

Dissertação apresentada à Pró-reitora de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica.

Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes

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

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Orientador

Profa. Dra. Emília Villani
Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Arantes, Lucas Fernando Seelig Rangel

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.

São José dos Campos, 2023.

86 f.

Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão.

1. Suporte logístico integrado. 2. Manutenção. 3. Energia solar. 4. Células fotovoltaicas. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Ciências e Tecnologias Espaciais. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARANTES, Lucas Fernando Seelig Rangel. **Aplicação de conceitos de desenvolvimento do suporte integrado do produto no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica**. 2023. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2023

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Fernando Seelig Rangel

TÍTULO DO TRABALHO: Aplicação de conceitos de engenharia de suportabilidade no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2023

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes

R. Dr. José Luís de Almeida Soares, 195 – Jardim Santa Clara

CEP: 12080-130 – Taubaté – SP

**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

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Olympio Lucchini Coutinho	Presidente	- ITA
Prof. Dr.	Fernando Teixeira Mendes Abrahão	Orientador	- ITA
Prof. Dr.	Henrique Costa Marques	Membro Interno	- ITA
Prof. Dr.	Ricardo Augusto Tavares Santos	Membro Externo	- C3M Tecnologias Críticas Ltda.

Dedico esta dissertação de mestrado à CAPES e ao ITA, pelo suporte acadêmico e pela oportunidade de realizar este estudo. À minha mãe falecida, minha esposa, meus filhos e meu orientador, agradeço pelo amor, apoio e orientação que me concederam. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

Agradecimentos

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), expresso meu profundo reconhecimento por fornecer o ambiente acadêmico propício e os recursos necessários para a condução deste estudo. O ITA tem sido uma fonte de conhecimento e aprendizado valiosos.

À empresa IDS Energia, agradeço pelo apoio financeiro fornecido, o qual foi fundamental para a conclusão deste trabalho. Sua colaboração demonstra o compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento científico.

Ao AeroLogLab ITA, expresso meu agradecimento por sua contribuição e apoio durante esta pesquisa. Sua expertise e recursos técnicos foram essenciais para o desenvolvimento e validação dos experimentos realizados.

À minha amada mãe Sonia Maria Seelig Rangel Arantes, mesmo não estando mais presente fisicamente, agradeço por todo o amor, incentivo e exemplos de resiliência que ela me proporcionou. Sua influência e memória permanecem vivas em minha jornada acadêmica.

A meu pai Luis Fernando de Carvalho Arantes e aos meus avôs, Paulo Pereira Rangel e José Fernandes Arantes, os dois militares que me inspiraram.

À minha dedicada esposa Edienifer Maiara Aparecida Seelig Rangel Arantes e aos meus filhos, agradeço por seu amor incondicional, apoio emocional e compreensão ao longo deste percurso. Sua presença e incentivo foram pilares fundamentais para minha motivação e superação de desafios.

Por fim, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, o Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Sua orientação acadêmica e profissional foi inestimável, guiando-me com sabedoria e compartilhando seus conhecimentos para o sucesso deste trabalho.

A todas as pessoas mencionadas e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste estudo, meu sincero agradecimento. Suas contribuições foram inestimáveis para esta conquista.

A meus colegas de curso Daniel Buch e Lucas Sales Martins que me auxiliaram nesta jornada. Meus mais profundos agradecimentos ao Tenente Coronel Danilo Garcia Figueiredo Pinto, cuja inestimável contribuição e sabedoria foram essenciais para o sucesso do meu trabalho.

Expresso minha sincera gratidão à CAPES pelo apoio inestimável e por fomentar a educação e a pesquisa, peças-chave para o desenvolvimento do nosso país.

Minha profunda gratidão à SYSTECON pelo fornecimento da licença do software opus 10, recurso crucial que ampliou as possibilidades e aprofundou a qualidade da minha pesquisa.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

Resumo

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.

Abstract

Photovoltaic power plants emerge as a promising solution to meet the demand for electric power due to their economic and environmental benefits, long lifespan, and increasing appreciation in the financial sector as a profitable and sustainable investment. However, despite the benefits, it is important to emphasize that there are challenges inherent in supporting the operation of these plants. Failures are notable concerning the supportability of these installations, with issues of low availability in many of the installed plants. These difficulties can result in operations with degraded expected cost-benefit ratios. In some cases, it may even lead to the shutdown and bankruptcy of the plant. This work models the supportability of photovoltaic plants using well-established concepts for the support of aircraft fleets. The strategy employed involves modeling a plant and its components, the maintenance structure that supports it, as well as the plant's operation over a specific period. The modeling leads to a better systemic and economic understanding of the plant's cost-benefit relationship and its supportability. The developed modeling parameterizes support performances and enables decision-making during the initial phases, acquisition, implementation, and operation of the plant to be accurate in terms of costs and objective in terms of performance parameters. Two instances were tested, pointing to the consequences between options with higher quality components (higher acquisition cost) and lower quality components. The results provide an understanding of the cost-benefit behavior, represented by the plant's availability versus the operational costs involved for both cases. The instance with a higher initial cost (higher quality) showed, over the modeled 25 years of operation, better availability performance and total costs.

Lista de Figuras

FIGURA 1 – USINA SOLAR DE SÃO GONÇALO (CANAL SOLAR, 2023)	20
FIGURA 2 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA (PORTAL SOLAR).	21
FIGURA 3 – ESTRUTURA FOTOVOLTAICA.	24
FIGURA 4 – CONECTOR MC4 UTILIZADO EM USINAS FOTOVOLTAICAS.	25
FIGURA 5 – CABOS PARA CORRENTE CONTÍNUA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.	26
FIGURA 6 – INVERSORES FOTOVOLTAICOS.....	28
FIGURA 7 – COMPORTAMENTO DE UM EQUIPAMENTO EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO DE FORMA DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL (ADAPTADO DE SELBITTO, 2005).	34
FIGURA 8 – FALHA DE MORTALIDADE INFANTIL E CONECTOR FOTOVOLTAICO (IDS ENERGIA).	35
FIGURA 9 – ELEMENTOS DO IPS (ADAPTADO DE DAU, 2011).....	37
FIGURA 10 – DIAGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA NO TRABALHO.....	51
FIGURA 11 – MODELO GENÉRICO DE USINA FOTOVOLTAICA.....	54
FIGURA 12 – APLICAÇÃO DAS VARIANTES NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL.	58
FIGURA 13 – USINA SOLAR DA OPERADORA CLARO SEMELHANTE AO EMPREGADA NO ESTUDO (GD SOLAR).	59
FIGURA 14 – APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS NO OPUS10.	59
FIGURA 15 – APLICAÇÃO DOS ELEMENTOS DO SISTEMA DE CORRENTE CONTINUA NO OPUS10. .	60
FIGURA 16 – APLICAÇÃO DO ITEM NÍVEL COMPONENTE NO OPUS 10.	66
FIGURA 17 – APLICAÇÃO DAS TAXAS DE FALHAS DOS COMPONENTES NO OPUS10.....	67
FIGURA 18 – DESCRIÇÃO DOS NÍVEIS DE MANUTENÇÃO NO MODELO NA ESTRUTURAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA	68
FIGURA 19 – CURVA C X E DO EXPERIMENTO DE USINAS FOTOVOLTAICAS.....	69
FIGURA 20 – CURVA C X E DO EXPERIMENTO DA VARIANTE A, DISPONIBILIDADE ≥ 95	70
FIGURA 21 – CURVA C X E DO EXPERIMENTO DA VARIANTE B, DISPONIBILIDADE ≥ 95	71
FIGURA 22 – CURVA C X E DO EXPERIMENTO DA VARIANTE B, DISPONIBILIDADE ≥ 95	72
FIGURA 23 – GRÁFICO COM O PERCENTUAL DE CUSTO DOS COMPONENTES DA VARIANTE B. 73	
FIGURA 24 – GRÁFICO COMPARATIVO VARIANTE A VERSUS VARIANTE B.	75

Lista de Tabelas

TABELA 1 – TABELA SINOTICA APRESENTA O RESUMO ESTRUTURADO DOS TRABALHOS.	50
TABELA 2 – COMPONENTE EMPREGADOS VARIANTE A.	62
TABELA 3 – COMPONENTE EMPREGADOS VARIANTE B.	64
TABELA 4 – LISTA DO EXPERIMENTO DA VARIANTE A, DISPONIBILIDADE ≥ 95	70
TABELA 5 – LISTA DO EXPERIMENTO DA VARIANTE B, DISPONIBILIDADE ≥ 95	72
TABELA 6 – COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO VARIANTE A X VARIANTE B.	76

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA	Aerospace Industries Association
ASD	AeroSpace and Defence Industries Association of Europe
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CIP	Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DAU	<i>Defense Acquisition University</i>
ILS	Suporte Logístico Integrado (do inglês Integrated Logistics Support)
IPS	Suporte Integrado ao Produto (do inglês Integrated Product Support)
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LCC	Custo do Ciclo de Vida (do inglês Life Cycle Cost)
LSC	Custo de suporte em vida (do inglês Life Support Cost)
PBS	Estrutura de produto (do inglês <i>Product Breakdown Structure</i>)
PHS&T	Embalagem, manuseio, estocagem e transporte (do inglês em inglês Packaging, Handling, Storage and Transportation)
RCM	Manutenção centrada na confiabilidade (do inglês <i>Reliability-Centered Maintenance</i>)
RAMS	Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade (do inglês <i>Reliability, Availability, Maintainability and Safety</i>)

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Definição do problema	16
1.2 Objetivo do trabalho	17
1.3 Hipótese	18
1.4 Estruturação do trabalho	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS FOTOVOLTAICOS	19
2.1.1 Sistema de geração de energia.....	20
2.1.1.1 Sistema de corrente continua.....	21
2.1.1.1.1 Módulos fotovoltaicos	22
2.1.1.1.2 Sistemas de proteção de corrente continua.....	22
2.1.1.1.3 Estrutura	23
2.1.1.1.4 Conectores	24
2.1.1.1.5 Cabos corrente continua	25
2.2.1.2 Sistema de corrente alternada	26
2.2.1.2.1 Inversores.....	27
2.2.1.2.2 Sistema de cabos ac	28
2.2.1.2.3 Quadros de controle , proteção e DPS	28
2.2.2 Sistema de controle e integração com a rede (subestação de alta tensão).....	29
2.2.2.1 Sistema de transformação	30
2.2.2.2 Sistema de medição	30
2.2.2.3 Sistema de comunicação.....	31
2.2.2.4 Sistema de proteção de alta tensão	31
2.3 Aplicação da engenharia de suporte em usinas fotovoltaicas.....	32
2.3.1 A teoria da análise de falhas aplicando a curva da banheira (distribuição de Weibull) em sistemas fotovoltaicos	33
2.3.1.1 Mortalidade infantil em usinas fotovoltaicas.....	34
2.3.1.2 Fase de vida útil das usinas fotovoltaicas	35
2.3.1.3 Fase de período de desgaste das usinas fotovoltaicas	35
2.4 Os elementos do IPS (Integrated Product Support).....	36
2.4.1 Suporte continuado de engenharia	37
2.4.2 Suporte de suprimentos	38
2.4.3 Manutenção	38

2.4.4 Operações logísticas	39
2.4.5 Dados técnicos	40
2.4.6 Equipamentos de Suporte	40
2.4.7 Treinamento e suporte ao treinamento	41
2.4.8 Mão de obra e recursos humanos	42
2.4.9 Instalações e infraestrutura	42
2.4.10 Recursos computacionais	43
2.4.11 Influencia no projeto.....	43
2.4.12 Gerenciamento do suporte ao produto.....	44
2.5 Modelagem de suporte de sistemas	45
2.6 Software OPUS 10	46
2.6.1 Otimização de peças de reposição.....	47
2.6.2 Avaliação de soluções de suporte.....	47
2.6.3 Avaliação de sistemas de suporte.....	48
2.6.4 Modelagem e otimização de diferentes cenários no opus 10	48
2.7 Tabela sinótica	49
3 METODOLOGIA	51
3.1 Abordagem da pesquisa	51
3.2 Modelagem do sistema de usina fotovoltaica do ponto de vista de seu comportamento de RAM.....	53
3.4.1 Modelagem Estática e Determinística	55
3.4.2 METRIC (<i>Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control</i>)	55
3.4.3 Maximização da Efetividade de Custo	56
4 APLICAÇÃO DO MÉTODO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Instâncias e parâmetros utilizados no experimento	57
4.1.1 Características técnica da usina estudada	58
4.1.2 Intervalo empregado no experimento	59
4.1.3 Componentes analisados no experimento.....	60
4.1.3.1 Componentes variante A.....	60
4.1.3.2 Componentes variante B	63
4.4 <i>Product Breakdown Structure</i> (PBS).....	65
4.5 Taxas de falha dos componentes	66
4.6 Níveis de manutenção da usina fotovoltaico no Opus10	67
4.7 Apresentação dos resultados	68
4.8 Apresentação dos resultados com a comparação com duas variantes.....	69

4.8.1 Apresentação dos resultados na variante A.	69
4.8.2 Apresentação dos resultados na variante b.	71
4.9 comparações sobre os resultados obtidos no experimento.....	73
4.10 Discussões sobre a aplicação do método.....	76
5 CONCLUSÃO.....	78
5.1 Contribuições acadêmicas.....	78
5.2 Trabalhos futuros a serem desenvolvidos	79
REFERÊNCIAS	80

1 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).

1.1 Definição do Problema

A geração de energia fotovoltaica tem se mostrado um importante alternativo para a produção de energia limpa e sustentável. No entanto, ao longo do ciclo de vida das usinas de geração de energia fotovoltaica, podem surgir desafios relacionados à confiabilidade, disponibilidade e eficiência desses sistemas. Problemas como falhas em equipamentos, baixo desempenho, altos custos de manutenção e dificuldades na tomada de decisões podem impactar negativamente a operação dessas usinas. A falta da aplicação de conceitos de desenvolvimento do suporte integrado do produto no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica é um problema que afeta o desempenho dessas usinas, causando baixas disponibilidades, altos custos de operação e baixo retorno financeiro (RAIMO, 2018). Segundo Santos (2020), o suporte integrado do produto abrange atividades de suporte, como manutenção, logística, treinamento e suporte técnico, desde o estágio inicial de projeto até o final do ciclo de vida do produto. A ausência da aplicação desses conceitos compromete a disponibilidade das usinas fotovoltaicas, resultando em períodos de parada não planejados e redução da geração de energia. Conforme destacado por Raimo (2019), a falta de uma abordagem integrada de suporte ao longo do ciclo de vida da usina fotovoltaica contribui para falhas não previstas, falta de manutenção preventiva

adequada e dificuldades na detecção e correção de problemas, resultando em baixa disponibilidade da usina.

Além disso, a falta de aplicação dos conceitos de suporte integrado impacta os custos de operação das usinas fotovoltaicas. De acordo com González *et al.*, (2018), a manutenção corretiva, necessária quando não há uma manutenção preventiva eficiente, tende a ser mais dispendiosa e causa interrupções não planejadas na geração de energia. A falta de planejamento logístico eficiente para reposição de peças e suprimentos também contribui para os altos custos operacionais.

O baixo retorno financeiro é outro aspecto afetado pela falta de aplicação dos conceitos de suporte integrado. Conforme mencionado por Silva (2017), o desempenho comprometido das usinas fotovoltaicas resulta em geração de energia abaixo do esperado, elevados custos operacionais e necessidade de investimentos adicionais para reparos e manutenção, reduzindo a rentabilidade do projeto e prolongando o tempo necessário para recuperar o investimento inicial.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é o de modelar um sistema fotovoltaico, do ponto de vista de sua suportabilidade, e testá-lo em diferentes instâncias representativas do problema. São objetivos específicos do trabalho:

- Objetivo específico 1: Definição e descrição de um sistema fotovoltaico genérico e seu comportamento de suporte;
- Objetivo específico 2: Descrição do sistema de infraestrutura de suporte aplicado a um sistema fotovoltaico;
- Objetivo específico 3: Descrição da operação de um sistema fotovoltaico
- Objetivo específico 4: Modelar o comportamento de suporte de um sistema fotovoltaico
- Objetivo específico 5: Testar em diferentes instancias representativas do problema;

1.3 Hipótese

Se a modelagem da suportabilidade, semelhante à aplicada em aeronaves, for aplicada aos sistemas de usinas fotovoltaicas, então será possível parametrizar seu desempenho e a relação custo-benefício de forma mais precisa e embasada, levando em consideração fatores como confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e custos operacionais.

A hipótese em questão sugere uma abordagem interdisciplinar ao contemplar a possibilidade de adaptar técnicas de modelagem da suportabilidade, comumente utilizadas na indústria aeronáutica, para o contexto das usinas fotovoltaicas. A indústria aeronáutica, historicamente, tem se dedicado a desenvolver metodologias que priorizam a confiabilidade e o desempenho de suas máquinas. Assim, considerar a aplicação dessas técnicas às usinas fotovoltaicas pode representar uma tentativa válida e inovadora de abordar os desafios que este setor enfrenta.

1.4 Estruturação do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta a contextualização e motivação para o desenvolvimento deste trabalho. Apresenta também a definição do problema e os objetivos do trabalho. O Capítulo 2 revisa a literatura a respeito do problema, bem como a fundamentação teórica dos modelos necessários ao desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 3 descreve o método utilizado para a modelagem do problema e testes relacionados. O Capítulo 4 aplica a estratégia sugerida no Capítulo 3, com a modelagem do problema de suporte de uma usina fotovoltaica, e apresenta os resultados encontrados para diferentes cenários. O Capítulo ainda apresenta uma discussão a respeito tanto da modelagem da suportabilidade quanto dos resultados encontrados. O Capítulo 5 conclui o trabalho de pesquisa contextualizando suas contribuições e apontando para sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta primeiramente o estudo do problema de suporte das usinas fotovoltaicas. Em seguida explora os conceitos de suporte integrado do produto para sistemas complexos tipicamente utilizados no desenvolvimento de projetos aeroespaciais. Finalmente, descreve os conceitos e métodos utilizados para a modelagem matemática do problema de suporte. O final do capítulo apresenta uma tabela resumo dos trabalhos estudados e citados nesta pesquisa e faz uma comparação sinótica dos mesmos com este trabalho.

2.1 Sistemas Elétricos Fotovoltaicos

A energia solar fotovoltaica é uma forma de energia renovável que utiliza células fotovoltaicas para converter a luz solar diretamente em eletricidade. A crescente demanda por energia limpa e a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos têm impulsionado seu rápido crescimento e adoção em todo o mundo. Autores como Goetzberger e Hoffmann (2005), Luque e Hegedus (2003) e Green (2001) discutem os princípios básicos e o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos. Eles destacam a importância dos materiais semicondutores nas células fotovoltaicas e a capacidade de gerar eletricidade de maneira sustentável. Estudos como os de Haegel. (2017) e Irena (2019) abordam aspectos importantes relacionados à eficiência e longevidade dos sistemas fotovoltaicos. Esses estudos enfatizam a necessidade de estratégias efetivas de engenharia de suportabilidade para assegurar a operação contínua e confiável dos sistemas, incluindo manutenção adequada, gestão de configuração e suporte logístico integrado. Além disso, a transição para a energia solar fotovoltaica tem sido impulsionada por fatores como a preocupação com as mudanças climáticas e a busca por fontes de energia limpa. Autores como Creutzig (2017), e Lewis (2016) discutem a importância da energia solar fotovoltaica como um componente fundamental na transição para um sistema energético mais sustentável e livre de emissões de carbono. A energia solar fotovoltaica é uma forma de energia renovável que utiliza células fotovoltaicas para converter a luz solar diretamente em eletricidade. A crescente demanda por energia limpa e a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos têm impulsionado seu rápido crescimento e adoção em todo o mundo. Autores como Goetzberger e Hoffmann (2005), Luque e Hegedus (2003) e Green. (2001) discutem os princípios básicos e o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos. Eles destacam a importância dos materiais semicondutores nas células fotovoltaicas e a capacidade de gerar eletricidade de maneira sustentável e ambientalmente amigável. Estudos

como os de Haegel *et al.*, (2017), Irena (2019) e Green (2012) abordam aspectos importantes relacionados à eficiência e longevidade dos sistemas fotovoltaicos. Esses estudos enfatizam a necessidade de estratégias efetivas de engenharia de suportabilidade para assegurar a operação contínua e confiável dos sistemas, incluindo manutenção adequada, gestão de configuração e suporte logístico integrado. Além disso, a transição para a energia solar fotovoltaica tem sido impulsionada por fatores como a preocupação com as mudanças climáticas e a busca por fontes de energia limpa. Autores como Creutzig (2017) e Lewis (2016) discutem a importância da energia solar fotovoltaica como um componente fundamental na transição para um sistema energético mais sustentável e livre de emissões de carbono. Para compreender a complexidade e tamanho e o desafio de operação temos a Usina solar de São Gonçalo maior instalação do Brasil com 575,725 MWp de potência e 2,2 milhões de painéis solares, localizada na região semiárida do estado do Piauí apresentada na Figura 1 a seguir.



