

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM MAIS DE 10 ANOS DE EXPOSIÇÃO EM CAMPO

Denio Alves Cassini – dac@cemig.com.br

Antonia Sonia Alves Cardoso – asacd@pucminas.br

Marcelo Machado Viana – marcelomachadov@pucminas.br

Suellen Caroline Silva Costa – suellencscosta@gmail.com

Thiago de Almeida Silvério – thiago@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/GREEN Solar - IPUC

Francisco Hering Alves de FreitasSouza–fhering@cemig.com.br

Companhia Energética de Minas Gerais

Lawrence Lee Kazmerski– solarpvkaz@gmail.com

Renewable and Sustainable Energy Institute (RASEI), University of Colorado Boulder and NREL, USA

Resumo. Este artigo apresenta os resultados da investigação de perdas de desempenho de módulos fotovoltaicos, bem como a identificação de problemas de falha e durabilidade. Para isso, este trabalho utilizou da coleta de amostras obtidas de aproximadamente 1000 sistemas fotovoltaicos autônomos, composto por sistema fotovoltaico residencial (tamanho 150 Wp) e sistema em escolas (aproximadamente 2000 Wp), que foram instalados e são operados pela Companhia Energética de Minas Gerais-CEMIG. Estes sistemas fotovoltaicos foram implantados no estado de Minas Gerais, e os sistemas mais antigos possuem mais de 10 anos de operação. Os sistemas autônomos estão localizados na região norte e no leste de Minas Gerais. Estas regiões são consideradas como zonas de clima subtropical, com invernos secos e verões chuvosos. Estes sistemas não tinham tido uma avaliação rigorosa de sua confiabilidade e desempenho de operação – investigação de qualquer envelhecimento do módulo ou identificação dos principais mecanismos de degradação. Foram utilizados procedimentos de inspeção visual para identificar os principais modos de degradação nos módulos fotovoltaicos como, descoloração gradual do encapsulamento e delaminação do encapsulante – que podem ser causadas pela elevada incidência de radiação ultravioleta existente, bem como presença de sujidades depositadas sobre os módulos, com até 20% de obscurecimento de transmissão. Este artigo fornece uma análise inicial dos resultados das inspeções visuais de módulos fotovoltaicos, a identificação dos modos de degradação e as medidas tomadas para restaurar os níveis aceitáveis de operação (por exemplo, inspeções regulares e limpezas periódicas programadas). Para a próxima etapa, será abordada uma amostragem mais ampla de módulos, com testes do desempenho elétrico dos mesmos e um estudo estatístico das falhas dos sistemas fotovoltaicos instalados em Minas Gerais.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, Degradação, Desempenho.

1. INTRODUÇÃO

A questão mais significativa para os investidores da tecnologia fotovoltaica é "quanto é o desempenho do sistema fotovoltaico", a fim de garantir o seu retorno de investimento. A compreensão do período de vida útil de sistemas fotovoltaicos é muito importante para prever e garantir o seu desempenho, para resolver quaisquer problemas, e para abordar a consideração fundamental para a bancabilidade de sistemas fotovoltaicos (FV) - incluindo o da integridade do módulo fotovoltaico.

Além disso, o preço da eletricidade gerada depende principalmente do preço do módulo fotovoltaico, do balanço dos componentes do sistema e o tempo de vida operacional dos mesmos (que é ditada principalmente pelas condições climáticas, dependente da confiabilidade da tecnologia e de problemas de durabilidade). A economia dos sistemas fotovoltaicos só pode ser competitiva se os módulos operarem de forma confiável com a longevidade assegurada por mais de 20 anos (ou seja, o período de garantia típico), com a degradação de energia menor do que 20% para este período (tipicamente designados por "menos de 1 % por ano"). Os modos de degradação em módulos fotovoltaicos ditam os sintomas de falhas e mecanismos de degradação, ea progressão relativa destes sintomas. Consequentemente, um mecanismo de falha é responsável pelo modo de falha e poderia ser a origem de um ou mais efeitos de falha (TamizhMani e Kuitche, 2012).

