

Plano de Manutenção para Geradores Fotovoltaicos Centrado em Confiabilidade

Jéssica Soneghetti Cordeiro, Pablo Rodrigues Muniz

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis (PPGTecS) – Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Vitória (Ifes-Vitória)

RESUMO

A energia solar é considerada uma fonte limpa e sustentável de energia, uma vez que, está disponível durante todo o ano e é acessível em qualquer parte do mundo, podendo contribuir para reduzir a dependência sobre importação ou produção de energia por outras fontes menos sustentáveis. Porém o aumento do consumo de energia é um reflexo do aquecimento econômico e da melhoria da qualidade de vida, principalmente quando considerada a falta de ações e controle que enfraqueçam essa correlação, por exemplo ações de eficiência e conservação de energia. Sendo assim, um aspecto que deve ser considerado na implantação de fontes renováveis de energia é o seu custo, não apenas o custo de implantação, mas também seu custo de manutenção e as possíveis perdas de geração a longo prazo. Este trabalho tem como objetivo principal conscientizar os investidores sobre a necessidade de manutenção em geradores fotovoltaicos. A manutenção preventiva é uma peça fundamental para uma boa gestão do setor de manutenção, sendo a principal responsável por alavancar os índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos. A análise conjunta desses fatores é fundamental para decisões, principalmente quando se trata de garantir o nível de risco e de confiabilidade do investimento.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar para geração de energia elétrica pode ser considerada uma fonte limpa e renovável de energia, e por isso seu uso tem aumentado significativamente nas últimas décadas, principalmente quando considerados os fatores econômico e ambiental, uma vez que as aplicações da energia solar têm se tornado cada vez mais viáveis economicamente [1].

O aumento do consumo de energia pode estar relacionado com o reflexo do aquecimento econômico e da melhoria da qualidade de vida, o que é mensurável através do aumento do consumo de eletroeletrônicos e do surgimento de produtos tecnologicamente avançados [2]. O aumento desenfreado do consumo de eletroeletrônicos pode gerar um grande impacto ao meio ambiente, caso a fonte de geração de energia elétrica não seja sustentável. Por isso é necessário investir em técnicas com o menor impacto ambiental possível para a geração de energia, sem se esquecer de avaliar o custo benefício dessas fontes [3].

A energia solar está amplamente disponível em todo o mundo e pode contribuir para reduzir a dependência sobre importação ou produção de energia por outras fontes menos sustentáveis. Com a energia solar é possível aumentar a diversidade energética de um país e estabilizar os custos de geração de energia a longo prazo, visto a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis [4].

Com isso, os projetos fotovoltaicos são desenvolvidos com base na capacidade de geração do local e necessária, ou seja, a incidência solar do local de instalação e a potência necessária para atender à demanda solicitada. De posse desses dados, é possível calcular o custo do projeto considerando sua vida útil e custos de manutenção, chegando assim à sua viabilidade econômica de implantação [5].

Apesar de apresentar vida útil aproximada de 25 anos [6], como todo e qualquer ativo, os geradores fotovoltaicos estão sujeitos a perda de desempenho durante sua operação, que podem estar associados com a temperatura, degradação natural e sujidade [6]. O entendimento dos fatores de perda de capacidade de gerar energia por instalação é fundamental para otimizar economicamente a produção de energia.

A norma técnica ABNT NBR ISO 55000:2014 fornece uma visão geral sobre a gestão de ativos, que consiste no controle eficaz e na administração dos ativos pelas organizações. Essa gestão é essencial para se obter o equilíbrio desejado entre custo, risco, desempenho e descarte/destinação final durante todo o ciclo de

vida útil do ativo. É importante ressaltar que a norma pode ser aplicada a todos os tipos de ativos e por organização de todos os tipos e tamanho [7].

O período da criação de um ativo até o seu fim de vida é considerado a vida do ativo. É através da gestão de ativos que a organização obtém lucro enquanto equilibra os custos financeiros, ambientais, sociais, risco, qualidade de serviço e desempenho relacionados aos ativos. Através de um gerenciamento eficaz dos efeitos de curto e longo prazo, despesas e desempenho, é possível melhorar a sustentabilidade das operações e da organização [8]. Com uma análise crítica e melhoria dos processos, procedimentos e desempenho de ativos, é possível melhorar a eficiência e eficácia e alcançar os objetivos organizacionais vislumbrados durante a instalação dos geradores fotovoltaicos.