Figura 1 – Usina solar de São Gonçalo (CANAL SOLAR, 2023).

2.1.1 Sistema de Geração de Energia

O sistema de geração de energia é o coração de um sistema fotovoltaico, responsável por converter a energia solar em energia elétrica. É composto pelos painéis fotovoltaicos, também conhecidos como módulos solares, e pelos inversores, que convertem a corrente contínua produzida pelos painéis em corrente alternada adequada para uso doméstico ou conexão à rede elétrica. No contexto brasileiro, diversos estudos têm abordado o sistema de geração de energia em sistemas fotovoltaicos, visando maximizar a eficiência, a produção de energia e a integração com a rede elétrica. Um estudo conduzido por Pereira. (2019) analisou o desempenho de diferentes tipos de painéis fotovoltaicos em condições climáticas brasileiras. Os resultados destacaram a importância da seleção adequada dos painéis solares, levando em

consideração fatores como eficiência, tolerância a sombreamento e durabilidade, para otimizar a geração de energia. Outro estudo realizado por Pereira (2019) abordou a otimização do posicionamento e inclinação dos painéis solares para maximizar a captura de energia solar ao longo do dia e do ano. Os resultados demonstraram que o correto posicionamento dos painéis pode aumentar significativamente a eficiência do sistema, especialmente em regiões com variações sazonais na incidência solar. Além disso, pesquisas conduzidas por Souza (2020) exploraram o uso de inversores de alta eficiência e técnicas avançadas de controle para maximizar a conversão de energia e otimizar a integração do sistema fotovoltaico com a rede elétrica. Esses estudos ressaltaram a importância de inversores de qualidade e sistemas de controle inteligentes para garantir um desempenho confiável e uma conexão eficiente com a rede. Esses estudos evidenciam a importância do sistema de geração de energia em sistemas fotovoltaicos no contexto brasileiro. A seleção adequada dos painéis fotovoltaicos, o posicionamento estratégico, a utilização de inversores eficientes e o controle avançado são aspectos fundamentais para maximizar a produção de energia, melhorar a eficiência e garantir a integração adequada com a rede elétrica conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Diagrama simplificado de uma usina fotovoltaica (Portal solar).

2.1.1.1 Sistema de Corrente Contínua

Os sistemas fotovoltaicos operam com corrente contínua (DC), uma vez que a energia solar é convertida diretamente em eletricidade DC pelos módulos fotovoltaicos. Esse tipo de corrente elétrica flui continuamente em uma única direção, que é uma característica distintiva da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos (PEFIA, 2008). As vantagens da corrente

contínua incluem a ausência de perdas de energia devido à reatância capacitiva e indutiva, a capacidade de ser armazenada diretamente em baterias e a possibilidade de uso eficiente em aplicações de baixa tensão, tais como iluminação LED e eletrônicos (DE SOTO, 2006). No entanto, para que a energia DC produzida pelos módulos fotovoltaicos possa ser usada na maioria das aplicações ou injetada na rede elétrica, é necessário um inversor para converter a corrente contínua em corrente alternada (AC) (CARRASCO *et al.*, 2006). Além disso, os sistemas DC também requerem componentes adicionais para operar com segurança e eficiência. Isso inclui disjuntores de corrente contínua, fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos, todos projetados para proteger o sistema fotovoltaico e o equipamento conectado a ele contra possíveis problemas elétricos (ZHAO *et al.*, 2014).

2.1.1.1.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são o núcleo de qualquer sistema de energia solar. Cada módulo é constituído por várias células solares, geralmente fabricadas de silício cristalino, devido às suas propriedades semicondutoras favoráveis (MASTERS, 2004). Através do efeito fotovoltaico, os módulos têm a capacidade de converter a energia da luz solar diretamente em eletricidade. O princípio do efeito fotovoltaico baseia-se na capacidade dos materiais semicondutores de gerar elétrons livres quando expostos à luz. Quando a luz solar incide sobre uma célula solar, os fótons são absorvidos pelo material semicondutor, excitando os elétrons e permitindo-lhes mover-se livremente. Essa movimentação dos elétrons cria um fluxo de corrente, que pode ser colhido e usados para fornecer energia elétrica (GREEN, 2005). A eficiência dos módulos fotovoltaicos é uma consideração crítica na concepção e implementação de sistemas de energia solar. A eficiência de um módulo refere-se à proporção de energia solar que é convertida em energia elétrica utilizável, e é influenciada por vários fatores, incluindo o tipo de célula solar utilizada, a qualidade da fabricação, e as condições ambientais e de funcionamento, tais como a quantidade de luz solar disponível e a temperatura do módulo (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011).

2.1.1.1.2 Sistemas de Proteção de Corrente Contínua

Os sistemas de proteção de corrente contínua (DC) são um componente crítico dos sistemas fotovoltaicos, desempenhando uma função crucial na manutenção da segurança do sistema e na prevenção de danos causados por falhas elétricas (WENHAM, 2007). Uma componente chave do sistema de proteção DC é o disjuntor de corrente contínua. Disjuntores

DC são projetados para interromper a corrente elétrica no caso de uma sobrecarga ou curto-circuito, prevenindo assim danos a outros componentes do sistema e reduzindo o risco de incêndio (KUSKO; THOMPSON, 2018). Outro componente essencial do sistema de proteção DC são os dispositivos de proteção contra surtos (DPSs). DPSs protegem o sistema contra picos de tensão transitórios, que podem ser causados por eventos como descargas atmosféricas ou flutuações na rede elétrica. Os DPSs desviam a sobretensão para a terra, protegendo assim o restante do sistema (KHAN; ISLAM, 2015). A seleção adequada e a instalação de dispositivos de proteção DC é crucial para o funcionamento seguro e eficiente de um sistema fotovoltaico. Eles devem ser projetados para suportar a máxima tensão e corrente que o sistema pode gerar, e devem ser instalados em locais adequados para oferecer a máxima proteção (ZHAO *et al.*, 2017).

2.1.1.1.3 Estrutura

Conforme Figura 3, as estruturas fotovoltaicas, também conhecidas como sistemas de montagem, são essenciais para a instalação e operação eficaz de módulos fotovoltaicos. A principal função dessas estruturas é fornecer um suporte seguro e estável para os módulos, permitindo que sejam posicionados de maneira ideal para capturar a máxima quantidade de luz solar (TSANAKAS *et al.*, 2016). Existem vários tipos de estruturas fotovoltaicas, incluindo estruturas fixas, rastreadores solares e sistemas de montagem integrados em edifícios (BIPV). As estruturas fixas são as mais comuns, oferecendo uma solução robusta e de baixo custo. No entanto, a sua eficiência pode ser limitada, pois a orientação dos módulos permanece constante, independentemente da posição do sol (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Os rastreadores solares, por outro lado, são projetados para seguir o movimento do sol ao longo do dia, maximizando assim a quantidade de luz solar que atinge os módulos. Embora os rastreadores possam aumentar a eficiência da geração de energia, eles também são mais caros e requerem mais manutenção do que as estruturas fixas (LÖFFLER, 2020).



Figura 3 – Estrutura fotovoltaica.

2.1.1.1.4 Conectores

Conectores desempenham um papel crucial na instalação e operação de sistemas fotovoltaicos. Eles são usados para fazer conexões elétricas entre várias partes do sistema, incluindo módulos, inversores, controladores de carga e baterias (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009). Existem muitos tipos diferentes de conectores usados em sistemas fotovoltaicos, cada um projetado para uma aplicação específica. Um dos mais comuns são os conectores MC4, que são amplamente utilizados para conectar módulos fotovoltaicos entre si e ao restante do sistema (SURI; BOTTACCIOLI, 2018). Conforme a Figura 4, os conectores MC4 são projetados para serem resistentes ao clima e proporcionar uma conexão elétrica segura e de baixa resistência. Outro tipo de conector comumente usados em sistemas fotovoltaicos é o conector de anel, que é usado para conectar cabos a terminais de bateria e a blocos de terminais de equipamentos. Esses conectores são projetados para proporcionar uma conexão segura e resistente à corrosão (PASUPATHI, 2018). A seleção e instalação corretas dos conectores são cruciais para a segurança e eficácia dos sistemas fotovoltaicos. Conectores inadequados ou mal instalados podem resultar em conexões elétricas inseguras ou ineficientes, que podem reduzir o desempenho do sistema e aumentar o risco de falhas ou incêndios (KIM; LEE, 2018).



Figura 4 – Conector MC4 utilizado em usinas fotovoltaicas.

2.1.1.1.5 Cabos Corrente Contínua

Os cabos de corrente contínua (DC) são componentes essenciais em sistemas fotovoltaicos, fornecendo o meio pelo qual a energia é transportada do módulo fotovoltaico para o inversor e, finalmente, para a carga ou a rede elétrica (PARIDA, 2011). Os cabos DC em sistemas fotovoltaicos são especificamente projetados para serem resistentes à radiação UV, temperaturas extremas e outros fatores ambientais severos. São tipicamente isolados e apresentam uma alta capacidade de suportar correntes elétricas elevadas, minimizando as perdas de energia durante a transmissão (DUFOUR, 2012). A escolha do tamanho e do tipo do cabo DC é um aspecto crucial do design de um sistema fotovoltaico. A seleção inadequada dos cabos pode levar a perdas de energia significativas e possivelmente ao superaquecimento dos cabos, o que pode ser um risco de incêndio (TSANAKAS, 2016). De acordo com a norma ABNT NBR 16690 (ABNT, 2017), os cabos para instalações fotovoltaicas devem ser dimensionados para suportar as correntes máximas do sistema e garantir a segurança e a eficiência energética. Ademais, deve-se levar em consideração a temperatura operacional, a resistência ao fogo e as influências externas, como a exposição à radiação solar e às condições climáticas.



Figura 5 – Cabos para corrente contínua em um sistema fotovoltaico.

2.2.1.2 Sistema de Corrente Alternada

O sistema de corrente alternada (AC) é um componente essencial dos sistemas fotovoltaicos, responsável por converter a corrente contínua (DC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada utilizável. Esse sistema desempenha um papel fundamental na integração da energia solar à rede elétrica e assegura o fornecimento confiável de energia elétrica aos consumidores. Segundo Abbas. (2020), o inversor é um dos principais componentes do sistema de corrente alternada em sistemas fotovoltaicos. Os inversores são responsáveis por converter a energia gerada pelos painéis solares em corrente alternada compatível com a rede elétrica. Eles desempenham um papel crucial na otimização da eficiência dos sistemas fotovoltaicos, garantindo a qualidade da energia produzida. Diferentes tipos de inversores, como inversores de Sting e micro inversores, são utilizados para atender às necessidades de diferentes aplicações e tamanhos de sistemas. De acordo com Hui *et al.*, (2019), os cabos AC desempenham um papel fundamental na transmissão da energia convertida em corrente alternada do inversor até o ponto de consumo ou conexão com a rede elétrica. A seleção adequada dos cabos AC é importante para garantir a eficiência do sistema e minimizar as perdas de energia. É essencial levar em consideração fatores como a capacidade de corrente, a queda de tensão, a resistência mecânica e a resistência térmica dos cabos. Os quadros de controle, proteção e dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são essenciais para o funcionamento seguro e protegido do sistema de corrente alternada. Segundo Siefer e Stiebig (2013), os quadros de controle abrigam dispositivos de monitoramento e controle do sistema, como medidores de energia e sistemas de controle automático. Já os DPS

são responsáveis por proteger o sistema contra picos de tensão indesejados causados por descargas atmosféricas e outros eventos. A seleção adequada e o dimensionamento correto dos componentes do sistema de corrente alternada são cruciais para garantir a eficiência, confiabilidade e segurança dos sistemas fotovoltaicos.

2.2.1.2.1 Inversores

De acordo a Figura 6, os inversores são componentes essenciais nos sistemas fotovoltaicos de corrente alternada (AC). Eles desempenham um papel crucial na conversão da corrente contínua (DC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada utilizável, adequada para o consumo elétrico ou para a conexão à rede elétrica. Existem diferentes tipos de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos, cada um com suas características e aplicações específicas. Os inversores de String são comumente usados em sistemas fotovoltaicos de médio a grande porte. Nesse tipo de inversor, vários módulos fotovoltaicos são conectados em série formando uma "String" e, em seguida, ligados ao inversor. Essa configuração permite uma maior eficiência na conversão da energia solar em corrente alternada. Os inversores de String são mais adequados para sistemas nos quais os módulos fotovoltaicos estão expostos a condições semelhantes de irradiação solar (ABBAS *et al.*, 2020). Os micros inversores são inversores de pequeno porte que são instalados em cada módulo fotovoltaico individualmente. Eles convertem a corrente contínua gerada por cada módulo em corrente alternada. Essa abordagem permite o monitoramento e controle individualizado de cada módulo, maximizando a eficiência do sistema. Os micros inversores também oferecem a vantagem de lidar melhor com sombreamento parcial, pois a energia de cada módulo é otimizada independentemente dos outros módulos do sistema (WONG *et al.*, 2019). Os inversores centrais são usados em grandes usinas solares, onde várias String de módulos fotovoltaicos são conectadas a um único inversor central. Esses inversores possuem alta capacidade de potência e eficiência, permitindo a conexão de grandes quantidades de módulos fotovoltaicos. Os inversores centrais são mais adequados para sistemas de grande porte, como usinas solares comerciais ou em escala de serviços públicos (KHATIB *et al.*, 2020). Além da função principal de conversão da corrente contínua em corrente alternada, os inversores também podem realizar outras funções importantes.



Figura 6 – Inversores fotovoltaicos.

2.2.1.2.2 Sistema de Cabos AC

O sistema de cabos de corrente alternada (AC) desempenha um papel essencial nos sistemas fotovoltaicos, sendo responsável por transportar a energia elétrica convertida em corrente alternada do inversor até o ponto de consumo ou conexão com a rede elétrica. Os cabos AC devem ser capazes de suportar as condições ambientais e as tensões mecânicas a que estão expostos. Eles devem ter resistência suficiente para resistir à tração, flexão e esforços de instalação sem sofrer danos ou rompimentos. A escolha adequada dos cabos AC é crucial para garantir a eficiência do sistema fotovoltaico e a segurança da instalação. É importante seguir as normas e regulamentações aplicáveis, como as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), para a seleção, instalação e dimensionamento adequados dos cabos AC.

2.2.1.2.3 Quadros de Controle, Proteção e DPS

Os quadros de controle, proteção e dispositivos de proteção contra surtos (DPS) desempenham um papel crucial no sistema de corrente alternada (AC) dos sistemas fotovoltaicos. Eles são responsáveis por fornecer controle, monitoramento e proteção adequados para garantir o funcionamento seguro e eficiente do sistema. Os quadros de

controle são responsáveis por fornecer uma interface entre os diferentes componentes do sistema fotovoltaico. De acordo com Márquez-Domínguez *et al.*, (2020), os quadros de proteção devem ser projetados considerando as normas e regulamentações aplicáveis, como as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), para garantir a proteção adequada do sistema fotovoltaico e dos usuários contra riscos elétricos. Os dispositivos de proteção contra surtos (DPS), também conhecidos como para-raios, são utilizados para proteger o sistema fotovoltaico contra picos de tensão transitórios causados por descargas atmosféricas, manobras na rede elétrica ou outros eventos. Os DPS são instalados no ponto de entrada do sistema fotovoltaico e desviam os picos de tensão indesejados para o aterramento, protegendo assim os equipamentos e componentes contra danos (MARCONETI, 2010).

2.2.2 Sistema de Controle e Integração com a Rede (Subestação de Alta Tensão)

O sistema de controle e integração com a rede, também conhecido como subestação de alta tensão, é uma parte essencial dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Ele desempenha um papel fundamental na gestão, monitoramento e proteção do fluxo de energia entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica de distribuição. No contexto brasileiro, diversos estudos têm abordado o sistema de controle e integração com a rede em sistemas fotovoltaicos, visando otimizar o desempenho, a eficiência e a segurança do sistema. Um estudo conduzido por Santos (2019) analisou a importância da automação e do controle avançado na subestação de alta tensão para o gerenciamento eficiente do sistema fotovoltaico. Os resultados destacaram a necessidade de sistemas de controle avançados que permitam o monitoramento em tempo real, a detecção de falhas e a adaptação às variações das condições operacionais. Outro estudo realizado por Santos (2019) abordou a integração de sistemas fotovoltaicos com subestações de alta tensão por meio de inversores inteligentes. Essa abordagem permite o controle e o gerenciamento da energia gerada pelos painéis solares, otimizando a injeção na rede elétrica e reduzindo os impactos na estabilidade e qualidade da energia. Além disso, pesquisas conduzidas por Santos (2019) exploraram a aplicação de técnicas de proteção e coordenação de relés na subestação de alta tensão de sistemas fotovoltaicos. Esses estudos destacaram a importância da coordenação adequada dos relés de proteção para garantir a detecção e a rápida interrupção de falhas, protegendo o sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Esses estudos evidenciam a importância do sistema de controle e integração com a rede, ou subestação de alta tensão, em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no contexto brasileiro.

2.2.2.1 Sistema de Transformação

O sistema de transformação é um componente essencial do sistema de controle e integração com a rede em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Ele desempenha um papel fundamental na conversão da energia gerada pelos painéis solares em níveis de tensão adequados para a conexão com a rede elétrica. No Brasil, diversos estudos têm abordado o sistema de transformação em sistemas fotovoltaicos para melhorar sua eficiência e desempenho. Pesquisas realizadas por Farias (2021) destacam a importância da seleção adequada de transformadores em sistemas fotovoltaicos para garantir a compatibilidade e a estabilidade do sistema. Esses estudos enfatizam a necessidade de considerar fatores como a capacidade de potência dos transformadores, a relação de transformação e as perdas de energia durante a conversão. Outro estudo realizado por Gonçalves (2019) avaliou a eficiência e o desempenho de diferentes configurações de transformadores utilizados em sistemas fotovoltaicos. Os resultados mostraram que a escolha da configuração correta pode influenciar significativamente a eficiência geral do sistema, destacando a importância de uma análise cuidadosa durante o projeto.

2.2.2.2 Sistema de Medição

O sistema de medição desempenha um papel crucial no monitoramento e controle dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Ele permite a obtenção de informações precisas sobre a geração de energia solar, o consumo e a troca de energia com a rede elétrica, sendo fundamental para a gestão eficiente e o funcionamento adequado do sistema. No Brasil, diversos estudos têm se concentrado no aprimoramento do sistema de medição em sistemas fotovoltaicos, buscando melhorar a precisão e a confiabilidade das medições. Um estudo realizado por Neves (2017) analisou a influência de diferentes tecnologias de medidores bidirecionais na precisão das medições em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil. Os resultados mostraram que a escolha adequada do tipo de medidor pode afetar significativamente a precisão das medições, destacando a importância de considerar as características específicas do sistema fotovoltaico e das condições de operação. Outro estudo realizado por Santos *et al.*, (2018) abordou a calibração dos medidores bidirecionais utilizados em sistemas fotovoltaicos.

