



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LEONARDO ANDRADE SANTOS

**MODELAGEM ESTOCÁSTICA DE CONFIABILIDADE PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA FMEA-FTA SOB ESCASSEZ DE
DADOS**

Recife

2025

LEONARDO ANDRADE SANTOS

**MODELAGEM ESTOCÁSTICA DE CONFIABILIDADE PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA FMEA-FTA SOB ESCASSEZ DE
DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Produção da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de
Produção.

Orientador (a): Márcio José das Chagas Moura, DSc

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Leonardo Andrade.

Modelagem estocástica de confiabilidade para sistemas de produção de hidrogênio verde: uma abordagem híbrida FMEA-FTA sob escassez de dados / Leonardo Andrade Santos. - Recife, 2025.

78 p. : il., tab.

Orientador(a): Márcio José das Chagas Moura

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Produção - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. FMEA. 2. FTA. 3. Hidrogênio verde. 4. Confiabilidade. I. Moura, Márcio José das Chagas. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LEONARDO ANDRADE SANTOS

**MODELAGEM ESTOCÁSTICA DE CONFIABILIDADE PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA FMEA-FTA SOB ESCASSEZ DE
DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Produção da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de
Produção.

Aprovado em: 19/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura
(Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Mateus Marques de Santana (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pelo privilégio de ter nascido brasileiro e nordestino, tendo a oportunidade de estudar em uma instituição de ensino tão renomada. Sou profundamente grato pelos livramentos, pela proteção diária e pela força necessária para superar cada desafio enfrentado ao longo desses cinco anos.

À minha família, minha base e maior fonte de apoio. Aos meus pais, Fabíola Andrea e Solierte Santos, agradeço por nunca desistirem de mim, por todo amor, incentivo e confiança depositados durante esta jornada. Às minhas avós, Luzenite e Anaide, exemplos de fortaleza e inspiração, dedico cada conquista com o desejo de orgulhá-las. Aos meus avôs, Ediraldo e Nadilson, símbolos de caráter e respeito, agradeço pelos ensinamentos que levarei por toda a vida.

À minha mãe de consideração, Irene, por cuidar de mim desde a infância com muita dedicação e paciência. Aos meus familiares de Recife, em especial tia Flávia e tio Carlos, sou grato pelo acolhimento, pelo suporte e por me fazerem sentir em casa. Aos meus amigos de quatro patas — Bono, Susi, Alceu, Tchip e Aquiles — agradeço pela companhia fiel, pela alegria cotidiana e por tornarem mais leves os momentos difíceis.

Aos meus primos — Ana Clara, Isabelle, Rhayssa, João Victor, “Ricardinho”, Igor e “Rominho” — deixo minha gratidão por caminharem comigo desde a infância, compartilhando afeto, aprendizados e o verdadeiro valor da irmandade. Vocês são exemplos de perseverança e luta para concretização de sonhos.

Sou igualmente grato aos meus amigos de Aracaju — “Gigio”, Lucca, Pedro Henrique, George, Arnaldo, Roberta, Ana Clara e Rafael — pela amizade que atravessa o tempo e a distância. Aos amigos que Recife me presenteou — Nicole, Sandrely e Mateus — agradeço por dividirem comigo angústias, conquistas, risadas e a rotina intensa da graduação.

No âmbito acadêmico, expresso minha sincera gratidão ao meu orientador do PRH 38.1, professor Caio Souto, pela paciência, orientação e incentivo ao longo de dois anos de pesquisa, que foram decisivos para minha formação científica. Agradeço aos professores Márcio e Isis pela oportunidade acadêmica que transformou minha trajetória, e ao professor Paulo, pelo entusiasmo, acolhimento e constante incentivo aos alunos.

Por fim, agradeço o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP (PRH-ANP-UFPE-FAPESP-38 - 2025/03497-0), intitulado PRH 38 - Gerenciamento de

Riscos, Confiabilidade e Sustentabilidade na Exploração e Produção de Petróleo, Gás Natural e Energias Renováveis, e ao Centro de Estudos e Ensaio em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA) pelo suporte, pela estrutura oferecida e pelo ambiente de crescimento que foram fundamentais para a realização deste trabalho. E um eterno obrigado à minha tia Mirtes, que não está entre nós, mas que me amou, me acolheu e se tornou mais uma mãe para mim aqui em vida.

RESUMO

A transição energética global posicionou o hidrogênio verde (H2V) como um vetor estratégico para a descarbonização. Contudo, a confiabilidade operacional dessas plantas ainda permanece como um desafio técnico, agravado pela escassez de dados históricos de falhas em tecnologias emergentes. Este trabalho propõe uma metodologia híbrida de modelagem estocástica para quantificar riscos e priorizar a manutenção em sistemas isolados (*off-grid*) de produção de H2V acoplados à geração fotovoltaica. A abordagem integra a sistematização qualitativa por meio da FMEA com a modelagem lógica via FTA, alimentando uma Simulação de Monte Carlo que incorpora a incerteza por meio das distribuições de probabilidade Beta e Weibull. Os resultados das simulações para um horizonte de 5 anos indicaram uma probabilidade mediana de interrupção da produção de 87,29%, evidenciando a fragilidade estrutural decorrente da topologia em série dos subsistemas. A Análise de Importância de Fussell-Vesely revelou que o subsistema fotovoltaico constitui o gargalo dominante, apresentando criticidade aproximadamente quatro vezes superior à do conjunto de eletrólise, destacando os inversores como o componente com maior vulnerabilidade individual. A análise de sensibilidade demonstrou que o elevado risco é robusto frente às variações na incerteza física, porém sensível a melhorias operacionais, indicando que a viabilidade da planta depende, obrigatoriamente, da implementação de redundâncias ativas, e não apenas do aprimoramento da qualidade dos componentes.

Palavras-chave: FMEA; FTA; Hidrogênio Verde; Confiabilidade.

ABSTRACT

The global energy transition has positioned green hydrogen (H₂V) as a strategic vector for decarbonization. However, the operational reliability of these plants still remains a technical challenge, aggravated by the scarcity of historical failure data in emerging technologies. This work proposes a hybrid stochastic modeling methodology to quantify risks and prioritize maintenance in off-grid H₂V production systems coupled with photovoltaic generation. The approach integrates qualitative systematization through FMEA with logical modeling via FTA, feeding a Monte Carlo Simulation that incorporates epistemic uncertainty through the Beta and Weibull probability distributions. Simulation results for a 5-year time horizon indicated a median probability of production interruption of 87.29%, highlighting the structural fragility resulting from the series topology of the subsystems. The Fussell-Vesely Importance Analysis revealed that the photovoltaic subsystem constitutes the dominant bottleneck, presenting a criticality approximately four times higher than that of the electrolysis stack, with inverters identified as the component with the highest individual vulnerability. Sensitivity analysis demonstrated that the high risk is robust against variations in physical uncertainty, but sensitive to operational improvements, indicating that plant viability necessarily depends on the implementation of active redundancies rather than solely on improvements in component quality.

Keywords: FMEA; FTA; Green Hydrogen; Reliability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema genérico de produção de H ₂ V	30
Figura 2 - Resumo metodológico.....	42
Figura 3 - Distribuição da Classificação de Risco.....	47
Figura 4 - Distribuição dos níveis de segurança da planta	49
Figura 5 - Histograma do Evento topo no Ano 5.....	50
Figura 6 - Túnel de confiabilidade do evento topo.....	51
Figura 7 - Painel de comportamento da falha no inversor	56
Figura 8 - Painel de comportamento da falha no eletrolisador	58
Figura 9 – Painel de comportamento da falha no painel fotovoltaico	61
Figura 10 – Sensibilidade à incerteza física	63
Figura 11 – Sensibilidade à incerteza temporal.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Revisão de Literatura	26
Tabela 2 - Descrição dos níveis do critério de severidade	33
Tabela 3 - Descrição dos níveis do critério	34
Tabela 4 - Matriz de risco	34
Tabela 5 - Legenda da matriz de risco	34
Tabela 6 - Parametrização de β	37
Tabela 7 - Parametrização de α	38
Tabela 8 - Modos de falha mais críticos.	46
Tabela 9 - Todos os critérios por subsistema	48
Tabela 10 - Nível de segurança por subsistema	49
Tabela 11 - Ranking de eventos básicos que mais impactam o Evento Topo.....	54
Tabela 12 - Ranking de eventos intermediários que mais impactam o Evento Topo	56
Tabela 13 - Comparação de diferentes cenários	61
Tabela 14: Legenda dos eventos da FTA.....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	13
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.4	METODOLOGIA.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	HIDROGÊNIO VERDE	19
2.2	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	19
2.2.1	FMEA.....	19
2.2.2	ÁRVORE DE FALHA	20
2.3	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE E MODELAGEM ESTOCÁSTICA	20
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1	ESTUDOS FOTOVOLTAICOS	23
3.2	ESTUDOS DO ELETROLISADOR E SEUS SUBSISTEMAS.....	24
3.3	ESTUDOS DO SISTEMA H2V-FV.....	25
4.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO.....	30
4.1	DESCRIÇÃO FUNCIONAL DOS COMPONENTES	30
4.1.1	PAINÉIS SOLARES	30
4.1.2	INVERSORES	30
4.1.3	RETIFICADOR.....	31
4.1.4	ELETROLISADOR PEM.....	31
4.1.5	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (DEIONIZADOR)	31
4.1.6	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	31
4.1.7	SISTEMA DE SEPARAÇÃO E SECAGEM DO GÁS.....	31
4.1.8	SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DO H2.....	32
4.2	ESTRUTURAÇÃO DO FMEA.....	32
4.2.1	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ADOTADOS	33
4.2.2	MATRIZ DE RISCO E CLASSIFICAÇÃO	34
4.3	ESTRUTURAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHA	35
4.4	METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA FTA	36
4.4.1	MODELAGEM DA FÍSICA DE FALHA (PARÂMETRO β).....	36
4.2.2	PARAMETRIZAÇÃO TEMPORAL (PARÂMETRO α).....	38
4.2.3	INTEGRAÇÃO ESTOCÁSTICA.....	39
4.2.4	TRATAMENTO DE CASOS ESPECÍFICOS.....	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	FMEA.....	43
5.1.1	ANÁLISE QUALITATIVA.....	43

SUMÁRIO

5.1.2 ANÁLISE QUANTITATIVA	45
5.2 FTA	49
5.2.1 ANÁLISE DO EVENTO TOPO	49
5.2.2 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA FUSSELL-VESELY PARA EVENTOS BÁSICOS	51
5.2.3 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA FUSSELL-VESELY PARA EVENTOS INTERMEDIÁRIOS	54
5.2.4 CARACTERIZAÇÃO ESTOCÁSTICA DA CONFIABILIDADE POR COMPONENTE	56
5.2.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	61
6. CONCLUSÕES.....	64
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
6.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	65
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	66
REFERÊNCIAS.....	67
APÊNDICE A – FMEA COMPLETO	70
APÊNDICE B – ÁRVORE DE FALHA COMPLETO.....	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A crescente pressão internacional pela descarbonização dos setores produtivos e pelo aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial tem impulsionado a busca por soluções seguras, eficientes e sustentáveis de armazenamento e transporte de energia (Tuhi; Bucelli; Liu, 2024). Nesse cenário, o hidrogênio verde (H2V) se consolida como uma alternativa promissora, tanto para setores industriais de alta demanda energética, quanto para o armazenamento de excedentes provenientes de fontes intermitentes, como solar e eólica (Marzouk, 2024). Apesar do avanço no debate acerca de sua viabilidade econômica e benefícios ambientais, a confiabilidade operacional dos sistemas de produção de hidrogênio verde permanece um tema pouco explorado na literatura técnica e acadêmica.

As propriedades físico-químicas do hidrogênio — gás leve, incolor, inodoro, altamente volátil e inflamável — impõem desafios adicionais à segurança e à integridade dos sistemas de produção, armazenamento e transporte (McCarty, 1981). Além disso, a integração de diferentes subsistemas tecnológicos resulta em um ambiente operacional complexo e sujeito a modos de falha diversos. Nesse contexto, torna-se essencial compreender como as falhas de cada componente afetam a disponibilidade global do sistema e quais são os impactos cumulativos dessas falhas sobre a operação ao longo do tempo.

A carência de dados históricos de falhas em plantas de hidrogênio verde limita a aplicação direta de métodos quantitativos clássicos de confiabilidade (Tuhi; Bucelli; Liu, 2024). Por outro lado, há um volume considerável de informações qualitativas dispersas na literatura técnica de sistemas fotovoltaicos e eletrolisadores, que pode ser organizado e utilizado de forma estruturada. Este trabalho propõe justamente preencher essa lacuna, coletando e organizando as informações levantadas na literatura em uma abordagem de análise de confiabilidade integrada, a fim de avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas de produção de hidrogênio verde em operação, além dos seus aspectos de segurança.

A relevância teórica da pesquisa reside na contribuição para a compreensão do comportamento dos modos de falha, especialmente nas fases iniciais de operação das plantas, permitindo a validação e o confronto de suposições presentes na literatura. No campo prático, o estudo apresenta-se como uma ferramenta inicial para

apoiar a compreensão do comportamento operacional da planta e de seus principais modos de falha, facilitando a tomada de decisão técnica mesmo em cenários caracterizados pela ausência de dados operacionais.

Dessa forma, a pesquisa justifica-se tanto por sua contribuição acadêmica ao avanço da engenharia de confiabilidade aplicada à transição energética quanto por seu impacto direto na gestão técnica de ativos críticos associados à produção de hidrogênio verde.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

As mudanças climáticas globais, impulsionadas pela elevação das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, representam um dos maiores desafios ambientais, econômicos e sociais da atualidade (Ekwurzel *et al.*, 2017). A queima de combustíveis fósseis em veículos, termelétricas e processos industriais é a principal responsável pelo aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), o GEE de maior impacto, contribuindo para a intensificação do efeito estufa e o aquecimento global (United Nations, 2024).

Diante desse cenário, diversas estratégias têm sido propostas para mitigar as emissões e promover a transição energética. Uma abordagem promissora para mitigar as emissões de CO₂ é substituir o hidrogênio de origem fóssil, atualmente produzido predominantemente a partir de gás natural, por hidrogênio verde, obtido via eletrólise da água utilizando energia proveniente de fontes renováveis, livre de emissão do gás (Kovač; Paranos; Marciuš, 2021).

De acordo com dados de Remme (2024), em 2023, a produção global de hidrogênio resultou na emissão de 920 milhões de toneladas de CO₂, sendo que aproximadamente dois terços dessa produção vieram de gás natural sem captura de carbono. Esse cenário evidencia a urgência em implementar mudanças na matriz de produção de hidrogênio, adotando alternativas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

O hidrogênio é um insumo estratégico em diversos setores industriais, como na produção de aço, no refino de petróleo, na produção de amônia para fertilizantes e em processos da indústria química (West *et al.*, 2022; Pal; Kumar, 2024). Além disso, desponta como vetor energético para aplicações em transporte pesado, células a combustível e no armazenamento de energia elétrica, atuando como solução para o problema de *curtailment* — a limitação da geração renovável em momentos de

excesso de oferta ou baixa demanda (Sgaramella *et al.*, 2023).

A descarbonização desses setores, portanto, passa necessariamente pela ampliação da produção e uso de hidrogênio verde, exigindo não apenas ganhos de escala e redução de custos, mas também o desenvolvimento de sistemas confiáveis e seguros, dado o caráter altamente inflamável e volátil do hidrogênio, além da necessidade de soluções para armazenar e distribuir essa energia de forma eficaz.

A produção de H₂V apresenta desafios significativos em termos de segurança e confiabilidade operacional. O hidrogênio é um gás incolor e inodoro em condições normais de temperatura e pressão, o que dificulta a detecção de vazamentos sem o uso de sensores específicos (Habib *et al.*, 2024). Além disso, possui uma ampla faixa de inflamabilidade no ar, variando de 4% a 75%, uma velocidade de queima seis vezes mais rápida que a gasolina e uma energia mínima de ignição extremamente baixa, de apenas 0,02 mJ (Jayaprabakar *et al.*, 2024). Em comparação, o gás liquefeito de petróleo (GLP), comumente utilizado em residências, possui uma faixa de inflamabilidade de 2,1% a 10,1% e requer uma energia de ignição cerca de 10 vezes maior (Mishra; Rahman, 2003). Essas características tornam o hidrogênio mais suscetível a ignições acidentais, aumentando os riscos de incêndios e explosões em instalações de produção e armazenamento.

Por outro lado, sistemas fotovoltaicos (FV) são geralmente considerados seguros e confiáveis. No entanto, em instalações de grande escala, falhas ocorrem com mais frequência, e esse é o caso daquelas que precisam alimentar eletrolisadores para produção de H₂V. Estudos indicam que sistemas FV de grande porte podem apresentar taxas de falha consideráveis em componentes críticos, como inversores, impactando a disponibilidade e eficiência do sistema (Zini; Mangeant; Merten, 2011); (Gallardo-Saavedra; Hernández-Callejo; Duque-Pérez, 2019). Além disso, perdas de energia devido a falhas técnicas e degradação dos componentes podem resultar em reduções significativas na produção energética ao longo do tempo (Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil, 2024).

A integração de sistemas fotovoltaicos com eletrolisadores para a produção de hidrogênio verde exige uma análise cuidadosa da confiabilidade e segurança operacional. Eletrolisadores, dependendo da tecnologia empregada, consomem em média entre 50 a 55 kWh de eletricidade para produzir 1 kg de hidrogênio (Aghakhani *et al.*, 2023). Portanto, falhas ou ineficiências nos sistemas FV podem comprometer a produção contínua de hidrogênio, afetando a viabilidade econômica e operacional

do processo.

Adicionalmente, há uma escassez de dados empíricos sobre falhas em sistemas integrados de produção de H₂V, o que dificulta a aplicação de modelos quantitativos tradicionais para análise de confiabilidade e prognóstico de falhas. Essa lacuna de dados limita o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção e gestão de riscos.

Diante da necessidade de garantir a segurança e a continuidade operacional desses ativos, este trabalho define como problemática central a seguinte questão: como quantificar a confiabilidade e o risco de sistemas de Hidrogênio Verde em um cenário caracterizado pela incerteza e pela escassez de dados históricos de falha?

Para responder a este desafio, o estudo estrutura-se em uma metodologia híbrida dividida em três etapas fundamentais:

i) Estruturação do Conhecimento (Abordagem Qualitativa): Sistematização das informações dispersas na literatura técnica por meio da ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). Esta etapa visa catalogar os modos de falha críticos, suas causas e efeitos, criando uma base de conhecimento padronizada para suprir a falta de bancos de dados operacionais.

ii) Modelagem Lógica de Falhas: Desenvolvimento da Árvore de Falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*), traduzindo a relação causal identificada no FMEA para uma estrutura lógica booleana. Esta etapa conecta os eventos básicos (falhas de componentes) ao evento topo (indisponibilidade do sistema), estabelecendo a arquitetura de confiabilidade da planta.

iii) Quantificação Estocástica: Execução de uma análise probabilística através da Simulação de Monte Carlo. Nesta etapa, a incerteza dos dados de entrada é tratada estatisticamente (via distribuições Beta e Weibull), permitindo a obtenção de indicadores de confiabilidade, análises de sensibilidade e hierarquização de riscos (Importância de Fussell-Vesely) mesmo na ausência de dados determinísticos exatos.

Espera-se, com isso, disponibilizar um *framework* metodológico capaz de transformar dados qualitativos da literatura em métricas quantitativas de suporte à decisão. O resultado final visa não apenas estimar a probabilidade de falha, mas fornecer à gestão de ativos um mapa de prioridades para manutenção, mitigando riscos e maximizando a disponibilidade operacional de futuras plantas de hidrogênio verde.

1.3 OBJETIVOS

Quanto ao objetivo geral:

- Desenvolver e validar uma metodologia integrada de análise de confiabilidade para sistemas de produção de H₂V, aplicando modelagem estocástica para quantificar riscos e incertezas em cenários caracterizados pela escassez de dados operacionais históricos.

Quanto aos objetivos específicos:

- Sistematizar o conhecimento disperso na literatura: Estruturar informações técnicas fragmentadas sobre modos de falha de subsistemas fotovoltaicos e eletrolisadores, consolidando-as em uma base de dados qualitativa padronizada via FMEA.
- Modelar a arquitetura de falha do sistema: Mapear as relações lógicas de dependência entre os componentes críticos através da construção de Árvores de Falhas, estabelecendo a conexão causal entre falhas básicas e a indisponibilidade da planta.
- Quantificar a incerteza operacional: Aplicar a Simulação de Monte Carlo combinada com distribuições probabilísticas (Weibull e Beta-PERT) para estimar a confiabilidade dos subsistemas ao longo do tempo, superando as limitações de abordagens determinísticas.
- Hierarquizar prioridades de manutenção: Identificar os componentes de maior criticidade e sensibilidade através de métricas de importância (Fussell-Vesely) e análises de cenários, fornecendo diretrizes fundamentadas para a gestão de ativos e tomada de decisão em O&M (setores de operação e manutenção de uma organização).

