ÁREA TEMÁTICA: FINANÇAS
CATEGORIA: ENANGRAD PLENO

CUSTO DE OPORTUNIDADE NA DECISÃO DE MANUTENÇÃO: ANÁLISE COMPARATIVA DAS ESTRATÉGIAS CORRETIVA, PREVENTIVA E PREDITIVA EM UM TURBOGERADOR

RESUMO

A gestão de ativos de alta criticidade é decisiva para a saúde financeira e a continuidade operacional das organizações industriais. Em uma unidade de tratamento de gás natural, a geração própria de energia torna essencial a disponibilidade dos turbogeradores, pois uma parada inesperada implica custos diretos, perda de produção e riscos à segurança e ao meio ambiente. Este estudo tem como objetivo analisar a aplicação do custo de oportunidade na tomada de decisão entre as estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em um turbogerador de alta criticidade, comparando quantitativamente os custos diretos de intervenção e o custo de oportunidade, e analisando qualitativamente os impactos da indisponibilidade operacional e dos riscos associados. Trata-se de pesquisa aplicada, de abordagem mista e caráter descritivo, conduzida por meio de estudo de caso único de um turbogerador que apresenta degradação do isolamento elétrico detectada por monitoramento de descargas parciais. Os valores monetários são apresentados após ajuste por coeficiente de confidencialidade e atualização para dezembro de 2025. Os resultados indicam que a estratégia preditiva apresenta o menor custo total em relação às estratégias preventiva e corretiva, com custos de oportunidade classificados como médio e alto, respectivamente, além de menor risco de parada não programada e da eliminação de 30 e 180 dias de indisponibilidade adicional. Conclui-se que a incorporação do custo de oportunidade torna a tomada de decisão em manutenção mais racional, otimiza a alocação de recursos e aumenta a disponibilidade do ativo, contribuindo para a gestão econômica de ativos críticos.

Palavras-chave: manutenção; ativos críticos; custo de oportunidade; estratégia; tomada de decisão.

ABSTRACT

The management of highly critical assets is essential to the financial health and operational continuity of industrial organizations. In a natural gas processing plant, on-site power generation makes the availability of turbogenerators essential, as an unexpected outage results in direct costs, production losses, and safety and environmental risks. This study aims to analyze the application of opportunity cost in decision-making among corrective, preventive, and predictive maintenance strategies for a highly critical turbogenerator by quantitatively comparing direct intervention costs and opportunity cost, while qualitatively assessing the impacts of operational downtime and the associated risks. This applied research adopts a descriptive, mixed-methods approach and is based on a single case study of a turbogenerator that exhibited electrical insulation degradation identified through partial discharge monitoring. Monetary values were adjusted by applying a confidentiality coefficient and updated to December 2025. The results indicate that the predictive maintenance strategy resulted in the lowest total cost compared with the preventive and corrective strategies, with opportunity costs classified as medium and high, respectively. In addition, the predictive strategy reduced the risk of unplanned shutdowns and eliminated 30 and 180 days of additional downtime associated with the preventive and corrective strategies, respectively. It is concluded that incorporating opportunity cost into maintenance decision-making supports more rational decisions, optimizes resource allocation, and increases asset availability, thereby contributing to the economic management of critical assets.

Keywords: maintenance; critical assets; opportunity cost; strategy; decision-making.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de ativos de alta criticidade é fundamental para a sustentabilidade operacional e financeira das organizações industriais. Em sistemas de geração de energia, a indisponibilidade de equipamentos críticos, como os turbogeradores, pode resultar em elevados custos diretos, perdas de produção e riscos operacionais.

Embora as técnicas de manutenção tenham evoluído significativamente, as práticas industriais permanecem amplamente baseadas em três estratégias clássicas: manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Conforme a ABNT NBR 5462 (1994), a manutenção corretiva ocorre após a falha e está associada a custos não planejados e maior indisponibilidade. Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva busca reduzir riscos por meio de intervenções programadas, podendo gerar substituições prematuras e gastos desnecessários. Para Dilda et al. (2017), a manutenção preditiva permite a identificação antecipada de falhas, contribuindo para a redução de paradas não programadas e para o aumento da vida útil dos ativos.