2.2.2.3 Sistema de Comunicação

O sistema de comunicação desempenha um papel fundamental na troca de informações entre os diferentes componentes do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Ele possibilita a transmissão de dados em tempo real, o monitoramento remoto, o controle e a integração do sistema fotovoltaico com a rede elétrica. No contexto brasileiro, vários estudos têm explorado o sistema de comunicação em sistemas fotovoltaicos, visando melhorar a eficiência e a confiabilidade da comunicação de dados. Uma pesquisa conduzida por Pereira. (2019) investigou o uso de redes de comunicação sem fio para o monitoramento e controle remoto de sistemas fotovoltaicos. Os resultados destacaram a importância da escolha adequada do protocolo de comunicação para garantir a interoperabilidade e a eficiência da comunicação no sistema fotovoltaico. Além disso, uma pesquisa conduzida por Barbosa (2020) explorou o uso de sistemas de comunicação baseados em Internet das Coisas (IoT) para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos em tempo real. O estudo demonstrou que a aplicação de tecnologias IoT pode fornecer uma infraestrutura confiável e escalável para a transmissão de dados em tempo real, permitindo o monitoramento e o controle eficiente dos sistemas fotovoltaicos.

2.2.2.4 Sistema de Proteção de Alta Tensão

O sistema de proteção de alta tensão desempenha um papel fundamental na garantia da segurança e confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Ele é responsável por detectar e interromper rapidamente qualquer falha ou condição anormal que possa ocorrer no sistema, protegendo os equipamentos, o sistema elétrico e os operadores. No contexto brasileiro, diversos estudos têm abordado o sistema de proteção de alta tensão em sistemas fotovoltaicos, visando garantir a segurança e o bom funcionamento do sistema. Um estudo conduzido por Montanari (2020) investigou as técnicas de proteção de alta tensão aplicadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil. Os resultados destacaram a importância da coordenação adequada dos dispositivos de proteção, como disjuntores, fusíveis e relés, para garantir a seletividade e a rapidez na detecção e interrupção de falhas. Outro estudo realizado por Farias (2018) abordou a análise de curto-circuito e o dimensionamento de dispositivos de proteção de alta tensão em sistemas fotovoltaicos. O estudo propôs uma metodologia para determinar a corrente de curto-circuito máxima e dimensionar os dispositivos de proteção de acordo com as normas e regulamentações vigentes.

2.3 Aplicação da Engenharia de Suporte em Usinas Fotovoltaicas

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.

A engenharia de suportabilidade assume um papel essencial na otimização e manutenção de usinas fotovoltaicas. Estas plantas, por sua natureza, precisam de soluções robustas e confiáveis para garantir seu desempenho ideal ao longo do tempo. Nesse contexto, a pesquisa de Deline, Jordan e Kurtz (2017) oferece insights valiosos sobre a importância do design de sistemas fotovoltaicos para alta performance e confiabilidade. Seus estudos destacam a necessidade de um equilíbrio cuidadoso entre o desempenho operacional e a eficiência energética, bem como a importância de uma abordagem orientada para a sustentabilidade. Ao discutir essas questões, os autores lançam luz sobre os desafios e oportunidades associados ao design de usinas fotovoltaicas. Essas ideias estão fortemente alinhadas com os princípios da engenharia de suportabilidade, que visa garantir a máxima eficiência e eficácia dos sistemas ao longo de seu ciclo de vida, minimizando custos e

maximizando a performance. Assim, a aplicação da engenharia de suportabilidade em usinas fotovoltaicas reflete um compromisso com a inovação, a eficiência e a sustentabilidade, conceitos que estão no coração das práticas de design de sistemas fotovoltaicos de alto desempenho e confiabilidade, conforme explorado por Deline, Jordan e Kurtz (2017). As usinas fotovoltaicas são sistemas complexos que exigem um equilíbrio cuidadoso entre desempenho, custo e confiabilidade. Conforme destacado por Kurtz (2012), a confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos é um componente-chave para garantir que eles possam fornecer energia de forma consistente e eficaz ao longo de sua vida útil.

2.3.1 A Teoria da Análise de Falhas Aplicando a Curva da Banheira (Distribuição de Weibull) em Sistemas Fotovoltaicos

A análise das fases da Curva da Banheira em usinas fotovoltaicas é uma abordagem essencial para compreender a taxa de falhas ao longo do tempo e identificar as principais etapas em que ocorrem. Essa análise permite uma gestão eficiente da confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos e auxilia no aprimoramento do desempenho das usinas. Ao compreender as fases da Curva da Banheira em usinas fotovoltaicas, os gestores e operadores podem implementar estratégias de manutenção adequadas para cada fase. Isso inclui ações como inspeções regulares, manutenção preventiva, substituição de componentes desgastados e implementação de sistemas de monitoramento avançados. Essas práticas permitem maximizar o desempenho, prolongar a vida útil e garantir a geração confiável de energia renovável. A análise das fases da Curva da Banheira é uma ferramenta valiosa para a gestão da confiabilidade e o aprimoramento contínuo do desempenho das usinas fotovoltaicas. Ao identificar as etapas em que ocorrem as falhas, é possível tomar medidas proativas para minimizar os impactos e garantir a operação eficiente e sustentável desses sistemas, Figura 7.

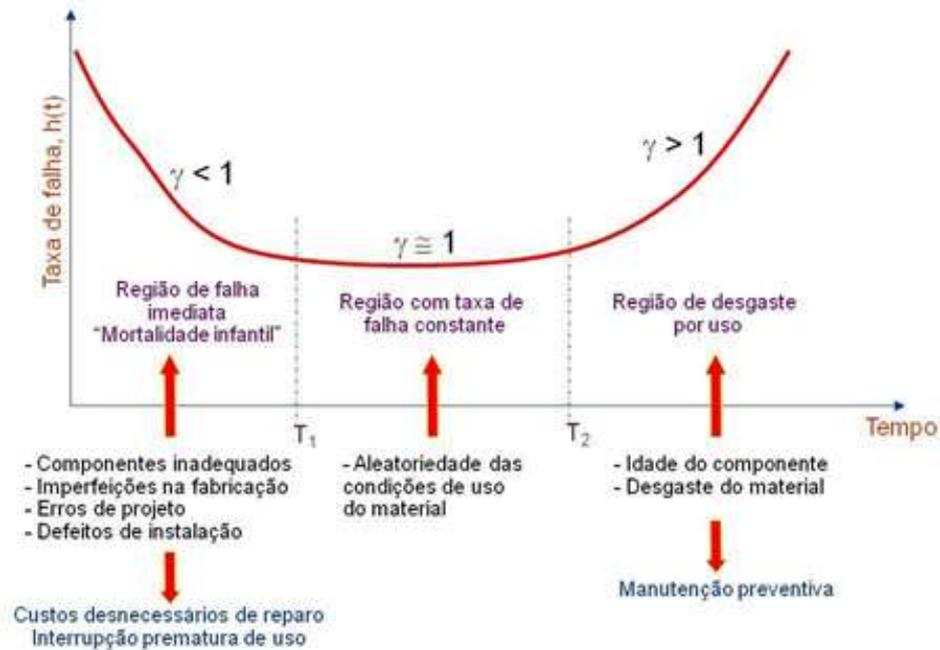


Figura 7 – Comportamento de um equipamento em função do parâmetro de forma da distribuição de Weibull (Adaptado de SELLITTO, 2005).

2.3.1.1 Mortalidade Infantil em Usinas Fotovoltaicas

A fase de "mortalidade infantil" é uma etapa crítica no ciclo de vida de uma usina fotovoltaica. Durante esse período inicial, é comum ocorrerem falhas devido a uma série de fatores, incluindo problemas de fabricação, instalação, comissionamento e teste inicial do sistema. Essas falhas podem ser atribuídas a erros de projeto, má qualidade dos equipamentos utilizados, falhas de conexão elétrica, entre outros. Estudos realizados por Palizban (2019), confirmam a existência dessa fase de mortalidade infantil e destacam a alta taxa de falhas observada durante esse período. Durante a operação inicial da usina fotovoltaica, é provável que ocorram problemas de funcionamento, devido a questões como defeitos nos componentes, erros de montagem, inadequação das conexões elétricas, entre outros. No entanto, à medida que a usina fotovoltaica amadurece e os problemas são identificados e corrigidos, a taxa de falhas tende a diminuir ao longo do tempo. Medidas corretivas e preventivas são implementadas para resolver os problemas de fabricação, melhorar a qualidade dos equipamentos e aprimorar as conexões elétricas. Essas ações visam estabilizar o desempenho do sistema e reduzir a ocorrência de falhas. Através da análise dessas falhas e da implementação de medidas de controle de qualidade, é possível melhorar a confiabilidade e a eficiência operacional das usinas, garantindo um desempenho sustentável ao longo do tempo.



Figura 8 – Falha de mortalidade infantil e conector fotovoltaico (IDS ENERGIA).

2.3.1.2 Fase de Vida Útil das Usinas Fotovoltaicas

Na fase de vida útil da Curva da Banheira em usinas fotovoltaicas, ocorre uma redução significativa na taxa de falhas em comparação à etapa de mortalidade infantil. Nesse estágio, as falhas iniciais já foram corrigidas e a usina fotovoltaica alcança um nível de estabilidade operacional. Durante essa fase, as falhas tendem a ser aleatórias e menos frequentes. No entanto, é importante ressaltar a importância de monitorar regularmente o desempenho do sistema para identificar e solucionar eventuais problemas que possam surgir. O monitoramento contínuo permite detectar falhas ocasionais e implementar ações corretivas de forma proativa. Estudos conduzidos por Silvestre *et al.*, (2007) enfatizam a necessidade de monitoramento e manutenção adequados durante a fase de vida útil das usinas fotovoltaicas. Essas atividades permitem identificar qualquer desgaste, envelhecimento ou mau funcionamento de componentes ao longo do tempo, garantindo a eficiência e confiabilidade contínuas da usina. A fase de vida útil da Curva da Banheira representa um estágio de estabilidade operacional nas usinas fotovoltaicas, com uma taxa reduzida de falhas. No entanto, a manutenção regular e o monitoramento constante são fundamentais para garantir o desempenho confiável e sustentável do sistema ao longo do tempo.

2.3.1.3 Fase de período de desgaste das usinas fotovoltaicas

Na última fase da Curva da Banheira, conhecida como período de desgaste, as usinas fotovoltaicas enfrentam um aumento significativo na taxa de falhas devido ao desgaste dos

componentes e às condições ambientais adversas. Durante essa fase, é comum observar falhas relacionadas à degradação das interconexões da junta de solda. Essas falhas ocorrem devido ao envelhecimento dos materiais utilizados na junção das células solares e podem resultar em perda de potência devido ao aumento da resistência em série. A resistência em série aumentada pode levar a uma redução na eficiência do sistema e, conseqüentemente, na geração de energia (MARMAI, 2015). É importante destacar que as condições ambientais adversas, como exposição a altas temperaturas, radiação UV intensa e umidade, podem acelerar o desgaste dos componentes e contribuir para o aumento das falhas nessa fase. Para mitigar as falhas durante o período de desgaste, é fundamental realizar inspeções regulares, manutenção preventiva e substituição de componentes desgastados. Além disso, a implementação de sistemas de monitoramento avançados pode auxiliar na detecção precoce de problemas e permitir intervenções oportunas. A compreensão da Curva da Banheira e a identificação das fases distintas ajudam os operadores de usinas fotovoltaicas a desenvolver estratégias adequadas de manutenção e gestão do ciclo de vida dos sistemas. Dessa forma, é possível maximizar o desempenho e a vida útil das usinas fotovoltaicas, assegurando a geração contínua e confiável.

2.4 Os Elementos do IPS (*Integrated Product Support*)

O IPS (*Integrated Product Support*) é um conjunto de elementos que compõem a Engenharia de Suportabilidade, uma disciplina que abrange todos os aspectos de suporte logístico necessários para garantir a eficiência operacional de um sistema durante todo o seu ciclo de vida. Os elementos do IPS são essenciais para o desenvolvimento, produção, operação e manutenção de um sistema. Autores como Blanchard (2004), e Goebel (2008) discutem os principais elementos do IPS. Eles destacam a importância da análise de tarefas, projeto para suporte, suporte logístico integrado, suporte ao cliente, treinamento e dados técnicos como componentes-chave para garantir a disponibilidade, confiabilidade e sustentabilidade de um sistema. Além disso, estudos como os de Kuitche *et al.*, (2015) e Jordan (2016) enfatizam a importância da manutenção adequada na maximização da produtividade e eficiência dos sistemas. Esses estudos ressaltam a necessidade de estratégias efetivas de manutenção preventiva e corretiva, guiadas pelos princípios da engenharia de suportabilidade, para minimizar perdas de produção de energia e otimizar a operação de sistemas fotovoltaicos. Outro elemento fundamental do IPS é a gestão de configuração, que abrange a identificação, controle e documentação das características e status de um sistema ao

longo do tempo. Autores como Blanchard (2004), discutem a importância da gestão de configuração na garantia da integridade e rastreabilidade de um sistema, facilitando alterações, atualizações e manutenção efetiva, Figura 9.

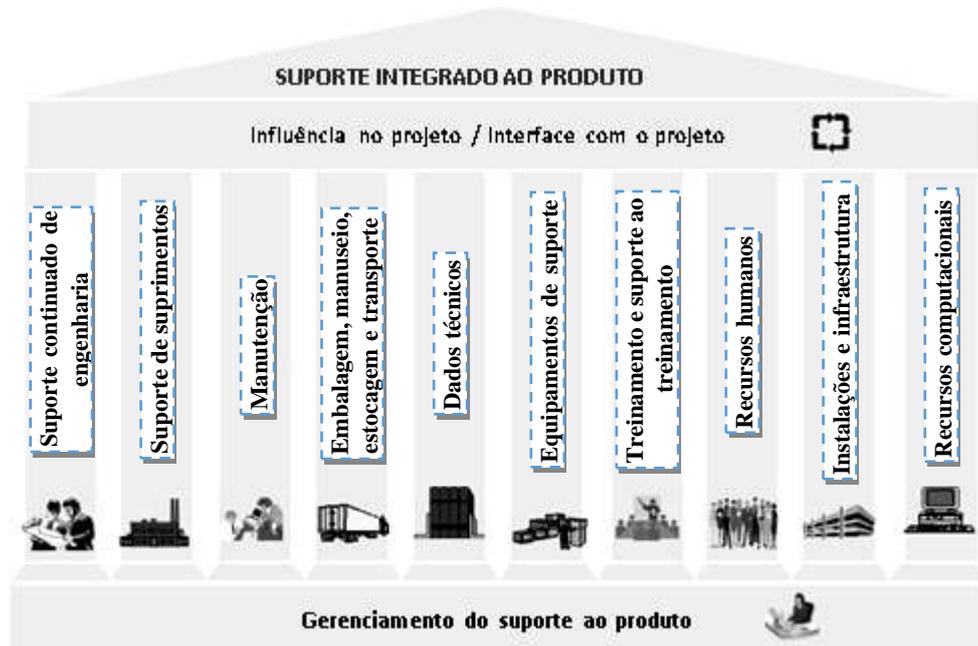


Figura 9 – Elementos do IPS (Adaptado de DAU, 2011).

2.4.1 Suporte Continuado de Engenharia

Segundo a *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) e a *Aerospace Industries Association* (AIA) em 2021, este elemento foca em fornecer suporte ao sistema dentro de seu ambiente operacional através de uma variedade de atividades técnicas. Essas atividades garantem que o sistema continue funcionando adequadamente desde sua implementação até seu eventual descarte. Um aspecto crítico da Engenharia de Suporte Continuado é a identificação e solução de deficiências que possam surgir durante o ciclo de vida do sistema. Essas deficiências, uma vez identificadas, requerem a implementação de ações corretivas. Neste contexto, a Engenharia de Suporte Continuado desempenha um papel crucial ao propor várias opções para a ação corretiva e, através de análises cuidadosas, selecionar a opção que minimize os custos e riscos associados. Neste processo, são frequentemente utilizadas análises econômicas do ciclo de vida e análises de custo-benefício para tomar decisões informadas (DAU, 2021). Além disso, a Engenharia de Suporte Continuado não se preocupa apenas com a manutenção da capacidade e desempenho operacional do sistema, mas também com aspectos de segurança e aero navegabilidade, quando aplicável. O conceito de RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, and Safety*)

é particularmente relevante, pois abrange a confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança do sistema. A inclusão da segurança, o "S" em RAMS, indica a crescente ênfase na monitoração de métricas e parâmetros associados à integridade e saúde dos sistemas (DAU, 2021).

2.4.2 Suporte de Suprimentos

Este elemento é essencial para o funcionamento eficaz de qualquer sistema complexo, pois envolve o gerenciamento de insumos e suprimentos necessários para as operações do sistema. De acordo com a *Defense Acquisition University* (DAU) em 2021, o objetivo do Suporte de Suprimento é identificar, planejar, providenciar os recursos necessários e gerenciar todas as ações envolvidas na aquisição de todas as classes de suprimentos, que incluem itens de consumo e componentes reparáveis. Isso deve ser feito de maneira a garantir que os requisitos operacionais do sistema sejam atendidos de forma custo-efetiva. O *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) e a *Aerospace Industries Association* (AIA) em 2021 adicionam que o Suporte de Suprimento engloba uma série de ações de gerenciamento, procedimentos e técnicas que são essenciais para o ciclo de vida dos suprimentos. Isso inclui a determinação de requisitos, catalogação, aquisição, recebimento, estocagem, transferência e, finalmente, descarte de insumos, materiais de consumo e itens reparáveis. É importante destacar que o Suporte de Suprimento é uma função crítica que assegura que os sistemas não só permaneçam operacionais, mas também o façam de maneira eficiente e rentável. Isso envolve um equilíbrio cuidadoso entre ter suprimentos suficientes disponíveis para atender às necessidades operacionais e evitar excesso de estoque que possa levar a custos desnecessários.

2.4.3 Manutenção

De acordo com Oliveira (2022), a manutenção é considerada o elemento mais proeminente do IPS, visto que os demais elementos podem ser entendidos como subcomponentes dela. Além disso, a manutenção tem um impacto significativo no planejamento, desenvolvimento e aquisição de sistemas complexos, conforme destacado pela *Aerospace Industries Association* (AIA) e *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) em 2021. O principal objetivo da manutenção, como descrito pela *Defense Acquisition University* (DAU) em 2021, é identificar, planejar, alocar recursos e implementar o conceito de manutenção e seus requisitos ao longo de todo o ciclo de vida de um sistema.

Isso é feito com o objetivo de assegurar a máxima disponibilidade do sistema a um custo mínimo. As atividades envolvidas no elemento de manutenção são diversas e podem ser complexas. Além disso, o texto menciona que as atividades dentro de um elemento do IPS têm natureza iterativa e dinâmica. Isso significa que as atividades estão inter-relacionadas e podem influenciar umas às outras ao longo do tempo. Por exemplo, os resultados de uma atividade podem afetar ou serem necessários para outra atividade e vice-versa. Essa característica iterativa e dinâmica é crucial para a eficácia da manutenção, pois permite a adaptação e resposta às mudanças nas necessidades e condições operacionais ao longo do ciclo de vida de um sistema.

2.4.4 Operações Logísticas

AS operações logísticas desempenham um papel crítico nas operações logísticas e é fundamental para garantir a eficácia e eficiência de qualquer sistema ou operação. PHS&T engloba várias atividades e considerações que estão intimamente interligadas (DAU, 2021). Em primeiro lugar, a embalagem é essencial para proteger os materiais contra danos durante o manuseio e transporte. Isto é especialmente crítico para itens frágeis ou sensíveis às condições ambientais. A embalagem deve ser projetada não apenas para proteger o conteúdo, mas também para facilitar o manuseio eficiente e minimizar o espaço de estocagem necessário (BLANCHARD; FABRYCKY, 2011). O manuseio adequado é vital para garantir que os materiais não sejam danificados durante o processo de movimentação. Isso inclui o carregamento e descarregamento de veículos de transporte, bem como a movimentação de materiais dentro das instalações de armazenamento. O treinamento e equipamento adequado são cruciais para garantir que o manuseio seja realizado de maneira segura e eficaz. A estocagem adequada é outra consideração crítica. Isso inclui garantir que os materiais sejam armazenados em condições que não comprometam sua integridade ou funcionalidade. Por exemplo, alguns materiais podem requerer armazenamento em temperaturas controladas ou proteção contra a umidade. Além disso, uma estocagem eficiente também envolve a organização dos materiais de forma a facilitar o acesso e minimizar o tempo necessário para recuperá-los quando necessário (DAU, 2021). O transporte é o componente que lida com a movimentação de materiais de um lugar para outro. Isso envolve selecionar os modos de transporte mais eficazes e eficientes, bem como planejar rotas que minimizem o tempo de trânsito e os custos. Para algumas operações, especialmente no setor de defesa, isso também pode envolver navegar por desafios logísticos complexos, como transportar materiais para áreas remotas ou lidar com regulamentações aduaneiras. No setor de defesa, o PHS&T

assume uma importância adicional, pois as operações militares frequentemente exigem que os sistemas sejam operáveis em ambientes extremos e sob condições rigorosas. Isso pode incluir a necessidade de estocar munição e outros materiais em áreas de combate, ou transportar equipamentos pesados através de terrenos difíceis. Além disso, as operações militares muitas vezes têm requisitos de tempo críticos, o que significa que a eficiência do PHS&T pode ser diretamente ligada ao sucesso ou falha de uma missão (DAU, 2021).

