



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

Análise de Confiabilidade em Planta Fotovoltaicas Flutuantes usando Metodologia FMEA

EDUARDO JOSÉ MONTEIRO DA SILVA

UFPA / ITEC / FEEB
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

EDUARDO JOSÉ MONTEIRO DA SILVA

**Análise de Confiabilidade em Planta Fotovoltaicas Flutuantes
usando Metodologia FMEA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para obtenção de grau
de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Me. Elen Priscila de Souza Lobato
Coorientador: Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca

UFPA / ITEC / FEEB
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- M772a Monteiro da Silva, Eduardo José.
Análise de Confiabilidade em Planta Fotovoltaicas Flutuantes usando Metodologia FMEA / Eduardo José Monteiro da Silva. — 2025.
XVI,42 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^ª. MSc. Elen Priscila de Souza Lobato
Coorientador(a): Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém, 2025.
1. Usinas Fotovoltaicas Flutuantes. 2. FMEA. 3. Análise de Confiabilidade. 4. Aplicação Web. 5. Seguidor Solar.. I. Título.

CDD 620.00452

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

Análise de Confiabilidade em Planta Fotovoltaicas Flutuantes usando Metodologia FMEA

AUTOR: **EDUARDO JOSÉ MONTEIRO DA SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

APROVADA EM: 28/03/2025

BANCA EXAMINADORA:

Me. Elen Priscila de Souza Lobato
(Orientadora - ITEC / UFPA)

Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
(Coorientador - FEED / UFPA)

Prof. Dr. Thiago Mota Soares
(Avaliador Interno - FEED / UFPA)

Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo
(Avaliador Externo - FCT / UFPA)

Eng. Mec. Gilberto Barbosa Lima Filho
(Avaliador Externo - VALE BASE METALS)

Dedico este trabalho à minha família, àqueles que me apoiaram, e àqueles que se dedicam à causa da virtude, cujas vidas puras e honradas honram Vosso Santo e sagrado Nome.

Agradecimentos

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus pelas graças alcançadas e constante presença ao longo de minha trajetória acadêmica.

Dirijo meu especial agradecimento à minha família, fonte de inspiração e apoio incondicional. Aos meus pais, Iza e Amauri que já não está entre nós, pelo suporte essencial em todas as etapas, assim como minha Tia e Mãe de Coração, Lindalva.

Estendo minha gratidão aos meus Irmãos Andrea e Nádia; aos meus avós Terezinha e Alexandre; aos meus Tios, meus primos pelo carinho. À Laila, companheira que contribuiu significativamente com seu apoio, incentivo e paciência ao longo desta jornada.

Aos meus queridos amigos Gustavo, Khallil, Yago, Domingos, Douglas, Guilherme, Danilo, Cauê, Adhan e Rômulo que nos deixou, manifesto meu profundo reconhecimento pela presença constante e motivação durante todo o período universitário.

Expresso minha sincera gratidão aos ilustres membros da banca examinadora. À Me. Elen Priscila de Souza Lobato, mentora e fonte de inspiração, por quem mantenho profunda admiração, cujas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e profissional. Ao Prof. Dr. Wellington Fonseca, meu primeiro mentor durante a graduação, cuja orientação tem sido essencial em minha trajetória acadêmica, sua influência e exemplo seguem como referências essenciais em meu percurso profissional. Ao Prof. Dr. Thiago Mota Soares e ao Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo pelas contribuições essenciais ao aprimoramento deste trabalho. Ao Engenheiro Sênior Gilberto Barbosa Lima Filho, meu sincero agradecimento por seu papel como mentor em minha carreira, suas contribuições foram cruciais para o desenvolvimento de minhas capacidades técnicas, e sua orientação precisa estabeleceu as bases para minha trajetória profissional atual.

Estendo meus agradecimentos à Família CEAMAZON, ambiente onde tenho o privilégio de colaborar com profissionais de excelência e qualidades humanas notáveis. Expresso também minha gratidão em nome da Família LCADE, agradeço pelas oportunidades nos projetos, trabalhos científicos e artigos publicados que me marcaram. Além das conexões estabelecidas e memórias construídas neste ambiente acolhedor.

Ao Engenheiro Sênior Yuri Lopes, apresento meus sinceros agradecimentos por seu papel como pilar em minha carreira. Como mentor que transformou minha atuação profissional, suas contribuições foram essenciais para a evolução de minhas capacidades técnicas. Ao Engenheiro Sênior Deyvison Rabelo. Seu domínio exemplar e abordagem não apenas ampliaram minha visão, mas também me inspiraram a buscar constantemente a excelência em meus projetos e desafios.

Registro, por fim, minha gratidão a todas as pessoas que, embora não nominalmente citadas, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desta etapa acadêmica. Todos vocês constituem parte permanente e significativa de minha trajetória.

“Above all else, show the data”
Edward Rolf Tufte

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma aplicação web para análise de confiabilidade em usinas fotovoltaicas flutuantes (FPV) com e sem seguidor solar, utilizando a metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). O estudo foi realizado no contexto do projeto EMOB-AMAZON, desenvolvido pelo Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) na Universidade Federal do Pará (UFPA). Diante deste cenário, a metodologia empregada incluiu a segmentação do sistema em cinco subsistemas fundamentais: geração, condicionamento de energia, distribuição, ambiental e estrutural, permitindo uma análise de potenciais falhas e seus impactos. Dessa forma, a aplicação foi desenvolvida com uso de tecnologias como *Flask*, *Dash*, *Pandas* e *Plotly*, resultando em uma plataforma interativa para visualização e análise de indicadores de confiabilidade. Os resultados demonstraram um valor de aproximadamente 10% dos problemas potenciais como os maiores riscos no sistema, com as células fotovoltaicas apresentando o maior RPN (*Risk Priority Number*). Além disso, a análise revelou uma vulnerabilidade fundamental relacionada à elevada sensibilidade do sistema às condições ambientais e à precisão dos procedimentos de instalação. Portanto, a aplicação desenvolvida constitui uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões em múltiplos níveis organizacionais, contribuindo para a otimização da operação e manutenção destes sistemas no desafiador contexto amazônico.

Palavras-chave: usinas fotovoltaicas flutuantes; FMEA; análise de confiabilidade; aplicação *Web*; seguidor solar; Amazônia.

Abstract

This work presents the development of a web application for reliability analysis in floating photovoltaic plants (FPV) with and without solar trackers, using the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) methodology. The study was conducted in the context of the EMOB-AMAZON project, developed by the Center of Excellence in Energy Efficiency of the Amazon (CEAMAZON) at the Federal University of Pará (UFPA). Given this scenario, the methodology employed included the segmentation of the system into five fundamental subsystems: generation, energy conditioning, distribution, environmental, and structural, allowing an analysis of potential failures and their impacts. Thus, the application was developed using technologies such as Flask, Dash, Pandas, and Plotly, resulting in an interactive platform for visualization and analysis of reliability indicators. The results demonstrated that approximately 10% of potential problems pose the highest risks to the system, with photovoltaic cells presenting the highest RPN (Risk Priority Number). Additionally, the analysis revealed a fundamental vulnerability related to the high sensitivity of the system to environmental conditions and the precision of installation procedures. Therefore, the developed application constitutes a valuable tool for decision-making at multiple organizational levels, contributing to the optimization of operation and maintenance of these systems in the challenging Amazonian context.

Key-words: floating photovoltaic plants; FMEA; reliability analysis; web application; solar tracker; Amazon.

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de uma usina instalada	6
Figura 2 – Esquema de Sistemas fixos modulares	6
Figura 3 – Esquema de Sistemas com rastreamento	7
Figura 4 – Vista seccionada do módulo fotovoltaico	8
Figura 5 – Fluxograma da metodologia implementada	20
Figura 6 – Arquitetura da Aplicação	22
Figura 7 – Ilustração da Planta Fotovoltaica Flutuante no Rio Guamá na UFPA	24
Figura 8 – Módulo fotovoltaico flutuador modelo	25
Figura 9 – Aplicação <i>web</i> página 1	29
Figura 10 – Aplicação <i>web</i> página 2	30
Figura 11 – Aplicação <i>web</i> página 3	31
Figura 12 – Gráfico de Pareto na aplicação <i>web</i>	32

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D)	11
Tabela 2 – Prioridade de Ação (AP), Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D) . . .	12

Lista de abreviaturas e siglas

AP	Action Priority (Prioridade de Ação)
CAFS	Compressed Air Foam System
CEAMAZON	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia
EMOB-AMAZON	Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora de Materiais Avançados em Energia e Mobilidade aplicados ao Contexto Amazônico
FEEB	Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Análise de Modos e Efeitos de Falha)
FPV	Floating Photovoltaic (Fotovoltaico Flutuante)
FRP	Fiber Reinforced Polymeric
GHI	Global Horizontal Irradiation (Irradiação Horizontal Global)
ICS	Índice de Confiabilidade do Sistema
IIS	Índice de Impacto no Sistema
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
ITEC	Instituto de Tecnologia
MDPE	Polietileno de Média Densidade
MVC	Model-View-Controller (Modelo-Visão-Controlador)
NPD	Desenvolvimento de Novos Produtos
RPN	Risk Priority Number (Número de Prioridade de Risco)
UFPA	Universidade Federal do Pará
UHV	Ultra-Alta Tensão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Visão Geral	1
1.2	Contexto da Pesquisa	1
1.3	Motivação	2
1.4	Perguntas da Pesquisa	2
1.5	Objetivos	3
1.5.1	Objetivo Geral	3
1.5.2	Objetivos Específicos	3
1.6	Justificativas	3
1.7	Estrutura do Trabalho	4
2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CONFIABILIDADE	5
2.1	Usinas Fotovoltaicas Flutuantes	5
2.1.1	Conceitos Fundamentais	5
2.1.2	Configurações de Sistema	6
2.1.3	Características e Componentes	8
2.1.4	Desafios Operacionais	9
2.2	Análise de Confiabilidade	10
2.2.1	Metodologia FMEA	10
2.2.2	Indicadores de Confiabilidade	11
2.2.3	Aplicações	12
2.3	Considerações Finais	13
3	TECNOLOGIAS UTILIZADAS	15
3.1	<i>Back-end</i>	15
3.1.1	<i>Flask</i>	15
3.1.2	<i>Dash</i>	15
3.1.3	<i>Numpy</i>	16
3.1.4	<i>Pandas</i>	16
3.2	<i>Front-end</i>	17
3.2.1	<i>HTML</i>	17
3.2.2	<i>CSS</i>	17
3.2.3	<i>Bootstrap</i>	17
3.2.4	<i>Plotly</i>	18
3.3	Considerações Finais	18
4	METODOLOGIA	19
4.1	Aplicação do método FMEA	19
4.2	Desenvolvimento da Aplicação Web	21

4.3	Considerações Finais	22
5	ESTUDO DE CASO: EMOB-AMAZON	24
5.1	Projeto EMOB-AMAZON	24
5.2	Aplicação do FMEA no EMOB-AMAZON	25
5.2.1	CrITÉrios de Análise	25
5.2.2	Coleta de Dados	26
5.3	Considerações Finais	27
6	RESULTADOS E ANÁLISES	29
6.1	Aplicação Web	29
6.2	Análise de Confiabilidade	30
6.3	Considerações Finais	33
7	CONCLUSÃO	34
7.1	SÍntese do Trabalho	34
7.2	Trabalhos Futuros	35
	Referências	36

1 INTRODUÇÃO

1.1 Visão Geral

Segundo a pesquisa realizada por [Junior \(2024a\)](#), os Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes (FPV) representam uma alternativa promissora no setor energético atual, integrando a necessidade crescente de fontes renováveis com o uso otimizado dos recursos de água. Dentre as possibilidades de FPV, destaca-se as usinas com seguidor solar, que podem aumentar a eficiência gerada. Esse tipo de usina mantém o ângulo das placas fotovoltaicas, de acordo com a posição aparente do sol, com objetivo de conseguir o melhor aproveitamento possível da irradiação solar.

Dentro desse contexto, a região Sul-Americana destaca-se como território privilegiado para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica. Isso ocorre, por causa das suas condições climáticas e por ser detentora de uma das seis principais zonas Globais de Irradiação Horizontal (GHI, sigla do termo em inglês) ([LAAROUSSI, 2021](#)).

A partir de dados da IRENA (Agência Internacional para as Energias Renováveis) verifica-se que entre 2019 e 2023, a produção de energia solar na América do Sul apresentou um expressivo crescimento anual médio de 54,42%, com o Brasil liderando a geração regional ao responder por 76,5% dos 49 GW produzidos em 2023 ([ELAVARASAN et al., 2020](#)). Contudo, a região Latino-Americana ainda precisa superar importantes obstáculos, incluindo os elevados investimentos iniciais necessários, além da limitada disseminação de conhecimento técnico, fatores que restringem a expansão do desenvolvimento energético sustentável ([SAMPAIO; GONZALEZ, 2017](#)).

Com base no cenário apresentado, este Trabalho de Curso foi desenvolvido com o objetivo de abordar a análise de confiabilidade desses sistemas, um aspecto fundamental para garantir sua operação eficiente e segura, especialmente ao considerar as condições específicas do ambiente aquático em que são instalados. Pois, a avaliação detalhada das falhas potenciais e riscos operacionais se torna essencial para otimizar o desempenho e a durabilidade dessas usinas, assegurando sua viabilidade a longo prazo.

1.2 Contexto da Pesquisa

Este trabalho se desenvolve em uma das frentes de pesquisa do projeto "Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora de Materiais Avançados em Energia e Mobilidade aplicados ao Contexto Amazônico"(EMOB-AMAZON). Esse projeto é financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e executado pelo Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), na Universidade Federal do Pará (UFPA).

Dessa forma, este trabalho teve como foco analisar a confiabilidade de sistemas fotovoltaicos flutuantes, sem e com seguidor solar, através, através da metodologia de Análise de Modos e Efeitos de Falha ou FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). Para isso, a metodologia FMEA foi aplicada aos sistemas fotovoltaicos do projeto. Além disso, foi criada uma aplicação web, para facilitar a análise e visualização de indicadores de confiabilidade.

