



ANÁLISES DOS PRINCÍPIOS FÍSICOS RESPONSÁVEIS PELA REDUÇÃO DO DESEMPENHO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Carlos Augusto De Carvalho, José Luiz Sousa Lima.

Resumo: A necessidade de se explorar outras fontes energéticas surge em nossa sociedade para se atender à crescente demanda de maneira a não comprometer a disponibilidade dos recursos naturais. Nesse contexto, tem sido uma prática comum a utilização da radiação solar para se obter a eletricidade, reduzindo a dependência em relação a outras fontes pautadas no uso de recursos que podem vir a ficar escassos em um futuro próximo. Nessa atividade acadêmica será apresentado um estudo sobre os princípios físicos que envolvem os atuais sistemas fotovoltaicos, ocasionando uma diminuição de sua eficiência com o passar do tempo. Nesse sentido, buscar-se caracterizar essas formas de degradação mostrando as principais tecnologias afetadas, assim como a necessidade de se desenvolver medidas para inibir ou amenizar seus efeitos.

Palavras-chave: Eficiência; Degradação induzida pelo potencial; Degradação induzida pela luz; Sistema fotovoltaico; Célula fotovoltaica.

1-INTRODUÇÃO

Em meio ao atual cenário marcado por intensos debates em torno das fontes não renováveis e poluentes, o aumento da demanda energética tem motivado a busca por novas fontes no intuito de conciliar interesses econômicos e sociais. Nesse contexto, o uso da energia solar se apresenta como uma alternativa bastante promissora em razão de se tratar de uma fonte renovável e que quase não gera impactos ambientais. Os sistemas que convertem a radiação solar em eletricidade não emitem gases poluentes e seus materiais podem ser reciclados em sua maior parte. Hoje a tecnologia para reutilizar esses materiais é pouco difundida, mas vários países se comprometem com o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao setor. No entanto, pode-se considerar que a geração de eletricidade a partir da luz solar ainda é uma opção pouco utilizada devido a questões econômicas.

A maior parte da eletricidade consumida em nosso país tem origem nas usinas hidrelétricas, as quais necessitam de grandes volumes de água para conseguir operar e apresentar um desempenho satisfatório. Entretanto, nos últimos anos, grandes períodos de estiagem têm comprometido essa forma de obtenção de energia. Além disso, muitos são os problemas ambientais e sociais que a envolvem. Apesar de apresentar boas condições climáticas, nossos mercados ainda são pouco atrativos a futuras instalações fotovoltaicas em função dos poucos incentivos ao desenvolvimento de pesquisas nessa área [1]. Hoje em dia, a energia solar é explorada basicamente em comunidades isoladas nas regiões norte e nordeste do país, onde os atuais sistemas convencionais não conseguem atender a demanda energética. A capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados no país é da ordem de $81 MWp$, considerada bastante pequena quando levamos em conta a dimensão do potencial que se pode aproveitar [2].

Recentemente, esse cenário tem apresentado melhoras e espera-se que nos próximos anos novos projetos sejam implantados, sobretudo em aplicações residenciais. Portanto, novas pesquisas estão se desenvolvendo, inclusive buscando selecionar materiais que apresentem melhores eficiências e, ao mesmo tempo, menores custos. Um dos principais campos de investigação tem sido o de células orgânicas, as quais, possivelmente, irão compor boa parte dos sistemas fotovoltaicos em um futuro próximo.

Os custos das células fotovoltaicas é ainda um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. Mas essa tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, em razão, tanto dos seus custos decrescentes, quanto dos custos crescentes das outras formas de produção de energia, inclusive em função da internalização de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais. Nos últimos anos, esses custos necessários para a exploração direta da energia solar tiveram uma redução em torno de 30%, embora ainda permaneçam bastante elevados [3].

Em muitos países desenvolvidos, a exploração da energia solar em sistemas fotovoltaicos tem ganhado importância e, em função dos constantes avanços tecnológicos, os custos necessários a realização dessa atividade são bem mais atrativos do que em países como o Brasil. A opção de substituir as formas convencionais de

geração de energia tem ganhado importância em virtude das constantes políticas que tentam amenizar os impactos ambientais que elas ocasionam. Em nosso país, ainda precisamos de muitos avanços para que a exploração da energia solar possa se tornar economicamente viável, a ponto de competir em condições de igualdade com outras fontes disponíveis no mercado. Mas vale salientar que passos importantes foram dados nos últimos anos com a realização de melhores políticas de incentivos as empresas que atuam no setor.