2.4.5 Dados Técnicos

Conforme definido pela *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) e *Aerospace Industries Association* (AIA) em 2021, Dados Técnicos se referem ao registro documental de informações de natureza técnica ou científica. É importante notar que os Dados Técnicos podem ser registrados e armazenados por meio de vários métodos, protocolos ou formatos, o que os torna altamente versáteis e aplicáveis em uma variedade de contextos. A *Defense Acquisition University* (DAU) em 2021 fornece exemplos de que tipos de documentos podem ser classificados como Dados Técnicos. Isso inclui, mas não se limita a, especificações do sistema, desenhos de engenharia, relatórios de análises, registros de decisões, e manuais de operação, manutenção e treinamento.

Especificamente, as especificações do sistema descrevem em detalhes as requisitos e características de um determinado sistema. Os desenhos de engenharia são essenciais para a produção e montagem, pois fornecem representações visuais e dimensões precisas dos componentes. Os relatórios de análises e registros de decisões são cruciais para documentar o processo de tomada de decisão e garantir que as informações relevantes estejam disponíveis para revisão e auditoria. Finalmente, os manuais de operação, manutenção e treinamento são indispensáveis para garantir que os usuários e técnicos tenham o conhecimento e as habilidades necessárias para operar e manter o sistema de forma eficaz.

2.4.6 Equipamentos de Suporte

O elemento equipamentos de suporte, que faz parte do Integrated Product Support (IPS). Conforme descrito pela *Defense Acquisition University* (DAU) em 2021, os Equipamentos de Suporte referem-se a todos os equipamentos, sejam eles fixos ou móveis, que são necessários para apoiar e operar um sistema, mas que não fazem parte integrante do próprio sistema. Entre os exemplos de Equipamentos de Suporte estão equipamentos de manutenção, testes, movimentação de cargas, manipulação de materiais, tratamento e

condicionamento de ar, metrologia, calibração, rebocadores, geradores, e várias fontes de potência. A *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe (ASD)* e a *Aerospace Industries Association (AIA)* esclarecem em 2021 que o objetivo desse elemento do IPS é identificar, planejar, prover e implementar ações de gerenciamento necessárias para adquirir e manter todos os equipamentos que são essenciais para apoiar o funcionamento do sistema. É crucial que essas ações de gerenciamento sejam executadas de forma a controlar a proliferação de equipamentos de suporte e evitar o desenvolvimento de novos equipamentos dedicados a um propósito específico. Em vez disso, deve-se priorizar a adoção de medidas para o uso de equipamentos existentes e de emprego comum, o que pode resultar em economias de custos e eficiências operacionais.

2.4.7 Treinamento e Suporte ao Treinamento

Este elemento é de suma importância, pois visa planejar, prover e implementar uma estratégia coesa e integrada para o desenvolvimento de treinamento de pessoal responsável pela operação e suporte do sistema ao longo de seu ciclo de vida. A *Defense Acquisition University (DAU)* destaca em 2021 que esta estratégia busca maximizar a efetividade da doutrina. Um componente crucial dessa estratégia é identificar, desenvolver e adquirir os recursos necessários para as atividades de treinamento. Isso inclui uma variedade de ferramentas e equipamentos, como simuladores, manuais eletrônicos interativos, ferramentas de aprendizado e dispositivos de treinamento, que podem ser tanto embarcados quanto não embarcados. Estes elementos desempenham um papel crucial no fortalecimento das habilidades e competências do pessoal envolvido. Além disso, é importante notar que os produtos de treinamento, especialmente aqueles que são baseados em tecnologia, como simuladores e manuais eletrônicos, podem exigir seu próprio gerenciamento de configuração. Isso significa que é necessário um processo contínuo de monitoramento e atualização para garantir que esses recursos de treinamento permaneçam atuais e eficazes. Além disso, a suportabilidade desses produtos de treinamento deve ser levada em consideração, o que implica garantir que eles possam ser efetivamente mantidos e suportados ao longo de seu ciclo de vida útil. Ao implementar uma estratégia de treinamento bem planejada e integrada, organizações podem assegurar que seu pessoal tenha as habilidades e conhecimentos necessários para desempenhar suas funções de forma eficaz, contribuindo para a operação bem-sucedida e sustentável dos sistemas envolvidos (BLANCHARD; FABRYCKY, 2011).

2.4.8 Mão de Obra e Recursos Humanos

O objetivo desse elemento do IPS é criar um equilíbrio entre a quantidade e a qualidade, garantindo que não apenas existam pessoas suficientes para executar a tarefa, mas também que elas estejam adequadamente equipadas em termos de habilidades e conhecimentos. Essa alocação estratégica de recursos humanos é especialmente crítica em ambientes complexos, como o setor de defesa e aeroespacial, onde os sistemas são altamente sofisticados e requerem suporte especializado. A *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe (ASD)* e a *Aerospace Industries Association (AIA)* reconhecem, em 2021, a importância de tal alocação estratégica de recursos humanos para o suporte eficaz de sistemas complexos durante todo o seu ciclo de vida. É vital para organizações que desejam manter a eficácia operacional, minimizar o tempo de inatividade e garantir que seus sistemas sejam confiáveis e seguros. É fundamental que as organizações reconheçam e implementem estratégias eficazes de alocação de recursos humanos, entendendo a importância tanto da mão de obra quanto dos recursos humanos no cumprimento de seus objetivos operacionais e de suporte. Isso envolve garantir que haja um número suficiente de pessoal disponível (mão de obra) e que esse pessoal possua as qualificações, habilidades e experiência necessárias (recursos humanos) para realizar tarefas de suporte com eficácia e eficiência (BLANCHARD; FABRYCKY, 2011).

2.4.9 Instalações e Infraestrutura

O elemento de Instalações e Infraestrutura, refere-se ao planejamento e fornecimento das instalações físicas e da infraestrutura necessária para apoiar o produto durante todo o seu ciclo de vida. Isso pode abranger uma variedade de recursos, desde a construção e manutenção de instalações de produção e armazenamento, até a gestão de recursos de infraestrutura, como energia, água e tecnologia da informação (BLANCHARD; FABRYCKY, 2011). O planejamento eficaz deste elemento é crucial, pois a infraestrutura e as instalações podem ter um impacto significativo no desempenho operacional do produto. Por exemplo, instalações inadequadas ou infraestrutura insuficiente podem levar a atrasos na produção, problemas de qualidade do produto, ou dificuldades na realização de manutenção e suporte. As atividades relacionadas a este elemento podem incluir a identificação das necessidades de infraestrutura, a seleção e design de instalações, a coordenação da construção ou adaptação das instalações, e a gestão da manutenção e operação das instalações e infraestrutura. No contexto do IPS, as Instalações e Infraestrutura de Suporte são vitais para

garantir que o produto possa ser produzido, mantido e suportado de maneira eficaz e eficiente. Isso não só ajuda a garantir a qualidade e a confiabilidade do produto, mas também pode contribuir para a otimização dos custos operacionais e de manutenção.

2.4.10 Recursos Computacionais

Recursos computacionais representam um elemento vital do *Integrated Product Support* (IPS), dedicado ao planejamento, implementação e manutenção dos sistemas de informação e tecnologias computacionais necessárias para apoiar o produto ao longo de seu ciclo de vida (TURBAN; VOLONINO; WOOD, 2015). A Informática, em essência, aborda a aplicação de computadores e softwares para gerir informações. No contexto do IPS, ela desempenha um papel crucial para assegurar que as informações relevantes sejam coletadas, armazenadas, processadas e distribuídas de maneira eficiente para suportar as operações do produto. Isso pode incluir sistemas de gerenciamento de banco de dados, sistemas de gerenciamento de documentos, sistemas de gerenciamento de desempenho, entre outros softwares de suporte técnico. O Suporte Computacional, por outro lado, refere-se às várias atividades e serviços que auxiliam no uso efetivo dessas tecnologias computacionais. Isso pode incluir suporte técnico para resolver problemas de TI, treinamento de usuários sobre como usar efetivamente os sistemas, atualizações de software, bem como manutenção e reparo de hardware. A combinação eficaz de informática com suporte computacional adequado possibilita uma gestão de dados mais eficiente, facilita a tomada de decisão baseada em dados, melhora a comunicação entre diferentes partes interessadas e contribui para a otimização do desempenho do produto.

2.4.11 Influencia no Projeto

Desempenha um papel crítico no desenvolvimento e suporte de sistemas complexos. Segundo o *Defense Acquisition University* (DAU, 2021), esse elemento tem como objetivo otimizar a suportabilidade do sistema, integrando características quantitativas de projeto como confiabilidade e manutenibilidade. Ao fazer isso, busca-se maximizar a disponibilidade e as capacidades do sistema ao longo de seu ciclo de vida, ao mesmo tempo em que se minimiza o Custo de Ciclo de Vida (*LCC - Life Cycle Cost*).

A *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) e a *Aerospace Industries Association* (AIA) destacam em 2021 que a influência no projeto serve como um guia para a relação entre os parâmetros de projeto e os requisitos do sistema de suporte.

Essencialmente, trata-se de estabelecer e gerenciar os requisitos de suporte de forma a garantir que o sistema cumpra suas metas de disponibilidade e custo.

Uma atividade chave dentro deste elemento é a Análise de Suporte Logístico (*LSA - Logistic Support Analysis*). A LSA é uma metodologia sistemática usada para identificar, quantificar e analisar os recursos de suporte necessários para o ciclo de vida de um sistema. Isso inclui avaliar a confiabilidade, manutenibilidade, e outras características do projeto que afetam a suportabilidade e o desempenho operacional. Outro aspecto importante a ser destacado é que a influência no projeto é especialmente relevante nas fases iniciais de desenvolvimento de um sistema. Isso porque as decisões tomadas nas fases iniciais podem ter um impacto significativo nos custos e na eficácia do suporte ao longo do ciclo de vida do sistema. No entanto, no caso de aquisições de sistemas comerciais prontos, conhecidos como *COTS (Commercial Off-The-Shelf)*, a aplicação deste elemento pode ser mais limitada e geralmente é direcionada para soluções de implementação e integração do sistema (ASD/AIA, 2021b).

2.4.12 Gerenciamento do Suporte ao Produto

O elemento de gerenciamento do suporte ao produto integra o escopo do *Integrated Product Support (IPS)* e desempenha um papel fulcral na garantia da eficácia e eficiência de um sistema ao longo de seu ciclo de vida. Segundo a *Defense Acquisition University (DAU, 2021)*, o objetivo primordial desse elemento é administrar, de forma proativa, os custos associados e o desempenho do suporte ao sistema, abarcando desde as fases iniciais de desenvolvimento até a sua retirada de serviço. Este elemento requer uma abordagem estratégica, envolvendo o desenvolvimento e implementação de estratégias de suporte que considerem a suportabilidade do sistema durante todo o seu ciclo de vida. Esta abordagem é imperativa para assegurar que os recursos adequados estejam alocados de forma eficiente e que o sistema mantenha um nível ótimo de desempenho ao longo do seu período operacional.

Um dos focos centrais desta dimensão do IPS é a otimização de métricas de desempenho, como disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade, simultaneamente trabalhando-se para mitigar os custos associados ao suporte do sistema. Esta dualidade de objetivos requer uma compreensão intrínseca das operacionalidades do sistema, bem como a capacidade de antecipar e mitigar potenciais adversidades que possam surgir durante o seu funcionamento. Para atingir tais objetivos, é comum a adoção de uma variedade de ferramentas e técnicas, incluindo, mas não se limitando a, análise de dados, modelagem e

simulação, e técnicas sofisticadas de gerenciamento de projetos. Adicionalmente, a implementação de avaliações e revisões periódicas do desempenho do sistema e da eficácia das estratégias de suporte em prática é essencial para um gerenciamento eficaz.

2.5 Modelagem de Suporte de Sistemas

A modelagem de suporte de sistemas é um componente fundamental na gestão e na otimização do desempenho de sistemas complexos. Ela integra vários elementos e disciplinas, incluindo a engenharia de sistemas, ciência da decisão, análise de risco e otimização, para garantir a funcionalidade, confiabilidade e eficiência da manutenção dos sistemas ao longo do seu ciclo de vida (BLANCHARD, 2004). Blanchard (2004) defende em seu trabalho "Logísticas Engineering and Management" que a suportabilidade não é apenas um elemento a ser considerado após a concepção e o design de um sistema. Pelo contrário, deve ser incorporada desde o início, no projeto do sistema. Blanchard argumenta que uma consideração precoce e eficaz da suportabilidade durante o design do sistema pode resultar em economias significativas de custos a longo prazo, e pode ajudar a evitar problemas de desempenho e confiabilidade que possam surgir após a implementação do sistema. Manutenibilidade e confiabilidade são dois aspectos fundamentais da suportabilidade de sistemas. Feeling (2010) em "*An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*", fornece uma visão abrangente de como modelar e avaliar estes componentes cruciais da suportabilidade. Ele salienta que uma compreensão adequada da manutenibilidade e da confiabilidade pode melhorar significativamente a capacidade de um sistema para desempenhar suas funções desejadas ao longo do tempo. Além da manutenibilidade e confiabilidade, a análise de confiabilidade também é crucial para a modelagem da suportabilidade de sistemas. Marseguerra, Zio e Podofilini (2003) em "*Basics of the Monte Carlo method with application to system reliability*", descrevem como o método de Monte Carlo pode ser usado para modelar eventos incertos e complexos, o que é crucial para a avaliação da suportabilidade de sistemas. Este é um exemplo notável de como técnicas avançadas de modelagem podem ser aplicadas na engenharia de suportabilidade para avaliar a confiabilidade do sistema. O processo de tomada de decisões também desempenha um papel crucial na modelagem da suportabilidade de sistemas. Parnell, Driscoll e Henderson (2011) em "*Decision Making in Systems Engineering and Management*", discutem a importância da tomada de decisões efetiva na engenharia de sistemas. Eles argumentam que a análise de decisão pode ser usada para melhorar não apenas a suportabilidade, mas também outros

aspectos da engenharia de sistemas, demonstrando assim o papel multifacetado que a suportabilidade desempenha na engenharia de sistemas. Em resumo, a modelagem da suportabilidade de sistemas é uma disciplina crucial que influencia a funcionalidade, confiabilidade e eficiência da manutenção de sistemas. As técnicas avançadas de modelagem, como o método de Monte Carlo, bem como a análise de decisão, são ferramentas vitais para avaliar e melhorar a suportabilidade de sistemas. Com base nos fundamentos teóricos acima, a hipótese central deste estudo é que a aplicação eficaz dos princípios de engenharia de suportabilidade em usinas de geração de energia fotovoltaica pode levar a melhorias substanciais na eficiência e longevidade desses sistemas. A hipótese sugere que a adoção de práticas de manutenção preventiva e corretiva, pautadas pelos princípios da engenharia de suportabilidade, pode resultar em uma operação mais eficiente dos sistemas fotovoltaicos, evitando perdas desnecessárias de energia e maximizando o retorno sobre o investimento em usinas solares (EROL-KANTARCI *et al.*, 2021; KEATING *et al.*, 2014; YANG *et al.*, 2019). A validação desta hipótese constitui o principal objetivo desta dissertação de mestrado.

2.6 Software OPUS 10

A ferramenta de software OPUS 10, desenvolvida pela systecgroup, tem sido amplamente reconhecida por sua capacidade de otimizar a gestão de peças sobressalentes, resultando em economias significativas e melhorias de desempenho. De acordo com Söderholm (2008), a aplicação do OPUS na otimização econômica de peças sobressalentes tem sido notável. A otimização econômica de peças sobressalentes refere-se ao processo de identificar a quantidade ideal de peças sobressalentes a serem mantidas em estoque, considerando fatores como custos de aquisição, custos de armazenamento, tempo de entrega e demanda. O OPUS utiliza algoritmos avançados e modelos de análise para determinar a melhor estratégia de estoque, minimizando os custos e maximizando a disponibilidade das peças. No entanto, é importante ressaltar que o potencial do OPUS não se limita apenas à otimização de peças sobressalentes. A ferramenta também pode ser aplicada em diferentes cenários de otimização e na avaliação de soluções de suporte e sistemas técnicos. Através da análise de dados e da modelagem de diferentes variáveis, o OPUS oferece insights valiosos para a tomada de decisões estratégicas, permitindo que as organizações identifiquem as melhores soluções para seus desafios específicos. Portanto, o OPUS não se restringe apenas à otimização econômica de peças sobressalentes, mas tem um amplo potencial para aprimorar a eficiência, a tomada de decisões e o desempenho em várias áreas.

2.6.1 Otimização de Peças de Reposição

A otimização de peças de reposição é uma aplicação essencial do software OPUS, que fornece soluções econômicas para questões relacionadas à distribuição de peças em diferentes instalações de estoque. De acordo com Van Houtum e Kranenburg (2015), o OPUS é eficaz em ajustar soluções de peças sobressalentes de forma progressiva para suportar cenários faseados, como implantação ou remoção gradual de sistemas. Uma das funcionalidades do software OPUS é auxiliar na tomada de decisão entre reparar ou descartar componentes falhos. Com base em modelos de análise e algoritmos avançados, o software ajuda a determinar o custo-benefício de cada opção, levando em consideração fatores como o custo de reparo, a disponibilidade de peças sobressalentes e o tempo necessário para realizar o reparo. Além disso, o OPUS é utilizado para determinar o local ideal para reparos, considerando fatores como a disponibilidade de recursos, a localização geográfica e o custo de transporte. Com base em análises de custo e tempo, o software auxilia na escolha do local mais eficiente e econômico para realizar os reparos necessários (KENNEDY *et al.*, 2002).

2.6.2 Avaliação de Soluções de Suporte

Além da otimização de peças de reposição, o software OPUS também desempenha um papel importante na avaliação de soluções de suporte. Conforme destacado por Cavaliere e Pinto (2012), o OPUS10 pode ser utilizado para comparar e avaliar diferentes soluções de suporte, permitindo determinar a estrutura organizacional de suporte mais econômica. Isso é especialmente útil ao tomar decisões sobre a terceirização de atividades de manutenção. O OPUS10 também auxilia na otimização da distribuição de equipamentos e pessoal de manutenção. Por meio de análises e algoritmos avançados, o software ajuda a determinar a alocação ideal dos recursos de manutenção, considerando fatores como a demanda, a localização geográfica e a capacidade de cada recurso. Dessa forma, é possível otimizar a eficiência do suporte de manutenção, garantindo que os recursos estejam adequadamente distribuídos para atender às necessidades operacionais (VAN HOUTUM; KRANENBURG, 2015). Além disso, o OPUS10 também auxilia na tomada de decisões relacionadas à necessidade e localização de armazéns. O software pode ser utilizado para analisar diferentes cenários e determinar a localização estratégica de armazéns de acordo com fatores como a demanda, a disponibilidade de recursos e os custos logísticos. Essa análise ajuda a otimizar o gerenciamento de estoques e a garantir uma distribuição eficiente dos materiais de suporte (VAN HOUTUM; KRANENBURG, 2015).

2.6.3 Avaliação de Sistemas de Suporte

O OPUS é capaz de avaliar diferentes sistemas técnicos para determinar o design e configuração do sistema ideal do ponto de vista de suporte. Ele também ajuda a decidir sobre as opções de componentes mais econômicas do ponto de vista do ciclo de vida (SÖDERHOLM, 2008). Do ponto de vista da concepção do sistema, para fins de projeto e planejamento, ficou evidenciado que é fundamental a comparação dos resultados frente a possíveis alterações na arquitetura da rede de suporte logístico, ou na confiabilidade dos equipamentos e de seus componentes, a fim de identificar qual alternativa oferece melhor ganho dado um orçamento disponível para ser investido na melhoria do sistema (FIGUEREDO, 2018).

