ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO

Neolmar Matos Filho (PUC Minas) - neolmar.matos@cefetmg.br

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz (GREEN - PUCMINAS) - asacd2012@gmail.com

Túlio Pinheiro Duarte (PUC MG) - tulio-p.duarte@outlook.com

Resumo:

Neste artigo busca-se realizar uma revisão da literatura. Com o objetivo de encontrar artigos que descrevessem ações, entre os profissionais em sistemas fotovoltaicos. Que apresentaram resultados satisfatórios no processo de aprendizado sobre snail trails (Trilhas de Caracol) em módulos fotovoltaicos de silício cristalino e suas consequências. A geração de energia nos módulos fotovoltaicos depende de seus diferentes modos de degradação. Afetando a confiabilidade e a vida útil de um gerador fotovoltaico. Em face disto, justifica-se a realização deste estudo por permitir aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento de um sistema fotovoltaico. Com o passar dos anos, sobretudo devido ao impacto na produção de energia elétrica pelo gerador fotovoltaico, em função das degradações advindas das snail trails nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Uma vez que a maioria dos módulos fotovoltaicos implementados no mundo utilizam o silício. Esta revisão fornece uma lista abrangente das publicações sobre o assunto entre os anos de 2013 a 2019, coletadas no portal de periódicos da CAPES/MEC e também no IEEE.

Palavras-chave: *Módulos Fotovoltaicos, Snail Trail, Desempenho.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO.

Neolmar de Matos Filho – neolmar.matos@cefetmg.br
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br
Túlio Pinheiro Duarte – tulio-p.duarte@outlook.com
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica.

Resumo. *Neste artigo busca-se realizar uma revisão da literatura. Com o objetivo de encontrar artigos que descrevessem ações, entre os profissionais em sistemas fotovoltaicos. Que apresentaram resultados satisfatórios no processo de aprendizado sobre snail trails (Trilhas de Caracol) em módulos fotovoltaicos de silício cristalino e suas consequências. A geração de energia nos módulos fotovoltaicos depende de seus diferentes modos de degradação. Afetando a confiabilidade e a vida útil de um gerador fotovoltaico. Em face disto, justifica-se a realização deste estudo por permitir aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento de um sistema fotovoltaico. Com o passar dos anos, sobretudo devido ao impacto na produção de energia elétrica pelo gerador fotovoltaico, em função das degradações advindas das snail trails nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Uma vez que a maioria dos módulos fotovoltaicos implementados no mundo utilizam o silício. Esta revisão fornece uma lista abrangente das publicações sobre o assunto entre os anos de 2013 a 2019, coletadas no portal de periódicos da CAPES/MEC e também no IEEE.*

Palavras-chave: *Módulos Fotovoltaicos, Snail Trail, Desempenho.*

1. INTRODUÇÃO

A energia é sem dúvida um importante elemento para o desenvolvimento socioeconômico em uma sociedade. Com o constante aumento no consumo de energia pela população mundial, a pesquisa por fontes renováveis são assuntos atuais e necessários. Dentre as mais relevantes fontes renováveis existentes, a energia solar fotovoltaica destaca-se, pois não polui o meio ambiente, praticamente inesgotável, silenciosa, não consome combustível e pode gerar energia elétrica. Conforme pode ser visto na Fig. 1 atualmente a matriz energética global é composta principalmente por petróleo, carvão e gás, que são altamente poluidores e de reservas finitas. Vários estudos estão sendo realizados visando à utilização de tecnologias que utilizam fontes renováveis, incluindo entre elas, a geração solar fotovoltaica está tendo um grande destaque.

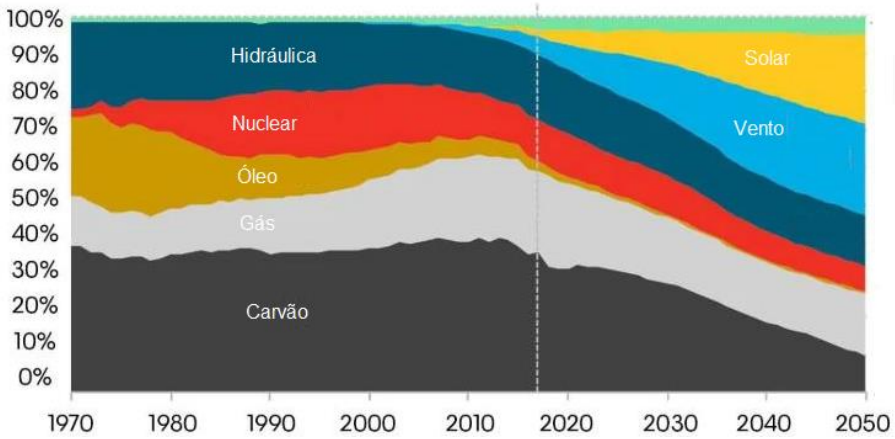

Figura 1 – Matriz energética global 1970-2017 e projeção até 2050
Fonte: https://cleantechnica.com/2018/06/21/wind-solar-to-achieve-50-by-2050-as-coal-shrinks-to-11-predicts-bnef/

No entanto, a matriz energética mundial vem mudando nos últimos anos, devido a instalação de tecnologias renováveis, entre elas, a energia solar para gerar calor e eletricidade. Com o amadurecimento e tempo de instalação mais longos, o mercado fotovoltaico está se tornando altamente competitivos, aumentando a necessidade de pesquisa e desenvolvimento, visando a melhoria da eficiência, confiabilidade, manutenção e diagnóstico de falhas de componentes-chave, como por exemplo, os módulos fotovoltaicos. Um número significativo de estudos e trabalhos técnicos foi publicado até hoje, com base em vários trabalhos de investigações laboratoriais e estudo de falhas,

especialmente para módulos fotovoltaicos de silício cristalino, que é a tecnologia fotovoltaica mais antiga e atualmente dominante, com aproximadamente 85-90% da participação no mercado fotovoltaico (Simbolotti et al. 2013).

