



APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE DESENVOLVIMENTO DO SUPORTE INTEGRADO DO PRODUTO NO CICLO DE VIDA DE USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

As usinas fotovoltaicas surgem como uma solução promissora para atender à demanda por energia elétrica, devido aos seus benefícios econômicos e ambientais, longa vida útil, e crescente valorização no setor financeiro, como um investimento que pode ser lucrativo e sustentável. No entanto, apesar dos benefícios, é importante enfatizar que existem desafios inerentes ao suporte à operação dessas usinas. É notável a ocorrência de falhas no que diz respeito à suportabilidade dessas instalações, com problemas de baixa disponibilidade em boa parte das usinas instaladas. Estas dificuldades podem resultar em operações com a degradação da relação custo benefício esperada. Em alguns casos, pode até levar à paralisação e falência da usina. Este trabalho modela a suportabilidade de usinas fotovoltaicas utilizando conceitos consagrados para o desenvolvimento do suporte às frotas de aeronaves. A estratégia utilizada conta com a modelagem de uma usina e seus componentes, a estrutura de manutenção que a suporta, além da operação da usina por um determinado período. A modelagem leva a um melhor entendimento sistêmico e econômico do comportamento da relação custo benefício da usina e da sua suportabilidade. A modelagem desenvolvida parametriza os desempenhos de suporte e possibilita que as tomadas de decisão nas fases iniciais, de aquisição, de implantação e de operação da usina possam ser tomadas de forma correta quanto aos seus custos e objetiva quanto aos seus parâmetros de desempenho. Duas instâncias foram testadas e apontam para as consequências entre opções com componentes de maior qualidade (maior custo de aquisição) e com componentes de menor qualidade. Os resultados permitem o entendimento do comportamento da relação custo benefício, representada pela disponibilidade da usina versus os custos operacionais envolvidos para os dois casos. A instância com maior custo inicial (maior qualidade) apresentou, ao longo dos 25 anos de operação modelados, um melhor desempenho de disponibilidade e custos totais.



INTRODUÇÃO

A transição energética em direção a fontes renováveis tem acelerado a implantação de sistemas de geração de energia fotovoltaica ao redor do mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). As usinas fotovoltaicas, em particular, representam uma importante contribuição para a sustentabilidade e diversificação da matriz energética de diversos países (HAEGEL, 2017). No entanto, garantir a suportabilidade e confiabilidade desses sistemas durante todo o ciclo de vida é um desafio (KUITCHE, 2013).

A motivação para esta pesquisa surge da percepção de que a engenharia de suportabilidade, apesar de seu potencial, ainda é subutilizada na prática da operação dos sistemas fotovoltaicos (BHANDARI, 2015). Adicionalmente, a crescente tendência de eletrificação em vários setores, incluindo transportes e aeronáutica, destaca a importância crítica de uma operação confiável das usinas fotovoltaicas. Falhas na suportabilidade dessas instalações podem resultar em operações abaixo da eficiência esperada e, em alguns casos, levar à paralisação total das usinas, com impactos negativos significativos na sustentabilidade e lucratividade dos sistemas (RAIMO, 2018).

REVISÃO DA LITERATURA

A relevância da engenharia de suportabilidade em sistemas fotovoltaicos é cada vez mais evidente no cenário energético atual. Blanchard (2004) define suportabilidade como a capacidade de um sistema operar de maneira eficiente e segura ao longo de sua vida útil, um conceito que se aplica perfeitamente às usinas fotovoltaicas; A manutenção preventiva é uma prática comum na engenharia de suportabilidade, visando identificar e corrigir potenciais falhas antes que elas ocorram (SMITH et al., 2018). Isto pode incluir atividades como a limpeza regular dos painéis para evitar a acumulação de sujeira e detritos que poderiam reduzir a eficiência da geração de energia (DOSHI et al., 2017). Mas a manutenção preventiva é apenas um aspecto da aplicação da engenharia de suportabilidade em usinas fotovoltaicas. De igual importância é a manutenção corretiva, que envolve a reparação de falhas que já ocorreram. Como observado por Kuitche et al., (2015), esta abordagem contribui significativamente para minimizar as perdas de energia e assegurar a eficiência operacional dos sistemas fotovoltaicos. A aplicação combinada de manutenção preventiva e corretiva baseada em princípios de engenharia de suportabilidade tem o potencial de otimizar o retorno financeiro de projetos de usinas fotovoltaicas (CUCCHIELLA