Sob a perspectiva econômica, o custo de oportunidade representa o valor do melhor benefício renunciado quando uma alternativa é escolhida em detrimento de outra (BEUREN, 1993). Embora amplamente discutido na teoria econômica e na contabilidade gerencial, sua aplicação como critério para comparar estratégias de manutenção em ativos industriais críticos ainda é pouco explorada, restringindo a avaliação econômica, em muitos casos, aos custos diretos de intervenção.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a aplicação do custo de oportunidade na tomada de decisão entre as estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em um ativo de alta criticidade com redundância, considerando os custos diretos de intervenção e, como dimensão complementar, os impactos associados à indisponibilidade operacional. Busca-se, responder à seguinte pergunta de pesquisa: como o custo de oportunidade pode contribuir para a tomada de decisão entre as estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em ativos de alta criticidade?

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a fundamentação teórica; a seção 3 descreve a metodologia; a seção 4 apresenta a análise e a discussão dos resultados; e a seção 5 traz a conclusão e as contribuições do estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos essenciais para a análise proposta, com foco na tomada de decisão, no custo de oportunidade e nas estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva aplicadas a ativos de alta criticidade.

2.1 Tomada de decisão

A tomada de decisão é um processo central nas organizações e envolve a escolha entre alternativas diante de objetivos e restrições. Simon (1963) introduz o conceito de racionalidade limitada, segundo o qual os decisores operam com informações incompletas, limitações cognitivas e restrições de tempo, o que os leva a optar por soluções satisfatórias, em vez de necessariamente ótimas.

A qualidade da decisão está diretamente associada à capacidade de transformar dados em informação relevante. Davenport (1998) afirma que dados, quando analisados e contextualizados, subsidiam decisões mais consistentes,

enquanto Bazerman e Moore (2020) destacam que vieses cognitivos podem distorcer decisões, reforçando a necessidade de critérios analíticos claros e estruturados.

Em decisões de manutenção, essas limitações tornam-se ainda mais evidentes, pois falhas, custos e impactos operacionais envolvem incertezas. Isso exige modelos capazes de comparar alternativas de forma racional e econômica. Nesse contexto, os dados, embora essenciais ao processo decisório, nem sempre são utilizados de forma adequada.

2.2 Custo de oportunidade

O custo de oportunidade é um conceito fundamental da teoria econômica e representa o valor do melhor benefício renunciado quando uma alternativa é escolhida em detrimento de outra. Wieser (1889) é um dos primeiros a formalizar essa ideia, ao afirmar que toda decisão implica renúncia a usos alternativos dos recursos.

Robbins (1932) reforça que, em um ambiente de escassez, a escolha entre alternativas mutuamente excludentes torna inevitável a perda de benefícios potenciais. De forma objetiva, Mankiw (2019) define o custo de oportunidade como o melhor benefício abandonado ao se optar por determinada alternativa, tornando esse conceito essencial para avaliar a eficiência econômica das decisões.

No campo da administração e das finanças, Gitman (1984) destaca que decisões de investimento devem considerar não apenas os custos explícitos, mas também os retornos potenciais sacrificados. Essa lógica aplica-se diretamente às decisões de manutenção, nas quais a escolha de uma estratégia pode implicar perdas associadas à indisponibilidade do ativo.

Segundo Araújo e Assaf Neto (2003), o custo de oportunidade representa o retorno que poderia ser obtido com a melhor alternativa não escolhida, pois o ato de decidir implica a exclusão de determinadas possibilidades para a seleção de uma alternativa específica, evidenciando a essência do custo de oportunidade presente em qualquer processo decisório.

2.3 Gestão da manutenção industrial e ativos críticos

A ISO 55000 estabelece os fundamentos, os princípios e a terminologia da gestão de ativos, orientando as organizações a obter valor de seus ativos ao longo de todo o ciclo de vida. Nesse contexto, o valor corresponde à capacidade do ativo de contribuir para os objetivos organizacionais por meio do equilíbrio entre desempenho, custos, riscos e oportunidades.

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), manutenção é o conjunto de ações técnicas e administrativas destinadas a manter ou recolocar um item em condições de desempenhar sua função requerida. Kardec e Nascif (2009) ampliam essa definição ao tratar a manutenção como função estratégica, voltada à garantia de disponibilidade, confiabilidade, segurança e custos adequados.