Os modos de degradação observados em módulos expostos em campo indicam que estes são os responsáveis por perda de desempenho e falha podendo ser de cinco tipos: (1) a degradação de materiais de embalagem, (2) perda de aderência, (3) degradação das interconexões da célula/módulo, (4) degradação causada pela entrada de umidade, e (5) a degradação do dispositivo semicondutor [1]. Jordan e Kurtz (2013) recentemente analisaram as taxas de degradação em estudos de testes de campo realizados durante os últimos 40 anos. Eles concluíram que as taxas de degradação observadas nos módulos fotovoltaicos/sistemas instalados após o ano de 2000, reduziram significativamente as taxas de

falha sobre aqueles instalados antes de 2000, indicando uma melhoria substancial em design, materiais e durabilidade dos módulos fotovoltaicos e sistemas fotovoltaicos (Jordan e Kurtz, 2013).

Recentemente, Wohlgemuth relatou vinte resultados de um estudo em módulos fotovoltaicos de silício cristalino relativo às falhas em campo e as taxas de retorno de garantia com base em várias descrições encontradas na literatura. Sua análise mostra que menos de 0,1% de taxa de falha anual refere-se a módulos fotovoltaicos com 10 anos de fabricação, 0,005% para os módulos fotovoltaicos com até 5 anos, 0,13% para módulos fotovoltaicos fabricados entre 1994-2005, e 0,01% de taxa de retorno anual de módulos fotovoltaicos fabricados entre 2005-2008. Esta avaliação abrangente indica certa confiança em relação à confiabilidade de módulos de silício cristalino, especialmente aquele que foi recentemente introduzido no mercado (Wohlgemuth, 2012).

Outra causa importante de perdas no desempenho destes sistemas é a sujeira nas superfícies de módulos fotovoltaicos. A sujeira pode ser composta por diferentes partículas. A poeira pode ser definida como qualquer material particulado de diâmetro inferior a 500 µm e composto por pequenas quantidades de pólen (vegetação, fungos, bactérias), células humanas/animais, fibras de carpete/materiais têxteis e outras micro-areias, sendo mais comumente, minerais orgânicos geomorfológicos (areia, argila, calcário erodido). O tamanho da partícula, dos componentes, e do formato da poeira pode variar de região para região no mundo inteiro. Além disso, o comportamento da deposição e a taxa de acumulação podem variar significativamente em diferentes localidades. Esses fatores são baseados na geografia, no clima e na urbanização de uma região (Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski, 2015). Perdas por poeira podem ser mitigadas através de limpeza, mas há casos no Brasil em que a camada suja é cimentício, resultando em sombreado indesejado das células.

Este artigo apresenta os resultados da investigação de perdas de desempenho de sistemas fotovoltaicos instalados no estado de Minas Gerais, devido a problemas de falha ou de durabilidade em seus componentes. Estes sistemas estão em operação, há 10 anos e contêm informações valiosas para mapear o desempenho e tomar decisões sobre investimentos futuros em fotovoltaicos, bancabilidade da tecnologia, e seleção de tecnologia apropriada para um melhor desempenho. Todos os sistemas fotovoltaicos autônomos estão localizados nas regiões norte e leste de Minas Gerais. Estas regiões estão inseridas na zona do clima subtropical, com invernos secos e verões chuvosos. Estes sistemas não tinham tido uma avaliação rigorosa para a confiabilidade e desempenho de operação – inspeção para identificação de qualquer envelhecimento do módulo ou dos principais mecanismos de degradação.

2. METODOLOGIA

Este estudo abrange aproximadamente 1000 sistemas fotovoltaicos autônomos, composto por sistema fotovoltaico residencial (tamanho 150 Wp) e sistemas em escolas (aproximadamente 2.000 Wp), que são operados pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Estes sistemas fotovoltaicos estão instalados no estado de Minas Gerais, com os mais antigos apresentando mais de 20 anos de operação em campo. Foram coletadas amostras dos sistemas com mais de 10 anos de operação. Esse estudo também abrange sistemas fotovoltaicos instalados no âmbito de vários programas de demonstração de eletrificação rural, como o programa US-Brasil que iniciou em 1995, PRODEEM em 1997 e Luz Solar em 1999, com os sistemas mais antigos com 15 anos de operação.

