso dos *hotspots*. Por fim, também existe a corrosão que o vidro sofre. A humidade ou água da chuva pode corroer o próprio vidro diminuindo a transmitância do mesmo, levando assim a perdas no rendimento do sistema. Nas figuras 2.1 e 2.2 podemos ver exemplos de uma braçadeira demasiado apertada levando à quebra do vidro assim como um painel estilhaçado. [2, 21, 22]

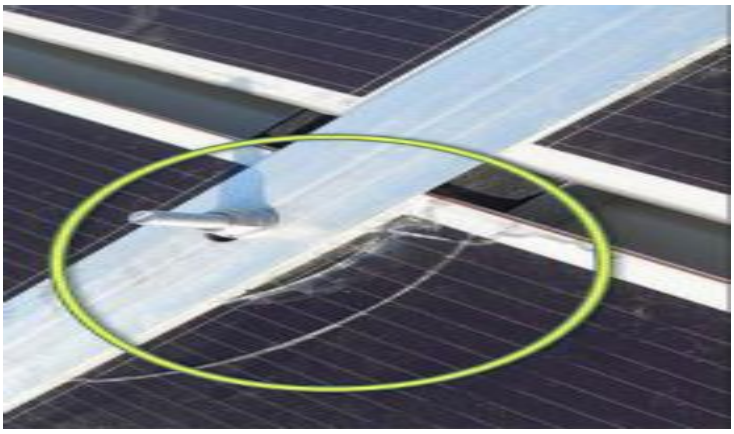

Figura 2.1: Quebra no vidro devido ao aperto da braçadeira [2].

Figura 2.2: Painel com vidro estilhaçado [3].

2.2 Falhas nas camadas encapsulantes

2.2.1 Descoloração

A descoloração surge na camada encapsulante, com ela a mudar de cor, onde algumas áreas do painel começam a ficar amareladas ou acastanhadas, figura 2.3, reduzindo assim a produção de corrente no sistema, visto que há uma menor área saudável com raios solares a serem absorvidos pelas células. Aqui também existe um aumento de temperatura o que vai aumentar a degradação das células presentes no painel. [22, 23]

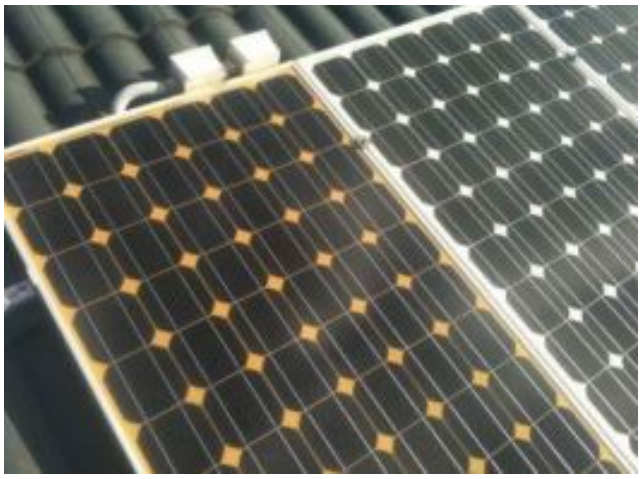

Figura 2.3: Painel acastanhado devido à descoloração [4].

2.2.2 Delaminação

A delaminação é um problema reconhecível pelo tipo de formas que cria no painel, como uma espécie de bolhas ou mudanças de cor em algumas zonas, ficando algo esbranquiçadas, figura 2.4. Pode aparecer em várias zonas do painel, entre a camada encapsulante e as células, entre a camada encapsulante e o vidro ou na parte traseira do painel. Esta situação, entre a camada encapsulante e o vidro, deve-se à falta de adesão entre as duas camadas, criada devido a alguma falha na sua montagem. Quando a delaminação acontece com as células, normalmente aparece à volta do barramento que percorre uma certa linha de células. Como é o busbar que faz o transporte da corrente esse fluxo pode criar algum resíduo que origina alguma reação química e pode libertar algum gás. Outra razão apontada é o aparecimento de água que entre o arrefecimento e aquecimento do painel condensa ou evapora. Isto faz com que aumente a degradação das linhas afetadas, reduzindo, assim, o rendimento do painel. Acrescentando a estes fatores, as manchas que surgem também vão levar a uma menor absorção de raios solares. Em relação à delaminação surgir na parte traseira, isto explica-se devido à libertação de gás que não consegue ser expelido para o exterior formando assim bolhas na parte traseira do painel. No caso da traseira do painel o maior problema é a segurança, pois em termos de performance pouco ou nada é afetada. [2, 21, 22, 24]

Figura 2.4: Painel afetado pela delaminação [5].

2.3 Falhas nas células solares

2.3.1 *Hotspots*

Um *hotspot*, como o nome indica, é uma zona do painel em que se verifica um aumento significativo da temperatura. Tal acontece devido a situações internas ou externas ao painel. Internamente, quando existe um defeito nas células durante a sua fabricação, sendo estes defeitos permanentes, afetando o sistema constantemente. Externamente devido a uma parte do painel ficar afetado por sombra por causa da sujidade ou a árvores durante algumas horas no dia, por exemplo. Neste caso, os *hotspots* são passageiros, não causando danos permanentes no sistema. Contudo, ambos os casos vão aumentar a degradação dos componentes do painel e reduzir a sua eficiência. Nos casos mais graves, é possível observar os *hotspots* como pontos já queimados ao longo das células afetadas, figura 2.5. Isto acontece quando a célula solar é forçada a estar em polarização inversa e em vez de estar a produzir energia passou a dissipar essa energia sobre a forma de calor nesses pontos. [25, 26]

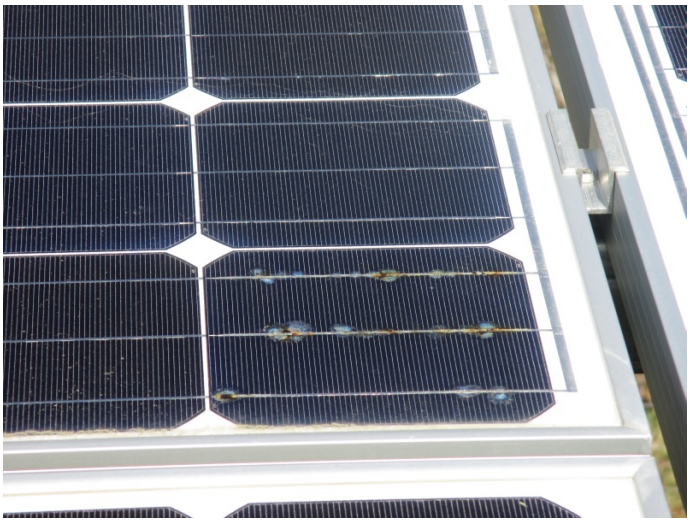

Figura 2.5: Painel afetado pelos *hotspots* [6].

2.3.2 *Cracking*

O *cracking* é um conjunto de fissuras que aparecem nas células e que de um modo geral vão reduzir o rendimento da célula e consequentemente de todo o painel onde esteja inserida. Numa tentativa de poupar recursos, a espessura das células tem vindo a diminuir o que tem contribuído para o aparecimento do *cracking*. Este tanto pode ocorrer durante a produção das células como no seu transporte, devido à excessiva vibração, ou instalação propriamente dita. Em caso de situações climatéricas mais adversas, por exemplo neve excessiva ou vento forte pode também levar à formação do *cracking*. É possível caracterizar o *crack* consoante a sua direção em relação ao *busbar*, perpendicular, paralelo, diagonal ou multi-direcional. Esta denominação é importante, pois consoante a geometria da célula e as ligações entre elas, mais ou menos prejudicial irá ser esse *cracking*, sendo normalmente a diagonal o caso mais grave, o que leva a grande perda de rendimento. Para além disso, são também caracterizadas por exteriores caso a camada exterior esteja também danificada ou interiores se tal não se verifique. Por fim, caracterizam-se em relação ao seu tamanho. *Crack* quando são visíveis a olho nu ou *micro crack* quando é preciso usar métodos óticos para se efetivar a sua existência. O maior problema que daqui advém é o facto de parte da célula ficar desconetada deixando de produzir energia, reduzindo-se assim a eficiência geral do painel. Já no *micro crack* tal pode não acontecer, existindo sempre algum contacto, mas que acaba por levar a perdas, estas mais difíceis de confirmar e de quantificar. [27–30]

2.4 Outros problemas

2.4.1 *Snail trails*

Os *snail trails* são umas pequenas linhas escuras que surgem ao longo da célula, figura 2.6, constituídas por partículas de prata provenientes dos *fingers* das células. Pensa-se que podem surgir devido aos micro *cracks* que afetam as células. Para além disso podem também, fazer surgir delaminação ao longo das suas linhas. [31]

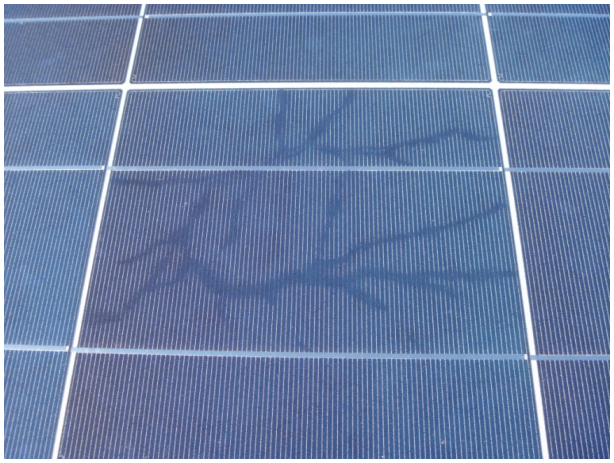

Figura 2.6: Painel afetado pelos *snail trails* [7].

2.4.2 Micro arcos

Os micro arcos aparecem nas ligações entre as linhas de células ou entre as células. Isto acontece devido a um fraco processo de soldadura levando assim a uma baixa condutividade elétrica. Contudo, pode levar a uma quebra total do rendimento do painel, sendo este o principal problema. [2]

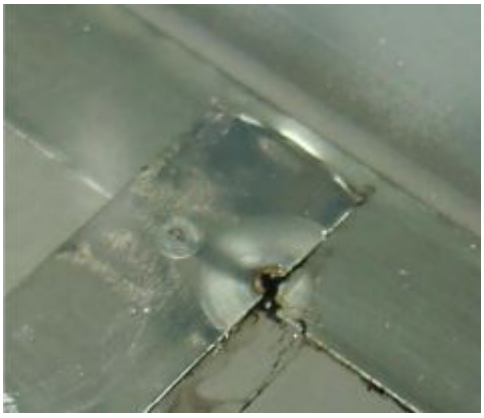

Figura 2.7: Má soldadura que leva aos micro arcos [2].

2.4.3 Quebra da estrutura

O quadro que suporta o painel partir é um problema muito comum, principalmente nas zonas mais nevosas. Com o acumular de neve sobre o painel, figura 2.8, o peso extra faz com que a estrutura quebre, inutilizando o painel, enquanto tal não for solucionado ou em caso extremo quebrar o painel deixando-o completamente sem uso. [2]

Figura 2.8: Quebra da estrutura [2].

2.4.4 Falha no díodo bypass

O díodo bypass tem como objetivo reduzir a energia perdida na sua produção devido ao sombreamento indevido nas células, assim como evitar corrente reversa superior à que a célula consegue suportar. Assim, evita estragos nas diferentes linhas de células. Este díodo é muito sensível e deve ser manuseado com muito cuidado para não haver danos, prevendo problemas no futuro. É complicado detetar quando uma falha está associada exclusivamente ao díodo, tal só é possível comparando a curva característica das diferentes células com a expectável, o que não assegura uma certeza absoluta. Por vezes, também surgem hotspots referidos anteriormente. [2]

2.4.5 Falha na caixa elétrica

A caixa elétrica protege as ligações do painel com os terminais situados exteriormente. Uma má ligação entre os cabos pode levar a um aumento da hipótese de existir um arco elétrico, colando assim o painel com risco de ser afetado por algum incêndio que possa surgir na caixa. Para além disto, com o uso de uma caixa de má qualidade ou mal construída, pode haver o risco da infiltração de água, corroendo as ligações o que coloca em causa a produção de todo o painel. Por fim, uma má colocação da caixa pode levar a que esta se solte, danificando ou partindo as ligações. [2]

3

Método e resultados experimentais

Conteúdo

3.1 Método experimental 16
3.2 Testes e resultados experimentais 19

3.1 Método experimental

Neste capítulo encontra-se a descrição de todo o método experimental com todo o material usado nos diversps estudos realizados, assim como, a descrição dos resultados obtidos. Em paralelo, foi usado o programa *MATLAB* para auxiliar no processamento dos dados. Todos os testes foram realizados em laboratório. O principal objetivo dos ensaios é perceber o impacto do *cracking* no desempenho da célula solar. Os testes foram feitos em várias células solares, células essas de diferentes tecnologias para assim se abranger um maior leque de objeto de estudo. Os testes laboratoriais foram produzidos em células e painel orgânico de *perovksita* e em células de CIGS. Por fim usaram-se células de silício e de silício amorfo flexível.

Com as medições efetuadas nos diferentes graus de degradação de cada célula foi então possível traçar as curvas corrente-tensão (I-U) e potência-tensão (P-U), obtendo assim os restantes parâmetros elétricos. A curva *I-U* mostra a relação entre a corrente e a tensão. Os seus valores nos eixos são a corrente em curto circuito (*Isc*), e a tensão em circuito aberto (*Voc*). A partir desta curva é possível obter então a curva *P-U*, através da equação 3.1, onde se obtém a potencia como sendo o resultado da tensão vezes a corrente, através da multiplicação ponto a ponto.

$$P = U \times I \tag{3.1}$$

Com essa curva traçada fica visível o ponto de potência máxima (MPP), onde é possível retirar o valor de potência máxima, Pmax e o respetivo ponto de tensão e corrente. Tudo isto está representado na figura 3.1.

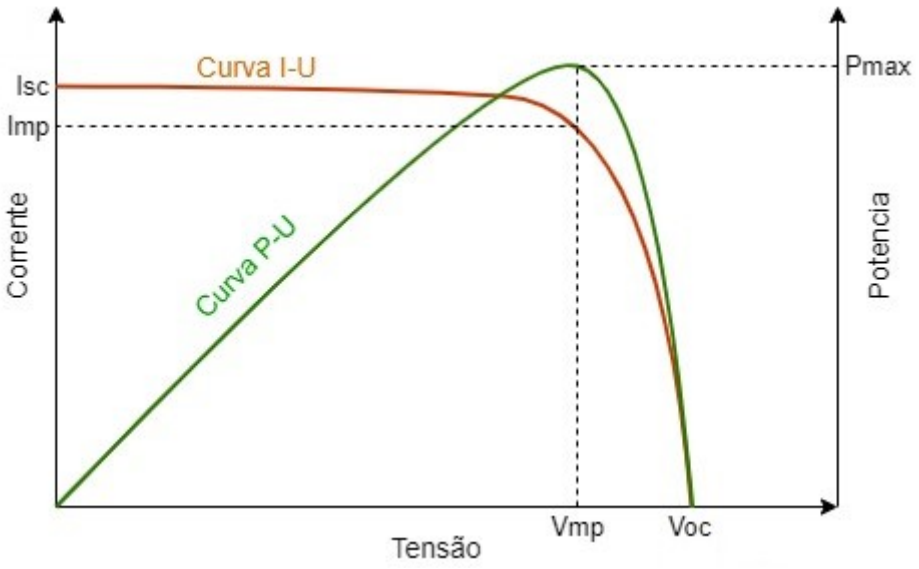

Figura 3.1: Curvas I-U e P-U.

