v7.n7.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PARADAS DA UG-01 POR MEIO DA METODOLOGIA FMEA EM UMA USINA TERMELÉTRICA DE MANAUS-AM

STRATEGIES FOR CONTROLLING SHUTDOWNS OF THE UG-01 UNIT USING THE FMEA METHODOLOGY IN A THERMOELECTRIC POWER PLANT IN MANAUS-AM

ESTRATEGIAS PARA CONTROLAR LAS PARADAS DE LA UNIDAD UG-01 UTILIZANDO LA METODOLOGÍA FMEA EN UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EN MANAUS-AM

José Carlos Costa da Rocha[1], Emerson Leão Brito do Nascimento[2], José César Oran Bendaham[3]

e778602
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8602

PUBLICADO: 07/2026

RESUMO

O aumento da complexidade operacional das usinas termelétricas, aliado à degradação progressiva dos equipamentos e às variações nos regimes de despacho energético, impõe desafios à confiabilidade e à disponibilidade dos sistemas de geração. Este estudo tem como objetivo aplicar a metodologia *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) como ferramenta para o controle e monitoramento das paradas da Unidade Geradora UG-01 de uma usina termelétrica em Manaus-AM, visando identificar os modos de falha mais críticos e subsidiar estratégias de manutenção baseadas na confiabilidade. A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quali-quantitativa, fundamentada nos princípios da engenharia de confiabilidade e da manutenção industrial. A metodologia integrou a análise de dados históricos provenientes do sistema informatizado de gestão da manutenção (CMMS) com o Diagrama de Pareto e a FMEA, permitindo a estratificação das ordens de serviço, a classificação dos desarmes operacionais e a priorização dos modos de falha com maior impacto na disponibilidade da unidade geradora. Os resultados indicaram maior criticidade nos sistemas de exaustão, injeção, proteção e arrefecimento, além de evidenciarem limitações das estratégias de manutenção baseadas exclusivamente em horas de operação, sobretudo em condições de carga variável. Conclui-se que a aplicação da FMEA favorece a adoção de uma manutenção preditiva orientada à condição dos ativos, contribuindo para reduzir paradas não programadas, otimizar custos operacionais e elevar a confiabilidade e a segurança da geração termelétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Termelétrica. Gestão da manutenção. FMEA.

ABSTRACT

The increasing operational complexity of thermal power plants, combined with the progressive degradation of equipment and fluctuations in energy dispatch conditions, poses significant challenges to the reliability and availability of power generation systems.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica (FUCAPI).
[2] Doutorando em Engenharia Elétrica pela Flórida University USA (FUUSA) e professor da Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica (FUCAPI).
[3] Graduando em Controle e Automação pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

This study aims to apply the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) methodology as a tool to support the control and monitoring of shutdowns in Generating Unit UG-01 of a thermal power plant located in Manaus, Brazil, identifying critical failure modes and supporting reliability-based maintenance strategies. This applied research adopts a qualitative and quantitative approach grounded in reliability engineering and industrial maintenance principles. The methodology combined historical maintenance data obtained from the Computerized Maintenance Management System (CMMS) with Pareto analysis and FMEA, enabling the stratification of work orders, systematic classification of operational trips, and prioritization of failure modes with the greatest impact on unit availability. The results identified the exhaust, fuel injection, protection, and cooling systems as the most critical due to the high operational severity associated with their failures. Furthermore, maintenance strategies based solely on operating hours proved insufficient under variable load conditions. The application of FMEA demonstrated its potential to support the transition from reactive maintenance to condition-based predictive maintenance, contributing to the reduction of unplanned shutdowns, optimization of operational costs, and improvement of the reliability and operational safety of thermal power generation.

KEYWORDS: *Thermal power plant. Maintenance management. FMEA.*

RESUMEN
La creciente complejidad operativa de las centrales termoeléctricas, junto con el envejecimiento de los activos y las variaciones en los regímenes de despacho energético, exige estrategias de mantenimiento orientadas a incrementar la confiabilidad y la disponibilidad de los sistemas de generación. Este estudio tuvo como objetivo aplicar la metodología Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) para identificar y priorizar los modos de falla responsables de las paradas de la Unidad Generadora UG-01 de una central termoeléctrica ubicada en Manaus, Brasil. La investigación es de naturaleza aplicada, con enfoque cualitativo-cuantitativo, fundamentada en los principios de la ingeniería de confiabilidad y el mantenimiento industrial. La metodología incluyó el análisis de registros históricos obtenidos del Sistema Computarizado de Gestión del Mantenimiento (CMMS), complementado con el uso del Diagrama de Pareto y la FMEA para clasificar las órdenes de servicio, identificar los principales disparos operacionales y evaluar la criticidad de los modos de falla. Los resultados mostraron que los sistemas de escape, inyección, protección y enfriamiento presentan el mayor impacto sobre la disponibilidad de la unidad generadora, evidenciando las limitaciones de las políticas de mantenimiento basadas únicamente en horas de operación. La aplicación de la FMEA permitió priorizar acciones de mantenimiento basadas en el riesgo, favoreciendo la transición hacia estrategias predictivas sustentadas en la condición de los activos. Se concluye que esta metodología contribuye a reducir las paradas no programadas, optimizar los costos de mantenimiento y aumentar la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad operativa de la generación termoeléctrica.