1.4 METODOLOGIA

Este estudo propõe uma estrutura de análise de confiabilidade para sistemas de produção de Hidrogênio Verde (H₂V) acoplados à geração fotovoltaica, fundamentada na integração de técnicas clássicas de engenharia de confiabilidade com métodos de simulação estocástica. A classificação metodológica da pesquisa toma como referência as definições propostas por Cauchick (2018) e está estruturada conforme as caracterizações a seguir:

Quanto ao método de abordagem foi adotado o método dedutivo, partindo de

premissas gerais consolidadas na teoria da confiabilidade (distribuições de Weibull, lógica Booleana de árvores de falha) e no conhecimento físico sobre degradação de componentes fotovoltaicos e eletroquímicos. A partir dessas leis gerais, deduzem-se as implicações específicas para o comportamento estocástico de sistemas híbridos H2V-FV, permitindo prever o desempenho do sistema particular a partir de teorias universais.

Quanto à natureza a pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, visto que visa gerar conhecimento técnico diretamente utilizável para a solução de problemas práticos na gestão de ativos, dimensionamento de redundâncias e planejamento de manutenção em plantas reais de hidrogênio verde.

Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa de abordagem mista (quali-quantitativa). A vertente qualitativa manifesta-se na estruturação do problema, na interpretação fenomenológica dos modos de falha via FMEA e na validação do modelo através da opinião de especialistas. Já a quantitativa, manifesta-se na tradução desses dados em distribuições de probabilidade e na aplicação de modelagem matemática (Árvore de Falhas e Simulação de Monte Carlo) para mensurar numericamente indicadores de risco, confiabilidade e importância.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória e descritiva. A primeira por investigar um tema emergente onde a disponibilidade de dados históricos é escassa, exigindo a proposição de novos *frameworks* de análise para preencher lacunas da literatura. E a segunda por buscar caracterizar detalhadamente o comportamento dos subsistemas ao longo do tempo, descrevendo as relações funcionais entre as falhas dos componentes e a disponibilidade global da planta.

Por fim, quanto aos dados, é uma pesquisa bibliográfica pois utiliza como base para o levantamento sistemático dos modos de falha, taxas de ocorrência e parâmetros físicos de degradação dados técnicos e literatura científica. Além disso, contempla também modelagem de problema em pesquisa operacional, por utilizar técnicas quantitativas de engenharia de confiabilidade associadas a simulação de eventos discretos para representar matematicamente o comportamento do sistema ao longo do tempo, sob diferentes cenários de falha, degradação e manutenção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho fundamenta-se em conceitos e metodologias consolidadas na área de engenharia de confiabilidade, aplicadas a sistemas de produção de hidrogênio verde. A seguir, apresentam-se os principais referenciais teóricos que embasam a pesquisa.

2.1 HIDROGÊNIO VERDE

A produção de hidrogênio verde baseia-se na eletrólise da água, um processo eletroquímico que divide moléculas de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) mediante aplicação de corrente elétrica obtida a partir de fontes renováveis. Os dois principais tipos de eletrólise são:

- Eletrólise alcalina (AEL): utiliza solução aquosa de hidróxido (KOH ou NaOH) entre os eletrodos. Apresenta uma eficiência de 62–82%, é madura tecnicamente, apresentando menor custo e materiais menos seletivos, porém menos reativa a flutuações energéticas e menor pureza no gás resultante (Shiva Kumar; Lim, 2022).
- Eletrólise por membrana de troca protônica (PEM): emprega uma membrana polimérica que separa o ânodo do cátodo, permitindo resposta rápida e alta pureza do produto, operando com uma eficiência típica de 67–82% (Shiva Kumar; Lim, 2022).

A tecnologia PEM é especialmente adequada para integração com fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, devido à sua rápida resposta (*start-stop*), alta densidade de potência e alta pureza do hidrogênio produzido (Schmidt *et al.*, 2017). Isso a torna a escolha preferencial para sistemas integrados de produção de hidrogênio verde e será a tecnologia utilizada no atual trabalho.

2.2 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

A engenharia de confiabilidade é a área responsável por analisar, modelar e melhorar o desempenho e a disponibilidade de sistemas, considerando suas taxas de falha, modos de falha, distribuições e métricas de confiabilidade. Para isso, utiliza ferramentas como Árvores de Falha (FT) e FMEA, além de distribuições de probabilidade para estruturar os problemas reais.

2.2.1 FMEA

O FMEA é uma ferramenta sistemática de análise qualitativa e semiquantitativa

que busca identificar, descrever e priorizar os possíveis modos de falha de um sistema, bem como suas causas e efeitos sobre a operação.

Tradicionalmente, cada modo de falha é avaliado segundo três critérios: Severidade (S) (impacto da falha), Ocorrência (O) (frequência da falha) e Detecção (D) (capacidade de detectar a falha antes do impacto). Esses fatores são comumente combinados no *Risk Priority Number* ($RPN = S \times O \times D$).

No entanto, diversas adaptações dessa métrica existem. Para a análise de risco de processo, é comum focar no Índice de Criticalidade (Cr), que utiliza apenas os dois fatores primários de risco:

$$Cr = S \times O$$

Essa abordagem ($S \times O$) prioriza as falhas com base em seu risco inerente (o quão severas e frequentes são), sendo especialmente útil em análises estratégicas ou em sistemas complexos onde os dados sobre a eficácia da detecção são escassos ou não aplicáveis (Modarres, 2016).

2.2.2 ÁRVORE DE FALHA

A FT é uma técnica gráfica e probabilística que parte de um evento indesejado (*top event*) e decompõe hierarquicamente as causas potenciais que podem levar a esse evento, utilizando portas lógicas (*AND*, *OR*) para estruturar a relação entre falhas.

Cada evento básico possui uma taxa de falha associada, e a FT permite calcular a probabilidade do evento de topo a partir das probabilidades dos eventos básicos, considerando a lógica combinatória. Essa ferramenta é especialmente útil para:

- Identificar relações de interdependência entre falhas.
- Analisar cenários críticos em sistemas complexos como a produção de hidrogênio verde.
- Calcular a probabilidade de falhas simultâneas ou sequenciais em subsistemas interligados.

No presente trabalho, a FT auxiliará na avaliação dos riscos mais críticos associados às falhas combinadas de subsistemas como painéis fotovoltaicos, inversores e eletrolisadores (Modarres, 2016)

2.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE E MODELAGEM ESTOCÁSTICA

A transição de uma análise qualitativa (FMEA) para uma quantitativa requer o uso de funções de distribuição de probabilidade que representem matematicamente

o comportamento da falha no tempo e a incerteza associada aos dados. Neste trabalho, destacam-se as distribuições de Weibull e Beta, aplicadas através da técnica PERT.

A distribuição de Weibull é amplamente utilizada na engenharia de confiabilidade devido à sua versatilidade em modelar as diferentes fases de vida de um componente, conhecidas como a "Curva da Banheira". A sua função de densidade de probabilidade $f(t)$ é governada fundamentalmente por dois parâmetros (Modarres, 2016):

- Parâmetro de Forma (β): Define a física da falha. Se $\beta < 1$, indica falhas prematuras (mortalidade infantil); se $\beta = 1$, indica falhas aleatórias (taxa constante, típica de componentes eletrônicos); e se $\beta > 1$, caracteriza falhas por desgaste ou fadiga.
- Parâmetro de Escala (α): Conhecido como "Vida Característica", representa o tempo no qual 63,2% da população terá falhado.

No contexto de sistemas de H2V, a Weibull permite diferenciar componentes que sofrem degradação física daqueles que sofrem falhas aleatórias.

A distribuição Beta é uma distribuição contínua definida no intervalo $[0, 1]$, o que a torna ideal para modelar probabilidades, taxas de disponibilidade e incertezas percentuais. Diferente da distribuição Normal, que é infinita em ambas as direções, a Beta é limitada, impedindo a geração de valores físicos impossíveis (como probabilidades negativas ou maiores que 100%) durante simulações numéricas (MODARRES, 2016).

Em cenários de escassez de dados, como é o caso de tecnologias emergentes de hidrogênio, frequentemente recorre-se à elicitación de especialistas ou à conversão de escalas qualitativas. Para isso, utiliza-se a técnica PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) adaptada à distribuição Beta.

O método Beta-PERT constrói uma distribuição de probabilidade a partir de três estimativas pontuais:

1. Otimista (a): O menor valor provável (ou cenário de menor falha).
2. Mais Provável / Moda (m): O valor esperado ou de maior frequência.
3. Pessimista (b): O maior valor provável (ou cenário de maior falha).

A média (μ) e o desvio padrão (σ) da distribuição são estimados pelas equações:

$$\mu = \frac{a+4m+b}{6}$$

$$\sigma = \frac{b - a}{6}$$

Essa abordagem permite transformar índices discretos do FMEA (ex: Ocorrência = 3) em distribuições de probabilidade contínuas, incorporando a incerteza na simulação de Monte Carlo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Para a construção deste trabalho, foi realizada uma revisão de literatura com o objetivo de compreender como a academia tem abordado a confiabilidade e a segurança de sistemas de produção de hidrogênio verde alimentados por energia fotovoltaica (H2V-FV). A revisão foi organizada em três blocos temáticos: estudos focados no sistema fotovoltaico, no eletrolisador e seus subsistemas de apoio, e na integração entre ambos.

3.1 ESTUDOS FOTOVOLTAICOS

O primeiro bloco contempla os estudos centrados no sistema fotovoltaico. Destaca-se Colli (2015), que apresentou e discutiu uma aplicação completa da metodologia FMEA a um sistema fotovoltaico conectado à rede. A análise concluiu que o inversor e o sistema de aterramento do campo fotovoltaico são os componentes que apresentam os valores de RPN mais elevados. Sayed *et al.* (2020) realizaram uma análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) de sete sistemas fotovoltaicos de grande porte, utilizando dados reais de falha e reparo extraídos da literatura. Os autores identificaram que os inversores e os módulos fotovoltaicos concentram os maiores impactos na disponibilidade do sistema. Aghaei *et al.* (2022) realizaram uma revisão abrangente sobre os principais mecanismos de degradação de módulos fotovoltaicos e os fatores de estresse mais críticos, ressaltando que a degradação normalmente ocorre pela combinação de múltiplos fatores simultâneos, e não de forma isolada.

Sonawane *et al.* (2023) propuseram uma metodologia de análise de confiabilidade para sistemas fotovoltaicos de grande porte, utilizando estimativas diretas das taxas de falha a partir da literatura. O estudo evidenciou falhas críticas como solda defeituosa, interconexão rompida e célula danificada. Posteriormente, Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024) refinaram a abordagem anterior, aplicando lógica fuzzy para converter julgamentos qualitativos de especialistas em probabilidades anuais de falha, contornando a ausência de dados históricos reais.

Na sequência, estruturaram uma análise quantitativa por meio de FTA. A International Energy Agency (IEA, 2025) descreveu os 30 modos de falha mais comuns em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, fornecendo informações atualizadas sobre padrões de degradação, frequências de ocorrência e seus respectivos impactos na operação dos sistemas.

3.2 ESTUDOS DO ELETROLISADOR E SEUS SUBSISTEMAS

O segundo bloco reúne estudos voltados para o eletrolisador e seus subsistemas. Kasai *et al.* (2016) tiveram como objetivo realizar uma avaliação qualitativa de risco em um sistema de geração de hidrogênio por eletrólise. O principal resultado foi que, após a implementação das medidas de segurança, o nível de risco da grande maioria dos perigos do sistema diminuiu para níveis "aceitáveis". Norazahar *et al.* (2024) propuseram um modelo de confiabilidade para eletrolisadores PEM aplicando a abordagem *Bayesian Structural Equation Modelling* (BSEM), identificando variáveis críticas associadas a cenários como formação de hotspots e secagem localizada de membranas, além de mapear os mecanismos físicos e químicos envolvidos nesses eventos.

Wismer *et al.* (2024) realizaram uma FMEA completa em eletrolisadores PEM em escala laboratorial, seguindo a norma IEC 60812:2018. Os autores identificaram 133 cenários de falha, destacando riscos como a mistura de hidrogênio e oxigênio e a liberação não controlada de hidrogênio. Mohsen *et al.* (2025) realizaram uma revisão para explorar os potenciais caminhos que levam à degradação da membrana e à permeação cruzada em eletrolisadores PEM. A metodologia central do trabalho foi a aplicação de uma FTA, definindo a "formação de uma mistura explosiva H₂/O₂" como o evento topo da árvore de falhas. O principal resultado é a própria árvore de falhas, que identifica e mapeia as causas-raiz do evento topo. A análise destaca os principais desafios associados à formação de misturas explosivas, fornecendo uma base sistemática para estratégias de segurança e projeto em eletrolisadores PEM.

Becker *et al.* (2023) propõem uma visão geral abrangente sobre o impacto de impurezas em eletrolisadores de água em operação. Como resultado principal, eles assumem que a falha do equipamento de purificação é um modo de falha crítico, pois pode levar diretamente à degradação dos materiais e componentes do eletrolisador. Xu *et al.* (2025) investigaram os mecanismos de degradação física da camada do catalisador do ânodo em eletrolisadores PEM. Os autores destacam que, embora a pesquisa acadêmica foque muito na degradação química, a experiência da indústria sugere que muitas limitações de desempenho e vida útil se originam de fatores físicos.

Zagoraίου *et al.* (2024) têm como objetivo principal revisar o estado-da-arte sobre o uso de Placas Bipolares de Aço Inoxidável (SS-BPPs) como uma alternativa

de baixo custo ao titânio em eletrolisadores PEM. O estudo resume os requisitos críticos que as BPPs devem atender e analisa os desafios de desempenho do aço inoxidável nesse ambiente. Gao; Wang; Meng, (2024) investigaram e compararam as tecnologias avançadas de retificadores (conversores AC/DC) que são empregadas na produção de hidrogênio por eletrólise. A comparação indicou que, em relação aos outros dois tipos, o retificador a tiristor oferece vantagens superiores de eficiência e custo, o que justifica sua atual participação dominante no mercado de eletrólise. Nguyen; Kwak, (2020) abordaram a confiabilidade dos dispositivos semicondutores de potência, identificando-os como os componentes "mais vulneráveis" às condições de temperatura e ciclagem térmica em conversores de eletrônica de potência (como inversores ou retificadores).

Wang *et al.* (2024) forneceram uma revisão abrangente do estado-da-arte da purificação de hidrogênio. O principal resultado é a própria síntese do conhecimento atual. O artigo mapeia os desafios técnicos (como a necessidade de altas pressões ou baixas temperaturas) e as vantagens (potencial alta seletividade) do uso de hidratos para a purificação de H₂. Por fim, Vermaak; Neomagus; Bessarabov (2021) avaliaram experimentalmente o desempenho de um sistema de membrana PEM na separação e purificação de hidrogênio de várias misturas de gases contaminados.

3.3 ESTUDOS DO SISTEMA H2V-FV

Já o terceiro bloco de estudos contém os artigos que integram o sistema fotovoltaico de produção de energia com o eletrolisador. Assim, notou-se que Kheirrouz; Melino; Ancona (2022) compilaram qualitativamente os modos de falha mais relevantes em sistemas de produção de hidrogênio verde com fonte fotovoltaica, além de apresentar métodos de diagnóstico aplicáveis a esse contexto. Importante notar que esse artigo fala de um sistema de produção de hidrogênio verde com fonte fotovoltaica (H2V-FV), mas é uma revisão de literatura sobre detectabilidade dos modos de falha e não possui dados operacionais em sua abordagem.

Tuhi; Bucelli; Liu (2024) realizaram uma revisão detalhada sobre falhas técnicas e desafios de confiabilidade na produção de hidrogênio verde via eletrólise da água, mapeando acidentes registrados na base HIAD 2.1 e ressaltando a carência de estudos específicos sobre confiabilidade de eletrolisadores e seus componentes auxiliares. Como resultado, eles perceberam que a falta de dados de

falha e de avaliação de confiabilidade dos componentes impedem a implementação de estratégias de manutenção otimizadas, e os métodos tradicionais de confiabilidade falham em considerar desafios específicos do H2V, como a intermitência das fontes renováveis (que acelera a degradação) e fenômenos como a fragilização por hidrogênio.

Kuhnert *et al.* (2024) investigaram o impacto da operação intermitente, típica de usinas fotovoltaicas, na degradação de eletrolisadores PEM. O trabalho compara o desempenho e a degradação de sistemas acoplados diretamente ao FV (com paradas e flutuações) com sistemas assistidos por bateria (que permitem operação estável). A metodologia central foi o uso de Testes de Estresse Acelerado (ASTs). Os resultados mostraram que os períodos de parada e as baixas cargas de operação foram identificados como os principais fatores que aceleram a degradação, mais do que as rápidas mudanças de carga. A conclusão é que a operação intermitente acelera a degradação do eletrolisador, sugerindo que sistemas com baterias aumentam a vida útil do equipamento.

Por fim, Ubale *et al.* (2025) realizaram uma análise de confiabilidade dos componentes do Balanço da Planta (BoP) de um eletrolisador PEM, com foco específico no subsistema de água. A análise foi conduzida integrando FMEA e FTA. O FMEA identificou 30 modos de falha de componentes no subsistema de água. Além disso, foram desenvolvidas FTAs para dois eventos topo: "degradação da qualidade da água" e "interrupção do fornecimento de água". A análise quantitativa calculou as probabilidades de indisponibilidade (falha) desses dois eventos como 0,49 (degradação da qualidade) e 0,68 (interrupção do fornecimento), respectivamente. A Tabela 1 sintetiza os objetivos, metodologias e principais resultados dos estudos revisados.

Tabela 1 - Revisão de Literatura

Referência	Objetivo	Metodologia	Principais Resultados
Sayed <i>et al.</i> (2020)	Demonstrar o impacto da disponibilidade dos subsistemas no desempenho geral de sistemas PV de grande escala e classificar os subsistemas mais críticos.	Coleta de dados mundiais de taxas de falha (λ) e reparo (μ); aplicação de Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) e Medidas de Importância.	O Inversor tem a menor disponibilidade e, junto com o Módulo PV, é o componente mais crítico (maior impacto) para a disponibilidade total do sistema.
Kheirrouz <i>et al.</i> (2022)	Investigar e analisar os métodos de Detecção e Diagnóstico de Falhas (FDD) aplicáveis a sistemas de H2V (PV, Eletrolisadores PEM, Compressores).	Revisão de literatura, categorizando os métodos de FDD (baseados em modelo, não baseados em modelo e baseados em dados).	Métodos baseados em IA são promissores; os métodos mais eficientes em custo são aqueles que conseguem identificar e localizar as falhas.
Aghaei <i>et al.</i> (2022)	Resumir os fenômenos de degradação e falha em módulos PV para avaliar o estado-da-arte da	Revisão abrangente da literatura, focada em fatores de estresse e modos de falha por	Existe uma lacuna na previsão de confiabilidade quando há uma "combinação de estresses" (vs.

Referência	Objetivo	Metodologia	Principais Resultados
	confiabilidade.	componente.	estresse único). Falhas de campo (como PID) não foram previstas por testes tradicionais.
Sonawane et al. (2023)	Propor uma metodologia para modelar e avaliar a confiabilidade de sistemas PV de grande escala usando Análise de Árvore de Falhas (FTA).	FTA híbrida, usando taxas de falha da literatura e a medida de importância Fussell-Vesely (F-V) para classificar a criticidade.	Falhas críticas identificadas: falha na ligação de solda, célula quebrada, interconexão rompida e sombreamento parcial.
Sonawane et al. (2024)	Propor uma metodologia Fuzzy-FTA (Lógica Fuzzy) para superar a escassez de dados precisos de probabilidade de falha em sistemas PV.	Uso da Lógica Fuzzy para converter opiniões subjetivas de especialistas (termos linguísticos) em probabilidades de falha para o FTA.	Falhas críticas identificadas: sujidade, acúmulo de poeira, manutenção inadequada. Confiabilidade geral do sistema calculada em 0,601.
Wismer et al. (2024)	Identificar os cenários de falha mais significativos em termos de risco em eletrolisadores PEM, para apoiar a implantação segura.	Aplicação rigorosa de FMEA (conforme IEC 60812) em um sistema de eletrolisador PEM de laboratório.	Identificou 133 cenários de falha. Componentes de maior risco: separadores de gás-água, bomba de água e o <i>stack</i> do eletrolisador.
Norazahar et al. (2024)	Apresentar um modelo de confiabilidade para eletrolisadores PEM, focado no " <i>hydrogen gas cross-over</i> " (permeação) e degradação da membrana.	Modelagem de Equações Estruturais Bayesianas (BSEM) para definir relações causais entre variáveis operacionais e cenários de falha.	Densidade de corrente e quantidade de água no ânodo são as variáveis operacionais críticas que mais afetam a degradação da membrana.
Tuhi et al. (2024)	Investigar como a engenharia de confiabilidade pode resolver problemas de custo (reparos, paradas) na produção de H2V.	Análise do banco de dados de incidentes (HIAD 2.1) e Revisão da literatura sobre engenharia de confiabilidade (FTA, RCM).	Identificou lacunas críticas: carência de pesquisa de falhas focada em eletrolisadores e o impacto da intermitência das fontes renováveis.
IEA-PVPS T13-30 (2025)	Criar uma referência padronizada ("Fichas de Fato") dos 30 modos de falha mais comuns em sistemas PV para operadores e pesquisadores.	Compilação e revisão de dados da indústria por um grupo de especialistas, estruturada em "Fichas de Fato" (PVFS).	O resultado é o próprio conjunto de fichas, que detalha causas, impactos (segurança, desempenho) e ações para cada falha (ex: "Falha de isolamento" causa "risco de incêndio").
Colli (2015)	Apresentar uma aplicação completa da metodologia FMEA a um sistema PV conectado à rede, para identificar falhas e priorizar riscos.	Aplicação de FMEA em um sistema modelo, com cálculo de RPN ($S \times O \times D$) baseado em literatura e opinião de especialistas.	O inversor e o sistema de aterramento do campo FV são os componentes com os valores de RPN (risco) mais elevados.
Kasai et al. (2016)	Realizar uma avaliação de risco qualitativa em um sistema de geração de hidrogênio por eletrólise.	Abordagem dupla: HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade) e FMEA, usando brainstorming guiado.	Após medidas de segurança, a maioria dos 133 cenários de risco tornou-se "aceitável". Riscos inevitáveis (ex: colapso de guindaste) permaneceram altos.
Kuhnert et al. (2024)	Investigar o impacto da operação intermitente (típica de PV) na degradação de eletrolisadores PEM.	Testes de Estresse Acelerado (ASTs) comparando um modo intermitente (AST 1) com um modo estável (AST 2, com bateria).	A operação intermitente causou uma taxa de degradação significativamente maior (quase o dobro). Paradas e baixas cargas foram os fatores mais agravantes.
Mohsen et al. (2025)	Explorar os caminhos que levam à degradação da membrana e permeação cruzada, resultando na formação de misturas explosivas (H_2/O_2).	Aplicação de uma Análise de Árvore de Falhas (FTA), definindo "formação de mistura explosiva" como o evento topo.	O resultado é a própria FTA, que mapeia as causas-raiz (degradação da membrana, temperatura, modo de operação) que levam ao risco de explosão.
Ubale et al. (2025)	Realizar uma análise de confiabilidade detalhada dos componentes do BoP de um eletrolisador PEM, focando no subsistema de água.	Integração de FMEA (identificação de falhas) e FTA (quantificação e criticidade).	Identificou 30 modos de falha no subsistema de água; a indisponibilidade por "interrupção do fornecimento" (0,68) é maior que a por "degradação da qualidade" (0,49).
Zagoraïou et al. (2024)	Revisar o uso de Placas Bipolares de Aço Inoxidável como alternativa de baixo custo ao titânio em eletrolisadores PEM.	Revisão abrangente da literatura, focando em corrosão, passivação e estratégias de mitigação (revestimentos).	Aço inoxidável sem revestimento não é viável: ele sofre corrosão e libera íons que contaminam a membrana, aumentando a resistência e diminuindo a vida útil.
Gao et al. (2024)	Comparar tecnologias avançadas de retificadores (conversores AC/DC) para produção de hidrogênio por eletrólise.	Estudo comparativo (Tiristor, IGBT, Diodo) em 5 MW, avaliando eficiência, qualidade de energia e custo; inclui	O retificador a tiristor oferece vantagens superiores de eficiência e custo, justificando sua dominância no mercado.