A partir dos gráficos traçados é possível calcular o parâmetro que falta, através da equação 3.2 , a eficiência (η) , percentagem de energia solar que a célula consegue converter em energia elétrica,

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times A} \tag{3.2}$$

onde *G* é a irradiância incidente na célula e *A* a área da mesma.

3.1.1 Método experimental

Foi então possível comparar a performance das células solares nas diferentes fases de degradação (sendo expostas a diferentes níveis de *cracking*), com o seu desempenho original, isto é, sem terem sido expostas a algum tipo de *cracking*. Assim, montou-se um circuito com a célula ligada em série com o amperímetro, medindo a sua corrente e uma *breadboard* com diferentes resistências. No circuito, foi também ligado um voltímetro em paralelo para a medição a tensão, figura 3.2.

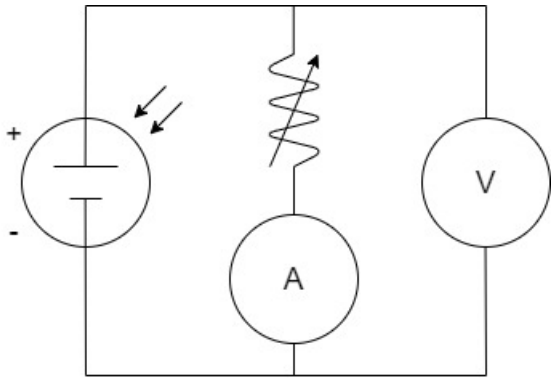

Figura 3.2: Circuito equivalente da montagem experimental.

Juntamente com o resto da montagem foi colocado um candeeiro com a luz a incidir sobre a célula. Nos vários testes com as diferentes células foi-se ajustando a altura do candeeiro de modo a que sobre elas incidisse uma irradiância à volta dos 300 W/m^2. Na figura 3.3, é visível toda a montagem para uma célula CIGS.

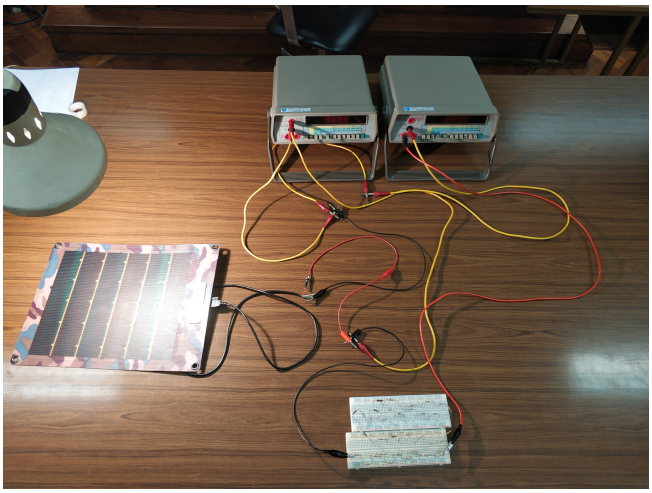

Figura 3.3: Montagem para o estudo da célula *CIGS*.

Em relação ao material usado, como já referido, utilizou-se uma *breadboard* com as várias resistências, um candeeiro com uma lâmpada incandescente 200 W da marca *Phillips*, dois multímetros *GWINSTEK GDM-8135*, um a servir de amperímetro e outro na função de voltímetro e, por fim, a respetiva célula. Foi usado, também, um medidor de irradiância para confirmar que todas as medições eram feitas segundo as mesmas condições, os 300 W/m^2. A montagem descrita anteriormente foi feita para as diversas células, mas para o painel de *perovskita* foi necessário utilizar um projetor *Ersetze Jede Gebrochene Schutzscheibe R7s* 500 W, colocado numa estrutura metálica, devido às dimensões do painel serem muito superiores aos das células testadas. A estrutura foi colocada de modo a que o projetor estivesse a garantir a irradiância de 300 W/m^2 no painel. Foi garantido que a temperatura se manteve constante dos vários testes realizados. Toda esta montagem está visível na figura 3.4.

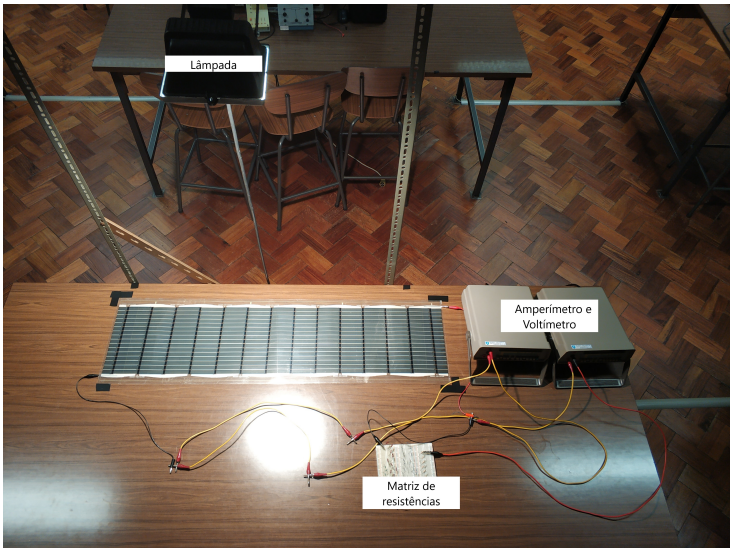

Figura 3.4: Montagem para o estudo do painel de *perovskita*.

3.2 Testes e resultados experimentais

Com todos os dados retirados, foi necessário encontrar um modelo de *fitting* que melhor caracterizasse o andamento das diferentes curvas *I-U* para as células analisada. Tanto para o seu comportamento original assim como para os diferentes níveis de *cracking* aplicados nas células, de modo a conseguir representar todas as situações. Para tal, foi usado uma ferramenta do *MATLAB*, de nome *Curve Fitting Toolbox*. Esta permite desenhar a curva que mais se aproxima com os dados que forem fornecidos ao programa. Assim, foi escolhida a equação da dupla exponencial para representar a curva *I-U* das células. Para comprovar a precisão deste *fitting* foram retirados os valores dos coeficientes de determinação, R^2. Este coeficiente varia entre 0 e 1. Avalia o quanto o modelo de regressão representa os valores fornecidos, sendo que quanto mais perto de 1 melhor é o *fitting* escolhido. [32] Contudo, na célula *CIGS* não foi possível usar este modelo devido às suas curvas serem tão díspares. Optou-se por apenas fazer a união dos pontos experimentais.

3.2.1 Célula de *perovskita*

A célula de *perovskita* analisada é fabricada pela empresa dinamarquesa *infinityPV*. Mede 14x10cm tendo como área ativa a dimensão de 9,3x8,3cm.A eficiência dessa mesma área ativa situa-se entre os 1,5% e os 7%. Pode operar até temperaturas de 140ºC. A sua transparência e flexibilidade assim como a sua construção sem materiais tóxicos ou materiais escassos com um baixo impacto ambiental são algumas das suas vantagens. [8]

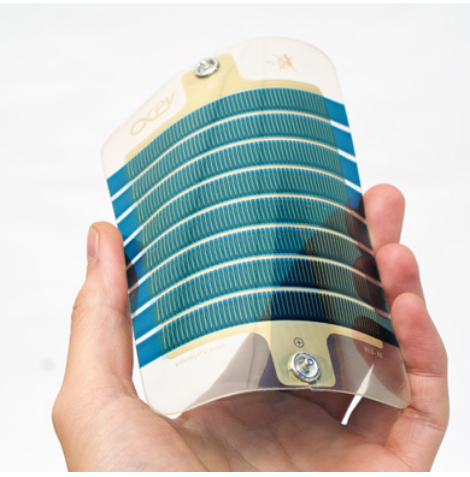

Figura 3.5: Célula de *perovskita* da empresa *ininityPV* [8].

3.2.1.A Teste

O teste nesta célula consistiu em medir o seu funcionamento com a célula saudável e depois comparar com os diferentes níveis de *cracking*. Para se deteriorar a célula, criaram-se cortes ao longo da célula, trespassando-a por completo, usando um objeto metálico. Começaram por se fazer dois cortes irregulares na célula, seguidos de dois cortes mais retilíneos. Por fim, foi feito um *cracking* transversal às extremidades das células. Todos os *crackings* efetuados atravessaram tanto a célula como a camada encapsulante. Na figura 3.6 é visível o estado final da célula.

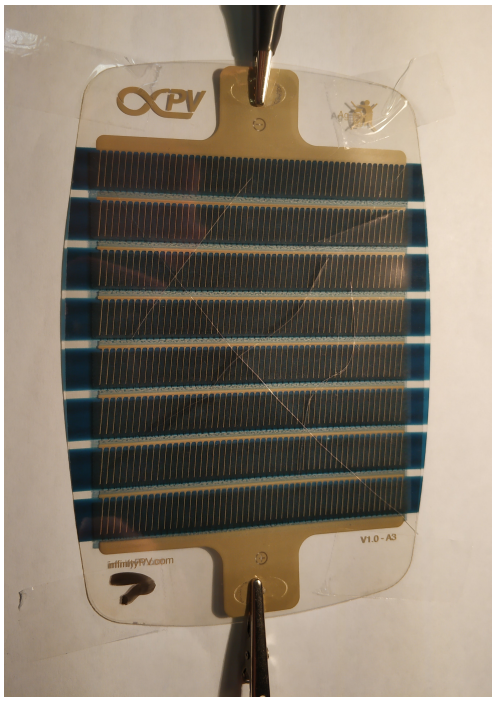

Figura 3.6: Célula de *perovskita* ao fim de submetida a vários *cracks*.

3.2.1.B Resultados experimentais

Com todas as medições feitas e os pontos experimentais retirados procedeu-se então ao tratamento desses dados. Aplicando o *fitting*, através do *MATLAB*, como referenciado anteriormente foi possível obter os seguintes resultados.

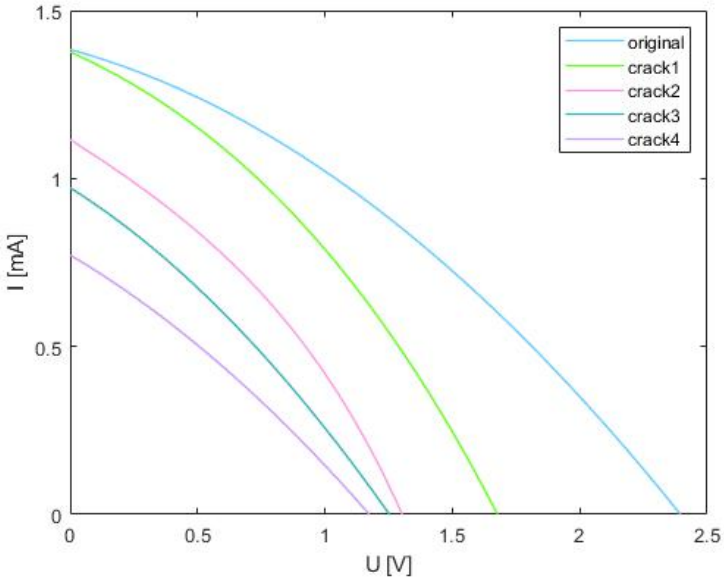

Figura 3.7: Curva *I-U* da célula de *perovskita*.

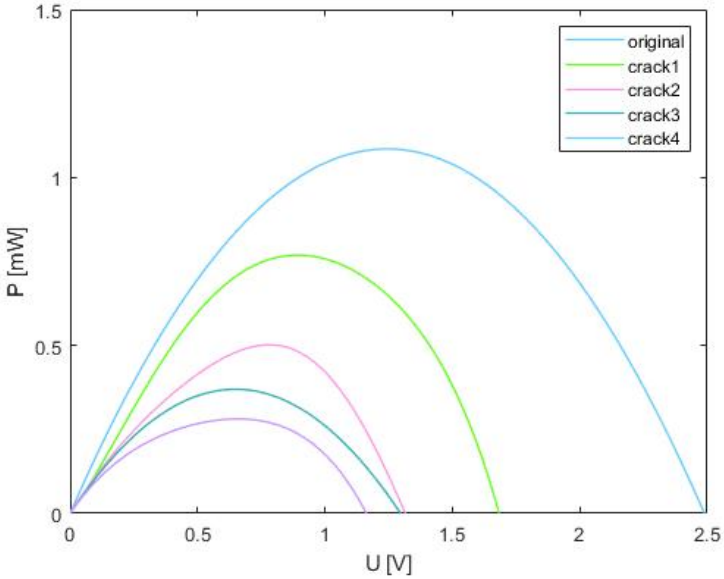

Figura 3.8: Curva *P-U* da célula de *perovskita*.

Tabela 3.1: Parâmetros de precisão do *fitting* da célula de *perovskita*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**
R^2	0.9653	0.9911	0.9952	0.9831	0.9945

Tabela 3.2: Parâmetros da célula de *perovskita* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**
$I_{sc}(mA)$	1.384	1.376	1.116	0.972	0.767
$V_{oc}(V)$	2.39	1.67	1.30	1.25	1.16
$P_{max}(mW)$	1.085	0.7688	0.5019	0.3696	0.2814
$\eta(\%)$	0.0468	0.0331	0.0216	0.0159	0.012

Como é possível ver na tabela 3.1, os valores de R^2 estão muito próximos de 1 o que demonstra a precisão do modelo de *fitting* escolhido, tanto para a situação original da célula assim como para as situações onde foram induzidos vários níveis de *cracking*. Olhando agora para as figuras 3.7 e 3.8 e para os dados da tabela 3.2 é visível a influência negativa que os diversos *crackings* tiveram na célula. As curvas representadas na figura 3.7 apresentam o aspeto típico da curva característica deste tipo de célula. O maior decréscimo sentiu-se entre a segunda e terceira situação com uma perda de eficiência a rondar os 35%, sendo que entre as restantes situações as perdas são algo semelhantes, a rondar os 25%.