2.6.4 Modelagem e Otimização de Diferentes Cenários no OPUS 10

O OPUS10, uma ferramenta de software essencial da Opus Suite, possui uma grande flexibilidade e escalabilidade, permitindo lidar com uma ampla gama de cenários. Estudos realizados por Kennedy *et al.*, (2002) destacam a capacidade do OPUS10 em lidar com cenários pequenos, contendo apenas alguns componentes e locais, bem como com programas grandes, envolvendo milhares de componentes e soluções de suporte complexas. Uma das características marcantes do OPUS10 é a sua capacidade de acomodar diferentes níveis de criticidade para os componentes. Isso significa que o software é capaz de priorizar os componentes de acordo com sua importância e estabelecer estratégias de suporte adequadas para cada nível de criticidade. Essa abordagem permite uma alocação eficiente de recursos e uma maior otimização dos sistemas de suporte. Além disso, o OPUS10 oferece diferentes requisitos de otimização, levando em consideração a localização, a unidade ou o tipo de sistema. Essa flexibilidade permite que os usuários personalizem a otimização de acordo com suas necessidades específicas. Estudos conduzidos por Figueredo (2022) ressaltam a importância de comparar os resultados diante de possíveis alterações na arquitetura da rede de suporte logístico, confiabilidade dos equipamentos e seus componentes, a fim de identificar qual alternativa oferece o melhor ganho, considerando o orçamento disponível para investimento no aprimoramento do sistema. Em resumo, o OPUS10 se destaca pela sua flexibilidade e escalabilidade, permitindo lidar com uma ampla variedade de cenários e programas. Sua capacidade de acomodar diferentes níveis de criticidade e requisitos de otimização contribui para uma melhor alocação de recursos e otimização dos sistemas de

suporte. Essa versatilidade faz do OPUS10 uma ferramenta valiosa para a análise e tomada de decisões no gerenciamento de sistemas de suporte e otimização.

2.7 Tabela sinótica

A Tabela 1 apresenta um resumo estruturado dos trabalhos estudados e analisados no contexto e dentro do escopo pretendido com esta pesquisa. A primeira linha aponta para os principais conceitos relacionados ao problema de pesquisa enquanto que a primeira coluna aponta para as referências respectivas. Este trabalho de pesquisa e seu escopo referencial é representado pela última linha da tabela.

Tabela 1 – Tabela sinotica apresenta o resumo estruturado dos trabalhos.

Autores	Ciclo de vida	ILS	IPS	Modelagem da suportabilidade de sistemas	Sistemas Eléctricos Fotovoltaicos	Engenharia de Suportabilidade em Usinas Fotovoltaicas	Ferramenta aplicada a modelagem de suporte
SKOPLAKI, E. (2009)					X		
EBELING, Charles E. (2010)	X	X	X	X			
PARNELL, Gregory S.(2011)	X		X	X			
Cucchiella et al. , (2017)	X		X	X	x	x	
Kurtz, Sara (2012)	X	X	X	X	X	X	
Kuitche, Joseph M. (2015)	X			X	X	X	
Deline, Christopher (2017)	X		X	X	X	X	
RAIMO, P. Abdala (2018)				X	X	X	
Abrahão, F. T. Mendes (2019)	X	X	X	X			X
Alfredsson, P. (2021)	X						X
Figueiredo, D. G. P. (2022)	X	X	X	X			X
Este trabalho acadêmico	X	X	X	X	X	X	X

3 Metodologia

Este capítulo detalha a metodologia que adota uma abordagem sistemática para investigar a possibilidade de otimizar o desempenho e relação custo-benefício das usinas fotovoltaicas, baseando-se nos princípios de suportabilidade aplicados na aeronáutica.

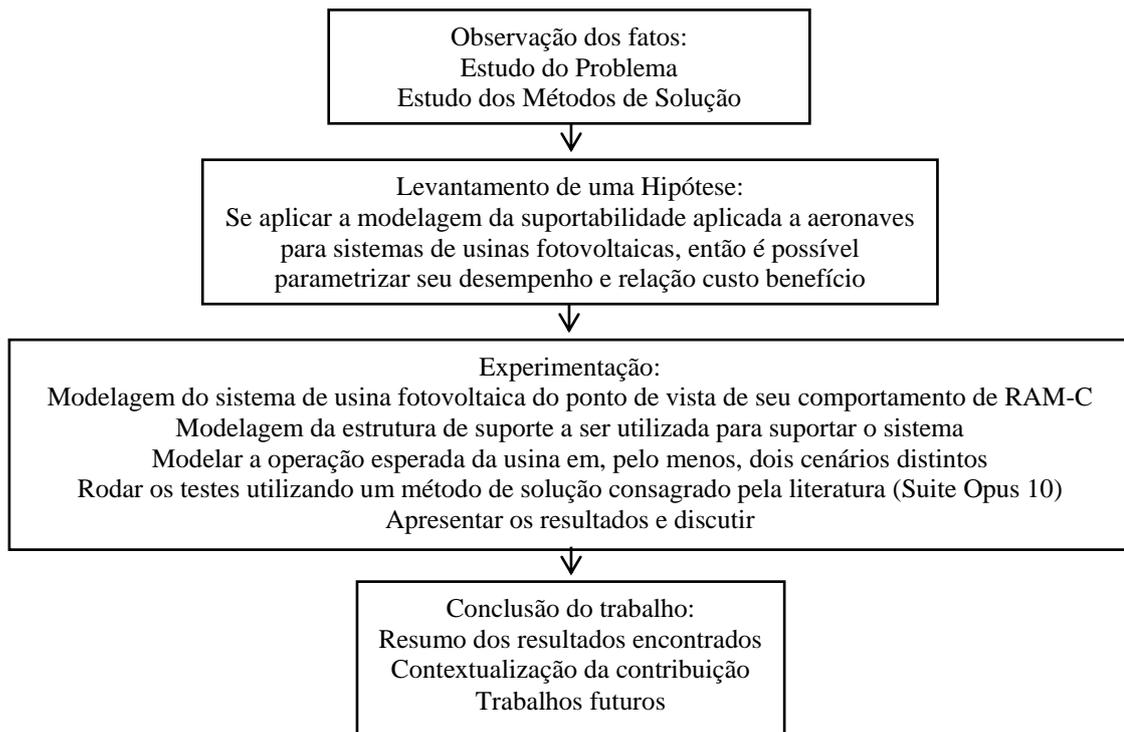


Figura 10 – Diagrama da metodologia aplicada no trabalho.

3.1 Abordagem da Pesquisa

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:

- 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.

- 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:

- 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.
- Modelagem da estrutura de suporte: Uma estrutura de suporte foi modelada, levando em consideração os materiais, design e carga dos painéis fotovoltaicos.
- 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.
- 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.
- Apresentação e Discussão dos Resultados: Após a execução das simulações, os resultados foram analisados, e as conclusões extraídas dessas análises foram discutidas em detalhe.

4. Conclusão do Trabalho:

- Resumo dos Resultados Encontrados: Uma recapitulação concisa dos principais resultados do estudo, destacando a validação ou refutação da hipótese.

- Contextualização da Contribuição: Esta seção enfocou como o trabalho se relaciona e contribui para a pesquisa atual no campo de usinas fotovoltaicas, principalmente em relação à aplicação de conceitos de suportabilidade.
- Trabalhos Futuros: Foram propostas sugestões para pesquisas subsequentes com base nos resultados e descobertas do estudo atual.

Este processo metodológico proporcionou uma abordagem sistemática para avaliar e validar a hipótese inicial, permitindo uma investigação rigorosa do problema e oferecendo insights valiosos para o campo de usinas fotovoltaicas.

3.2 Modelagem do Sistema de Usina Fotovoltaica do Ponto de Vista de seu Comportamento de RAM

A modelagem do sistema de usina fotovoltaica do ponto de vista de seu comportamento de RAM envolve a análise e a consideração de três principais fatores: confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade. Esses fatores são fundamentais para garantir o bom desempenho e a eficiência operacional da usina ao longo de sua vida útil.

A confiabilidade é a capacidade do sistema de usina fotovoltaica de desempenhar suas funções conforme o esperado, sem falhas ou interrupções. A modelagem da confiabilidade envolve a análise das falhas potenciais dos componentes do sistema, como painéis solares, inversores, cabos e dispositivos de monitoramento. Também é importante considerar a confiabilidade dos sistemas de proteção contra surtos, sistemas de aterramento e outros dispositivos de segurança.

A disponibilidade é a medida em que o sistema de usina fotovoltaica está operacional e pronto para fornecer energia. A modelagem da disponibilidade envolve a análise dos tempos de parada planejados e não planejados, incluindo a manutenção preventiva, a manutenção corretiva e a recuperação de falhas. Também é importante considerar a disponibilidade dos recursos necessários, como mão de obra qualificada, peças de reposição e equipamentos de diagnóstico.

A manutenibilidade refere-se à facilidade e eficiência com que o sistema de usina fotovoltaica pode ser mantido e reparado. A modelagem da manutenibilidade envolve a análise dos procedimentos de manutenção e reparo, a disponibilidade de documentação técnica, a acessibilidade aos componentes do sistema e a facilidade de diagnóstico de falhas. Também é importante considerar a disponibilidade de mão de obra qualificada e a capacidade

de treinamento dos operadores e técnicos. Na Figura 11 a seguir segue o diagrama do modelo com os componentes que compõem a usina fotovoltaica com os sistemas e subsistemas.

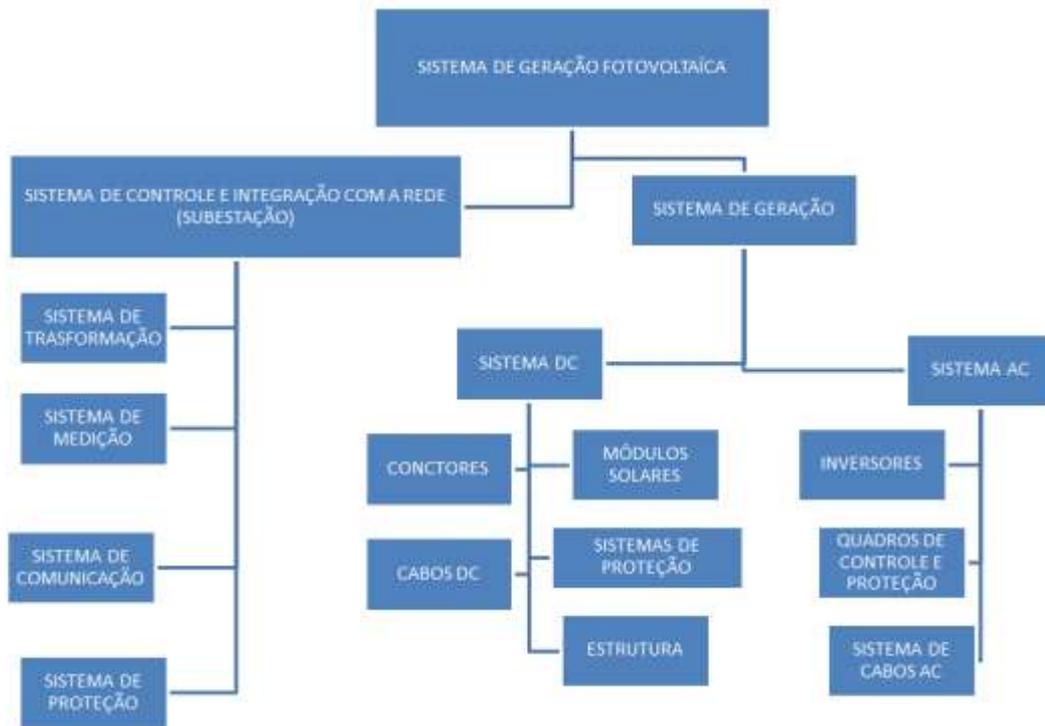


Figura 11 – Modelo genérico de usina fotovoltaica.

3.3 Simulações Computacionais com o Software

Na execução dos testes de funcionalidade e sensibilidade, bem como no desenvolvimento do estudo de caso, foi empregado o software OPUS SUITE, especificamente a versão RDM 55 (Refined Data Model) 2022.1 Revisada, datada de 02 de junho de 2022. Esta suíte é composta, dentre outros programas, pelo OPUS10©, uma ferramenta de renome internacional produzida pela empresa sueca Systecon Group AB.

O OPUS10© é reconhecido como um software especializado na otimização sistêmica de estoques, além de prover análises aprofundadas de suporte logístico. Seus resultados, primordialmente expressos através da curva de custo-efetividade, trazem à luz a associação intrínseca entre a disponibilidade operacional e o custo de suporte. Importante salientar que, na busca pela melhor solução, todos os parâmetros de entrada são tratados de forma simultânea e holística pela ferramenta, possibilitando uma vasta gama de soluções ótimas.

Blanchard e Boyle (2016) oferecem uma análise qualitativa da ferramenta, destacando sua versatilidade, sobretudo quando se trata da otimização de estoques de peças de reposição e no delineamento de alternativas de reparo. Estes autores, por meio de suas análises,

corroboram a importância e eficácia do OPUS10©, apontando que o software tem a capacidade de considerar variados cenários operacionais. Isso é particularmente relevante quando se pretende determinar padrões de demanda para peças de reposição em sistemas complexos, adaptando-se aos diferentes perfis de utilização. Além disso, sua capacidade de auxiliar na avaliação de diferentes configurações de bases aéreas e composições de frota é um testemunho de sua aplicabilidade e relevância no mundo logístico moderno.

Concluindo, os recursos computacionais empregados neste estudo, especificamente o OPUS10©, não apenas facilitaram, mas também enriqueceram a análise, proporcionando insights baseados em uma abordagem de otimização sistêmica. Sua aplicação garantiu que o estudo fosse fundamentado em métodos robustos e amplamente reconhecidos pela comunidade acadêmica e profissional.

3.4 Ferramentas e Técnicas Utilizadas

A abordagem de Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018) se distingue de outros métodos de avaliação de custos ao abraçar o potencial dos avanços tecnológicos. A suíte de software OPUS©, da Systecon Group AB, é um exemplo desse comprometimento com a precisão e eficiência. A técnica de Estimativa de Custos de Engenharia de Projetos: Esta técnica, mencionada por Dhillon (1989), é reconhecida por sua precisão em estimativas de custos, mas requer modelagem detalhada e recursos computacionais robustos. Esta é a base da metodologia proposta, com ênfase em detalhamento, precisão e integração com a tecnologia.

3.4.1 Modelagem Estática e Determinística

Antes de prosseguir com análises mais complexas, é fundamental começar com uma modelagem que pressupõe taxas de falha constantes. Isto ajuda na otimização inicial do sistema, determinando a combinação ideal de estoques para apoiar operações dentro de vários orçamentos.

3.4.2 METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*)

Uma técnica de vanguarda proposta por Sherbrooke em 1978, METRIC é usada para calcular a combinação otimizada de estoque. Suas diretrizes, como a proibição de canibalização da frota, são seguidas rigorosamente.

3.4.3 Maximização da Efetividade de Custo

A abordagem oferece um mapa, na forma de uma curva, que detalha a relação entre orçamento e efetividade. Cada ponto nesta curva representa uma solução ideal de composição de estoque, permitindo às organizações identificar a combinação perfeita para qualquer orçamento. Como com qualquer abordagem de modelagem, existem limitações. Embora se busque precisão, a abordagem não leva em consideração medidas de dispersão ou variações de probabilidade, podendo haver discrepâncias em sistemas extremamente complexos ou voláteis. A incorporação da suíte de software OPUS© é uma ferramenta essencial para a aplicação desta metodologia, pois integra precisão analítica com capacidades tecnológicas avançadas, garantindo uma análise abrangente e precisa.

4 Aplicação do Método, Resultados e Discussão

Neste capítulo será apresentado a implementação detalhada da metodologia proposta através do software OPUS10, especificamente direcionada para usinas fotovoltaicas. Será apresentada uma abordagem organizada de como os sistemas são modelados, evidenciando as áreas mais sensíveis e os procedimentos que foram ajustados para otimização. Além disso, o capítulo destaca a manutenibilidade, abordando os processos de manutenção. Concluindo, a seção de discussão traz uma avaliação crítica dos resultados obtidos, comparando-os com padrões da indústria e sugerindo possíveis melhorias, oferecendo uma visão abrangente do atual estado dos sistemas fotovoltaicos e caminhos para aprimoramento.

4.1 Instâncias e Parâmetros Utilizados no Experimento

No experimento realizado, foram aplicadas duas variantes de usinas solares, a variante A e a variante B, conforme Figura 12. Ambas as variantes possuem módulos fotovoltaicos e inversores com a mesma potência, compartilhando estruturas metálicas, cabeamentos e outros componentes em comum. No entanto, os fabricantes dos componentes são diferentes, resultando em taxas de falha e valores de aquisição de equipamentos distintos. Essa abordagem permitiu comparar o desempenho e a viabilidade econômica das duas variantes ao longo do tempo. Ao utilizar fabricantes diferentes, é possível analisar a influência da qualidade dos componentes na taxa de falha e no custo de aquisição. A variante A, por exemplo, pode apresentar uma taxa de falha mais baixa e um custo de aquisição mais elevado devido à utilização de componentes de alta qualidade. Por outro lado, a variante B pode ter uma taxa de falha maior e um custo de aquisição mais baixo, devido ao uso de componentes de qualidade inferior. Essa comparação entre as variantes permite avaliar os *trade-offs* entre confiabilidade e custo. Os resultados obtidos podem auxiliar na tomada de decisões sobre qual variante é mais adequada para implantação, considerando as necessidades e restrições específicas do projeto. Dessa forma, o experimento com as variantes A e B proporciona uma análise mais abrangente e realista das usinas solares, considerando diferentes fornecedores e suas influências nos aspectos de confiabilidade e custo.

ProductVariant			
PVID	DESCR	BPID	NOTE
Product variant identifier	Description	Product or product variant identifier	User note
1	VARIANT_A	VARIANT_A	
2			
3	VARIANT_B	VARIANT_B	

Figura 12 – Aplicação das variantes na ferramenta computacional.

4.1.1 Características Técnica da Usina Estudada

A usina fotovoltaica empregada no estudo foi uma usina com características semelhantes a com 5,1 MWp de potência e 10 mil painéis solares, localizada em Taubaté no estado de São Paulo sendo as características técnicas:

- Potência da usina fotovoltaica: 5.5 MWp
- Quantidade de módulos fotovoltaicos: 10.000,00
- Potência dos módulos fotovoltaicos: 550 Wp
- Quantidade de inversores: 55 inversores
- Potência dos inversores: 100 kW
- Área ocupada: 31.700 m²
- Subestação: 6 MVA de potência
- Transformadores : 6 transformadores de 1 MVA
- Capacidade estimada de geração mensal: 773 mil Kwh
- Investimento estimado: 15 milhões de dólares
- Custo do homem hora: 5 dólares
- Intervalo de manutenção preventiva: 6 meses
- DISPONIBILIDADE DA USINA $\geq 95\%$ (ANEEL, CCEE e ONS)



Figura 13 – Usina solar da operadora Claro semelhante ao empregada no estudo (GD Solar).

4.1.2 Intervalo Empregado no Experimento

No experimento, foi considerado um período de 25 anos, que corresponde ao ciclo de vida projetado para uma usina fotovoltaica. Essa escolha de tempo permite uma análise abrangente do desempenho e dos custos ao longo de toda a vida útil da usina. Ao considerar um horizonte de 25 anos, é possível avaliar não apenas o desempenho inicial do sistema, mas também a sua durabilidade, confiabilidade e sustentabilidade ao longo do tempo. A operação da usina possui uma operação interrompida uma vez que mesmo durante a noite todos os equipamentos estão operantes, uma vez que eles ficam em *standy-by* e estão na intempere do clima e local de instalação da usina podendo os mesmos apresentar falhas durante o dia ou durante a noite, assim considerando uma operação de **24 horas diárias**, com uma operação de aproximadamente **219144 horas**, **durante seu ciclo de vida**. Na Figura 14 apresenta a aplicação do intervalo na ferramenta computacional empregada no experimento.