PALABRAS CLAVE*: Central térmica. Gestión del mantenimiento. FMEA.*

INTRODUÇÃO

A garantia da segurança energética, notadamente em cenários de transição e variabilidade hidrológica, permanece como um dos mais relevantes desafios técnico-operacionais enfrentados pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) (EPE, 2024). No Brasil, as usinas termelétricas consolidaram-se como ativos de infraestrutura críticos, caracterizadas por elevada necessidade de despacho térmico, operação contínua sob demanda e crescente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

importância na matriz de confiabilidade. Seus impactos extrapolam o âmbito estritamente elétrico, produzindo reflexos econômicos, contratuais e regulatórios que comprometem a estabilidade tarifária e a otimização de recursos no provimento de energia (ONS, 2023).

O ciclo termodinâmico de geração de base, comum em grande parte do parque térmico brasileiro, registra sucessivos episódios de ciclagem operacional que tensionam as rotinas de manutenção, especialmente em períodos de despacho emergencial contínuo. Já os sistemas mecânicos centrais, cuja operação ininterrupta expõe componentes a gradientes extremos de temperatura e pressão, evidenciaram a gravidade dos desgastes físicos associados à operação em regimes atípicos (IEMA, 2022). A Unidade Geradora (UG), por sua vez, apresenta elevada suscetibilidade a falhas intermitentes em subsistemas auxiliares, sendo frequentemente responsável por paradas forçadas que incidem diretamente sobre a disponibilidade fabril e a capacidade efetiva de entrega de potência contratada (Braga, 2022).

O custo econômico e operacional dessas interrupções não programadas é expressivo: incluem-se gastos imprevistos com manutenção corretiva, substituição emergencial de componentes mecânicos, redução da eficiência térmica global e a exposição a penalidades financeiras impostas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Tais despesas, associadas a danos sistêmicos indiretos, como desgaste acelerado de sobressalentes e a desestruturação do planejamento de paradas preventivas, conferem à indisponibilidade de termelétricas um caráter oneroso, crítico e de complexa mitigação (ANEEL, 2024; Santos; Pereira, 2023).

A persistência desses cenários operacionais insatisfatórios encontra relação direta com a inerente degradação física dos equipamentos submetidos a regimes severos de carga. A fadiga mecânica dos rotores e mancais, aliada às vibrações excessivas e a variáveis operacionais frequentemente posicionadas nos limites de projeto, favorece o encurtamento do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e amplia as Taxas de Indisponibilidade Forçada (TEIF) dos geradores (Silva; Oliveira, 2023). Paralelamente, fragilidades estruturais na engenharia de manutenção, como a limitação técnica do monitoramento preditivo de condição contínua, a dependência excessiva de rotinas baseadas apenas em tempo e a fragmentação no registro do histórico de anomalias, restringem a efetividade das estratégias de gestão de ativos (Costa *et al.*, 2024; Ferreira; Almeida, 2025).

Diante desse contexto, emerge a necessidade de adoção de metodologias sistemáticas capazes de identificar, priorizar e mitigar falhas operacionais críticas, promovendo maior confiabilidade e disponibilidade dos sistemas de geração termoelétrica. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo geral aplicar a metodologia FMEA como ferramenta de apoio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ao controle e monitoramento de paradas da Unidade Geradora UG-01 em uma Usina Termelétrica (UTE) em Manaus-AM, visando subsidiar estratégias de manutenção orientadas à confiabilidade operacional e à redução de indisponibilidades não programadas.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica desta pesquisa baseia-se nos princípios da engenharia de confiabilidade, da manutenção industrial e da análise de falhas, áreas fundamentais para a gestão eficiente de ativos em usinas termelétricas. Esses conceitos fornecem o embasamento necessário para compreender as estratégias que aumentam a disponibilidade, a confiabilidade e a eficiência operacional dos sistemas de geração de energia.