O desenvolvimento dos equipamentos necessários para a geração de energia fotovoltaica também tem sido um dos grandes empecilhos enfrentados, uma vez que a grande maioria são projetados de maneira que não conseguem apresentar condições adequadas de funcionamento, por um longo período, devido as perdas de eficiência. Nessa perspectiva, a presente atividade acadêmica possui a intenção de analisar o funcionamento de células fotovoltaicas, assim como os princípios físicos envolvidos na sua perda de eficiência com o passar do tempo. Será abordado o princípio de degradação induzida pelo potencial e o de degradação induzida pela luz.

2- ANÁLISE TEÓRICA

2.1- Funcionamento dos Sistemas Fotovoltaicos

A obtenção da eletricidade a partir da radiação solar constitui uma atividade em franca expansão, dada as atuais circunstâncias onde a necessidade da utilização de outras formas de energias renováveis se evidencia em nossa sociedade. Tal obtenção ocorre através das células fotovoltaicas, as quais são constituídas basicamente por materiais semicondutores.

Entre os materiais semicondutores mais usados no processo de confecção de células fotovoltaicas, o silício se destaca como um dos melhores em função do conhecimento que se tem a seu respeito e, também, devido as melhores eficiências obtidas até o momento terem sido alcançadas com a sua utilização. As suas formas mais conhecidas são o silício monocristalino, o amorfo e o policristalino.

Esses materiais precisam se submeter a um processo de dopagem antes de serem usados na confecção de células fotovoltaicas. Durante esse processo, certos elementos de impurezas são adicionados aos materiais semicondutores dependendo do resultado almejado. O fósforo e o alumínio são alguns dos elementos de impurezas bastante utilizados, modificando significativamente as características do material.

Numa célula fotovoltaica, temos duas camadas de materiais semicondutores que foram dopadas com elementos diferentes, de maneira a apresentar uma diferença de potencial quando a luz incide na área de contato entre elas. Em função dessa diferença de potencial, os portadores que possuem cargas opostas passam a se movimentar na direção um do outro atravessando a área de contato e transferindo suas cargas. Com isso, cria-se um campo elétrico permitindo o estabelecimento do fluxo eletrônico [1].

A diferença de potencial entre as extremidades do material consiste no chamado efeito fotovoltaico. É através da exploração de tal efeito que as células fotovoltaicas conseguem operar em um painel, realizando a conversão da radiação solar em eletricidade. Entre os principais componentes de um sistema fotovoltaico estão os módulos, o controlador de carga, o sistema de armazenamento de energia e, também, o inversor de corrente contínua para corrente alternada. Geralmente, precisamos reunir em um painel uma grande quantidade de células interconectadas em série ou em paralelo, em razão da energia obtida com uma única célula isolada ser bastante pequena. Essa quantidade varia bastante conforme o tipo de aplicação desejada. Além disso, o rendimento de um conjunto de células é um pouco menor do que a soma total devido as interligações e outros fatores externos [1].

Na Figura 1, temos a ilustração de um sistema fotovoltaico típico de áreas isoladas da rede de distribuição de energia convencional, que precisa de dispositivos para armazenar a energia produzida. Esses sistemas de armazenamento contribuem para encarecer os projetos fotovoltaicos e, além disso, parte da energia armazenada é dissipada para o ambiente em razão da ocorrência de reações químicas. As baterias constituem umas das formas mais comum de armazenamento, sobretudo as de chumbo-ácido e níquel-cádmio, por serem as mais eficientes. Essas baterias, além de apresentar tempo de vida relativamente curto, podem causar sérios impactos ambientais dependendo de sua composição.

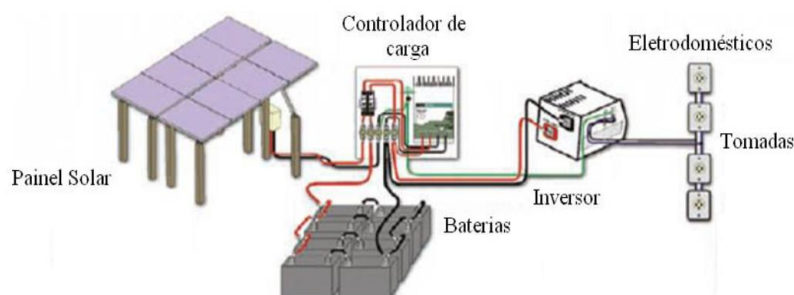


Figura 1. Sistema solar fotovoltaico. (Ref. [4])

Além disso, quando estão em operação, precisam de constantes manutenções no sentido de reduzir as perdas de eficiência em razão do efeito da temperatura do ambiente. Geralmente, dependendo da aplicação, os sistemas de armazenamento precisam de dispositivos reguladores de cargas de maneira a não ser danificado quando eventualmente ocorrer sobrecargas ou descargas intensas.