Referência	Objetivo	Metodologia	Principais Resultados
		estudos de caso.	
Wang et al. (2024)	Fornecer uma revisão abrangente sobre a tecnologia emergente de purificação de H ₂ usando métodos baseados em hidratos.	Compilação e análise da literatura científica sobre equilíbrio de fase e cinética da formação de hidratos.	Mapeamento dos desafios técnicos (ex: altas pressões) e vantagens (alta seletividade) da tecnologia.
Vermaak et al. (2021)	Avaliar experimentalmente o desempenho de um sistema de membrana eletroquímica (EHP) na separação e purificação de H ₂ de gases contaminados.	Estudo experimental em célula de teste (PEM com catalisador Pt-Co/C) em temperaturas elevadas (100–160 °C).	Relatório sobre o desempenho da separação (eficiência e pureza) e viabilidade da tecnologia EHP para purificação de H ₂ .
Nguyen & Kwak (2020)	Revisar comparativamente os avanços nas técnicas de pesquisa (CM, ATC, RUL) para aumentar a confiabilidade de dispositivos semicondutores de potência (os "mais vulneráveis").	Revisão técnica comparando três áreas: Monitoramento de Condição (CM), Controle Térmico Ativo (ATC) e Estimativa da Vida Útil Remanescente (RUL).	Uma visão geral comparativa (baseada em 144 artigos) sobre as vantagens e desvantagens de cada técnica (CM, ATC, RUL).
Becker et al. (2023)	Fornecer uma visão geral abrangente sobre o impacto de impurezas na operação de eletrolisadores de água (PEMWEs, AWEs, etc.) e seu impacto na vida útil.	Revisão crítica da literatura, focada em fontes de impurezas, mecanismos de degradação, purificação de água e estratégias de mitigação.	A falha do equipamento de purificação de água é um modo de falha crítico, pois leva diretamente à degradação dos materiais e componentes do eletrolisador.
Xu et al. (2025)	Investigar os mecanismos de degradação física (vs. química) da camada do catalisador do ânodo (ACL) em eletrolisadores PEM.	Revisão da literatura focada na classificação e análise de mecanismos de falha físicos (com base na experiência da indústria).	Identificação de três mecanismos de falha físicos: Rachaduras, Inchaço dos ionômeros e Descolamento das partículas do catalisador.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os trabalhos analisados nesta revisão evidenciam a carência de dados de falha reais em sistemas de produção de hidrogênio verde, o que tem levado os pesquisadores a recorrerem majoritariamente a dados secundários provenientes da literatura para contornar essa limitação. A maior parte dos estudos estrutura as informações obtidas por meio de ferramentas consolidadas da engenharia de confiabilidade, como Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD) e Árvores de Falha. Outros trabalhos, por sua vez, apresentam abordagens qualitativas, discutindo os modos de falha, suas causas e formas de detecção, sem avançar para análises quantitativas estruturadas. Notou-se, entretanto, que os artigos que abrangem o sistema de hidrogênio verde como um todo adotam predominantemente essa abordagem qualitativa, enquanto os estudos mais completos e parametrizados quantitativamente concentram-se em sistemas fotovoltaicos.

Diante desse panorama, a revisão da literatura evidencia uma lacuna central: enquanto as análises de confiabilidade de subsistemas isolados — como o fotovoltaico — já apresentam abordagens quantitativas consolidadas, os estudos que tratam do sistema integrado de produção de H₂V permanecem majoritariamente qualitativos.

Este trabalho busca preencher essa lacuna ao propor um *framework*

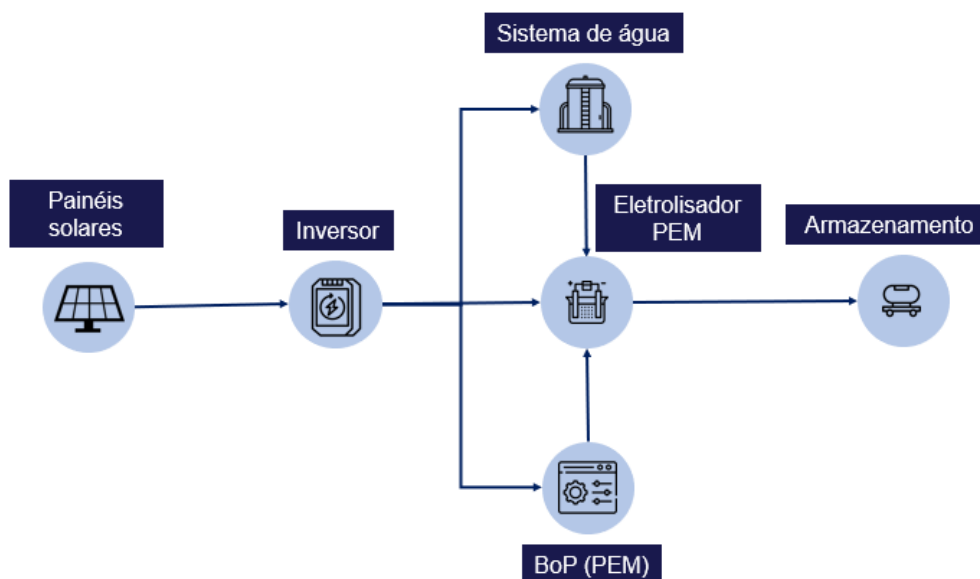
metodológico no qual o FMEA atua não apenas como ferramenta de priorização de riscos, mas também como uma estrutura para viabilizar uma abordagem quantitativa ao servir como fonte de parametrização para a modelagem estocástica.

Neste *framework*, a integração quantitativa é viabilizada por um mecanismo de tradução probabilística: as informações qualitativas sobre a física da falha são mapeadas em parâmetros de forma da distribuição de Weibull (classificando o comportamento entre aleatório, desgaste ou fadiga com base na literatura), enquanto os níveis discretos de Ocorrência do FMEA são convertidos na moda de distribuições Beta-PERT, fundamentando a estimativa do parâmetro de escala. Dessa forma, a incerteza é tratada matematicamente, permitindo que os dados qualitativos estruturados alimentem uma simulação de Monte Carlo, resultando em uma análise quantitativa de confiabilidade robusta.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO

Para a condução da análise de confiabilidade, foi necessário delimitar o escopo do sistema de estudo. Este trabalho foca em uma arquitetura representativa de produção de H₂V acoplada a um sistema fotovoltaico (FV). Para fins de generalização da análise e foco nos componentes de maior criticidade, o sistema foi modelado com seus subsistemas essenciais, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Sistema genérico de produção de H₂V



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sistema FV opera em modo *Off-Grid*, isto é, desconectado à rede elétrica de transmissão. O eletrolisador PEM e seus sistemas auxiliares representam a demanda de energia principal.

4.1 DESCRIÇÃO FUNCIONAL DOS COMPONENTES

A seguir, são descritas as funções dos principais componentes selecionados para a análise de confiabilidade.

4.1.1 PAINÉIS SOLARES

Os painéis solares são os geradores primários de energia do sistema. Compostos por células fotovoltaicas (majoritariamente de silício), eles convertem diretamente a irradiância solar (fótons) em eletricidade de corrente contínua (DC), por meio do efeito fotovoltaico. A confiabilidade deste componente é a base para a autonomia energética de todo o processo (Al-Ezzi; Ansari, 2022).

4.1.2 INVERSORES

O inversor é um dispositivo de eletrônica de potência com a função central neste sistema de converter a energia de corrente contínua (DC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (AC) (Pudur; Rajak, 2025).

4.1.3 RETIFICADOR

Embora o inversor gere AC, o processo de eletrólise (especificamente em eletrolisadores PEM e Alcalinos) consome grandes volumes de energia em corrente contínua (DC). O retificador é o equipamento de eletrônica de potência que converte a energia AC (vinda da rede ou do inversor) para a energia DC de alta amperagem necessária para alimentar o eletrolisador (Gao; Wang; Meng, 2024).

4.1.4 ELETROLISADOR PEM

Este é o ponto central do sistema de H₂V. O eletrolisador utiliza a tecnologia de Membrana de Troca de Prótons (PEM). Ele usa a energia DC fornecida pelo retificador para realizar a eletrólise da água em seus componentes básicos. No ânodo, a água é oxidada, liberando oxigênio e prótons; estes prótons migram pela membrana até o cátodo, onde se recombina com elétrons (do circuito DC) para formar hidrogênio gasoso (Shiva Kumar; Himabindu, 2019).

4.1.5 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (DEIONIZADOR)

O eletrolisador PEM exige água com um grau de pureza extremamente elevado (água deionizada ou ultrapura) para evitar a contaminação e a degradação da membrana e dos catalisadores. Este subsistema é responsável por tratar a água de entrada (ex: água potável), removendo íons e minerais, e bombeá-la para o eletrolisador na pressão e vazão corretas (Becker *et al.*, 2023).

4.1.6 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O processo de eletrólise é exotérmico, ou seja, libera uma quantidade significativa de calor. O sistema de refrigeração (geralmente um *chiller* a água ou ar) é vital para a segurança e eficiência do processo. Ele circula um fluido refrigerante para manter o *stack* (pilha de células) do eletrolisador dentro da faixa de temperatura operacional ideal, prevenindo o superaquecimento (Chen *et al.*, 2025).

4.1.7 SISTEMA DE SEPARAÇÃO E SECAGEM DO GÁS

O hidrogênio produzido no cátodo do eletrolisador sai saturado de vapor de água (gás "úmido"). Este subsistema é responsável por separar o fluxo de H₂ do fluxo de O₂ (e da água) e, em seguida, "secar" o hidrogênio, removendo a umidade através de processos como a adsorção por oscilação de pressão (PSA) ou membranas, até

que atinja o grau de pureza exigido (Krótki *et al.*, 2025).

4.1.8 SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DO H₂

Embora a secagem remova a água, a purificação (frequentemente integrada à secagem em unidades PSA) é o passo final para garantir a qualidade do H₂. Esta etapa remove traços residuais de oxigênio (que podem ter cruzado a membrana) ou outros gases, garantindo que o hidrogênio atinja a pureza necessária para armazenamento ou uso (Becker *et al.*, 2023).

4.2 ESTRUTURAÇÃO DO FMEA

Após a definição dos componentes que constituem o sistema estudado, procedeu-se à revisão de literatura previamente apresentada. Essa revisão teve dois propósitos centrais: (i) identificar lacunas existentes no conhecimento acadêmico sobre confiabilidade e segurança em sistemas H₂V-FV e (ii) mapear os modos de falha mais recorrentes reportados para cada componente do sistema.

As evidências coletadas foram consolidadas na Tabela 1, que sintetiza os principais achados da revisão. A partir dessa síntese, estruturou-se o FMEA completo do sistema, apresentado no Apêndice A, no qual cada modo de falha foi classificado segundo suas causas, efeitos, nível de impacto à segurança das pessoas, severidade e ocorrência. Além disso, utilizou-se o Índice de Criticalidade ($Cr = S \times O$) como métrica auxiliar para ranqueamento dos riscos, permitindo identificar os modos de falha com maior prioridade de mitigação em cenários de operação real.

Durante a elaboração do FMEA, adotou-se uma sistemática que permitiu categorizar as causas dos modos de falha em grupos homogêneos (mecânicas, elétricas, químicas, térmicas e operacionais). Essa categorização é fundamental para análises quantitativas posteriores e para a identificação mais precisa das origens físicas e funcionais dos problemas. Os efeitos de cada falha foram divididos em três níveis hierárquicos, de forma a evidenciar a propagação do dano dentro da planta:

1. Nível de Componente: consequências imediatas e localizadas no equipamento onde ocorre a falha;
2. Nível de Subsistema: impactos que afetam o funcionamento integrado do eletrolisador ou do sistema fotovoltaico;
3. Nível de Sistema: efeitos globais na operação da planta H₂V-FV,

incluindo perda de produção, indisponibilidade total e riscos sistêmicos.

4.2.1 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ADOTADOS

O critério de severidade utilizado no FMEA foi estruturado para captar não apenas efeitos na performance e vida útil, mas também o impacto direto na segurança das pessoas — um aspecto crítico em sistemas que operam com hidrogênio, dada sua inflamabilidade e risco de ignição. A classificação varia de 1 a 5, onde 1 representa impacto negligível e 5 caracteriza risco crítico capaz de causar incêndio, explosão ou morte. A tabela 2 detalha este critério.

Tabela 2 - Descrição dos níveis do critério de severidade

Critério de severidade (FMEA)				
Nível	Descrição	Impacto na Performance	Impacto na Vida Útil	Impacto na Segurança
1	Muito Baixa	Impacto negligível na performance do sistema	Sem impacto significativo na vida útil	Sem risco à segurança
2	Baixa	Pequena redução na performance, facilmente compensável	Redução mínima da vida útil	Risco muito baixo, facilmente mitigável
3	Moderada	Redução moderada na performance, impacto perceptível	Redução moderada da vida útil	Risco moderado, requer atenção
4	Alta	Redução significativa na performance, impacto operacional importante	Redução significativa da vida útil	Risco alto, pode causar ferimentos ou danos
5	Muito alta	Perda severa de performance ou parada total do sistema	Perda prematura do componente	Risco crítico, pode causar morte, explosão ou incêndio

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Já o critério de ocorrência, apresentado na Tabela 3 a seguir, classifica a frequência esperada da falha conforme dados ou afirmações encontradas na literatura. Ele varia de 1 (muito baixa) a 5 (muito alta). A distinção entre “baixa”, “moderada” e “alta” é essencial, pois diversos componentes — como eletrolisadores PEM e retificadores — possuem falhas que emergem em função de mecanismos distintos (ex.: ciclos térmicos, contaminação, intermitência da fonte FV).

Tabela 3 - Descrição dos níveis do critério

Critério de ocorrência (FMEA)		
1	Muito Baixa	Falha muito rara, pode ocorrer apenas em condições extremas ou após muitos anos de operação
2	Baixa	Falha ocasional, pode ocorrer algumas vezes durante a vida útil do sistema
3	Moderada	Falha que pode ocorrer periodicamente durante a operação normal
4	Alta	Falha frequente, esperada durante a operação normal do sistema
5	Muito alta	Falha que é certa que irá aparecer recorrentemente durante a vida útil do sistema

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.2 MATRIZ DE RISCO E CLASSIFICAÇÃO

A Matriz de Risco (Tabela 4) permite integrar severidade e ocorrência em uma estrutura única, gerando valores que variam entre 1 e 25. Valores elevados indicam modos de falha que devem ser tratados com prioridade, sobretudo quando se localizam nos quadrantes de maior severidade e maior ocorrência. A Tabela 5, que apresenta a legenda de classificação dos riscos (baixo, médio, alto, crítico), possibilita uma leitura direta da criticidade operacional do sistema.

Tabela 4 - Matriz de risco

MATRIZ DE RISCO (Severidade × Ocorrência)					
Severidade Ocorrência \	1 (Muito Baixa)	2 (Baixa)	3 (Moderada)	4 (Alta)	5 (Muito Alta)
5 (Muito Alta)	5	10	15	20	25
4 (Alta)	4	8	12	16	20
3 (Moderada)	3	6	9	12	15
2 (Baixa)	2	4	6	8	10
1 (Muito Baixa)	1	2	3	4	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 5 - Legenda da matriz de risco

LEGENDA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO	
Faixa de Risco	Classificação
1 - 4	BAIXO
5 - 9	MÉDIO
10 - 14	ALTO
15 - 20	CRÍTICO

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, torna-se possível compreender a estrutura apresentada no apêndice A, que consolida o FMEA desenvolvido para o sistema, composto por 24

modos de falha. Essa sistematização permite visualizar, de maneira integrada, os riscos mais relevantes do sistema H2V-FV e estabelecer as prioridades para ações de mitigação e aprimoramento da confiabilidade global da planta.

4.3 ESTRUTURAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHA

A quantificação probabilística dos eventos indesejáveis é fundamental para compreender a interação entre as falhas dos componentes e mensurar seus impactos no evento principal, permitindo o mapeamento de causas raízes e a proposição de melhorias no sistema. No entanto, a análise de tecnologias emergentes, como plantas de H2V recém-construídas ou em fase de projeto, depara-se com o desafio da escassez de dados históricos de operação.

Para superar essa limitação, este trabalho estabelece uma metodologia que integra as informações qualitativas do FMEA à estrutura lógica da FTA. Neste contexto, os dados de entrada não são tratados como valores exatos (determinísticos), mas como variáveis aleatórias que refletem a incerteza associada à falta de informação perfeita.

A quantificação da confiabilidade do sistema foi realizada através da metodologia de FTA, cujas estruturas lógicas foram derivadas diretamente dos modos de falha identificados no FMEA. O evento topo analisado pela árvore de falha foi "Parada/Redução Inesperada na Produção de Hidrogênio", focando na confiabilidade operacional e na disponibilidade do ativo. A FTA completa, detalhando a hierarquia das portas lógicas e eventos básicos, encontra-se no apêndice B.

Dada a incerteza inerente aos parâmetros de entrada (derivados da literatura e não de dados de campo exatos), uma abordagem analítica tradicional — que utilizaria apenas valores médios de ocorrência — seria insuficiente e potencialmente enganosa, pois ocultaria a variabilidade do risco. Portanto, a propagação da incerteza através da árvore de falhas foi realizada via Simulação de Monte Carlo. O uso deste método justifica-se por três motivos centrais:

1. Tratamento Estocástico: Permite modelar a probabilidade de falha de cada componente não como um número fixo, mas como uma distribuição de probabilidade.
2. Propagação da Variância: Possibilita calcular como a incerteza de um componente básico afeta a incerteza do sistema global, algo inviável em cálculos determinísticos simples.
3. Resultado Probabilístico: Ao realizar milhares de iterações, o método gera um histograma de probabilidade para o Evento Topo, permitindo afirmar não apenas a

medida central do risco, mas também o nível de confiança dos resultados, crucial para a tomada de decisão em cenários de poucos dados.

A quantificação e propagação da probabilidade para o evento topo foram realizadas em Python. As etapas da metodologia serão detalhadas a seguir.

4.4 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA FTA

O objetivo central desta metodologia é transitar de uma abordagem qualitativa para uma modelagem estocástica quantitativa. Enquanto o FMEA fornece a identificação dos modos de falha, suas causas, efeitos e níveis de severidade, a FTA permite compreender a lógica de interação entre esses eventos e propagar suas probabilidades até o colapso do sistema (Evento Topo).

A inovação proposta neste trabalho reside na substituição de valores pontuais de falha por distribuições de probabilidade. Ao modelar cada evento básico através de uma distribuição estatística, incorpora-se à análise a "bagagem teórica" dos seus parâmetros.