A norma técnica ABNT NBR 5462 [9] conceitua a manutenção como a junção de ações técnicas destinadas a fazer com que um equipamento volte a exercer sua principal função ou que continue a exercê-la. Em geral, a manutenção corretiva não é uma atividade de manutenção programada, pois é feita depois que o equipamento já está danificado e utilizar essa estratégia de manutenção como principal acarreta alto impacto na produção. Essa é a manutenção mais cara que existe para os geradores fotovoltaicos, uma vez que sua produção de energia elétrica cessará até que o equipamento seja consertado, e o investidor deixará de produzir energia elétrica e lucrar durante esse período [9].

Uma interessante comparação foi feita nos estudos de Tonolo et al. [10] entre os resultados obtidos na geração de energia antes e depois da limpeza e manutenção dos módulos fotovoltaicos. Os resultados do estudo mostram que houve um aumento significativo de produção de energia nos sistemas que eram feitas limpezas e manutenções periódicas, quando observado os dados de produção de energia elétrica no sistema fotovoltaico estudado, foi constatado um aumento de 2,03% na irradiação e 6,26% na energia produzida, confirmando a importância da manutenção e limpeza das células, independente dos fatores climáticos da região em que o módulo foi instalado.

Os estudos de Kimber et al. [11] mostram o modelo desenvolvido para determinar o padrão de sujeidade instalados em geradores fotovoltaicos em 20 diferentes localidades nos EUA. A partir das informações descritas no trabalho, é possível comparar o desempenho de geradores fotovoltaicos utilizando previsões meteorológicas, índices de poluição e características da poeira existente a partir das informações disponíveis nos bancos de dados nacionais, permitindo aprimorar a previsão de simulações. O estudo sugere ainda que os índices de sujeidade diminuem à medida que o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos aumenta. Também foi possível concluir que as chuvas de até 0,3 mm não são capazes de limpar as células fotovoltaicas, que pode ocasionar a perda da capacidade de geração de módulos fotovoltaicos. Também é possível concluir que, a perda média anual de energia devido à sujeidade do sistema pode variar de 1,5% a 6,2%, dependendo da estação do ano. O estudo ainda mostra que o modelo de taxa de sujeidade sofreu uma perda de aproximadamente 27% da capacidade do gerador durante o fim da estação seca, o que ressalta a importância de modelos de previsão e dos fatores ambientais no estudo proposto [11].

Segundo os autores [12], as gotas de orvalho depositadas na superfície dos módulos fotovoltaicos durante a noite dissolviam as partículas depositadas no módulo fotovoltaico, ocasionando a infiltração dessa mistura de água e poeira através de pequenas frestas ou rachaduras. Com a incidência do sol, as gotas de água evaporavam e as partículas de poeira permaneciam depositadas no módulo fotovoltaico, formando uma camada sólida que bloqueava a luz solar na superfície da célula fotovoltaica. Também foi constatado que, a camada de sujeidade depositada na superfície provocava um aumento significativo da temperatura da célula, ocasionando a perda de até 27% na energia produzida [12]. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que o acúmulo de poeira que ocorrem nas áreas desérticas ou semidesérticas pode ser um problema crítico, sendo essa uma das causas no atraso da expansão de células fotovoltaicas nessas regiões. Uma das formas propostas para amenizar o problema seria a limpeza noturna das células fotovoltaicas, o que ajudaria a evitar a deposição de partículas e formação de camadas de poeira, ajudando a manter a produção das células [12].

A melhor alternativa, como citado em todos os estudos acima, é a manutenção preventiva, uma vez que é a peça fundamental para uma boa gestão do setor de manutenção e responsável por alavancar os índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos.

Segundo a Norma ABNT NBR 5462 (1994), manutenção preventiva é uma atividade efetuada em intervalos predeterminados de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item, ou seja, todas as atividades destinadas a prevenção de falhas, panes e quebras são encaradas como manutenção preventiva. Entretanto, realizar qualquer uma dessas atividades sem parâmetros pré-estabelecidos e confiáveis, pode tornar o serviço demorado e oneroso. A opção de utilizar um documento de referência que reúna as atividades a serem realizadas e as dificuldades que se espera encontrar, tornaria a manutenção preventiva muito mais precisa, rápida e econômica.