et al., 2017). Isto se dá ao aumentar a disponibilidade dos sistemas e reduzir a frequência e o custo de reparos de longo prazo. Na busca por projetar sistemas fotovoltaicos de alto desempenho e confiabilidade, Deline, Jordan e Kurtz (2017) destacam a importância de práticas robustas de projeto e manutenção. A engenharia de suportabilidade é crucial nesse contexto, já que permite a otimização do tempo de vida útil e a minimização dos custos de manutenção em usinas fotovoltaicas.

MÉTODO

A metodologia aplicada neste trabalho acadêmico, intitulado "APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE DESENVOLVIMENTO DO SUPORTE INTEGRADO DO PRODUTO NO CICLO DE VIDA DE USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA", seguiu um conjunto estruturado de etapas para investigar a viabilidade e eficácia de adaptar conceitos de suportabilidade, comumente usados em aeronaves, para o domínio de usinas fotovoltaicas.

1. Observação dos Fatos:

- a) Estudo do Problema: A primeira etapa envolveu um exame profundo das questões inerentes à implementação e operação de usinas fotovoltaicas. Isso permitiu identificar as áreas problemáticas que poderiam ser otimizadas com uma abordagem de suportabilidade.
- b) Estudo dos Métodos de Solução: Uma revisão literária foi realizada para compreender as técnicas e métodos que a aeronáutica usa ao aplicar conceitos de suportabilidade.

2. Levantamento de uma Hipótese

Baseado nas observações iniciais, foi proposta a hipótese de que, ao adaptar e aplicar a modelagem de suportabilidade de aeronaves em usinas fotovoltaicas, seria possível melhorar sua eficiência e otimizar a relação custo- benefício.

3. Experimentação:



- a) Modelagem do sistema de usina fotovoltaica: O sistema de usina fotovoltaica foi detalhadamente modelado, especialmente focando nos parâmetros de RAM-C (Reliability, Availability, Maintainability, and Cost) para identificar áreas de otimização.
- b) Modelagem da estrutura de suporte: Uma estrutura de suporte foi modelada, levando em consideração os materiais, design e carga dos painéis fotovoltaicos.
- c) Modelagem dos cenários: Foram estabelecidos pelo menos dois cenários distintos que refletiam diferentes condições operacionais para a usina. Esses cenários poderiam envolver variações sazonais, diferentes intensidades de luz solar, entre outros.
- d) Rodar os testes utilizando o Suite Opus 10: As modelagens e cenários foram submetidos a simulações usando o software Suite Opus 10, uma ferramenta consagrada pela literatura para análises desse tipo.
- e) Apresentação e Discussão dos Resultados: Após a execução das simulações, os resultados foram analisados, e as conclusões extraídas dessas análises foram discutidas em detalhe.

RESULTADOS

Ao aplicar a curva C X E (Custo X Eficácia) em sistemas fotovoltaicos, foi analisado diferentes estratégias e configurações para avaliar a relação entre os custos envolvidos e a eficácia do sistema. Os resultados obtidos forneceram insights valiosos sobre as opções mais eficientes e economicamente viáveis. Durante a análise, considerei uma variedade de fatores, como custos de aquisição dos painéis solares, inversores, sistemas de armazenamento de energia e outros componentes necessários para o sistema fotovoltaico. Além disso, levei em conta os custos de instalação, manutenção e operação ao longo do tempo. Ao plotar os diferentes pontos na curva C X E, foi possível identificar as estratégias que oferecem o melhor equilíbrio entre custos e eficácia. Por exemplo, ao comparar diferentes tipos de painéis solares, observei que aqueles com maior eficiência de conversão geralmente apresentavam custos mais altos. A análise revelou que, embora certos componentes possam ser mais caros inicialmente, eles podem oferecer maior durabilidade e menor necessidade de substituição ao longo do tempo, resultando em menor custo total de propriedade. Essa eficácia ao longo da vida útil do sistema foi um fator importante na tomada de decisão. Além disso, ao analisar os custos de manutenção