A investigação sobre o desempenho desses sistemas fotovoltaicos começou com uma avaliação do histórico de falhas destes através da análise do banco de dados da CEMIG. Isto foi seguido por uma seleção de sistemas fotovoltaicos residenciais típicos baseados em anos de exposição em campo (banco de dados CEMIG) e seleção de módulos que tinham sido substituídos por causa de problemas de desempenho e que foram armazenados no estoque da CEMIG. Todos os módulos eram compostos por células de silício cristalino. A partir do banco de dados e do armazenamento, uma amostra de 20 módulos dos mais antigos sistemas foi escolhida, tipicamente os módulos mais danificados e apresentando algum modo de degradação. Também foram identificados os sistemas com problemas de manutenção e, com mais 10 anos de exposição em campo. Uma amostra destes sistemas fotovoltaicos foi inspecionada no campo durante as visitas técnicas, e os módulos fotovoltaicos com os piores modos de degradação foram retirados do campo para análise e teste no Laboratório de Energia Fotovoltaica, do GREEN Solar-IPUC em Belo Horizonte. Estes sistemas foram inspecionados e uma inspeção visual nos módulos fotovoltaicos foi realizada seguindo os procedimentos desenvolvidos pelo NREL (Packard, Wohlgemuth e Kurtz, 2012), e adaptado por Souza (2014) para identificar os principais modos de degradação nos módulos fotovoltaicos e as causas de falha nos outros equipamentos BOS (inversores, controladores de carga, e baterias). Os módulos fotovoltaicos foram também examinados em relação à sujeira. Isto incluiu a inspeção visual do grau de sujeira, a não uniformidade (especialmente para os módulos moldados), e quaisquer indicações de cimentação.

Seguindo o procedimento de inspeção visual detalhada, os módulos (tanto os do armazenamento e do campo) tiveram as suas características de curva I-V levantadas e foram submetidos à análise de imagem por infravermelhos para identificar pontos quentes. As medições de corrente-tensão (I-V) foram realizadas sobre a luz natural do sol, com um piranômetro utilizado como um dispositivo solar de referência para a classificação global de irradiância. Os módulos também foram examinados quanto aos problemas de sujeira, através da coleta de amostras do solo para exame posterior das características químicas e físicas. Vários módulos tiveram as características I-V coletadas antes e após a limpeza para comparar com as especificações originais para qualquer degradação.

3. RESULTADOS

A partir da inspeção visual foi identificado que os principais modos de degradação encontrados nos módulos fotovoltaicos analisados foram descoloração gradual e delaminação do encapsulante. Além disso, a presença de pontos quentes era característica comum para os módulos degradados. Esses modos de degradação foram classificados como consequência da elevada incidência de radiação ultravioleta com elevadas temperaturas de operação, associados ao clima na região norte e leste de Minas Gerais.

Na Fig. 1 são apresentados os modos de degradação identificados em módulos fotovoltaicos retirados da amostra. É possível observar manchas escurecidas denominadas *browning* (coloração marrom da resina etileno e acetato de vinila – EVA), e delaminação do encapsulante.