Em um mercado cada vez mais exigente e concorrente, somado a um cenário econômico volátil, as empresas são obrigadas a adotar estratégias cada vez mais agressivas e ousadas para serem competitivas buscando melhorias, qualidade e economia dos seus serviços e produtos. É importante prevê as falhas prematuras dos módulos fotovoltaicos devido às degradações, advindas das interferências provocadas por fatores climáticos, das influências externas aos sistemas fotovoltaicos, do processo de fabricação, transporte e manejo. Pois com o conhecimento prévio destes fatores podem se propor soluções para aumentar a eficiência elétrica e térmica dos geradores fotovoltaicos.

Segundo XiaoqingGu et al. (2018) graves problemas de qualidade dos módulos fotovoltaicos surgem gradualmente, colocando enormes desafios para esta nova indústria de geradores fotovoltaicos. *Snail trails*, é um deles. Em 2004, os snail trails foram encontrados pela primeira vez em módulos fotovoltaicos por XiaoqingGu et al. (2018), do Instituto de Pesquisa de Energia Solar Hamelin (ISFH).

Este artigo representa um esforço para fornecer informações atualizadas contribuindo para maior conhecimento do *snail trail* para a base de referência de publicações para pesquisadores, desenvolvedores, fabricantes e instaladores de sistemas fotovoltaicos sobre as trilhas de caracol ou *snail trails*. Recentemente este modo de degradação em módulos fotovoltaicos de silício cristalino começou a chamar atenção devido ao seu fator limitante na produção de energia elétrica.

2. METODOLOGIA

Relatar um aumento das publicações de pesquisas sobre este assunto, também foi realizado um esforço para buscar as publicações mais recentes e relevantes para o sistema energético fotovoltaico, na tentativa de tornar este banco de dados mais interessante e atual, conforme apresentado na Fig. 2.

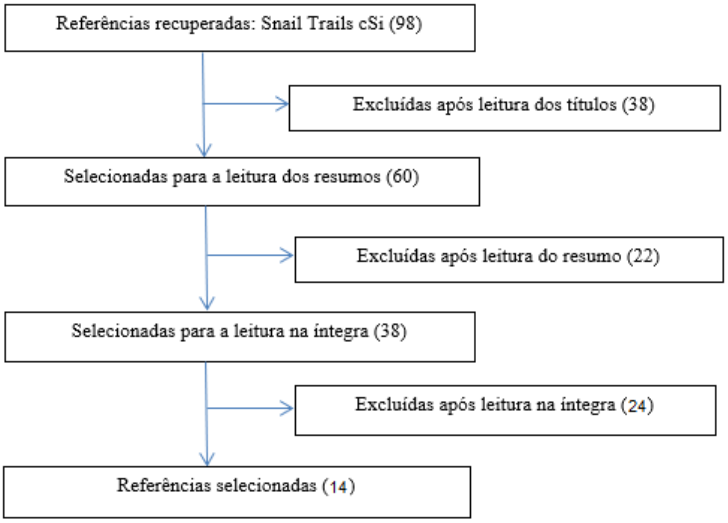

Figura 2 – Seleção das referências bibliográficas sobre o tema no período de 2013 a 2019.

3. DEGRADAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CAUSADAS POR SNAIL TRAIL.

Degradação é a deterioração gradual das características de um componente ou de um sistema que pode afetar sua capacidade operacional dentro dos parâmetros aceitáveis e que é causada pelas condições de operação. Um módulo fotovoltaico degradado pode continuar fazendo sua função primária, de produção de energia elétrica a partir da radiação solar, mesmo gerando abaixo do ideal. No entanto, o estado degradado do módulo fotovoltaico pode ser mais problemático quando a degradação excede um limite crítico, segundo Tamizhmani et al. (2013) o mercado atualmente trabalha considerando uma garantia de 20% de degradação máxima ao longo de 20 anos.

Quando os módulos fotovoltaicos são conectados ao sistema, eles são expostos ao ambiente externo e são influenciados por vários fatores ambientais, como contato e penetração da radiação solar, umidade, penetração do ar, mudanças de temperatura, aterramento, além de vibrações mecânicas provenientes do transporte, manejo e fixação. Quando os módulos fotovoltaicos são afetados pelos fatores listados acima, problemas de confiabilidade e durabilidade ocorrem. Existem grandes possibilidades de surgir *snail trails* (trilhas de caracol). Nos últimos anos as *snail trails*, têm sido uma preocupação para a indústria fotovoltaica. Afetando a operação de geradores fotovoltaicos, que depende, além de condições restritas de temperatura e umidade, da composição dos materiais com os quais são fabricados tanto a célula fotovoltaica, como seu encapsulamento e vidro. A seguir será abordado com mais detalhes este modo de

degradação que está surgindo com muita frequência em módulos fotovoltaicos de silício cristalino (Tamizhmani et al., 2013).

3.1. Snail trail

Kim et al. (2013) mencionaram que o material de encapsulamento (EVA - Ethylene Vinyl Acetat ou acetato-vinilo de etileno) de módulos fotovoltaicos é um dos principais contribuintes para as snail trails. A mistura de Ag_2CO_3 e $AgC_2H_3O_2$, e que $AgC_2H_3O_2$ é a razão pela qual as snail trails são visíveis. Verificou-se também que a prata (Ag), que é utilizada nas grades metálicas na superfície das células fotovoltaicas, possui reações químicas com algumas substâncias da composição do EVA, surgindo assim o aparecimento de trilhas esbranquiçadas, ou seja, snail trails. Em um estudo realizado por Meyer et al. (2013) foi demonstrado que o vapor d'água que penetra pela parte de trás (*back sheet*) dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino, atinge a superfície das células e causa as *snail trails*. Quando o módulo é conectado à fonte de alimentação, exposto à luz ultravioleta e com à mudança de temperatura, pode ocorrer corrosão nas linhas de grade de prata e o EVA. Portanto, a luz ultravioleta, a penetração de vapor d'água e a temperatura são identificadas como gatilhos para o surgimento das *snail trails*.