A justificativa para a adoção universal da Distribuição de Weibull para modelar todos os modos de falha fundamenta-se na sua adaptabilidade e consistência física. Conhecida na literatura como uma distribuição "versátil", a Weibull é capaz de representar as três fases da curva da banheira (mortalidade infantil, vida útil e desgaste) apenas através do ajuste do parâmetro β . Desta forma, ela consegue unificar matematicamente comportamentos distintos — comportando-se como uma Distribuição Exponencial quando $\beta = 1$ (falhas aleatórias) ou aproximando-se de uma Distribuição Normal/Rayleigh quando $\beta > 2$ (desgaste) — sem a necessidade de alternar entre diferentes famílias estatísticas. Essa propriedade permite traduzir aspectos físicos do mundo real (como corrosão ou falha eletrônica) diretamente para o domínio temporal da simulação. Desta forma, os dados extraídos do FMEA (Ocorrência e Tipo de Falha) são utilizados para estimar estes parâmetros físicos e temporais, permitindo calcular a probabilidade de falha de cada evento.

O horizonte de análise definido foi o tempo de missão de 5 anos. Este período é crítico pois abrange a fase de consolidação da planta, um cenário realista onde dados históricos de longo prazo inexistem ou são escassos. O processo de quantificação foi estruturado em três etapas sequenciais e executado através de uma Simulação de Monte Carlo com 100.000 iterações, conforme detalhado a seguir.

4.4.1 MODELAGEM DA FÍSICA DE FALHA (PARÂMETRO β)

A primeira etapa da quantificação consiste na definição do comportamento

físico da falha ao longo do tempo. Graças à análise detalhada do FMEA, foi possível ultrapassar a simples identificação dos modos de falha e classificar os mecanismos de estresse subjacentes.

O parâmetro de forma (β) da distribuição de Weibull é o indicador matemático que traduz essa física. Ele determina se a taxa de falha é constante (independente do tempo), crescente ou decrescente. Neste estudo, assumiu-se a premissa de que falhas prematuras de manufatura ou erros humanos de instalação (características da região de "mortalidade infantil", onde $\beta < 1$) são mitigadas por processos rigorosos de controle de qualidade e comissionamento. Portanto, o modelo foca exclusivamente nas fases de vida útil e desgaste.

Para atribuir valores a este parâmetro na ausência de dados de ensaios destrutivos, utilizou-se a abordagem de Analogia Física, classificando cada modo de falha em três categorias baseadas na literatura clássica de confiabilidade (Abernethy, 2006; O'Connor; KLEYNER, 2012).

Reconhecendo que a física exata de cada componente pode variar conforme as condições de operação, o β não foi fixado em valores pontuais. Em vez disso, foi modelado como uma variável aleatória descrita por uma distribuição Beta, em que os parâmetros foram elicitados por uma PERT. A Tabela 6 resume os parâmetros adotados para cada categoria física identificada no FMEA.

Tabela 6 - Parametrização de β

Categoria Física FMEA)	(Do Comportamento da Falha	Parâmetros PERT para β (Mín - Moda - Máx)	Referência
Eletrônica / Eventos Externos	Taxa Constante (Aleatória)	0,9 – 1,0 – 1,1	O'Connor; KLEYNER, 2012 Abernethy, 2006
Degradação Físico-Química	Taxa Crescente	2,0 – 3,0 – 3,5	Abernethy, 2006
Fadiga Termomecânica	Taxa Crescente	2,5 – 3,25 – 4,0	Abernethy, 2006

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Desta forma, o modelo incorpora a incerteza física: um modo de falha classificado como "Degradação da Membrana" terá seu β sorteado em torno de 3,0, permitindo que a simulação explore cenários onde o desgaste é mais lento ou mais acelerado do que o previsto.

4.2.2 PARAMETRIZAÇÃO TEMPORAL (PARÂMETRO α)

Uma vez definida a natureza física da falha, a segunda etapa consiste em dimensionar a magnitude temporal do risco, ou seja, determinar o parâmetro de escala (α) da distribuição de Weibull, também conhecido como Vida Característica.

O desafio reside na tradução da nota ordinal de Ocorrência (O) do FMEA em uma grandeza física temporal. A premissa fundamental adotada neste trabalho é que a classificação de risco do FMEA reflete a probabilidade acumulada de falha P_{vida} ao final da vida útil nominal (t_{nom}) do equipamento, conforme especificado em manuais e na literatura.

Dada a subjetividade da classificação "Alta" ou "Baixa" e a ausência de dados históricos da planta, a probabilidade P_{vida} não foi associada a valores pontuais, mas tratada como uma variável aleatória com incerteza máxima.

Para tal, utilizou-se uma Distribuição Beta Padrão, definida no domínio $[0, 1]$, parametrizada via método PERT.

Limites (Mínimo e Máximo): Fixados em 0% e 100% para todos os níveis de Ocorrência. Esta abordagem evita o dogmatismo probabilístico. Ao permitir que a distribuição abranja quase todo o espectro de probabilidade (0 a 1), o modelo reconhece a possibilidade — ainda que remota — de um componente classificado como "Raro" sofrer uma falha catastrófica prematura, ou de um componente "Crítico" superar sua expectativa de vida. Isso garante que a simulação explore cenários de cauda (extremos) que seriam ignorados por distribuições truncadas.

Tendência Central: A distinção entre os níveis de risco (1 a 5) é feita exclusivamente pela Moda da distribuição, deslocando a massa de probabilidade conforme a severidade da classificação (ver Tabela 7).

Tabela 7 - Parametrização de α

Nota FMEA (O)	Classificação	Parâmetros PERT (Mín - Moda - Máx)
1	Remoto	0 – 0,10 – 1,00
2	Baixo	0 – 0,30 – 1,00
3	Moderado	0 – 0,50 – 1,00
4	Alto	0 – 0,70 – 1,00
5	Crítico	0 – 0,90 – 1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tendo em mãos t_{nom} , a probabilidade sorteada P_{vida} e o parâmetro β central

o parâmetro α torna-se a única incógnita da equação da CDF de Weibull. O algoritmo resolve a seguinte igualdade em cada iteração:

$$P_{vida} = 1 - e^{-\left(\frac{t_{nom}}{\alpha}\right)^\beta}$$

Isolando α :

$$\alpha = \frac{t_{nom}}{[-\ln(1 - P_{vida})]^{\frac{1}{\beta_{central}}}}$$

Desta forma, a incerteza qualitativa do FMEA é convertida em uma incerteza sobre a durabilidade real do componente.

4.2.3 INTEGRAÇÃO ESTOCÁSTICA

A terceira e última etapa da metodologia constitui o núcleo computacional do estudo, onde ocorre a síntese entre a física da falha (Etapa 1) e a estimativa temporal (Etapa 2). O objetivo é calcular a probabilidade de falha efetiva de cada componente no horizonte de tempo crítico $t_{alvo} = 5$ anos e propagar essa incerteza através da lógica do sistema.

Diferentemente de abordagens determinísticas que operam com valores únicos, esta etapa manipula vetores de simulação. Para cada uma das 100.000 iterações do método de Monte Carlo, o algoritmo executa os seguintes sub-processos:

1) Recombinação Paramétrica (Cálculo de $P(t)$):

Nesta fase, o modelo realiza o acoplamento final das incertezas. É fundamental destacar a estratégia de desacoplamento utilizada:

- I. Na Etapa 2, utilizou-se o valor *modal* do Beta ($\beta_{central}$) apenas para ancorar o cálculo da vida característica (α), evitando que a variância da forma distorcesse a estimativa da escala temporal.
- II. Agora, na Etapa 3, o modelo recupera a distribuição estocástica completa do beta, gerada na Etapa 1.

Desta forma, para cada iteração i , o cálculo da probabilidade de falha utiliza:

- O α_i (que carrega a incerteza da frequência de falha oriunda do FMEA);
- O β_i (que carrega a incerteza sobre a agressividade física da degradação).

A probabilidade de falha do evento básico no tempo alvo é obtida pela Função de Distribuição Acumulada (CDF) de Weibull:

$$P_i(t_{alvo}) = 1 - e^{-\left(\frac{t_{alvo}}{\alpha_i}\right)^{\beta_i}}$$

Esta formulação matemática é robusta pois reintroduz a variabilidade física no momento do cálculo do risco. Isso permite que a simulação capture cenários onde um componente pode ter, simultaneamente, uma vida útil estimada menor que a nominal (devido a Ocorrência Alta) e um mecanismo de degradação mais agressivo que a média (devido a um β alto sorteado na cauda da distribuição).

2) Propagação Lógica (Agregação *Bottom-Up*):

Uma vez gerados os vetores de probabilidade para todos os eventos básicos (folhas da árvore), inicia-se a propagação sistêmica em direção ao Evento Topo. A agregação segue estritamente a lógica booleana definida na FTA, utilizando as equações probabilísticas exatas de acordo com a porta estabelecida.

3) Saídas do Modelo (Diagnóstico de Incerteza)

A execução deste processo iterativo resulta na geração de histogramas de probabilidade não apenas para o Evento Topo, mas para todos os eventos intermediários.

Isso confere ao estudo uma capacidade diagnóstica superior: permite analisar a largura das distribuições (dispersão) de cada subsistema, identificando se a incerteza global do projeto provém predominantemente da variabilidade física dos componentes ou da incerteza dos dados de entrada.

4.2.4 TRATAMENTO DE CASOS ESPECÍFICOS

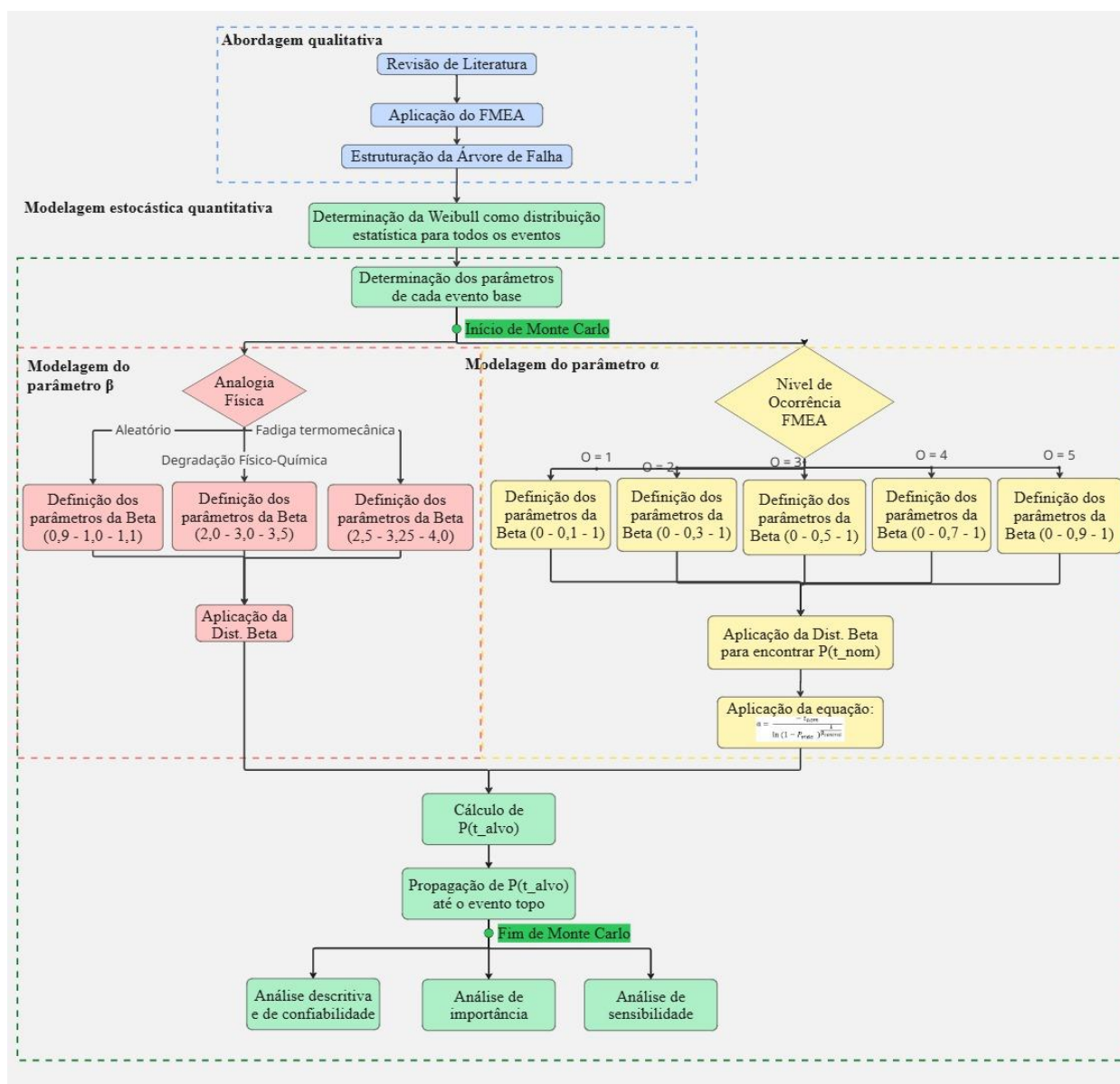
Alguns eventos básicos ou intermediários exigiram tratamento especial para alinhar a FTA ao FMEA:

- Eventos Não-FMEA (O=1): Eventos como "Condições climáticas adversas" e "Ruptura de outros componentes" não estavam explicitamente no FMEA, mas foram adicionados à FTA para completude lógica.
 - Para "Condições climáticas adversas", atribuiu-se O=1, pois o evento não se refere à intermitência normal (noite/dia), mas sim a eventos severos e *inesperados* que excedem o planejamento da planta.
 - Para "Ruptura de outros componentes" (no BoP), O=1 foi usado para representar falhas genéricas e raras não cobertas pelos modos principais (ex: falha de um flange, corrosão de uma tubulação menor), tratando-a como um evento de causa-raiz de baixa probabilidade.

- Desagregação Top-Down (O Caso do Inversor): O evento intermediário "Falha no inversor" possuía uma nota de Ocorrência no FMEA, mas seus eventos-filho (ex: "Falha elétrica", "Superaquecimento") não. Para permitir a análise de causa-raiz, foi aplicada uma desagregação *top-down*:
 1. A P_{alvo} do "pai" ('Falha no inversor', O=4) foi calculada em cada iteração (assim como a determinação dos parâmetros da Weibull).
 2. Esta probabilidade foi distribuída igualmente entre os N eventos-filho usando a fórmula $P_{alvo-filho} = 1 - (1 - P_{alvo-pai})^{\frac{1}{N}}$.
 3. Essa abordagem de "pesos iguais" é uma simplificação de modelagem que permite a análise de sensibilidade futura, mesmo na ausência de dados de falha para os subcomponentes.

A figura 2 a seguir resume a metodologia desenvolvida acima.

Figura 2 - Resumo metodológico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 FMEA

5.1.1 ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa dos modos de falha das placas solares evidencia um impacto sistêmico crítico: qualquer falha que reduza a potência de saída do subsistema FV eleva o risco de operação intermitente e ciclagem do eletrolisador, um efeito que, como visto na literatura, causa degradação acelerada da membrana. A análise também identificou falhas que atuam como mecanismos propagadores; a quebra do vidro e a delaminação do encapsulante, por exemplo, facilitam a penetração de agentes externos, potencializando o surgimento de falhas secundárias. Adicionalmente, modos de falha operacionais como a sujidade e o sombreamento, embora facilmente mitigáveis, são de alta prioridade. Isso se deve ao fato de potencializarem diretamente a formação de *hotspots*, um evento de Severidade máxima ($S=5$) que representa um risco crítico de segurança (risco de incêndio), reforçando a necessidade de estratégias de manutenção ativa.

A análise da caixa de junção e da estrutura de fixação revela um perfil de risco que exige atenção: embora os modos de falha apresentem baixa Ocorrência ($O=1$ e $O=2$), a Severidade (S) associada é extremamente alta ($S=4$ e $S=5$). Este cenário resulta em eventos de alto risco intrínseco (como risco de incêndio e choque elétrico) que, no momento, são mascarados pela baixa frequência. Portanto, a manutenção preventiva e preditiva é fundamental. Para este perfil de risco específico (Baixa Ocorrência / Alta Severidade), ter apenas a manutenção corretiva é inaceitável. A estratégia de gestão deve ser puramente proativa, focada na manutenção preventiva e preditiva. O objetivo é garantir que esses níveis de ocorrência permaneçam baixos, gerenciando ativamente a integridade do sistema para prevenir falhas de consequências catastróficas.

A análise FMEA dos conectores elétricos destaca dois perfis de falha distintos. O curto-circuito é o modo de maior criticidade, classificado com Severidade máxima ($S=5$) devido ao risco direto de incêndio e choque elétrico. A sua Ocorrência, avaliada em $O=2$, é significativa, pois sugere que a falha não é puramente aleatória, mas sim um evento que pode ser gerenciado, muitas vezes decorrente de degradação detectável (ex: corrosão, entrada de umidade). Por outro lado, o circuito aberto, embora não apresente risco direto à segurança, compartilha um efeito sistêmico grave com o curto-circuito: ambos levam à parada imediata da *string*. Essa falha resulta em

intermitência operacional abrupta para a planta, um evento que, como discutido, eleva o risco de degradação do eletrolisador. Conclui-se que uma instalação robusta, que proteja os conectores da exposição a agentes ambientais (umidade, poeira), é a principal barreira de mitigação para ambos os modos de falha.

A análise do inversor revela o modo de falha de maior criticidade em todo o subsistema fotovoltaico, com um RPN (Número de Prioridade de Risco) de 20. Este índice é impulsionado por uma combinação de Severidade máxima ($S=5$) e Ocorrência alta ($O=4$). Qualitativamente, o inversor é o "coração" do sistema FV; sua falha acarreta a parada imediata e total da geração fotovoltaica, como identificado por Colli (2015) e IEA-PVPS (2025). O impacto sistêmico para a planta de H2V é a interrupção abrupta da geração própria, forçando uma parada ou a dependência total da rede, o que eleva os custos e o risco de ciclagem do eletrolisador. Além da severidade operacional (parada), a Severidade para a segurança também é máxima, pois falhas de hardware ou isolamento no inversor apresentam risco crítico de incêndio e choque elétrico. Dada a complexidade do equipamento, a falha geralmente exige a substituição do componente, resultando em longos tempos médios de reparo (MTTR) e perdas significativas de produção.

A análise do eletrolisador PEM revela um perfil de risco elevado e interconectado, com todos os componentes críticos do *stack* (membrana, catalisador e placas bipolares) apresentando índices críticos, todos acima de 15. O ponto central desta análise é a intermitência operacional, que atua tanto como a principal causa-raiz dessas falhas quanto como um modo de falha de processo por si só. Notavelmente, a "Intermitência Operacional" é o único modo de falha em todo o FMEA a receber a Ocorrência máxima ($O=5$). Isso se justifica por sua natureza dupla: é composta por fatores incontroláveis (o ciclo solar, que é inevitável) e por fatores controláveis (paradas e partidas operacionais) que, na prática, são difíceis de gerenciar. Esta intermitência contínua agrava diretamente os modos de falha do *stack*, impondo estresse dinâmico (flutuações de pressão, tensão e corrente) que acelera a degradação da membrana, do catalisador e das placas. Portanto, o controle robusto em tempo real dessas variáveis operacionais é a principal estratégia de mitigação para reduzir a ocorrência de danos e mitigar o desgaste geral do eletrolisador.

Os modos de falha identificados nos sistemas auxiliares do eletrolisador — incluindo os sistemas de refrigeração, controle, purificação do hidrogênio, separação

e secagem do gás e fornecimento de água — mostram que suas degradações impactam diretamente a eficiência global e a segurança operacional da planta. Observa-se que falhas como superaquecimento no sistema de refrigeração e falhas no fornecimento de água possuem alto potencial de criticidade (níveis 12 e 15, respectivamente), podendo resultar em superaquecimento da membrana, explosões e danos irreversíveis ao *stack*. As falhas associadas ao controle e retificação de energia também demonstram criticidade elevada (nível 15), uma vez que comprometem a resposta automática do sistema a condições anômalas e podem gerar sobrecorrente, despressurização rápida e choque elétrico. Já falhas nos sistemas de purificação e secagem de gás apresentam riscos operacionais e de qualidade (níveis 9 e 15), afetando a pureza do hidrogênio e aumentando o risco de misturas explosivas. Por fim, a degradação da qualidade da água, com o maior índice de criticidade (16), destaca-se como fator de risco cumulativo, uma vez que acelera a corrosão da membrana e reduz a eficiência de conversão energética ao longo do tempo.

5.1.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

A tabela 8 mostra os modos de falha considerados com risco crítico (índice de criticidade ≥ 15), conforme a matriz de risco apresentada anteriormente. Nela, observa-se que 50% dos modos de falha analisados foram classificados como críticos, evidenciando a relevância dos mecanismos de falha associados à segurança operacional e à integridade do sistema. Dentre esses, todas as falhas relacionadas ao eletrolisador foram consideradas críticas, representando o núcleo de maior vulnerabilidade do sistema de produção de hidrogênio verde. Por outro lado, apenas 16,67% (duas falhas) correspondem ao subsistema fotovoltaico. Apesar desse baixo número, é importante ressaltar que as falhas associadas ao subsistema fotovoltaico são as causas diretas da falha de intermitência, cujo a ocorrência possui nível mais elevado em todo FMEA, 5. Reduzir esse nível é atuar diretamente nas falhas associadas ao subsistema FV.