Os controladores de cargas atuam principalmente evitando a sobrecarga e, também como uma espécie de sinalizador indicando o estado de conservação desses sistemas de armazenamento. Em uma bateria, por exemplo, os reguladores de carga interrompem o fornecimento de energia quando sua capacidade máxima de armazenamento for atingida. Dessa forma, eles evitam que a bateria sofra intensa degradação em virtude de um aquecimento excessivo resultante do fluxo de energia em excesso [4]. Atualmente a maior parte dos controladores de boa qualidade disponível no mercado possui um sensor de temperatura acoplado diretamente a bateria, permitindo a visualização de sua temperatura e possibilitando a identificação do grau de eficiência desses reguladores de carga.

Ao longo dos últimos anos, a quantidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica aumentou de forma significativa em algumas regiões. Isso representa uma fonte complementar, diminuindo a dependência em relação ao sistema elétrico convencional, que se pauta sobretudo no uso de recursos não renováveis e poluentes. Por estarem interligados a rede, tais sistemas dispensam a necessidade de se fazer dimensionamento para atender a demanda energética sob períodos de baixas incidência solar, ao contrário dos sistemas isolados.

Quando eventualmente a energia solar for insuficiente, em determinadas épocas do ano, temos a opção de usar a eletricidade fornecida pelas companhias que operam o setor. Além disso, muitas empresas se comprometem a adquirir o excesso de energia gerada nesses tipos de sistemas, melhorando a confiabilidade e o interesse pela exploração da energia solar.

Devido a energia gerada ser em corrente contínua, os sistemas fotovoltaicos também envolvem o uso de inversores. Os inversores são dispositivos que fazem a conversão da corrente contínua, fornecida pelo módulo, em corrente alternada adequada ao funcionamento da maior parte dos equipamentos de uso comum em nossas atividades cotidianas. As correntes alternadas são mais adequadas para se transportar a longas distâncias do que as correntes contínuas, assim constituem a forma padrão de geração e distribuição de energia elétrica no mundo.

Um inversor deve ser projetado para operar dentro de certos limites, garantido uma maior confiabilidade. Quando mal dimensionado pode prejudicar o funcionamento do sistema, ocasionando perdas de eficiência. Assim, um inversor deve operar em um sistema de maneira a suportar sua potência total. O valor dessa potência pode ser mensurado levando em consideração a potência nominal de entrada e a eficiência do inversor, geralmente fornecida pelo fabricante do aparelho. Quando formos adquirir um inversor junto ao fabricante, devemos levar em conta que a tensão do sistema não deve exceder a tensão de entrada do inversor, considerando as variações da incidência solar em qualquer época do ano [1].

2.2- Características elétricas de uma célula fotovoltaica

Para conhecer o estado operacional dos módulos fotovoltaicos após terem iniciado seu funcionamento, devemos analisar suas características elétricas. Algumas das características mais importantes são apresentadas na curva da Figura 2. Uma das formas mais importantes para se conhecer as características elétricas dos módulos é pela análise de sua curva característica da tensão em função da corrente.

Através de uma fonte de tensão, realiza-se uma varredura entre uma tensão negativa e uma que seja superior à de circuito aberto. Nessa varredura, são conhecidos alguns pontos de tensão e corrente, permitindo o traçado da curva característica como o apresentado na Figura 2. Durante essa atividade o sistema é submetido a certas condições que normalmente não representam aquelas verificadas quando o mesmo for posto em operação [3].