Segundo Kim et al. (2013) as origens químicas e estruturais da *snail trail*, especialmente com foco nas indicações de prata descoloridas, acastanhadas ou escuras, são devidos à formação de acetato de prata, bem como à sua reação com o encapsulante. O acetato de prata foi sintetizado por carbonato de prata originado da reação de íons Ag e dióxido de carbono e ácido acético que se originaram da degradação do encapsulante.

Como informado por Meyer et al (2013), do *Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics* CSP, as nanopartículas de prata acumuladas dentro da folha do encapsulamento causam a descoloração acastanhada, e que certos aditivos de folhas de encapsulamento e *back sheet* desencadeiam a formação dessas nanopartículas. Após alguns meses de operação, vários módulos fotovoltaicos desenvolvem um defeito de *snail trails*, que aparecem como listras esbranquiçadas irregulares através das células.

Uma vez que a descoloração ocorre com mais frequência nas bordas das células e nas microfissuras, Meyer et al. (2013) informa que a umidade é um papel fundamental na formação das *snail trails*. Em combinação com esta descoberta, de que as nanopartículas de prata podem ser facilmente induzidas unicamente pela incubação da folha de EVA em uma solução salina de prata, eles propuseram (Meyer et al., 2013) a seguinte hipótese para a formação de trilha: Sob condições operacionais, umidade ambiental pode entrar no módulo fotovoltaico através do *back sheet*; no entanto, a própria célula é uma barreira eficaz que protege o lado ensolarado da umidade. Somente as bordas das células ou microfissuras são locais onde a água inserida pode se difundir na superfície da célula.

Na mesma linha de raciocínio os chineses Jing et al. (2017) relataram, através de experiências, que o acetato de prata é identificado como um componente essencial das *snail trails*. A reação química entre as linhas de grade de prata, ácido acético (liberado pelo encapsulante EVA) e oxigênio no topo de uma microfissura é fundamental para o surgimento da *snail trail* em módulos fotovoltaicos. A taxa de transmissão de oxigênio do *back sheet* também tem influência significativa na formação das *snail trails*. Os resultados da simulação realizada, em 2017, por Jing et al. (2017) indicam que a microfissura atua como um caminho para a difusão do gás, além do gap celular, o que explica por que a *snail trail* aparece sempre acima da fissura da célula ou perto da borda da célula. Tanto a simulação quanto os testes de envelhecimento acelerado mostram que o encapsulante desempenha um papel importante na formação da *snail trail.*

Com uma visão diferente de outros pesquisadores, Hong et al. (2016) informaram que a fonte de prata metálica em *snail trails* não é dos barramentos de prata, mas das impurezas (fosfato de prata) dos aditivos em EVA. Impurezas de fosfato de prata em EVA foram adicionadas por acaso no processo de fabricação de EVA. No trabalho realizado por Hong et al. (2016) em módulos solares de silício cristalino com *snail trails*, foram investigadas características elétricas I-V e P-V, eletroluminescência (EL), análise termográfica em usinas fotovoltaicas. Os resultados obtidos mostraram que as *snail trails* podem afetar a produção de energia para módulos fotovoltaicos de silício cristalino em comparação com o módulo de referência, a produção de energia medida foi cerca de 9,1% menor do que a do módulo de referência.

A técnica de eletroluminescência (EL) é o resultado da recombinação radiativa de elétrons e buracos em um material. Os elétrons excitados liberam sua energia como fótons - luz. Essa luz pode ser capturada como uma imagem de eletroluminescência, resultando em uma imagem que permite uma avaliação. Uma câmara de teste EL consiste em uma sala escura na qual o módulo solar é colocado, uma fonte de alimentação DC que injetará uma corrente elétrica ao módulo fotovoltaico, com isso todas as zonas elétricas do módulo começarão a emitir radiação infravermelha. Essa radiação infravermelha será capturada pela câmera CCD refrigerada. Isso nos permite visualizar todas as áreas elétricas ativas e não ativas do módulo fotovoltaico.

Este teste permite a detecção e visibilidade de defeitos no material na fabricação de células fotovoltaicas. Como resultado, é possível avaliar a qualidade do processo de fabricação das células e qualquer outro defeito que possa ser causado pelo manuseio subsequente dos módulos fotovoltaicos. Este método pode localizar os pontos onde a resistência série está anormalmente alta, fissuras nas células e áreas onde não há conexão elétrica. Essas questões afetam diretamente a longevidade do módulo e, portanto, sua rentabilidade, porque, se não, o próprio módulo corre o risco de ter que ser substituído antes da amortização.

Já Dolara et al. (2014), realizaram testes de inspeção visual, determinação pela máxima potência, suporte dielétrico, corrente de fuga úmida e teste de eletroluminescência, visando detectar o impacto dos fenômenos da *snail trail* no desempenho de módulos fotovoltaicos e na produção de energia. Como pode ser verificado no fluxograma da

Fig. 3. As medições experimentais ao ar livre foram realizadas em uma usina fotovoltaica no Politécnico de Milano, Itália (Dolara et al, 2014).