Essa distribuição evidencia que os sistemas auxiliares do eletrolisador (como os sistemas de controle, refrigeração, fornecimento de água e retificação) concentram falhas de alta severidade ($S = 5$), frequentemente combinadas a ocorrências moderadas ($O = 3-4$), resultando em índices de risco entre 15 e 20, considerados críticos. Tal resultado é coerente com a literatura, que aponta os sistemas auxiliares como pontos sensíveis à falha devido à sua função de suporte direto ao processo

eletroquímico e à dependência de condições operacionais estáveis.

Tabela 8 - Modos de falha mais críticos.

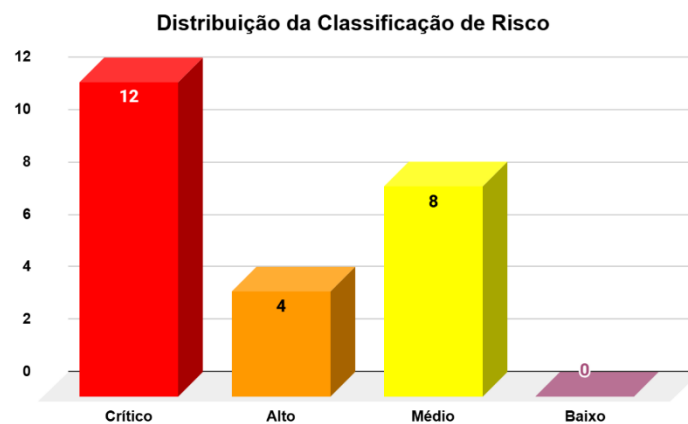
Prioridade	Componente	Modo de Falha	S	O	Risco	Segurança
1	Inversor	Falha no Inversor	5	4	20	CRÍTICO
1	Eletrolisador PEM	Degradação da membrana PEM	5	4	20	CRÍTICO
3	Eletrolisador PEM	Intermitência (Ciclagem)	4	5	20	MÉDIO
4	Eletrolisador PEM	Degradação do Catalisador	4	4	16	BAIXO
4	Eletrolisador PEM	Degradação das Placas Bipolares	4	4	16	BAIXO
4	Sistemas auxiliares do eletrolisador	Degradação da Qualidade da Água	4	4	16	MÉDIO
7	Placas solares	Hotspot	5	3	15	CRÍTICO
7	Eletrolisador PEM	Falha nas vedações	5	3	15	CRÍTICO
7	Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Sistema de Controle	5	3	15	CRÍTICO
7	Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Sistema de Separação e Secagem do Gás	5	3	15	CRÍTICO
11	Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Retificador Falha no Fornecimento de Água	5	3	15	ALTO
12	Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Retificador	5	3	15	MÉDIO

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 3 apresenta a distribuição das classificações de risco obtidas a partir da análise FMEA. Observa-se que nenhum modo de falha foi classificado como de risco baixo, o que reforça o caráter sensível e potencialmente perigoso dos sistemas que compõem a planta de produção de hidrogênio verde. No total, 67% dos modos de falha foram avaliados como de criticalidade alta ou crítica, indicando que a maioria das falhas analisadas possui impacto significativo sobre a segurança operacional e o desempenho global do sistema. Além disso, observa-se que, dentre os oito modos de falha classificados como de risco médio, sete estão associados ao subsistema fotovoltaico. Essa predominância sugere que há maior margem de intervenção para

mitigação de risco nesse subsistema, uma vez que a mediana da ocorrência foi igual a 3, indicando eventos de frequência moderada e potencialmente reduzível por meio de aprimoramentos operacionais e de monitoramento. Ainda que tais modos sejam classificados como de risco médio, eles exercem influência direta sobre o principal fator de falha identificado no sistema: a intermitência operacional. Esse tipo de instabilidade, se não for devidamente controlado, pode amplificar o desgaste dos componentes e aumentar a probabilidade de falhas em cascata, afetando o desempenho do eletrolisador e, consequentemente, a eficiência global da produção de hidrogênio.

Figura 3 - Distribuição da Classificação de Risco



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise estatística comparativa dos Índices de Criticalidade (IC) revela uma disparidade de risco significativa entre os subsistemas. O subsistema de eletrólise (Eletrolisador + BoP) apresenta uma mediana de IC de 15, consideravelmente maior que a mediana de 9 do subsistema FV. Este dado é agravado pela moda do IC da eletrólise ser também 15, indicando que o "risco típico" neste subsistema já é classificado como crítico. A causa dessa disparidade não está apenas na Severidade (S). Embora a mediana da Severidade da eletrólise (4,5) seja ligeiramente superior à do FV (4,0), a moda para ambos é 5 (máxima). Isso confirma que falhas com consequências catastróficas ($S=5$) são uma ameaça em ambos os lados do sistema.

O ponto de atenção da análise, portanto, reside na Ocorrência (O). A mediana e a moda da Ocorrência para ambos os subsistemas, e para o sistema geral, convergem em 3 (mediana e moda). Este é o insight mais importante da análise quantitativa: ao contrário da Severidade (que é intrínseca ao projeto e difícil de

alterar), a Ocorrência é a variável que pode ser ativamente gerenciada e reduzida. Um índice '3' não representa um evento raro, mas sim uma falha gerenciável. Isso evidencia uma clara oportunidade para melhorar o risco global (cuja mediana é $S=4$ e $O=3$), focando em estratégias de manutenção proativas que visem reduzir este índice de Ocorrência.

Tabela 9 - Todos os critérios por subsistema

Severidade por subsistema	Mediana	Moda	Ocorrência por subsistema	Mediana	Moda	Risco por subsistema	Mediana	Moda
Geral	4	5	Geral	3	3	Geral	13,5	15
Eletrólise	4,5	5	Eletrólise	3	3	Eletrólise	15	15
Sistema Fotovoltaico	4	5	Sistema Fotovoltaico	3	3	Sistema Fotovoltaico	9	9

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, a análise do FMEA focada especificamente na segurança humana (uma métrica distinta da Severidade operacional) revela um panorama de risco elevado e distribuído. Notavelmente, na figura 4, mais de 53% dos modos de falha identificados apresentam um impacto de nível "Alto" ou "Crítico" direto à integridade dos operadores. A análise da Tabela 10, que estratifica este risco por subsistema, oferece a conclusão mais contundente desta seção: A percepção comum de que o risco reside apenas no processo de eletrólise é equivocada. A análise quantitativa mostra uma paridade de risco crítico entre os subsistemas. Ambos os setores, FV e Eletrólise, apresentam exatamente 4 modos de falha de nível "Crítico" e um número comparável de riscos de nível "Alto" (3 no FV, 2 na Eletrólise). Isso demonstra que o risco elétrico (choque e arco voltaico de alta tensão/corrente no lado FV) é estatisticamente tão perigoso quanto o risco químico (vazamento de H_2 e mistura explosiva no lado da eletrólise). Portanto, a gestão de segurança deve ser integrada, exigindo protocolos rigorosos e equivalentes tanto para a segurança elétrica quanto para a segurança de processos inflamáveis.

Figura 4 - Distribuição dos níveis de segurança da planta



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 10 - Nível de segurança por subsistema

Nível de segurança por subsistema		
Eletrólise	Crítico	4
	Alto	2
	Médio	3
	Baixo	3
	Mínimo	0
Sistema fotovoltaico	Crítico	4
	Alto	3
	Médio	1
	Baixo	3
	Mínimo	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 FTA

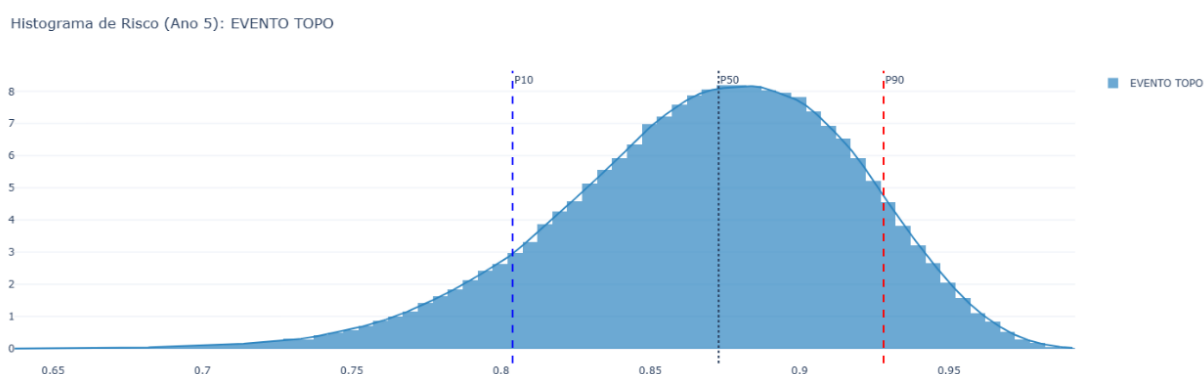
5.2.1 ANÁLISE DO EVENTO TOPO

A análise probabilística focou no evento topo definido como "Parada não programada ou Redução de capacidade da planta". Diferentemente de eventos catastróficos de segurança, cuja ocorrência deve ser remota, este evento representa a interrupção da continuidade operacional, impactando diretamente a eficiência financeira do ativo.

Os resultados da simulação (Figura 5) indicam que a probabilidade acumulada de ocorrer pelo menos um evento de parada ou redução nos primeiros 5 anos apresenta uma mediana (P50) de 87,41%. Mais alarmante do que o valor central é a análise dos percentis extremos. O intervalo de confiança entre o cenário otimista (P10 = 79,84%) e o cenário pessimista (P90 = 92,89%) revela uma robustez negativa do sistema: mesmo sob as premissas mais favoráveis de física e operação (P10), a

probabilidade de falha permanece em patamares altos. A "cauda esquerda" da distribuição é praticamente inexistente, demonstrando que não existem combinações prováveis de parâmetros que resultem em uma operação segura sem intervenções de manutenção ou redundância adicionais. Este resultado demonstra que a operação ininterrupta ("zero falhas") durante todo o período de consolidação é um cenário estatisticamente improvável (apenas ~7% a 21% de chance de sucesso total). Isso é consistente com a natureza industrial de plantas de Hidrogênio Verde, onde a complexidade dos subsistemas (Eletrolisador + Solar + BoP) cria múltiplos pontos de falha que, embora não representem risco à vida, forçam paradas de manutenção.

Figura 5 - Histograma do Evento topo no Ano 5



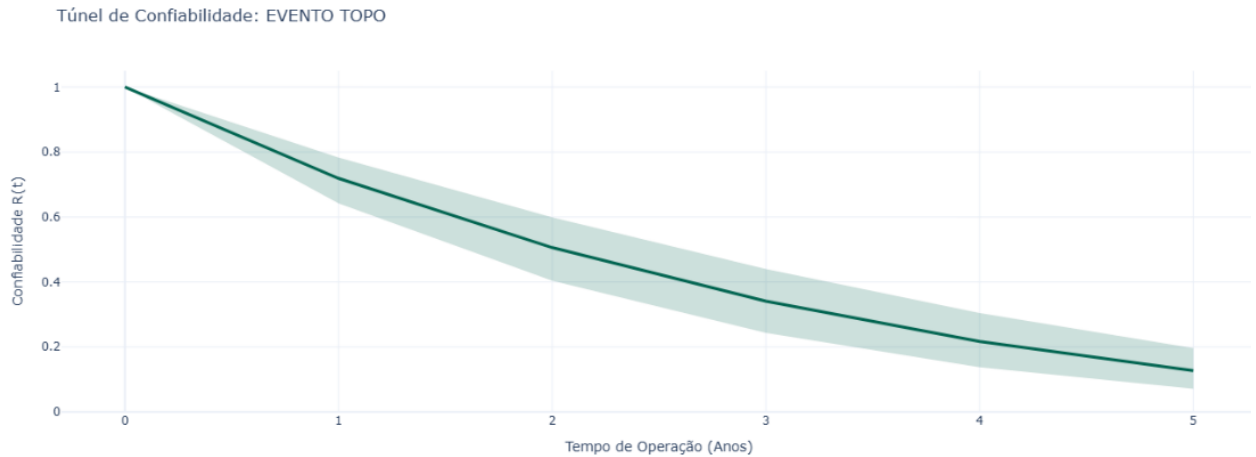
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao analisar o Túnel de Confiabilidade ao longo dos 5 primeiros anos (figura 6) observa-se que a confiabilidade do sistema cai para 50% já ao final do 2º ano. Ou seja, estatisticamente, espera-se que a primeira falha relevante que exija intervenção (parada ou redução) ocorra em torno do segundo ano de operação. A largura da faixa de incerteza (a distância entre P10 e P90) mantém-se relativamente constante entre 15% e 20%. Isso indica que a incerteza dos dados de entrada não é suficiente para mascarar a tendência física: o sistema sofre de uma combinação de mortalidade infantil residual (queda inicial) e desgaste acelerado (queda contínua). Isso refuta a ideia de que a planta pode operar em regime de "manutenção mínima" durante os 5 primeiros anos. O plano de manutenção deve atuar de maneira preventiva para evitar que a "parada não programada" se concretize.

A alta probabilidade de redução de produção (convergindo para >90% no cenário P90) é impulsionada pela física de degradação dos componentes. Como o

modelo considerou $\beta > 1$ para itens críticos, o sistema perde robustez com o tempo. O resultado de 87% não indica um "erro de projeto", mas sim a característica intrínseca de desgaste da tecnologia de eletrólise acoplada à intermitência solar. Assim, conclui-se que a planta terá como risco acentuado, como previsto em literatura, a indisponibilidade da mesma ao longo de sua operação.

Figura 6 - Túnel de confiabilidade do evento topo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2.2 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA FUSSELL-VESELY PARA EVENTOS BÁSICOS

Para hierarquizar a criticidade dos componentes e identificar quais falhas contribuem mais severamente para a indisponibilidade do sistema, utilizou-se a Análise de Importância de Fussell-Vesely (F-V). Matematicamente, o F-V calcula a fração do risco total que é eliminada caso um determinado componente se torne "perfeito" (probabilidade de falha zero).

A Equação a seguir formaliza esse conceito, onde FV_i representa o fator de importância do evento i , $P_{topo(base)}$ é a probabilidade do evento topo sob condições normais e $P_{topo(Pi=0)}$ é a probabilidade recalculada do evento topo assumindo que o evento i não ocorre:

$$FV_i = \frac{P_{topo(base)} - P_{topo(Pi=0)}}{P_{topo(base)}}$$

Diferentemente de abordagens determinísticas que retornam um valor único de importância, este estudo incorporou o cálculo do F-V dentro das iterações de

Monte Carlo. O resultado é uma distribuição de probabilidade da importância para cada evento, permitindo avaliar não apenas a "culpabilidade" mediana do componente, mas também a incerteza associada a essa importância.

A Tabela 11 apresenta o ranking dos componentes básicos. Um primeiro diagnóstico fundamental é a pulverização do risco: o evento mais crítico ("Sombreamento") possui uma importância mediana (P50) de apenas 3,74%. Isso indica que o sistema não possui um único "ponto único de falha" dominante, mas sim que o risco de parada é resultado da contribuição agregada de múltiplos fatores de baixa/média probabilidade. Esta é uma evidência da importância de realizar um estudo macro de confiabilidade em sistema de produção de H2V, ao invés de simplesmente estudar componente a componente.

Os dois maiores vetores de risco são externos à planta: Sombreamento (P50 = 3,74%) e Condições Climáticas Adversas (P50 = 3,70%). Embora possuam medianas tecnicamente empatadas, a análise de incerteza revela comportamentos distintos:

- Sombreamento: Apresenta uma importância mais estável (Amplitude P90-P10 = 6,16%).
- Condições Climáticas: Apresenta maior volatilidade (Amplitude = 8,67%).

Nota-se uma inversão de ranking nos cenários extremos: sob condições pessimistas (P90), as "Condições Climáticas" assumem a liderança (9,49%) sobre o Sombreamento (7,68%). Isso sugere que a variabilidade climática é um fator de risco mais explosivo do que a previsibilidade geométrica do sombreamento.

Logo abaixo dos fatores ambientais, observa-se um bloco de componentes de *Balance of Plant* (Sistema de Controle, Fornecimento de Água e Retificador) empatados com 2,70% de importância mediana.

Um ponto crucial observado nos dados é a "Barreira de Relevância". Ao comparar os cenários extremos, percebe-se que a incerteza, embora exista, não é suficiente para alterar a estrutura macro do ranking. Por exemplo, o evento "Degradação da Qualidade da Água" (15º colocado) possui um cenário otimista (P90 de falha = 0,63%) que ainda é inferior ao cenário pessimista dos eventos prioritários (acima de 1,06%).

Isso valida a estratégia de priorização: os 12 eventos na base da tabela (como "Quebra de vidro" ou "Falha na estrutura") possuem importâncias tão baixas e

intervalos de incerteza tão estreitos que podem ser seguramente classificados como negligenciáveis para fins de manutenção imediata, independentemente do cenário físico simulado.

Observou-se uma correlação direta entre a magnitude da importância e a sua amplitude de variação (Amplitude P90-P10). Eventos com F-V baixo tendem a ter amplitudes pequenas. Isso se dá porque o cálculo do F-V é uma razão, como mostrado na equação acima. Quando a probabilidade de falha de um evento é muito pequena (próxima de zero), a sua capacidade de impactar o numerador da equação é matematicamente limitada, restringindo a variação do resultado. Fisicamente, isso significa que componentes muito robustos (raros de falhar) são consistentemente irrelevantes, enquanto componentes frágeis têm espaço para oscilar entre "muito críticos" e "pouco críticos" dependendo da agressividade do desgaste (β) sorteado.

Os baixos valores absolutos de importância (máximo de ~3,7%) reforçam que a melhoria da qualidade individual das peças terá retorno marginal sobre a disponibilidade. A planta sofre de uma fragilidade sistêmica decorrente da configuração em série de múltiplos subsistemas. Portanto, para elevar a confiabilidade global, a estratégia mais eficaz não é a "troca por componentes melhores", mas sim a introdução de redundâncias (paralelismo) nos subsistemas críticos identificados, como o controle e o fornecimento de água, para que a falha de um item não implique na parada imediata da produção.

Tabela 11 - Ranking de eventos básicos que mais impactam o Evento Topo

Ranking	Evento	P10	P50 (Mediana)	P90	Amplitude (Incerteza)
1º	Sombreamento	1.52%	3.74%	7.68%	6.16%
2º	Condições climáticas adversas	0.82%	3.70%	9.49%	8.67%
3º	Falha no Sistema de Controle	1.08%	2.70%	5.74%	4.66%
-	Falha no Fornecimento de Água	1.08%	2.70%	5.73%	4.65%
5º	Falha no Retificador	1.08%	2.69%	5.71%	4.63%
6º	Falha no software do inversor	0.82%	1.76%	3.14%	2.31%
-	Superaquecimento do inversor	0.82%	1.76%	3.14%	2.31%
-	Falha elétrica/eletrônica no inversor	0.82%	1.76%	3.14%	2.31%
9º	Degradação do catalisador	0.47%	1.20%	2.66%	2.19%
10º	Degradação da membrana	0.47%	1.19%	2.66%	2.20%
-	Degradação das placas bipolares	0.46%	1.19%	2.65%	2.19%
12º	Falha na caixa de junção	0.35%	1.07%	2.61%	2.26%
13º	Falha do Diodo de bypass	0.35%	1.06%	2.58%	2.23%
14º	Falha nas vedações	0.29%	0.79%	1.86%	1.57%
15º	Degradação da Qualidade da Água	0.09%	0.26%	0.63%	0.54%
16º	Ruptura de outros componentes	0.03%	0.18%	0.63%	0.60%
17º	Falha no Sistema de Separação e Secagem do Gás	0.06%	0.17%	0.44%	0.38%
-	Falha do Sistema de Refrigeração	0.06%	0.17%	0.44%	0.38%
-	Falha no Sistema de Purificação do H2	0.06%	0.17%	0.44%	0.38%
20º	Sujidade	0.05%	0.16%	0.42%	0.36%
21º	Quebra da célula	0.02%	0.06%	0.16%	0.14%
22º	Falha no encapsulante	0.02%	0.05%	0.15%	0.13%
23º	Curto circuito	0.01%	0.03%	0.10%	0.09%
-	Circuito aberto	0.01%	0.03%	0.08%	0.07%
25º	Quebra do vidro da placa	0.00%	0.02%	0.06%	0.05%
26º	Falha na estrutura	0.00%	0.01%	0.04%	0.04%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2.3 ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA FUSSELL-VESELY PARA EVENTOS INTERMEDIÁRIOS

A análise do ranking dos eventos intermediários (subsistemas) revela uma clara hierarquia de criticidade que deve orientar a gestão de ativos da planta. A Tabela 12 apresenta os resultados consolidados.

O diagnóstico mais contundente é a dominância absoluta do evento "Falha

Crítica de Fornecimento de Energia Solar". Com uma importância mediana (P50) de 28,52%, este subsistema isolado é responsável por quase um terço da probabilidade de falha da planta. Para contextualizar a magnitude deste resultado, o segundo subsistema mais crítico ("Falha nos Sistemas Auxiliares") possui um P50 de 7,28%, e o próprio Eletrolisador aparece apenas com 5,84%. Ou seja, a fonte de energia é aproximadamente 4 vezes mais crítica para a disponibilidade do que o processo de eletrólise em si. Isso demonstra que, na arquitetura atual (sem armazenamento via baterias ou conexão à rede), a intermitência e as falhas do campo solar são o gargalo determinante da produção.