A criticidade de um ativo está relacionada ao impacto de sua falha sobre o sistema produtivo. Aven (2009) define criticidade como a combinação entre a probabilidade de falha e a severidade de suas consequências. Smith e Hawkins (2004) destacam que ativos de alta criticidade exigem políticas de manutenção mais robustas, uma vez que suas falhas afetam diretamente a produção, a segurança e o meio ambiente. A escolha da estratégia de manutenção torna-se, portanto, uma decisão econômica relevante.

2.4 Tipos de manutenção industrial

Na visão de Viana (2002), a literatura aponta três estratégias clássicas de manutenção amplamente utilizadas na indústria: corretiva, preventiva e preditiva.

A manutenção corretiva, conforme a ABNT NBR 5462 (1994), é realizada após a ocorrência da falha, podendo ser planejada ou não planejada. Wireman (2010) explica que a manutenção corretiva não planejada está associada a elevados custos, paradas inesperadas e maior risco operacional, sendo indicada apenas para ativos de baixa criticidade e sistemas redundantes de baixo custo.

Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva baseia-se em intervenções programadas em intervalos de tempo ou uso. Embora reduza a probabilidade de falhas, pode gerar substituições prematuras e custos desnecessários quando não alinhada às reais condições do equipamento.

A manutenção preditiva fundamenta-se no monitoramento das condições reais de operação dos ativos, por meio de técnicas como análise de vibração, termografia e descargas parciais. Segundo Mobley (2002), essa abordagem permite intervir no momento ótimo, maximizando a vida útil dos equipamentos e reduzindo paradas não programadas. Para Bampoula, Nikolakis e Alexopoulos (2024), a combinação do monitoramento de condição com métodos de inteligência artificial contribui para otimizar a utilização de recursos e reduzir paradas de produção, desde que sustentada por dados confiáveis e de qualidade adequada.

Cada estratégia apresenta uma estrutura distinta de custos, o que reforça a necessidade de analisá-las sob a ótica do custo de oportunidade, especialmente em ativos de alta criticidade.

3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, incluindo o delineamento do estudo, a caracterização do objeto analisado, os critérios de coleta de dados e os métodos utilizados para comparar as estratégias de manutenção sob a ótica do custo de oportunidade.

3.1 Delineamento da pesquisa

Esta pesquisa tem caráter aplicado, pois busca resolver um problema real de tomada de decisão em manutenção industrial, com ênfase na análise econômica de diferentes estratégias em um ativo crítico. Segundo Gil (2019), pesquisas dessa natureza voltam-se à geração de conhecimento com finalidade prática, buscando aplicar resultados em situações concretas e específicas.

Quanto à abordagem metodológica, a pesquisa caracteriza-se como mista, ao combinar análises quantitativas de custos com análises qualitativas dos impactos operacionais e gerenciais decorrentes da degradação do isolamento elétrico e da indisponibilidade do equipamento. Prodanov e Freitas (2013) destacam que a pesquisa de abordagem mista é indicada quando o fenômeno investigado exige tanto a mensuração objetiva de variáveis quanto a interpretação contextual dos dados, proporcionando uma compreensão mais abrangente do problema estudado.

O estudo é de natureza descritiva, pois descreve e compara as características econômicas e operacionais das estratégias de manutenção preditiva, preventiva e corretiva, sem manipular variáveis ou estabelecer relações de causa e efeito. Conforme Vergara (2000), a pesquisa descritiva tem como finalidade expor as

características de determinado fenômeno, podendo estabelecer correlações entre variáveis. Nesse contexto, a comparação é empregada para analisar as diferenças e as semelhanças entre as estratégias de manutenção, considerando aspectos como custos, desempenho e aplicabilidade operacional.

Utiliza-se o método de estudo de caso, com foco em um único ativo industrial de alta criticidade. Yin (2015) argumenta que o estudo de caso é uma estratégia especialmente adequada para investigar fenômenos contemporâneos em seu contexto real, quando não há possibilidade de controle das variáveis pelo pesquisador.

A pesquisa é documental e de campo: são utilizadas ordens de serviço, registros técnicos e planilhas de custos, complementadas pela observação direta do processo de manutenção. Os dados são de fonte primária, coletados em corte transversal por meio de amostragem não probabilística por tipicidade. Prodanov e Freitas (2013) esclarecem que, nesse tipo de amostragem, o pesquisador seleciona intencionalmente os casos que considera típicos ou representativos do universo que pretende estudar, sem recorrer a critérios probabilísticos.