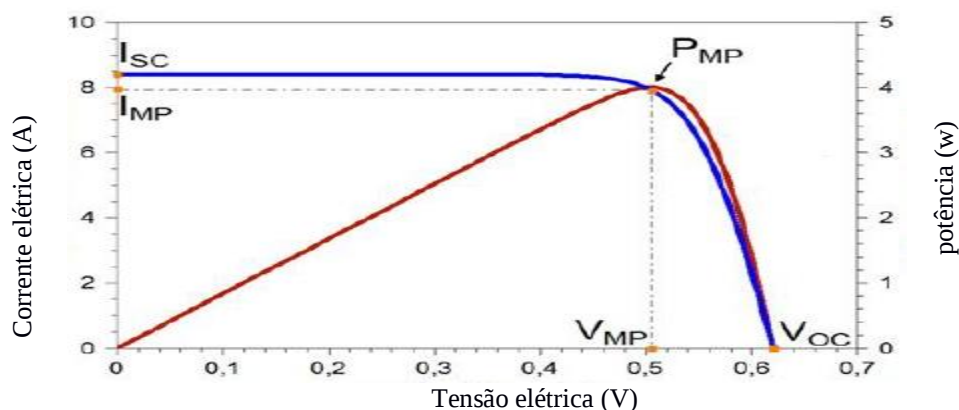


Figura 2. Curva característica (I-V) e curva de potência (P-V) para um módulo. (Fonte: Ref. [3])

Assim, em razão de, na maioria dos casos, as condições reais de operação não coincidirem com aquelas para o qual o módulo foi projetado, algumas normas definem certas condições específicas. Sob essas condições, podemos obter informações a respeito dos módulos fotovoltaicos que se aproximam das que realmente existem. Para cada ponto da curva característica, podemos conhecer a potência com base na multiplicação da tensão pelo valor da corrente elétrica no respectivo ponto escolhido. Desse modo, podemos visualizar o ponto da curva correspondente a potência máxima de operação, assim como os pontos de tensão em circuito aberto e o de corrente de curto-circuito.

Com base nessa curva, podemos ter um maior controle acerca das variações nos valores de tensão e corrente elétrica, o que pode indicar a existência de algum defeito no módulo. Nesse sentido, ao identificarmos uma pequena variação na tensão de circuito aberto, uma das possíveis causas seria a degradação induzida pelo potencial ou até mesmo, a degradação influenciada pela luz. Já quando for observado uma diminuição da corrente de curto-circuito, vários outros fatores podem ser os causadores [5]. Portanto, quando for verificado algo de atípico em relação ao desempenho do módulo, estudos posteriores devem ser realizados no intuito de identificar suas causas e, possíveis medidas para solucionar o problema.

Em relação a análise do estado operacional do módulo fotovoltaico, no intuito de identificar possíveis falhas que de alguma forma possam comprometer seu rendimento, tão importante quanto conhecer a curva característica e os parâmetros elétricos, configura-se o uso das técnicas de termografia [6]. Com o uso das imagens termográficas, podemos através de uma análise qualitativa, identificar possíveis falhas no sistema.

A termografia consiste em uma das formas empregadas para a avaliação de módulos fotovoltaicos, sobretudo antes de serem instalados, numa tentativa de evitar problemas que possam surgir após os mesmos entrar em funcionamento, mas também para analisar a qualidade desses módulos. Geralmente, através de imagens termográficas podemos observar alguns problemas, tal como o aumento de temperatura da célula que diminui a tensão de operação do sistema [7].

2.3- Parâmetros elétricos

Através de análises experimentais, podemos determinar alguns parâmetros elétricos com base nas curvas apresentadas na Figura 2. Com base nesses parâmetros, podemos realizar uma análise quantitativa acerca do rendimento do módulo.

2.3.1- Tensão de circuito aberto (V_{oc})

Quando ocorre a incidência da radiação solar, caso não exista carga ligada ao sistema, surge uma diferença de potencial entre as extremidades de uma célula. Essa diferença de potencial é chamada de tensão de circuito aberto.

Após medida com o auxílio de um voltímetro, essa tensão deve ser comparada com o valor fornecido pelo fabricante do módulo. É esperado que esse valor seja inferior ao especificado pelo fabricante, uma vez que a temperatura de operação é bem maior do que a projetada. Normalmente, o valor dessa tensão fica entre 0,5V e 0,7V para células de silício monocristalino [3]. Através de medidas experimentais, constatou-se que essa tensão pode ser relacionada com outros parâmetros, conforme a Equação:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} + 1\right) \quad (1)$$

onde,

T – Temperatura em Kelvin,

k – Constante de Boltzmann,¹

q – Carga do elétron,²

I_L – Corrente Fotogerada,

I_o – Corrente de saturação reversa do diodo.