1.3 Motivação

A motivação para este trabalho emerge da necessidade de desenvolver ferramentas especializadas para análise de confiabilidade em FPV, com e sem seguidor solar. Estes sistemas possuem interface entre os elementos aquáticos e solares, e podem ou não utilizar mecanismos de rastreamento. Isso introduz variáveis e considerações devido à complexidade e ambiente operacional desafiador. Portanto, demandam uma abordagem analítica específica, adequada e rigorosa de melhoria contínua e excelência operacional e de processo.

A ausência de plataformas dedicadas que integrem efetivamente a metodologia FMEA com visualização de dados em tempo real representa uma lacuna técnica e operacional significativa no setor de energia solar. Esta deficiência impacta diretamente a capacidade das organizações de identificar, avaliar e mitigar riscos de forma proativa, potencialmente comprometendo a eficiência operacional e a longevidade dos sistemas.

Além disso, a complexidade inerente destes sistemas, que combina elementos de engenharia mecânica, elétrica e hidráulica, exige uma abordagem analítica que possa efetivamente capturar e visualizar as interrelações entre diferentes modos de falha e seus impactos sistêmicos. A integração de análise FMEA com capacidades avançadas de visualização de dados, não é apenas uma conveniência técnica, mas uma necessidade estratégica para garantir a operação segura e eficiente destes sistemas inovadores de geração de energia.

1.4 Perguntas da Pesquisa

Este trabalho busca responder às seguintes questões de pesquisa:

- Como implementar efetivamente a metodologia FMEA em FPV sem e com seguidor solar?
- Quais são os principais indicadores de confiabilidade relevantes para estas instalações?
- Como uma plataforma web pode auxiliar na análise e visualização destes indicadores?
- Qual o impacto do ambiente aquático na confiabilidade do sistema?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma aplicação *web* para análise de confiabilidade em sistemas fotovoltaicos flutuantes sem e com seguidor solar, utilizando a metodologia FMEA, para facilitar a aplicação do método.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a metodologia FMEA em FPV sem sistema seguidor solar
- Aplicar a metodologia FMEA em FPV com sistema seguidor solar
- Desenvolver uma interface *web* intuitiva para facilitar a aplicação do método FMEA.

1.6 Justificativas

No Brasil cresce a adoção de FPV representando uma tendência significativa no setor de energia renovável (LACERDA DOUGLAS FELIPE LUCAS, 2023). Nesse contexto, a instalação destes sistemas em ambientes aquáticos apresenta desafios únicos que demandam ferramentas especializadas para análise de confiabilidade, atualmente escassas no mercado (SOUSA, 2022). A implementação de uma plataforma *web* dedicada à análise FMEA, além de facilitar a análise de confiabilidade, preenche uma lacuna importante, oferecendo recursos de visualização de dados que facilitam a tomada de decisão por parte dos gestores e técnicos envolvidos na operação destes sistemas.

Além disso, o trabalho contribui significativamente para a literatura sobre confiabilidade em FPV, um campo ainda em desenvolvimento e com amplo potencial para pesquisa. A aplicação prática no contexto do projeto EMOB-AMAZON permite validar a metodologia proposta, fornecendo *insights* valiosos para futuros desenvolvimentos na área. A integração de tecnologias modernas de desenvolvimento *web* com análise de confiabilidade representa uma abordagem inovadora, que pode servir como referência para projetos similares no setor de energia renovável.

A escolha de tecnologias como *Flask*, *Dash* e *Plotly* para o desenvolvimento da plataforma se justifica pela necessidade de criar uma solução robusta e escalável, capaz de processar e visualizar dados em tempo real. Esta abordagem não apenas facilita a análise dos indicadores de confiabilidade, mas também permite uma melhor compreensão dos fatores que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos flutuantes, contribuindo para a otimização de sua operação e manutenção.

Mediante ao exposto, o desenvolvimento deste trabalho se justifica pelos seguintes aspectos:

- Crescente adoção de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil e no mundo;
- Necessidade de ferramentas especializadas para análise de confiabilidade;
- Importância da visualização de dados para tomada de decisão;
- Contribuição para a literatura sobre confiabilidade em FPV com seguidor solar; e
- Aplicação prática no contexto do projeto EMOB-AMAZON;

1.7 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos:

- **CAPÍTULO 2 – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CONFIABILIDADE:** Aborda o estado da arte em sistemas fotovoltaicos flutuantes e análise de confiabilidade.
- **CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS UTILIZADAS:** Detalha as tecnologias utilizadas no desenvolvimento da plataforma.
- **CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA:** Apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.
- **CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO: EMOB-AMAZON:** Descreve o estudo de caso no projeto EMOB-AMAZON.
- **CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E ANÁLISES:** Apresenta os resultados e análises obtidos.
- **CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO:** Traz as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CONFIABILIDADE

Nesta seção será apresentado uma revisão da literatura sistemática. Utilizando o método PRISMA, conforme é descrito em [Page et al. \(2021\)](#). Essa que permitiu identificar e explorar a literatura relevante sobre análise de confiabilidade em sistemas fotovoltaicos flutuantes, tecnologias de sem e com seguidor solar e aplicações da metodologia FMEA no setor fotovoltaico.

2.1 Usinas Fotovoltaicas Flutuantes

2.1.1 Conceitos Fundamentais

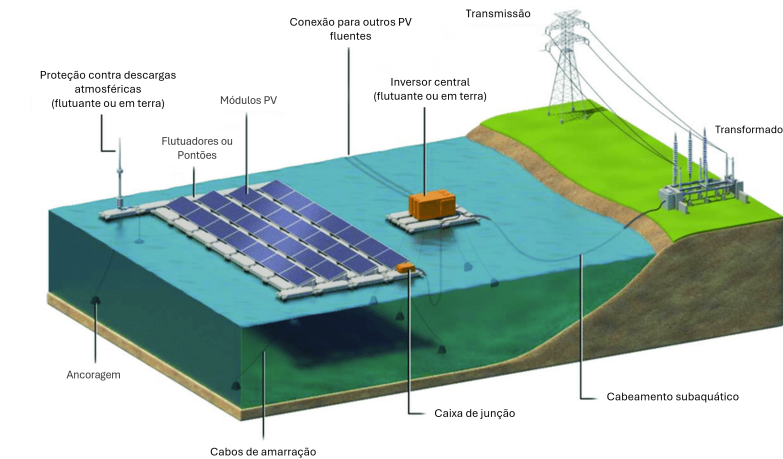
Segundo o relatório [Acharya e Devraj \(2019\)](#), a tecnologia FPV evoluiu significativamente desde sua primeira instalação em 2007 no Japão, expandindo-se de projetos experimentais de pequena escala para instalações comerciais em larga escala. O setor apresentou crescimento expressivo entre 2016 e 2018, atingindo capacidade instalada global de 1.314 MWp, impulsionado principalmente por países asiáticos como China, Japão e Coreia do Sul.

Atualmente, a tecnologia está presente em mais de 24 países, sendo majoritariamente implementada em corpos d'água artificiais como represas de irrigação, bacias industriais, estações de tratamento de água e áreas de mineração desativadas. Este crescimento é impulsionado principalmente pela otimização do uso de áreas já impactadas, como reservatórios hidrelétricos e lagos artificiais, evitando conflitos com outros usos do solo. De acordo com estudos realizados por [Rodríguez-Gallegos et al. \(2024\)](#), os FPVs demonstram um aumento médio de 5-10% na eficiência de geração quando comparados a sistemas terrestres similares.

Os FPVs se diferenciam das instalações convencionais por sua capacidade de gerar energia elétrica enquanto flutua sobre superfícies aquáticas, como lagos, reservatórios e barragens. A Figura 1 ilustra os componentes essenciais de um sistema típico FPV. É possível observar uma estrutura flutuante que serve como base para os módulos fotovoltaicos, ancorada ao fundo do corpo d'água através de sistemas de amarração.

Esse tipo de sistemas incluem elementos para proteção contra descargas atmosféricas, caixas de conexão e inversores centrais que podem ser instalados tanto na própria estrutura flutuante quanto em terra. A transmissão da energia gerada é realizada através de cabos subaquáticos que conectam o sistema à subestação transformadora em terra, onde a energia é adequada para integração à rede elétrica.

Figura 1 – Esquema de uma usina instalada



Fonte: (GADZANKU et al., 2021).

A característica mais notável da FPV é sua eficiência aprimorada, resultante do efeito de resfriamento natural proporcionado pela proximidade com a água (LIU et al., 2017). Este fenômeno térmico mantém os módulos fotovoltaicos em temperaturas mais estáveis e reduzidas, minimizando as perdas de eficiência tipicamente associadas ao aquecimento dos painéis em instalações terrestres convencionais. Adicionalmente, a tecnologia FPV oferece benefícios secundários significativos, como a redução da evaporação da água e o aproveitamento de áreas que, de outra forma, permaneceriam sem utilização produtiva (LIU et al., 2013).

2.1.2 Configurações de Sistema

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes apresentam diferentes configurações que podem ser categorizadas principalmente quanto ao seu sistema de rastreamento e tipo de estrutura flutuante. Conforme apresentado por Choi et al. (2014), os sistemas podem ser classificados em Sistemas fixos modulares, conforme ilustra a Figura 2, e Sistemas com rastreamento, representado na Figura 3:

Figura 2 – Esquema de Sistemas fixos modulares



Fonte: (MITTAL; SAXENA; RAO, 2017).

Os sistemas fixos, que representam aproximadamente 80% das instalações globais, caracterizam-se por uma configuração mais simples, com módulos fotovoltaicos instalados em ângulo fixo, requerendo menor peso estrutural e, conseqüentemente, facilitando a escolha dos flutuadores. Embora apresentem menor custo de instalação e manutenção, demandam um sistema de ancoragem preciso para evitar movimentação indesejada dos painéis.

Figura 3 – Esquema de Sistemas com rastreamento



Fonte: Adaptado de (MITTAL; SAXENA; RAO, 2017).

De acordo com Cazzaniga et al. (2012), os sistemas com rastreamento, que podem incluir rastreamento de eixo único ou duplo eixo, permitem acompanhar o movimento do sol tanto em azimute quanto em altitude, apresentando ganho de eficiência de até 25% quando utilizado o rastreamento de eixo vertical. Choi et al. (2014) indica que o material preferencial para sua estrutura rotativa é o FRP (*Fiber Reinforced Polymeric*), devido à sua durabilidade superior ao aço e alumínio. Particularmente, os sistemas FTCC (*Floating Tracking Cooling Concentrating*) podem alcançar ganhos impressionantes de 60-70% na geração de energia em comparação com plantas fixas, segundo estudos de Ueda et al. (2008).

Quanto à estrutura flutuante, os sistemas podem ser classificados em três tipos principais, como documentado no artigo. Os sistemas baseados em pontões utilizam estruturas de flutuação individual para cada conjunto de módulos, fabricados geralmente em MDPE (Polietileno de Média Densidade), apresentando limitações quanto ao tamanho da planta e menor resistência a condições ambientais adversas. Trapani e Millar (2014) apresentam os sistemas flexíveis, que utilizam filmes finos flexíveis, oferecendo maior adaptabilidade ao movimento das ondas e melhor aproveitamento da radiação em diferentes ângulos, além de requerer menor infraestrutura e apresentar melhor contato com a superfície da água devido à tensão superficial.

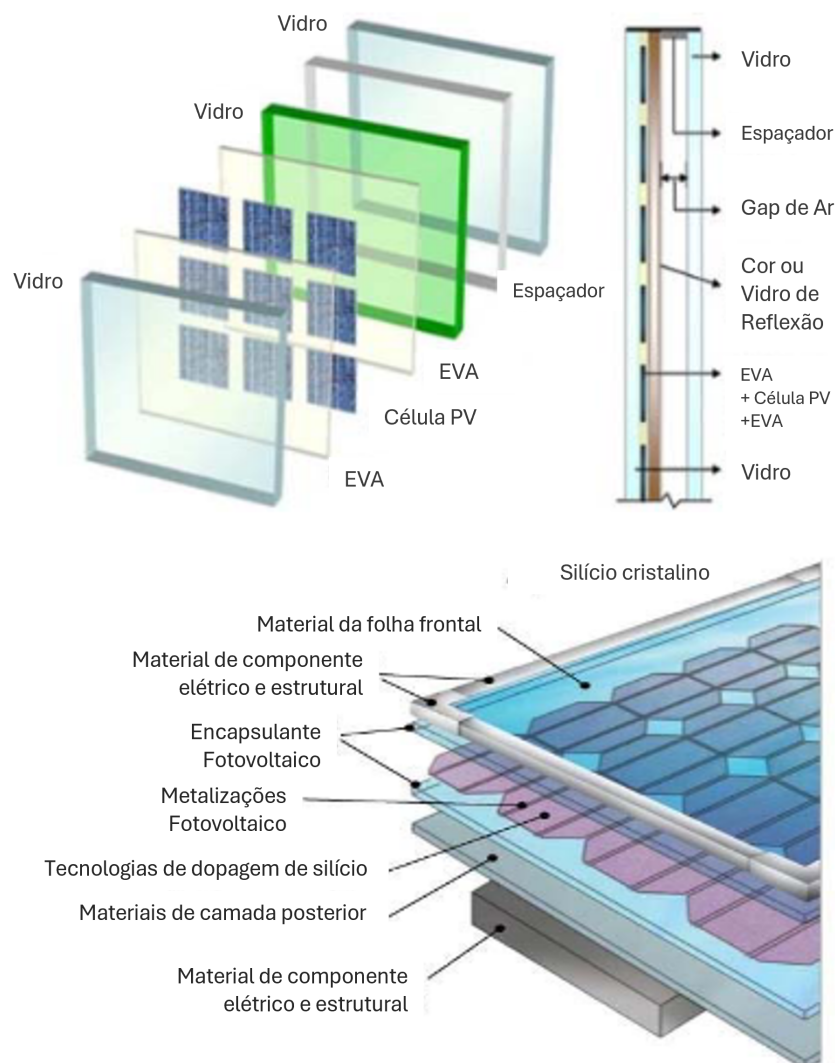
Por fim, Tina et al. (2012) investigaram os sistemas submersos, caracterizados por módulos parcialmente submersos em água rasa, tendo seu desempenho afetado pela temperatura operacional e espectro de radiação. Lanzafame et al. (2009) demonstraram que estes sistemas podem apresentar aumento de 10-20% na eficiência até profundidades de 8-10 cm, beneficiando-se da redução das perdas por reflexão e eliminação da deriva térmica. A seleção da configuração mais adequada depende de diversos fatores, incluindo as características do corpo d'água, requisi-

tos de geração, condições ambientais locais, orçamento disponível, facilidade de manutenção e necessidades específicas do projeto.