e operação, foi possível identificar estratégias que maximizam a eficácia do sistema ao mesmo tempo em que minimizam os custos de longo prazo. Isso incluiu a implementação de um plano de manutenção preventiva eficiente, a escolha de fornecedores confiáveis e a consideração de fatores como durabilidade e facilidade de manutenção dos componentes. Os resultados da análise da curva C X E forneceram uma base sólida para tomar decisões informadas sobre a seleção de componentes, configuração do sistema e estratégias de manutenção. Com base nessas informações, pude recomendar as opções mais eficientes e economicamente viáveis para o sistema fotovoltaico em questão, levando em consideração tanto os custos iniciais quanto os custos ao longo da vida útil do sistema. Portanto, é fundamental adaptar a análise da curva C X E às circunstâncias específicas do sistema fotovoltaico em consideração, levando em conta as premissas e dados relevantes para obter resultados mais precisos e aplicáveis, conforme representado na Figura 1.

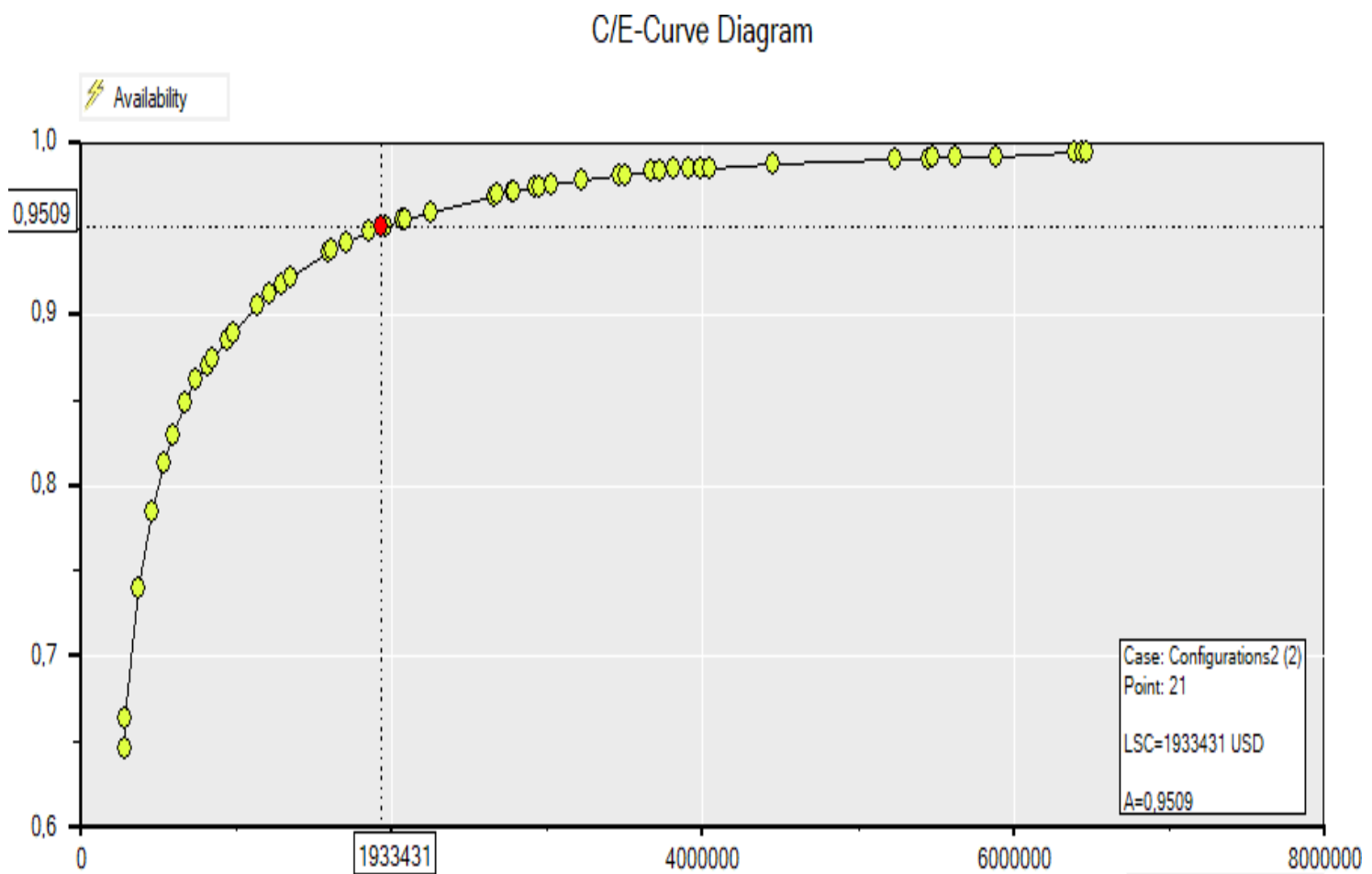


Figura 1 – Curva C X E do experimento de usinas fotovoltaicas



CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

A aplicação de conceitos de Desenvolvimento do Suporte Integrado do Produto em usinas fotovoltaicas transcende uma otimização puramente técnica e econômica, alinhando-se estrategicamente com os pilares da Agenda 2030 da ONU e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A pesquisa contribui fundamentalmente para o **ODS 7 (Energia Limpa e Acessível)**, pois, ao focar na suportabilidade para aumentar a **disponibilidade e confiabilidade** das usinas, garante que a energia limpa seja entregue de forma consistente, enquanto a análise da curva Custo x Eficácia demonstra que investimentos em componentes de maior qualidade resultam em um menor custo total de propriedade, tornando a energia solar mais competitiva e economicamente acessível a longo prazo. Concomitantemente, o estudo dialoga com o **ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura)** ao promover a **inovação** através da transferência de conhecimento da indústria aeronáutica para o setor energético e ao fornecer um modelo que auxilia na construção de uma infraestrutura de geração mais **resiliente e sustentável**. Adicionalmente, a pesquisa tangencia o **ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis)**, incentivando a priorização da durabilidade e do ciclo de vida dos componentes em detrimento do menor custo inicial, o que reduz o descarte e otimiza o uso de