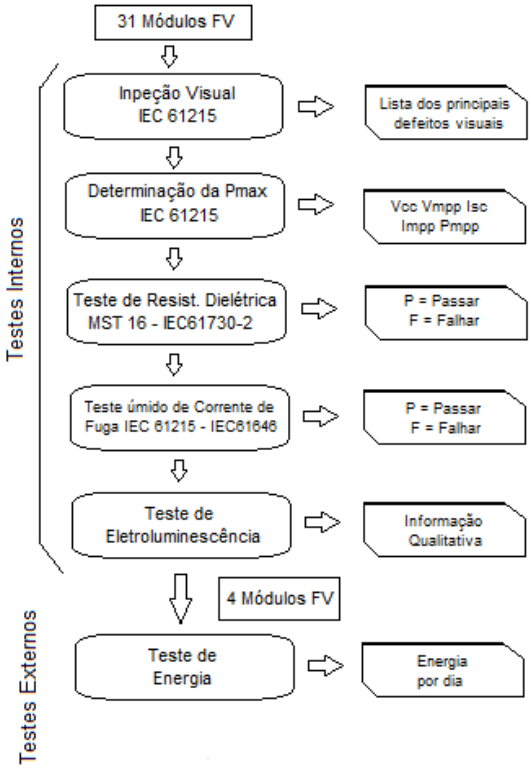

Figura 3 – Fluxograma de procedimento experimental.
Fonte: Dolara et al. (2014) – Adaptada

Usando o ponto de potência máxima (mpp), a variação de potência (ΔP) em relação ao valor de potência nominal (Pn) foi calculada conforme mostrada na Eq. (1):

$$\Delta P = \frac{Pmmp - Pn}{Pn} x100 \quad (1)$$

Um valor negativo da variação de potência (ΔP) significa uma redução na produção de energia em relação à energia nominal do *datasheet*, (considerando as Condições de Padrão de Testes) indicando possível problema no módulo.

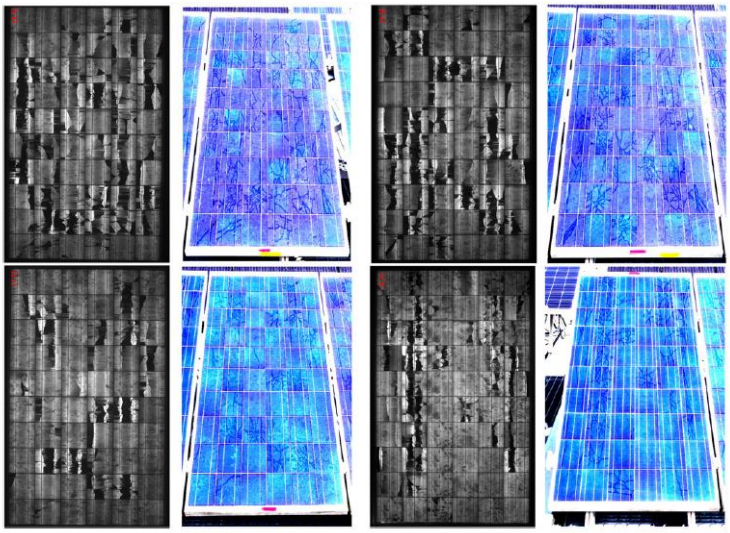

Figura 4 - Imagem de eletroluminescência e imagem dos módulos PV # 17, # 18, # 23 e # 24.
Fonte: Dolara et al. (2016).

Os resultados obtidos dos testes de inspeção visual e determinação de máxima potência estão resumidos na Tab. 1 (a cor representa a diferença entre a potência máxima do módulo fotovoltaico e o valor do *datasheet*: verde indica uma diferença positiva ou ligeira e a mais alta redução de vermelho) (Dolara et al., 2016).

Os módulos fotovoltaicos (# 17, # 18, # 23 e # 24) foram escolhidos entre aqueles com o menor ΔP para serem analisados sob condições ambientais reais (Dolara et al. 2014).

Neste estudo, vários testes foram realizados para analisar alguns módulos afetados por fenômenos de *snail trails.* A determinação do mmp indicou uma redução de 10 a 30% em relação aos dados do datasheet. O teste indoor de eletroluminescência (EL), a Fig. 4 demonstrou uma forte correlação entre a ocorrência de fenômeno de *snail trails* e microfissuras em células fotovoltaicas. Os resultados obtidos evidenciam que as fissuras celulares podem reduzir a produção de energia de módulos fotovoltaicos em 29% em relação ao módulo fotovoltaico de referência.

Tabela 1 - Resultados obtidos pela inspeção visual e determinação máxima de potência.
Fonte: Dolara et al. (2016)