2.1.3 Características e Componentes

Com base na literatura especializada, um módulo fotovoltaico é composto por diversos elementos que trabalham em conjunto para garantir sua funcionalidade e durabilidade, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Vista seccionada do módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de (AYANG et al., 2018).

Conforme destacado por Machado e Miranda (2015), a estrutura desses módulos apresenta uma configuração em camadas, cada uma com função específica e essencial para o funcionamento eficiente do sistema. A moldura de alumínio constitui o elemento estrutural primário, fornecendo suporte mecânico e proteção ao conjunto. Villalva e Gazoli (2012) ressaltam que,

além de sua função estrutural, a moldura protege os componentes internos contra danos mecânicos e oferece rigidez ao módulo, característica fundamental para instalações em diferentes ambientes e condições climáticas.

De acordo com [Junior \(2024b\)](#), sobre a moldura, encontra-se o vidro especial, componente crucial que permite a passagem da luz solar enquanto protege as células fotovoltaicas. Este vidro é especialmente projetado para ser transparente e resistente, atuando como uma barreira contra intempéries, incluindo chuva e vento, além de prevenir a entrada de poeira, umidade e agentes químicos prejudiciais ao sistema.

O encapsulante EVA (Acetato de Etileno e Vinil) desempenha papel fundamental na proteção e fixação das células fotovoltaicas. [Alves \(2011\)](#) destaca que este material possui propriedades adesivas e de amortecimento que garantem a fixação adequada das células e as protegem contra tensões e vibrações mecânicas. Sua característica de transparência é essencial para permitir a passagem eficiente da luz solar até as células fotovoltaicas.

[Lana et al. \(2015\)](#) explica que no centro do módulo encontram-se as células fotovoltaicas, componentes responsáveis pela conversão direta da energia solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Fabricadas principalmente com materiais semicondutores à base de silício, estas células são conectadas em série ou paralelo para aumentar a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico, proporcionando maior potência elétrica.

O *backsheet*, localizado na parte posterior do módulo, é composto por materiais compostos ou polímeros, como o poliéster. [Jales \(2024\)](#) enfatiza que sua função primordial é fornecer isolamento elétrico e proteção contra umidade e agentes ambientais adversos, atuando como barreira impermeável que evita a entrada de água e gases corrosivos, prolongando assim a vida útil do módulo e reduzindo riscos de falhas elétricas e degradação.

[Severino e Oliveira \(2010\)](#) descrevem a caixa de junção como último componente essencial, que estabelece a conexão elétrica entre as células fotovoltaicas e o sistema externo. Construída com material resistente, geralmente plástico, abriga os diodos de bypass, que previnem perdas de energia causadas por sombreamento parcial ou defeitos em células individuais.

2.1.4 Desafios Operacionais

A operação de sistemas FPV apresenta desafios únicos que têm sido documentados através de experiências operacionais globais. [Colli \(2015\)](#) identifica que um dos principais desafios é o controle e mitigação dos efeitos da temperatura sobre os módulos fotovoltaicos, visto que o aumento da temperatura operacional pode reduzir significativamente a eficiência de conversão de energia. Segundo [Arias \(2023\)](#), a exposição constante às intempéries representa outro desafio significativo, especialmente em sistemas de grande porte. A degradação dos materiais devido à radiação UV, variações térmicas e umidade pode comprometer a integridade dos componentes ao longo do tempo, reduzindo sua vida útil e eficiência.

De acordo com [Sullivan, Pugh e Melendez \(2018\)](#), a manutenção adequada dos sistemas fotovoltaicos é crucial, mas apresenta desafios próprios, principalmente em instalações de grande escala. O acesso aos equipamentos para inspeção e manutenção requer um planejamento específico e pode envolver riscos operacionais significativos.

[Poor et al. \(2019\)](#) destacam que o monitoramento contínuo do desempenho e a detecção precoce de falhas são desafios técnicos importantes. A necessidade de sistemas de monitoramento sofisticados e a interpretação correta dos dados coletados demandam investimentos significativos em tecnologia e capacitação técnica. O sombreamento parcial dos módulos, conforme apontado por [Johnson \(2021\)](#), representa um desafio operacional significativo, podendo causar perdas de eficiência e, em casos extremos, danos aos equipamentos. Este problema requer soluções tanto no design inicial quanto na operação contínua do sistema.

2.2 Análise de Confiabilidade

2.2.1 Metodologia FMEA

A FMEA é uma metodologia sistemática e proativa para identificação e prevenção de falhas em sistemas complexos, sendo amplamente adotada em instalações fotovoltaicas de grande porte. De acordo com [Wang, Chen e Zhang \(2023\)](#), a metodologia tem evoluído significativamente nas últimas décadas, incorporando aspectos específicos para análise de sistemas de energia renovável. No contexto fotovoltaico, [Martinez e Kumar \(2023\)](#) destaca que a FMEA é particularmente eficaz na identificação precoce de potenciais falhas em componentes críticos, permitindo a implementação de medidas preventivas antes que ocorram falhas significativas que possam comprometer o desempenho do sistema.

O processo de implementação do método em sistemas fotovoltaicos segue uma estrutura hierárquica bem definida, conforme estabelecido por [Anderson e Thompson \(2022\)](#). Esta estrutura compreende sete etapas fundamentais: planejamento e preparação, estruturação do projeto, análise de função, análise de falhas, análise de risco, otimização e documentação dos resultados.

Dessa forma, cada etapa possui objetivos específicos e contribui para uma análise abrangente do sistema. Além disso, [Liu e Brown \(2023\)](#) enfatiza que esta abordagem sistemática permite não apenas a identificação de possíveis falhas, mas também a compreensão das interações entre diferentes componentes e subsistemas, aspecto crucial em instalações fotovoltaicas modernas. Dessa maneira, a avaliação quantitativa é realizada através de três critérios principais: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D).

O estudo apresentado por [Garcia e Lee \(2023\)](#) descreve que cada critério é avaliado em uma escala de 1 a 10, onde a Severidade mensura o impacto da falha no sistema, a Ocorrência representa a probabilidade de uma falha acontecer, e a Detecção indica a capacidade de identificar a falha antes que ela afete o sistema, conforme descrito na Tabela 1. O produto destes três fatores

resulta no Número de Prioridade de Risco (RPN), que varia de 1 a 1000.

Tabela 1 – Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D)

Class.	Severidade (S)	Detecção (D)	Ocorrência (O)	
			Probabilidade	Descrição
1	Nenhuma	Certeza	0,00% < O 0,01%	Extremamente Baixa
2	Muito Leve	Quase Certeza	0,01% < O 1,00%	Muito Baixa
3	Leve	Muito Alta	1,00% < O 2,00%	Média Baixa
4	Muito Baixa	Alta	2,00% < O 5,00%	Baixa
5	Baixa	Médio-Superior	5,00% < O 10,00%	Média
6	Média	Média	10,00% < O 20,00%	Alta
7	Alta	Baixa	20,00% < O 50,00%	Média Alta
8	Muito Alta	Muito Baixa	50,00% < O 80,00%	Muito Alta
9	Risco Grave	Extremamente Baixa	80,00% < O 99,99%	Extremamente Alta
10	Risco Catastrófico	Absolutamente Não	99,99% < O 100%	

[Park e Kim \(2023\)](#) complementa que, especificamente para sistemas fotovoltaicos, o RPN deve considerar fatores ambientais e operacionais únicos, como exposição à radiação solar, variações térmicas e condições climáticas adversas. Segundo [Pingulkar e Jain \(2025\)](#), instalações que implementaram a metodologia de forma consistente apresentaram redução média de 45% em falhas críticas e aumento de 23% na disponibilidade do sistema.

[Wilson e Davis \(2023\)](#) destacam que a metodologia tem sido fundamental para otimizar estratégias de manutenção preventiva e preditiva, resultando em economia significativa nos custos operacionais e aumento da vida útil dos componentes. Portanto, esses resultados evidenciam a importância da FMEA como ferramenta de gestão de confiabilidade em sistemas fotovoltaicos modernos.

2.2.2 Indicadores de Confiabilidade

A análise da confiabilidade em sistemas FPV recorre ao FMEA, tradicionalmente, utilizando o RPN como principal indicador para avaliação. Entretanto, como destacado em [Liu, Liu e Liu \(2013\)](#) a complexidade das interações entre diferentes modos de falha e seus impactos sistêmicos demanda uma metodologia mais abrangente de avaliação. Essa constatação fundamenta o uso de um conjunto de indicadores que permitem uma avaliação alternativa da confiabilidade.

O Índice de Confiabilidade do Sistema (ICS), desenvolvido a partir da metodologia proposta por [Braglia M. e Montanari \(2003\)](#) e [Gargama e Chaturvedi \(2011\)](#), representa a distribuição e interdependências ao longo do sistema, proporcionando assim uma medida mais

representativa da confiabilidade global. Esta abordagem permite uma compreensão mais profunda das vulnerabilidades sistêmicas e suas interações.

Em relação a criticidade, [Carpitella et al. \(2018\)](#) discutem a integração de técnicas de análise multicritério ao FMEA tradicional. Dessa forma, o Índice de Impacto no Sistema (IIS), que considera os efeitos em cascata das falhas, permitindo uma avaliação mais precisa e contextualizada do impacto potencial de cada modo de falha no sistema como um todo.

De acordo com [Gueorguiev \(2020\)](#), para a priorização estratégica de ações, expande a análise tradicional, ao incorporar o conceito de Número de Prioridade de Ação (AP), conforme descrito na Tabela 2. Dessa forma, prioriza-se as ações corretivas, principalmente com base na Severidade e independentemente do valor do RPN. Assim, o AP é classificado em 3 níveis: baixa prioridade (*low*), moderada prioridade (*moderate*) e alta prioridade (*high*), uma alternativa mais recente que oferece uma perspectiva adicional para a priorização das ações corretivas.

Tabela 2 – Prioridade de Ação (AP), Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D)

Prioridade de Ação (AP)	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	Ação Requerida
A (Alta)	9-10	4-10	1-10	Ação imediata requerida. Alta prioridade para eliminar/reduzir risco
A (Alta)	7-8	5-10	1-10	Ação imediata requerida. Alta prioridade para eliminar/reduzir risco
M (Média)	9-10	1-3	1-10	Ação necessária. Prioridade moderada para reduzir risco
M (Média)	7-8	1-4	1-10	Ação necessária. Prioridade moderada para reduzir risco
M (Média)	5-6	5-10	1-10	Ação necessária. Prioridade moderada para reduzir risco
B (Baixa)	5-6	1-4	1-10	Ação opcional. Baixa prioridade
B (Baixa)	1-4	1-10	1-10	Ação opcional. Baixa prioridade

2.2.3 Aplicações

[Guo et al. \(2023\)](#) investigam o uso da FMEA baseada em métodos bayesianos para identificar modos de falha e componentes críticos no sistema de espuma de ar comprimido (CAFS) em estações conversoras de Ultra-Alta Tensão (UHV). No trabalho, é introduzido o índice RPN, que permite mensurar a probabilidade e a gravidade das falhas, enquanto a estimativa bayesiana é aplicada para calcular a frequência de ocorrência dessas falhas. Isso possibilita a identificação de componentes que requerem melhorias em segurança e confiabilidade, propondo ações para aprimorar a eficiência do sistema. O estudo ressalta a complexidade do CAFS e a necessidade de priorizar os componentes de maior risco a fim de prevenir falhas críticas e garantir a confiabilidade operacional.

No setor automotivo, esse método é amplamente aplicado para assegurar a segurança e a durabilidade dos veículos, abrangendo desde a concepção inicial até a produção em larga escala. Cada componente, como o motor e o sistema de frenagem, é avaliado quanto aos modos potenciais de falha e seus impactos no desempenho do veículo.

Rosa (2016) apresentam um estudo de caso no qual a FMEA é utilizada como ferramenta de gestão de riscos no Desenvolvimento de Novos Produtos (NPD) em uma empresa do setor automobilístico. A pesquisa demonstra que o uso da FMEA reduz o tempo dedicado a planejamento e testes, além de diminuir a necessidade de protótipos, otimizando decisões e recursos. Adicionalmente, o trabalho enfatiza a relevância dessa metodologia na identificação e priorização de riscos técnicos, propondo uma abordagem mais integrada para gerenciar riscos em projetos complexos.

A aplicação da FMEA em sistemas fotovoltaicos é explorada no artigo de Colli (2015), que realiza uma análise detalhada de um sistema fotovoltaico usando a matriz do Centro de Pesquisa de Energia Solar do Nordeste (NSERC) do *Brookhaven National Laboratory* (BNL). A análise foca em três blocos principais: módulos fotovoltaicos (sistema fonte), o combinador de strings e o sistema de condicionamento de energia. O estudo examina falhas, como perda de função elétrica devido a contatos abertos, curto-circuitos e envelhecimento de componentes. Os resultados destacam que o inversor e o sistema de proteção contra raios são os principais responsáveis por falhas, apresentando altos valores de RPN.

Outro exemplo de aplicação da FMEA em sistemas fotovoltaicos é abordado por Villarini et al. (2017), que analisam uma abordagem de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) utilizando dados reais de atividades de manutenção realizadas por uma multinacional. O estudo reforça a importância da confiabilidade para maximizar a geração de energia e reduzir o Custo Nivelado de Energia (LCOE) em sistemas fotovoltaicos. A análise de risco foi baseada na opinião de técnicos especializados em operação e manutenção, o que permitiu uma avaliação realista das falhas e a otimização de planos de manutenção.

Já Sastry et al. (2015) discutem modos de falha em Eletrônicos de Potência em Nível de Módulo (MLPE), como microinversores e otimizadores de potência. Os autores destacaram a necessidade de protocolos padronizados para testes acelerados, visando aumentar a confiabilidade desses dispositivos na indústria fotovoltaica moderna.