A análise de amplitude (P90-P10) reforça a criticidade do setor solar sob uma ótica probabilística. O subsistema solar apresenta a maior incerteza do estudo (Amplitude de 18,06%). Em condições de estresse físico intenso, a importância deste subsistema salta para 38,11%, dominando completamente o perfil de risco da planta. Mesmo ao confrontar o cenário mais otimista do Solar (P10 = 20,05%) com o cenário mais pessimista do segundo colocado, "Falha nos Sistemas Auxiliares" (P90 = 12,83%), o subsistema solar permanece como prioridade máxima. Isso comprova que a liderança do Solar não é um artefato estatístico ou uma coincidência de simulação, mas uma característica determinística do sistema: não existe cenário físico razoável onde o Solar deixe de ser o gargalo principal.

Ao investigar as causas raízes dentro do subsistema solar, observa-se que o evento "Falha no Sistema Fotovoltaico" (Hardware) ocupa a 2ª posição geral (P50 = 14,10%), enquanto a "Irradiância Insuficiente" (Ambiente) ocupa a 4ª posição (P50 = 6,49%). Percebe-se, então, que o risco de falha por quebra de equipamentos (painéis, cabos, inversores) é mais que o dobro do risco de indisponibilidade por falta de sol. Isso é um indicador positivo para a operação, pois sugere que a maior parte das perdas é mitigável via manutenção, e não apenas uma consequência inevitável do clima.

Um detalhe técnico relevante surge ao analisar a 5ª posição: o evento intermediário "Falha no Inversor" (P50 = 6,01%) possui uma importância superior à de todo o subsistema "Falha no Eletrolisador" (P50 = 5,84%). Isso valida a literatura clássica de sistemas fotovoltaicos, que aponta a eletrônica de potência como o componente de menor confiabilidade. No contexto desta planta, o inversor sozinho representa um risco maior à continuidade da produção do que todo o complexo *stack* de eletrólise.

Para a equipe de O&M, estes dados ditam a prioridade estratégica: recursos de monitoramento preditivo e estoque de sobressalentes devem ser massivamente alocados no campo solar, especificamente nos inversores e nos módulos (P50 = 6% e 5% respectivamente). Mitigar falhas neste setor oferece o maior retorno em termos de disponibilidade global da planta, visto que a incerteza associada a ele (amplitude alta) sugere que uma manutenção negligente pode elevar rapidamente sua contribuição de falha para o patamar de quase 40%.

Tabela 12 - Ranking de eventos intermediários que mais impactam o Evento Topo

Ranking	Evento	P10	P50 (Mediana)	P90	Amplitude (Incerteza)
1º	Falha Crítica Solar	20,05%	28,52%	38,11%	18,06%
2º	Falha no sistema fotovoltaico	7,96%	14,10%	21,74%	13,77%
3º	Falha Auxiliares	3,66%	7,28%	12,83%	9,17%
4º	Irradiância Insuficiente	3,07%	6,49%	12,50%	9,43%
5º	Falha no inversor	2,67%	6,01%	11,36%	8,69%
6º	Falha no Eletrolisador	2,97%	5,84%	10,20%	7,23%
7º	Falha nos módulos	2,64%	5,10%	8,70%	6,07%
8º	Surgimento de <i>Hotspot</i>	1,63%	3,34%	5,97%	4,34%
9º	Falha na Água	1,33%	3,08%	6,27%	4,94%
10º	Vazamento de H2	1,17%	2,49%	4,79%	3,62%
11º	Falha de isolamento	0,40%	1,14%	2,71%	2,31%
12º	Falha no cabeamento e conexões	0,03%	0,07%	0,17%	0,14%
13º	Danos físicos ao modulo	0,02%	0,05%	0,12%	0,10%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2.4 CARACTERIZAÇÃO ESTOCÁSTICA DA CONFIABILIDADE POR COMPONENTE

Para aprofundar o diagnóstico de confiabilidade além do ranking de importância, esta seção investiga o comportamento dinâmico dos três subsistemas críticos: Inversor, Eletrolisador e Módulos Fotovoltaicos. O objetivo é compreender não apenas "quem falha mais", mas "como a falha evolui" ao longo do tempo.

A metodologia consistiu na agregação das curvas de falha de todos os componentes básicos que compõem cada subsistema. A partir da simulação de Monte Carlo para o horizonte de 5 anos, obtiveram-se três funções fundamentais da engenharia de confiabilidade:

1. Função Confiabilidade: A probabilidade de sobrevivência até o tempo t .

2. Função Densidade de Probabilidade (PDF): A derivada de $R(t)$, indicando a concentração de falhas em períodos específicos.
3. Taxa de Falha: A taxa instantânea de falha condicional, que permite diagnosticar se o componente sofre de mortalidade infantil, falha aleatória ou desgaste acelerado.

A Figura 7 apresenta o painel de caracterização física do Inversor. A análise das curvas confirma a natureza eletrônica deste componente, dominada por falhas aleatórias, mas com nuances importantes reveladas pela incerteza.

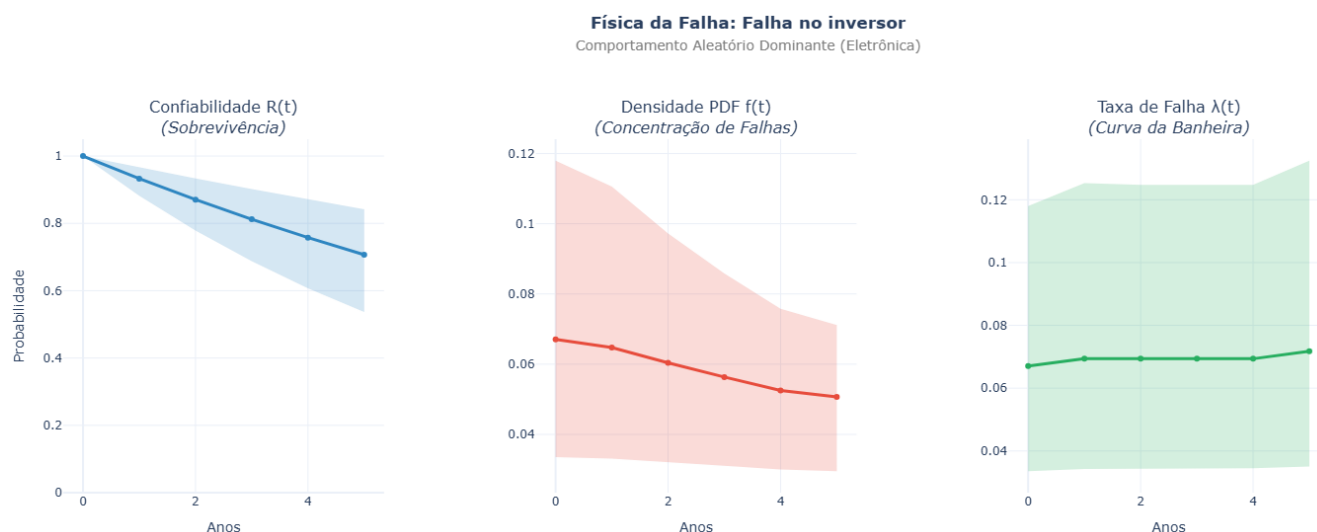
A curva de sobrevivência (Gráfico à esquerda) apresenta um decaimento quase linear. A mediana da confiabilidade inicia em 100% e reduz para aproximadamente 71% ao final do 5º ano. Observa-se o fenômeno de "Abertura do Cone de Incerteza". No ano 1, a variação (P90-P10) é pequena, mas no ano 5 ela oscila entre 53% (cenário pessimista) e 84% (otimista). Isso indica que a previsibilidade do estado de saúde do inversor diminui drasticamente conforme o tempo avança, dificultando o planejamento de longo prazo sem dados de monitoramento real.

O gráfico de PDF (centro) mostra uma mediana decrescente, saindo de 0,067 (ano 0) para 0,051 (ano 5). A queda na densidade não significa que o risco diminuiu, mas sim que a população de inversores "sobreviventes" está diminuindo. A amplitude da incerteza é notavelmente alta no primeiro ano (variando entre 0,11 e 0,03), o que reflete a dúvida sobre a qualidade do lote de fabricação.

O gráfico mais revelador é o da Taxa de Falha (à direita). A mediana apresenta-se praticamente constante ao longo dos 5 anos, variando marginalmente de 0,0694 (ano 1) para 0,0718 (ano 5). A constância de confirma que o Inversor opera na região de "Vida Útil" da Curva da Banheira. Isso significa que o componente não sofre de desgaste mecânico progressivo clássico (como corrosão). As falhas ocorrem devido a estresses aleatórios.

A incerteza associada à taxa de falha é elevada (0,035 a 0,132). Contudo, o comportamento constante dita a estratégia: manutenções preventivas baseadas em tempo (substituição periódica) são ineficazes para o inversor, pois a probabilidade de falha hoje é a mesma de amanhã. A estratégia correta deve ser o estoque de sobressalentes (para correção rápida) e o monitoramento de condições ambientais (temperatura/poeira) para evitar os "gatilhos" dessas falhas aleatórias.

Figura 7 - Painel de comportamento da falha no inversor



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

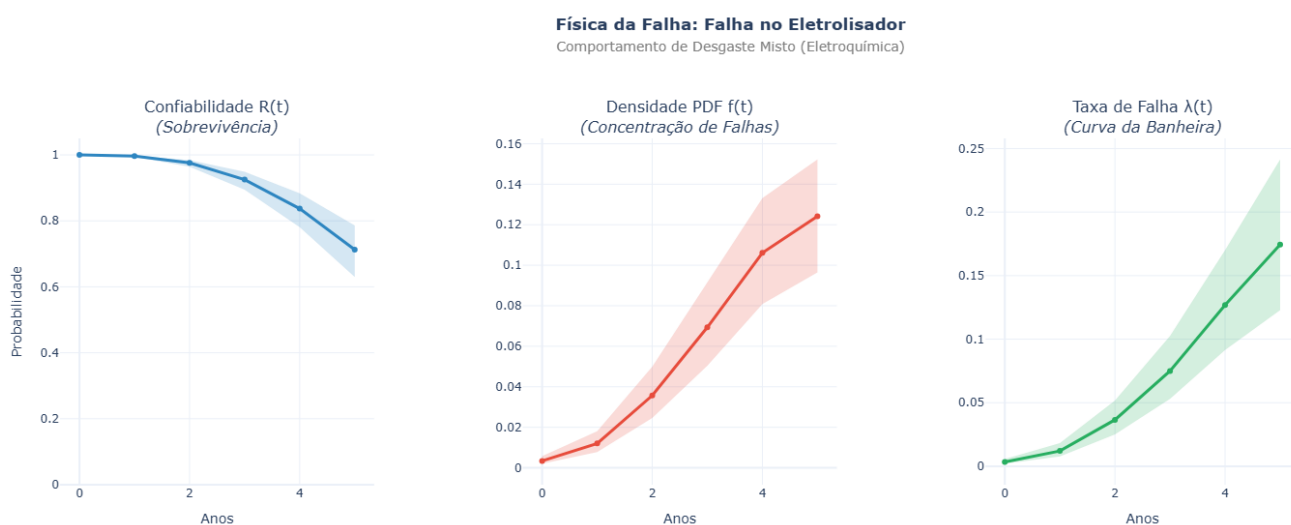
A figura 8 apresenta a caracterização física do subsistema do Eletrolisador. Diferentemente do Inversor, as curvas aqui revelam a assinatura clássica de degradação físico-química, dominada por mecanismos de desgaste ($\beta > 1$). Embora a confiabilidade mediana no 5º ano (aproximadamente 71%) seja numericamente similar à do inversor, o perfil de incerteza é distinto. A faixa de variação é consideravelmente mais estreita, situando-se entre 63% (P10) e 79% (P90). A menor amplitude de incerteza ocorre porque os mecanismos de falha do eletrolisador (corrosão das placas, afinamento da membrana) são processos cumulativos e determinísticos, dependentes do tempo de operação. Diferente da eletrônica, onde a falha é um evento estocástico súbito ("funciona ou não funciona"), o desgaste eletroquímico segue uma trajetória física mais previsível, agrupando a probabilidade de falha em torno da vida média do componente.

O comportamento da PDF é inverso ao observado na eletrônica. A mediana da densidade é crescente ao longo do tempo. O aumento da densidade indica que o sistema está caminhando em direção ao seu "pico de falhas". Enquanto no inversor as falhas se dispersam, no eletrolisador elas começam a se concentrar conforme os componentes envelhecem. Isso é um alerta de que, após o ano 5, a frequência de falhas tenderá a aumentar ainda mais, pois a população está entrando na fase de fim de vida útil.

O gráfico da Taxa de Falha (à direita) confirma o regime de desgaste. A mediana sai de um valor marginal de 0,0121 falhas/ano no ano 1 e dispara para

0,1743 falhas/ano no ano 5. Este crescimento exponencial (um aumento de mais de 14 vezes na taxa instantânea caracteriza a região de Desgaste da Curva da Banheira. A amplitude da incerteza também cresce com o tempo, refletindo a variabilidade na agressividade da degradação (β variando entre 2,0 e 3,5). No entanto, a tendência de subida é clara em todos os cenários (P10 a P90). Isso dita uma estratégia de manutenção oposta à do inversor: a manutenção preventiva baseada em tempo é mandatória. Como a taxa de falha cresce com a idade, substituir componentes preventivamente reduz efetivamente o número de paradas corretivas.

Figura 8 - Painel de comportamento da falha no eletrolisador



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 9 apresenta a caracterização do subsistema de Módulos Fotovoltaicos. Diferentemente da expectativa teórica de componentes "quase infinitos" (vida útil de 25 anos), a simulação baseada no FMEA revelou um comportamento de degradação sensível já no horizonte de curto prazo (5 anos). A curva de sobrevivência aponta uma confiabilidade mediana (P50) de 74% ao final do 5º ano. Isso significa que existe uma probabilidade de 26% de ocorrerem falhas físicas nos módulos (como quebra de vidro, falhas de diodo ou degradação do encapsulante) que exijam manutenção corretiva.

A faixa de incerteza situa-se entre 64% (P10) e 82% (P90). Essa amplitude de 18 pontos percentuais sugere que a durabilidade dos módulos é altamente dependente da agressividade dos ciclos ambientais (vento/temperatura) modelados pela física da fadiga.

A função de densidade (PDF) apresenta um comportamento peculiar de

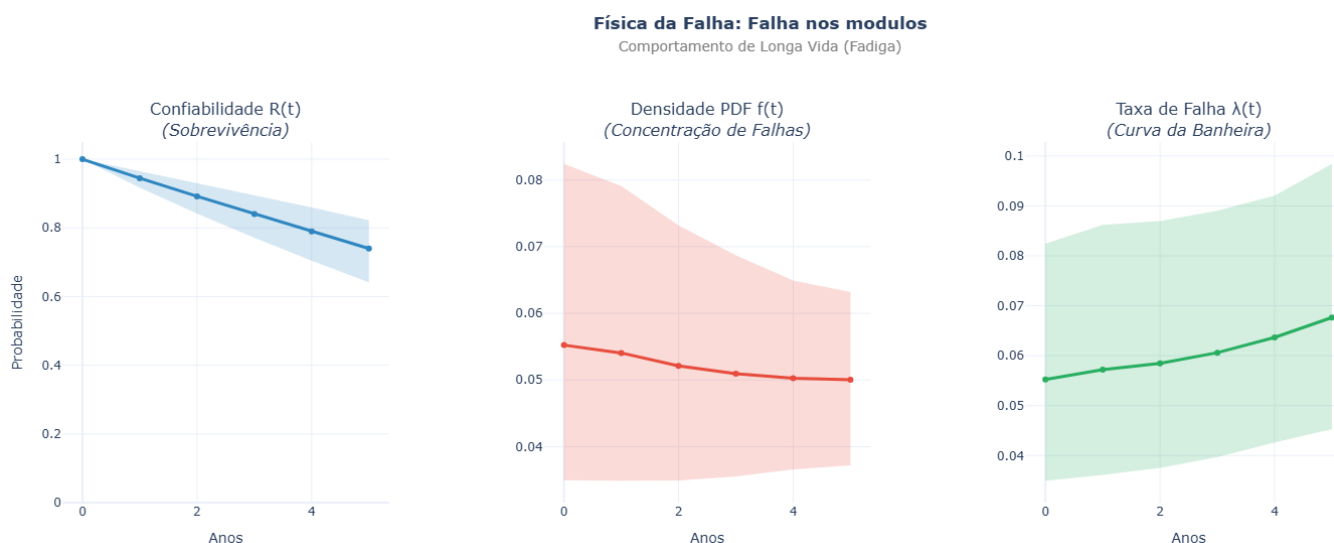
"estabilização da incerteza".

- Ano 1: Observa-se uma dispersão muito elevada na probabilidade de falha, variando de 0,0349 a 0,0790 (mediana 0,054). Isso indica uma grande dúvida sobre a resistência inicial dos módulos.
- Ano 5: A amplitude da incerteza diminui, e a mediana estabiliza-se em torno de 0,05. Aparentemente constante, essa densidade mascara o real aumento do risco, que é revelado pela taxa de falha.

Apesar da PDF parecer constante, a Taxa de Falha apresenta uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Como o denominador (Confiabilidade) está diminuindo (o universo de módulos saudáveis encolhe), a taxa de falha instantânea sobre os sobreviventes aumenta. A amplitude da incerteza no 5º ano é expressiva, com a taxa variando entre 0,0453 (P10) e 0,0984 (P90) falhas/ano. Esse aumento na taxa de falha confirma que os módulos não estão na fase de vida útil aleatória (como o inversor), mas sim sofrendo de mecanismos de fadiga cumulativa.

O resultado alerta que os módulos não podem ser tratados como ativos de "instalar e esquecer". A taxa de falha crescente e a alta incerteza exigem inspeções visuais periódicas (ex: termografia por drones) para identificar precocemente os módulos que estão degradando mais rápido (cenário P10) antes que afetem a performance da string inteira. A alta incerteza pode estar associada a qualidade do material, ao local de instalação e os agentes físicos em sua volta, e como a manutenção será realizada, podendo assim, ter ou não um componente confiável.

Figura 9 – Painel de comportamento da falha no painel fotovoltaico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de validar a solidez das conclusões e mensurar o impacto de incertezas (precisão dos dados) e operacionais (eficácia da manutenção), realizou-se uma Análise de Sensibilidade Global. Foram simulados cenários alternativos comparados ao Cenário Base no horizonte de 5 anos, conforme detalhado na Tabela 13. As figuras 10 e 11 resumem visualmente os resultados da tabela.

Tabela 13 - Comparação de diferentes cenários

Cenário	P10	P50 (Mediana)	P90	Desvio Padrão
Base	80,44%	87,29%	92,81%	0,0484
Otimizado (O-1)	66,43%	76,60%	85,78%	0,0746
Beta +10% (Incerteza)	80,46%	87,37%	92,81%	0,0484
Beta -10% (Precisão)	80,29%	87,21%	92,76%	0,0488

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados da análise de sensibilidade demonstraram que o modelo é pouco sensível a variações na incerteza física (Parâmetro Beta). Mesmo variando a dispersão das curvas de falha em $\pm 10\%$, a probabilidade final de parada da planta permaneceu praticamente inalterada (oscilação menor que 0,2%). Isso leva a uma conclusão fundamental: o alto risco da planta não é decorrente de erros de cálculo ou imprecisão nos dados de entrada, mas sim da própria arquitetura do sistema.

Este comportamento leva a uma conclusão fundamental: o alto risco calculado não é um artefato decorrente de imprecisões nos dados de entrada, mas sim uma consequência direta da arquitetura do sistema. Como a planta foi modelada com

múltiplos subsistemas críticos em série (sem redundância), a fragilidade é estrutural. Para o tomador de decisão, esta é uma evidência robusta de que esforços para "refinar" estatisticamente os dados trariam retornos marginais. A mitigação efetiva do risco exige, necessariamente, alterações físicas no projeto, como a implementação de redundâncias ativas ou a substituição tecnológica.

O cenário "Otimizado" simulou uma redução global de 1 ponto na classificação de Ocorrência (O-1), representando uma correção de conservadorismo na elicitação do FMEA ou um cenário de excelência em manutenção.

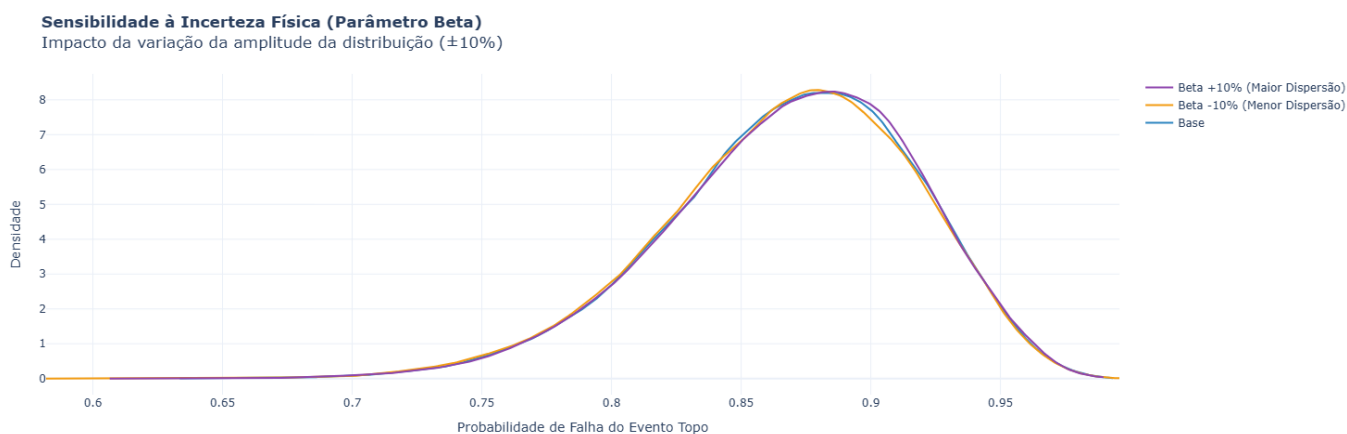
Esta alteração revelou um impacto significativo, reduzindo a probabilidade mediana de falha de 87,29% para 76,60%. Embora represente um ganho teórico de disponibilidade de 10,7 pontos percentuais, o risco residual permanece em patamar elevado (>75%), corroborando a tese da limitação estrutural.