3.2.2 Painel de *perovksita*

O painel de *perovksita* tem a mesma constituição que a célula referida anteriormente. Em termos de dimensão tem 95x32cm de área ativa. Nas condições de teste padrão, *STC* com 1000 W/m^2, tem 120V de tensão e 6W de potência. [33]

3.2.2.A Teste

No painel de *perovskita* o teste foi muito similar ao da célula. Começou por medir-se a performance do painel sem ser submetido a nenhum *cracking*. Como o painel se encontrava divido em ”colunas”, foram-se adicionando fissuras algo similares pelas diferentes colunas, sempre retirando os dados do funcionamento do painel antes da criação de um novo *cracking*. Na figura 3.9 são visíveis os diferentes níveis de cortes feitos no painel.

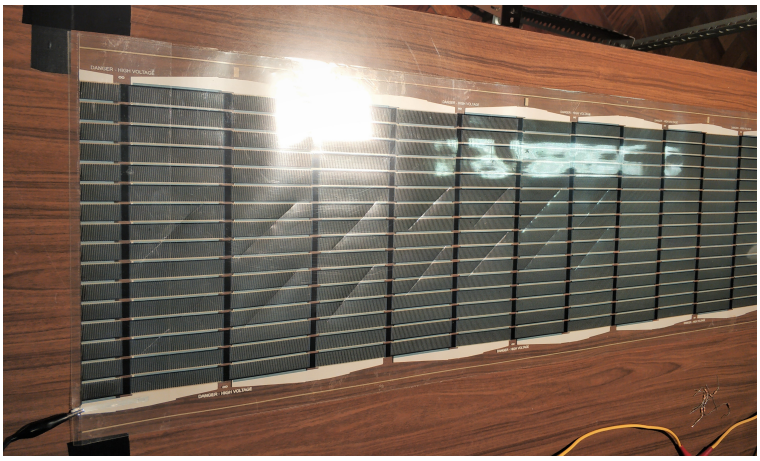

Figura 3.9: Painel de *perovskita* ao fim da indução de *cracks*.

3.2.2.B Resultados experimentais

Antes de serem analisados os dados sobre o painel de *perovskita*, é necessário referir que este painel foi usado anteriormente noutro estudo, encontrando-se já bastante degradado à data dos testes experimentais efetuados. Portanto a situação original representada é a situação antes de ser aplicado qualquer *crack* no painel.

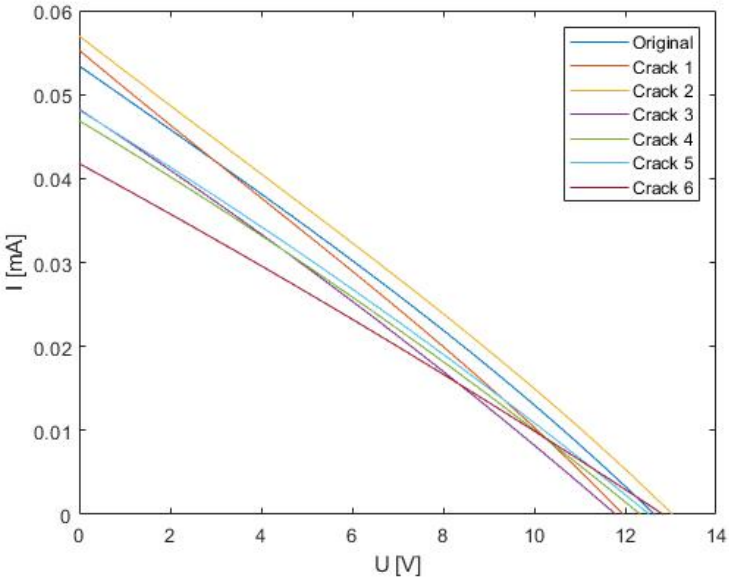

Figura 3.10: Curva *I-U* do painel de *perovskita*.

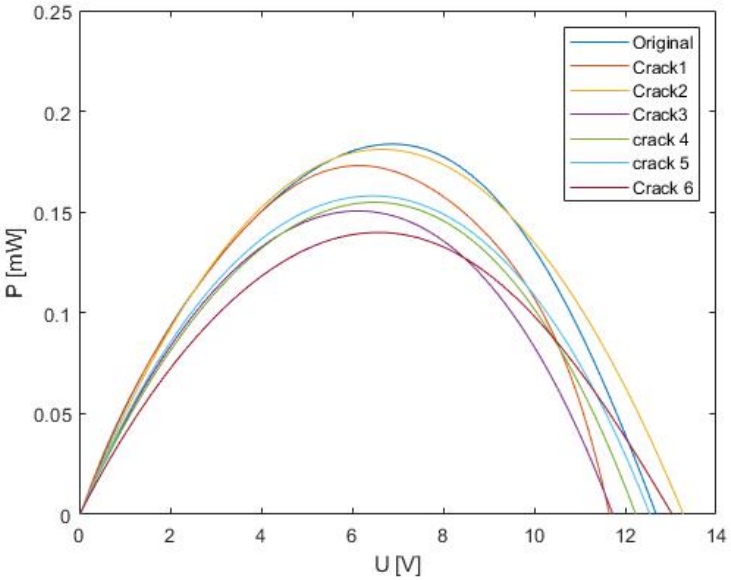

Figura 3.11: Curva *P-U* do painel de *perovskita*.

Tabela 3.3: Parametros de precisão do *fitting* do painel de *perovskita*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack 5**	**Crack 6**
R^2	0.9988	0.9973	0.997	0.9988	0.9989	0.9982	0.9992

Tabela 3.4: Parâmetros do painel de *perovskita* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack 5**	**Crack 6**
$I_{sc}(mA)$	0.0534	0.05528	0.05697	0.04825	0.04689	0.04183	0.04178
$V_{oc}(V)$	12.64	11.95	13.01	11.79	12.26	12.53	12.83
$P_{max}(mW)$	0.1837	0.1729	0.1811	0.1503	0.1549	0.1582	0.1399
$\eta(\%)$	1.8 $\times 10^{-4}$	1.69$\times 10^{-4}$	1.78$\times 10^{-4}$	1.47$\times 10^{-4}$	1.52$\times 10^{-4}$	1.55$\times 10^{-4}$	1.37$\times 10^{-4}$

Com os resultados apurados e apresentados nas figuras 3.10 e 3.11 e na tabela 3.4 pouco se consegue concluir. A variação de potência máxima é muito baixa, assim como a dos valores de tensão e corrente para os diferentes estados de degradação. Como é visível pela baixa corrente que passa no painel é possível ver o quão degradado este se encontrava. Tamanha degradação teve bastante influência no seu mau desempenho. Porém, é possível constatar-se o baixo impacto que o *cracking* teve numa célula já bastante estragada, tendo como comparação os testes efetuados nas restantes células, onde apenas no primeiro estado de degradação era visível o seu efeito no *output* da célula.

3.2.3 Célula *CIGS*

A célula *CIGS* usada é da empresa *Hanergy*, correspondente ao modelo *SC-8GUR*. Tem como objetivo ser usada no exterior como carregador portátil, tendo uma ligação de saída USB. Esta célula é bastante flexível, leve e resistente à água, medindo 33.8cm de comprimento e 25.6cm de largura e tem uma área ativa de 25.5cm x 21.5cm. Em termos de eficiência chega aos 13% com potência máxima no valor de 7.7W. [34]

3.2.3.A Teste

O procedimento experimental na célula CIGS diferiu um pouco dos já mencionados, isto porque na sua composição poderá existir cádmio, que é extremamente tóxico. Assim não foi possível aplicar cortes na célula com o receio de haver exposição a esse composto. Optou-se então por se ir dobrando e vincando parte da célula, sempre com precaução, na esperança de assim se conseguir criar algum tipo de *cracking* na célula. Na figura 3.12 é visível as situações do primeiro, terceiro e quinto *crack*.

Figura 3.12: Célula *CIGS* exposta aos múltiplos *cracks*.

3.2.3.B Resultados experimentais

Como já referido, para o caso desta célula não foi usado nenhum *fitting*, pois não foi encontrado um modelo que representasse minimamente as curvas obtidas. Assim, são visíveis as curvas I-U e P-U nas figuras 3.13 e 3.14, respetivamente.

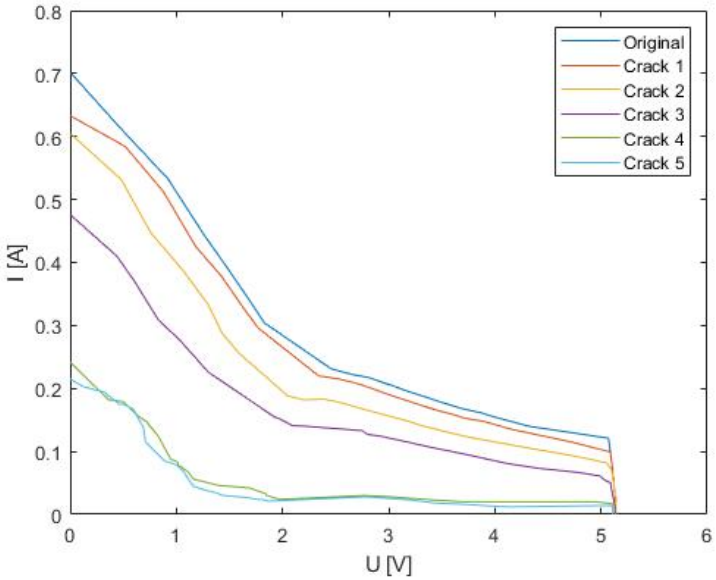

Figura 3.13: Curva *I-U* da célula *CIGS*.

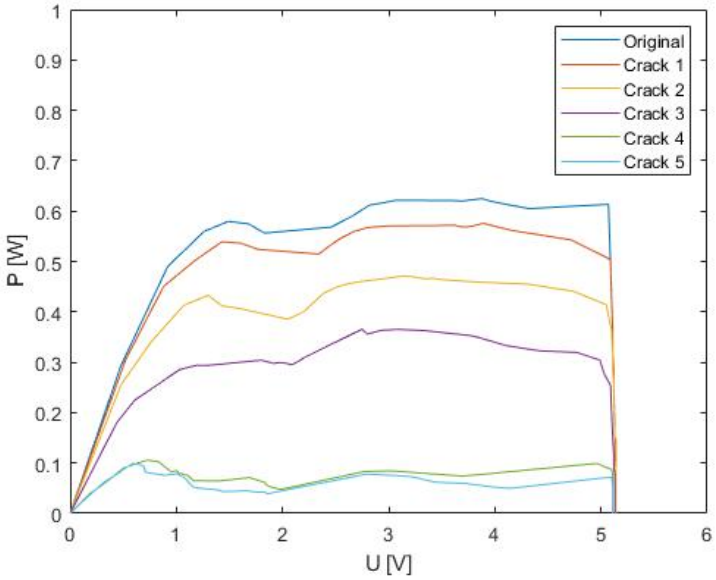

Figura 3.14: Curva *P-U* da célula *CIGS*.

Tabela 3.5: Parâmetros da célula *CIGS* com a indução dos diferentes níveis de *cracking*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack 5**
$I_{sc}(A)$	0.702	0.633	0.605	0.476	0.242	0.215
$V_{oc}(V)$	5.14	5.14	5.14	5.13	5.11	5.11
$P_{max}(W)$	0.624	0.576	0.471	0.366	0.106	0.099
$\eta(\%)$	3.79	3.5	2.86	2.23	0.64	0.60

Analisando os dados obtidos é possível observar claramente o efeito dos diversos *cracks* no comportamento da célula. Apesar do decréscimo de potência fornecida pela célula ao longo dos diversos estados de degradação é visível uma certa estabilidade no seu comportamento sendo que o valor de potência é algo constante para cada um dos casos apresentados. Para além disto, é possível constatar que entre o *crack 3* e o *crack 4* foi onde houve o decréscimo de performance mais acentuado. Tal pode ter acontecido devido à falta de consistência na degradação da célula. Querendo com isto dizer que como a célula não foi cortada, mas sim vincada sucessivamente, a força aplicada não foi com certeza a mesma, apesar de ter havido sempre essa preocupação ao longo do processo.

3.2.4 Célula silício amorfo

A célula de silício amorfo usada tem o modelo XD161700. Para além de ser bastante fina e flexível é também resistente à água. Possui, ainda, uma camada encapsulante com bastante transmitância e tem uma dimensão de 9.2cm x 3.7cm de área ativa. Opera com 1.5V e a corrente varia entre os 0 e os 200mA e tem como potência 0.3W [35]

3.2.4.A Teste

O processo para testar a célula de silício amorfo foi muito similar ao da célula de *perovskita*. Esta foi submetida a diferentes *crackings*, visíveis na figura 3.15, com a performance a ser medida entre defeitos. Iniciou-se com o corte no canto inferior esquerdo, seguindo-se os cortes superior e inferior da parte central, terminando num corte maior transversal a toda ela. Todos os *cracks* induzidos afetaram a célula em todas as suas camadas.

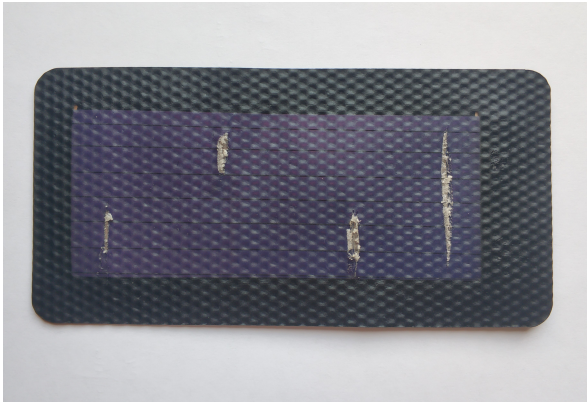

Figura 3.15: *Cracking* efetuado na célula de silício amorfo.

3.2.4.B Resultados experimentais

Seguem em baixo os resultados experimentais. Volta a ser visível na tabela 3.6 a precisão do *fitting* escolhido.

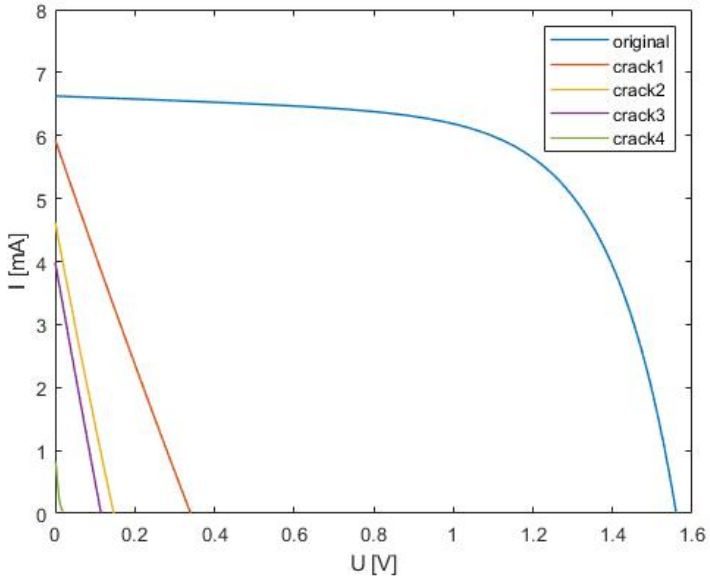

Figura 3.16: Curva *I-U* da célula de silício amorfo.