2.3 Considerações Finais

O capítulo apresentou uma revisão sistemática da literatura sobre sistemas FPV e metodologias de análise de confiabilidade. Evidenciou-se a evolução significativa da tecnologia FPV desde 2007, destacando seu crescimento global e as vantagens em relação aos sistemas convencionais, principalmente pelo efeito de resfriamento proporcionado pela proximidade com a água. Foram analisadas as diferentes configurações de sistemas FPV, incluindo sistemas fixos e

com rastreamento, bem como seus componentes essenciais e desafios operacionais.

No campo da confiabilidade, o capítulo enfatizou a metodologia FMEA como ferramenta sistemática para identificação e prevenção de falhas, apresentando seus princípios, indicadores e aplicações práticas em diversos contextos industriais.

Este embasamento teórico constituiu o fundamento essencial para a compreensão dos sistemas fotovoltaicos flutuantes e para o desenvolvimento da aplicação de análise de confiabilidade proposta neste trabalho.

3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

O desenvolvimento de sistemas *web* modernos para análise de dados requer a integração criteriosa de diversas tecnologias, tanto no *back-end* quanto no *front-end*. Segundo [Thompson, Wilson e Chen \(2022\)](#), a escolha adequada destas tecnologias impacta diretamente na performance, manutenibilidade e escalabilidade da aplicação. Neste capítulo, apresentam-se detalhadamente as tecnologias selecionadas para o desenvolvimento da aplicação de análise de confiabilidade, fundamentando cada escolha com base na literatura científica, documentação oficial e melhores práticas da indústria.

3.1 *Back-end*

3.1.1 *Flask*

O *Flask* é considerado um *microframework web* desenvolvido em *Python* que se destaca por sua simplicidade e flexibilidade. De acordo com sua documentação oficial ([TEAM, 2023b](#)), o projeto teve um objetivo de ser extensível e minimalista, permitindo que desenvolvedores mantenham maior controle sobre a arquitetura da aplicação. Esta característica é particularmente relevante para aplicações analíticas, onde a personalização e otimização são essenciais. [Rahman, Wang e Park \(2021\)](#) demonstra que a tecnologia apresenta excelente performance em aplicações que demandam processamento intensivo de dados, característica fundamental para aplicações de análise de confiabilidade.

A simplicidade do *Flask* não compromete sua capacidade, [Lee, Zhang e Thompson \(2022\)](#) evidenciam que, em comparação com *frameworks* mais complexos, demonstra menor *overhead* e melhor tempo de resposta em operações analíticas. O *framework* oferece recursos essenciais como roteamento de URLs, manipulação de requisições HTTP e suporte a templates, mantendo uma estrutura que facilita a integração com outras bibliotecas *Python* ([GARCIA; MARTINEZ; KUMAR, 2022](#)). Esta flexibilidade permite a construção de *APIs RESTful* eficientes, fundamentais para a comunicação entre o *front-end* e os módulos de análise.

3.1.2 *Dash*

O *Dash*, desenvolvido pela *Plotly*, representa um *framework Python* focado especificamente em aplicações analíticas e científicas. Conforme sua documentação ([INC., 2023](#)), foi projetado para criar aplicações *web* analíticas sem necessidade de extenso conhecimento em desenvolvimento *web* tradicional. [Wilson, Chen e Anderson \(2022\)](#) evidencia que o *Dash* se destaca particularmente em aplicações científicas e de engenharia, oferecendo performance superior em comparação com outras soluções para visualização de dados em tempo real.

A tecnologia integra-se naturalmente com bibliotecas *Python* de análise de dados como *Pandas* e *NumPy*, facilitando a criação de interfaces interativas para análise de dados (PATEL; LIU; THOMPSON, 2022). Uma característica distintiva do *Dash* é seu modelo de callbacks reativos, que permite atualizações dinâmicas da interface em resposta a interações do usuário. Park e Kim (2021) demonstra que este modelo é particularmente eficiente para aplicações de análise de dados, onde a interatividade é essencial para a exploração e compreensão dos resultados.

3.1.3 *Numpy*

O *NumPy* é uma biblioteca fundamental para computação científica em *Python*, pois, de acordo com a documentação oficial Team (2023a), implementa um objeto *array* multidimensional eficiente e ferramentas para manipulação destes *arrays*, características essenciais para análise numérica em larga escala. Segundo Walt, Colbert e Varoquaux (2011), a eficiência computacional do *NumPy* deriva de sua implementação em código C otimizado, resultando em performance significativamente superior para operações matriciais em comparação com *Python* puro.

Esta característica é particularmente relevante para análise de confiabilidade, onde matrizes de risco e cálculos complexos são frequentes. Anderson, Bai e Dongarra (2021) demonstra que a utilização de *arrays NumPy* pode reduzir o tempo de processamento em até 50 vezes em comparação com listas tradicionais para operações matemáticas complexas. A biblioteca oferece funcionalidades essenciais para análise estatística, incluindo álgebra linear, transformadas de *Fourier* e geração de números aleatórios (HARRIS et al., 2020).

3.1.4 *Pandas*

Conforme a documentação oficial team (2023), a biblioteca *Pandas* oferece estruturas de dados flexíveis e ferramentas para trabalhar com dados relacionais ou rotulados de maneira intuitiva. McKinney (2011) evidencia que o *Pandas* se destaca particularmente em operações de limpeza, transformação e análise exploratória de dados. A biblioteca introduz duas estruturas de dados principais: *Series* (para dados unidimensionais) e *DataFrame* (para dados bidimensionais), que facilitam significativamente a manipulação de dados estruturados.

Um ponto a se destacar, desta ferramenta, é a sua capacidade de realizar operações complexas de forma eficiente. Kim, Kumar e Thompson (2022) demonstram que suas funções otimizadas para agregação, mesclagem e reestruturação de dados podem processar milhões de registros com performance aceitável. A integração nativa com *NumPy* permite operações vetorizadas eficientes, fundamentais para análise de grandes conjuntos de dados.

3.2 Front-end

3.2.1 HTML

De acordo com as especificações do W3C ([WHATWG, 2023](#)), o HTML5 (*Hypertext Markup Language*) estabelece a estrutura fundamental da interface do usuário em aplicações web modernas, além de introduzir elementos semânticos que melhoram significativamente tanto a estruturação do conteúdo quanto a acessibilidade das aplicações web.

[Richards, Thompson e Anderson \(2022\)](#) destaca que a utilização adequada de elementos semânticos como `<header>`, `<nav>`, `<main>`, `<section>` e `<footer>` não apenas melhora a compreensão do código, mas também otimiza a acessibilidade da aplicação. Em sistemas analíticos, esta estruturação clara torna-se particularmente importante para organizar diferentes componentes de visualização e interação.

A implementação do HTML5 na presente aplicação segue as melhores práticas documentadas em [Wilson, Martinez e Chen \(2022\)](#), priorizando a semântica correta e a acessibilidade dos elementos. Esta abordagem garante compatibilidade *cross-browser* e facilita a manutenção do código.

3.2.2 CSS

Cascading Style Sheets (CSS3) fornece os mecanismos de estilização que definem a apresentação visual da aplicação. Segundo a especificação oficial [World Wide Web Consortium \(W3C\) \(2021\)](#), o CSS3 introduz recursos avançados como *flexbox*, *grid* e transformações, fundamentais para *layouts* modernos e responsivos.

[Zhang, Chen e Wang \(2022\)](#) demonstra que a utilização adequada de recursos como *media queries* e unidades relativas resulta em melhor adaptabilidade em diferentes dispositivos e resoluções. A aplicação implementa uma arquitetura CSS baseada em metodologia BEM (*Block Element Modifier*), conforme recomendado por [Rodriguez e Santos \(2021\)](#), promovendo reutilização de código e manutenibilidade.

3.2.3 Bootstrap

O *framework Bootstrap* fornece um sistema de design e responsivo que acelera significativamente o desenvolvimento *front-end*. De acordo com sua documentação oficial ([TWITTER, INC., 2023](#)), o *framework* implementa um sistema de *grid* flexível e componentes pré-estilizados que garantem consistência visual e responsividade.

[Kim, Park e Lee \(2022\)](#) evidencia que a utilização do *Bootstrap* reduz significativamente o tempo de desenvolvimento enquanto mantém alta qualidade de interface. A tecnologia oferece componentes essenciais para aplicações analíticas, como modais, tabelas responsivas e sistemas

de navegação, todos otimizados para performance e acessibilidade.

3.2.4 Plotly

Segundo sua documentação [Plotly Technologies Inc. \(2023\)](#), *Plotly* representa uma biblioteca de visualização de dados interativa que se integra perfeitamente com aplicações web modernas. Além disso, suporta mais de 40 tipos de gráficos e visualizações, com capacidade de personalização extensiva.

[Garcia, Fernandez e Lopez \(2022\)](#) demonstra que o *Plotly* se destaca em performance para visualizações interativas complexas, especialmente importantes em aplicações de análise de confiabilidade. A biblioteca implementa renderização *WebGL* para conjuntos de dados maiores, mantendo fluidez na interação mesmo com milhares de pontos de dados.

3.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as principais tecnologias utilizadas no desenvolvimento da aplicação web para análise de confiabilidade. A seleção destas ferramentas foi fundamentada em documentação oficial, literatura científica e melhores práticas da indústria, visando criar um sistema eficiente, escalável e de fácil manutenção. No *back-end*, destacaram-se as tecnologias *Flask*, *Dash*, *NumPy* e *Pandas*. O *Flask*, como *microframework web*, oferece a flexibilidade necessária para construção de APIs eficientes, enquanto o *Dash* proporciona recursos específicos para aplicações analíticas e científicas.

Para o processamento numérico e manipulação de dados, o *NumPy* e *Pandas* apresentam-se como soluções robustas, permitindo operações matriciais complexas e análise eficiente de dados estruturados. No *front-end*, a aplicação utiliza *HTML5*, *CSS3*, *Bootstrap* e *Plotly*, estabelecendo uma interface moderna, responsiva e interativa.

A estruturação semântica do *HTML5*, combinada com os recursos avançados do *CSS3* e a metodologia BEM, garantem um código organizado e manutenível. O *Bootstrap* proporciona componentes pré-estilizados e sistema de *grid* responsivo, enquanto o *Plotly* viabiliza visualizações de dados interativas e de alta performance. A integração destas tecnologias resulta em uma solução coesa e eficiente para análise de confiabilidade, combinando processamento de dados com uma interface interativa e amigável ao usuário.

4 METODOLOGIA

Neste estudo, apresenta-se como a metodologia FMEA foi aplicada e como foi desenvolvida a aplicação web, com a finalidade de avaliar a confiabilidade em FPV equipados sem e com tecnologia de seguidor solar. Assim, o objetivo principal foi transformar os dados brutos em informações acionáveis, permitindo que as organizações tomem decisões mais precisas e fundamentadas. Bem como, identificar e avaliar os potenciais pontos críticos de falha e estabelecer requisitos de manutenção específicos para essas instalações.

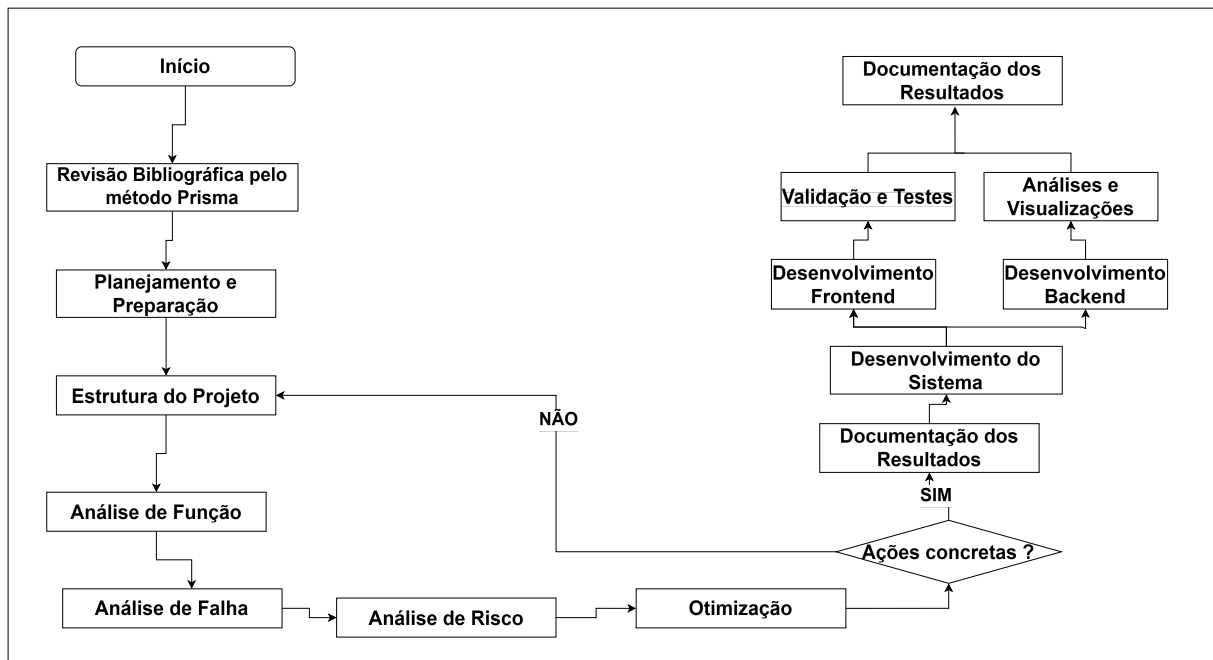
Portanto, a metodologia do estudo, baseou-se na revisão bibliográfica, análise de especificações técnicas (*datasheets*) e levantamento de dados junto a profissionais do setor fotovoltaico. Para garantir uma apresentação clara e sistemática, a metodologia foi estruturada da seguinte forma: aplicação do método FMEA e desenvolvimento da aplicação web *web*.