GlobalParameters			
IRATE	Interest rate	[%]	<0.00>
SCLN	Scenario length	[Years]	25.0
SCTIM	Scenario start time	[Years]	<0.0>
ENPER	Endurance time period	[Hours]	
TLEN	Technical life length	[Years]	
IPBRO	Initial period before reorder	[Years]	
IPCFL	Initial period confidence level		<0.00>
REOPF	Reorder price factor		<1.00>
CURRN	Currency name		USD

Figura 14 – Aplicação dos parâmetros no OPUS10.

4.1.3 Componentes Analisados no Experimento

Os componentes analisados no experimento foram os componentes apresentados conforme a estrutura de modelagem apresentadas no capítulo 2 e 3.

No experimento realizado, foram analisados diversos componentes que compõem uma usina fotovoltaica, abrangendo sistemas e subsistemas que desempenham papéis fundamentais na geração de energia solar. A análise teve como foco a taxa de falha e o custo desses componentes, a fim de compreender sua confiabilidade e impacto financeiro no funcionamento da usina. Um dos principais sistemas analisados foi o Sistema de Geração de Energia, que compreende os Módulos Fotovoltaicos. Esses módulos são responsáveis por converter a luz solar em eletricidade. Sua taxa de falha e custo são de grande importância para garantir um bom desempenho e retorno financeiro do investimento. Todos esses componentes foram analisados em termos de taxa de falha e custo, permitindo uma avaliação abrangente da confiabilidade e dos aspectos financeiros da usina fotovoltaica. Essa análise fornece informações valiosas para a tomada de decisões no planejamento, operação e manutenção da usina, visando garantir um desempenho confiável e eficiente ao longo de seu ciclo de vida, conforme apresentado na Figura 15.

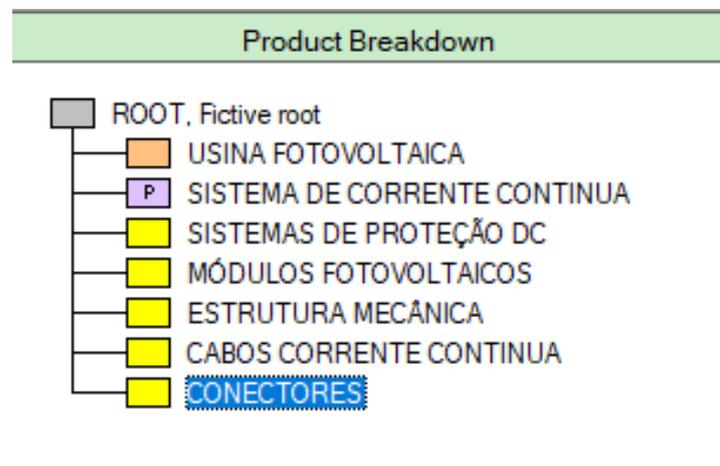


Figura 15 – Aplicação dos elementos do sistema de corrente contínua no opus10.

4.1.3.1 Componentes Variante A

A variante A, que utiliza equipamentos com menor taxa de falha e maior confiabilidade, se destaca por garantir uma maior disponibilidade no sistema. Embora demande um investimento inicial mais alto - resultado do custo mais elevado de componentes de maior qualidade - a redução na frequência de falhas se traduz em menos interrupções e,

consequentemente, maior produção constante de energia.

Com um sistema mais confiável e robusto, os custos de manutenção e substituição de componentes ao longo do tempo são minimizados, contribuindo para a eficácia global da instalação fotovoltaica. Essa eficiência prolongada resulta em menores custos operacionais, que quando distribuídos pela quantidade total de energia produzida ao longo da vida útil do sistema, resultam em um custo de energia (custo por unidade de energia) potencialmente muito baixo. Isso demonstra que, embora a variante A exija um investimento inicial maior, esse custo pode ser recuperado e até mesmo superado ao longo do tempo devido à alta confiabilidade do equipamento, à menor taxa de falhas e ao consequente menor custo de manutenção. Adicionalmente, um sistema confiável assegura uma produção de energia mais previsível e constante, fator que pode ser particularmente importante para operações que necessitam de uma fonte de energia estável e confiável, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Componente empregados Variante A.

Variante A			
ITEM	Quantidade	PRICE USD	TOTAL PRICE USD
Módulos fotovoltaico 550 wp modelo A	10000	R\$ 1.239,00	\$12.390.000,00
Sistemas de proteção de corrente continua	55	R\$ 1.350,00	\$74.250,00
Conjunto estrutura solo fotovoltaica	2500	R\$ 275,00	\$687.500,00
Conector MC4	20000	R\$ 27,00	\$540.000,00
Cabo corrente continua 1,8 kg estanhado metros	30000	R\$ 13,00	\$390.000,00
Inversor Fotovoltaico trifásico 100KW modelo A	55	R\$ 19.534,00	\$1.074.370,00
cabo cobre 1kv 50 mm ² EPR	40000	R\$ 11,31	\$452.400,00
Quadros TRIFÁSICO de controle , proteção e DPS	55	R\$ 537,89	\$29.583,95
Transformador 1MVA 380 / 13.800 V	6	R\$ 5.490,90	\$32.945,40
Medidor trifásico com medição indireta com TC e TP	1	R\$ 2.873,90	\$2.873,90
ROTEADOR WIFI	40	R\$ 143,90	\$5.756,00
DISJUNTOR ALTA TENSÃO COM RELÉ DE PROTEÇÃO	1	R\$ 50.000,00	\$50.000,00
TOTAL IMPLANTAÇÃO			\$15.729.679,25

4.1.3.2 Componentes Variante B

A Variante B, que envolve a utilização de equipamentos com uma maior taxa de falha e menor confiabilidade, pode ser atraente inicialmente devido ao menor investimento necessário para colocar o sistema em funcionamento. Isso pode ser especialmente atraente para projetos com restrições de orçamento iniciais. No entanto, as desvantagens desta abordagem se tornam mais evidentes à medida que o sistema entra em operação ao longo do tempo.

Uma taxa de falha mais alta significa que os componentes do sistema estão mais propensos a quebrar ou funcionar de forma inadequada. Isso, por sua vez, resulta em um aumento na necessidade de manutenção, reparo e substituição de componentes, o que pode representar custos significativos ao longo do tempo. Além disso, cada vez que uma falha ocorre e o sistema precisa ser reparado ou um componente substituído, há uma perda de produção de energia durante o período de inatividade. Esse tempo de inatividade, ou indisponibilidade, também representa um custo, pois a energia que poderia ter sido gerada e potencialmente vendida ou utilizada não está sendo produzida, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Componente empregados Variante B.

Variante B			
ITEM	Quantidade	PRICE USD	TOTAL PRICE USD
Módulos fotovoltaico 550 wp modelo B	10000	R\$ 1.201,00	\$12.010.000,00
Sistemas de proteção de corrente continua	55	R\$ 1.350,00	\$74.250,00
Conjunto estrutura solo fotovoltaica	2500	R\$ 275,00	\$687.500,00
Conector MC4	20000	R\$ 27,00	\$540.000,00
Cabo corrente continua 1,8 kg estanhado metros	30000	R\$ 13,00	\$390.000,00
Inversor Fotovoltaico trifásico 100KW modelo B	55	R\$ 15.743,00	\$865.865,00
cabo cobre 1kv 50 mm ² EPR	40000	R\$ 11,31	\$452.400,00
Quadros TRIFÁSICO de controle , proteção e DPS	55	R\$ 537,89	\$29.583,95
Transformador 1MVA 380 / 13.800 V	6	R\$ 5.490,90	\$32.945,40
Medidor trifásico com medição indireta com TC e TP	1	R\$ 2.873,90	\$2.873,90
ROTEADOR WIFI	40	R\$ 143,90	\$5.756,00
DISJUNTOR ALTA TENSÃO COM RELÉ DE PROTEÇÃO	1	R\$ 50.000,00	\$50.000,00
TOTAL IMPLANTAÇÃO			\$15.141.174,25

4.4 Product Breakdown Structure (PBS)

O *Product Breakdown Structure* (PBS) no OPUS para usinas fotovoltaicas é uma representação hierárquica dos componentes e sistemas que compõem a usina. Ele descreve a estrutura do produto e permite uma análise mais detalhada dos elementos do sistema fotovoltaico. A estrutura do PBS pode variar dependendo da complexidade e escopo do projeto da usina fotovoltaica, mas geralmente inclui os seguintes níveis de decomposição:

Nível de Sistema: representa a usina fotovoltaica como um todo, identificando os principais sistemas que a compõem, como sistema de geração de energia, sistema de distribuição, sistema de monitoramento, entre outros.

Nível de Subsistema: desagrega os sistemas principais em subsistemas mais específicos. Por exemplo, o sistema de geração de energia pode ser subdividido em subsistemas como módulos fotovoltaicos, inversores, sistema de montagem, sistemas de proteção e controle, entre outros.

Nível de Componente: divide cada subsistema em componentes individuais. Por exemplo, o subsistema de módulos fotovoltaicos pode incluir componentes como células solares, vidro frontal, encapsulamento, estrutura de suporte, cabos de interconexão, entre outros.

Essa estrutura hierárquica permite uma visão clara e organizada dos componentes e sistemas da usina fotovoltaica, facilitando a análise de custos, disponibilidade, confiabilidade e outros aspectos relevantes para a gestão do projeto. No OPUS, cada componente pode ser atribuído a informações específicas, como custo, taxa de falha, tempos de reparo, entre outros dados relevantes. Isso permite realizar análises de custo do ciclo de vida, otimização do estoque de peças sobressalentes, simulação de diferentes cenários operacionais e avaliação de desempenho do sistema. O *Product Breakdown Structure* no OPUS para usinas fotovoltaicas é uma ferramenta valiosa que auxilia na decomposição e análise dos componentes e sistemas da usina, permitindo uma gestão eficiente do projeto e uma compreensão abrangente de suas características e desafios, conforme Figura 16.

ID	DESCR	PRICE	TLEN	EXIST	MINST	MAXST	AREPL	IPBRO	IPCFL	REOPF	TRACK	WTLIM	UTXT1	UTXT2	NOTE
Item identifier	Description	Price	Technical life length [Years]	Existing stock	Minimal stock	Maximal stock	Allow replenishment	Initial period before reorder [Years]	Initial period confidence level	Reorder price factor	Collect item result	Waiting time tolerance	User-defined text	User-defined text	User note
				<0>	<0>		<Y>				<N>				
1	SISTEMAS DE PROTEÇÃO DC	1350.000	25.0												
2	ESTRUTURA MECÂNICA	275.000	20.0												
3	CONECTORES	27.000	10.0												
4	CABOS CORRENTE CONTINUA	13.000	30.0												
5	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	1239.000	25.0												

Figura 16 – Aplicação do item nível componente no OPUS 10.

4.5 Taxas de Falha dos Componentes

No OPUS10, as taxas de falha dos componentes podem ser expressas na base de um milhão de horas de operação, também conhecida como taxa de falha em horas de falha por milhão (HFPM). Essa medida permite representar a confiabilidade dos componentes de forma mais precisa e comparável. Ao inserir os dados no OPUS10, é possível atribuir taxas de falha específicas para cada componente do sistema fotovoltaico. Essas taxas de falha são normalmente fornecidas pelos fabricantes, obtidas a partir de dados históricos ou estimadas com base em conhecimento especializado. O OPUS10 utiliza as taxas de falha dos componentes para simular o desempenho do sistema ao longo do tempo. Com base nessas taxas de falha, o software calcula a confiabilidade do sistema, ou seja, a probabilidade de que o sistema funcione corretamente em um determinado período de tempo. Além disso, o OPUS10 permite realizar análises de sensibilidade, onde é possível testar diferentes taxas de falha para avaliar seu impacto no desempenho global do sistema. Isso permite identificar os componentes mais críticos em termos de confiabilidade e auxiliar na tomada de decisões relacionadas à manutenção preventiva, substituição de componentes ou outras estratégias de melhoria da confiabilidade. É importante ressaltar que as taxas de falha podem variar de acordo com vários fatores, como o tipo de componente, a qualidade do equipamento, as condições ambientais, as práticas de manutenção e outros. Portanto, é fundamental utilizar dados confiáveis e atualizados para obter resultados precisos nas análises realizadas no OPUS10, conforme representado na Figura 17.

	FRID	OPID	FRT	FRTT	NOTE
	Failure identifier	Operation parameter identifier	Failure rate [1/MOPIDs]	FRT Time dependent value identifier	User note
1	FAILURE_SISTEMAS DE PROTEÇÃO DC	<OPHOURS>	8,25		
2	FAILURE_ESTRUTURA MECÂNICA	<OPHOURS>	11,57		
3	FAILURE_CONECTORES	<OPHOURS>	28,53		
4	FAILURE_CABOS CORRENTE CONTINUA	<OPHOURS>	11,79		
5	FAILURE_MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	<OPHOURS>	4,83		

Figura 17 – Aplicação das taxas de Falhas dos componentes no Opus10.

4.6 Níveis de Manutenção da Usina Fotovoltaico no Opus10

Os níveis de manutenção da usina fotovoltaica no OPUS10 podem ser definidos em diferentes escalões: BASE_LEVEL, CENTRAL_LEVEL e WORKSHOP_LEVEL. Esses escalões representam diferentes níveis de manutenção e podem ser atribuídos aos diferentes componentes e sistemas da usina.

No BASE_LEVEL, são realizadas atividades de manutenção de caráter básico, que envolvem inspeções regulares, limpeza, e ajustes em componentes e sistemas fundamentais da usina. Essas atividades geralmente são executadas no local, sem a necessidade de remoção ou substituição de componentes. O objetivo é manter o funcionamento adequado dos equipamentos e garantir a confiabilidade do sistema como um todo.

No CENTRAL_LEVEL, são realizadas atividades de manutenção mais abrangentes e complexas, que podem envolver a substituição de componentes, reparos, calibrações e ajustes em sistemas centrais da usina, como módulos fotovoltaicos, inversores, quadros de controle e proteção. Essas atividades geralmente requerem o acesso a áreas específicas da usina e podem ser executadas por equipes especializadas.

No WORKSHOP_LEVEL, são realizadas atividades de manutenção mais detalhadas e específicas, que podem envolver reparos, testes avançados, substituição de componentes de maior complexidade e serviços especializados em equipamentos e sistemas da usina. Essas atividades são normalmente realizadas em uma oficina ou local dedicado, onde estão disponíveis recursos e equipamentos específicos para a manutenção.

De acordo com a Figura 18, a definição e atribuição dos escalões de manutenção no OPUS10 permitem planejar e programar as atividades de manutenção de acordo com a

natureza e a complexidade dos componentes e sistemas da usina fotovoltaica. Isso contribui para uma gestão eficiente da manutenção, maximizando a disponibilidade e confiabilidade da usina ao longo do tempo.

MaintenanceLevel			
LEVLID	DESCR	LEVLNO	NOTE
Maintenance level identifier	Description	Level number	User note
1 OPERACIONAL	Remove and replace items	1	BASE_LEVEL
2 EMPRESA_INSTALADORA	Remove and replace item modules	2	CENTRAL_LEVEL
3 ASSISTENCIA_TECNICA_LEVEL	Item repairs and item module repairs	3	WORKSHOP_LEVEL

Figura 18 – Descrição dos níveis de manutenção no modelo na estruturação da usina fotovoltaica

4.7 Apresentação dos 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 19.

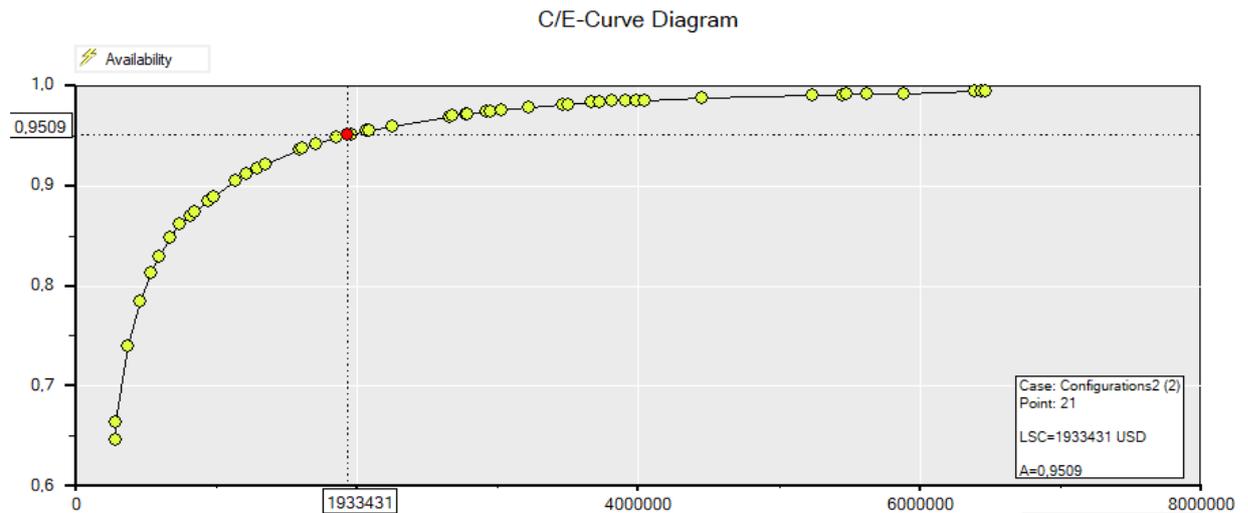


Figura 19 – Curva C X E do experimento de usinas fotovoltaicas.

4.8 Apresentação dos Resultados com a Comparação com Duas Variantes

Os resultados do experimento apresentam um retrato interessante sobre como a confiabilidade do equipamento e a taxa de falha podem influenciar os custos e a disponibilidade do sistema fotovoltaico, em particular no ponto de disponibilidade de 95% na curva Custo x Eficácia (CxE).

4.8.1 Apresentação dos Resultados na Variante A

Este sistema, com equipamento de maior confiabilidade e menor taxa de falha, resultou em maior disponibilidade. Para alcançar o ponto de disponibilidade de 95%, no entanto, provavelmente exigiu um maior investimento inicial devido ao custo mais elevado de equipamentos mais confiáveis e com menor taxa de falha. Apesar deste investimento inicial mais alto, o benefício é que o sistema tem menos probabilidade de falhar e, portanto, mais propenso a operar de forma consistente e eficaz. Isso significa que, uma vez que o investimento inicial seja recuperado, o custo por unidade de energia produzida pode ser bastante baixo, já que a taxa de falha e os custos associados à manutenção e substituição são minimizados, conforme Figura 20.

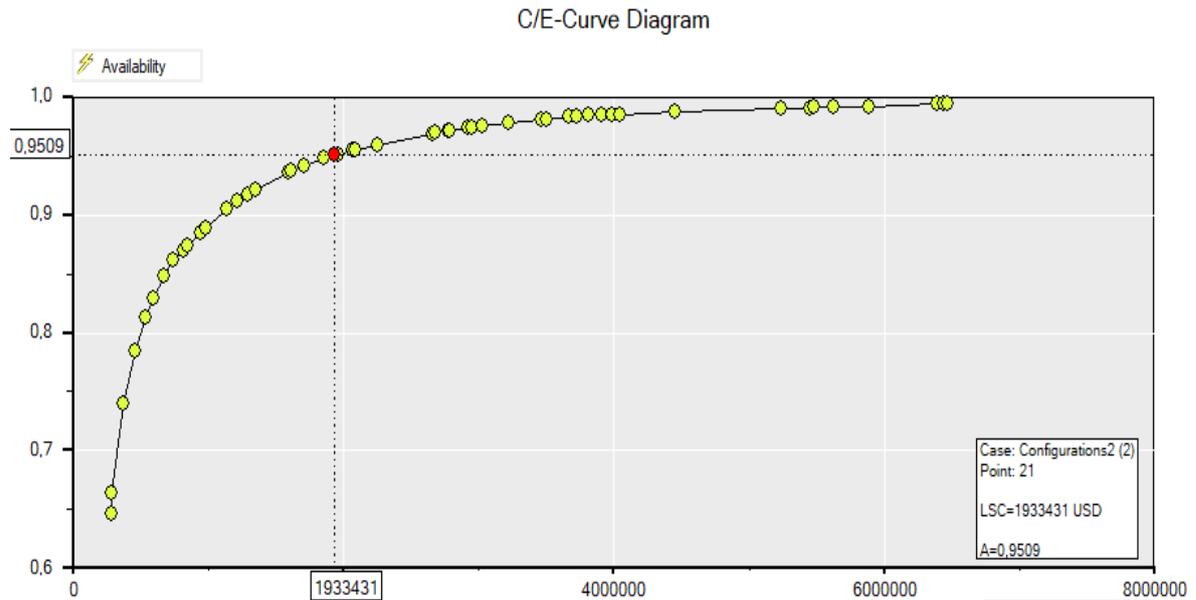


Figura 20 – Curva C X E do experimento da VARIANTE A, disponibilidade ≥ 95 .