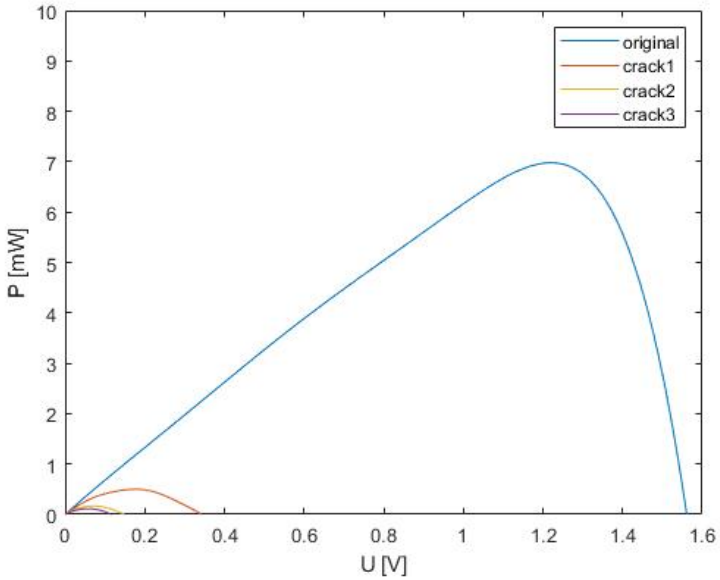

Figura 3.17: Curva *P-U* da célula de silício amorfo.

Tabela 3.6: Parametros de precisão do *fitting* da célula de sílicio amorfo.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**
R^2	0.9934	0.9983	0.9984	0.9995	0.9802

Tabela 3.7: Parâmetros da célula de silício amorfo com a indução dos diferentes níveis de *cracking*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**
$I_{sc}(A)$	6.627	5.936	4.625	3.990	0.8135
$V_{oc}(V)$	1.559	0.341	0.147	0.115	0.02
$P_{max}(mW)$	6.978	0.4991	0.1673	0.1137	0.0027
$\eta(\%)$	0.683	0.0489	0.0164	0.0111	2.64×10^{-4}

No caso da célula de silício amorfo volta a ser visível o impacto do *cracking* no seu desempenho, com o seu decréscimo a ser visível ao longo dos diferentes estados de degradação, tendo o primeiro *crack* efetuado o maior e mais visível impacto. Assim, existiu logo um decréscimo de quase 93% na eficiência da célula e o ponto de potência máxima reduziu drasticamente para níveis muito próximos de zero. Na figura 3.16 também é possível ver que nos estados de degradação a curva é muito semelhante uma linha reta, com os valores de V_{oc} a serem o fator mais afetado. O *crack 4* praticamente inutilizou a célula ficando com valores residuais que nem foram possíveis representar na curva da potência, figura 3.17.

3.2.5 Célula de silício cristalino

A célula de silício cristalino usada é o modelo *AK50X50*, figura 3.18, tendo uma área ativa de 25cm^2, com 5cm por 5cm. Na sua constituição tem a camada incapsulante que é feita de resina *epoxy*, concedendo-lhe grande proteção contra a corrosão e danos do meio exterior, o que dificultou bastante o processo de teste, como explicado seguidamente. [36]

Figura 3.18: Célula de silício cristalino, modelo *AK50X50*.

3.2.5.A Teste

A célula de silício tem uma diferença em relação a todas as anteriores mencionadas, não é *thin-film*. A criação de algum tipo de fissura na célula torna-se mais complicada devido a rigidez que apresenta. Posto isto, começou-se a tentar induzir algum tipo de *cracking* através da fricção contínua de uma superfície metálica na célula, com uma orientação perpendicular aos *fingers*, figura 3.19 situação 1. Esta tentativa mostrou-se totalmente ineficaz, pois a performance da célula manteve-se inalterada em comparação com a situação pré *cracking*.

Na sequência do último teste, optou-se agora por tentar criar *crackings* no sentido dos *fingers*. Foram-se criando fissuras ao longo deles, de modo a ficarem similares em tamanho e em distribuição na superfície da célula. Foi medida a sua prestação a cada quatro/cinco fendas aplicadas, figura 3.19 situação 1.

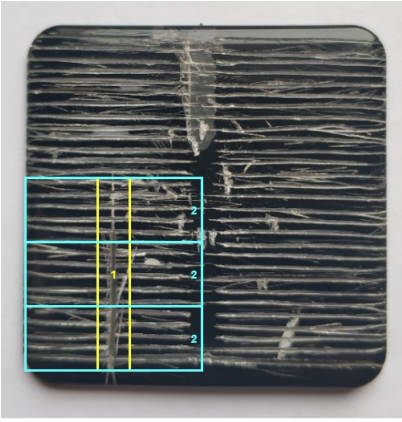

Figura 3.19: Célula de silício cristalino ao fim de várias tentativas de indução de *cracks*.

Este ensaio mostrou-se algo inconclusivo. A prestação da célula foi piorando ao longo das diferentes situações, o que era expectável. Mas tal variação não acontecia a cada medição efetuada. Ou seja, performance da célula não mudou, entre o primeiro bloco de quatro fissuras e o terceiro bloco, por exemplo. Com mais oito fendas provocadas na célula, nada se alterou. Isto voltou a verificar-se em blocos posteriores. Toda esta degradação foi feita à mão livre, podendo essas diferenças acontecerem pelo erro humano, não ferindo a célula de igual modo em todos as fendas. Com posterior análise, foi possível concluir que os *fingers* trata-se de algo puramente estético, não tendo influência no trânsito de corrente. Foi possível ver também que os cortes feitos na célula, feriram maioritariamente o material de encapsulamento da célula, não sendo visível na traseira da célula nenhuma ferida aparente, figura 3.20. Surgem, assim, zonas bastante bassas que iam provocar *shading* e de facto reduzir a performance da célula.

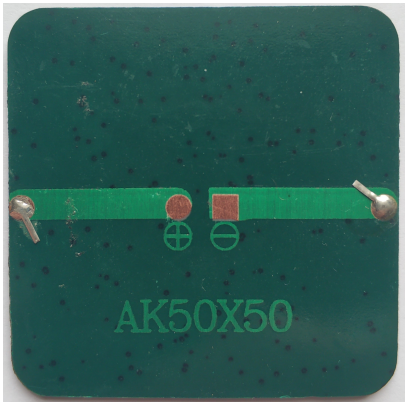

Figura 3.20: Traseira da célula de silício cristalino ao fim de várias tentativas de indução de *cracks*.

Por fim, utilizou-se uma célula nova e optou-se por deteriorar esta atravessando todo o material, através da aplicação de alguma força em diferentes locais das células. Assim, foi possível obter cinco pontos de *cracking*, figura 3.21, onde se mediu a performance da célula ao longo do processo. Nesta situação a célula acabou por ficar cada vez mais partida ao longo dos vários testes.

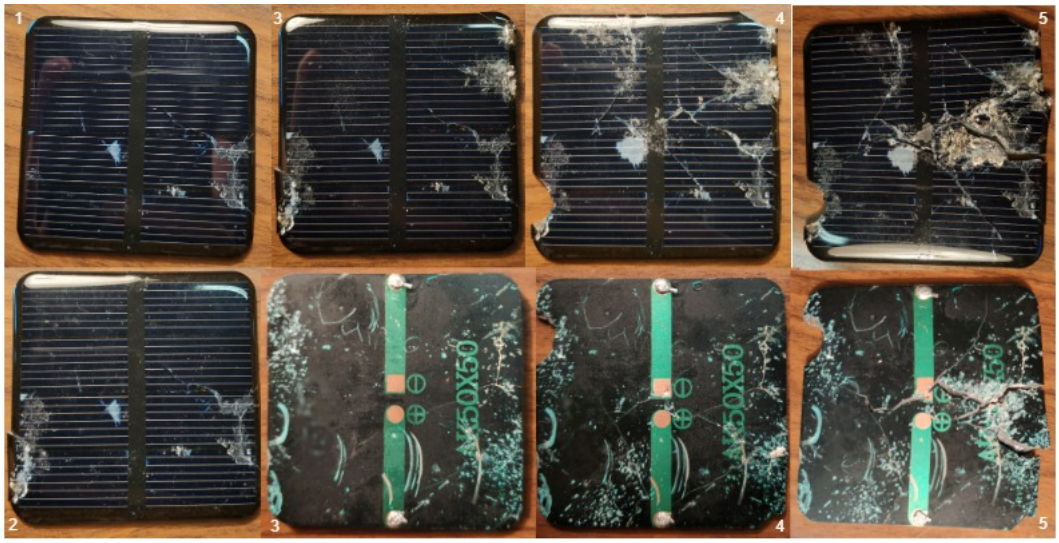

Figura 3.21: Processo de indução de *cracking* na célula de silício cristalino.

3.2.5.B Resultados experimentais

Finalmente são apresentados os dados relativos à célula de silício cristalino. Novamente, é possível verificar a precisão do *fitting* na tabela 3.8. Em relação ao desempenho da célula, é visível que este caiu ao longo dos diferentes *cracks* induzidos na mesma. Houve uma perda de eficiência a rondar os 60% na primeira situação de degradação, bem visível com o reduzir do ponto de potência máxima, figura 3.23. Essa grande redução deve-se ao grande dano inicial provocado, fator que já não se verifica no

crack 2, 3 e 4. No ultimo *crack*, também existiu uma grande perda de rendimento, quando comparado com o caso o *crack* anterior, visto que neste caso houve parte da célula a soltar-se e a romper as suas ligações. Contribui, assim, para o pior desempenho, pois até aqui apesar da célula já estar dividida, todas as suas partes ainda mantinham contacto.

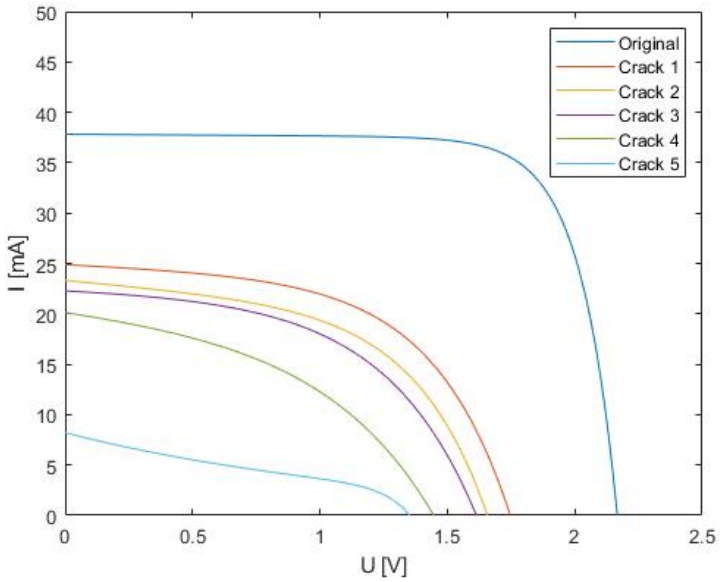

Figura 3.22: Curva *I-U* da célula de silício amorfo.

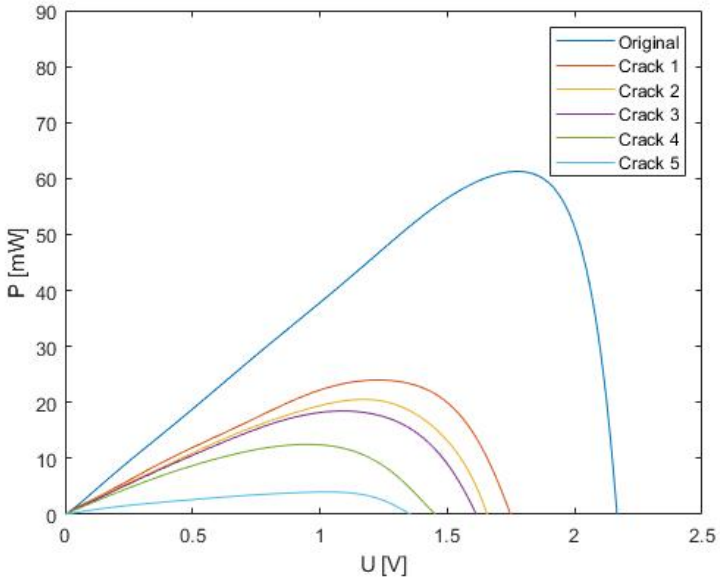

Figura 3.23: Curva *P-U* da célula de silício amorfo.

Tabela 3.8: Parametros de precisão do *fitting* da célula de sílicio cristalino.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack 5**
R^2	0.9955	0.9995	0.9993	0.9995	0.9993	0.9936

Tabela 3.9: Parâmetros da célula de silício cristalino com a indução dos diferentes níveis de *cracking*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack 5**
$\mathrm{I}_{sc}(mA)$	37.82	24.88	23.31	22.28	20.12	8.205
$\mathrm{V}_{oc}(V)$	2.17	1.74	1.65	1.61	1.44	1.35
$\mathrm{P}_{max}(mW)$	61.26	24	20.55	18.47	12.51	4.008
$\eta(\%)$	8.16	3.2	2.74	2.46	1.66	0.53

4

Modelo do cracking

Conteúdo

4.1 Modelo célula solar ideal 36

4.2 Modelo do *cracking* 37

4.3 Resultados do modelo do *cracking* 38

4.1 Modelo célula solar ideal

Com a análise prática realizada para as diferentes células houve a tentativa de obter um modelo em que fosse possível simular o comportamento das células quando submetidas aos diferentes *cracks*. Para tal foi necessário entender os modelos existentes para representar uma célula solar. As diferentes curvas *I-U* têm uma curva algo parecida à curva exponencial característica do díodo. Surge então o circuito equivalente da célula solar, também conhecido como *1m3p*. Este modelo tem uma fonte de corrente em paralelo com um díodo, figura 4.1, e tem três parâmetros, o fator de idealidade do díodo, m, a corrente de saturação do díodo, I_s, e a corrente gerada pela fonte, I_{ph}. É importante referir que existem outros modelos com quatro e cinco parâmetros que têm maior precisão, mas também aumenta a sua complexidade, daí ter-se optado pelo uso do modelo *1m3p*. [37, 38]

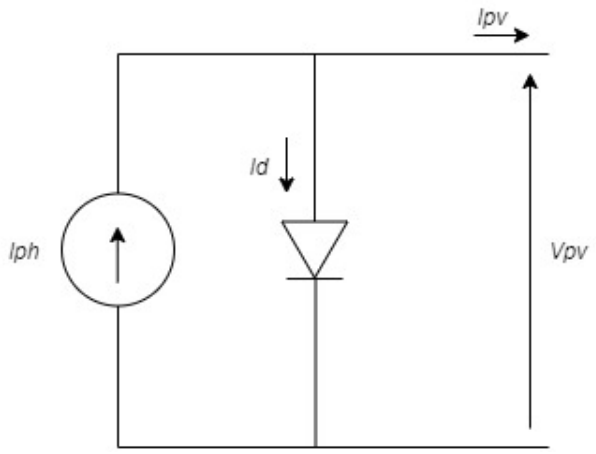

Figura 4.1: Circuito equivalente da célula solar (modelo *1m3p*).