1.1. Engenharia de confiabilidade em UTE

Conceitos fundamentais de confiabilidade aplicada a sistemas de geração A engenharia de confiabilidade em Usinas Termelétricas (UTEs) constitui a disciplina central para a garantia da disponibilidade operacional e para a mitigação de falhas sistêmicas em ativos críticos. A confiabilidade é definida matematicamente como a probabilidade de um equipamento desempenhar sua função requerida sob condições operacionais rigorosamente estipuladas, durante um intervalo de tempo específico. Em matrizes elétricas modernas, as UTEs operam frequentemente no suprimento de base e na modulação de segurança do sistema interligado. A quebra intempestiva de turbinas a gás, geradores elétricos ou caldeiras de recuperação gera perdas substanciais de faturamento para o concessionário e compromete a estabilidade da frequência da rede elétrica (Sharma *et al.*, 2025).

No ambiente regulatório do setor elétrico, a Taxa de Indisponibilidade Forçada (TEIF) figura como indicador preponderante. A TEIF mensura o percentual de tempo em que a unidade geradora foi compelida a se desconectar do sistema elétrico exclusivamente em razão de avarias imprevistas. Órgãos de planejamento técnico utilizam a TEIF histórica acumulada da usina como fator redutor direto no cálculo da Garantia Física, o que restringe a capacidade legal de comercialização de energia firme do empreendimento em leilões de reserva (EPE, 2024). A aplicação de programas rigorosos de engenharia de confiabilidade impacta três eixos operacionais vitais das termelétricas. A elevação contínua do MTBF sincronizada com a redução drástica do MTTR maximiza a disponibilidade da planta. Sob a ótica financeira, a alta confiabilidade reduz o Custo Operacional (OPEX), suprimindo intervenções emergenciais fora

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de turno, fretes urgentes de componentes pesados e a queima ineficiente de combustíveis fósseis requerida nas sucessivas rampas de partida. No escopo da segurança energética, usinas dotadas de confiabilidade de classe mundial garantem o pronto atendimento aos despachos ordenados pelo operador nacional da rede, provendo inércia rotativa e suportando o balanço de carga frente à intermitência severa das fontes eólicas e solares.

1.2. Modelos de Manutenção Industrial

A engenharia de gestão de ativos industriais classifica as estratégias de intervenção em quatro modelos estruturais distintos. A manutenção corretiva é aplicada estritamente após a perda da função do componente e destina-se apenas aos itens secundários, cuja quebra não afeta a segurança ocupacional e não restringe a geração de energia. A manutenção preventiva baseia-se em trocas completas executadas em intervalos cronológicos fixos. A manutenção preditiva utiliza parâmetros físicos para monitorar o avanço da degradação e prever o limite seguro de operação antes da quebra catastrófica. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) consolida essas três tipologias em uma governança superior. A filosofia RCM direciona a seleção exata da técnica mais rentável para cada ativo baseando-se na matriz de criticidade individual e nas consequências financeiras sistêmicas da falha do equipamento (Smith *et al.*, 2022).

Os modelos de gestão alicerçados puramente no tempo de calendário ou nas horas de funcionamento contínuo apresentam restrições técnicas profundas em processos de cogeração e geração de base. A substituição preventiva pressupõe equivocadamente que a probabilidade de falha aumenta na mesma proporção do envelhecimento do material. O corpo teórico da tribologia e da ciência dos materiais atesta que essa curva de desgaste gradual aplica-se exclusivamente a itens de contato mecânico simples ou submetidos à fadiga cíclica modelada. A abertura injustificada de caixas de engrenagens e compressores axiais para a substituição de peças estruturalmente íntegras induz o sistema ao fenômeno da mortalidade infantil (Kusuma *et al.*, 2024). A mortalidade infantil caracteriza as falhas precoces causadas por erros no tensionamento de parafusos, falhas de assentamento de mancais novos ou defeitos de fabricação de lotes de reposição. Consequentemente, a intervenção prematura baseada no tempo eleva excessivamente os custos logísticos e derruba a confiabilidade mecânica global da máquina.

A busca pela erradicação do subaproveitamento da vida útil dos conjuntos rotativos forçou as termelétricas a migrarem integralmente para a Manutenção Baseada na Condição

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(CBM). Integrada aos barramentos de sensoriamento digital avançado, a CBM subordina a emissão das ordens de serviço à coleta ininterrupta de dados fisiológicos do equipamento em rotação nominal. A engenharia de diagnóstico analisa diariamente as assinaturas térmicas, espectros de vibração, detecção de ultrassom e análises cromatográficas do óleo lubrificante. O comissionamento da intervenção física nas oficinas ocorre exclusivamente no momento exato em que o equipamento projeta um desvio matemático inaceitável em relação ao seu perfil padrão de vibração e temperatura. Essa metodologia extrai o limite seguro de fadiga de cada liga metálica e blinda o ciclo térmico contra paradas impostas por manuais de fabricantes excessivamente conservadores.