2.3.2- Corrente de curto-circuito (I_{sc})

Essa corrente, que consiste em um outro parâmetro de suma importância, é medida quando a tensão elétrica existente entre os terminais de uma célula é nula. Isso acontece quando o módulo está em curto-circuito.

¹ Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$).

² Carga do elétron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$).

Sua leitura é obtida através de um amperímetro, o qual deve ser posicionado em serie para medir a corrente em uma determinada região do circuito [8].

$$I_{sc} = I_{sc_{stc}} \frac{G}{1000} \quad (2)$$

onde,

$I_{sc_{stc}}$ - Corrente de curto circuito do módulo nas STC,³

I_{sc} - Corrente elétrica de circuito aberto,

G - Irradiância incidente no módulo.

2.3.3- Fator de forma (FF)

O fator forma é um parâmetro importante quando necessitarmos realizar uma análise do estado operacional de um sistema fotovoltaico, pode ser definido como sendo a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão. Essa definição é representada pela Equação 3. Valores típicos desses parâmetros para células monocristalinas variam entre 0,6 e 0,85 e de 0,5 a 0,7 para células de silício amorfo [3]. Além disso, esse parâmetro determina a máxima potência do módulo e depende do material da célula.

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (3)$$

onde,

V_{MP} - Tensão onde a potência é máxima,

I_{MP} - Corrente no ponto onde a potência é máxima.

2.3.4- Eficiência (n)

A eficiência representa o grau de conversão da energia solar incidente em eletricidade. Portanto, é considerado um dos mais importante quando se trata de uma análise do estado operacional de um módulo fotovoltaico. Podemos defini-la como a razão entre a potência elétrica produzida em uma célula e a potência da energia incidente, ou seja,

$$n = \frac{I_{sc} V_{MP} FF}{AG} 100\% , \quad (4)$$

onde,

A - Área da célula.

Em testes realizados em laboratórios, as melhores células apresentaram uma eficiência de apenas 24%, sob determinadas condições que na maioria das vezes não refletem aquelas existentes no local onde o painel fotovoltaico é posto em operação [3]. Quando determinada nas condições de teste⁴, a irradiância é igual a G e a potência luminosa incidente no módulo pode ser calculada multiplicando este valor pela área do módulo. A Tabela 1 apresenta a eficiência de alguns materiais.

Pela Tabela 1, observa-se que as células de silício se destacam entre as que apresentam as melhores eficiências, principalmente as de silício monocristalino. Por essa razão são usadas na maior parte dos sistemas fotovoltaicos existentes em nossa sociedade

Em função das quantidades de defeitos adquiridos durante seu processo de fabricação, a forma policristalina apresenta uma menor eficiência em relação ao silício monocristalino, apesar de ser bastante usada em razão de menores custos. Já o silício amorfo é encontrado em muitas aplicações arquitetônicas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas. Ele também é bastante comum, sobretudo quando buscamos conciliar a obtenção de energia e ao mesmo tempo deixar nossas construções com uma certa aparência estética. Os custos dos módulos amorfos podem chegar a ser 40% menores se comparados aos outros materiais [1].

³ STC – Condições padrões de teste (irradiância incidente é $G = 1000 \text{ w/m}^2$, distribuição espectral em AM 1,5 e a temperatura é igual a 25°C).

⁴ Nas condições padrões de teste, a irradiância incidente é $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

Observação: Essa irradiância incidente é global, uma vez que a radiação solar pode incidir tanto de forma perpendicular à superfície da célula quanto de forma difusa. Geralmente, os módulos são instalados em uma certa posição inclinada de maneira a receber uma melhor insolação.

Tabela 1: Eficiência conforme o material. (Adaptado Ref. [1])

Material	Eficiência das células	
	Laboratório	Comercial
Silício monocristalino	24,7%	18%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%
Silício policristalino	19,8%	15%
Silício cristalino de película fina	19,2%	9,5%
Silício amorfo estável	13%	10,5%
Telureto de cádmio	16,4%	10%

No entanto, a eficiência dos módulos solares obtida até o momento, se configura como sendo muito pequena quando comparada a obtida com as demais fontes energéticas e, além disso, tende a diminuir gradativamente com o passar do tempo em razão da possível existência de algumas formas de degradação que serão discutidas a seguir.