Para ser possível definir uma célula solar é necessário conhecer o seu ponto de corrente curto-circuito, I_{sc} e a sua tensão em circuito aberto, V_{oc}. Então através da lei de *Kirchhoff* é possível deduzir a equação 4.1.

$$I_{pv} = I_d + I_{ph} \tag{4.1}$$

Sabendo que a corrente de um díodo vem definida pela equação 4.2, substituindo em 4.1 fica a equação 4.3

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1 \right) \tag{4.2}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1 \right) \tag{4.3}$$

Assim sabendo que o com I_{pv} = 0 visto que o V_{oc} é a tensão em circuito aberto, fica a equação 4.4. Para a corrente I_{sc}, que corresponde a corrente em curto circuito vem V_{pv} =0 obtendo-se a equação 4.5.

$$V_{oc} = V_{pv} = \frac{qV_{pv}}{mkT} \times ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_s}\right) \tag{4.4}$$

$$I_{sc} = I_{pv} = I_{ph} \tag{4.5}$$

Por fim, atinge-se a potência de saída na equação 4.6.

$$P = V_{pv}\left[I_{sc} - I_s\left(e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1\right)\right] \tag{4.6}$$

4.2 Modelo do *cracking*

Tendo por base o modelo referido anteriormente tentou-se então criar um modelo em que fosse possível simular o desempenho das diferentes células estudadas. Olhando para a figura 3.1, onde temos corrente no eixo dos y e a tensão no eixo dos x, através da lei de *Ohm* é percetível que o declive de qualquer reta é passível de ser calculado através de equação 4.8.

$$U = R \times I \tag{4.7}$$

$$R = \left(\frac{I}{U}\right)^{-1} \tag{4.8}$$

Posto isto, é possível representar uma reta no campo *I-U*, digamos assim, tendo o seu ponto no eixo do y, que equivale ao ponto de corrente em curto circuito, o I_{sc} e tendo a resistência que é, nada mais nada menos, que o inverso do declive dessa reta. Agora a questão que se coloca seria como representar uma curva, visto que o declive não é constante. Se essa mesma curva for decomposta em vários segmentos retas, cada um com o seu único declive, seria possível fazer uma aproximação da curva com a junção de todos eles. Assim, seria necessário implementar esta ideia, não esquecendo o modelo solar ideal.

Analisando o início da qualquer curva, esta seria definida pela fonte de corrente e sabendo que o maior valor que a corrente pode atingir é o valor do I_{sc}, a fonte acabaria por tomar esse valor. Partindo agora para o ramo do díodo, escolheu-se um díodo ideal, que quando a polaridade está positiva se comporta como um condutor perfeito, mas quando a a polaridade está negativa comporta-se como um isolador perfeito. Em série com o díodo ideal, ao ser colocada uma resistência e uma fonte de tensão,

percebe-se que é possível moldar de facto o declive de uma reta. A resistência influencia diretamente o valor desse declive e a fonte de tensão define a partir de que ponto esse declive passa a influenciar a reta. Com isto, foi possível idealizar um modelo onde com *n* ramos da série do díodo ideal, resistência e fonte de tensão seria possível obter uma curva aproximada do comportamento das células solares nos diferentes casos. Na imagem 4.2 está exemplificado este circuito.

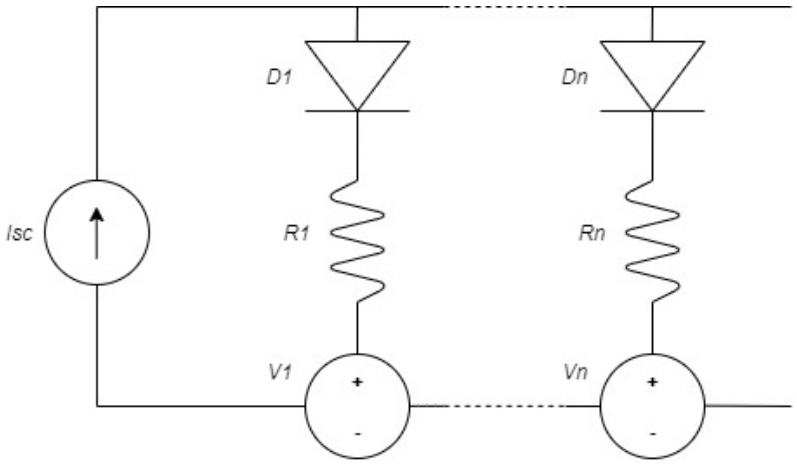

Figura 4.2: Circuito do *cracking* para *n* pontos.

Com o modelo idealizado passou-se à sua aplicação nas células usadas nos ensaios experimentais, a célula de *perovskita* e o painel, a célula *CIGS* e as células de silício amorfo e de silício cristalino. Para tal, foram utilizados os pontos experimentais, das diferentes fases de degradação, e calculou-se os declives entre todos esses pontos, ficando assim com a curva *I-U* dividia nos diferentes segmentos de reta. Ou seja, imaginando o ponto A e B de um ensaio, calculou-se o declive do segmento de reta compreendido entre esses dois pontos, equação 4.9, de onde é possível obter o valor da primeira resistência através da equação 4.8 referida anteriormente. O valor da fonte de tensão seria o valor da tensão do ponto inicial desse segmento de reta, neste caso ponto A. De seguida pegando no ponto B e C repetir-se-ia todo este processo. Por último, iriam sendo adicionados novos ramos ao circuito consoante existissem pontos experimentais.

$$declive = \frac{I_A - I_B}{V_A - V_B} \tag{4.9}$$

4.3 Resultados do modelo do *cracking*

Para ser possível aplicar o modelo criado foi usado o programa *LTspice* para os diferentes testes e simulações dos circuitos elétricos. Posteriormente os dados foram tratados em *Matlab* de onde se retiraram as curvas *I-U* apresentadas a seguir.

Iniciando a análise pela figura 4.3 é possível verificar que as curvas resultantes do modelo são bastante diferentes daquelas obtidos na parte experimental, figura 3.13. Este resultado era expectável, visto que este modelo tem por base o comportamento exponencial similar entre o díodo e as diferentes células solares e a célula *CIGS* já que é a única em que a exponencialidade não estava presente na sua curva característica. Contudo é possível a sua análise onde se verifica que os pontos de V_{oc} estão muito longe dos valores obtidos experimentalmente, tabela 4.1. Os restantes valores fogem também dos valores expectáveis. Como ponto positivo há a salientar o visível decréscimo entre as várias fases de *cracking*.

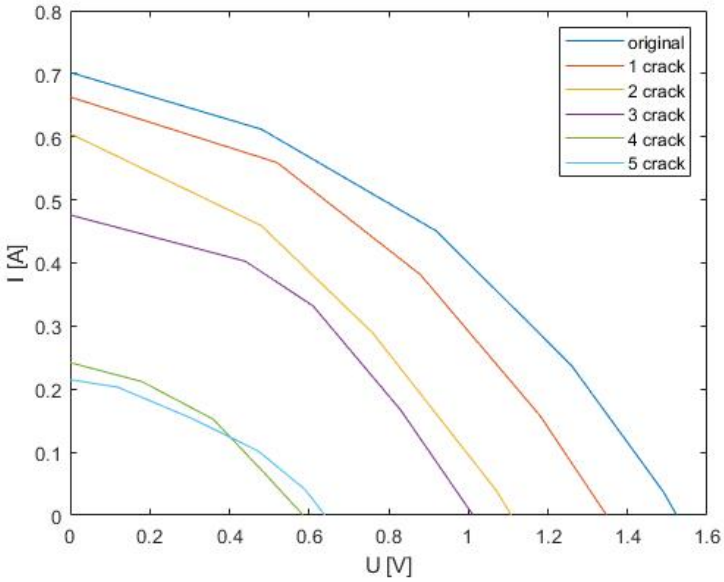

Figura 4.3: Curva *I-U* da célula *CIGS* usando o modelo do *cracking*.

Tabela 4.1: Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula *CIGS*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack5**
I_{sc} experimental (A)	0.702	0.633	0.605	0.476	0.242	0.215
I_{sc} modelo (A)	0.702	0.663	0.605	0.476	0.242	0.215
V_{oc} experimental (V)	5.14	5.14	5.14	5.13	5.11	5.11
V_{oc} modelo (V)	1.52	1.34	1.1	1.01	0.57	0.63
P_{max} experimental (W)	0.624	0.576	0.471	0.366	0.106	0.099
P_{max} modelo (W)	0.4145	0.3369	0.2319	0.2024	0.05473	0.0497
I_{mp} experimental (A)	0.160	0.148	0.146	0.133	0.147	0.167
I_{mp} modelo (A)	0.4505	0.405	0.374	0.3318	0.152	0.1243
V_{mp} experimental (V)	3.88	3.89	3.22	2.75	0.72	0.59
V_{mp} modelo (V)	0.92	0.83	0.62	0.61	0.36	0.4

Agora são apresentados os resultados do painel de *perovskita*, figura 4.4. Os resultados aqui visíveis têm alguma coerência com aqueles apresentados na parte experimental. As curvas demonstram pouca diferença entre si mas com os pontos de V_{oc}, novamente muito menores daqueles obtidos experimentalmente. Os restantes parâmetros também se afastam dos resultados experimentais, como esperado visível na tabela 4.2. É de relembrar ainda que este painel já se encontrava bastante deteriorado e que os valores obtidos durante as experiências em laboratório eram bastante baixos e instáveis, havendo uma grande dispersão de pontos. Aliado a isso, o cálculo das diferentes resistências, fez com que existisse essa descida drástica reduzindo os valores da tensão em circuito aberto.

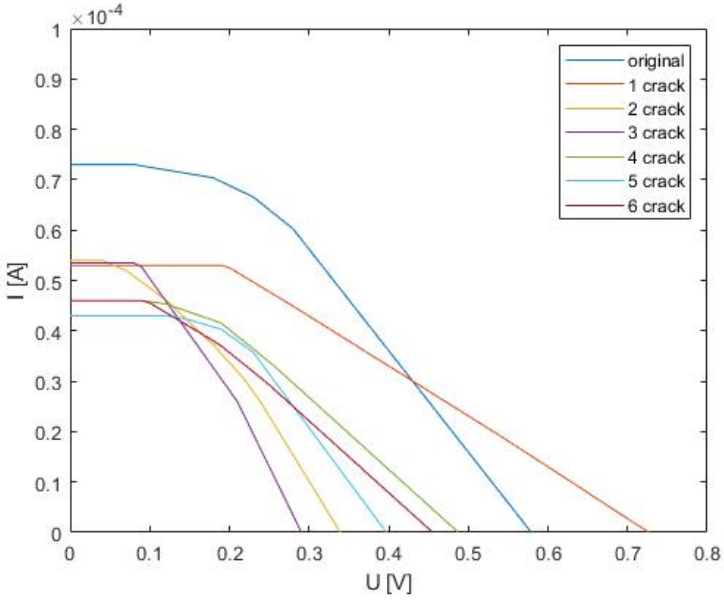

Figura 4.4: Curva *I-U* do painel de *perovskita* usando o modelo do *cracking*.

Tabela 4.2: Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para o painel de *perovskita*.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack5**	**Crack6**
I_{sc} experimental (mA)	0.0534	0.05528	0.05697	0.04825	0.04689	0.04183	0.04178
I_{sc} modelo (mA)	0.073	0.0533	0.0541	0.0535	0.0462	0.0434	0.0462
V_{oc} experimental (V)	12.64	11.95	13.01	11.79	12.26	12.53	12.83
V_{oc} modelo (V)	0.57	0.72	0.33	0.29	0.48	0.39	0.45
P_{max} experimental (mW)	0.1837	0.173	0.1857	0.1505	0.1549	0.158	0.1399
P_{max} modelo (mW)	0.0168	0.0133	0.00673	0.00593	0.00846	0.00822	0.00734
I_{mp} experimental (A)	0.0268	0.02822	0.0272	0.0248	0.0239	0.0245	0.0211
I_{mp} modelo (A)	0.0579	0.035	0.034	0.037	0.338	0.0357	0.0306
V_{mp} experimental (V)	6.85	6.13	6.81	6.06	6.49	6.45	6.63
V_{mp} modelo (V)	0.29	0.38	0.2	0.16	0.25	0.23	0.24

Na célula de *perovskita*, figura 4.5, acontece algo similar ao que se verificou no painel de *perovskita*. Existe uma grande dispersão de pontos experimentais, o que leva a uma variação de valores de resistências, afundando assim as curvas, obtendo-se, assim, valores pouco precisos de V_{oc}, tabela 4.3. Porém, as curvas são similares com as experimentais, demonstrando alguma coerência entre o modelo e os pontos reais.

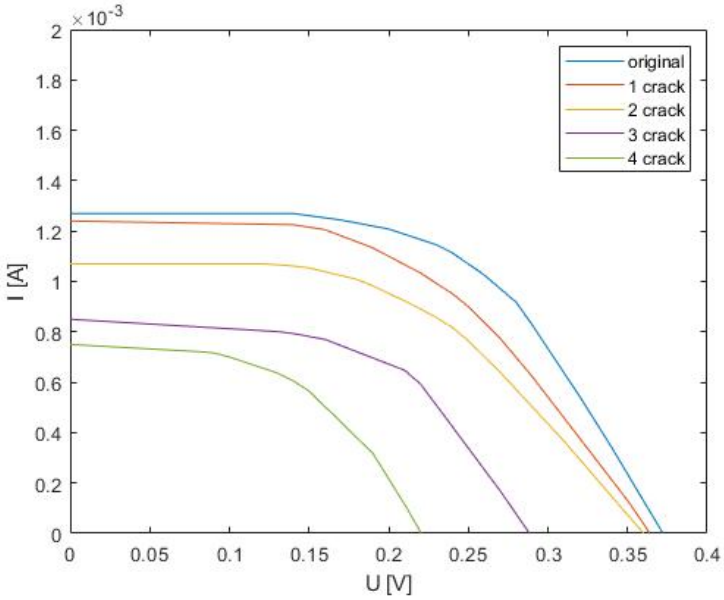

Figura 4.5: Curva *I-U* da célula de *perovskita* usando o modelo do *cracking*.

Tabela 4.3: Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de *perovskita*.