#	P_N (W)	Finding – description	V_{OC} (V)	V_{MPP} (V)	I_{SC} (A)	I_{MPP} (A)	P_{MPP} (W)	*EFF*
1	220	Fingers blackened, scratch on cell, mark on cell. No major visual defects	24.5	19.7	8.25	7.53	148.4	-32.55%
2	220	Fingers blackened. No major visual effects	36.29	29.23	8.22	7.6	222	0.91%
3	230	Mark on cells, crack. No major visual defects	36.98	30.11	8.19	7.55	227.4	-1.13%
4	220	Fingers blackened. No major visual defects	36.35	29.17	8.25	7.57	220.7	0.32%
5	220	Fingers blackened. No major visual defects	36.27	29.18	8.18	7.59	221.4	0.64%
6	220	Mark on cells. Finger blackened. No major visual defects	36.35	29.24	8.16	7.71	225.3	2.41%
7	220	Fingers blackened. No major visual defects	24.09	19.42	8.23	7.59	147.3	-33.05%
8	220	Fingers blackened. No major visual defects	36.35	29.83	8.27	7.62	227.2	3.27%
9	220	Mark on cell. Fingers blackened. No major visual defects	36.32	29.23	8.34	7.69	224.8	2.18%
10	230	Fingers blackened, scratch on cell. No major visual defects	36.48	29.81	8.05	7.41	220.9	-3.96%
11	230	Fingers blackened. No major visual defects	36.87	30.18	8.28	7.68	231.8	0.78%
12	230	Scratch on cell. Finger blackened. No major visual defects	36.41	29.25	8.34	7.81	228.5	-0.65%
13	230	Fingers blackened. No major visual defects	36.39	29.87	8.2	7.53	224.9	-2.22%
14	230	Mark on cells. Fingers blackened. No major visual defects	36.48	29.25	8.29	7.88	230.5	0.22%
15	230	Mark on cell. Fingers blackened. Scratch on cells. No major visual defects	36.49	28.93	8.2	7.69	222.5	-3.26%
16	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells and fingers	36.65	27.8	8.09	7.03	195.5	-11.14%
17	220	Several Snail Trails. Fingers blackened. Evidence of burning on cells	36.81	28.21	8	5.73	161.6	-26.55%
18	220	Several Snail Trails. Fingers blackened. Evidence of burning on cells	36.8	28.46	7.63	5.66	161.2	-26.73%
19	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.5	28.67	7.94	6.68	191.5	-12.95%
20	220	Evidence of burning on cells. Diverse snail trails. Fingers blackened	36.53	28.7	8.18	6.93	198.9	-9.59%
21	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.64	28.62	7.75	6.6	188.7	-14.23%
22	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells	36.47	28.74	8.05	6.83	196.3	-10.77%
23	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.68	28.54	8.03	5.96	170.1	-22.68%
24	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.14	27.67	8.21	6.21	171.8	-21.91%
25	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.4	28.62	8.02	6.66	190.7	-13.32%
26	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. fingers blackened	36.47	28.64	8.07	6.41	183.5	-16.59%
27	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.52	28.78	7.94	5.82	167.5	-23.86%
28	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. fingers blackened	36.55	28.99	8.14	6.88	199.6	-9.27%
29	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.53	28.68	8.11	6.74	193.3	-12.14%
30	230	Evidence of burning on cells e Several Snail Trails	36.41	28.77	8.07	7.14	205.3	-10.74%
31	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened. Cell chipped	36.69	27.39	8.16	6.48	177.4	-19.36%

Pesquisadores chineses (Zhoua et al., 2015) verificaram a presença frequente de *snail trail* em células fotovoltaicas de módulos com microfissuras em sistemas fotovoltaicos. Neste estudo, o papel dos encapsulantes, células e condições de laminação foram estudadas e discutidas experimentalmente. Um mecanismo integrado de formação de *snail trail* foi proposto e parcialmente verificado por algumas provas experimentais que, a reação de migração e redução de íons de prata sob correntes seja a reação intrínseca desse fenômeno, enquanto a oxidação de nanopartículas de prata pelo peróxido de resíduo na grade de prata com microfissura foi a principal razão da descoloração da cor (Zhoua et al., 2015).

Embora o impacto de *back sheets* e encapsulantes na durabilidade do módulo fotovoltaico tenha sido estudado em grande escala, o papel das pastas de metalização é significativamente menos compreendido. Por meio de estudos detalhados, Meisel et al. (2015) conseguiram vincular a causa raiz das *snail trails* à química do EVA, que reage com a prata na presença de umidade introduzida por microfissuras. Eles investigaram a influência das microfissuras, bem como as propriedades dos materiais encapsulantes e *back sheets* nas taxas de ingresso de água e subsequente a formação de *snail trails*. Como mostrado na Fig. 5, uma camada de nanopartícula contendo Ag escuro é formada na região da *snail trail* na grade frontal, e o EVA naquela região é degradado. O ácido acético liberado durante o envelhecimento de EVA foi encontrado para catalisar a reação, acelerando assim a formação de *snail trails* (Fig. 6).

Segundo XiaoqingGu et al. (2018) graves problemas de qualidade dos módulos fotovoltaicos surgem gradualmente, colocando enormes desafios para esta nova indústria de sistemas fotovoltaicos. *Snail trails*, é um deles, a Fig. 7 ilustra o *snail trail*.

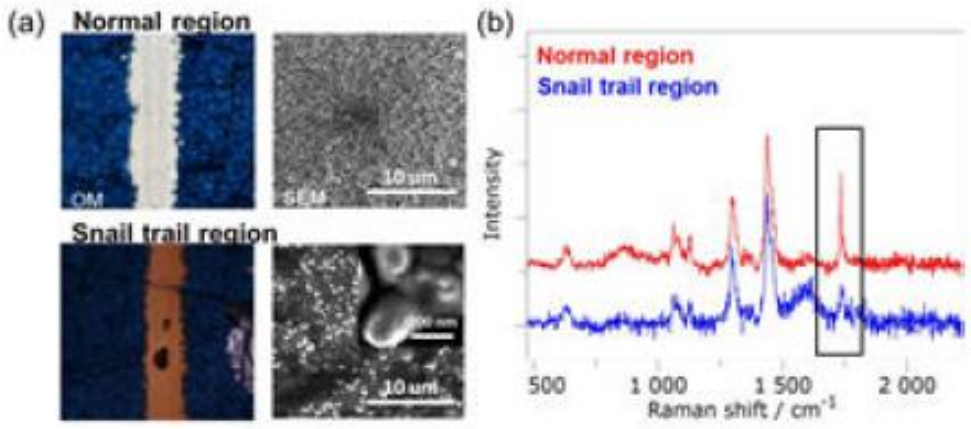

Figura 5 - (a) Imagens de microscopia ótica em células fotovoltaicas não afetadas por *snail trails* e com regiões afetadas por *snail trails*, respectivamente. (b) dados de EVA na região da trilha normal e com *snail trail*.
Fonte: Meisel et al., 2015