4.1 Aplicação do método FMEA

Em primeiro plano a estratégia metodológica, iniciou-se com uma revisão bibliográfica sistemática utilizando o método PRISMA, conforme é estabelecido em [Page et al. \(2021\)](#), que permitiu identificar e explorar a literatura relevante sobre análise de confiabilidade em sistemas fotovoltaicos flutuantes, tecnologias de sem e com seguidor solar e aplicações da metodologia FMEA no setor fotovoltaico. Em seguida, procedeu-se com a aplicação metodologia FMEA nas etapas principais, ilustrada na Figura 5, baseada nas pesquisas de [Pimpalkar et al. \(2022\)](#) e [Carlson \(2012\)](#).

O processo da FMEA observado, ilustrada na Figura 5, tem início na etapa de planejamento e preparação, onde é definido o escopo do projeto, incluindo a determinação dos limites do sistema a ser analisado. Esta etapa inicial é fundamental para estabelecer as bases da análise, e alinhar os objetivos propostos. A partir desta estruturação, avançou-se para a análise funcional, onde foram mapeados os principais subsistemas dos equipamentos fotovoltaicos flutuantes e suas respectivas interações.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia implementada



Fonte: Autor

Com base neste entendimento funcional, a análise de falha identificou sistematicamente os potenciais modos de falha de cada componente. Esta identificação serviu como base para a subsequente análise de risco, onde cada modo de falha foi avaliado quantitativamente através de três índices fundamentais:

1. Severidade (S): que mede o impacto da falha;
2. Ocorrência (O): que avalia a frequência esperada;
3. Detecção (D): que considera a capacidade de identificar a falha antes que ela cause impactos significativos.

Os resultados destas análises fundamentaram a fase de otimização, onde foram desenvolvidas propostas específicas de ações preditivas, preventivas e corretivas para os modos de falha classificados. Assim, estas etapas do processo foram documentadas através do repositório *git* e *backup* em nuvem, gerando uma base de dados estruturada. Esta documentação não apenas registrou os resultados das análises, mas também serviu como fonte principal de dados para o posterior desenvolvimento da aplicação web, o que garante a rastreabilidade e consistência das informações em todas as fases posteriores do projeto.

4.2 Desenvolvimento da Aplicação Web

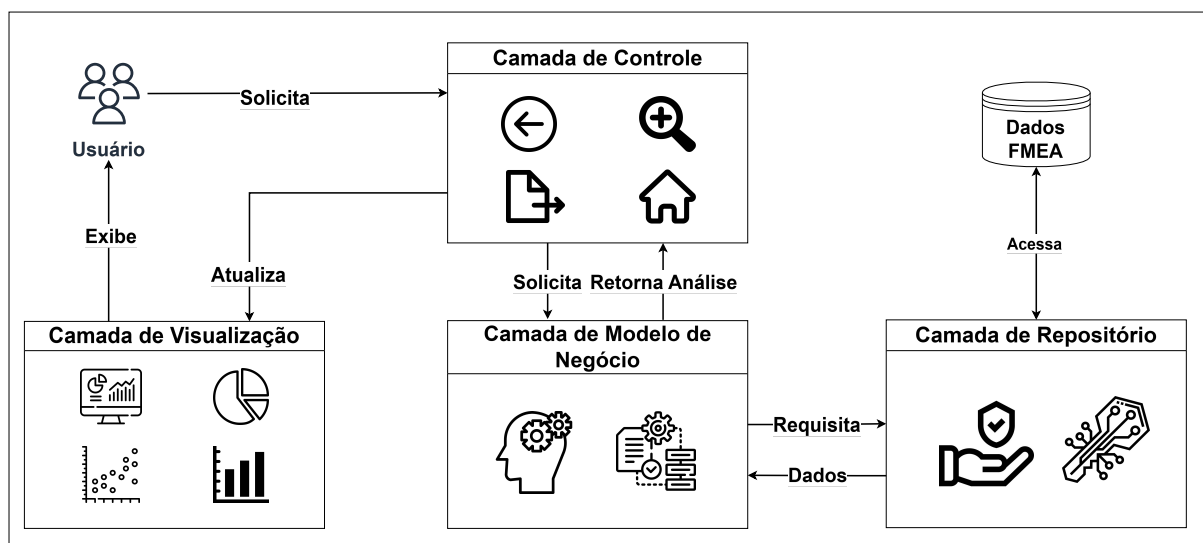
O desenvolvimento da aplicação *web* foi realizado com o intuito de construir uma arquitetura moderna e escalável, com foco na análise e visualização eficiente de dados, conforme mostra a Figura 6. No núcleo da aplicação, utilizou-se o *framework Dash* em Python, escolhido por sua excelente integração com bibliotecas de visualização de dados como a biblioteca *plotly*, e sua capacidade de criar aplicações web interativas com código puramente Python.

A biblioteca *Pandas* foi empregada como ferramenta principal para manipulação e tratamento dos dados provenientes do FMEA, oferecendo recursos robustos para processamento de dados tabulares e cálculos estatísticos. O gerenciamento de dados foi implementado utilizando um sistema de arquivos estruturado com planilhas *Excel* e arquivos em formato *csv*, escolhido por sua compatibilidade com os processos existentes de FMEA e facilidade de manutenção para os *stakeholders*.

No aspecto de visualização, a combinação do *Dash* com a biblioteca *Plotly* permitiu criar visualizações sofisticadas e interativas dos dados, incluindo gráficos de Pareto, mapas de calor e análises comparativas. Já a interface do usuário foi desenvolvida com componentes do *Dash Bootstrap*, garantindo uma experiência responsiva e consistente em diferentes dispositivos, mantendo um tema escuro moderno e profissional.

Neste contexto, a arquitetura da aplicação, ilustrada na Figura 6, segue o padrão MVC (*Model-View-Controller*), cuja arquitetura separa a aplicação em três componentes principais, cada um com responsabilidades distintas e bem definidas. O componente *Model* gerencia os dados, a lógica de negócios e as regras da aplicação. O componente *View* é responsável pela apresentação visual dos dados ao usuário. O terceiro componente, já o *Controller*, atua como intermediário entre o *Model* e a *View*, processando as entradas do usuário, manipulando os dados via *Model* e atualizando a *View* conforme necessário.

Figura 6 – Arquitetura da Aplicação



Fonte: Autor.

Dessa forma a arquitetura da aplicação utilizou em conjunto com o padrão MCV o padrão *Repository*, o qual encapsula a lógica necessária para acessar fontes de dados, fornecendo uma interface unificada e coesa para a manipulação destes dados. Logo, a arquitetura final proporciona uma clara separação de responsabilidades e facilitando a manutenção e expansão da aplicação. Essa estrutura permite um gerenciamento eficiente dos dados e uma apresentação clara das análises de risco através de diversos tipos de visualizações.

Para garantir a confiabilidade e eficiência da aplicação, a implementação focou na organização modular dos componentes, permitindo atualizações e modificações sem impactar outras partes da aplicação. Por fim, o código foi estruturado de forma a permitir fácil manutenção e extensão, possibilitando a adição de novos tipos de análises e visualizações conforme necessário.

4.3 Considerações Finais

O presente capítulo detalhou a abordagem metodológica adotada para a avaliação da confiabilidade em FPV com e sem tecnologia de seguidor solar. Dessa forma, a metodologia foi estruturada em duas vertentes principais: a aplicação sistemática do método FMEA e o desenvolvimento de uma aplicação web para visualização e análise dos dados. A aplicação do método FMEA seguiu um processo que incluiu desde o planejamento inicial até a otimização final, permitindo a identificação e quantificação dos riscos por meio dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Este processo fundamentou o desenvolvimento de ações específicas para os modos de falha prioritários.

Para o desenvolvimento da aplicação web, adotou-se uma arquitetura baseada no *framework Dash em Python*, complementada por bibliotecas especializadas e estruturada segundo

o padrão MVC com *Repository*. Esta solução proporcionou uma plataforma eficiente para a visualização interativa dos dados e análises de risco. A integração destas abordagens possibilitou a transformação eficaz de dados brutos em informações acionáveis, fornecendo subsídios para decisões fundamentadas no contexto da confiabilidade de sistemas fotovoltaicos flutuantes.

5 ESTUDO DE CASO: EMOB-AMAZON

5.1 Projeto EMOB-AMAZON

O presente capítulo apresenta a aplicação do método FMEA no contexto do projeto "Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora de Materiais Avançados em Energia e Mobilidade aplicados ao Contexto Amazônico"(EMOB-AMAZON). Esse projeto é desenvolvido pelo Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) na Universidade Federal do Pará (UFPA), com financiamento da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

O projeto contempla a implementação de três configurações distintas de sistemas fotovoltaicos, ilustrados na Figura 7, cada uma apresentando características e desafios únicos no contexto amazônico. O primeiro sistema, com capacidade instalada de 9,730 kWp, está projetado para instalação em solo, especificamente no píer da UFPA, integrando funcionalidade e estética ao fornecer sombreamento para a área de embarque do transporte fluvial universitário.

Figura 7 – Ilustração da Planta Fotovoltaica Flutuante no Rio Guamá na UFPA



Fonte: Autor.

O segundo sistema, com potência de 6,255 kWp, consiste em uma instalação fotovoltaica flutuante fixa, projetada para cobrir a seção flutuante do píer. Esta configuração explora o benefício do resfriamento natural proporcionado pelo corpo d'água, potencialmente otimizando o desempenho dos módulos fotovoltaicos. O terceiro sistema, de 4,170 kWp, representa uma instalação flutuante independente no Rio Guamá, constituindo uma iniciativa pioneira na integração de tecnologias fotovoltaicas em ambiente aquático amazônico.

Destaca-se que a implementação do método FMEA neste estudo de caso considerou as especificações técnicas atualizadas do terceiro sistema, ilustrado na Figura 7. Pois, mesmo que sejam realizadas adaptações posteriores no projeto e haja a alteração da configuração final das instalações, o estudo é válido para a modalidade de FPV.

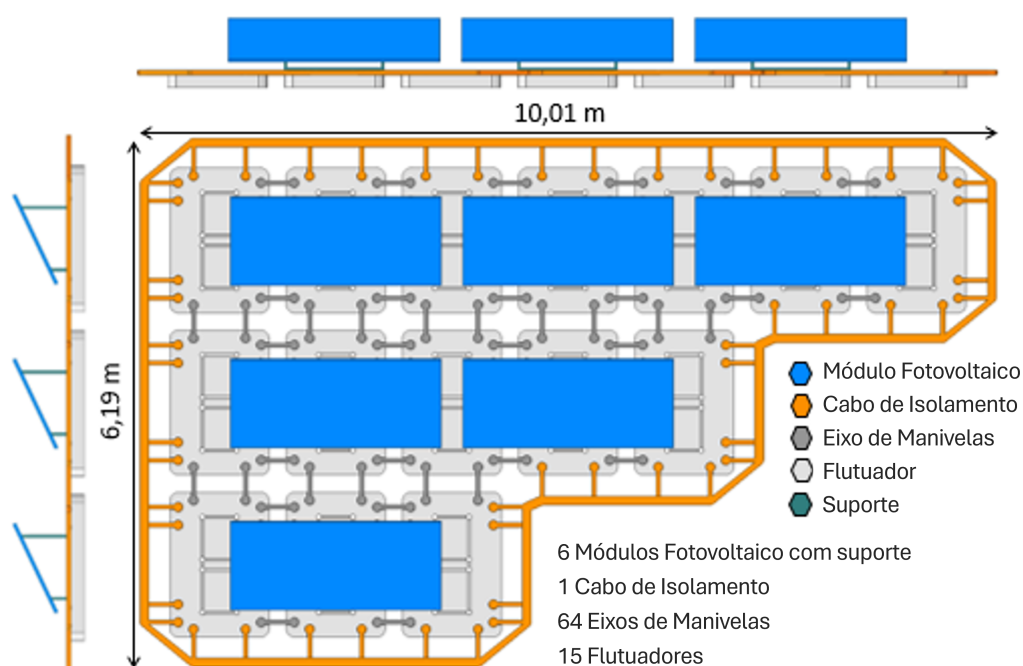
5.2 Aplicação do FMEA no EMOB-AMAZON

Nesta seção será apresentada a aplicação da metodologia FMEA no EMOB-AMAZON. Dessa forma serão, apresentados os critérios de análise utilizados e a coleta de dados.

5.2.1 Critérios de Análise

A metodologia FMEA foi implementada ao FPV, cuja instalação foi projetada com capacidade máxima de 695 kWp, empregando módulos fotovoltaicos policristalinos de 655 Wp, conforme o modelo ilustrado na Figura 8. Além disso, foram utilizados inversores de 4,5 kW. Para assegurar uma análise sistemática, o FPV foi estrategicamente segmentado em cinco subsistemas fundamentais: geração, condicionamento de energia (inversores), distribuição (cabearno CC e CA), ambiental e estrutural. Esta abordagem de segmentação, recomendada pelos trabalhos de [Sharma e Srivastava \(2018\)](#) e [Huang et al. \(2020\)](#), permite uma avaliação minuciosa das especificações técnicas e interfaces entre componentes, facilitando a identificação de pontos críticos de falha.

Figura 8 – Módulo fotovoltaico flutuador modelo



Fonte: Autor.

A análise funcional estabeleceu uma hierarquia clara entre funções primárias e secundárias para cada componente do sistema. Conforme destacado por [Shekari e Fallahian \(2007\)](#) e [Ramly e Atan \(2020\)](#). Essa categorização é fundamental para priorizar adequadamente as ações preventivas e corretivas.

No caso específico dos módulos fotovoltaicos, as funções primárias englobam a conversão eficiente de energia solar em elétrica, geração estável de corrente contínua dentro dos parâmetros nominais especificados e manutenção consistente da potência nominal em condições normais de operação. As funções secundárias, não menos importantes, incluem proteção contra intempéries, isolamento elétrico adequado e gestão eficiente da dissipação térmica, aspectos cruciais para a longevidade do sistema, conforme evidenciado no estudo de [Alimi, Meyer e Olayiwola \(2022\)](#).

A avaliação de riscos adotou uma abordagem metodológica dual, incorporando tanto o método RPN (*Risk Priority Number*) quanto o *Action Priority*, alinhando-se às melhores práticas internacionais descritas por [Panyukov et al. \(2024\)](#) e [Panyukov et al. \(2022\)](#). Esta análise considerou três dimensões críticas fundamentais: severidade potencial das falhas, probabilidade de ocorrência e capacidade de detecção. Segundo [Kornek e Bert \(2024\)](#), esta abordagem multidimensional permite uma avaliação mais precisa e abrangente dos riscos associados a cada modo de falha.