	Original	**Crack1**	**Crack2**	**Crack3**	**Crack4**
I_{sc} experimental (mA)	1.384	1.376	1.116	0.972	0.767
I_{sc} modelo (mA)	1.27	1.24	1.07	0.85	0.75
V_{oc} experimental (V)	2.39	1.67	1.30	1.25	1.16
V_{oc} modelo (V)	0.373	0.365	0.36	0.28	0.22
P_{max} experimental (mW)	1.085	0.7688	0.5019	0.3696	0.2814
P_{max} modelo (mW)	0.267	0.228	0.197	0.136	0.084
I_{mp} experimental (A)	0.854	0.864	0.66	0.56	0.259
I_{mp} modelo (A)	1.068	0.95	0.857	0.648	0.606
V_{mp} experimental (V)	1.27	0.89	0.76	0.66	0.62
V_{mp} modelo (V)	0.25	0.24	0.23	0.21	0.14

Por último são apresentados os resultados das células de silício amorfo e silício cristalino, figura 4.6 e 4.7, respetivamente. Estas duas células foram as que demonstraram melhores resultados. Avaliando a célula de silício amorfo, se a curva da figura 4.6 for comparada com a da figura 3.16, é possível

verificar uma grande semelhança. Novamente houve um decréscimo dos parâmetros, tabela 4.4. É de salientar novamente a descida do ponto de V_{oc} assim com os pontos de potência máxima.

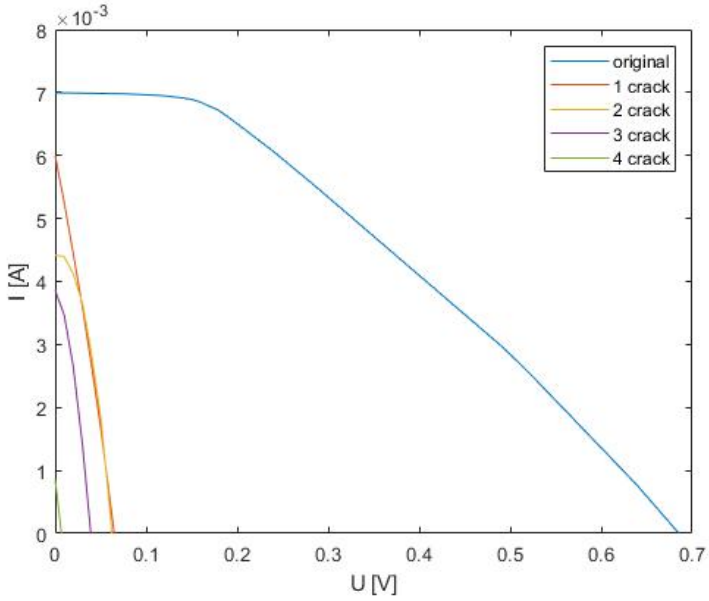

Figura 4.6: Curva *I-U* da célula de silicio amorfo usando o modelo do *cracking*.

Tabela 4.4: Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de silício amorfo.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**
I_{sc} experimental (mA)	6.627	5.936	4.625	3.990	0.8135
I_{sc} modelo (mA)	6.997	6.001	4.42	3.86	0.86
V_{oc} experimental (V)	1.559	0.341	0.147	0.115	0.02
V_{oc} modelo (V)	0.68	0.064	0.062	0.04	6.2$\times 10^{-}3$
P_{max} experimental (mW)	6.978	0.4991	0.1673	0.1137	0.0027
P_{max} modelo (mW)	1.653	0.109	0.114	0.0528	-
I_{mp} experimental (A)	5.715	2.852	2.356	1.833	0.01475
I_{mp} modelo (mA)	4.5	0.989	2.85	2.641	-
V_{mp} experimental (V)	1.221	0.175	0.071	0.062	0.183
V_{mp} modelo (V)	0.36	0.03	0.04	0.02	-

Os resultados do silício cristalino são os que mais se assemelham com os resultados experimentais visíveis na figura 3.22. Os valores da tensão em curto circuito tiveram uma pequena descida, à exceção dos últimos dois *cracks*, onde a descida é mais acentuada. A célula de silício cristalino é mais estável que todas as outras e tem uma menor dispersão nos pontos retirados, o que acaba por ser demonstrado nas curvas retiradas do modelo.

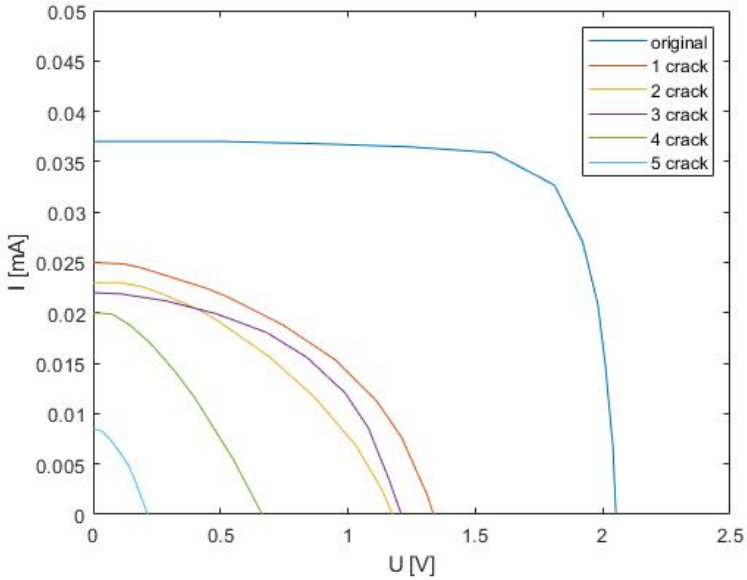

Figura 4.7: Curva *I-U* da célula de silicio cristalino usando o modelo do *cracking*.

Tabela 4.5: Comparação entre os dados experimentais e os dados do modelo para a célula de silício cristalino.

	Original	**Crack 1**	**Crack 2**	**Crack 3**	**Crack 4**	**Crack5**
I_{sc} experimental (mA)	37.82	24.88	23.31	22.28	20.12	8.205
I_{sc} modelo (mA)	37.2	25.1	23.3	22	20.1	8.5
V_{oc} experimental (V)	2.17	1.74	1.65	1.61	1.44	1.35
V_{oc} modelo (V)	2.05	1.33	1.17	1.2	0.66	0.21
P_{max} experimental (mW)	61.26	24	20.55	18.47	12.51	4.008
P_{max} modelo (mW)	59.14	14.58	13.07	10.82	4.62	0.67
I_{mp} experimental (mA)	34.42	19.35	17.56	16.79	13.31	3.89
I_{mp} modelo (mA)	32.67	15.51	15.56	15.68	12.49	4.79
V_{mp} experimental (V)	1.78	1.24	1.17	1.1	0.94	1.03
V_{mp} modelo (V)	1.81	0.94	0.84	0.69	0.37	0.14

Com todos estes resultados provenientes do modelo é necessário analisar alguns pontos para ser possível tirar algumas conclusões. Na primeira situação, o número de pontos experimentais usados em cada célula variou. Ou seja, o número de ramos vai variar para cada situação. Outro fator ligado aos pontos é a sua disposição. Querendo com isto dizer que existem testes onde a maior parte dos pontos retirados se encontra no início da curva, ficando a haver uma maior escassez de pontos no seu final ou vice-versa. Isto faz com que haja uma maior concentração de ramos em certa gama de valores de tensão, afetando mais o sentido da curva.

Ainda olhando para os pontos usados no cálculo das diferentes resistências, houve alguns que foram descartados ou que não foram possíveis de serem usados. No cálculo do declive existem pontos

consecutivos onde o valor de tensão não varia, apesar do valor de corrente variar. Isto acontece devido à diferença ser tão mínima que os instrumentos de medição usados não tinham capacidade de os apresentar. No entanto, leva a que exista uma divisão por 0 na equação 4.9, sendo a mesma impossível. Assim esses pontos não foram tidos em consideração. Já nos pontos descartados, é necessário ter em atenção à curva característica *I-U* do modelo da célula solar ideal, representado na figura 3.1. Esta curva tem tendência negativa, sendo o seu declive negativo ao longo de toda ela. No calculo dos declives, apareceram casos pontuais em que este dava positivo. Ou seja, isto levaria a ser necessário implementar uma resistência negativa, o que também seria impossível visto não existir tal componente.

Para finalizar, a última situação também está relacionada com os declives. Voltando a olhar para a curva característica da curva do modelo ideal da célula solar, figura 3.1 é possível verificar que para além de o declive ser sempre negativo, vai sempre diminuindo ao longo da curva. Ou seja, não contempla situações em que o declive entre o ponto B e C seja superior ao de A e B. Pensando agora em resistência, o valor dela vai diminuindo ao longo da curva característica. Assim sempre que o valor seguinte de resistência for superior ao anterior, a curva devia ser ”aliviada”, atrasar o seu decréscimo. Tal situação não é verificada, onde todos os ramos estão a ajudar no decréscimo da curva. Esta talvez seja a principal razão para haver um decréscimo dos valores de V_{oc} em todas as situações apresentadas.

Resultante desta análise é possível apontar os pontos de melhoria, começando pelo número de pontos retirados. Para uma melhor representação possível deste modelo, seria necessário o maior número possível de pontos, tendo assim um maior alcance decimal, para desta forma se conseguir chegar a um circuito com *n* ramos. Seria igualmente necessário arranjar forma de representar uma resistência negativa assim como alterar o circuito para ser possível existir o ajuste da curva quando surgisse um ramo com resistência superior.

Por fim encontram-se em anexo tabelas com os valores de resistência e de fonte de tensão usados para cada célula em cada situação de degradação.

5

Conclusão

Conteúdo

5.1 Conclusão 46

5.1 Conclusão

O interesse nesta dissertação surgiu devido a importância que as novas fontes de energia têm e eventualmente vão ter na vida humana. É necessário aumentar o uso das novas tecnologias renováveis assim como prolongar a vida daquelas que já existem. Desse modo, o objetivo principal deste trabalho foi estudar o impacto que o *cracking* tinha em diferentes tecnologias solares, nomeadamente, células de silício amorfo e cristalino, células de *perovksita* e células *CIGS*. Para tal foram estudados os problemas mais comuns que afetam os painéis fotovoltaicos para haver um maior conhecimento geral das situações que podiam afetar os sistemas solares e de que forma esses ou outros problemas poderiam levar ao surgimento de *cracking*.

Desenvolveram-se, assim, testes em laboratório para avaliar o comportamento das células no seu estado saudável para depois ser possível fazer uma comparação com os vários níveis de *cracking*. Houve, também, a necessidade de ter alguns cuidados especiais na maneira como iriam ser induzidos os vários *cracks*. Na célula *CIGS* existiram cuidados especiais, como a precaução no caso de haver substancias tóxicas na sua constituição, havendo um vincar sucessivo da célula, na tentativa de simular algum *cracking*. Para além disso, na célula de silício cristalino devido à sua rigidez não foi possível cortar a célula como aconteceu na de silício amorfo e nas de *perovksita*, sendo necessário força em vários pontos da célula de modo a que ela fosse quebrando. Assim, não houve possibilidade de haver uma comparação direta entre células devido à grande diferença existente no método experimental.

Em termos de tratamento de resultados, o *fitting* da dupla exponencial usado no *MATLAB* foi aquele que melhor representava os dados obtidos experimentalmente, tanto em termos das curvas originais das células, assim como as curvas depois de degradadas. Tudo isto através do parâmetro de precisão R^2, assim como avaliando a relação entre o desenhar da curva e os seus pontos.

Através da análise dos resultados é percetível o impacto do *cracking* em todas as células testadas. Todos os parâmetros de estudo, a tensão em circuito aberto V_{oc}, a corrente em curto circuito I_{sc}, a potência *P* e a eficiência η foram afetados, com os seus valores a diminuírem com o aumento do estado de degradação. Observou-se, ainda, que existem casos onde o primeiro *crack* tem um impacto muito grande, como é o caso da célula de silício amorfo, silício cristalino e de *perovksita*, onde a potência gerada pela célula desceu consideravelmente, ficando a ideia de que o primeiro *crack* induzido na célula é o que surte mais efeito. Isto demonstra a importância que existe em manter um sistema fotovoltaico saudável, de modo a evitar a ocorrência desta degradação, de forma a prolongar o seu ótimo ponto de trabalho. Em relação ao caso do painel de *perovksita*, que já se encontrava bastante degradado, os sucessivos *cracks* aplicados pouco efeito tiveram, podendo ficar a ideia de que uma célula já num estado avançado de degradação o *cracking* vai ter uma baixa influência no seu desempenho. A célula *CIGS* teve um comportamento mais linear, notando-se a maior perda nos testes finais.

O modelo idealizado tinha o objetivo de representar as curvas *I-U* das células recorrendo a pon-

tos reais medidos pelas células. O melhor resultado foi tirado da célula de silício cristalino, onde as curvas estavam semelhantes quando comparadas com o *fitting* experimental, estando os valores de V_{oc} inferiores ao esperado. A estabilidade desta célula, com a boa dispersão de pontos, fez com que a sua precisão fosse a melhor. A célula de silício amorfo apresentou resultados algo positivos, pela parecença visual das suas curvas. Nas células de *perovksita* os resultados já foram algo medianos. Apesar do decréscimo da performance das células, dependendo do nível de *cracking*, ser visível nas curvas, estas apresentavam valores de V_{oc} longe do esperado. A instabilidade destas células com a grande dispersão dos pontos experimentais, teve impacto nestes resultados. A célula *CIGS*, como era de esperar teve um péssimo resultado, devido à sua curva característica nada ter a ver com a do modelo *1m3p*. Este modelo necessita de alguns ajustes de modo a conseguir representar com maior precisão o comportamento das células.

Com o estudo efetuado neste trabalho é possível concluir que o *cracking* influencia seguramente o desempenho de uma célula solar, onde no extremo inviabiliza completamente a célula. Para além de ser necessária uma boa manutenção dos sistemas solares de modo a reduzir as possíveis perdas ao máximo é necessária uma evolução da tecnologia, onde seja possível diminuir estas situações, ou mesmo extingui-las o que iria otimizar o seu desempenho.

Bibliografia

[1] H. Ritchie and M. Roser, "Renewable energy," *Our World in Data*, 2020, https://ourworldindata.org/renewable-energy.

[2] Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K.A., K. Kato, Friesen T., Liu H., and Van Iseghem M., *IEA-PVPS T13-01 2014 Review of Failures of Photovoltaic Modules Final*, 2014, no. July.

[3] http://www.hovall.com/solar-panels-repair/, [Online; 15 de Março de 2021].

[4] https://www.lgenergy.com.au/faq/beware-cheap-solar-systems/i-can-see-some-browning-or-yellowing-on-my-solar-panel-what-is-it, [Online; 15 de Março de 2021].

[5] https://www.waaree.com/reliable-raw-material.htmt, [Online; 15 de Março de 2021].

[6] https://sussexsolar.com/solar-pv-service/, [Online; 1 de Fevereiro de 2021].

[7] https://www.constructionspecifier.com/solar-power-focusing-on-quality-and-long-term-reliability/, [Online; 10 de Fevereiro de 2021].