1.3. Metodologias de análise de falhas

A supressão assertiva das causas raízes das falhas nas termelétricas demanda o emprego preliminar de ferramentas estatísticas focadas. O Diagrama de Pareto atua como o mecanismo primário de triagem técnica nos departamentos de engenharia. Fundamentado na regra matemática da assimetria, o diagrama comprova que oitenta por cento de todo o prejuízo financeiro decorrente da indisponibilidade da planta origina-se de vinte por cento dos equipamentos. A transposição desse método sobre os laudos do sistema informatizado de gestão permite isolar os componentes com classificação vital. A metodologia força as equipes corporativas a canalizarem todas as verbas de modernização sobre sistemas específicos como as bombas de água de alimentação de caldeira e sopradores de fuligem, eliminando a dispersão orçamentária em componentes acessórios com impacto nulo na injeção de megawatts na rede elétrica.

Definidos matematicamente os subsistemas de alta criticidade, a Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) figura como a ferramenta analítica mandatória para a quantificação técnica do risco. O princípio intrínseco da FMEA exige a decomposição técnica da máquina até suas peças unitárias e a formulação de hipóteses técnicas a respeito da perda da função e das consequências físicas no restante do fluxo de processo. O instrumento de mensuração do risco nesta metodologia é o Número de Prioridade de Risco (RPN). A variável Severidade classifica os potenciais vazamentos tóxicos, as ameaças físicas aos operadores e as quebras estruturais irreparáveis. A variável Ocorrência afere o percentual probabilístico de repetição deste desvio técnico na usina ao longo dos anos. A variável Detecção mensura o grau de sofisticação dos transmissores e dos painéis lógicos do sistema supervisório em notificar visualmente o operador central antes do colapso físico acontecer. Modelos industriais proíbem a operação contínua de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

qualquer subsistema de pressão ou rotação com escore de RPN superior ao teto estipulado pela diretoria técnica da concessionária.

A arquitetura normativa da engenharia de manutenção estabelece delimitações claras entre a FMEA e outras ferramentas investigativas corriqueiras. A sigla AMEF (Análise de Modos de Falha e Efeitos) constitui apenas a versão traduzida do acrônimo original para o idioma português e não incorpora nenhuma divergência metodológica na organização de tabelas ou no algoritmo de cálculo do risco, tratando-se rigorosamente da mesma ferramenta acadêmica. Em oposição total aos fundamentos da FMEA, a Análise de Causa Raiz (RCA) apresenta uma natureza temporal inversa. A FMEA tem um DNA puramente prospectivo, rastreando desvios latentes com a premissa de alterar o design do equipamento para impedir que a falha se concretize no futuro. A RCA configura-se como um procedimento de auditoria estritamente retrospectivo e reativo (Al Kautsar *et al.*, 2022). A aplicação da RCA é engatilhada logo após a falha consumada para efetuar a engenharia reversa do incidente e expor as quebras de barreira nos setores de fabricação, especificação de liga metálica ou montagem. As usinas termelétricas de ponta garantem a eficiência retroalimentando a matriz da FMEA com todos os novos modos de falha exóticos identificados após a conclusão investigativa dos relatórios de RCA.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi classificada, em primeiro lugar, quanto à abordagem do problema: adotou-se uma abordagem quantitativa, com a incorporação de elementos quali-quantitativos. Essa opção justificou-se pelo fato de que a análise de confiabilidade da Unidade Geradora 01 (UG-01) requereu a coleta, o processamento e a análise de dados operacionais e de manutenção mensuráveis, visando calcular indicadores como o Mean Time Between Failures (MTBF) e o Mean Time to Repair (MTTR); ou seja, trabalhou-se estritamente com variáveis numéricas e estatísticas de falha.

Segundo Gil (2022), a abordagem quantitativa é indicada sempre que se trabalha com variáveis mensuráveis e análise estatística, especialmente em levantamentos focados na frequência de eventos. Desse modo, a abordagem pôde dimensionar-se como quali-quantitativa, combinando o rigor dos dados numéricos com a interpretação técnica contextualizada. Essa flexibilidade metodológica está prevista na tipologia de pesquisa com abordagem mista (quali-quanti), conforme apresentado por Marconi e Lakatos (2022).

Quanto à natureza da pesquisa, classifica-se como aplicada, pois o propósito não é apenas gerar conhecimento teórico sobre termodinâmica ou mecânica dos fluidos, mas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

desenvolver um diagnóstico prático e propor um plano de intervenção aplicável diretamente à mitigação de paradas forçadas e à otimização da disponibilidade da planta termoelétrica.

Em relação aos objetivos, considera-se a pesquisa como descritiva e explicativa. É descritiva na medida em que visa caracterizar e quantificar o histórico de indisponibilidade da UG-01, estratificando como as paradas se distribuem entre os diferentes subsistemas. É explicativa porque busca identificar as causas raízes dessas interrupções, estabelecendo relações de causa e efeito por meio de ferramentas de engenharia de manutenção.