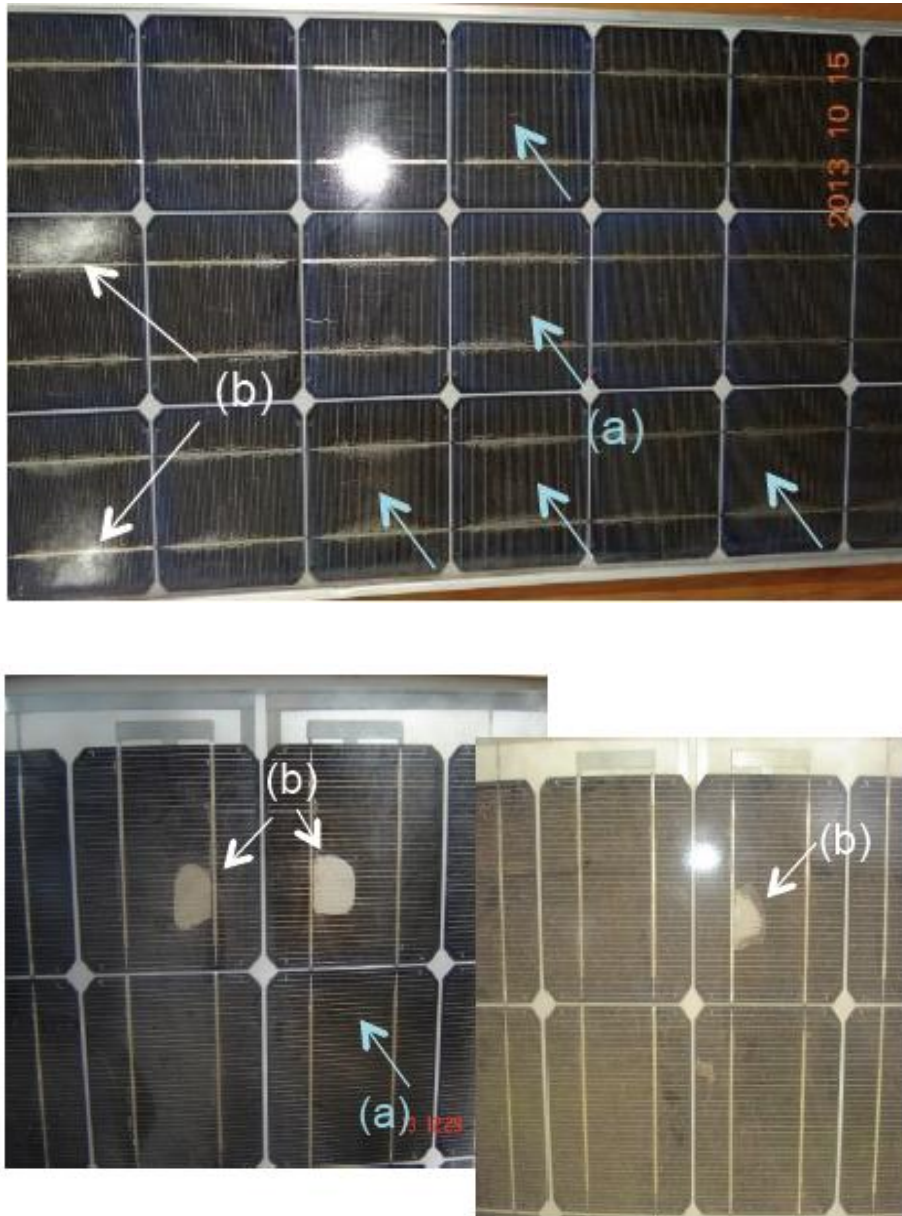


Figura 1 – Módulos fotovoltaicos de silício cristalino degradados: (a) *browning* e (b) delaminação do encapsulante

A Figura 2 (a) mostra os modos de degradação infiltração e *browning* em outro módulo fotovoltaico retirado de um sistema fotovoltaico instalado em Sete Lagoas. Na Fig. 2(b) é apresentada a imagem no infravermelho deste módulo fotovoltaico, indicando os pontos quentes.