[8] "Organic Solar Cells," https://infinitypv.com/images/infinityPV_OPV_organic_solar_cells.pdf, [Online; 1 de Março de 2021].

[9] S. R. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216–1226, 2001.

[10] B. P. Rappaport, "The Photovohaic Effect and its Utilization*," 1959.

[11] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, "Photovoltaic solar energy: Conceptual framework," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, no. June 2016, pp. 590–601, 2017.

[12] A. Goetzberger, C. Hebling, and H. W. Schock, "Photovoltaic materials, history, status and outlook," *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 40, no. 1, pp. 1–46, 2003.

[13] J. Subtil Lacerda and J. C. Van Den Bergh, “Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 331–340, 2016.

[14] M. Hosenuzzaman, N. A. Rahim, J. Selvaraj, M. Hasanuzzaman, A. B. Malek, and A. Nahar, “Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 284–297, 2015.

[15] L. El Chaar, L. A. Lamont, and N. El Zein, “Review of photovoltaic technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2165–2175, 2011.

[16] V. Avrutin, N. Izyumskaya, and H. Morko, “Semiconductor solar cells: Recent progress in terrestrial applications,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 49, no. 4, pp. 337–364, 2011.

[17] B. Ehrler, E. Alarcón-Lladó, S. W. Tabernig, T. Veeken, E. C. Garnett, and A. Polman, “Photovoltaics reaching for the shockley-queisser limit,” *ACS Energy Letters*, vol. 5, no. 9, pp. 3029–3033, 2020.

[18] N. G. Park, “Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology,” *Materials Today*, vol. 18, no. 2, pp. 65–72, 2015.

[19] J. Jeong, M. Kim, J. Seo, H. Lu, P. Ahlawat, A. Mishra, Y. Yang, M. A. Hope, F. T. Eickemeyer, M. Kim, Y. J. Yoon, I. W. Choi, B. P. Darwich, S. J. Choi, Y. Jo, J. H. Lee, B. Walker, S. M. Zakeeruddin, L. Emsley, U. Rothlisberger, A. Hagfeldt, D. S. Kim, M. Grätzel, and J. Y. Kim, “Pseudo-halide anion engineering for α-fapbi3 perovskite solar cells,” *Nature*, vol. 592, no. 7854, pp. 381–385, Apr 2021.

[20] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, “The emergence of perovskite solar cells,” *Nature Photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506–514, 2014.

[21] A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, C. M. Kébé, P. A. Ndiaye, and V. Sambou, “Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review,” *Solar Energy*, vol. 96, pp. 140–151, 2013.

[22] S. Yang and L. Jiang, *Crystalline Silicon PV Module Field Failures*. Shuying Yang & Long Jiang, 2019, no. 5.

[23] A. Sinha, O. S. Sastry, and R. Gupta, “Nondestructive characterization of encapsulant discoloration effects in crystalline-silicon PV modules,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 155, pp. 234–242, 2016.

[24] J. H. Wohlgemuth, P. Hacke, N. Bosco, D. C. Miller, M. D. Kempe, and S. R. Kurtz, “Assessing the causes of encapsulant delamination in PV modules,” *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017*, pp. 1–6, 2017.

[25] M. Waqar Akram, G. Li, Y. Jin, C. Zhu, A. Javaid, M. Zuhaib Akram, and M. Usman Khan, "Study of manufacturing and hotspot formation in cut cell and full cell PV modules," *Solar Energy*, vol. 203, no. March, pp. 247–259, 2020.

[26] P. Bharadwaj, K. Karnataki, and V. John, "Formation of Hotspots on Healthy PV Modules and Their Effect on Output Performance," *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC 2018 - A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC and 34th EU PVSEC*, pp. 676–680, 2018.

[27] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, and M. Köntges, "Criticality of cracks in PV modules," *Energy Procedia*, vol. 27, pp. 658–663, 2012.

[28] A. Ennemri, P. O. Logerais, M. Balistrou, J. F. Durastanti, and I. Belaidi, "Cracks in silicon photovoltaic modules: A review," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 21, no. 1-2, pp. 74–92, 2019.

[29] A. Morlier, F. Haase, and M. Kontges, "Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power - A simulation study based on field data," *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*, pp. 1–7, 2015.

[30] M. Dhimish, V. Holmes, M. Dales, and B. Mehrdadi, "Effect of micro cracks on photovoltaic output power: Case study based on real time long term data measurements," *Micro and Nano Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 803–807, 2017.

[31] H. Yang, J. Chang, H. Wang, and D. Song, "Power degradation caused by snail trails in urban photovoltaic energy systems," *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 422–428, 2016.

[32] N. J. Nagelkerke, "A note on a general definition of the coefficient of determination," *Biometrika*, vol. 78, no. 3, pp. 691–692, 1991.

[33] "SOLO Panels," https://infinitypv.com/brochures/SOLO%20V1.2.pdf, [Online; 1 de Março de 2021].

[34] https://portuguese.alibaba.com/product-detail/rollable-5v-1a-power-bank-solar-fast-charger-solar-charger-power-bank-62381462949.html, [Online; 1 de Março de 2021].

[35] https://www.amazon.es/Newgrees-plegable-silicio-membrana-bater%C3%83%C2%AD/dp/B07P6GHT4J, [Online; 1 de Março de 2021].

[36] https://pt.aliexpress.com/item/32818454409.html, [Online; 1 de Março de 2021].

[37] T. A. Varshney A, "Simulink model of solar array for photovoltaic power generation system." *Int J Electr Electr Eng*, vol. 7, no. 2, p. 8, 2014.

[38] M. and Azzouzi, D. Popescu, and M. Bouchahdane, “Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model,” *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 4, no. 6, pp. 414–420, 2016.

6

Anexo

6.1 Valores da fonte de tensão e resistência para célula de *perovksita*

Tabela 6.1: Valores da fonte de tensão e resistência para a célula de *perovskita*.

Original		Crack1		Crack2	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)	Fonte de tensão (V)	Resistência (Ohm)	Fonte de tensão (V)	Resistência (Ohm)
0,14	1500	0	9500	0,109	2550
0,23	1500	0,19	1063,83	0,17	2000
0,14	5000	0,24	1020,619	0,19	2666,667
0,24	875	0,141	1123,711	0,23	2000
0,17	3000	0,25	841,1215	0,24	1000
0,2	1142,857	0,16	714,2857	0,25	907,1429
0,28	285,7143	0,26	111,1111	0,123	2400
0,26	1500	0,27	880	0,147	1650
0,23	2000	0,226	1300	0,18	1166,667
0,29	1571,429	0,35	1000	0,215	1750
0,4	1200	0,36	1285,714	0,25	2000
0,34	2000	0,29	1500	0,24	1166,667
0,26	3000	0,35	1571,429	0,275	7000
0,32	1800	0,45	777,7778	0,31	666,6667
0,41	7000	0,38	2000	0,38	777,7778
0,48	1800	0,4	1400	0,31	1000
0,39	2000	0,5	1500	0,36	2000
0,41	2000	0,53	1000	0,38	333,3333
0,47	3000	0,55	2000	0,45	1200
0,53	1000	0,58	500	0,486	700
0,54	5000	0,59	1000	0,5	1000
0,51	2000	0,61	2000	0,53	1400
0,55	2000	0,63	1000	0,6	4000
0,59	2666,667	0,65	750	0,64	3000
0,67	857,1429	0,68	1000	0,67	2000
0,61	3000	0,71	1333,333	0,69	2000
0,64	2000	0,75	1000	0,71	1000
0,66	3000	0,77	1000	0,76	1000
0,69	2000	0,8	1333,333	0,79	500
0,75	1666,667	0,82	1200	0,81	1200
0,7	2000	0,85	1250	0,84	800
0,76	1000	0,875	833,3333	0,86	1000
0,78	1666,667	0,9	4000	0,88	800
0,83	2000	0,92	897,4359	0,9	1000
0,85	2000	0,955	972,2222	0,92	500
0,92	3000	0,99	1000	0,93	1333,333
0,98	1000	1,02	1333,333	0,95	500
0,99	2500	1,06	666,6667	0,96	666,6667
1,04	1800	1,08	1500	0,97	666,6667
1,13	2000	1,11	1000	0,98	1500
1,19	125	1,13	1000	0,995	500
1,18	1666,667	1,15	1500	1	666,6667

Tabela 6.1: Valores da fonte de tensão e resistência para a célula de *perovskita*.

Original	
1,23	1333,333
1,27	2000
1,31	1000
1,34	1333,333
1,38	2000
1,42	1500
1,45	5000
1,5	1500
1,53	4000
1,57	666,6667
1,59	1000
1,61	500
1,6	500
1,61	2000
1,63	1000
1,65	2000
1,67	4000
1,74	3000
1,75	1000
1,76	1000
1,77	1000
1,83	3000
1,89	666,6667
2,08	15000
2,23	2000
2,25	2500
2,2	9000
2,29	1000
2,3	500
2,08	500
2,09	1000
2,1	3000
2,13	500
2,14	2000
2,16	500
2,18	20000

Crack1	
1,18	400
1,19	1333,333
1,21	1000
1,23	1333,333
1,25	666,6667
1,26	666,6667
1,27	666,6667
1,28	2000
1,3	1000
1,31	1000
1,325	333,3333
1,33	1000
1,34	1000
1,35	2000
1,36	1000
1,37	1000
1,375	1500
1,39	500
1,395	500
1,4	2000
1,41	1000
1,42	2000
1,43	2000
1,44	2000
1,45	1000
1,455	1000
1,46	1000
1,465	909,0909
1,415	1000
1,445	833,3333
1,47	750
1,515	1500
1,53	666,6667
1,54	666,6667
1,53	666,6667
1,54	1000
1,57	500
1,575	714,2857
1,58	769,2308
1,59	666,6667
1,6	1000
1,61	400
1,62	1000
1,63	500
1,635	1000
1,64	1000
1,645	71,42857

Crack2	
1,01	1000
1,02	666,6667
1,03	2000
1,05	1000
1,06	666,6667
1,07	1000
1,09	1000
1,1	666,6667
1,11	1000
1,12	1000
1,13	1000
1,14	1000
1,15	1000
1,13	666,6667
1,15	1000
1,19	1000
1,2	1000
1,21	1000
1,23	666,6667
1,24	1000
1,25	1000
1,26	1000
1,27	2000

Crack3	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Ohm)**
0	2666,667
0,135	1250
0,16	785,7143
0,215	166,6667
0,27	1400
0,34	1400
0,41	666,6667
0,45	1000
0,5	800
0,52	1428,571
0,57	750
0,6	200
0,605	1200
0,635	1200
0,665	1666,667
0,69	2000
0,71	2000
0,73	2000
0,76	1000
0,77	10000
0,82	1666,667
0,82	1200
0,85	1000
0,855	2500
0,88	1333,333
0,9	1000
0,91	1000
0,92	2000
0,93	1000
0,94	666,6667
0,95	1500
0,965	1500
0,98	1500
0,995	500
1	2000
1,02	1000
1,03	2000
1,04	1000
1,05	2000
1,06	1333,333
1,08	1000
1,09	666,6667
1,1	2000
1,12	1000
1,13	1000
1,14	1000
1,145	6000
1,175	1000
1,145	500

Crack4	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Ohm)**
0	2833,333
0,085	3250
0,15	3250
0,13	1000
0,09	1000
0,1	2250
0,145	500
0,15	1333,333
0,19	250
0,21	1250
0,26	1666,667
0,31	1666,667
0,36	1142,857
0,4	1400
0,435	1750
0,47	1200
0,5	1666,667
0,525	1000
0,545	550
0,56	2500
0,61	1000
0,65	1250
0,675	1500
0,69	2000
0,71	1500
0,725	1500
0,74	1500
0,755	2500
0,78	1500
0,81	2000
0,82	2000
0,84	666,6667
0,84	1200
0,87	1333,333
0,89	2000
0,9	2000
0,92	666,6667
0,93	1500
0,945	2000
0,955	1500
0,97	1333,333
0,99	1111,111
1	909,0909
1,01	1000
1,02	2000
1,03	1000
1,035	500
1,04	1200
1,05	1428,571

Crack3	
1,15	1000
1,15	2500

Crack4	
1,06	1111,111
1,07	1000
1,08	2000
1,09	153,8462

6.2 Valores da fonte de tensão e resistência para painel de *perovksita*

Tabela 6.3: Valores da fonte de tensão e resistência para o painel de *perovksita*.

Original		Crack1		Crack2	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)	Fonte de tensão (V)	Resistência (Ohm)	Fonte de tensão (V)	Resistência (Ohm)
0,08	38000	0,195	10500	0,04	15000
0,18	20000	0,278	267000	0,07	20000
0,23	20000	0,545	265000	0,12	30000
0,28	13333,33	1,06	240000	0,18	40000
0,57	250000	1,3	220000	0,22	20000
0,82	500000	1,74	160000	0,24	30000
1,07	287500	1,9	50000	0,55	50000
1,3	244444,4	1,98	180000	1,06	83333,33
1,52	275000	2,38	220000	1,55	220000
1,74	210000	2,6	200000	1,77	230000
1,95	10000	2,95	200000	2,27	210000
2,19	190000	3,15	130000	2,48	200000
2,38	170000	3,28	220000	2,86	140000
2,76	140000	3,68	120000	3	200000
2,9	170000	3,8	150000	3,4	85000
3,07	360000	4,1	130000	3,57	130000
3,5	300000	4,38	120000	4,05	150000
3,92	80000	4,5	30000	4,2	130000
4	100000	4,53	260000	4,45	170000
4,3	100000	5,05	175000	4,47	365000
4,4	660000	5,4	500000	5,2	200000
5,06	170000	5,9	150000	5,6	450000
5,4	450000	6,2	300000	6,05	150000
5,85	125000	6,5	400000	6,35	450000
6,1	390000	6,9	180000	6,8	250000
6,49	280000	7,26	280000	7,05	275000
6,77	265000	7,82	420000	7,6	240000
7,3	240000	8,24	190000	8,08	185000
7,78	240000	8,62	180000	8,45	390000
8,14	173333,3	8,8	300000	8,84	280000
8,4	350000	9,1	270000	9,12	145000
8,75	250000	9,37	210000	9,41	210000
9	250000	9,58	160000	9,62	180000
9,25	200000	9,9	150000	9,8	950000
9,45	180000	10,05	150000	9,99	200000
9,63	300000	10,34	90000	10,15	250000
9,78	100000	10,55	30000	10,3	100000
10	100000	10,64	210000	10,37	260000
10,11	128571,4	11,13	35000	10,5	325000
10,2	333333,3	11,4	233333,3	10,63	233333,3
10,3	142857,1	11,47	233333,3	10,77	140000
10,4	500000	11,54	200000	10,84	250000

Tabela 6.3: Valores da fonte de tensão e resistência para o painel de *perovksita*.