A manutenção preventiva possibilita a antecipação da correção da avaria antes que a falha ocorra, nos geradores fotovoltaicos a manutenção preventiva pode ser feita após o pôr do sol que é o momento do dia em que o gerador fotovoltaico não está gerando energia. Com uma manutenção preventiva eficiente e eficaz a confiabilidade desse ativo será muito alta e não haverá indisponibilidade no processo, pois o evento de manutenção não exigirá a necessidade de parada na produção de energia.

Os módulos fotovoltaicos são comercializados com garantia de, pelo menos, 12 anos, com eficiência energética de 80%. Sua durabilidade está diretamente ligada ao fato de os módulos solares não consumirem matéria-prima no processo de captação da energia solar, uma vez que a transforma em energia elétrica. Sendo assim, a manutenção do módulo solar se restringe à realização de limpezas periódicas e observação dos sinais de degradação [13].

Atualmente, vem sendo dedicada uma atenção especial a confiabilidade e custo de manutenção de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O desafio é satisfazer os requisitos do ambicioso mercado de geração de energia fotovoltaica e possibilitar um longo tempo de vida útil sob condições normais e críticas. Apesar dos inversores representarem uma pequena porcentagem do custo inicial (30%-40%), eles são um dos pontos mais fracos do sistema fotovoltaico [14].

O método de gerenciamento de degradação térmica do inversor provou que sua vida útil pode ser aumentada consideravelmente através do equilíbrio perfeito das perdas entre todas as chaves do conversor. Para garantir esses limites é necessário sobre dimensionar o sistema, ou seja, utilizar inversores de potência nominal acima da potência dos módulos fotovoltaicos. Com o sobre dimensionamento, o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos se tornam consideravelmente maior, ou seja, a degradação por ciclagem térmica deixa de ser uma preocupação no tempo de vida útil do inversor [15].

Pode-se afirmar que um investimento em micro geradores fotovoltaicos é rentável e seguro após a análise minuciosa de seus custos de implantação, limpeza e manutenção. A manutenção é uma peça fundamental para uma boa gestão do desempenho e é um dos responsáveis por alavancar os índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Para investimento em geradores fotovoltaicos, o índice de disponibilidade e os gastos com manutenção garantem uma análise segura sobre o investimento.

A Figura 1 ilustra o custo da manutenção de um ativo em função da periodicidade em meses [16]. Aplicando isso em geradores fotovoltaicos é possível dizer que para uma alta confiabilidade do gerador fotovoltaico o custo elevado de manutenção inviabiliza a lucratividade do gerador, ao mesmo tempo, a não realização da manutenção é equivalente a ignorar a lucratividade do gerador fotovoltaico; uma vez que não quantizados esses gastos, não se calculou esses gastos, não se prediz os valores e o período da intervenção, tornando a confiabilidade do gerador extremamente baixa. Ao realizar um investimento a confiabilidade do ativo deve ser conhecida, a região da periodicidade ótima (entre 9 e 12) demonstrada da figura 01, é a que proporciona melhor resultado financeiro do sistema e depende de vários fatores, como: custo da manutenção preventiva, lucratividade do processo e, principalmente, conhecimento da vida útil dos sistemas. Visto isso fica claro a importância de conhecer os custos e periodicidade de manutenção do gerador fotovoltaico para ter certeza de sua lucratividade ao longo da sua vida útil aproximada de 25 anos.

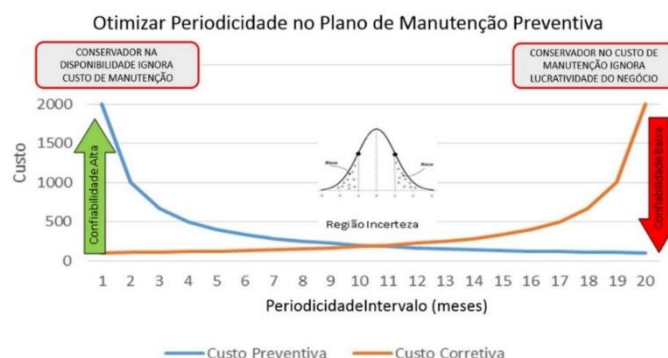


Fig.1 – Efeito dos custos na periodicidade de manutenção preventiva [16].