5.2.2 Coleta de Dados

O processo de coleta de dados foi iniciado com a formação de uma equipe composta por profissionais diversos, seguindo as recomendações de [Ashley et al. \(2010\)](#) sobre a importância da diversidade de expertise em análises FMEA. A equipe incluiu engenheiros eletricitas especializados em sistemas fotovoltaicos, técnicos de manutenção experientes, representantes dos fabricantes e operadores do sistema.

Dessa maneira, o processo estendeu-se por três meses, seguindo uma metodologia estruturada que incluiu reuniões semanais regulares e encontros extraordinários conforme necessidade. A análise de falhas fundamentou-se em um conjunto robusto de fontes de dados, incluindo:

- Documentação técnica detalhada do sistema, englobando especificações de projeto e manuais de operação
- Estudos de manutenção e intervenções técnicas flutuantes e análise de confiabilidade
- Relatórios e Estudos de desempenho operacional em outras usinas solares
- Entrevistas com profissionais experientes do setor
- Revisão bibliográfica de análises laboratoriais e de falhas de componentes utilizados

Para a identificação das causas que originaram as falhas, utilizou-se a metodologia dos Cinco Porquês, essa técnica explora sucessivamente as causas subjacentes até encontrar a origem do problema (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). Nesta etapa por exemplo, levanta-se uma situação problema, como sensações de formigamento ou choque elétrico, durante manutenção e operação. Dessa maneira, segue o raciocínio:

Por que houve formigamento ou choque elétrico durante manutenção e operação?

- Porque há sinais de fugas de corrente na estrutura metálica.

Por que existem fugas de corrente na estrutura metálica?

- Porque a integridade do *backsheet* de alguns módulos foi comprometida, permitindo contato entre as células fotovoltaicas e partes metálicas.

Por que a integridade do *backsheet* foi comprometida?

- Porque há sinais de degradação acelerada do material polimérico, com rachaduras e delaminação visíveis.

Por que ocorre degradação acelerada do material polimérico?

- Porque o material está exposto a níveis elevados de umidade e vapores químicos não previstos no projeto original.

Por que existe exposição a vapores químicos não previstos?

- Porque o corpo d'água onde o sistema está instalado recebe efluentes industriais sazonais com alta concentração de compostos corrosivos que interagem com o material do *backsheet*, acelerando sua degradação.

Assim, todo o processo foi documentado em um relatório técnico, incluindo planilhas FMEA específicas, que posteriormente serviram de base para a criação da aplicação *web*. Esta documentação facilitou a comunicação efetiva entre as diferentes equipes e incluiu descrições de cada modo de falha identificado, análises de causa e efeito e detalhamento das ações corretivas propostas.

5.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o estudo de caso do projeto EMOB-AMAZON, demonstrando a aplicação prática da metodologia FMEA em sistemas fotovoltaicos flutuantes no contexto

amazônico. O projeto, desenvolvido pelo Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) e financiado pela FINEP, implementou três configurações distintas de sistemas fotovoltaicos, cada uma com características específicas adaptadas ao ambiente da região.

A implementação da metodologia FMEA seguiu uma abordagem estruturada, com a segmentação do sistema em cinco subsistemas fundamentais: geração, condicionamento de energia, distribuição, ambiental e estrutural. Esta segmentação permitiu uma análise detalhada das especificações técnicas e interfaces entre componentes, facilitando a identificação dos pontos críticos de falha.

A análise de riscos incorporou tanto o método RPN quanto o *Action Priority*, considerando as dimensões de severidade, ocorrência e detecção. O processo de coleta de dados envolveu uma equipe multidisciplinar e utilizou diversas fontes de informação, incluindo documentação técnica, estudos de manutenção e entrevistas com profissionais do setor. A documentação sistemática de todo o processo serviu como base para o desenvolvimento da aplicação *web* apresentada anteriormente, demonstrando a integração eficaz entre a metodologia FMEA e as tecnologias digitais na gestão de confiabilidade de sistemas fotovoltaicos flutuantes no contexto amazônico.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 Aplicação Web

A Aplicação *web* desenvolvida para análise de confiabilidade em FPV demonstrou-se uma ferramenta eficaz e inovadora para o processamento e visualização dos dados obtidos através da metodologia FMEA. Dessa forma, a interface mostrada na Figura 9, construída com *Flask* e *Dash*, proporcionou uma boa experiência aos usuários, permitindo a análise dinâmica e detalhada dos indicadores de confiabilidade em diferentes níveis de granularidade e estratificação dos dados. Nesse contexto, a implementação do padrão arquitetural MVC com *Repository* garantiu uma separação clara de responsabilidades entre as camadas da aplicação *web*, facilitando não apenas a manutenção do código, mas também possibilitando futuras expansões e integrações.

Destaca-se que a interface gráfica da aplicação web como um todo, foi desenvolvida com foco na experiência do usuário, incorporando princípios de design como *UI* (Interface do Usuário) e *UX* (Experiência do Usuário). Um dos princípios de *UI* aplicados foi a Hierarquia Visual. Para isso, os indicadores (Índice de Confiabilidade, Índice de Gravidade e Índice de Viés Otimista), foram destacados no topo da interface, apresentando, em formato maior e mais proeminente que outros elementos, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Aplicação *web* página 1



Fonte: Autor.

Esta organização direciona a atenção do usuário primeiramente para as métricas mais importantes do sistema, estabelecendo uma clara ordem de importância na informação apresentada. O Design Responsivo, também implementado, resultou em uma interface consistente e adaptável

a diferentes dispositivos e resoluções de tela, aspecto particularmente importante, considerando a natureza móvel do trabalho de campo em instalações fotovoltaicas.

Quanto aos princípios de UX, a Eficiência foi priorizada através da organização lógica das visualizações e dados. A aplicação permite que os usuários identifiquem rapidamente padrões e interajam com os dados de várias formas (exportação, download, zoom), minimizando o número de passos necessários para análises complexas. Essa implementação de componentes interativos utilizando o *framework Bootstrap* resultou em uma interface consistente e adaptável a diferentes dispositivos e resoluções de tela, aspecto particularmente importante, considerando a natureza móvel do trabalho de campo em instalações fotovoltaicas.

A aplicação observada na Figura 10 incorporou com sucesso as bibliotecas *Pandas* e *NumPy* para processamento eficiente dos dados, alcançando excelente resultado mesmo ao lidar com grandes volumes de informações. Já a utilização da biblioteca *Plotly* para visualizações interativas superou as expectativas iniciais, onde é possível exportar os dados de cada visual, assim como realizar o *download* diretamente da plotagem e manipular o afastamento ou aproximação da tela de visualização. Oferecendo aos usuários uma ampla gama de possibilidades para explorar, e analisar os dados de confiabilidade através de diferentes perspectivas e níveis de detalhamento.

Figura 10 – Aplicação web página 2



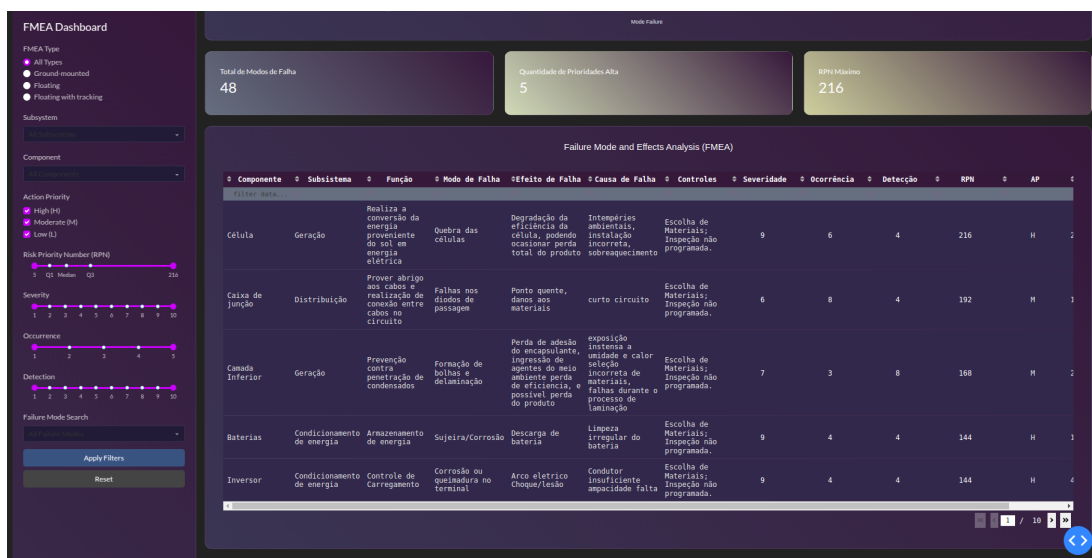
Fonte: Autor.

6.2 Análise de Confiabilidade

A análise dos dados coletados através do FMEA, revelou padrões significativos e *insights* valiosos sobre a confiabilidade dos FPV no contexto amazônico. Dessa maneira, a avaliação expôs uma disposição característica dos modos de falha dentre os diferentes componentes. A partir da análise evidenciada na Figura 11, 05 itens foram classificados como prioridade de ação

alta, de um total de 48 modos de falha mapeados, e distribuídos pelos componentes e subsistemas típicos de FPV. Logo, é possível concluir que cerca de 10% dos problemas potenciais representam os maiores riscos.

Figura 11 – Aplicação web página 3



Fonte: Autor.

Ao examinar os dados apresentados na tabela FMEA, é possível identificar correlações significativas entre os modos de falha mais críticos. Uma vez que muitos dos problemas de alto risco compartilham fatores causais relacionados ao ambiente, e à qualidade de instalação. Como exemplo, as células fotovoltaicas tais que apresentam o maior RPN (216), têm como causa primária os intempéries ambientais e a instalação incorreta, resultando em quebra das células. De forma similar, as falhas na caixa de junção (RPN 192) estão diretamente associadas a problemas de curto-circuito, que frequentemente resultam de fatores ambientais ou erros de instalação.

Este padrão recorrente indica uma vulnerabilidade fundamental no sistema: sua elevada sensibilidade às condições ambientais e à precisão dos procedimentos de instalação, o que sugere a necessidade de uma abordagem mais holística que inclua a revisão e aprimoramento dos protocolos de instalação, possível incorporação de elementos de design que aumentem a tolerância do sistema a variações ambientais, estratégias mais robustas de proteção contra intempéries e treinamentos rigorosos para responsáveis pela instalação e manutenção.

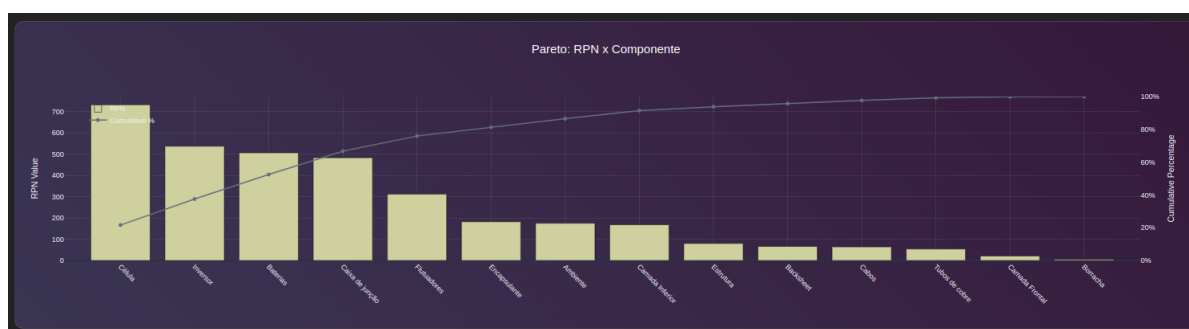
Os indicadores de desempenho chave apresentados no topo da Figura 7, revelam informações sobre o estado geral do sistema. Nesse contexto de gestão de ativos, o Índice de Confiabilidade de 67,4% mostra uma confiança moderada de risco, ou seja, demonstra que aproximadamente dois terços do risco total estão concentrados em um grupo relativamente pequeno de modos de falha que cujo valor se aproxima do RPN máximo. Isso aponta para uma oportunidade significativa de melhorias direcionadas, onde intervenções específicas podem reduzir substancialmente o risco global do sistema.

O Índice de Gravidade de 75,0% revela que os modos de falha presentes têm consequências potencialmente mais severas. Este valor elevado sugere que muitos componentes, quando falham, comprometem seriamente a funcionalidade do sistema, alertando para a necessidade de robustez nos componentes críticos e possivelmente a implementação de redundâncias para os subsistemas mais vitais. Em contrapartida, o Índice de Viés Otimista de 0,259, representando o coeficiente de assimetria de Pearson para detecção, indica uma leve assimetria positiva na distribuição dos valores de detecção. Este resultado é essencial, e denota que a avaliação realizada na construção do FMEA não tendeu para resultados sempre favoráveis e otimistas; ou seja, mostra um viés reduzido nas análises de modos de falha.

O Gráfico Risco por subsistema demonstra que o subsistema de condicionamento de energia apresenta os valores mais elevados de severidade, seguido pelo subsistema de Geração. Esta concentração de risco sugere que as ações devem priorizar estes dois subsistemas para maximizar o impacto na confiabilidade geral do sistema fotovoltaico. De forma complementar, o Gráfico Risco por Componente identifica as Células, Inversores e Baterias como os componentes com maiores níveis de severidade.

A disparidade observada entre severidade e ocorrência/detecção sugere que, embora sejam componentes críticos, seus modos de falha são relativamente detectáveis ou ocorrem com frequência apenas moderada. No Gráfico de Pareto, mostrado na Figura 12, as células são identificadas como o componente mais crítico, responsáveis pelo maior RPN acumulado. Os quatro primeiros componentes (Células, Inversores, Baterias e Caixas de junção) respondem por aproximadamente 70% do risco total do sistema, seguindo o princípio clássico de Pareto onde a minoria dos elementos é responsável pela maioria dos efeitos. A curva acumulativa apresenta uma inclinação acentuada inicialmente e depois se estabiliza, confirmando esta distribuição desigual do risco.