Original	
10,6	187500
10,75	216666,7
10,87	250000
10,97	250000
11,07	100000
11,1	200000
11,2	100000
11,25	55555,56
11,3	125000
11,35	200000
11,33	175000
11,4	1000000
11,6	250000
11,65	50000
11,66	400000
11,7	250000
11,75	1000000
11,85	200000
11,83	100000
11,85	250000
11,8	288888,9

Crack1	
11,6	280000
11,63	700000
11,7	200000
11,73	250000
11,78	200000
11,8	500000
11,85	50000
11,86	400000
11,9	100000
11,91	250000

Crack2	
10,94	162500
11,07	300000
11,21	225000
11,3	250000
11,4	250000
11,5	300000
11,56	200000
11,62	166666,7
11,67	100000
11,7	250000
11,75	100000
11,78	300000
11,84	300000
11,9	500000
11,95	150000
11,98	250000
11,93	300000
11,99	100000
12	400000
12,05	1230000

Crack3	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0,086	4500
0,215	10000
0,595	251000
0,846	244000
1,31	230000
1,54	20000
1,56	390000
1,95	120000
2,19	110000
2,5	500000
2,75	150000
2,9	187500
3,05	750000
3,2	40000
3,7	100000
3,8	500000
4,1	1000000
4,2	100000
4,37	300000
4,46	258823,5
4,9	100000
5,2	500000
5,7	300000

Crack4	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Ohm)**
0,09	48333,33
0,119	30000
0,189	13571,43
0,256	66000
0,52	228000
0,748	212000
0,96	80000
1,4	237500
1,59	190000
1,78	500000
1,98	170000
2,15	187500
2,51	233333,3
2,65	125000
2,8	750000
2,95	383333,3
3,18	77777,78
3,25	250000
3,4	142857,1
3,5	1700000
3,67	220000
3,78	183333,3
3,89	433333,3

Crack5	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Ohm)**
0,119	48000
0,143	38000
0,19	15000
0,23	10000
0,72	133333,3
1,33	126666,7
1,52	360000
1,7	60000
1,73	420000
1,94	475000
2,13	266666,7
2,46	140000
2,6	340000
2,77	130000
2,9	340000
3,07	260000
3,4	100000
3,5	200000
3,6	300000
3,75	650000
3,88	150000
4	260000
4,13	280000

Crack3	
6	200000
6,3	133333,3
6,5	300000
7,1	200000
7,5	333333,3
7,9	185714,3
8,16	200000
8,44	160000
8,6	312500
8,85	55555,56
8,9	350000
9,18	250000
9,33	185714,3
9,46	240000
9,58	150000
9,67	275000
9,78	66666,67
9,82	366666,7
9,93	40000
10,15	100000
10,3	200000
10,4	200000
10,5	250000
10,6	500000
10,7	250000
10,75	200000
10,71	50000
10,73	233333,3
10,8	333333,3
10,9	300000
10,93	166666,7
10,98	33333,33
10,99	200000
11,01	33333,33
11,02	100000
11,03	100000
11,04	150000
11,07	100000
11,08	227272,7

Crack4	
4,02	80000
4,1	300000
4,55	194444,4
4,9	230769,2
5,2	230769,2
5,5	345454,5
5,88	183333,3
6,1	272222,2
6,59	320000
7,07	220000
7,4	250000
7,7	254545,5
7,98	210000
8,19	287500
8,42	212500
8,59	300000
8,8	200000
8,92	433333,3
9,05	78571,43
9,16	380000
9,35	250000
9,45	225000
9,54	125000
9,59	166666,7
9,64	300000
9,82	360000
10	220000
10,11	100000
10,16	266666,7
10,24	300000
10,36	100000
10,39	200000
10,45	250000
10,5	233333,3
10,57	300000
10,6	500000
10,7	200000
10,66	200000
10,7	250000
10,75	500000
10,8	1000000
10,9	500000
10,95	50000
10,97	255555,6

Crack5	
4,55	190000
4,93	370000
5,3	220000
5,63	270000
5,9	250000
6,15	323529,4
6,7	281250
7,15	436363,6
7,63	266666,7
7,95	208333,3
8,2	250000
8,45	312500
8,7	225000
8,88	314285,7
9,1	187500
9,25	160000
9,33	233333,3
9,47	100000
9,52	260000
9,65	160000
9,73	140000
9,8	600000
9,92	228571,4
10,08	200000
10,2	400000
10,4	250000
10,5	1000000
10,6	87500
10,67	350000
10,74	150000
10,8	333333,3
10,9	125000
10,95	400000
11,03	200000
11,07	250000
11,12	300000
11,18	2200000
11,25	900000
11,34	150000
11,37	100000
11,39	100000
11,39	290000

Crack6	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0,095	10625

Crack6	
0,187	30000
0,247	66000
0,52	450000
0,986	565000
1,216	114666,7
1,56	480000
1,8	360000
1,98	440000
2,2	200000
2,3	200000
2,72	130000
2,85	425000
3,02	163636,4
3,2	500000
3,35	216666,7
3,6	62500
3,85	200000
4,08	46666,67
4,15	300000
4,6	720000
4,96	191304,3
5,4	200000
5,7	291666,7
6,05	210000
6,26	260000
6,78	280000
7,2	233333,3
7,55	230769,2
7,85	388888,9
8,2	260000
8,46	266666,7
8,7	250000
8,9	285714,3
9,1	333333,3
9,3	300000
9,45	600000
9,71	180000
9,8	85714,29
9,86	650000
9,99	400000
10,11	342857,1
10,35	83333,33
10,4	400000
10,6	160000
10,68	250000
10,73	200000
10,81	100000
10,87	350000
10,94	450000
11,03	166666,7

Crack6	
11,08	266666,7
11,16	300000
11,22	350000
11,29	300000
11,35	100000
11,39	400000
11,43	50000
11,44	300000
11,5	1000000
11,6	100000
11,62	200000
11,64	344444,4

6.3 Valores da fonte de tensão e resistência para célula *CIGS*

Tabela 6.6: Valores da fonte de tensão e resistência para célula *CIGS*.

Original	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	5,333333
0,48	5,56962
0,92	3,820225
1,26	4,181818
1,49	4,042553
1,68	3,947368
1,83	8,630137
2,46	22,22222
2,66	32
2,82	16,25
2,95	18,33333
3,06	15,71429
3,17	18,33333
3,61	20
3,69	26,66667
3,77	27,5
3,88	17,5
3,95	20
4,01	22,14286
4,32	39,47368
5,07	0,833333
5,09	0,666667
5,1	0,833333
5,11	1,428571
5,12	0,5
5,13	2,5

Crack1	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	5
0,52	3,488372
0,88	5,102041
1,18	4,090909
1,43	4,324324
1,61	7,5
1,77	38
2,34	25
2,53	18,57143
2,68	15,71429
2,81	16,66667
2,92	18,26087
3,02	22,5
3,44	22,5
3,53	17,5
3,62	26,66667
3,69	40
3,77	20,76923
3,89	28
4,16	23,125
4,72	0,625
5,09	0,909091
5,11	1,428571
5,12	0,769231
5,12	0,769231

Crack2	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	3,294118
0,48	5,081967
0,76	4,339623
1,07	2,888889
1,3	5
1,43	6,764706
1,59	25
2,05	190
2,2	30
2,39	22
2,51	20
2,62	22,10526
2,72	20
3,14	17,5
3,22	20
3,29	26,66667
3,35	20
3,43	25,45455
3,49	32,94118
3,77	34,16667
4,33	28,18182
4,74	4,545455
5,05	1,111111
5,11	1,666667
5,11	0,625
5,13	2,5

Crack3	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	6,666667
0,44	4,146341
0,61	3,666667
0,83	6,25
1,03	5,333333
1,19	5,238095
1,3	8,77193
1,8	8,571429
1,92	16,66667
1,97	11,66667
2,04	10

Crack4	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	6
0,18	6
0,36	46,66667
0,5	6
0,62	8,333333
0,72	4,782609
0,83	3,243243
0,95	20
1,01	1,666667
1,02	10
1,05	6,666667

Crack5	
Fonte de tensão (V)	**Resistência (Omh)**
0	10
0,12	22,22222
0,32	7,5
0,48	13,75
0,59	3,333333
0,69	0,869565
0,71	6
0,89	17,14286
1,01	5,384615
1,08	3,636364
1,12	5

Crack3	
2,09	130
2,22	75,71429
2,75	8,333333
2,8	45
2,89	35
2,96	25
3,01	30
3,07	26
3,33	28,75
3,79	26,66667
4,11	38,75
4,42	58,33333
4,77	36,66667
4,99	6,666667
5,03	12
5,09	0,909091
5,1	1,111111
5,11	1,428571
5,12	3,333333

Crack4	
1,07	10
1,11	4,166667
1,16	24
1,4	72,5
1,69	16,66667
1,84	3,333333
1,85	20
1,93	25
1,98	131,6667
2,77	125
3,02	78
3,41	96,66667
4,96	46,66667
5,1	5

Crack5	
1,14	4
1,16	16
1,24	23,33333
1,38	15
1,44	73,33333
1,66	33,33333
1,76	70
1,83	15
2,79	82
3,2	48
3,44	140
3,72	90
3,9	100
4	140
5,1	2,5

6.4 Valores da fonte de tensão e resistência para célula silício amorfo

Tabela 6.8: Valores da fonte de tensão e resistência para célula de silício amorfo.

Original	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0	4500
0,09	2150
0,133	925
0,17	625
0,195	550
0,25	900
0,16	650
0,3	2300
0,5	1300
0,64	600
0,7	7700
0,777	505,5556
1,09	500
1,14	172,7273
1,33	100
1,37	60
1,4	48,78049
1,42	51,28205
1,44	33,33333
1,45	100
1,49	30,30303
1,5	100
1,5	153,8462
1,54	100
1,55	500

Crack1	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,007	13,33333
0,013	113,3333
0,03	113,3333
0,047	52,17391
0,083	48,21429
0,13	90,90909
0,174	52,17391
0,186	57,89474
0,197	47,05882
0,205	60
0,214	50
0,22	71,42857
0,23	83,33333
0,235	500
0,24	15,78947
0,243	50
0,247	42,85714
0,255	166,6667
0,262	26,66667
0,27	125
0,28	9,090909
0,281	122,2222
0,292	50
0,296	50
0,299	137,5
0,31	66,66667
0,314	42,85714
0,317	100
0,32	25
0,321	40
0,325	100
0,33	25
0,331	100
0,338	300
0,341	200

Crack2	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,005	30,76923
0,009	36,36364
0,025	28,57143
0,035	30,88235
0,056	29,78723
0,07	29,41176
0,08	37,5
0,089	75
0,095	19,23077
0,1	30,76923
0,104	40
0,108	25
0,109	23,07692
0,112	66,66667
0,116	16,66667
0,117	16,66667
0,118	50
0,12	20
0,121	33,33333
0,122	40
0,124	50
0,125	36,36364
0,129	37,5
0,132	33,33333
0,134	25
0,135	166,6667
0,13	200
0,136	40
0,138	66,66667
0,14	50
0,141	66,66667
0,145	150
0,142	50
0,144	66,66667
0,147	100

Crack3	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,004	20
0,007	31,70732
0,02	27,27273
0,029	29,03226
0,047	28,20513
0,058	27,58621
0,066	31,81818
0,073	25
0,077	30,76923
0,081	30
0,084	33,33333
0,087	105,2632
0,089	6,289308
0,09	40
0,092	20
0,093	40
0,095	25
0,096	33,33333
0,097	33,33333
0,098	50
0,099	33,33333
0,1	37,5
0,103	28,57143
0,105	75
0,107	33,33333
0,108	50
0,109	33,33333
0,11	33,33333
0,111	100
0,112	33,33333
0,113	20
0,114	100

Crack4	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,001	25
0,002	10
0,003	16,66667
0,005	20
0,008	11,11111
0,009	16,66667
0,01	33,33333
0,011	50
0,012	100
0,013	100
0,014	100
0,016	100
0,018	100
0,02	100
0,014	100
0,015	100

6.5 Valores da fonte de tensão e resistência para célula silício cristalino

Tabela 6.10: Valores da fonte de tensão e resistência para célula de silício cristalino.

Original	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,52	1700
0,85	3900
1,24	1100
1,57	85,71429
1,81	26,82927
1,92	19,35484
1,98	10
2,01	13,63636
2,04	5,882353
2,05	7,8125
2,1	6,060606
2,12	9,52381
2,14	10
2,15	25

Crack1	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0	800
0,12	233,3333
0,19	416,6667
0,44	450
0,53	366,6667
0,75	250
0,95	123,0769
1,11	85,71429
1,23	50
1,31	50
1,38	38,46154
1,43	33,33333
1,46	26,82927
1,57	21,73913
1,62	20
1,65	20
1,67	12,5
1,68	16,66667
1,69	25
1,7	50
1,71	50
1,72	16,66667
1,73	33,33333
1,74	50

Crack2	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0,11	200
0,19	266,6667
0,27	466,6667
0,41	266,6667
0,49	333,3333
0,69	200
0,87	145,4545
1,03	76,92308
1,13	64,28571
1,22	53,84615
1,29	45,45455
1,34	28,57143
1,36	33,33333
1,42	30
1,48	21,42857
1,51	14,28571
1,52	21,42857
1,55	33,33333
1,58	14,28571
1,59	16,66667
1,6	25
1,61	33,33333
1,62	100
1,63	16,66667
1,64	33,33333

Crack3	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0	900
0,11	360
0,28	400
0,48	333,3333
0,68	160
0,84	125
0,99	69,23077
1,08	40
1,16	120
1,22	50

Crack4	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0	700
0,07	100
0,08	233,3333
0,15	133,3333
0,23	180
0,32	200
0,4	150
0,55	130
0,68	90,90909
0,78	125

Crack5	
Fonte de tensão (V)	Resistência (Omh)
0	150
0,03	100
0,04	100
0,07	150
0,1	200
0,14	50
0,16	120
0,22	166,6667
0,27	166,6667
0,32	250

Crack3	
1,27	37,5
1,36	30,76923
1,4	27,27273
1,43	26,66667
1,47	23,07692
1,5	22,22222
1,52	14,28571
1,53	20
1,54	25
1,55	25
1,56	33,33333
1,57	50
1,58	100
1,59	20
1,6	50

Crack4	
0,88	70
0,95	66,66667
1,01	55,55556
1,06	42,85714
1,09	50
1,15	50
1,22	22,22222
1,24	33,33333
1,27	27,27273
1,3	25
1,32	40
1,34	40
1,36	33,33333
1,37	33,33333
1,38	50
1,39	100
1,4	100
1,41	20
1,42	50
1,43	33,33333
1,44	100

Crack5	
0,37	200
0,41	400
0,45	200
0,49	500
0,54	350
0,61	366,6667
0,72	600
0,78	500
0,88	300
1	200
1,08	200
1,14	100
1,17	66,66667
1,19	100
1,22	100
1,23	100
1,25	50
1,26	100
1,27	50
1,29	50
1,31	50
1,32	50
1,33	100