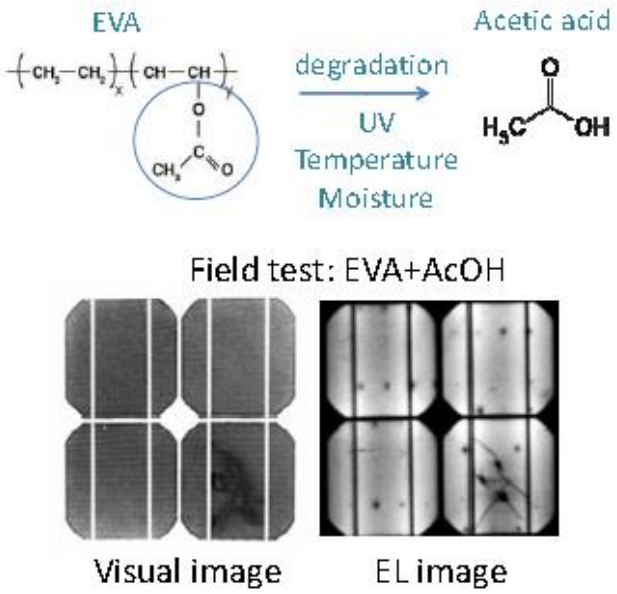

Figura 6 - Formação de ácido acético devido à degradação de EVA causada por radiação UV, temperatura e umidade (topo) e formação de snail trails para EVA que foi misturado com 0,1% de ácido acético.
Fonte: Meisel et al., 2015

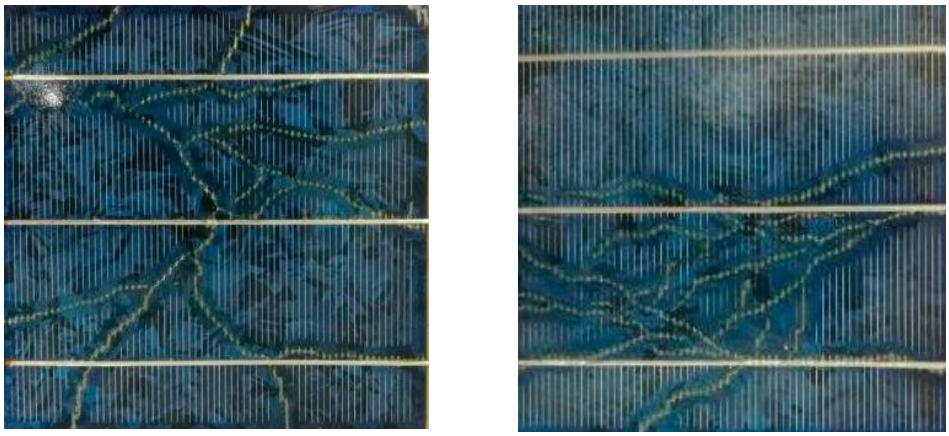

Figura 7 – Exemplos de células fotovoltaicas com *Snail trails.*
Fonte: XiaoqingGu et al., 2018

Após o teste UV30 + DH200 de 200 horas, XiaoqingGu et al. (2018) informou que um dos fatores importantes para o *snail trail* é a composição do EVA. O EVA com substância adequada poderia resistir o *snail trail.* Os produtos

de alguns fornecedores de EVA provaram que funcionam bem. *Back sheet* não é o principal contribuinte para *snail trail*. *Snail trails* sempre aparecerão com ou sem *back sheet* (XiaoqingGu et al., 2018). Microfissuras, também são um fator chave. Elas evitam que a umidade evapore do módulo, fazendo com que a umidade caia dentro do módulo fotovoltaico. É mais fácil criar *snail trails* em tais condições.

Existe uma controvérsia ao impacto do *snail trail* no desempenho do módulo fotovoltaico, alguns pesquisadores acreditam que *snail trails* tem um pequeno impacto no desempenho dos módulos solares, Yang et al. (2018) investigaram em detalhes por seis anos, através de testes de confiabilidade, que a *snail trail* tem um impacto modesto no desempenho dos módulos solares, porque a *snail trail* afeta apenas a transmissão da radiação solar. Os resultados dos testes mostraram que a degradação média de energia dos módulos com *snail trails* foi de 5,90%, enquanto a degradação média de energia dos módulos sem *snail trails* foi de 5,64% durante um período de operação de seis anos. Informaram ainda que as imagens de eletroluminescência provaram que não há correlação entre *snail trails* e microfissuras (Yang et al., 2018). Para avaliar o impacto das trilhas de caracol na confiabilidade de longo prazo dos módulos fotovoltaicos, eles aplicaram testes de confiabilidade estendida baseados no padrão internacional IEC 61215. Os testes de confiabilidade estendida de módulos fotovoltaicos com *snail trails* revelam que a degradação média de energia foi de 1,77% e 0,68% após o teste de calor húmido ao longo de 1250 h e o ciclo térmico teste de 500 ciclos, respectivamente. Estes resultados sugerem que a confiabilidade a longo prazo e a durabilidade dos módulos solares não são afetados por *snail trails*. Provando assim que a grade de Ag abaixo das *snail trails* não tem alteração, e nenhuma corrosão pode ser identificada.