recursos. Por fim, ao maximizar o tempo de operação das usinas, o trabalho reforça a **ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima)**, garantindo que o potencial de cada instalação para mitigar as emissões de gases de efeito estufa seja plenamente realizado, consolidando a suportabilidade como um vetor essencial para que os investimentos em energia renovável se traduzam em uma infraestrutura verdadeiramente limpa, inovadora e confiável para as futuras gerações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, a utilização de ferramentas computacionais, como o Opus Suite, proporcionou um alicerce sólido para a exploração e validação da hipótese apresentada. Através de uma análise, foi possível verificar que o modelo desenvolvido adere de forma consistente à fundamentação teórica e às revisões bibliográficas presentes no campo de estudo. Os testes de funcionalidade e sensibilidade estabeleceram uma prova de conceito robusta, evidenciando a solidez e a confiabilidade do modelo proposto. O estudo de caso,



com seu caráter realístico, reforçou a aplicabilidade prática do trabalho. Durante a experimentação, as variantes demonstraram cenários variados de custo e disponibilidade, proporcionando uma visão clara da eficiência do modelo no contexto dos sistemas fotovoltaicos. Ao analisar os resultados, torna-se evidente a notável confiabilidade e disponibilidade destes sistemas, confirmando que são capazes de fornecer energia elétrica consistentemente durante décadas. O modelo proposto, além de resolver o problema de pesquisa apresentado, destacou-se como uma ferramenta viável para a aplicação em usinas fotovoltaicas. Sua contribuição acadêmica é notável, fornecendo um modelo de apoio à decisão que pode impulsionar a eficiência do suporte logístico em usinas fotovoltaicas. A aplicabilidade operacional deste modelo promete ser revolucionária para novos projetos e otimização de usinas existentes. Olhando adiante, sugere-se que pesquisas futuras se aprofundem em cenários alternativos, explorando e expandindo ainda mais o potencial inerente ao Desenvolvimento do Suporte Integrado do Produto em Usinas Fotovoltaicas.



REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, F. T. M.; FILHO, J. N. M.; DUARTE, L. P. N.; MESQUITA, A. C. P. Development of the AeroLogLabTOOL®. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019. Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16690**: Instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos – requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2017.