Por fim, quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa empregou um estudo de caso embasado no levantamento empírico de dados secundários (análise de relatórios de operação e registros de manutenção). A etapa inicial consistiu em revisão documental dos manuais dos fabricantes (OEM) e dos diários de operação do sistema supervisório (SCADA). Em seguida, realizou-se um levantamento quantitativo no Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizado (CMMS) da usina, integrando variáveis de tempo de operação, alarmes de desarme (trips) e ordens de serviço corretivas. A articulação dessas técnicas configurou um procedimento técnico típico de estudos empíricos nas áreas de engenharia de confiabilidade e gestão de ativos industriais.

2.1. Coleta e tratamento dos dados

A coleta de dados concentrou informações provenientes de diferentes bases operacionais da UTE. Em atendimento a questões de sigilo e à solicitação da usina, seu nome não foi identificado no estudo. As informações analisadas incluíram registros do banco de dados do CMMS, além de laudos de inspeção termográfica e de análise de vibração. A diversidade dessas fontes contribui para maior precisão analítica, possibilitando uma abordagem multifatorial da dinâmica de degradação dos equipamentos.

Após a etapa de coleta, referente ao recorte temporal dos últimos 36 meses de operação da UG-01, os dados foram organizados em um único banco relacional e passaram por um processo rigoroso de sanitização e padronização. Essa etapa incluiu a compatibilização dos horários de eventos, a eliminação de redundâncias no registro de falhas espúrias e a uniformização das taxonomias de defeitos, assegurando integridade e consistência estatística às análises de causa raiz realizadas na sequência.

2.2. Análise de falhas e modelagem de confiabilidade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise de dados utilizou ferramentas da engenharia de qualidade capazes de integrar as múltiplas variáveis de manutenção, permitindo modelar o comportamento histórico da unidade. A aplicação do Diagrama de Pareto e da FMEA seguiu princípios de sistematicidade, buscando representar de forma precisa os componentes críticos que mais impactam a Taxa de Indisponibilidade Forçada (TEIF).

Os gráficos e diagramas gerados por essa modelagem foram organizados conforme critérios de severidade, ocorrência e detecção, permitindo identificar gargalos operacionais, zonas de desgaste acelerado e vulnerabilidades sistêmicas. Esse processo tornou possível visualizar tendências de fadiga e interpretar padrões de falhas intermitentes que, isoladamente, dificilmente seriam percebidos apenas pela leitura bruta dos logs de operação.

2.3. Limitações do estudo

O registro histórico de Ordens de Manutenção (OMs) apresentou lacunas descritivas, nas quais operadores e mantenedores omitiram detalhes técnicos das causas primárias em falhas de curta duração, o que reduz a precisão da categorização em eventos menores. Essa limitação impacta diretamente a rastreabilidade absoluta de 100% das microparadas.

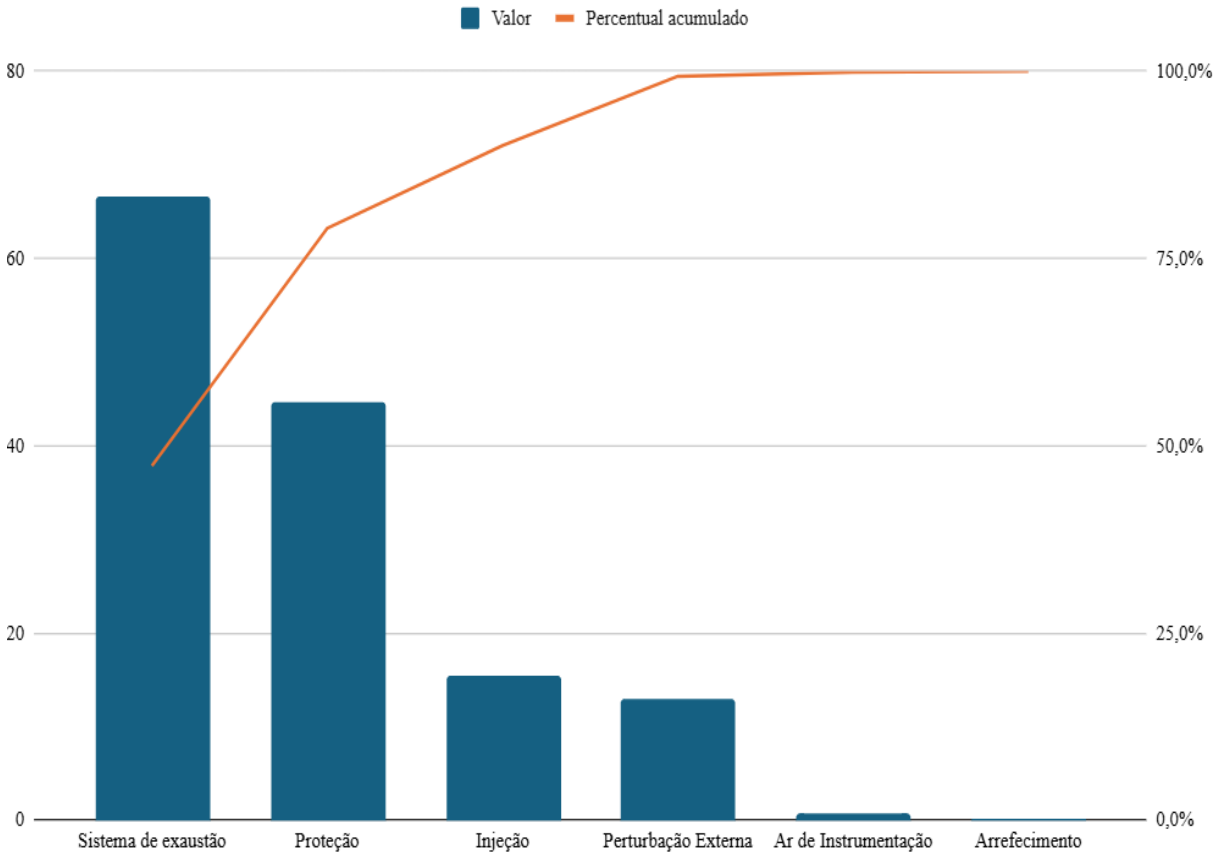
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos registros históricos de manutenção, alarmes operacionais e eventos de parada, foi possível identificar padrões recorrentes de falhas que anteriormente eram tratados apenas de forma corretiva, sem uma avaliação estruturada das causas.