O estudo é classificado como uma pesquisa original e aplicada, pois seus resultados podem subsidiar a tomada de decisão sobre estratégias de manutenção, contribuindo para a redução de custos, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e o aprimoramento da gestão de ativos em ambientes industriais.

3.2 Objeto de pesquisa

O objeto de estudo consiste em um turbogerador a gás, composto por uma turbina a gás e um gerador elétrico. A combustão do gás natural aciona a turbina, que movimenta o gerador responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica. O equipamento integra um sistema de geração composto por quatro turbogeradores instalados em uma unidade de tratamento de gás natural, sendo necessária a operação simultânea de, no mínimo, duas unidades para atendimento à demanda elétrica do processo. Em condições usuais, duas unidades permanecem em operação, uma em reserva e outra pode estar indisponível para manutenção preventiva ou corretiva.

Essa configuração evidencia a criticidade do ativo, uma vez que a perda não planejada de uma unidade em operação reduz a confiabilidade, podendo acarretar a perda da capacidade de geração disponível e exigir o desligamento de cargas relevantes ao processo produtivo, com impactos sobre a continuidade operacional. Em situações de falha catastrófica de um turbogerador, os efeitos podem ser agravados pela necessidade de reparos extensos, substituição de componentes de elevado valor e longos períodos de indisponibilidade, resultando em impactos operacionais e financeiros significativos.

O turbogerador apresenta degradação progressiva do isolamento elétrico em 2022, identificada por meio de um sistema de monitoramento contínuo. Como a falha é detectada antes da indisponibilidade do equipamento, torna-se possível comparar os impactos técnicos e econômicos das estratégias corretiva, preventiva e preditiva, com destaque para o custo de oportunidade associado a cada decisão de manutenção.

Os valores monetários dos cenários corretivo e preditivo são atualizados para dezembro de 2025 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo Especial (IPCA-E), calculado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), utilizando a Calculadora do Cidadão disponibilizada pelo Banco Central do Brasil (BCB). O cenário corretivo refere-se a uma intervenção realizada em 2014 e o

cenário preditivo à implantação do sistema de monitoramento em 2022, ambos corrigidos para a mesma base temporal. O cenário preventivo corresponde a uma manutenção executada em dezembro de 2025, motivo pelo qual não requer correção monetária.

Cabe esclarecer que, no caso analisado, o sistema de monitoramento é instalado durante uma parada preventiva programada em 2022, e o reparo do isolamento elétrico é executado na parada preventiva de 2025. Como a intervenção ocorre no âmbito de um contrato contínuo de manutenção especializada, não há custo incremental para avaliar e corrigir o isolamento do turbogerador.

3.3 Critérios de coleta e análise

Os dados utilizados nesta pesquisa contemplam custos de materiais, equipamentos, serviços e mão de obra associados às três intervenções analisadas. Para garantir a confidencialidade das informações, os valores monetários são submetidos a um ajuste proporcional conhecido apenas pelo autor e pelo orientador, preservando-se integralmente as relações comparativas entre os cenários avaliados.

A análise é comparativa e contempla três dimensões: (i) custo total de intervenção; (ii) indisponibilidade operacional, em dias de parada; e (iii) custo de oportunidade, calculado tendo a manutenção preditiva como estratégia de referência, por representar o menor custo e o menor impacto operacional entre os cenários analisados.

3.3.1 Comparação das estratégias de manutenção

A análise comparativa é realizada com base nos dados dos Apêndices A, B e C, obtidos a partir de ordens de serviço reais, com valores atualizados para dezembro de 2025 pelo IPCA-E (IBGE) e ajustados por coeficiente de sigilo. Para fins deste estudo, o custo de oportunidade é operacionalizado como o benefício econômico sacrificado ao se optar por uma estratégia de maior custo total em detrimento da alternativa de menor custo entre os cenários analisados, no caso a manutenção preditiva. O custo de oportunidade das demais estratégias corresponde, portanto, ao diferencial de custo em relação a essa base.

A indisponibilidade operacional é mantida como dimensão qualitativa de análise, sem incorporação monetária ao cálculo. Trata-se, assim, de uma estimativa conservadora: a eventual monetização dos períodos de parada tenderia a ampliar os diferenciais observados entre as estratégias. Os resultados são apresentados e discutidos na seção seguinte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos a partir da comparação entre as estratégias de manutenção preditiva, preventiva e corretiva aplicadas ao turbogerador. Inicialmente, são apresentados os resultados individuais de cada estratégia, contemplando os custos de manutenção corrigidos monetariamente para dezembro de 2025 e os impactos relacionados à indisponibilidade operacional do equipamento. Em seguida, é realizada a análise comparativa por meio do custo de oportunidade, utilizado como critério para avaliar os benefícios econômicos sacrificados ao se optar por uma estratégia em detrimento das demais.