Um achado estatístico relevante foi o aumento do Desvio Padrão neste cenário (de 0,0484 para 0,0746). Este fenômeno ocorre devido à "dessaturação" da probabilidade de falha. No Cenário Base, o risco é tão elevado que a distribuição se comprime assintoticamente próxima a 100% (baixa variância). Ao melhorar a qualidade dos componentes, o sistema sai da zona de "falha quase certa" para uma região de maior incerteza probabilística, onde a variabilidade estocástica tem mais espaço para atuar. A análise comparativa permite as seguintes conclusões:

1. Robustez à Modelagem Física: O diagnóstico de risco é estável e não depende de ajustes finos nos parâmetros de forma (β).
2. Teto da Melhoria Incremental: A redução de Ocorrência, interpretada como melhoria de manutenção, possui um limite de eficácia. Mesmo elevando a confiabilidade individual de todos os componentes, a topologia em série impede que a planta atinja níveis aceitáveis de segurança operacional, reforçando a necessidade imperativa de redundâncias.
3. A Influência do Parâmetro α : A análise demonstrou que a incerteza do modelo é governada predominantemente pelo parâmetro de escala, que dita o tempo característico de falha e é derivado da nota de Ocorrência. Ao reduzir O, deslocamos o α para tempos maiores, o que, paradoxalmente, aumenta a janela de incerteza sobre o momento exato da falha (aumento do desvio padrão). Portanto, para reduzir essa incerteza residual, o foco deve ser a

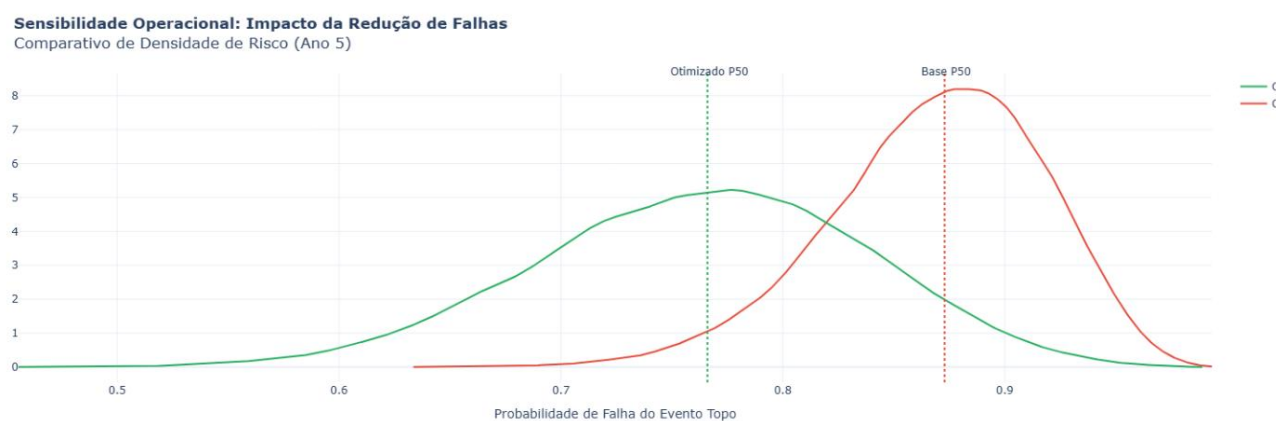
aquisição de dados reais de tempo de falha para calibrar o parâmetro α e não apenas o ajuste do β .

Figura 10 – Sensibilidade à incerteza física



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 11 – Sensibilidade à incerteza temporal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6. CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver uma metodologia híbrida de análise de confiabilidade para sistemas de produção de Hidrogênio Verde (H2V), superando a barreira da escassez de dados operacionais por meio de modelagem estocástica. A integração entre a sistematização qualitativa (FMEA), a lógica causal (FTA) e a simulação probabilística (Monte Carlo) permitiu transformar informações dispersas na literatura em indicadores quantitativos robustos de suporte à decisão. Os resultados obtidos apontam para conclusões críticas sobre a viabilidade operacional e a gestão de ativos dessas plantas:

1. Fragilidade Estrutural e Saturação de Risco:

A simulação do cenário base revelou uma probabilidade mediana de falha (interrupção ou redução de produção) de 87,29% no horizonte de 5 anos. A Análise de Sensibilidade demonstrou que este alto risco é pouco sensível a variações nos parâmetros físicos, indicando que a baixa confiabilidade não é um artefato estatístico, mas uma consequência da topologia em série do sistema. A ausência de redundâncias cria uma cadeia crítica onde a falha de qualquer subsistema compromete a produção global, caracterizando uma fragilidade estrutural que não pode ser resolvida apenas com a melhoria incremental da qualidade dos componentes.

2. O Gargalo Fotovoltaico e o Elo Fraco do Inversor:

A análise de importância de Fussell-Vesely desmistificou a percepção de que o Eletrolisador seria o único ponto crítico. O estudo comprovou que o Subsistema Fotovoltaico é o dominante de indisponibilidade, sendo aproximadamente 4 vezes mais crítico que o *stack* de eletrólise. Especificamente, o Inversor foi identificado como o "elo fraco" do hardware, apresentando uma importância individual superior à de todo o subsistema eletroquímico.

3. Estratégias de Manutenção Distintas:

A caracterização física das curvas de falha permitiu ditar estratégias de O&M diferenciadas:

- Inversores (Comportamento Aleatório): Apresentam taxa de falha constante. A estratégia mandatória é o estoque de sobressalentes para correção rápida, pois a manutenção preventiva baseada no tempo é

ineficaz para falhas aleatórias.

- Eletrolisador (Comportamento de Desgaste): Apresenta taxa de falha exponencialmente crescente. Exige manutenção preventiva rigorosa e substituição programada antes do fim da vida útil para evitar o aumento abrupto de paradas corretivas.
- Módulos (Fadiga): Apresentam alta incerteza. Exigem monitoramento preditivo para identificar degradação precoce.

4. A Dominância do Parâmetro α na Incerteza:

Por fim, vale ressaltar que a análise de sensibilidade identificou o parâmetro de escala, derivado diretamente da classificação de Ocorrência do FMEA, como o principal vetor de incerteza do modelo. Diferentemente do parâmetro de forma, que demonstrou influência marginal na variabilidade do resultado, a precisão na estimativa do tempo característico de falha é determinante para a dispersão dos resultados. Isso indica que, para elevar o modelo a um patamar de maior robustez e menor incerteza, os esforços futuros não devem focar apenas no refinamento da física de degradação, mas sim na aquisição de dados mais precisos quanto a ocorrência dos modos de falha.

Em suma, conclui-se que a viabilidade operacional de plantas de H₂V depende menos do avanço tecnológico individual dos eletrolisadores e mais da robustez da arquitetura do sistema. A transição de plantas demonstrativas para a escala industrial exige a implementação mandatória de redundâncias (paralelismo em inversores e sistemas de água) e armazenamento de energia (baterias) para mitigar a intermitência que, conforme demonstrado, é o maior vetor de incerteza do projeto.

6.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Embora a metodologia proposta ofereça uma estrutura robusta para a análise de confiabilidade em cenários de incerteza, é fundamental reconhecer as fronteiras e simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo. As principais limitações deste trabalho são:

- Dependência de Dados Secundários: A parametrização baseou-se em literatura e bases genéricas. O modelo reflete o comportamento de uma "planta teórica média", tratando a incerteza via Monte Carlo, mas sem a precisão de dados de telemetria reais.
- Generalização da Planta e Ausência de Contexto Geográfico: O

estudo adota uma topologia genérica, desconsiderando variáveis específicas do local. Fatores locais críticos (como salinidade, temperatura e umidade) interferem drasticamente na taxa de falha real. O modelo, portanto, não captura a degradação acelerada típica de ambientes agressivos específicos.

- **Premissa de Independência Estatística:** O modelo FTA assume independência entre eventos, não contemplando explicitamente Falhas de Causa Comum (CCF), como eventos climáticos severos que afetam múltiplos subsistemas simultaneamente.
- **Modelagem Binária de Estados:** A análise foca na probabilidade de falha total, não aprofundando nos estados de degradação parcial, onde a planta continua operando com capacidade reduzida.
- **Ausência da Modelagem de Reparabilidade (MTTR):** O foco restringe-se à Confiabilidade $R(t)$. Não foram incluídas métricas de logística e reparo (MTTR), o que impede o cálculo da Disponibilidade Inerente $A(t)$ e do tempo total de indisponibilidade.
- **A simplificação da ausência de falha humana também é uma limitação a ser considerada.** Esta decisão facilitou a estruturação do *framework* e a focar exclusivamente no maquinário, mas a atuação humana é um fator determinante quanto ao desempenho do sistema.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Considerando as limitações e conclusões apresentadas, sugere-se como continuidade do trabalho a Atualização Bayesiana via Elicitação de Especialistas, isto é, realizar um método estruturado de entrevista para eliciar a opinião de especialistas do setor, visando refinar as estimativas de ocorrência (parâmetro α). Recomenda-se adaptar a metodologia para aplicar o Teorema de Bayes, utilizando os dados de literatura como priores e a informação dos especialistas (entrevistas) como a função de verossimilhança, permitindo assim a atualização dinâmica da confiabilidade à medida que novo conhecimento técnico se torna disponível.

REFERÊNCIAS

- ABERNETHY, Robert B. **The new Weibull handbook: reliability & statistical analysis for predicting life, safety, risk, support costs, failures, and forecasting warranty claims, substantiation and accelerated testing, using Weibull, log normal, Crow-AMSAA, Probit, and Kaplan- meier Models**. 5. ed ed. North Palm Beach, Fla: R.B. Abernethy, 2006.
- AGHAEI, M. *et al.* **Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 159, p. 112160, 1 maio 2022.
- AGHAKHANI, Arash *et al.* **Direct carbon footprint of hydrogen generation via PEM and alkaline electrolyzers using various electrical energy sources and considering cell characteristics**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 77, p. 30170–30190, 8 set. 2023.
- AL-EZZI, Athil S.; ANSARI, Mohamed Nainar M. **Photovoltaic Solar Cells: A Review**. Applied System Innovation, v. 5, n. 4, p. 67, 8 jul. 2022.
- BECKER, Hans *et al.* **Impact of impurities on water electrolysis: a review**. Sustainable Energy & Fuels, v. 7, n. 7, p. 1565–1603, 2023.
- CAUCHICK MIGUEL, Paulo Augusto (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- CHEN, Jie *et al.* **Thermal management matters in photovoltaic–electrocatalysis for solar hydrogen production**. EcoEnergy, v. 3, n. 2, p. 205–216, jun. 2025.
- COLLI, Alessandra. **Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 804–809, out. 2015.
- EKWURZEL, B. *et al.* **The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers**. Climatic Change, v. 144, n. 4, p. 579–590, out. 2017.
- GALLARDO-SAAVEDRA, Sara; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; DUQUE-PÉREZ, Oscar. **Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants**. Energy, v. 183, p. 825–836, 15 set. 2019.
- GAO, Yan; WANG, Xiongzhen; MENG, Xin. **Advanced Rectifier Technologies for Electrolysis-Based Hydrogen Production: A Comparative Study and Real-World Applications**. Energies, v. 18, n. 1, p. 48, 27 dez. 2024.
- HABIB, Mohamed A. *et al.* **Hydrogen combustion, production, and applications: A review**. Alexandria Engineering Journal, v. 100, p. 182–207, 1 ago. 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA; PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME – PVPS. **Trends in Photovoltaic Applications 2025: Photovoltaic Failure Fact Sheets**. Paris: IEA PVPS, 2025. (IEA PVPS Report T1-48:2025). ISBN 978-1-7642902-3-4.
- JAYAPRABAKAR, J. *et al.* **Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines: Methodological insights on its production, injection, properties, performance and emissions**. Fuel, v. 363, p. 131034, 1 maio 2024.
- KASAI, Naoya *et al.* **The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation**

system. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 30, p. 13308–13314, ago. 2016.

KHEIRROUZ, Mahdi; MELINO, Francesco; ANCONA, Maria Alessandra. **Fault detection and diagnosis methods for green hydrogen production: A review.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 65, p. 27747–27774, 30 jul. 2022.

KOVAČ, Ankica; PARANOS, Matej; MARCIUŠ, Doria. **Hydrogen in energy transition: A review.** International Journal of Hydrogen Energy, Hydrogen and Fuel Cells. v. 46, n. 16, p. 10016–10035, 3 mar. 2021.

KRÓTKI, Aleksander *et al.* **Performance Evaluation of Pressure Swing Adsorption for Hydrogen Separation from Syngas and Water–Gas Shift Syngas.** Energies, v. 18, n. 8, p. 1887, 8 abr. 2025.

KUHNERT, Eveline *et al.* **Impact of intermittent operation on photovoltaic-PEM electrolyzer systems: A degradation study based on accelerated stress testing.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 55, p. 683–695, fev. 2024.

MARZOUK, Osama A. **Expectations for the Role of Hydrogen and Its Derivatives in Different Sectors through Analysis of the Four Energy Scenarios: IEA-STEPS, IEA-NZE, IRENA-PES, and IRENA-1.5°C.** Energies, v. 17, n. 3, p. 646, 30 jan. 2024.

McCARTY, R. D. **Selected properties of hydrogen (engineering design data).** Boulder: National Bureau of Standards, 1981

MISHRA, D. P.; RAHMAN, A. **An experimental study of flammability limits of LPG/air mixtures.** Fuel, v. 82, n. 7, p. 863–866, 1 maio 2003.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

MOHSEN, Rana *et al.* **Explosive mixture formation in PEM electrolyzers: A safety review using fault tree analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 211, p. 115225, abr. 2025.

NATIONS, United. **Causes and Effects of Climate Change.** Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>>. Acesso em: 17 maio. 2025.

NGUYEN, Minh Hoang; KWAK, Sangshin. **Enhance Reliability of Semiconductor Devices in Power Converters.** Electronics, v. 9, n. 12, p. 2068, 4 dez. 2020.

NORAZAHAR, Norafneeza *et al.* **Degradation modelling and reliability analysis of PEM electrolyzer.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 50, p. 842–856, 2 jan. 2024.

O'CONNOR, Patrick D. T.; KLEYNER, Andre. **Practical reliability engineering.** 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.

PAL, Mamta; KUMAR, Sachin. **Chapter Ten - Hydrogen in the chemical industry.** In: BIBRA, Mohit; SANI, Rajesh K.; KUMAR, Sudhir (Orgs.). Renewable Hydrogen. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 221–249.

PUDUR, Rajen; RAJAK, Mrinal Kanti. **A comprehensive review of grid-connected inverter topologies and control strategies (2020–2025).** Next Energy, v. 9, p. 100433, out. 2025.

REMME, Uwe. **Global Hydrogen Review 2024.** 2024.

- SAYED, A. *et al.* **Impact of subsystems on the overall system availability for the large scale grid-connected photovoltaic systems.** *Reliability Engineering & System Safety*, v. 196, p. 106742, 1 abr. 2020.
- SCHMIDT, O. *et al.* **Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 52, p. 30470–30492, 28 dez. 2017.
- SGARAMELLA, Antonio *et al.* **Optimal RES integration for matching the Italian hydrogen strategy requirements.** *Renewable Energy*, v. 219, p. 119409, 1 dez. 2023.
- SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review.** *Materials Science for Energy Technologies*, v. 2, n. 3, p. 442–454, dez. 2019.
- SHIVA KUMAR, S.; LIM, Hankwon. **An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production.** *Energy Reports*, v. 8, p. 13793–13813, 1 nov. 2022.
- SONAWANE, Pramod R. *et al.* **Reliability and Criticality Analysis of a Large-Scale Solar Photovoltaic System Using Fault Tree Analysis Approach.** *Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 4609, 4 mar. 2023.
- SONAWANE, Pramod R.; BHANDARI, Sheetal; BHIMGONDA PATIL, Rajkumar. **Reliability and criticality analysis of a large-scale solar photovoltaic system using fuzzy-fault tree analysis approach.** *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 22 set. 2024.
- TUHI, Farhana Yasmine; BUCELLI, Marta; LIU, Yiliu. **Technical failures in green hydrogen production and reliability engineering responses: Insights from database analysis and a literature review.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 94, p. 608–625, dez. 2024.
- UBALE, Salim *et al.* **Failure and reliability analysis of PEM electrolyser balance of plant.** *Renewable Energy*, v. 256, p. 124029, jan. 2026.
- VERMAAK, Leandri; NEOMAGUS, Hein W. J. P.; BESSARABOV, Dmitri G. **Hydrogen Separation and Purification from Various Gas Mixtures by Means of Electrochemical Membrane Technology in the Temperature Range 100–160 °C.** *Membranes*, v. 11, n. 4, p. 282, 10 abr. 2021.
- WANG, Pengfei *et al.* **A comprehensive review of hydrogen purification using a hydrate-based method.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 194, p. 114303, abr. 2024.
- WEST, Madison *et al.* **Critical review and analysis of hydrogen safety data collection tools.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 40, p. 17845–17858, 8 maio 2022.
- WISMER, Samantha E. *et al.* **PEM electrolyzer failure scenarios identified by failure modes and effects analysis (FMEA).** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 89, p. 1280–1289, 4 nov. 2024.
- XU, Shuwen *et al.* **Physical Degradation of Anode Catalyst Layer in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis.** *Advanced Materials Interfaces*, v. 12, n. 4, p. 2400549, fev. 2025.
- ZAGORAIOU, Eirini *et al.* **Performance of Stainless-Steel Bipolar Plates (SS-BPPs) in Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyser (PEMWE): A Comprehensive Review.** *Compounds*, v. 4, n. 2, p. 252–267, 29 mar. 2024.
- ZINI, Gabriele; MANGEANT, Christophe; MERTEN, Jens. **Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic systems.** *Renewable Energy*, v. 36, n. 9, p. 2334–2340, 1 set. 2011.