A seguir, apresentamos a Tabela 4 detalhada com todos os itens e custos associados de estoques para a variante A. Esta tabela é crucial para a compreensão e avaliação dos investimentos necessários e para o planejamento estratégico de gestão de estoques, calculados pela ferramenta computacional com a metodologia aplicada.

Tabela 4 – Lista do experimento da VARIANTE A, disponibilidade ≥ 95 .

CUSTO TOTAL DE ESTOQUE 25 ANOS para variante A				
<i>STATION UNIT</i>	ITEM	<i>STOCK SIZE</i>	<i>PRICE USD</i>	<i>TOTAL PRICE USD</i>
CENTRAL_LEVEL	Módulos fotovoltaico 550 wp modelo A	837	\$1.239,00	\$1.037.043,00
CENTRAL_LEVEL	Sistemas de proteção de corrente continua	4	\$1.350,00	\$5.400,00
CENTRAL_LEVEL	Conjunto estrutura solo fotovoltaica	413	\$275,00	\$113.575,00
CENTRAL_LEVEL	Conector MC4	12473	\$27,00	\$336.771,00
CENTRAL_LEVEL	Cabo corrente continua 1,8 KV estanhado metros	1250	\$13,00	\$16.250,00
CENTRAL_LEVEL	Inversor Fotovoltaico trifásico 100KW modelo A	5	\$19.534,00	\$97.670,00
CENTRAL_LEVEL	cabo cobre 1kv 50 mm ² EPR	1150	\$11,31	\$13.006,50
CENTRAL_LEVEL	Quadros TRIFÁSICO de controle , proteção e DPS	3	\$537,89	\$1.613,67
CENTRAL_LEVEL	Transformador 1MVA 380 / 13.800 V	1	\$5.490,90	\$5.490,90
CENTRAL_LEVEL	Medidor trifásico com medição indireta com TC e TP	1	\$2.873,90	\$2.873,90
CENTRAL_LEVEL	ROTEADOR WIFI	4	\$143,90	\$575,60
CENTRAL_LEVEL	DISJUNTOR ALTA TENSÃO COM RELÉ DE PROTEÇÃO	0	\$50.000,00	\$0,00
CUSTO TOTAL DE ESTOQUE 25 ANOS				\$1.630.269,57
CUSTO TOTAL DE INTEVRNÇÕES de manutenção				\$303.161,43
Custo total do suporte do ciclo de vida para 25 anos para 95% de disponibilidade				\$1.933.431,00

Para uma visualização mais clara de como os custos estão distribuídos entre os diferentes componentes do estoque, apresentamos abaixo um gráfico em formato de pizza que destaca a contribuição percentual de cada item no custo total do projeto. Os módulos fotovoltaicos representam 64% do custo total. Esta é a maior parcela, visto que os módulos fotovoltaicos possuem um alto valor agregado e são cruciais para a eficiência e eficácia do projeto. Esta representação gráfica na Figura 21, permite aos gestores perceber imediatamente onde a maior parte do orçamento está sendo alocada e, assim, tomar decisões informadas sobre possíveis otimizações ou mudanças nas variantes A e B. Os módulos fotovoltaicos e os inversores são, sem dúvida, os componentes mais caros do projeto. Sua variação entre as variantes A e B pode ter um impacto significativo no custo total, razão pela qual a escolha entre estas duas variantes deve ser feita com cautela, considerando não apenas o custo, mas também a eficiência, durabilidade e outros fatores relacionados a cada componente.

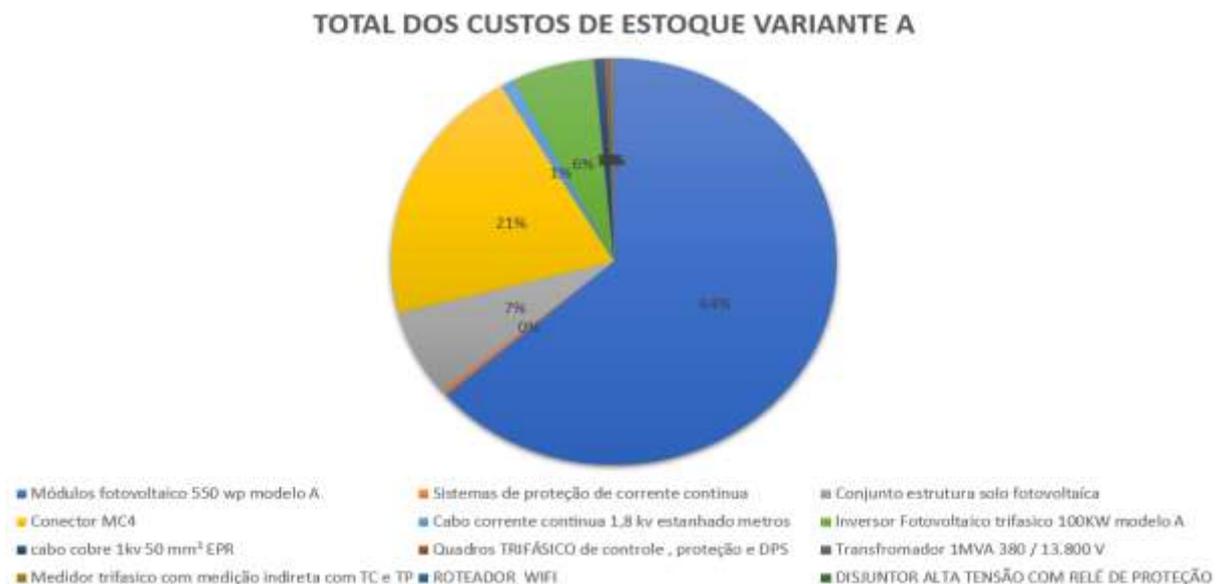


Figura 21 – Curva C X E do experimento da VARIANTE B, disponibilidade ≥ 95 .

4.8.2 Apresentação dos Resultados na Variante b.

Este sistema, com maior taxa de falha e menor confiabilidade, provavelmente teria um custo inicial mais baixo para atingir o ponto de 95% de disponibilidade na curva Cx E. No entanto, isso vem com a desvantagem de uma maior necessidade de investimento em estoque para substituição de componentes, além de uma maior indisponibilidade devido à maior taxa de falha. Isso significa que, embora o investimento inicial possa ser menor, os custos operacionais e de manutenção a longo prazo podem ser mais altos. Além disso, a maior

indisponibilidade pode levar a uma menor produção de energia, o que poderia aumentar o custo por unidade de energia produzida, conforme indicado na Figura 22.

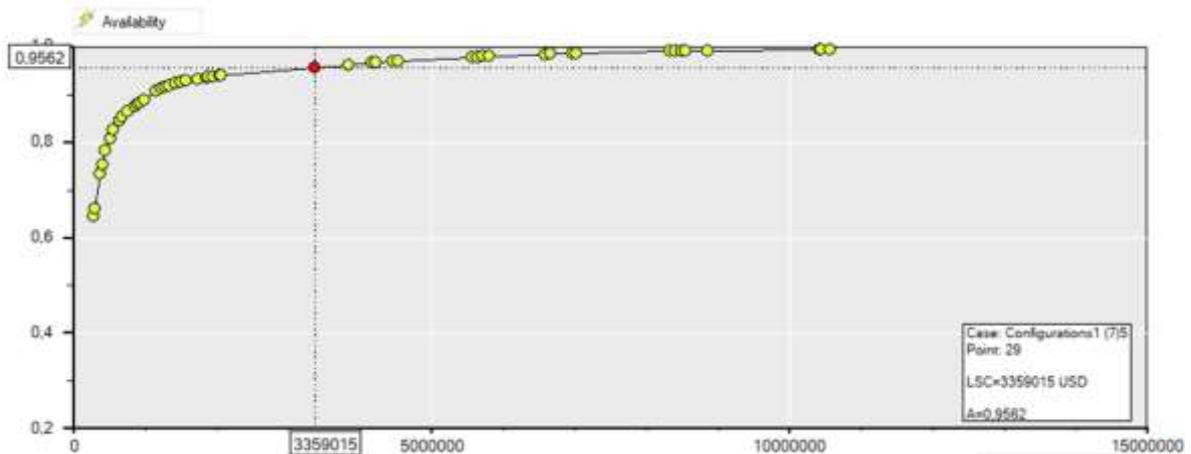


Figura 22 – Curva C X E do experimento da VARIANTE B, disponibilidade ≥ 95 .

A seguir, apresentamos a Tabela 5 detalhada com todos os itens e custos associados de estoques para a variante B. Esta tabela é crucial para a compreensão e avaliação dos investimentos necessários e para o planejamento estratégico de gestão de estoques, calculados pela ferramenta computacional com a metodologia aplicada.

Tabela 5 – Lista do experimento da VARIANTE B, disponibilidade ≥ 95 .

CUSTO TOTAL DE ESTOQUE 25 ANOS para variante B				
STATION UNIT	ITEM	STOCK SIZE	PRICE USD	TOTAL PRICE
CENTRAL_LEVEL	Módulos fotovoltaico 550 wp modelo B	1453	\$1.201,00	\$1.745.053,00
CENTRAL_LEVEL	Sistemas de proteção de corrente continua	4	\$1.350,00	\$5.400,00
CENTRAL_LEVEL	Conjunto estrutura solo fotovoltaica	413	\$275,00	\$113.575,00
CENTRAL_LEVEL	Conector MC4	12473	\$27,00	\$336.771,00
CENTRAL_LEVEL	Cabo corrente continua 1,8 KV estanhado metros	1250	\$13,00	\$16.250,00
CENTRAL_LEVEL	Inversor Fotovoltaico trifásico 100KW modelo B	11	\$15.743,00	\$173.173,00
CENTRAL_LEVEL	cabo cobre 1kv 50 mm ² EPR	1150	\$11,31	\$13.006,50
CENTRAL_LEVEL	Quadros TRIFÁSICO de controle , proteção e DPS	3	\$537,89	\$1.613,67
CENTRAL_LEVEL	Transformador 1MVA 380 / 13.800 V	1	\$5.490,90	\$5.490,90
CENTRAL_LEVEL	Medidor trifásico com medição indireta com TC e TP	1	\$2.873,90	\$2.873,90
CENTRAL_LEVEL	ROTEADOR WIFI	4	\$143,90	\$575,60
CENTRAL_LEVEL	DISJUNTOR ALTA TENSÃO COM RELÉ DE PROTEÇÃO	0	\$50.000,00	\$0,00
CUSTO TOTAL DE ESTOQUE 25 ANOS				\$2.413.782,57
CUSTO TOTAL DE INTEVRNÇÕES de manutenção				\$945.232,43
Custo total do suporte do ciclo de vida para 25 anos para 95% de disponibilidade				\$3.359.015,00

A avaliação criteriosa dos investimentos em um projeto fotovoltaico é vital para garantir sua viabilidade econômica e desempenho eficiente ao longo do tempo. Nesse sentido, para facilitar a compreensão da distribuição dos custos associados a cada componente do sistema, elaboramos um gráfico, conforme mostrado na Figura 23, que descreve a representatividade percentual desses custos no estoque, referindo-se à variante B do projeto. O que se destaca nesse cenário é a evidente influência dos módulos fotovoltaicos e dos inversores nos custos totais. Estes componentes, fundamentais para a operação eficaz do sistema, são também os mais onerosos, refletindo diretamente no orçamento do projeto. No caso da variante B, eles apresentam uma taxa de falha mais alta e uma qualidade inferior em comparação à variante A. Esta combinação de fatores implica em uma necessidade maior de substituição e manutenção desses componentes ao longo do tempo. Ao analisar o gráfico, torna-se evidente que a porcentagem dos custos de estoque atribuída aos módulos fotovoltaicos e aos inversores na variante B é consideravelmente mais alta em comparação com a variante A. Esta diferença não é apenas consequência da menor qualidade dos componentes, mas também de sua maior taxa de falha. A soma desses fatores faz com que o valor do estoque para a variante B seja mais elevado. Este cenário reitera a importância de um investimento consciente em componentes de alta qualidade.

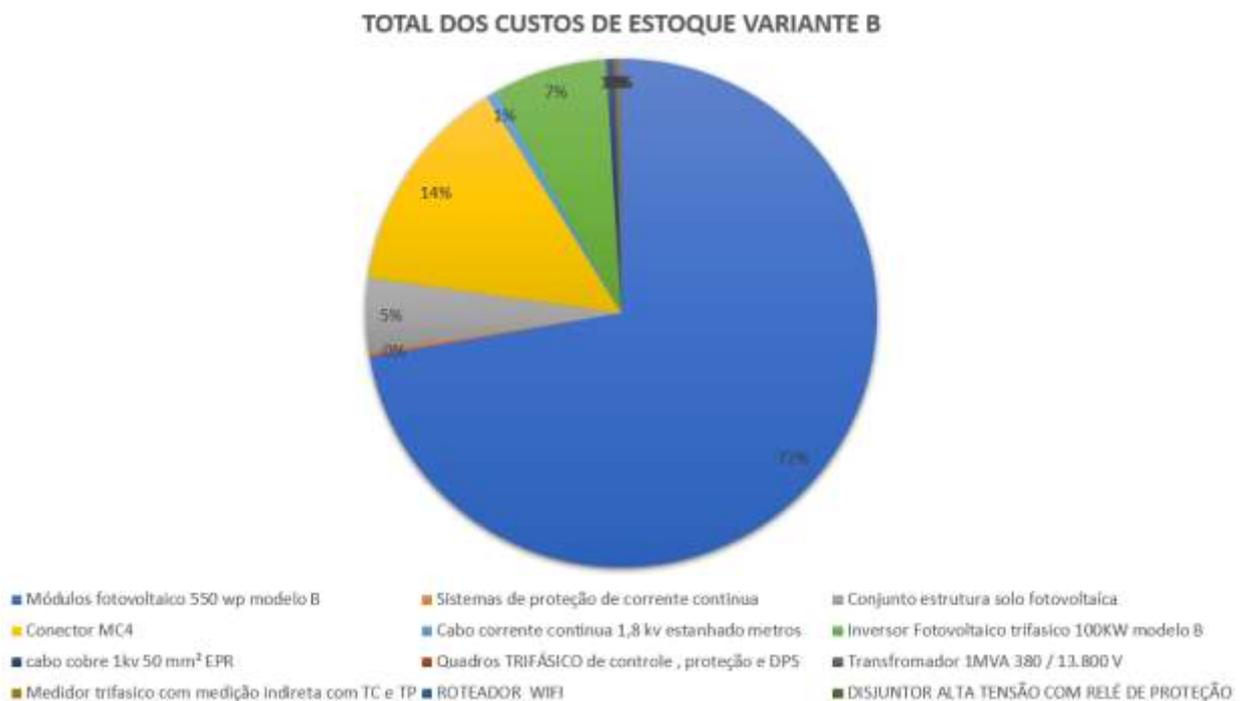


Figura 23 – Gráfico com o percentual de custo dos componentes da VARIANTE B.

4.9 Comparações Sobre os Resultados Obtidos no Experimento

Os resultados apresentados no experimento confirmam a hipótese. No ponto 21 da curva C x E (Custo x Eficácia) da variante A, foi alcançada uma disponibilidade superior a 95%, o que indica que a usina fotovoltaica estudada apresentou uma alta confiabilidade ao longo dos 25 anos de operação. Essa proporção é bastante favorável, pois significa que o investimento realizado foi relativamente baixo em comparação com a capacidade de geração da usina. Esses resultados demonstram a eficiência e a viabilidade econômica da usina fotovoltaica analisada. Com uma disponibilidade superior a 95% e um investimento representando apenas uma pequena porcentagem da capacidade de geração, fica evidente que o sistema foi bem projetado e gerenciado, com um bom equilíbrio entre custos e desempenho. Além disso, a alta disponibilidade da usina ao longo dos 25 anos de operação garante um fornecimento constante de energia elétrica, contribuindo para a estabilidade e confiabilidade do sistema energético. Isso é particularmente relevante em um contexto de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, como a energia solar. Isso significa que o investimento realizado foi altamente eficiente, gerando uma quantidade significativa de energia em relação aos custos envolvidos. Essa relação custo-benefício favorável é um indicativo da viabilidade econômica do projeto. Os resultados obtidos confirmam a eficiência do OPUS10 na análise e otimização de usinas fotovoltaicas. O software permitiu a identificação do ponto de equilíbrio entre disponibilidade e custos, garantindo que a usina atendesse aos requisitos de confiabilidade com um investimento adequado. É importante ressaltar que esses resultados são baseados em dados específicos do experimento e podem variar dependendo de diferentes fatores, como localização geográfica, condições climáticas e características do mercado. Portanto, é essencial realizar análises personalizadas e estudos detalhados para cada projeto de usina fotovoltaica, levando em consideração as condições específicas do local. Em suma, os resultados apresentados demonstram que as usinas fotovoltaicas são uma solução altamente confiável, eficiente e economicamente viável para a geração de energia renovável. A combinação da alta disponibilidade com custos de implementação e manutenção relativamente baixos torna essas usinas uma opção atraente para a transição para uma matriz energética mais sustentável e redução das emissões de carbono. O OPUS10 se mostrou uma ferramenta valiosa na análise e otimização desses sistemas, auxiliando na tomada de decisões embasadas em dados e maximizando o desempenho das usinas fotovoltaicas.

Essas duas variantes ilustram uma troca importante na otimização de sistemas fotovoltaicos: a relação entre custo inicial, confiabilidade, taxa de falha e disponibilidade. A Variante A demonstra que um maior investimento inicial pode levar a uma maior confiabilidade e menor taxa de falha, resultando em maior disponibilidade e possivelmente menor custo de energia a longo prazo. Em contraste, a Variante B mostra que um menor investimento inicial pode levar a uma maior taxa de falha e menor confiabilidade, resultando em maior investimento em estoque e maior indisponibilidade, o que pode aumentar o custo de energia a longo prazo. Para alguns, um investimento inicial mais alto pode ser justificado pela maior confiabilidade e menor taxa de falha. Para outros, um menor investimento inicial pode ser mais atraente, mesmo com a possibilidade de maiores custos operacionais e de manutenção a longo prazo. De qualquer forma, esses resultados destacam a importância da taxa de falha e da confiabilidade na otimização da disponibilidade e dos custos em sistemas fotovoltaicos.

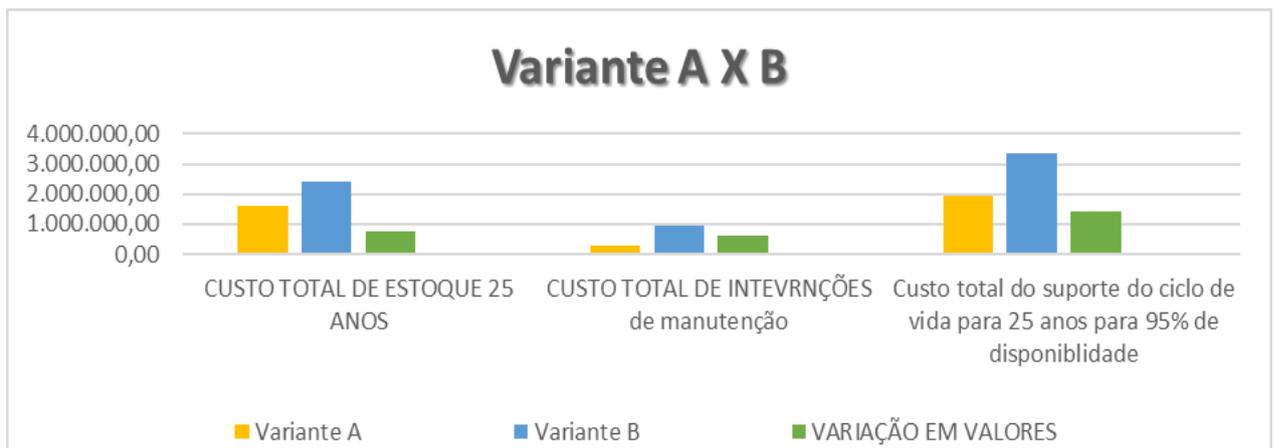


Figura 24 – Gráfico comparativo variante A versus variante B.