4.1 Critérios de análise e interpretação dos dados

Os resultados são obtidos a partir da análise de dados reais de manutenção, organizados nos Apêndices A, B e C, considerando os custos diretos das intervenções, os períodos de indisponibilidade do ativo e a atualização monetária dos valores pelo IPCA-E (IBGE). Os resultados obtidos são interpretados com base na fundamentação teórica, permitindo discutir os impactos econômicos e operacionais de cada estratégia e sua contribuição para o processo de tomada de decisão na gestão da manutenção.

4.1.1 Resultados na manutenção preditiva

Para implementar a manutenção preditiva por monitoramento de descargas parciais no turbogerador, os custos totalizam R$597.886,53 em dezembro de 2022. Atualizados para dezembro de 2025 pelo IPCA-E (IBGE), esses valores atingem R$688.019,84, conforme a Figura 1. Esse montante engloba a aquisição dos sensores, a instalação e o treinamento da equipe, conforme apresentado no Apêndice A.

Figura 1: Resultado da correção pelo IPCA-E (IBGE) – Manutenção Preditiva

Resultado da Correção pelo IPCA-E (IBGE)

Dados básicos da correção pelo IPCA-E (IBGE)			
Dados informados			
Data inicial			12/2022
Data final			12/2025
Valor nominal	R$	597.886,53	(REAL)
Dados calculados			
Índice de correção no período			1,15075320
Valor percentual correspondente			15,075320 %
Valor corrigido na data final	R$	688.019,84	(REAL)

Fonte: Banco Central do Brasil.

Cabe registrar que o monitor portátil de descargas parciais atende aos quatro turbogeradores da unidade, e que os custos de mão de obra são rateados entre os equipamentos.

A manutenção preditiva tem como objetivo monitorar o ativo em operação, permitindo a identificação antecipada de falhas sem impactar sua disponibilidade. No caso estudado, a implementação do sistema de monitoramento de descargas parciais realizada durante uma parada preventiva programada de 30 dias não gera acréscimo ao cronograma de indisponibilidade do turbogerador. Dessa forma, para fins de análise do custo de oportunidade, considera-se que a estratégia preditiva não resulta em dias adicionais de parada.

No período de 2022 a 2025, o monitoramento contínuo viabiliza acompanhar a evolução da degradação do isolamento elétrico durante a operação do equipamento, fornecendo informações que não estavam disponíveis na ocorrência corretiva de 2014. Diante de uma possível falha identificada através dos dados, o reparo é planejado e executado durante a manutenção preventiva de 2025, com os custos previamente estimados e contemplados no orçamento da intervenção. Evidencia-se,

assim, que o investimento em manutenção preditiva é inferior ao custo evitado da trajetória corretiva, sendo recuperado já na primeira falha grave evitada.

4.1.2 Resultados na manutenção preventiva

A manutenção preventiva apresenta custo total de R$1.014.728,95 em dezembro de 2025 e demanda uma parada programada de 30 dias, conforme o Apêndice B. Diferentemente do cenário corretivo, a intervenção ocorre antes da falha do equipamento, reduzindo os impactos associados à indisponibilidade observada em 2014.

Embora a manutenção preventiva seja orientada por critérios de periodicidade previamente estabelecidos, é durante essa intervenção que a degradação do isolamento elétrico identificada pelo monitoramento preditivo em 2022 é corrigida de forma planejada. Assim, o reparo de 2025 acontece em condições controladas, com recursos, materiais e mão de obra programados, o que evita uma parada emergencial e traz mais previsibilidade aos custos envolvidos.

Kardec e Nascif (2009) observam que estratégias preventivas podem levar à substituição de componentes que ainda permanecem aptos à operação, uma vez que o momento da intervenção não é necessariamente determinado pela condição real do equipamento. Essa característica ajuda a explicar por que o custo e o período de parada permanecem superiores aos observados no cenário preditivo, apesar dos benefícios decorrentes do planejamento da intervenção.