A utilização do Diagrama de Pareto, ver Figura 1, possibilitou visualizar a distribuição das horas de parada entre os principais sistemas da unidade. Os resultados demonstraram que o sistema de Exaustão foi responsável pela maior parcela das indisponibilidades, acumulando 133 horas de parada, o que corresponde a 47,31% do total analisado. Em seguida, o sistema de Proteção apresentou 89,1 horas de indisponibilidade, representando 31,70% das ocorrências registradas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Diagrama de Pareto da UG-01 da Termelétrica



Fonte: Os autores, 2026.

Na prática, isso significa que praticamente 80% das falhas da UG-01 estão concentradas em apenas dois subsistemas. Esse comportamento confirma o princípio de Pareto aplicado à engenharia de confiabilidade, demonstrando que pequenas parcelas dos equipamentos acabam sendo responsáveis pela maior parte das perdas operacionais.

Os eventos relacionados ao Sistema de Exaustão apresentaram elevada criticidade devido ao rompimento dos discos de ruptura durante a operação do motor. Além da necessidade imediata de desligamento da unidade geradora, essas falhas provocaram aumento abrupto de ruído, liberação de gases quentes e necessidade de manutenção corretiva emergencial, ampliando significativamente o tempo de indisponibilidade.

A análise técnica do FMEA, Figura 2, demonstrou que essas falhas possuem severidade elevada principalmente pela ausência de mecanismos eficientes de detecção antecipada. Em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

diversos eventos analisados, o problema somente era percebido após a ruptura efetiva do disco, quando a unidade já se encontrava fora de operação.