A manutenção preventiva no caso dos geradores fotovoltaicos não está atrelada somente a substituição da peça, e sim em retardar o momento de falha do equipamento. A figura 02 mostra exatamente o que acontece quando um ativo recebe pequenos reparos antes do momento de falha, observa-se que ao fazer reparos baseados no tempo ou na condição do ativo o seu número de ciclos antes da falha é aumentado consideravelmente e quando você age apenas na falha, você não tem gastos com manutenção preventiva porém precisa estar preparado para elevar o custo do processo, devido à baixa confiabilidade o que vai gerar indisponibilidade no processo durante o período de substituição do ativo. Quando falamos dos geradores fotovoltaicos, que tem sua produção de energia a cada dia, fala-se em redução de 3,33% da produção mensal de energia por cada dia parado.

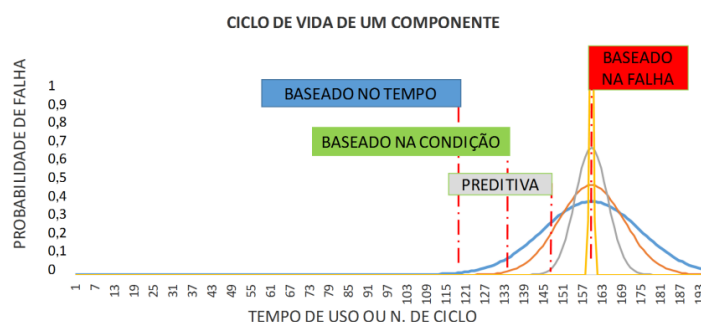


Fig.2 – Definição da periodicidade em função da vida útil [16].

Já os estudos apresentados por Rafael e Ruther [17] mostraram que em decorrência de uma falha em um dos quatro inversores instalados o gerador fotovoltaico analisado permaneceu 1750 horas parado o que representou indisponibilidade de 13,2% do total da energia gerada pelo sistema durante o ano em que falhou o inversor, outra falha do inversor gerou 615 horas de indisponibilidade do sistema o representou indisponibilidade operação de aproximadamente 20,4% do total da energia gerada pelo sistema durante o ano em que esta foi verificada a falha. O gerador analisado por [18] obteve índice de disponibilidade de 65,429% para o arranjo de painéis fotovoltaicos, 99,994% para o cabo do circuito de corrente contínua, 99,695% para o inversor e 99,999% para os cabos do circuito corrente alternada.

Através da análise das informações obtidas nas pesquisas bibliográficas realizadas, foi possível elaborar e descrever um plano de manutenção de referência para os sistemas fotovoltaicos de micro geração, equilibrando os custos financeiros, ambientais e sociais, de modo que, o proprietário da geração fotovoltaica tenha maior assertividade da estimativa da energia elétrica, bem como dos custos de manutenção e operação, desde que considere e realize periodicamente as manutenções necessárias.

Neste artigo, levantam-se as taxas de falhas dos componentes do gerador fotovoltaico e, baseando-se nesses indicadores, é contradito o senso comum de que as usinas de geração fotovoltaica são relacionadas a baixa ou nula necessidade de assistência durante operação e manutenção. Conclui-se assim que o custo de

manutenção existe e é um fator decisivo nas viabilidades operacional e econômica de um equipamento ou processo.

2. METODOLOGIA

Através da análise das informações obtidas nas pesquisas bibliográficas realizadas, foi possível levantar as taxas de falhas e MTBF dos componentes do sistemas fotovoltaicos de micro geração, de posse desses dados será possível prever as manutenções necessárias equilibrando os custos financeiros, ambientais e sociais, de modo que, o proprietário da geração fotovoltaica tenha maior assertividade da estimativa da energia elétrica, bem como dos custos de manutenção e operação, desde que considere e realize periodicamente as manutenções necessárias.