2-4. Degradação induzida pelo potencial

O fenômeno da degradação induzida pelo potencial (PID) constitui um importante fator a ser considerado quando tratamos de sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte, os quais operam sob regime de tensão relativamente alta [9]. Em algumas literaturas, podemos encontrar diferentes definições para o fenômeno dependendo do módulo afetado. No entanto, para módulos de silício cristalinos que até o momento tem sido os mais estudados com relação a essa forma de degradação, podemos definir a PID como sendo a degradação sofrida pelo material devido a sua exposição a um potencial externo em relação a terra. Seus efeitos podem ser mais intensos em função tanto do material da célula como também de alguns fatores climáticos, como a umidade e a temperatura.

A umidade e a temperatura nos locais onde se realiza a operação dos sistemas fotovoltaicos possuem grandes influências no surgimento da PID, de modo que os períodos mais favoráveis à sua ocorrência têm sido nas primeiras horas da manhã, quando a temperatura ainda é muito baixa e a umidade é relativamente alta.

Apesar de ser uma forma de degradação predominante em tecnologias de silício cristalino, também podemos verificar sua presença em proporções menores em outros tipos de materiais, sobretudo em instalações não aterradas. Quando ocorre, a PID interfere de maneira significativa no funcionamento do sistema, comprometendo seu desempenho. Conforme vemos na figura 3, em módulos afetados, a tensão de operação do sistema diminui gradativamente com o passar do tempo. Em casos de períodos prolongados sob a influência da PID, os efeitos sobre o sistema podem se tornar irreversíveis uma vez que as consequências sobre a corrente e a tensão de operação dos sistemas fotovoltaicos são muito consideráveis.

No entanto, por se tratar de um processo lento, as vezes se assemelha ao próprio desgaste natural com o tempo. Consequentemente, há uma dificuldade para ser diagnosticado em um curto espaço de tempo, a ponto de ter seus efeitos completamente revertidos.

Em função do tipo de associação das células no módulo, os efeitos da PID também podem apresentar variações. Quando associadas em série, a tensão do módulo é dada em função das tensões de cada célula individualmente. Dessa forma, o desempenho do módulo é afetado quando, pelo menos, uma das células sofrer o

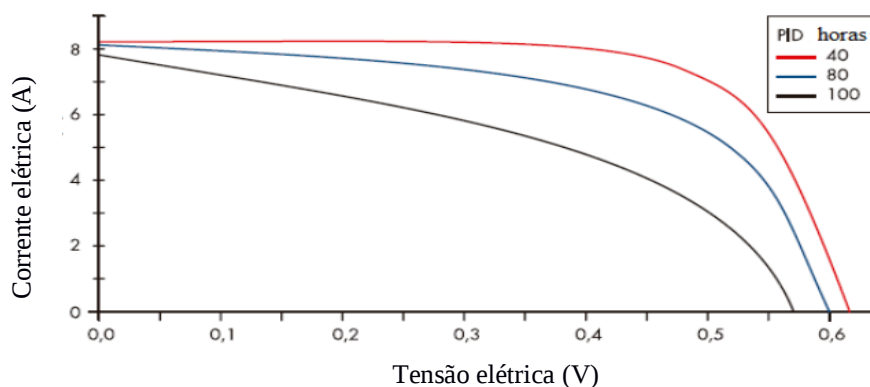


Figura 3. Efeito da ocorrência de PID na curva característica de uma célula fotovoltaica. (Fonte: Ref. [10])

fenômeno da PID. No entanto, quando temos uma associação em paralelo, a eficiência do módulo é menos afetada pela PID em razão de o defeito de uma célula não causar interferência no funcionamento das demais. Dependendo da aplicação, geralmente esse tipo de interconexão pode não ser tão vantajoso a curto prazo, em razão de necessitar de maiores investimentos e, também, de ser menos eficientes. Em algumas literaturas, a ideia de implantar sistemas de aterramentos é defendida como uma das principais medidas para se evitar o aparecimento da PID. Tais sistemas, além de oferecer maior segurança contra possíveis choques elétricos, proporcionam uma maior estabilidade ao funcionamento dos módulos fotovoltaicos.