Figura 2. Tabela FMEA

Nº	PONTO DA FALHA	ANÁLISE DA FALHA			AVALIAÇÃO DE RISCO			AÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA
		Modos de falha	Efeitos de falha	Causas da falha	Ocorrência	Severidade	Detecção	
1	Sistema de exaustão.	Abertura/rompimento do disco de ruptura.	Descarga súbita de gases quentes e aumento de ruído; risco ao entorno; parada não programada da máquina para troca do disco.	Disco de ruptura fora das especificações.	6	9	Inspeçao visual.	- Instalar sensores/alarmes de contrapressão nos três discos de rupturas; - Proteger contra intempéries e corrosão;. - Aumentar periodicidade de manutenção preventiva de anual para trimestral/semestral.
				Disco de ruptura instalado incorretamente.	6	9	Inspeçao visual.	
2	Proteção.	Alarme no detector de névoa.	Risco de aquecimento anormal dentro do carter do motor; presença de água; falha no equipamento; parada não programada da máquina por alarme de proteção.	Engrenagem super aquecidas e gases de combustão no carter.	4	8	Inspeçao visual.	Realizar manutenção preventiva do motor e detector de névoa conforme recomeda manual do fabricante.
				Água no óleo lubrificante.	4	8	Análise de uma amostra de óleo lubrifcante.	
				Funcionamento incorreto do equipamento e excesso de condensado na rede de ar de instrumentação.	4	8	Calibração do equipamento e inspeção visual.	
3	Injeção.	Falha de injeção.	Alta ou baixa temperatura de gases de exaustão; alta ou baixa pressão máxima nos cilindros.	Alta ou baixa injeção de gás.	7	8	Supervisório.	Realizar manutenção preventiva do motor conforme recomeda manual do fabricante.
				Falha no sensor de pressão máxima.	7	8	Supervisório.	
				Falha nas bobinas de ignição e velas.	7	8	Supervisório e medição das bobinas e velas.	
4	Pertubação externa.	Variação no sistema elétrico/gás externo.	Alta ou baixa tensão; Alta ou baixa frequência; alta ou baixa corrente elétrica; pressão de gás.	Sobre ou subtensão.	7	6	Relé de proteção.	Calibração nos relés de proteção.
				Sobre ou subfrequência.	7	6	Relé de proteção.	
				Sobrecorrente.	7	6	Relé de proteção.	
				Baixa pressão de gás.	7	6	Supervisório.	Não há.
5	Ar de Instrumentação.	Tubulação de ar de instrumentação rompida.	Baixa pressão de ar de instrumentação.	Falha de operação na válvula principal de gás.	4	6	Inspeçao visual e supervisório.	Inspeção diária nas redes de ar de instrumentação.
6	Arrefecimento.	Falha no inversor de frequência.	Alta temperatura de água do motor; alta temperatura de óleo lubrificante.	Danos severos nos mancais móveis e fixo do motor.	4	10	Supervisório	Manutenção nos invesores de frequência conforme recomanda o manual do fabricante.
				Danos severos nas turbinas.	4	10	Supervisório	

Fonte: Os autores, 2026.

Com base nos resultados obtidos, foram propostas ações corretivas e preventivas voltadas à redução das falhas recorrentes. Para o Sistema de Exaustão, recomendou-se a instalação de transmissores de contrapressão para monitoramento contínuo da linha, permitindo identificar tendências de aumento de pressão antes da ruptura dos discos.

Também foi proposta a revisão da especificação técnica dos discos de ruptura, buscando componentes mais adequados às condições térmicas e mecânicas da operação da UG-01. Além

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

disso, sugeriu-se a padronização dos procedimentos de montagem, controle de torque e aumento da frequência das inspeções preventivas.

No sistema de Injeção, as ações recomendadas incluíram substituição preventiva de sensores críticos, monitoramento periódico das bobinas de ignição e calibração frequente dos instrumentos de pressão e controle de combustível.

Os resultados esperados com a implementação dessas medidas incluem redução significativa da Taxa de Indisponibilidade Forçada (TEIF), aumento do MTBF, redução do MTTR e melhoria da estabilidade operacional da unidade geradora. A expectativa é que a atuação preventiva permita diminuir intervenções emergenciais, reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade global da planta termoelétrica.

De forma geral, os resultados demonstraram que a aplicação integrada das ferramentas de confiabilidade forneceu uma visão mais clara das causas raízes das falhas operacionais da UG-01. A combinação entre o Diagrama de Pareto e o FMEA permitiu não apenas identificar os sistemas mais críticos, mas também direcionar tecnicamente as ações de manutenção com maior potencial de impacto na disponibilidade da usina.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu compreender, de forma técnica e aplicada, os principais fatores responsáveis pelas paradas forçadas da Unidade Geradora UG-01 da UTE. A partir da integração entre dados operacionais, registros de manutenção e ferramentas clássicas da engenharia de confiabilidade, foi possível identificar padrões recorrentes de falhas que impactam diretamente a disponibilidade operacional da planta e comprometem a estabilidade do processo de geração de energia.

Os resultados obtidos evidenciaram que os sistemas de Exaustão e Proteção concentram a maior parcela das indisponibilidades da unidade, sendo responsáveis por aproximadamente 80% das horas totais de parada analisadas. A aplicação do Diagrama de Pareto demonstrou de maneira objetiva que poucos subsistemas possuem influência desproporcional sobre a performance operacional da UG-01, reforçando a necessidade de priorização estratégica das ações de manutenção.

A análise FMEA complementou esse diagnóstico ao permitir a hierarquização dos modos de falha mais críticos por meio do cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN). As falhas associadas ao rompimento dos discos de ruptura, problemas de injeção de combustível, falhas em sensores de pressão e instabilidades nos sistemas de proteção apresentaram os maiores

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

índices de criticidade, principalmente devido à elevada severidade operacional e à baixa capacidade de detecção antecipada.