De acordo com a Figura 24, ao comparar as barras lado a lado, é notável um aumento significativo nos custos de Módulos Fotovoltaicos e Inversores da Variante B em relação à Variante A. Isso se deve, como apontado, à maior taxa de falha e à menor qualidade desses componentes na Variante B. A necessidade de mais manutenções e substituições é refletida no aumento de custos de estoque, com os Módulos Fotovoltaicos e Inversores da Variante B, juntos, representando um total de 211,79% dos custos, comparados a Variante A.

Este gráfico enfatiza a importância da escolha de componentes de qualidade superior, mesmo que tenham um custo inicial mais elevado, pois os custos a longo prazo, incluindo manutenção e substituições, podem superar significativamente a economia inicial. Os

decisores devem considerar essas implicações ao avaliar as opções de variantes para um projeto.

Podemos através da tabela a seguir compreender que os custos com estoque e intervenções de manutenção tiveram um aumento significativo se comparando a variante A com maior confiabilidade com a variante B com menor confiabilidade, representando a variante b um custo 73,73% maior no suporte de Manutenção da usina.

Tabela 6 – Comparação de custos de manutenção variante A X variante B.

	Variante A	Variante B	VARIAÇÃO EM VALORES	VARIAÇÃO EM %
CUSTO TOTAL DE ESTOQUE 25 ANOS	\$1.630.269,57	\$2.413.782,57	\$783.513,00	48,06%
CUSTO TOTAL DE INTEVRNÇÕES de manutenção	\$303.161,43	\$945.232,43	\$642.071,00	211,79%
Custo total do suporte do ciclo de vida para 25 anos para próximo de 95% de disponibilidade	\$1.933.431,00	\$3.359.015,00	\$1.425.584,00	73,73%

4.10 Discussões Sobre a Aplicação do Método

A aplicação do método utilizado no experimento, o OPUS 10, trouxe resultados relevantes e proporcionou uma análise abrangente dos sistemas fotovoltaicos. Ao empregar a curva C x E (Custo x Eficácia) e considerar fatores como taxa de falha, custo e disponibilidade, foi possível obter uma visão clara do desempenho e da viabilidade econômica desses sistemas. Uma das principais contribuições do método foi a capacidade de avaliar a relação entre custo e eficácia dos sistemas fotovoltaicos. Isso permitiu identificar o ponto de equilíbrio ideal, onde é possível obter uma alta disponibilidade do sistema com um custo de implementação e manutenção. Essa abordagem ajuda os tomadores de decisão a otimizar seus investimentos, buscando maximizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, a aplicação do OPUS 10 possibilitou a análise de diferentes cenários e a consideração de incertezas, como variações nas taxas de falha e nos tempos de manutenibilidade dos componentes. Isso é particularmente relevante, pois permite uma avaliação mais realista do desempenho do sistema ao longo do tempo, levando em conta as flutuações e incertezas inerentes aos componentes e à operação do sistema. Os resultados obtidos demonstraram que é possível alcançar uma alta disponibilidade nos sistemas fotovoltaicos, mantendo um

investimento adequado. No ponto 21 da curva C x E, onde a disponibilidade superou 95%, o investimento total ao longo dos 25 anos foi representado por uma proporção relativamente baixa da capacidade de geração total da usina. É importante notar que a menor confiabilidade e maior taxa de falha, característicos da Variante B, podem também afetar a previsibilidade e a confiança no sistema. Isso pode ser um fator importante para os usuários finais ou partes interessadas que dependem da energia fornecida pelo sistema. No ponto de 95% de disponibilidade na curva Custo x Eficácia (CxE), é possível que a Variante B possa não alcançar esse nível de disponibilidade de forma tão eficiente quanto a Variante A, devido aos custos operacionais mais elevados e maior indisponibilidade resultantes da maior taxa de falha e menor confiabilidade. Em resumo, embora a Variante B possa exigir um menor investimento inicial, os custos operacionais a longo prazo e a indisponibilidade potencialmente maior podem torná-la menos econômica ao longo do tempo, quando comparada com a Variante A. Além disso, a Variante B pode não ser capaz de fornecer o mesmo nível de confiança e previsibilidade na produção de energia, o que pode ser uma consideração importante para muitos projetos. Isso indica que o custo por unidade de energia produzida é viável e que os sistemas fotovoltaicos apresentam uma relação custo-benefício favorável. Essas informações são extremamente valiosas para os planejadores e investidores no setor de energia. Os resultados do experimento demonstram a viabilidade econômica e técnica dos sistemas fotovoltaicos, destacando seu potencial como fonte confiável de energia renovável. Essa validação contribui para a tomada de decisões embasadas em dados concretos, impulsionando o avanço e a adoção de tecnologias fotovoltaicas. No entanto, é importante reconhecer que ainda existem desafios e oportunidades de melhoria na aplicação do método e nos estudos futuros. A precisão dos dados utilizados, a modelagem dos componentes, a consideração das incertezas e a análise abrangente dos custos ao longo do ciclo de vida são algumas das áreas que podem ser aprimoradas. Além disso, é fundamental considerar os aspectos ambientais, sociais e regulatórios para uma avaliação mais completa dos sistemas fotovoltaicos. Em suma, a aplicação do método e os resultados obtidos no experimento forneceram insights valiosos sobre os sistemas fotovoltaicos. Essas informações contribuem para embasar decisões estratégicas e promover o desenvolvimento sustentável do setor de energia, impulsionando a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável. Com a contínua pesquisa e aprimoramento dos métodos de análise, será possível alcançar avanços ainda maiores no campo dos sistemas fotovoltaicos.

5 Conclusão

Nesta pesquisa de mestrado, 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.

5.1 Contribuições Acadêmicas

Este trabalho de mestrado representa uma contribuição acadêmica para o campo da engenharia e tecnologia de energia. Ele demonstrou a aplicabilidade dos conceitos de engenharia de suporte, usados na indústria aeronáutica, em um contexto diferente, especificamente na geração de energia fotovoltaica.

Em primeiro lugar, introduziu um paradigma, sugerindo que as práticas e princípios de suporte de engenharia em um setor podem ser adaptados e aplicados com sucesso em outro. Isso é considerável, pois pode abrir caminho para a transferência e adaptação de estratégias de outras indústrias para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de geração de energia fotovoltaica.

Em segundo lugar, este trabalho destacou a importância de considerar todo o ciclo de vida de uma usina de geração de energia fotovoltaica. Ao fazer isso, ele ressalta a necessidade de planejamento estratégico cuidadoso, não apenas na fase de design e instalação, mas também em termos de manutenção, atualização e eventual desativação.

Finalmente, ao demonstrar a viabilidade de aplicar os conceitos de engenharia de suporte da indústria aeronáutica aos sistemas de energia fotovoltaica, o trabalho lança as bases para uma pesquisa adicional. Pode inspirar outros pesquisadores a explorar essa abordagem em uma variedade de contextos, incluindo outros tipos de sistemas de energia renovável, como a energia eólica ou hidrelétrica.

5.2 Trabalhos Futuros a Serem Desenvolvidos

No futuro, poderá ser realizado trabalhos que testem outros cenários com o objetivo de desenvolver cada vez mais o potencial que existe na área de Conceitos de Desenvolvimento do Suporte Integrado do Produto no Ciclo de Vida de Usinas de Geração de Energia Fotovoltaica. Algumas possibilidades incluem:

- a) Testes de Configurações Alternativas de Usinas Fotovoltaicas: Avaliar diferentes combinações de componentes e configurações de usinas fotovoltaicas para identificar as soluções mais eficientes e confiáveis ao longo de todo o ciclo de vida do sistema.
- b) Otimização da Cadeia de Suprimentos: Realizar estudos para otimizar a cadeia de suprimentos de componentes de usinas fotovoltaicas, buscando maximizar a eficiência, minimizar os custos e garantir a sustentabilidade.
- c) Implementação de Sistemas de Monitoramento de Desempenho em Tempo Real: Desenvolver e testar sistemas avançados de monitoramento em tempo real que possam ser integrados nas usinas fotovoltaicas para otimizar o desempenho e prever falhas.
- d) A integração dos resultados de um estudo com o software SIMLOX como um trabalho futuro pode ser uma abordagem valiosa para melhorar a análise e o entendimento dos dados.

Referências

- ABBAS, A. Performance evaluation of different types of inverters used in grid-connected photovoltaic systems. **International Journal of Photoenergy**, v. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/7251806>
- 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.
- ARENT, D. J.; WISE, A.; GELMAN, R.; HEIMILLER, D. The status and prospects of renewable energy for combating global warming. **Energy Economics**, v. 33, n. 4, p. 584-593, 2011.
- 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.
- BLANCHARD, B. S. **Logística empresarial**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2004.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems engineering and analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- 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.
- BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; & PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470-4482, 2011.
- 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.
- BRITO, R. Communication security in photovoltaic systems: a review. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY*, 2019. **Proceedings [...]**. [S.l]: IEEE, 2019.
- CAVALIERI, S.; PINTO, R. A capacity-driven approach to establish spare parts safety stocks in an MRO (maintenance, repair and overhaul) environment. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 1, p. 316-323, 2012.
- CAVALIERI, S.; PEZZOTTA, G. Product–service systems engineering: state of the art and research challenges. **Computers in Industry**, v. 63, n. 4, p. 278-288, 2012.

CHU, S.; MAJUMDAR, A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. **Nature**, v. 488, n. 7411, p. 294-303, 2012.

CREUTZIG, F.; AGOSTON, P.; GOLDSCHMIDT, J. C.; LUDERER, G.; NEMET, G.; PIETZCKER, R. C. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. **Nature Energy**, v. 2, n. 9, p. 17140, 2017.

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.

DELINE, C.; JORDAN, D.; KURTZ, S. Designing photovoltaic systems for high-performance and reliability. **IEEE**, v., n., p., 2017.

DENHOLM, P.; HAND, M. Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1817-1830, 2011.

DOSHI, R.; THAKKAR, A.; SHAH, J. A comprehensive review on the PV panel cleaning systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1044-1069, 2017.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.

DUFOUR, L.; RIVEST, L. P.; LAROSE, C. Influence of DC cabling on the energy yield in PV systems. *In: 27th EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 27., 2012. Frankfurt. Proceedings [...]. Frankfurt, 2012. p. 4246-4251.*

EBELING, C. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. 2. ed. Waveland Press, 2010.

EDENHOFER, O.; CARRARO, C.; HOURCADE, J. C.; NEUHOFF, K. Architecture of the global deal on climate change. **Climatic Change**, v. 106, n. 1, p. 137-155, 2011.

EROL-KANTARCI, M. Predictive maintenance in photovoltaic systems: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111372, 2021.

FARIAS, A. M. Avaliação da eficiência de transformadores de potência em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Revista Internacional de Energia**, v. 2, n. 1, p. 37-44, 2021.

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.
- FOXON, T. J. Technological and institutional ‘lock-in’ as a barrier to sustainable innovation: lessons from UK energy policy. **Environmental Policy and Governance**, v. 23, n. 1, p. 24-41, 2013.
- FREIRE, F. Measurement system using smart sensor network for photovoltaic panels. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 30, n. 2, p. 291-301, 2019.
- GEISLER, G. **Technical data management: strategy, tactics, operations, and applications**. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 2007.
- GOEBEL, K. Prognostics challenges for complex aerospace systems. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY*, 2008. **Proceedings** [...]. [S.l], 2008.
- GONÇALVES, A. S. Avaliação da eficiência de transformadores aplicados em sistemas fotovoltaicos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE*, 2019. **Anais** [...]. [S.l], 2019.
- GREEN, M. A. **Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion**. New York: Springer-Verlag, 2005.
- GRUBLER, A.; NAKICENOVIC, N.; VICTOR, D. G. Dynamics of energy technologies and global change. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 37, p. 33-68, 2012.
- GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- HUI, S. Y. R. **Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation**. Routledge, 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World energy outlook 2020**. Paris: International Energy Agency, 2020.
- JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1154-1169, 2011.
- JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C. **Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- JORDAN, D. C. Performance-based photovoltaics operation and maintenance methodology: preprint. *In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION*, 2016. **Proceedings** [...]. [S.l], 2016.
- KAMMEN, D. M.; PACCA, S. Energy policy: the technical and policy potential of renewable energy. **Science**, v. 306, n. 5702, p. 981-982, 2004.

KENNEDY, W. J.; PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, n. 2, p. 201-215, 2002.

KHAN, F.; ISLAM, M. **Electrical systems protection**. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

KREITH, F.; KREIDER, J. F.; CURTIS, A. **Energy efficient buildings: principles and practices**. New York: John Wiley & Sons, 2017.

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.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. M. Short-circuit protection in DC power distribution systems and equipment. *In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE*. 2018. **Proceedings** [...]. [S.l.]. p. 1952-1959, 2018.

KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. An examination of the policy effects on the market penetration process of building integrated photovoltaic (BIPV) technology in the residential sector of the United States: a system dynamics approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p.19-34, 2017.

LEET, H. Novas tecnologias e aplicações das aeronaves de decolagem e pouso vertical elétricas. **Revista Internacional de Engenharia Aeroespacial**, v. 12, n. 3, p. 89-105, 2021.

LIN, S. Potencial das aeronaves elétricas na aviação urbana. **Revista de Pesquisa em Transporte Aéreo**, v. 8, n. 2, p. 113-128, 2020.

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.

LÖFFLER, S.; RIEDER, M.; SCHÜLE, R.; BEISENHERZ, S.; CENIS, A.; RAVE, M.; WETZSTEIN, A. Review on market development and investment models for solar tracking systems. **Energy Procedia**, v.162, p.25-34, 2020.

MACCHIARELLA, G. Regulamentação e desenvolvimento de infraestrutura para aeronaves elétricas. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AERONÁUTICA*, 2020. São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020.

MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.; PODOFILLINI, L. **Basics of the Monte Carlo method with application to system reliability**. [S.l.], 2003.

MASTERS, G. M. **Renewable and efficient electric power systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

MONTANARI, G. C. Técnicas de proteção de alta tensão em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: revisão e análise de aplicações. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 2020. **Anais [...]**. [S.l], 2020.

NEVES, W. R. Accuracy analysis of bidirectional energy meters for photovoltaic systems in Brazil. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 86, p. 66-71, 2017.

NIKOLIC, M. Densidade energética de baterias para aeronaves elétricas. *In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA SUSTENTÁVEL*, 2020. **Anais [...]** Belgrado: Universidade de Belgrado, 2020.

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.

PALIZBAN, M.; BORISOV, B. S.; CATALÃO, J. P. Reliability assessment of photovoltaic systems: a review. **Energies**, v. 12, 2019.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n. 3, p. 1625-1636, 2011.

PARNELL, G. S.; DRISCOLL, P. J.; HENDERSON, D. L. **Decision making in systems engineering and management**. 2. ed. London: Wiley, 2011.

PEREIRA, G. M. Wireless communication networks for monitoring and control of photovoltaic systems. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2019.

PERPIÑÁN, O. **Solar photovoltaic energy: from fundamentals to applications**. CRC Press, 2018.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. *In: Complex system maintenance handbook*. London: Springer, 2008. p. 21-42.

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.

RIBEIRO, R. Dispositivos de proteção contra surtos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 2019.

SANDBORN, P.; PRABHAKAR, V.; AHMAD, O. Forecasting electronic part procurement lifetimes to enable the management of DMSMS obsolescence. **Microelectronics Reliability**, v. 51, n. 2, p. 392-399, Ago.2010.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Manual "stand-alone photovoltaic systems – a handbook of recommended design practices"**. Novembro de 1991.

SANTOS, M. S. Calibration of bidirectional energy meters for grid-connected photovoltaic systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, n. 7, p. 1696-1701, 2018.

SHERBROOKE, C. C. **Optimal inventory modeling of systems: multiechelon techniques**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.

SIEFER, E.; STIEBIG, H. J. **Photovoltaics: fundamentals, technology and practice**. John Wiley & Sons, 2013.

SILVESTRE, S.; COLLARES-PEREIRA, M.; CABRAL, R. G. Field performance of photovoltaic systems and degradation analysis: a review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 15, n. 8, 2007.

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.

SMIL, V. **Energy transitions: history, requirements, prospects**. Santa Barbara: Praeger Publishers, 2010.

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

SMITH, J. Engineering supportability. *In*: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2018. **Proceedings** [...]. [S.l.], 2018.

SÖDERHOLM, P. A system view of the no fault found (NFF) phenomenon. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 7, p. 965-976, 2008.

SOHONI, R. Impactos ambientais das aeronaves elétricas. *In*: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE SUSTENTABILIDADE NA AVIAÇÃO, 2021. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021.

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

SOVACOO, B. K.; DWORKIN, M. H. **Global energy justice: Problems, principles, and practices**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

SPERTINO, F.; TOMMASINI, R.; CORONADO, J.; CHIABERGE, M. Maintenance policies for a photovoltaic system: the effect on the levelized cost of energy for different technologies and degradation profiles. **Renewable Energy**, v. 46, p. 219-229, 2012.

TOJA-SILVA, M. O papel da regulamentação na implantação de aeronaves elétricas. **Revista Brasileira de Engenharia Aeroespacial**, v. 5, n. 1, p. 27-38, 2018.

TSANAKAS, J. A.; MOUSTAKAS, K. N.; MALAMATENIOS, C.; ROUBELAKIS-ANGELAKIS, K. A.; PSYCHIS, M.; SALMAS, C. E.; LOIZIDOU, M. D. Life cycle

assessment (LCA) of photovoltaic modules including uncertainties in the assessment of the environmental impacts. **Renewable Energy**, v. 92, p. 438-450, 2016.

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.

VAN HOUTUM, G. J.; KRANENBURG, A. A. Spare parts inventory control under system availability constraints. **Production and Operations Management**, v. 24, n 7, p. 1181-1197, 2015.

VARTIAINEN, S. Photovoltaic system degradation and dependability under real operational conditions. **Solar Energy**, v. 205, p. 343-354, 2020.

VARUN, S.; BHAT, I. K.; PRAKASH, R. Techno-economic analysis of a solar-wind hybrid system for a base transceiver station. **Energy Policy**, v. 37, n. 6, p. 2434-2440, 2009.

WENHAM, S. R.; WATTS, M. A.; CORKISH, R. P.; GREEN, M. A.; PENG, P. **Applied photovoltaics**. New York: Earthscan, 2007.

WINZER, C. Conceptualizing energy security. **Energy Policy**, v. 46, p. 36–48, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.067>. Acesso em: 03 jun. 2023.

YERGIN, D. Ensuring energy security. **Foreign AFF**. v. 85, p. 69–82, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/20031912>. Acesso em: 26 jun. 2022.

YILMAZ, E. O futuro da implantação de aeronaves elétricas. **Revista Internacional de Pesquisa Aeroespacial**, v. 3, n. 1, p. 13-28, 2019.

YIN, Y. Potencial das aeronaves elétricas na redução de emissões. **Revista de Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 77-92, 2020.

ZHAO, Y.; ZHANG, J.; HAO, H.; ZHANG, X.; GUAN, Z.; WANG, H.; ZHANG, L. A review on anti-islanding protection algorithms for power converters of photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p.1109-1123, 2017.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 16 de agosto de 2023	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/DM-075/2023	4. N° DE PÁGINAS 86
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Aplicação de conceitos de desenvolvimento do suporte integrado do produto no ciclo de vida de usinas de geração de energia fotovoltaica			
6. AUTOR(ES): Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Engenharia de Suportabilidade. 2. Energia Solar. 3. Manutenção			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Suporte logístico integrado; Manutenção; Energia solar; Células fotovoltaicas; Coletores solares; Ciclo de vida; Tomada de decisões; Engenharia; Administração.			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais. Área de Gestão Tecnológica. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Defesa em 14/07/2023. Publicada em 2023.			
11. RESUMO: 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 <i>versus</i> 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.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			