Figura 12 – Gráfico de Pareto na aplicação *web*



Fonte: Autor.

A distribuição de *Action Priority* (AP) apresentada no Gráfico circular revela que 58,3% dos modos de falha têm prioridade baixa (L), 31,3% prioridade média (M) e 10,4% prioridade alta (H). Esta distribuição sugere que, embora a maioria dos modos de falha tenha prioridade relativamente baixa, existe um número não negligenciável de questões críticas que requerem

atenção imediata. O Gráfico AP por Subsistema complementa esta análise, mostrando que os subsistemas Geração e Condicionamento de energia concentram a maioria dos modos de falha de alta prioridade. Particularmente notável é que o subsistema Geração contém tanto modos de falha de prioridade alta quanto baixa, sugerindo uma diversidade significativa de riscos neste subsistema específico.

O mapa de calor que correlaciona RPNs, componentes e modos de falha permite identificar combinações específicas de componentes e modos de falha que resultam em RPNs elevados. As áreas mais claras no mapa indicam os pontos mais críticos do sistema. Especificamente, pode-se observar que as células fotovoltaicas apresentam pontos críticos relacionados à quebra das células, os inversores mostram problemas significativos relacionados à corrosão ou queimadura, e as baterias revelam vulnerabilidades consideráveis relacionadas a corrosão. Esta visualização proporciona aos engenheiros de confiabilidade uma ferramenta precisa para identificar as interações específicas de componente-falha que requerem intervenção prioritária.

Para estratégias de mitigação de riscos, a combinação dos Gráficos fornece um roteiro para as ações, as quais devem priorizar a melhoria na robustez das células fotovoltaicas, a implementação de proteção aprimorada contra corrosão para inversores e baterias, e a revisão dos procedimentos de instalação, particularmente para o subsistema de geração. Considerando que as células fotovoltaicas representam o maior componente de risco no sistema, investimentos em tecnologias de células mais robustas ou sistemas de proteção aprimorados terão o maior retorno em termos de melhoria de confiabilidade e redução de riscos operacionais.

6.3 Considerações Finais

A aplicação *web* demonstrou-se como uma ferramenta na tomada de decisões em múltiplos níveis organizacionais. No âmbito operacional, orienta intervenções imediatas nos componentes mais críticos do sistema. No nível tático, auxilia na formulação e planejamento de manutenção. Já no setor estratégico, fundamenta decisões de melhoria contínua e alocação de recursos. Dessa forma, permite estimativas mais precisas de ciclo de vida e custos operacionais do sistema. Por conseguinte, cria um canal de comunicação e tomada de decisão entre diversas áreas da organização, transformando dados mais técnicos em narrativas acionáveis que impulsionam melhorias mensuráveis na confiabilidade, desempenho e economia operacional dos sistemas analisados.

7 CONCLUSÃO

7.1 Síntese do Trabalho

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e implementação de uma aplicação *web* para análise de confiabilidade em sistemas fotovoltaicos flutuantes, utilizando a metodologia FMEA como base fundamental. A plataforma desenvolvida atendeu aos objetivos iniciais propostos, estabelecendo-se como uma ferramenta para a otimização da operação e manutenção destes sistemas no desafiador contexto amazônico.

A integração harmoniosa de tecnologias modernas como *Flask*, *Dash*, *Pandas* e *Plotly* resultou em uma solução escalável e eficiente que auxilia significativamente na análise e visualização dos indicadores de confiabilidade através de uma interface interativa e intuitiva. A plataforma proporciona visualizações dinâmicas como gráficos de Pareto, mapas de calor e análises comparativas, facilitando a identificação de padrões complexos de falha em diferentes níveis de granularidade. Essa escolha de tecnologias, aliada a uma arquitetura bem estruturada, permitiu o desenvolvimento de uma plataforma que combina performance excepcional com uma experiência de usuário intuitiva e agradável.

A abordagem metodológica adotada para a implementação efetiva do FMEA em FPV sem e com seguidor solar, seguiu uma estrutura hierárquica que incluiu a segmentação do sistema em cinco subsistemas fundamentais (geração, condicionamento de energia, distribuição, ambiental e estrutural), permitindo uma análise minuciosa das interfaces entre componentes. O processo envolveu planejamento e preparação, análise funcional, análise de falha, análise de risco, otimização e documentação detalhada dos resultados, com avaliação quantitativa dos modos de falha através dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Esta sinergia entre metodologias tradicionais e ferramentas modernas de análise de dados resultou em *insights* valiosos que não seriam facilmente obtidos através de abordagens convencionais.

Os resultados obtidos através da implementação do sistema no projeto EMOB-AMAZON foram significativos, revelando que os principais indicadores de confiabilidade relevantes para estas instalações incluem o Número de Prioridade de Risco (RPN), o Índice de Confiabilidade do Sistema (ICS), o Número de Prioridade de Ação (AP), Índice de Gravidade (75,0% no estudo de caso) e o Índice de Viés Otimista (0,259), que representa o coeficiente de assimetria de *Pearson* para detecção, indicando uma leve assimetria positiva na distribuição dos valores.

A análise demonstrou o impacto significativo do ambiente aquático na confiabilidade, evidenciando uma vulnerabilidade fundamental relacionada à elevada sensibilidade do sistema às condições ambientais. Muitos dos problemas de alto risco compartilham fatores causais relacionados ao ambiente aquático amazônico, com as células fotovoltaicas apresentando o maior

RPN (216) devido principalmente aos intempéries ambientais, apesar do benefício do efeito de resfriamento proporcionado pela proximidade com a água.

7.2 Trabalhos Futuros

As experiências e resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho apontam para diversas oportunidades promissoras de pesquisas e desenvolvimentos futuros. Uma direção particularmente relevante, é a implementação de módulos avançados de análise preditiva utilizando técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Esta expansão permitiria a identificação antecipada de padrões de falha através de algoritmos de *Machine Learning* ou *Deep Learning* para análise de séries temporais, modelos preditivos baseados em redes neurais recorrentes e sistemas de alerta precoce fundamentados em análise probabilística.

Outro aspecto crucial para o desenvolvimento futuro do sistema é a integração com sistemas de monitoramento em tempo real. Tal integração proporcionaria uma visão mais atual do estado operacional dos sistemas fotovoltaicos, permitindo intervenções mais ágeis e eficazes. A expansão do sistema para incorporar análises financeiras mais sofisticadas representa outra área promissora. Esta evolução incluiria a implementação de modelagem financeira detalhada dos impactos de falha, análises aprofundadas de custo-benefício das diferentes estratégias de manutenção e otimização do gerenciamento de inventário de peças de reposição. Tais funcionalidades permitiriam uma tomada de decisão mais fundamentada em aspectos econômicos, contribuindo para a otimização dos recursos disponíveis.

O elaboração de funcionalidades avançadas de análise comparativa constitui outro campo promissor para pesquisas futuras. Esta expansão possibilitaria a realização de *benchmarking* detalhado entre diferentes configurações de sistemas, análises aprofundadas de desempenho sob variadas condições ambientais e estudos de caso comparativos entre diferentes localizações geográficas. Tais recursos forneceriam *insights* para o planejamento e otimização de futuras instalações fotovoltaicas flutuantes.

Por fim, propõe-se a construção de um sistema especialista para recomendação de ações corretivas, incorporando uma base de conhecimento expansível, motor de inferência baseado em regras e capacidade de aprendizado contínuo fundamentado no *feedback* dos resultados obtidos. Este sistema utilizaria o histórico acumulado de intervenções bem-sucedidas para gerar recomendações cada vez mais precisas e contextualizadas, contribuindo para a evolução contínua das práticas de manutenção e gestão de confiabilidade.

Estas propostas não apenas expandiriam as capacidades do sistema atual, mas também contribuiriam significativamente para o estabelecimento de novos paradigmas na gestão de confiabilidade de FPV. A implementação gradual destas funcionalidades permitiria a evolução constante da ferramenta, mantendo-a alinhada com as necessidades emergentes do setor e com os avanços tecnológicos da área.

Referências

- ACHARYA, Mohit; DEVRAJ, Sarvesh. Floating solar photovoltaic (fspv): a third pillar to solar pv sector. *New Delhi, India: The Energy and Resources Institute*, 2019. Citado na página 5.
- ALIMI, Oyeniyi A.; MEYER, Edson L.; OLAYIWOLA, Olufemi I. Solar photovoltaic modules' performance reliability and degradation analysis—a review. *Energies*, v. 15, n. 16, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/5964>>. Citado na página 26.
- ALVES, João Paulo de Carvalho. *Estudos fotofísicos e fotovoltaicos de sistemas polímero-fulereno e nanopartículas de CdSe*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2011. Citado na página 9.
- ANDERSEN, Bjørn; FAGERHAUG, Tom. Root cause analysis: Simplified tools and techniques. *Journal For Healthcare Quality*, v. 24, p. 46–47, 05 2002. Citado na página 27.
- ANDERSON, E.; BAI, Z.; DONGARRA, J. Performance optimization of numerical linear algebra in python. *ACM Transactions on Mathematical Software*, v. 47, n. 2, p. 1–25, 2021. Citado na página 16.
- ANDERSON, K.; THOMPSON, M. Risk assessment frameworks for renewable energy systems. *Reliability Engineering System Safety*, v. 218, p. 108–122, 2022. Citado na página 10.
- ARIAS, V. C. Comparação entre a aplicação de inversores centrais e strings em uma usina solar fotovoltaica: análise técnica e financeira. *Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense*, 2023. Disponível em: <<http://app.uff.br/riuff/handle/1/27456>>. Citado na página 9.
- ASHLEY, Laura; ARMITAGE, Gerry; NEARY, Maria; HOLLINGSWORTH, Gillian. A practical guide to failure mode and effects analysis in health care: making the most of the team and its meetings. *The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, Elsevier, v. 36, n. 8, p. 351–358, 2010. Citado na página 26.
- AYANG, Albert; WAMKEUE, René; OUHROUCHE, Mohand; SAAD, Mohamad. Faults diagnosis and monitoring of a single diode photovoltaic module based on estimated parameters. In: *2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 8.
- BRAGLIA M., Frosolini M.; MONTANARI, R. uzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality Reliability Management*, v. 20, n. 4, p. 503–524, 2003. Citado na página 11.
- CARLSON, Carl. Effective fmeas: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. *Effective FMEAs: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*, 04 2012. Citado na página 19.
- CARPITELLA, Silvia; CERTA, Antonella; IZQUIERDO, Joaquín; La Fata, Concetta Manuela. A combined multi-criteria approach to support fmeca analyses: A real-world case. *Reliability*

Engineering System Safety, v. 169, p. 394–402, 2018. ISSN 0951-8320. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016301727>. Citado na página 12.

CAZZANIGA, Raniero; ROSA-CLOT, Marco; ROSA-CLOT, Paolo; TINA, Giuseppe M. Floating tracking cooling concentrating (ftcc) systems. In: IEEE. *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. [S.l.], 2012. p. 000514–000519. Citado na página 7.

CHOI, Young-Kwan; LEE, Nam-Hyung; LEE, An-Kyu; KIM, Kern-Joong. A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, v. 3, n. 1, p. 70–74, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

COLLI, Alessandra. Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 804–809, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115005262>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 13.

ELAVARASAN, Rajvikram Madurai; SHAFIULLAH, G.M.; PADMANABAN, Sanjeevikumar; KUMAR, Nallapaneni Manoj; ANNAM, Annapurna; VETRICHELVAN, Ajayragavan Manavalanagar; MIHET-POPA, Lucian; HOLM-NIELSEN, Jens Bo. A comprehensive review on renewable energy development, challenges, and policies of leading indian states with an international perspective. *IEEE Access*, v. 8, p. 74432–74457, 2020. Citado na página 1.

GADZANKU, Sika; MIRLETZ, Heather; LEE, Nathan; DAW, Jennifer; WARREN, Adam. Benefits and critical knowledge gaps in determining the role of floating photovoltaics in the energy-water-food nexus. *Sustainability*, v. 13, p. 4317, 04 2021. Citado na página 6.

GARCIA, M.; LEE, J. Enhanced fmea applications in renewable energy systems. *Renewable Energy*, v. 185, p. 325–340, 2023. Citado na página 10.

GARCIA, R.; FERNANDEZ, A.; LOPEZ, M. Performance optimization in interactive data visualization: WebGL and large-scale rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 28, n. 6, p. 2345–2361, 2022. Citado na página 18.

GARCIA, R.; MARTINEZ, A.; KUMAR, S. Architectural patterns for microservices with flask: Best practices and performance implications. *IEEE Transactions on Services Computing*, v. 15, n. 4, p. 1589–1602, 2022. Citado na página 15.

GARGAMA, Heeralal; CHATURVEDI, Sanjay Kumar. Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 1, p. 102–110, 2011. Citado na página 11.

GUEORGUIEV, S. Aiag & vda fmea handbook - application of the new 7-step approach in the european automotive industry. In: *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 12.

GUO, Yi; TAN, Tiantian; ZHANG, Jiaqing; XIE, Jia; HUANG, Yubiao; SHANG, Fengju. Failure mode analysis and reliability improvement of compressed air foam system. In: . [S.l.: s.n.], 2023. p. 2705–2714. Citado na página 12.

HARRIS, C.R.; MILLMAN, K.J.; WALT, S.J. van der; GOMMERS, R.; VIRTANEN, P.; COURNAPEAU, D. et al. Array programming with NumPy. *Nature*, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. Citado na página 16.

HUANG, Jia; YOU, Jian-Xin; LIU, Hu-Chen; SONG, Ming-Shun. Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering System Safety*, v. 199, p. 106885, 2020. ISSN 0951-8320. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201930105X>>. Citado na página 25.

INC., Plotly Technologies. *Dash Documentation*. [S.l.], 2023. Version 2.11.1. Disponível em: <<https://dash.plotly.com/>>. Citado na página 15.

JALES, Jonathan de Oliveira. Estudo do rendimento da tensão do módulo fotovoltaico em relação ao sombreamento. 2024. Citado na página 9.