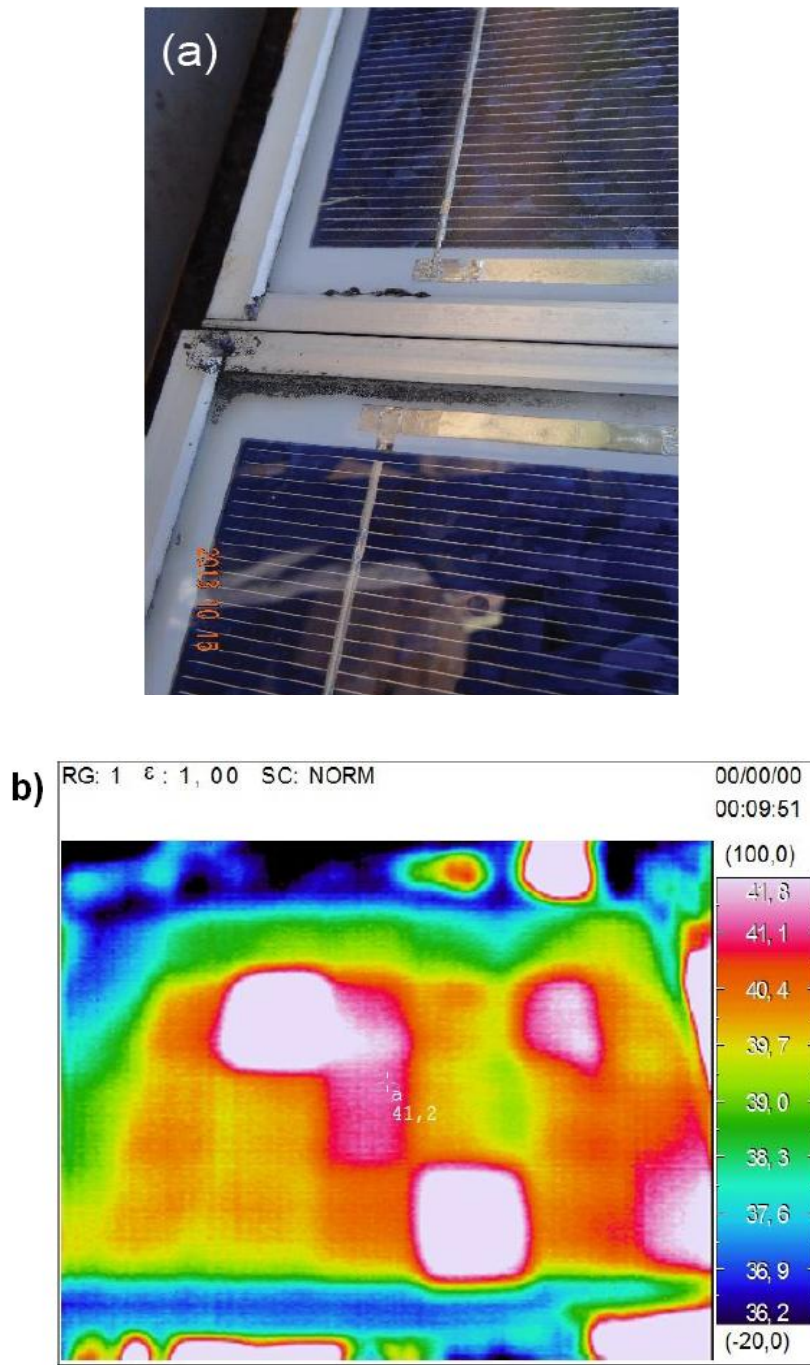


Figura 2 – (a) Módulo degradado e (b) imagem infravermelha do módulo

Na Fig. 3 é indicada a curva corrente-tensão (I-V) do módulo degradado de potência nominal igual a 80 Wp. Em comparação com o módulo de referência com mesmas características elétricas e térmicas e do mesmo fabricante, o módulo degradado apresentou uma perda de 26% na corrente, 13,7% na tensão e 36% de decréscimo na potência no ponto de máxima potência, com aumentos significativos na resistência série causados pela perda de transmissão na superfície do módulo.

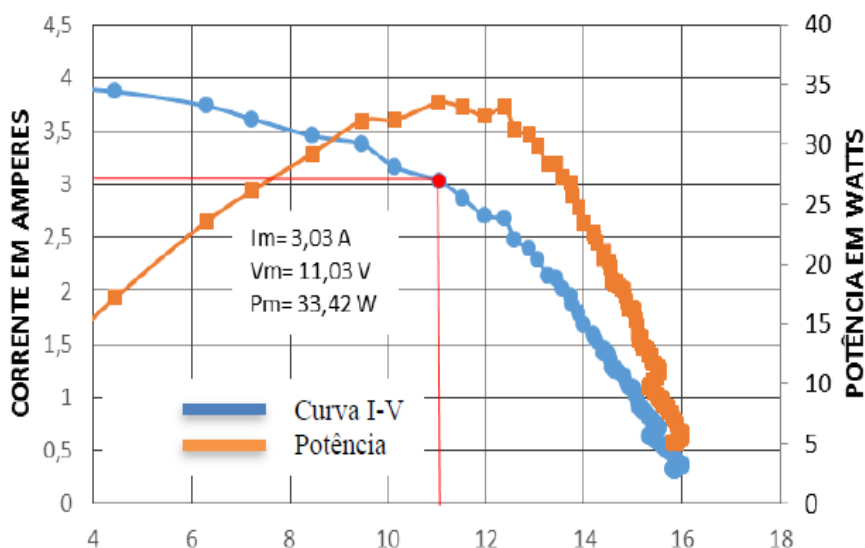


Figura 3 – Curva característica do módulo degradado com infiltração e *browning*

A inspeção nos componentes BOS (inversores, controladores de carga, e baterias) do sistema revelou uma taxa elevada de falhas no inversor, apesar de um programa de manutenção de rotina por técnicos da CEMIG. A causa principal dessas falhas não tinha sido profundamente investigada anteriormente. Verificou-se que essas falhas são consequências das elevadas temperaturas no interior da caixa de armazenamento e da falta de instalação de ventilação adequada no interior do inversor. Os reguladores de carga também apresentaram falhas frequentes, devido a estas condições de alta temperatura, e no verão a saída de energia do sistema foi significativamente reduzida e/ou interrompida.