Apesar de Yang et al. (2018) de afirmarem nas suas pesquisas que, não existe correlação entre *snail trails* e microfissuras, muitos pesquisadores afirmam o contrário, como exemplo temos as simulações em laboratório e ao ar livre realizadas por Liu et al. (2015) mostrando que, em uma única planta possui alguns módulos fotovoltaicos com sérios problemas de *snail trails*, mas outros módulos não apresentavam. Além disso, de acordo com a IEC 61215, os testes de envelhecimento acelerado mostraram que estes módulos de *snail trails* apresentaram degradação de energia em 2% e nenhum aumento da área descolorada após os testes de envelhecimento TC200 (200 ciclos térmicos), HF10 (10 dias de umidade) e DH (1000 horas de calor úmido) de acordo com os padrões IEC 61215 - 10.11, 10.12 e 10.13, respectivamente.

As principais perdas de energia acima de 5% vieram de microfissuras celulares antes da formação da *snail trail*. Isso significava que a maioria das perdas de energia dependia de microfissuras antes da aparência das *snail trails*. De acordo com os resultados dos testes, a *snail trail* segue apenas o visual pobre (Liu et al., 2015). As microfissuras de células com defeito de ocultação são mais conscientes. Para minimizar as *snail trails*, o rígido controle de qualidade seria executado e, portanto, otimizaria a saída de energia do módulo fotovoltaico por um período de 25 anos.

Em uma parceria entre o Centro Nacional de Pesquisa e Educação Fotovoltaica (NCPRE) do Instituto Indiano de Tecnologia de Bombaim (IITB) e o Instituto Nacional de Energia Solar (NISE), foi realizada uma pesquisa em 2016 para avaliar a confiabilidade e a durabilidade de módulos fotovoltaicos (PV) em diferentes partes da Índia. Um total de 925 módulos foram inspecionados em 37 locais em todas as 6 zonas climáticas da Índia (Chattopadhyay et al., 2016)

Conforme relata Chattopadhyay et al. (2016) microfissuras nas células fotovoltaicas podem levar a efeitos diferentes no encapsulante. Nos módulos fotovoltaicos antigos (antes de 2011) com descoloração, fissuras nas células é possível a penetração de oxigênio através do encapsulante descolorindo no topo das células, e esse oxigênio então apresenta descoloração na presença da radiação solar. Por outro lado, em vários módulos mais novos (após 2011), a umidade e outros gases são capazes de migrar através das microfissuras nas células e causar a formação de snail trails no topo das células (Chattopadhyay et al., 2016). Além disso, o espaçamento entre as células pode servir como um caminho para a penetração de umidade até a grade metálica no topo das células, e em alguns casos isso leva a snail trails nas bordas das células. Nesta pesquisa, foi encontrado uma boa correlação entre as microfissuras celulares e as snail trails.

Mediante Chattopadhyay et al. (2016) a descoloração da metalização é observada em todas as zonas climáticas, mas sua severidade é mais alta na zona quente e úmida. Pequenas / médias instalações têm uma severidade média maior em comparação com grandes instalações, o que implica uma diferença na qualidade do material usado nessas instalações. Outros problemas que também propiciam o surgimento de snail trails são os arranhões no backsheet, no vidro frontal e estrutura, pois possibilita a penetração de umidade nos módulos fotovoltaicos. Portanto é necessária uma preocupação constante no transporte, no manuseio dos módulos e também a utilização de materiais de qualidade que suportem ambientes externos e possam fornecer os níveis necessários de segurança durante toda a vida útil da instalação.

Os pesquisadores indianos após as conclusões finais da pesquisa realizada em 2016 na Índia (Chattopadhyay et al., 2016) recomendaram que os materiais usados em módulos fotovoltaicos como o EVA e o backsheet, devem ser de boa qualidade e especificados pelo fabricante no datasheet e também no edital de aquisição e também a realização de eletroluminescência (EL) em campo após receber os módulos no local da instalação e após a instalação para revelar microfissuras que podem ter sido causadas durante as fases de transporte, manejo e instalação. Chattopadhyay et al. (2016) também alerta sobre a necessidade de realização de estudos sobre os fenômenos de degradação em climas quentes pela comunidade fotovoltaica, devido apresentar um ambiente operacional agressivo para os módulos fotovoltaicos.

4. CONCLUSÃO

Como foco principal das pesquisas listadas acima, é possível concluir que o surgimento das *snail trails* nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino está diretamente ligado à penetração de vapor d'água, juntamente com a temperatura, bem como à reação do encapsulante com as grades e barramentos de Ag, que desencadeiam a formação de nanopartículas, causadoras da descoloração acastanhada nos módulos, ou seja, *snail trails*.

Também é relatado que existe uma influência significativa na formação da *snail trails* o oxigênio no topo de uma microfissura celular ou no *back sheet* de um módulo fotovoltaico. Sendo que a microfissura atua como um caminho para a difusão do gás, além do gap celular, o que explica por que a *snail trail* normalmente aparece acima de microfissura celular ou perto da borda da célula.

Foi possível verificar que alguns pesquisadores defendem que as *snail trails* não diminuem diretamente a produção de energia elétrica, mas a maioria dos artigos encontrados atualmente defendem que as *snail trails* compromete sim o desempenho dos módulos principalmente quando estão atreladas com microfissuras. E também vários autores dizem que as microfissuras nas células são uma condição prévia para o surgimento de *snail trails* no módulo.

As normas de certificação (por exemplo, 61215), que estão sendo utilizadas atualmente, precisam levar em conta os fenômenos climáticos e desenvolver procedimentos de teste de aceleração do envelhecimento que atinjam temperaturas mais altas.