A manutenção preventiva pode ser fundamentada no tempo, na condição ou na falha. Quando a manutenção é pautada no tempo determina-se um tempo de uso para a execução dos reparos ou ajustes. Quando a manutenção é pautada na condição do equipamento, os reparos são feitos após inspeções visuais que sejam capazes de detectar necessidade de reparo, esse tipo inspeção visual é conhecida como preditiva. E a manutenção pautada na falha é quando o equipamento falha, cessa seu funcionamento e então ele é substituído, para aplicar a manutenção após a falha é necessário saber se a falha não danificará outros componentes do gerador fotovoltaico.

Para um gerador fotovoltaico cujo a instalação é feita em uma residência ou empresa de pequeno porte e a mesma não possui um setor especializado em manutenção a manutenção vai ocorrer somente no momento da falha, porém ao optar pela manutenção apenas no momento da falha haverá possibilidade de reduzir o custo da manutenção e elevar o custo do processo, devido à baixa confiabilidade, gerando indisponibilidade no processo durante o período de aquisição da peça e contratação de mão de obra especializada para identificar a falha e corrigir.

Em geral, a gestão de ativos é suportada pela definição dos modos de falha, especificando as formas possíveis para que o equipamento possa deixar de cumprir as suas funções (Modo de falha); o que causa cada falha funcional (causa de falha); o que acontece quando cada uma das falhas ocorre (efeitos da falha), e qual a importância de cada modo de falha. Estas podem ser descritas de forma estruturada por Causa, Efeito, Ação. Gallardo-Saavedra et al. [19] analisaram dados operacionais de 100 geradores entre os anos de 2012 e 2016, registrando taxa de falhas média de (321-72,6%) por ano e por gerador fotovoltaico se a capacidade dos geradores não for considerada. O mesmo estudo calculou a quantidade de falhas por quilowatt (potência nominal do gerador) em vez de por gerador fotovoltaico, revelando uma taxa anual de 0,23 falhas/kW.

Para entender melhor as observações apresentadas anteriormente, observe-se a avaliação dos principais componentes de um gerador fotovoltaico com seus respectivos MTBF e o intervalo de manutenção necessária para a confiabilidade desejada conforme Tabela 1. Veja que para uma confiabilidade de 99,5% nos inversores são necessárias manutenções a cada 9,6 meses.

Tab.1 – Representação dos índices de confiabilidade de um gerador fotovoltaico

GERADOR FOTOVOLTAICO												
Componentes do Gerador	Módulo Fotovoltaico				Inversor Fotovoltaico				Cabos e Conexões			
MTBF(anos)	24,95				5,50				20,5			
Confiabilidade	99,5%	99%	97,5%	95%	99,5%	99%	97,5%	95%	99,5%	99%	97,5%	95%
Intervalo de Manutenção (anos)	24,94	24,94	24,95	24,95	0,80	1,35	2,14	2,83	20,5	20,5	20,5	20,5

A tabela 1 mostra dados compilados de 7.108 inversores, 3.013.650 módulos fotovoltaicos, cabos e conexões de micro geradores fotovoltaicos em uso desde 2012. Os dados utilizados para construir a tabela 1 foram coletados de artigos científicos que mostram micro geradores fotovoltaicos em uso no mundo desde

2012 e estão demonstrados na tabela 1. Conhecendo a região da periodicidade ótima de cada ativo do gerador fotovoltaico o investidor consegue prever os custos com a manutenção preventiva, custos com manutenção corretiva e principalmente ter um controle estatístico das falhas e tempo de ocorrência de falha em outros geradores para usar como base para a manutenção e inspeção do seu ativo.

3. DISCUSSÃO

Apesar de existir o senso comum de que as usinas de geração fotovoltaica são relacionadas a baixa ou nula necessidade de assistência durante operação e manutenção, uma vez que o gerador apresenta uma vida útil aproximada de 25 anos [6]. A tabela 01 compilou dados de dezenas de geradores fotovoltaicos em operação e mostrou que intervenções são necessárias em um período de tempo menor do que a vida útil estimada do ativo. A realidade encontrada em campo é diferente do senso comum divulgado.

Visto isso, a manutenção dos geradores fotovoltaicos é fundamental para garantir maior assertividade da estimativa da energia elétrica, bem como dos custos de manutenção e operação do seu gerador fotovoltaico, desde que considere e realize periodicamente as manutenções necessárias. Essas manutenções tornam-se mais eficientes quando seguem um histórico de falhas e inspeções de campo além das recomendações dos fabricantes. A periodicidade ótima de manutenção de um ativo, que proporciona melhor resultado financeiro do sistema, depende de vários fatores, como: custo da manutenção preventiva, lucratividade do processo e, principalmente, conhecimento da vida útil dos sistemas. Para isso é necessário conhecer profundamente as falhas dos componentes e seu tempo de ocorrência.