O acúmulo usual de componentes secos de poeira não parece ser uma das principais fontes de degradação. No entanto, alguns indícios mostram a contribuição da umidade no acúmulo de camadas de poeira sobre os módulos (com listras associadas com a ação de lavagem da chuva). No entanto, de maior preocupação foram os módulos situados próximo das áreas de rodovias em que a poeira formou camadas densas, cimentadas. Este tipo de sujidade é muito difícil de remover (limpar) -causando efeitos de sombreamento. A análise inicial mostrou que a cimentação está associada com diesel e outros combustíveis (provenientes da fumaça emitida pelos automóveis) misturando com os componentes de sujidade (poeira) para constituir esta camada sólida. A sujidade depositada sobre os módulos causou até 20% de redução da potência de saída de alguns sistemas fotovoltaicos, necessitando de inspeções regulares e programações de limpeza periódicas.

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta os resultados de perda de desempenho e mecanismos de degradação investigados em sistemas fotovoltaicos autônomos e conectados à rede instalados no estado de Minas Gerais, por mais de 10 anos. Vários modos de degradação foram identificados a partir de metodologias de inspeção visual padrão e análise do banco de dados de inspeções periódicas da CEMIG. A inspeção visual da amostra dos sistemas revelou extensa corrosão nas interconexões, caixas de junção, e cabeamento do sistema, extensiva descoloração do encapsulante, e falhas do inversor prolongadas, bem como sujidade depositada sobre os módulos. Este artigo fornece uma análise parcial da degradação dos sistemas fotovoltaicos da CEMIG, com a identificação dos modos de degradação e sugestão de inspeções regulares e programações de limpeza periódicas. Para a próxima etapa, será feita um estudo estatístico das falhas dos sistemas fotovoltaicos instalados em Minas Gerais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG-D e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais-PUC Minas por todo o apoio para o desenvolvimento deste projeto, e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- G. Tamizhmani, J. Kuitche, "ABC Report- A Literature Review and Analysis on: Accelerated Lifetime Testing of Photovoltaic Modules", Solar ABCs report, Dec 2012.
- Jordan, D.C. and Kurtz, S.R. Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2013; 21:12–29.

- J. Wohlgemuth, “Standards for PV Modules and Components - Recent Developments and Challenges”. NREL Report number: NREL/CP-5200-56531, 2012
- Sarver, T.; Al-Qaraghuli, A. and Kazmerski, L.L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 689-744, 2013. N.B. Update of literature and status expected for publication in April 2015.
- Packard, C.; Wohlgemuth, J. and Kurtz, S. Development of a Visual Inspection Data Collection Tool for Evaluation of Fielded PV Module Condition. National Renewable Energy Laboratory (Technical Report: NREL/TP-5200-56154), 2012.
- Souza, F.H.A.F. Inspeção e monitoramento do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso real. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEGRADATION EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES MORE THAN 10 YEARS OF FIELD EXPOSURE

Abstract. *This paper presents the results of the investigation of performance losses of photovoltaic module and the identification of component failure and durability issues. Therefore, this study used the sample collection obtained of the approximately 1000 stand-alone PV systems, which include solar home systems (sized 150 Wp) and schools systems (approximately 2000 Wp). These were commissioned and are operated by the Energetic Company of Minas Gerais (CEMIG). These PV systems are installed in the state of Minas Gerais, with the oldest 10 years in operation. The stand-alone systems are located at northern and eastern region of Minas Gerais. These areas are considered subtropical climate zones, with dry winters and rainy summers. These systems had not had a rigorous evaluation for their reliability and operation performance—with no reporting of any module ageing or identifying major degradation mechanisms. Following accepted power-plant evaluation methodologies, we used visual inspection procedures to identify the major PV module degradation modes as gradual encapsulant discoloration and delamination — that may be caused by the high incidence of ultraviolet radiation existing, as well as presence of deposited dirt on the modules, with until 20% obscuration transmission. This paper provides an initial analysis of the visual inspection results of photovoltaic modules, the identification of the degradation modes, and the steps taken to restore acceptable levels of operation (e.g., regular inspections and periodic cleaning schedules). At the next step further degradation will be investigated in a larger sample of modules, with performance electrical test and statistical analysis of the failures of the PV systems installed in Minas Gerais..*

Key words: *Autonomous Photovoltaic Systems, Degradation, Performance.*