BARBOSA, F. Real-time monitoring of photovoltaic systems based on IoT communication systems. **Journal of Renewable Energy**, v. 152, p. 157-166, 2020.

BLANCHARD, B. S. **System engineering management**. London: John Wiley & Sons, 2004.

BRACALE, A.; CARPINELLI, G.; MOTTOLA, F. A stochastic model for the analysis of the impact of Electric Vehicles and of PV systems on low voltage grids. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 14-25, 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobras-EPE. **Relatório do grupo de trabalho - especificações dos projetos de referência no âmbito do programa luz para todos**. Brasília, DF, 2013.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Sustainable energy in the photovoltaic sector: a case study for the region of Umbria, Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2991-3005, 2017.

CUNHA, M.S.; MARTINS; M. R.; SZAJNBOK, M. Contribuição do apoio logístico integrado para o desempenho e disponibilidade de sistemas complexos. Congress Pan Americano de Engenharia Naval, p.1- 20, 2011.

DAU. **Integrated product support (IPS) elements guidebook**. Defense Acquisition University, 2021. Disponível em: [https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-\(IPS\)-Element-Guidebook.pdf](https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-(IPS)-Element-Guidebook.pdf). Acesso em: 4 jun. 2023.

FIGUEIREDO-PINTO, D. G.; ABRAHÃO, F. T. M. Custo do ciclo de vida: proposta de método de cálculo prospectivo e análise de sensibilidade a fatores de confiabilidade e manutenibilidade. *In*: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 20. 2018, São José dos Campos. **Anais** [...].

São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018.



FIGUEIREDO-PINTO, D. G. **A military aircraft fleet support management model based on the optimal integration of predictive and schedule maintenance**. 2022. 125p. Thesis (Doctor of Science in Space Sciences and Technologies) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

GONÇALVES, A. S. Avaliação da eficiência de transformadores aplicados em sistemas fotovoltaicos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE*, 2019. **Anais [...]**. [S.l.], 2019.

GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World energy outlook 2020**. Paris: International Energy Agency, 2020.

KUITCHE, J.; PANTHA, B.; TAMIZHMANI, G. Photovoltaic reliability: quantification of the effect of installation workmanship on system and component reliability. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n. 5, p. 051502, 2015.

KURTZ, S. "Reliability of PV systems." **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, 2012, p. 1166-1179, 2011. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2182090.

LINDNER, O. **Air force develops new, deployable, energy systems**. U.S. Department of Defense, 2017. Disponível em: <https://www.defense.gov/News/Article/Article/1143863/air-force-develops-new-deployable-energy-systems/>. Acesso em: 27 jun. 2021.

LIVERA, A. **Operation and maintenance decision support system for photovoltaic systems**. IEEE Access. Cyprus: PV Technology Laboratory, FOSS Research Centre for Sustainable Energy, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Cyprus, 2022.

OLIVEIRA, T. C. **Design of a tool for the integrated logistics support development of aerospace complex systems: embryo digital twin**. 2022. 87 p. Dissertation (Master of Science) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

QUEIROZ, V. A. Use of the Modbus communication protocol in monitoring photovoltaic systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, 2018.

RAIMO, P. A. **A disseminação dos sistemas fotovoltaicos e a qualificação profissional**. 2018. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SKOPLAKI, E. Performance and reliability of photovoltaic systems: evaluation of their efficiency decline and investigation of the contributing factors. **Renewable Energy**, v. 34, n. 11, p. 2438-2441,



2009.

SMITH, D. J.; HINCHCLIFFE, K.; GREASLEY, A. **Reliability centred maintenance**. Routledge, 2018.

SOUZA, A. M. Aplicação de transformadores inteligentes em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018.

UNITED STATES. Department of Defense. **DOD-HDBK-470A**: designing and developing maintainable products and systems. Washington, DC: DoD, 1997.

UNITED STATES. Department of Defense. **DOD-HDBK-791**: maintainability design techniques. Washington, DC: DoD, 1988.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-HDBK-470A**: designing and developing maintainable products and systems. Washington, DC: DoD, 1997.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-HDBK-472**: maintainability prediction. Washington, DC: DoD, 1966.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-S-8512D**: military specification: support equipment, aeronautical, special, general specification for the design of. Washington, DC: DoD, 1974.