Do ponto de vista técnico, verificou-se que grande parte das ocorrências está relacionada à combinação entre desgaste físico acelerado, regimes severos de operação, ciclagem térmica intensa e limitações dos modelos tradicionais de manutenção baseados apenas em tempo de operação. Em muitos casos, os mecanismos de falha somente eram percebidos após a perda parcial ou total da funcionalidade do equipamento, aumentando o tempo de indisponibilidade e ampliando os custos associados às intervenções corretivas emergenciais.

Além dos aspectos puramente mecânicos e operacionais, o estudo demonstrou a importância da qualidade dos registros históricos de manutenção para o sucesso das análises de confiabilidade. A ausência de padronização em determinadas ordens de serviço e a limitação descritiva de algumas ocorrências reduziram parcialmente a rastreabilidade completa das causas raízes, evidenciando a necessidade de fortalecimento das práticas de apontamento técnico e gestão de dados industriais.

As ações propostas ao longo da pesquisa buscaram atuar diretamente sobre os principais fatores identificados. Entre elas, destacam-se a implementação de monitoramento contínuo de contrapressão, revisão das especificações técnicas dos discos de ruptura, ampliação das rotinas de inspeção preventiva, calibração periódica de sensores críticos e fortalecimento das práticas de manutenção preditiva baseada em condição.

A expectativa é que a adoção dessas medidas contribua para a redução da Taxa de Indisponibilidade Forçada (TEIF), aumento do Mean Time Between Failures (MTBF), redução do Mean Time To Repair (MTTR) e melhoria da confiabilidade operacional da UG-01. Além disso, a atuação preventiva tende a minimizar custos operacionais, reduzir intervenções emergenciais e ampliar a segurança sistêmica da geração termelétrica.

De forma geral, a pesquisa demonstrou que a aplicação integrada das ferramentas de engenharia de confiabilidade representa uma abordagem eficiente para o diagnóstico de falhas complexas em usinas termelétricas. A combinação entre análise estatística, investigação técnica e interpretação operacional permitiu transformar dados históricos em informações estratégicas para tomada de decisão.

Por fim, conclui-se que a transição gradual de modelos reativos para estratégias preditivas baseadas na condição real dos ativos não representa apenas uma melhoria técnica, mas uma necessidade operacional para garantir maior disponibilidade, segurança e sustentabilidade econômica no contexto atual da geração termelétrica brasileira.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de Rede e Regras de Comercialização: Penalidades por Indisponibilidade de Geração Termelétrica e Apuração de TEIF. Brasília: ANEEL, 2024.

BRAGA, L. A. Análise de disponibilidade e confiabilidade de sistemas mecânicos em usinas termelétricas a ciclo combinado. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

COSTA, R. S.; ALMEIDA, T. R.; LIMA, J. P. Implementação de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) para redução de Taxas de Indisponibilidade Forçada (TEIF) no setor elétrico. Revista de Engenharia de Produção e Gestão de Ativos, v. 14, n. 2, p. 45-62, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034). Ministério de Minas e Energia. Brasília: EPE, 2024.

FERREIRA, A. C.; ALMEIDA, M. B. Estratégias de monitoramento preditivo de condição contínua e diagnóstico de falhas em unidades geradoras térmicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS, 2025, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: [s.n.], 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). Inventário de Emissões Atmosféricas e Geração em Usinas Termelétricas: Ano Base 2022. São Paulo: IEMA, 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Relatório Anual 2023: O ONS e o Sistema Interligado Nacional. Rio de Janeiro: ONS, 2024.

SANTOS, P. A.; PEREIRA, M. F. Impactos econômicos, contratuais e regulatórios da indisponibilidade fabril forçada em plantas termelétricas no SIN. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 1, p. 112-128, 2023.

SILVA, J. F. R.; OLIVEIRA, C. D. Avaliação de fadiga e indicadores MTBF e MTTR sob condições de ciclagem e regimes atípicos de carga estrutural. Journal of Reliability and Industrial Maintenance, v. 8, n. 4, p. 23-39, 2023.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

AL KAUTSAR, A.; PRASETYO, E.; WIDODO, A. Root cause analysis and reliability centered maintenance for power plant equipment. International Journal of Quality and Reliability Management, Bingley, v. 39, n. 2, p. 400-415, 2022.

KUSUMA, B. A.; NUGROHO, W.; SANTOSO, B. Failure Mode and Effects Analysis implementation in gas turbine power plants: a modern approach. Journal of Reliability Engineering, Londres, v. 45, n. 3, p. 112-128, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SHARMA, V.; KUMAR, R.; SINGH, P. Reliability and availability analysis of thermal power plant systems using Markov modeling. Energy Reports, Amsterdã, v. 13, p. 1500-1515, 2025.

SMITH, R. K.; JOHNSON, M.; WILLIAMS, D. Condition based maintenance strategies for critical rotary equipment in thermal power generation. Power Engineering, Tulsa, v. 50, n. 4, p. 55-68, 2022.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.