Para identificar a presença da PID, a avaliação da eficiência do módulo em operação pode ser um pouco trabalhosa, uma vez que precisamos levar em consideração a existência de outros fatores externos que podem estar atuando no sistema. Essa medida consiste em analisar basicamente a tensão de operação, uma vez que ela constitui um dos parâmetros mais afetados quando sob a influência do fenômeno. A utilização de imagens de eletroluminescência também tem sido uma opção para observar a PID. Com essas imagens podemos visualizar com mais clareza e rapidez quais células estão sendo afetadas, pelo fato dessas não apresentarem brilho quando captadas por uma câmera específica. Após identificar as células afetadas, podemos mudar a posição elétrica dos módulos afetados de maneira que o dispositivo fique sujeito a uma tensão inversa a que originou a PID. Embora ainda sejam pouco usadas em razão de serem desconhecidas em muitas literaturas, alguns autores alegam que a adoção dessas medidas poderia auxiliar na identificação da presença da PID. No entanto, a maioria delas são pouco viáveis devido à presença de outros fatores externos poderem estar atuando no sistema [10].

Atualmente ainda não temos conhecimento suficientes para fazer uma análise rápida e identificar a presença desse fenômeno. Isso acontece pelo fato de não termos boas condições para avaliar os sistemas fotovoltaicos após os mesmos entrarem em operação. No entanto, podemos fazer análises de alguns parâmetros, os quais já foram discutidos anteriormente, e observar a eficiência da célula. Hoje em dia essas análises podem ser difíceis em razão da PID ser um fenômeno recente e do fato de vários outros fatores, como a influência das condições climáticas poderem estar atuando no sistema de maneira a contribuir para diminuir sua eficiência com o passar do tempo.

2.5- Degradação induzida pela luz

Essa forma de degradação, induzida pela própria radiação, refere-se a pequenas perdas de eficiência devido ao aumento de temperatura [5]. Geralmente esse processo se inicia logo nos primeiros momentos de exposição a luz solar, após a célula se aquecer a uma temperatura acima da que foi projetada para operar.

Normalmente, conforme indicada por seus fabricantes, a temperatura ideal para uma célula operar, sob a condição de não ser danificada e apresentar eficiência razoável, é de 25°C . Assim, após a temperatura ultrapassar 25°C , o rendimento de um sistema fotovoltaico pode ser comprometido. Com essa variação da temperatura, a tensão de operação passa a diminuir gradativamente ao longo do tempo, causando uma perda considerável de sua eficiência. A Figura 4 mostra a queda de tensão em função da temperatura. Quando a temperatura atinge 100°C , os efeitos sobre o funcionamento já estão bastantes críticos e podem ser observados com mais facilidades. Quando isso acontece em células de silício cristalino, a tensão de circuito aberto pode chegar a ficar 30% menor, enquanto a corrente sofreria um aumento em torno de 0,2% [3].

Em princípio espera-se que os efeitos da degradação induzida pela luz (LID) sejam tão pequenos que não interrompa o funcionamento de um módulo fotovoltaico a curto prazo. Mesmo assim alguns fabricantes conseguem estimar o tempo de vida útil de uma célula, mesmo tendo conhecimento de que receberá influência da LID no local onde irá operar. Normalmente o tempo estimado corresponde de 20 a 25 anos, dependendo do material. Os módulos de silício amorfo são muito menos afetados pela LID, embora apresentem uma menor eficiência [11]. Assim, diversos estudos têm se realizado no intuito de melhorar as características desses materiais, tornando-os mais eficientes e ao mesmo tempo buscando diversificar sua utilização em larga escala.

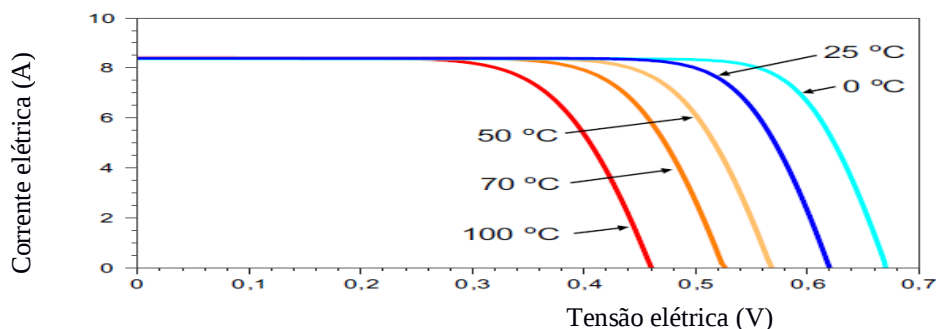


Figura 4. Influência da temperatura na célula fotovoltaica. (Fonte: Ref. [3])

No entanto, devido a existência de algumas outras formas de degradação a que as células podem ficar submetidas quando estão em funcionamento, os efeitos da LID podem se tornar mais intensos. Dependendo do tempo de exposição a temperaturas elevadas, as consequências de degradação se tornarão bastante visíveis e inclusive dificultarão o funcionamento do sistema.