A investigação de defeitos em módulos fotovoltaicos de silício cristalino é muito importante para a indústria fotovoltaica. Então existe a necessidade eminente de continuar os estudos sobre *snail trails* até mesmo para que, em um futuro próximo chegar a um consenso sobre a real causa desta degradação.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem aos colaboradores do Laboratório GREEN (Grupo de Estudos em Energia) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelo apoio de troca de experiencias. O GREEN é um laboratório referência no cenário nacional de estudos e pesquisas em energias renováveis, e possui recursos laboratoriais que possibilitam condições ideais para o desenvolvimento de diversos trabalhos sobre sistemas fotovoltaicos. O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CEFET-MG, que possui um programa institucional de apoio à Pós-Graduação dos servidores, concedendo uma licença para capacitação e inclusive custeando parte a mesma.

REFERÊNCIAS

Chattopadhyay, S., Dubey, R., Kuthanazhi, V., Zachariah, S., Bhaduri, S., Mahapatra, C., Rambabu, S., Ansari, F., Chindarkar, A., Sinha, A., Singh, H. K., Narendra Shiradkar, Arora, B. M., Kottantharayil, A., Narasimhan, K. L., Sabnis, S., Vasi, J. Birinchi Bora, B., Kumar, G., Bangar, M., Kumar, M., Haldkar, A. K., Singh, R., Raghava, S., Morampudi, M., Ganesh, G., Kumar, R., Sastry, O. S. 2016. All-India Survey of Photovoltaic Module Reliability: 2016. National Centre for Photovoltaic Research and Education Indian Institute of Technology, National Institute of Solar Energy Gwalpahari, India.

Dolara, A., Leva, S., Manzolini, G., Ogliari, E., 2014. Investigation on Performance Decay on Photovoltaic Modules: Snail Trails and Cell Microcracks, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, Nº. 5. http://www.ieee.org/publications standards/publications/rights/index.html.

Dolara, A., Lazaroiu, G.C., Leva, S., Manzolini, G., Votta, L., 2016. Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production", IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 6, Nº. 5, http://www.ieee.org/publications standards/publications/rights/index.html.

Hong, Y., Jipeng, C., He, W., Dengyuan, S., 2016. Power degradation caused by snail trails in urban photovoltaic energy systems, Energy Procedia, Vol. 88, pp. 422 – 428. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.06.018

Simbolotti, G., Taylor, M., Tosato, G., Kempener, R., 2013. Photovoltaic solar power insights for policy makers. IEA – Energy Technology Network and IRENA – International Renewable Energy Agency. https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E11IR_PV_GSMT_Jan2013_final_GSOK.pdf

Jing F., Daliang, J., Xiaoqin, Y., Zhen, P., Mason, T., William, G., Katherine, S., Junhui, L., Wusong T., Zengsheng, L., Yafeng, L., Mao, W., Qiuju, W.,Torence, J.T., 2017. Study on snail trail formation in PV module through modeling and acceleratadaging test, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.164, pp.80-86. https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2017.02.013

Kim, N., Hwang, K., Kim, D., Lee, J., Shinyoung Jeong, S., Jeong, S. H., 2013. Analysis and reproduction of snail trails on silver grid lines in crystalline silicon photovoltaic modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 124, pp. 153-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.11.040.

Liu, H., Huang, C., Lee, W., Yan, S., Lin, F.,2015. A Defect Formation as Snail Trails in Photovoltaic Modules", Energy and Power Engineering, Vol. 7, pp. 348-353. http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.78032

Meisel, A., Xu, Y., Fan, J., Wang, J., Dang, T., Alcantara, C., Inns, D., Terry, M., Kapur, J., Hamzavytehrany, B., Gambogi, W., Antoniadis, R., 2015. Holistic View of Interactions in Modules Affecting Durability – Adhesion and Snail Trails", IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, USA. https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355705

Meyer, S., Timmel, S., Richter, S., Werner, M., Gläser, M., Swatek, S., Braun, U., Hagendorf, C., 2013. Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 121, pp. 171-175. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.013

Tamizhmani, G.; Kuitche, J., 2013. Accelerated lifetime testing of photovoltaic modules. Solar America Board for Codes and Standard. http://www.solarabcs.org/about/publications/reports/acceleratedtesting/pdfs/SolarAB Cs-33-2013.pdf

XiaoqingGu, X., Liu, Z., Qiu, Y., Cao, C., Lim, M. T., 2018. Na Effective Method on Evaluating Photovoltaic Module Snail Trail, 12th SNEC, Energy Procedia, Vol. 150, pp. 58-65. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.09.007

Yang, H., He, W., Wang, H., Huang, J., Zhang, J., 2018. Assessing power degradation and reliability of crystalline silicon solar modules with snail trails, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 187, pp. 61–68. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.021

Zhoua,G., Xionga, X., Zhoub, W., Liu, Y., Sanga, V., Koua, Z., 2015. Mechanism analysis of snail trails in photovoltaic modules. First PV Material CO., IEEE, China.

DIAGNOSIS ON THE CAUSES OF SNAIL TRAILS IN CRYSTAL SILIC PHOTOVOLTAIC MODULES: A REVIEW OF RESEARCH AND FUTURE CHALLENGES.

Abstract. *This article seeks to conduct a literature review. In order to find articles describing actions, among professionals in photovoltaic systems. Which presented satisfactory results in the learning process about snail trails (Snail Trails) in crystalline silicon photovoltaic modules and their consequences. The generation of energy in the photovoltaic modules depends on their different degradation modes. Affecting the reliability and service life of a photovoltaic generator. In view of this, this study is justified because it allows to deepen the knowledge about the behavior of a photovoltaic system. Over the years, mainly due to the impact on the production of electric energy by the photovoltaic generator, due to the degradation caused by the snail trails in the crystalline silicon photovoltaic modules. Since most of the photovoltaic modules implemented in the world use silicon. This review provides a comprehensive list of publications on the subject between the years 2013 to 2019, collected on the CAPES / MEC journal portal and also on the IEEE.*

Keywords: *Photovoltaic Modules, Snail Trail, Performance.*