APÊNDICE A – FMEA COMPLETO

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
Placas solares	Rachadura/Quebra do Vidro	Mecânica/Ambiental: • Fadiga mecânica por ciclos, cargas estáticas e dinâmicas (vento, granizo)	• LOCAL: Exposição dos componentes internos ao ambiente • SUBSISTEMA: Perda de potência progressiva • SISTEMA GLOBAL: Redução de potência causa operação em carga parcial do eletrolisador (intermitência operacional)	MÉDIO: Risco de choque elétrico por exposição de componentes energizados. Fragmentos de vidro podem causar ferimentos. Em casos extremos, pode facilitar incêndios por falha de isolamento.	3	2	6	IEA (2025), Aghaei <i>et al.</i> (2022), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023), Sayed <i>et al.</i> (2020)
Placas solares	Rachadura/Quebra na Célula	Mecânica/Térmica/Ambiental: • Carga dinâmica e estática ambiental, estresse térmico	• LOCAL: Propagação de fissuras, isolamento de partes da célula • SUBSISTEMA: Aumento da resistência, perda de potência, formação de hotspots • SISTEMA GLOBAL: Perda de potência reduz capacidade de produção. Hotspots severos podem causar falha da string e parada súbita	BAIXO: Risco de segurança limitado na maioria dos casos. Pode contribuir para hotspots que, em casos extremos, podem causar incêndio.	3	3	9	Kheirrouz; Melino; Ancona, (2022), Aghaei <i>et al.</i> (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Placas solares	Falha no Encapsulante (Delaminação)	Química/Térmica/Ambiental: • Umidade e condensação, sobretensão transitória, radiação UV, ciclos térmicos	• LOCAL: Separação das camadas, perda de adesão • SUBSISTEMA: Corrosão das células, aumento da resistência, risco de falha de isolamento • SISTEMA GLOBAL: Redução de potência causa operação em carga parcial do eletrolisador (intermitência operacional). A falha de isolamento pode desarmar inversor aumentando esse efeito	ALTO: Alto risco de choque elétrico quando evolui para falha de isolamento. Pode causar incêndio em casos extremos por superaquecimento localizado.	4	3	12	IEA (2025), Aghaei <i>et al.</i> (2022), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Placas solares	Sombreamento	Ambiental: • Obstáculos (nuvens, árvores, antenas)	• LOCAL: Células sombreadas operam em polarização reversa • SUBSISTEMA: Ativação de diodos bypass, perda de potência significativa, risco de hotspots • SISTEMA GLOBAL: Variações rápidas de potência (nuvens) são uma das principais causas de estresse por ciclagem no eletrolisador PEM	BAIXO: Risco indireto através da formação de hotspots. Sombreamento persistente pode levar ao superaquecimento e eventual incêndio se os diodos de bypass falharem.	3	3	9	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Placas solares	Sujidade	Ambiental: • Partículas e poeira, poluição, dejetos de pássaros	• LOCAL: Redução da transmissão de energia pelo vidro • SUBSISTEMA: Perda de potência generalizada, possível mismatch entre módulos, risco de hotspots • SISTEMA GLOBAL: Redução de potência causa operação em carga parcial do eletrolisador (intermitência operacional)	MÍNIMO: Não gera risco direto à segurança. Pode contribuir indiretamente para hotspots se a sujidade for muito irregular, mas é facilmente mitigável com limpeza.	2	4	8	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Placas solares	Hotspot	Elétrica/Ambiental/Térmica: • Sombreamento, sujidade, falhas elétricas, falha do	• LOCAL: Aquecimento severo e localizado em células • SUBSISTEMA: Degradação irreversível da célula,	CRÍTICO: Alto risco de incêndio desde a primeira ocorrência. Temperaturas	5	3	15	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), Aghaei <i>et al.</i> , (2022),

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
		bypass, sobreaquecimento localizado	danos aos materiais adjacentes, risco de incêndio • SISTEMA GLOBAL: Risco de incêndio ameaça toda a instalação incluindo eletrolisador. Falha da string causa queda abrupta de potência (intermitência operacional)	podem exceder 200°C, causando ignição de materiais adjacentes. Risco de choque elétrico durante combate ao incêndio.				IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Caixa de Junção	Falha no Diodo de Bypass	Elétrica/Térmica/Ambiental: • Sobretensão, alta temperatura, sombreamento contínuo	• LOCAL: Diodo em curto-circuito ou circuito aberto • SUBSISTEMA: Curto: perda permanente de parte da potência. Aberto: hotspots severos • SISTEMA GLOBAL: Redução de potência causa operação em carga parcial do eletrolisador (intermitência operacional)	ALTO: Risco de choque elétrico e incêndio. Diodo em curto pode causar superaquecimento da caixa de junção. Diodo aberto permite hotspots perigosos.	4	2	8	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), Aghaei <i>et al.</i> (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024)
Caixa de Junção	Defeito/Soltura da Caixa	Térmica/Ambiental: • Alta temperatura	• LOCAL: Exposição dos componentes • SUBSISTEMA: Corrosão dos terminais, falha dos diodos, superaquecimento • SISTEMA GLOBAL: Risco de incêndio ameaça instalação. Falha pode causar perda de string inteira, reduzindo potência (intermitência operacional)	CRÍTICO: Alto risco de choque elétrico e incêndio desde a primeira ocorrência. Exposição de terminais energizados e possível formação de arco elétrico.	5	2	10	Aghaei <i>et al.</i> (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023)
Conectores	Curto circuito	Ambiental/Térmica/Química: • Exposição dos cabos aos raios UV • Corrosão (contato com a umidade e salinidade)	• LOCAL: Superaquecimento extremo no ponto da falha, derretendo o isolamento e o metal. • SUBSISTEMA: Frequentemente, a falha se manifesta como um Arco Elétrico CC, que é uma fonte de ignição contínua. • Sistema Global: Parada imediata por segurança da produção de hidrogênio	CRÍTICO: Alto risco de choque elétrico fatal e incêndio imediato. Arco elétrico pode causar queimaduras graves e ignição de materiais próximos.	5	2	10	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023), Sayed <i>et al.</i> (2020)
Conectores	Circuito aberto	Ambiental/Mecânica/térmica: • Soltura dos materiais pela expansão térmica e/ou vibrações • Corrosão (contato com a umidade e salinidade)	• LOCAL: O fluxo de corrente é interrompido no ponto da falha • SUBSISTEMA: A "string" inteira de painéis solares conectada em série para de gerar energia • SISTEMA GLOBAL: O inversor solar (ou o canal MPPT específico) recebe menos potência, resultando em uma redução imediata da produção de energia solar. Consequentemente, a produção de H ₂ é reduzida proporcionalmente. Esta é uma falha "fail-safe" (falha de modo seguro), pois não gera calor nem risco de incêndio.	BAIXO: Não gera risco de choque elétrico, incêndio ou explosão. O cuidado cabe a equipe de manutenção.	3	3	9	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023), Sayed <i>et al.</i> (2020)

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
Estrutura de Fixação	Falha na Estrutura	Mecânica/Ambiental/Química: • Carga estática e dinâmica ambiental e corrosão	• LOCAL: Perda da integridade mecânica • SUBSISTEMA: Desalinhamento/queda dos módulos, danos aos cabos e módulos • SISTEMA GLOBAL: Falha catastrófica pode destruir parte significativa do arranjo, interrompendo produção por longo período	ALTO: Risco de danos físicos graves por queda de módulos. Cabos danificados podem causar choque elétrico. Em cenários extremos, pode causar ferimentos fatais.	5	1	5	Kheirrouz; Melino; Ancona (2022), IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023), Sayed <i>et al.</i> (2020)
Inversor	Falha no Inversor	Elétrica/Eletrônica/Térmica: • Falhas eletrônicas internas, sobrecorrente, problemas de software, sobreaquecimento	• LOCAL: Parada total do inversor • SUBSISTEMA: Parada de toda geração • SISTEMA GLOBAL: CORRELAÇÃO PV→PEM: Ponto único de falha. Parada imediata de toda produção de hidrogênio. É o modo de falha mais crítico para correlação	CRÍTICO: Alto risco de choque elétrico e incêndio. Componentes de alta potência podem causar arcos elétricos perigosos. Risco de explosão de capacitores.	5	4	20	IEA (2025), Sonawane; Bhandari; Bhimgonda Patil (2024), Sonawane <i>et al.</i> (2023), Sayed <i>et al.</i> (2020)
Eletrolisador PEM	Degradação da membrana PEM	Mecânica/Química/Térmica: • Operação Intermitente - Pouca quantidade de água no ânodo (Secagem da membrana) • Alta Pressão Diferencial que força mecanicamente a membrana • Contaminação: Íons metálicos vindos da água de alimentação ou da corrosão de componentes atuam como catalisadores, acelerando drasticamente o ataque químico. • Operação em Alta Temperatura e alta densidade de corrente (gera hotspots locais).	• LOCAL: A degradação manifesta-se como degradação química (ex: dissolução do catalisador) e física • SUBSISTEMA: Vazamento interno (crossover de gás entre anodo e catodo) ou vazamento externo (liberação de H₂/O₂ para o ambiente). Queda de pressão operacional. • SISTEMA GLOBAL: Parada imediata do sistema por detecção de vazamento.	CRÍTICO: Vazamento externo de hidrogênio cria um risco imediato de incêndio e explosão. Vazamento interno pode levar à formação de mistura explosiva dentro do equipamento.	5	4	20	Wisner <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025) Kuhnert <i>et al.</i> (2024)

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
Eletrolisador PEM	Falha nas vedações	Química/Mecânica/Térmica: • Fragilização por hidrogênio, corrosão, fadiga, vibrações, sobreaquecimento	• LOCAL: Perda de integridade dos materiais e vedações • SUBSISTEMA: Vazamento de hidrogênio, perda de eficiência, risco de explosão • SISTEMA GLOBAL: Vazamento de H₂ cria atmosfera inflamável que ameaça sistema PV. Explosão pode destruir toda instalação	CRÍTICO: Vazamento de H ₂ cria atmosfera explosiva. Dependendo do tamanho do vazamento, pode formar nuvem inflamável com risco de explosão que destrói toda a instalação.	5	3	15	Kuhnert <i>et al.</i> (2024)
Eletrolisador PEM	Intermitência (Ciclagem)	Elétrica: • Variações frequentes de carga vindas da fonte PV	• LOCAL: Estresse mecânico e térmico repetitivo na membrana • SUBSISTEMA: Degradação acelerada de todos os componentes do stack • SISTEMA GLOBAL: Esta é a principal correlação. Natureza intermitente do PV é causa raiz direta da degradação do eletrolisador	MÉDIO: Acelera outros modos de falha perigosos (crossover, vazamentos). Por si só não é perigoso, mas reduz a vida útil dos sistemas de segurança.	4	5	20	Wisner <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)
Eletrolisador PEM	Degradação do Catalisador	Mecânica/Química: • Operação intermentente que causa a dissolução do catalisador de Irídio - água contaminada - Ciclagem mecânica	• LOCAL: Ocorre a dissolução do catalisador. • SUBSISTEMA: redução na eficiência do eletrolisador. • SISTEMA GLOBAL: Queda irreversível e progressiva da eficiência do eletrolisador. O sistema de controle tentará compensar aumentando a tensão, o que acelera ainda mais a degradação.	BAIXO: Risco primariamente operacional e de performance, não um risco de segurança imediato. No entanto, a longo prazo, pode levar a superaquecimento e estresse em outros componentes.	4	4	16	Kuhnert <i>et al.</i> (2024) Becker <i>et al.</i> (2023) Xu <i>et al.</i> (2025)
Eletrolisador PEM	Degradação das Placas Bipolares	Mecânica/Elétrica/Química/Térmica: • Operação em alta densidade de corrente e potencial. • Formação de uma camada de óxido passivo na superfície de titânio (passivação). - Ciclagem térmica ou mecânica	• LOCAL: aumento da resistência elétrica interfacial, queda na condutividade elétrica e térmica, aumento do aquecimento, possível falha de vedação ou perfuração da placa, vazamento de gases. • SUBSISTEMA: queda da eficiência do stack, aumento da queda de tensão, maior geração de calor, maior consumo de energia para produzir a mesma quantidade de H₂, possível aumento de crossover de gases, necessidade de manutenção ou substituição da placa. • SISTEMA GLOBAL: Perda de eficiência similar à degradação do catalisador. CORRELAÇÃO PEM→PV: O eletrolisador exigirá mais potência (tensão mais alta) do retificador, o que pode alterar	BAIXO: Risco primariamente operacional. O calor excessivo gerado pode, secundariamente, acelerar o envelhecimento de outros componentes, como as vedações.	4	4	16	Zagoraiou <i>et al.</i> (2024)

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
			o ponto de operação ótimo do sistema fotovoltaico.					
Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Sistema de Controle	Mecânica/Elétrica: • Entupimento/congelamento de reguladores, travamento mecânico de componentes, falha de circuito interno, de software/firmware, perda de alimentação, etc.	• LOCAL: Sistema não responde a condições anormais • SUBSISTEMA: Estresse mecânico na membrana, risco de ruptura, vazamento, permite evolução descontrolada de falhas, danos severos a pilha. • SISTEMA GLOBAL: Vazamento de H₂ cria risco de explosão que pode destruir sistema PV adjacente	CRÍTICO: Falha latente que pode permitir evolução de qualquer condição perigosa (sobrepresão, superaquecimento, vazamento) sem resposta de segurança, levando a explosões ou incêndios.	5	3	15	Wismer <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)
Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Retificador	Elétrica/Eletrônica/Térmica: • Falha de semicondutores por overstress elétrico (sobretensão / sobrecorrente) • degradação por ciclo térmico.	• LOCAL: Parada do componente. • SUBSISTEMA: Interrupção total do fornecimento de energia CC para o eletrolisador. • SISTEMA GLOBAL: Uma falha no retificador desacopla completamente a geração solar do consumo, causando uma parada abrupta que pode estressar a membrana PEM por despressurização rápida.	MÉDIO: Risco de choque elétrico para operadores durante a manutenção. Falhas catastróficas de componentes de potência podem gerar arco elétrico e risco de incêndio localizado no equipamento.	5	3	15	Gao <i>et al.</i> (2024) Nguyen & Kwak (2020)
Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Sistema de Separação e Secagem do Gás	Mecânica: • Saturação do material secante (peneira molecular, sílica) por fim de vida útil ou falha no ciclo de regeneração. • Obstrução de dreno de líquido no separador.	• LOCAL: Perda da capacidade de remover umidade do gás. • SUBSISTEMA: Produção de hidrogênio fora de especificação, Mistura de Hidrogênio e Oxigênio, Liberação de Hidrogênio e/ou de oxigênio • SISTEMA GLOBAL: Contaminação do sistema de armazenamento ou do processo subsequente. A qualidade do produto é comprometida, podendo levar à parada da planta por controle de qualidade.	CRÍTICO: Vazamento externo de hidrogênio cria um risco imediato de incêndio e explosão. Vazamento interno pode levar à formação de mistura explosiva dentro do equipamento.	5	3	15	Wismer <i>et al.</i> (2024) Vermaak; Neomagus; Bessarabov, (2021) Wang <i>et al.</i> (2024)

Componente	Modo de Falha	Causa Raiz (Tipo/Descrição)	Efeitos	Segurança	S	O	R	Fonte
Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha do Sistema de Refrigeração	Mecânica/Elétrica: • Falha do compressor, vazamento de fluido, entupimento, falha da bomba, falha do motor/controlador	• LOCAL: Superaquecimento do stack • SUBSISTEMA: Degradação térmica acelerada da membrana, parada de emergência • SISTEMA GLOBAL: Parada por superaquecimento desperdiça energia FV disponível. Degradação térmica reduz eficiência de conversão	ALTO: Superaquecimento pode causar incêndio e acelerar degradação da membrana, levando a crossover perigoso. Em casos extremos, pode causar explosão por mistura de gases.	4	3	12	Wismer <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)
Sistemas auxiliares do eletrolisador	Falha no Sistema de Purificação do H ₂	Química/Mecânica/Elétrica: • Contaminação do catalisador, falha do sistema de aquecimento/resfriamento para regeneração	• LOCAL: H₂ contaminado fora de especificação • SUBSISTEMA: Produto final inadequado, possível dano a equipamentos a jusante • SISTEMA GLOBAL: Energia FV utilizada para produzir H₂ de baixa qualidade é desperdiçada, reduzindo eficiência global	BAIXO: Risco de segurança limitado. H ₂ contaminado pode danificar equipamentos a jusante, mas não representa risco imediato de explosão ou incêndio no sistema de produção.	3	3	9	Wismer <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)
Sistema da Água	Degradação da Qualidade da Água	Química/Mecânica/Elétrica: • Falha da deionização/filtragem, falha do refrigerador de água, perda de alimentação elétrica	• LOCAL: Água contaminada alimenta o stack • SUBSISTEMA: Contaminação da membrana, envenenamento do catalisador, corrosão de componentes • SISTEMA GLOBAL: CORRELAÇÃO PEM→PV: Degradação química permanente reduz eficiência de conversão da energia PV em H₂ ao longo da vida útil	MÉDIO: Acelera corrosão e degradação da membrana, aumentando risco de vazamentos futuros. Por si só não é perigoso, mas compromete sistemas de segurança a longo prazo.	4	4	16	Wismer <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)
Sistema da Água	Falha no Fornecimento de Água	Mecânica/Elétrica: • Falha da bomba, entupimento/congelamento de tubulações/válvulas, perda de alimentação elétrica	• LOCAL: Interrupção do fluxo de água para o stack • SUBSISTEMA: Secagem da membrana, superaquecimento, parada de emergência, danos irreversíveis • SISTEMA GLOBAL: CORRELAÇÃO PEM→PV: Parada por falta de água desperdiça energia PV. Danos à membrana reduzem eficiência permanentemente	ALTO: Secagem da membrana pode causar superaquecimento severo e incêndio. Danos à membrana podem levar a crossover perigoso em operações futuras.	5	3	15	Wismer <i>et al.</i> (2024), Mohsen <i>et al.</i> (2025), Kasai <i>et al.</i> (2016), Norazahar <i>et al.</i> (2024), Ubale <i>et al.</i> (2025)

APÊNDICE B – ÁRVORE DE FALHA COMPLETA

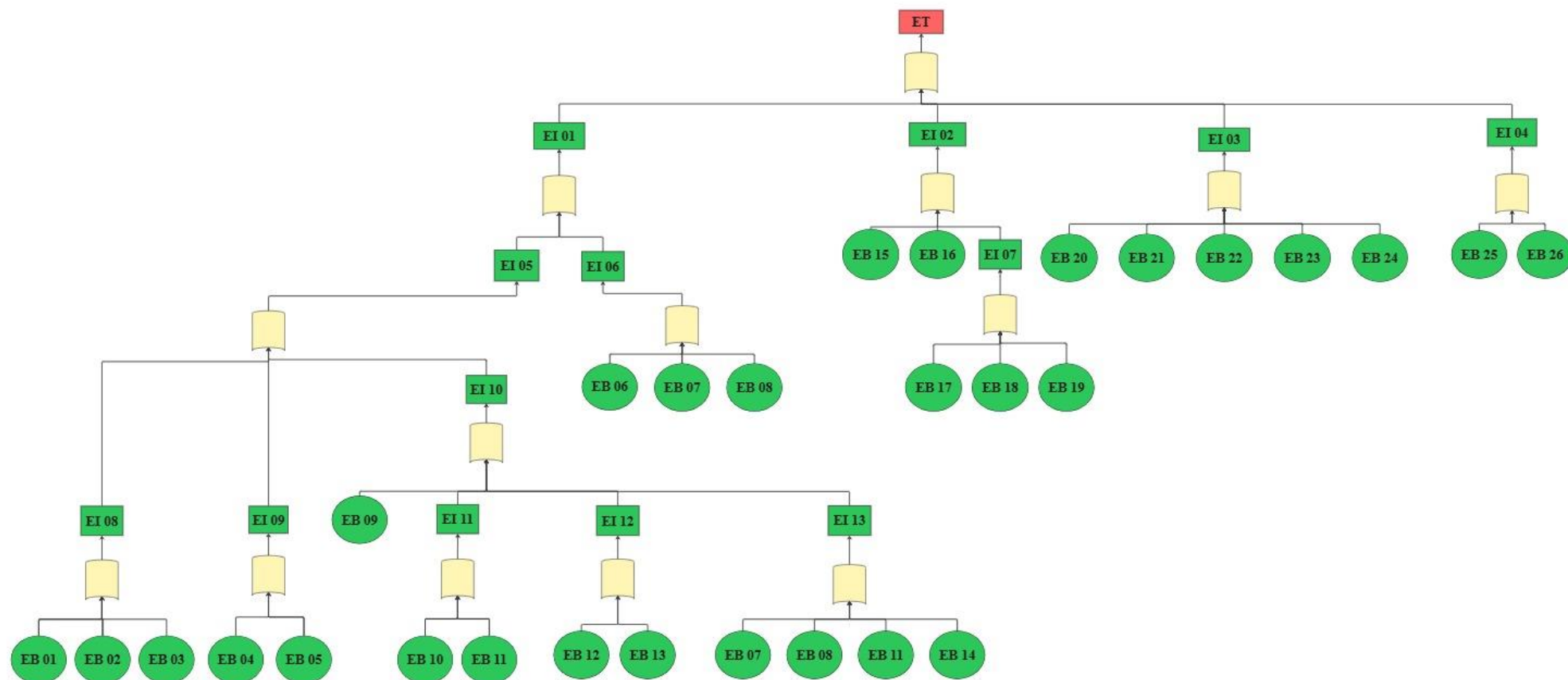


Tabela 14: Legenda dos eventos da FTA

Identificação	Classificação	Eventos
ET	Evento Topo	Parada/Redução na produção de H ₂ V
EI 01	Evento intermediário	Falha Crítica de Fornecimento de Energia Solar
EI 02	Evento intermediário	Falha no eletrolisador
EI 03	Evento intermediário	Falha nos sistemas auxiliares
EI 04	Evento intermediário	Falha no abastecimento de água
EI 05	Evento intermediário	Falha no sistema fotovoltaico
EI 06	Evento intermediário	Irradiância Solar Insuficiente
EI 07	Evento intermediário	Vazamento de H ₂
EI 08	Evento intermediário	Falha no inversor
EI 09	Evento intermediário	Falha no cabeamento e conexões
EI 10	Evento intermediário	Falha nos módulos
EI 11	Evento intermediário	Danos físicos ao modulo
EI 12	Evento intermediário	Falha de isolamento
EI 13	Evento intermediário	Surgimento de <i>Hotspot</i>
EB 01	Evento básico	Falha elétrica/eletrônica no inversor
EB 02	Evento básico	Superaquecimento do inversor
EB 03	Evento básico	Falha no software do inversor
EB 04	Evento básico	Curto circuito
EB 05	Evento básico	Circuito aberto
EB 06	Evento básico	Condições climáticas adversas

Identificação	Classificação	Eventos
EB 07	Evento básico	Sombreamento
EB 08	Evento básico	Sujidade
EB 09	Evento básico	Falha na estrutura
EB 10	Evento básico	Quebra do vidro da placa
EB 11	Evento básico	Quebra da célula
EB 12	Evento básico	Delaminação do encapsulante
EB 13	Evento básico	Falha na caixa de junção
EB 14	Evento básico	Falha do Diodo de <i>bypass</i>
EB 15	Evento básico	Degradação do catalisador
EB 16	Evento básico	Degradação das placas bipolares
EB 17	Evento básico	Degradação da membrana
EB 18	Evento básico	Falha nas vedações
EB 19	Evento básico	Ruptura de outros componentes
EB 20	Evento básico	Falha no Sistema de Resfriamento
EB 21	Evento básico	Falha no Sistema de Controle
EB 22	Evento básico	Falha no Retificador
EB 23	Evento básico	Falha no Sistema de separação e secagem do gás
EB 24	Evento básico	Falha no Sistema de Purificação do H ₂
EB 25	Evento básico	Fornecimento de água insuficiente
EB 26	Evento básico	Falha na purificação da Água