Normalmente, dependendo do material e do tempo de exposição, podemos amenizar os efeitos da LID submetendo a célula a processos de resfriamento [12]. Muito embora essa medida possa ser uma solução para o problema, até o momento, são poucos os que a colocam em prática. Isso em razão tanto dos seus elevados custos, quanto do pouco conhecimento que se tem a respeito dessa medida.

No entanto, alguns estudos têm se desenvolvido nessa área na busca de tentar encontrar outras soluções para o problema da perda de desempenho em função do aumento da temperatura, inclusive que sejam mais viáveis economicamente. Além disso, muitos fabricantes tentam encontrar meios para conseguirem projetar novos sistemas fotovoltaicos, que se adaptem melhor as condições adversas encontradas nos ambientes onde tais sistemas irão operar.

3- CONCLUSÃO

Os princípios físicos responsáveis pela degradação das células fotovoltaicas com o passar do tempo são relativamente recentes, por isso serem poucas as literaturas que os abordam. Assim, a maior parte do conhecimento que se tem a respeito dos princípios físicos que assolam as células fotovoltaicas é baseada em observações indiretas, especialmente quando se trata das células de silício cristalino. Quando realizadas em campo, nem sempre condiz com a realidade, uma vez que a existência de outras formas de degradação podem estar atuando no sistema e inclusive atrapalhar nossas observações. No entanto, a realização de análises nos locais onde se executará a operação de um módulo pode trazer importantes melhorias no sentido de amenizar os efeitos ou até evitar seu aparecimento. Nesse sentido, ainda não temos condições suficientes para analisar um sistema fotovoltaico e, de imediato identificar quais as formas de degradação que estão presentes, de maneira a comprometer seu desempenho. Com isso, estudos posteriores devem ser realizados para melhor conhecer as formas de degradação que afetam os módulos fotovoltaicos quando em operação, contribuindo para diversificar a exploração da energia solar em larga escala e suprir parte de nossas demandas energéticas.

4- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOPEZ, R. A., Energia solar para produção de eletricidade. São Paulo: Artliber Editora, p.27-190, 2012.
- [2] Ministério de Minas e Energia. Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3308684/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Dezembro-2016.pdf/f6b5284d-4105-4b79-a030-31755664721a>. Acesso em 09 de Nov. de 2018.
- [3] Pinho, J. T. e Galdino, M. A., Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL-CRESESB,2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf. Acesso em 09 de Nov. de 2018.
- [4] Farias, L.A. et al., Investigação experimental da geração de energia elétrica solar fotovoltaica, Natal, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/html/4815/481549221008/>. Acesso em 20 de nov. de 2018.
- [5] Köntges, M. et al., Review Of Failures Of photovoltaic Modules, 2014. Disponível em: Review of Failures of Photovoltaic Modules, IEA International Energy Agency, Task 13. Acesso em 08 de jan. de 2019.
- [6] Buerhop, C. et al., Verifying defective PV-modules by IR-imaging and controlling with module optimizers, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.2985>. Acesso em 04 de jan. de 2019.
- [7] Tsanakas, J.A. et al., Fault Diagnosis and classification of large-scale photovoltaic plants through aerial orthophoto themal mapping, 2015. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/283727126_fault-diagnosis_and-classification_of_largescale-photovoItaic_plants_throygh_aerial_orthophoto_thermal_mapping. Acesso em Nov. de 2018.
- [8] Zilles, R. et al., Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo, 2012.
- [9] Jaekel, B.; Cosic, M.; Arp, J., Investigation of c-Si modules degradation and recovery effect under high potentials: CV-PID,2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6925067>. Acesso em 08 de jan. de 2019.
- [10] Figueiredo, G.; Zilles, R., Revista Brasileira de Energia Solar, São Paulo, p.128-137, 2015. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/135>. Acesso em 10 de nov. de 2018.
- [11] Ruther, R., Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil, Florianópolis, 2004.
- [12] Tinoco, H.L. et al., Congresso Brasileiro de engenharia de produção, VII, paraná, 2017. Disponível em: <http://www.aprepro.org.br/conbrepro/2017/down.php?id=3819&q=1>. Acesso em nov. de 2018.