JOHNSON, W. Simulações de computador no treinamento de diagnóstico de falhas: Um estudo empírico da transferência de aprendizado da simulação para o desempenho do sistema ao vivo. *ProQuest Dissertations Publishing*, 2021. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/2e3e307626dda9f3701a0386bf2b58f2/1>>. Citado na página 10.

JUNIOR, Andréa Viviana Waichman Mauricio Gama. Sistemas fotovoltaicos flutuantes: uma solução energética sustentável para a amazônia? *Miscellaneous*, v. 17, n. 55, p. e1434, 2024. Citado na página 1.

JUNIOR, Robson Luiz Fernandes. Dimensionamento de usina fotovoltaica para unidades consumidoras de baixa tensão na região de sorocaba-sp. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2024. Citado na página 9.

KIM, H.; PARK, J.; LEE, S. Responsive web design: Performance impact and best practices for complex data visualization applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 28, n. 5, p. 2134–2147, 2022. Citado na página 17.

KIM, J.; KUMAR, S.; THOMPSON, R. Performance optimization strategies for large-scale data analysis with pandas. *IEEE Transactions on Big Data*, v. 8, n. 2, p. 432–445, 2022. Citado na página 16.

KORNEK, Dominik; BERT, Christoph. Process failure mode and effects analysis for external beam radiotherapy: Introducing a literature-based template and a novel action priority. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, v. 34, n. 3, p. 358–370, 2024. ISSN 0939-3889. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0939388924000254>>. Citado na página 26.

LAAROSSI, A. Bouayad A. Study of economic and environmental impact of photovoltaic installation located in morocco. *International Renewable and Sustainable Energy Conference*, v. 9, p. 1–4, 2021. Citado na página 1.

LACERDA DOUGLAS FELIPE LUCAS, Marcelo Antônio Nero Patrícia Crisóstomo Dupin Bráulio Magalhães Fonseca Liséte Celina Lange Lucas Antônio Brasil Gonçalves. *Produção energética por sistemas fotovoltaicos em reservatórios hidrelétricos*. 2023. 1-19 p. Citado na página 3.

LANA, Luana Teixeira Costa; ALMEIDA, Eliane; DIAS, Fernanda Cristina Lima Sales; ROSA, Anna Clara; SANTO, Olívia Castro do Espírito; SACRAMENTO, Thays Cristina Bajur; BRAZ, Kathlen Thais Mariotto. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2015. Citado na página 9.

- LANZAFAME, Rosario; NACHTMANN, Silvia; ROSA-CLOT, Marco; ROSA-CLOT, Paolo; SCANDURA, Pier Francesco; TADDEI, Stefano; TINA, Giuseppe M. Field experience with performances evaluation of a single-crystalline photovoltaic panel in an underwater environment. *IEEE transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 57, n. 7, p. 2492–2498, 2009. Citado na página 7.
- LEE, S.; ZHANG, H.; THOMPSON, K. Benchmarking python web frameworks: A comparative study of flask, django and fastapi. *Journal of Systems and Software*, v. 184, p. 111124, 2022. Citado na página 15.
- LIU, H.; BROWN, R. Standardization of reliability assessment in photovoltaic systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 13, n. 3, p. 112–125, 2023. Citado na página 10.
- LIU, Hu-Chen; LIU, Long; LIU, Nan. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, v. 40, n. 2, p. 828–838, 2013. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412009712>>. Citado na página 11.
- LIU, Junguo; ZANG, Chuanfu; TIAN, Shiyang; LIU, Jianguo; YANG, Hong; JIA, Shaofeng; YOU, Liangzhi; LIU, Bo; ZHANG, Miao. Water conservancy projects in china: Achievements, challenges and way forward. *Global Environmental Change*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 633–643, 2013. Citado na página 6.
- LIU, Luyao; WANG, Qinxing; LIN, Haiyang; LI, Hailong; SUN, Qie; WENNERSTEN, Ronald. Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems. *Energy Procedia*, v. 105, p. 1136–1142, 2017. ISSN 1876-6102. 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217305246>>. Citado na página 6.
- MACHADO, Carolina T; MIRANDA, Fabio S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista virtual de química*, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015. Citado na página 8.
- MARTINEZ, R.; KUMAR, S. Comprehensive failure analysis in modern solar power plants. *Solar Energy Systems*, v. 215, p. 198–212, 2023. Citado na página 10.
- MCKINNEY, W. pandas: a foundational python library for data analysis and statistics. *Python for High Performance and Scientific Computing*, v. 14, n. 9, p. 1–9, 2011. Citado na página 16.
- MITTAL, Divya; SAXENA, Bharat Kumar; RAO, KVS. Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility at kota in rajasthan. In: IEEE. *2017 international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT)*. [S.l.], 2017. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- PAGE, Matthew J; MCKENZIE, Joanne E; BOSSUYT, Patrick M; BOUTRON, Isabelle; HOFFMANN, Tammy C; MULROW, Cynthia D; SHAMSEER, Larissa; TETZLAFF, Jennifer M; AKL, Elie A; BRENNAN, Sue E; CHOU, Roger; GLANVILLE, Julie; GRIMSHAW, Jeremy M; HRÓBJARTSSON, Asbjørn; LALU, Manoj M; LI, Tianjing; LODER, Elizabeth W; MAYO-WILSON, Evan; MCDONALD, Steve; MCGUINNESS, Luke A; STEWART, Lesley A; THOMAS, James; TRICCO, Andrea C; WELCH, Vivian A; WHITING, Penny; MOHER, David. The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, BMJ Publishing Group Ltd, v. 372, 2021. Disponível em: <<https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 19.

- PANYUKOV, D. I.; KOZLOVSKII, V. N.; AIDAROV, D. V.; SHAKURSKII, M. V. FMEA risk analysis on the basis of action priorities. *Russian Engineering Research*, v. 42, n. 10, p. 1077–1080, 2022. ISSN 1934-8088. Disponível em: <<https://doi.org/10.3103/S1068798X22100227>>. Citado na página 26.
- PANYUKOV, D. I.; NENASHEV, M. V.; KOZLOVSKII, V. N.; AIDAROV, D. V. Improvement of the risk assessment system based on the FMEA action priority method. *Russian Engineering Research*, v. 44, n. 7, p. 1030–1034, 2024. ISSN 1934-8088. Disponível em: <<https://doi.org/10.3103/S1068798X24701430>>. Citado na página 26.
- PARK, J.; KIM, S. Reactive programming models in data analysis web applications. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 47, n. 8, p. 1678–1692, 2021. Citado na página 16.
- PARK, S.; KIM, J. Advanced reliability methods for solar energy applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 38, n. 4, p. 458–472, 2023. Citado na página 11.
- PATEL, S.; LIU, J.; THOMPSON, M. Performance optimization in real-time data visualization frameworks: Case studies with dash and plotly. *Journal of Big Data*, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2022. Citado na página 16.
- PIMPALKAR, Rita; SAHU, Anil; PATIL, Rajkumar; ROY, Anindita. A comprehensive review on failure modes and effect analysis of solar photovoltaic system. *Materials Today: Proceedings*, 12 2022. Citado na página 19.
- PINGULKAR, Chinmay; JAIN, Shubham. Using pfmea to enhance safety and reliability in solar power systems. *Technology (IJRMEET)*, v. 13, n. 01, 2025. Citado na página 11.
- PLOTLY TECHNOLOGIES INC. *Plotly.js Official Documentation*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://plotly.com/javascript/>>. Citado na página 18.
- POOR, P.; KUCHTOVA, N.; LEEDER, E.; JANUSKA, M. Facility management as innovative tool for effective management of supporting company activities. *Research Gate Technical Report*, 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Barbora-BryksiStunova/publication/277935974>>. Citado na página 10.
- RAHMAN, M.; WANG, D.; PARK, J. Performance analysis of python web frameworks for data-intensive applications. *IEEE Access*, v. 9, p. 123456–123471, 2021. Citado na página 15.
- RAMLY, Edly F; ATAN, Hood. Fmea aiag-vda-commentary and case study. In: *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–8. Citado na página 26.
- RICHARDS, K.; THOMPSON, M.; ANDERSON, S. Modern web standards and their impact on application development. *IEEE Internet Computing*, v. 26, n. 4, p. 45–53, 2022. Citado na página 17.
- RODRIGUEZ, M.; SANTOS, P. Evaluating css methodologies: Bem and modular design patterns. *IEEE Software*, v. 38, n. 4, p. 72–79, 2021. Citado na página 17.
- RODRÍGUEZ-GALLEGOS, Carlos D; GANDHI, Oktoviano; SUN, Huixuan; PATON, Céline; ZHANG, Ji; ALI, Jaffar Moideen Yacob; ALVAREZ-ALVARADO, Manuel S; ZHANG, Wenjie; RODRÍGUEZ-GALLEGOS, César A; CHUA, Lloyd H C; REINDL, Thomas. Global floating pv status and potential. *Progress in Energy*, IOP Publishing, v. 7, n. 1, p. 015001, nov 2024. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/2516-1083/ad9074>>. Citado na página 5.

- ROSA, Rafael Nascimento da. Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em um processo da indústria automobilística. Porto Alegre, 2016. Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção. Citado na página 13.
- SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos; GONZALEZ, Mario Orestes Aguirre. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, n. C, p. 590–601, 2017. Citado na página 1.
- SASTRY, A.; KULASEKARAN, S.; FLICKER, J.; AYYANAR, R.; TAMIZHMANI, G. S.; ROY, J.; SRINIVASAN, D.; TILFORD, I. Failure modes and effect analysis of module level power electronics. In: *Proc. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8. Citado na página 13.
- SEVERINO, M; OLIVEIRA, M. Fontes e tecnologias de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas. *Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados, Palmas, ano*, v. 1, p. 265–322, 2010. Citado na página 9.
- SHARMA, Kapil Dev; SRIVASTAVA, Shobhit Kumar. Failure mode and effect analysis (fmea) implementation: A literature review. 2018. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115607603>>. Citado na página 25.
- SHEKARI, Amir; FALLAHIAN, Soheil. A new methodology to linking value engineering & fmea. *Innovative Logistics Management: Competitive Advantages Through New Processes and Services*, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG, v. 4, p. 267, 2007. Citado na página 26.
- SOUSA, Diani Fernanda da Silva Less Daniel Carlos Santos de Siqueira; Vinicius Davi de Almeida. *Sistema fotovoltaico flutuante, principais entraves e desafios de implantação no Brasil: uma revisão de literatura*. 2022. e45311125084-e45311125084 p. Citado na página 3.
- SULLIVAN, G. P.; PUGH, R.; MELENDEZ, A. P. *Operations & Maintenance Best Practices A Guide to Achieving Operational Efficiency*. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-13890.pdf>. Citado na página 10.
- TEAM, NumPy Development. *NumPy User Guide*. [S.l.], 2023. Version 1.24. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/user/>>. Citado na página 16.
- TEAM, Pallets. *Flask Documentation*. [S.l.], 2023. Version 2.3.3. Disponível em: <<https://flask.palletsprojects.com/>>. Citado na página 15.
- TEAM pandas development. *pandas: powerful Python data analysis toolkit*. [S.l.], 2023. Version 2.0.3. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/>>. Citado na página 16.
- THOMPSON, M.; WILSON, R.; CHEN, Y. Architectural design patterns for modern web applications: A systematic review. *IEEE Transactions on Software Engineering*, v. 48, n. 6, p. 952–967, 2022. Citado na página 15.
- TINA, GM; ROSA-CLOT, M; ROSA-CLOT, P; SCANDURA, PF. Optical and thermal behavior of submerged photovoltaic solar panel: Sp2. *Energy*, Elsevier, v. 39, n. 1, p. 17–26, 2012. Citado na página 7.
- TRAPANI, Kim; MILLAR, Dean L. The thin film flexible floating pv (t3f-pv) array: The concept and development of the prototype. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 71, p. 43–50, 2014. Citado na página 7.

TWITTER, INC. *Bootstrap 5 Official Documentation*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://getbootstrap.com/docs/5.3/getting-started/introduction/>>. Citado na página 17.

UEDA, Yuzuru; SAKURAI, Tsurugi; TATEBE, Shinya; ITOH, Akihiro; KUROKAWA, Kosuke. Performance analysis of pv systems on the water. In: *Proceedings of the 23rd European photovoltaic solar energy conference, Valencia, Spain*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2670–2673. Citado na página 7.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. *São Paulo: Érica*, v. 2, 2012. Citado na página 8.

VILLARINI, Mauro; CESAROTTI, Vittorio; ALFONSI, Lucrezia; INTRONA, Vito. Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a finea approach based on real data. *Energy Conversion and Management*, v. 152, p. 1–12, 2017. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417307926>>. Citado na página 13.

WALT, S. van der; COLBERT, S.C.; VAROQUAUX, G. The numpy array: A structure for efficient numerical computation. *Computing in Science & Engineering*, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011. Citado na página 16.

WANG, Y.; CHEN, X.; ZHANG, L. Advanced reliability analysis methods for large-scale photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 72, n. 2, p. 621–635, 2023. Citado na página 10.

WHATWG. *HTML Living Standard*. [S.l.], 2023. Living Standard. Disponível em: <<https://html.spec.whatwg.org/>>. Citado na página 17.

WILSON, K.; CHEN, L.; ANDERSON, R. Interactive data analytics web applications: A comprehensive study of framework performance. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 28, n. 3, p. 1432–1445, 2022. Citado na página 15.

WILSON, M.; DAVIS, A. Optimization of maintenance strategies in photovoltaic systems. *Solar Energy*, v. 210, p. 156–171, 2023. Citado na página 11.

WILSON, R.; MARTINEZ, J.; CHEN, L. Best practices for semantic html5 in modern web applications. *ACM Transactions on the Web*, v. 16, n. 3, p. 1–28, 2022. Citado na página 17.

World Wide Web Consortium (W3C). *Cascading Style Sheets (CSS) Level 3 Specification*. 2021. W3C Recommendation. Disponível em: <<https://www.w3.org/TR/css3-roadmap/>>. Citado na página 17.

ZHANG, L.; CHEN, H.; WANG, X. Performance optimization techniques for responsive web design. *IEEE Transactions on Web Technologies*, v. 14, n. 3, p. 245–261, 2022. Citado na página 17.