Este trabalho mostra que conhecer o tempo de falha do equipamento fotovoltaico é fundamental para que as inspeções e intervenções sejam planejadas e executadas em intervalos pré-determinados para aumentar o clico de vida dos ativos. O gerador fotovoltaico foi dividido em três componentes: módulos, inversor e cabos e conexões.

Para os módulos, a vida útil e o tempo de falha são próximos de 25 anos o que demonstra que o ativo sofre poucos ou nulos defeitos antes do fim de sua vida útil, porém análises em campo mostram que sua eficiência é prejudicada pela falta de limpeza, fazendo com que a eficiência possa ser reduzida em até 27%. A sujidade depositada sobre o vidro do módulo fotovoltaico é o fenômeno resultante da deposição de diversas partículas sobre o módulo, entre tais partículas podemos citar: pólenes, grãos de areia, sujidade de aves, partículas provenientes de construções civis nas proximidades entre outras. Quando a limpeza e manutenção preditiva dos módulos não é realizada periodicamente, a remoção dessas partículas se torna cada vez mais difícil e prejudica a geração de energia.

A falha de um inversor em um gerador fotovoltaico ocasiona em parada do gerador até seu reparo ou substituição, os inversores representam uma pequena porcentagem do custo inicial (30%-40%) de implantação do gerador fotovoltaico eles são um dos pontos mais fracos do sistema fotovoltaico dado que a troca de um inversor antes do período de vida útil previsto, do ponto de vista econômico, pode inviabilizar a instalação do gerador fotovoltaico, portando atuar de maneira preventiva seria o mais viável para a lucratividade do gerador, uma vez que são peças de alto custo e de difícil aquisição.

A falha nos cabos e conectores elétricos não inutilizam o gerador fotovoltaico, como são quantidades expressivas de cabos e conectores e a confiabilidade deles é de 99,99% mesmo após o tempo de vida útil do ativo. Do ponto de vista econômico, para o cenário apresentado, atuar de maneira corretiva é o mais viável para a lucratividade do gerador, uma vez que são peças de baixo custo e de fácil aquisição. O proprietário do gerador pode ter peças em casa para substituição em caso de necessidade.

4. CONCLUSÃO

Ao levantar as taxas de falhas dos componentes do gerador fotovoltaico em campo é contradito o senso comum de que as usinas de geração fotovoltaica são relacionadas a baixa ou nula necessidade de assistência durante operação e manutenção. Conclui-se assim que o custo de manutenção existe e é um fator decisivo nas viabilidades operacional e econômica de um equipamento ou processo.

Este trabalho mostra que conhecer o tempo de falha do equipamento fotovoltaico é fundamental para que as inspeções e intervenções sejam planejadas e executadas em intervalos pré-determinados para aumentar o ciclo de vida dos ativos. O gerador fotovoltaico foi dividido em três componentes: módulos, inversor e cabos e conexões. Para os módulos cujo a vida útil e o tempo de falha são próximos de 25 anos o que demonstra que o ativo sofre poucos ou nulos defeitos antes do fim de sua vida útil, sua manutenção deve ser a preditiva que consistirá em inspeções visuais para identificar a necessidade de limpeza e ou troca dos módulos por presença de avarias identificadas visualmente. A falha de um inversor em um gerador fotovoltaico ocasiona em parada do gerador até seu reparo ou substituição, portando atuar de maneira preventiva seria o mais viável para a lucratividade do gerador, uma vez que são peças de alto custo e de difícil aquisição. Levando-se em consideração que a falha gerada nos cabos elétricos e conectores devido à utilização exaustiva da vida útil não ocasiona nenhum dano ao sistema. Do ponto de vista econômico, para os cenários analisados, atuar de maneira corretiva seria o mais viável para a lucratividade do gerador, uma vez que são peças de baixo custo e de fácil aquisição.

Conclui-se assim que podem ser utilizados três tipos de manutenção nos geradores fotovoltaicos: limpeza de manutenção preditiva nos painéis, onde a troca será feita somente quando identificadas falhas após inspeção. Manutenção preventiva em períodos pré-determinados nos inversores, uma vez que o inversor quando falha demanda parada do gerador e sua falha tem um alto custo de reparo e manutenção corretiva em cabos e conexões, uma vez que suas falhas e reparos são de baixo impacto no gerador e baixo custo de reparo.

5. REFERÊNCIAS

- [1] M. A. M. Ferreira and R. B. Cardoso, "Energy and environmental impacts of using solar photovoltaic systems for charging electric cars at gas station in Brazil," *Res. Soc. Dev.*, vol. 9, no. 9 SE-, p. e767997749, Sep. 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i9.7749.
- [2] C. Morales, "Indicadores de consumo de energia elétrica como ferramentas de apoio à gestão: Classificação por prioridades de atuação na Universidade de São Paulo," p. 114, 2007.
- [3] A. N. D. E. E. AGÊNCIA, "Capacidade de geração do Brasil," *Capacidade de geração do Brasil*, 2020. <https://www.aneel.gov.br/signa>.
- [4] E. de P. E. EPE, "Plano decenal de expansão de energia 2029," *Análise Socioambiental*, 2019.
- [5] R. Rella, "Energia solar fotovoltaica no Brasil," *Rev. Iniciação Científica*, vol. v. 15, n., no. ISSN 1678-7706, pp. 01–10, 2017.
- [6] E. Hasselbrink *et al.*, "Validation of the PVLife model using 3 million module-years of live site data," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2013, pp. 7–12, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744087.
- [7] I. (International and C. A. P. (Instituto B. do Cobre), "GUIA PARA A APLICAÇÃO DA NORMA ABNT NBR ISO 55001," vol. EDIÇÃO 02, 2018.
- [8] L. M. P. Pinho, "Gestão de Ativos," p. 109, 2016.
- [9] NBR-5462 ABNT, "NBR 5462 Confiabilidade e manutenibilidade," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, no. 1, p. 37, 1994.
- [10] É. A. Tonolo, J. D. Mariano, C. E. T. Neves, A. P. de M. Silva, and J. Urbanetz Junior, "Study of the Performance Reduction Due to the Dirt Effect in the Photovoltaic Systems of UTFPR - Curitiba," *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, vol. 61, no. spe, 2018, doi: 10.1590/1678-4324-smart-2018000240.
- [11] A. Kimber, L. Mitchell, S. Nogradi, and H. Wenger, "The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest Region of the United States," *Conf. Rec. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4*, vol. 2, pp. 2391–2395, 2006, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279690.
- [12] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman," *Sol. Energy*, vol. 187, no. May, pp. 30–38, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.05.036.
- [13] E. L. Meyer and E. E. van Dyk, "Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 53, no. 1, pp. 83–92, 2004, doi: 10.1109/TR.2004.824831.
- [14] A. Rocha, "A relação incompreendida entre confiabilidade e MTBF," 2020.

<http://tesla.eng.ufmg.br/joomla/index.php/pt/tesla/blog-with-left-sidebar/120-a-relacao-incompreendida-entre-confiabilidade-e-mtbf> (accessed Mar. 03, 2021).

- [15] V. de Nazareth, “Confiabilidade de Inversores: Avaliação e Redução dos Efeitos de Ciclos Térmicos em Módulos de Potência,” 2016.
- [16] R. F. Corrêa and A. Dias, “Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva,” *Gest. e Prod.*, vol. 23, no. 2, pp. 267–278, 2014, doi: 10.1590/0104-530X2001-15.
- [17] L. Rafael do Nascimento and R. Ruther, “A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública,” *V Congr. Bras. Energ. Sol.*, vol. V, pp. 73–81, 2014.
- [18] D. F. SIMON, “ESTIMAÇÃO DE DISPONIBILIDADE EM SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA A PARTIR DE MODELO DE SIMULAÇÃO BASEADO EM REDES DE PETRI TEMPORIZADAS. 105f,” *Diss. Programa PósGraduação em Eng. Elétrica, Univ. Tecnológica Fed. do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.*, 2020.
- [19] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, and O. Duque-Pérez, “Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants,” *Energy*, vol. 183, pp. 825–836, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.185.