4.1.3 Resultados na manutenção corretiva

O impacto observado nesse cenário corretivo não está restrito ao custo da intervenção. A indisponibilidade prolongada do equipamento amplia as consequências operacionais da falha. Esse contexto difere dos demais cenários analisados, nos quais a intervenção ocorre antes de uma falha catastrófica.

A falha do isolamento elétrico resulta em 180 dias de indisponibilidade do turbogerador, período necessário para a execução do rebobinamento completo, o transporte, a reinstalação do equipamento e a contratação de serviços especializados. Além dos custos diretos de manutenção, essa paralisação compromete a disponibilidade operacional da unidade, reduzindo a confiabilidade do sistema de geração de energia. Consequentemente, amplia-se o custo de oportunidade associado à estratégia corretiva, em razão da perda de produção e da indisponibilidade prolongada de um ativo altamente crítico.

A manutenção corretiva apresenta o maior custo entre os cenários analisados. Embora a intervenção totalize R$1.006.615,05 em dezembro de 2014, a atualização monetária pelo IPCA-E (IBGE) eleva esse valor para R$1.855.717,59 em dezembro de 2025, conforme Figura 2 e Apêndice C.

Figura 2: Resultado da correção pelo IPCA-E (IBGE) – Manutenção Corretiva

Resultado da Correção pelo IPCA-E (IBGE)

Dados básicos da correção pelo IPCA-E (IBGE)		
Dados informados		
Data inicial		12/2014
Data final		12/2025
Valor nominal	R$ 1.006.615,05	(REAL)
Dados calculados		
Índice de correção no período		1,84352260
Valor percentual correspondente		84,352260 %
Valor corrigido na data final	R$ 1.855.717,59	(REAL)

Fonte: Banco Central do Brasil.

4.2 Análise de indisponibilidade e custo de oportunidade

A Tabela 1 sintetiza os custos totais de intervenção, a indisponibilidade operacional e o custo de oportunidade de cada estratégia, tendo a manutenção preditiva como referência por apresentar o menor custo de oportunidade.

Tabela 1: Análise comparativa das estratégias de manutenção

Estratégia	Custo total 2025 (R$)	Indisponibilidade	Custo de oportunidade (R$)	Classificação
Manutenção Preditiva	688.019,84	Mínima	(referência)	Baixo
Manutenção Preventiva	1.014.728,95	30 dias	+ 326.709,11	Médio
Manutenção Corretiva	1.855.717,59	180 dias	+ 1.167.697,75	Alto

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Conforme evidenciado na Tabela 1, a adoção da estratégia de manutenção preditiva representa uma economia de R$326.709,11 em relação à manutenção preventiva e de R$1.167.697,75 em relação à corretiva. Além dessas economias, a estratégia preventiva implica uma indisponibilidade operacional adicional de 30 dias e a corretiva de 180 dias, ambas não monetizadas nesta análise, enquanto a manutenção preditiva não gera indisponibilidade operacional adicional. Esses resultados reforçam que a manutenção preditiva constitui a estratégia de menor custo de oportunidade para o ativo analisado.

4.3 Implicações dos resultados para a tomada de decisão em manutenção

O Quadro 1 consolida, em uma única visão, as sete dimensões de análise comparadas entre as três estratégias de manutenção, permitindo identificar a posição relativa de cada alternativa. Sua análise evidencia que a manutenção preditiva apresenta desempenho superior em todas as dimensões avaliadas, destacando-se pelo menor custo total, indisponibilidade mínima, menor custo de oportunidade, intervenção baseada na condição real do equipamento, planejamento antecipado, menor risco de paradas não programadas e maior eficiência econômica.

Quadro 1: Comparativo consolidado das estratégias de manutenção

Dimensão de Análise	Preditiva	Preventiva	Corretiva
Custo total da intervenção	R$ 688.019,84	R$ 1.014.728,95	R$ 1.855.717,59
Indisponibilidade operacional	Nenhum dia	30 dias	180 dias
Custo de oportunidade vs. preditiva	(referência)	R$ 326.709,11	R$ 1.167.697,75
Tipo de intervenção	Por condição	Programada (calendário)	Após a falha
Planejamento possível	Sim	Sim	Talvez
Risco de parada não programada	Baixo	Médio	Alto
Eficiência econômica	**Elevada**	**Moderada**	**Reduzida**

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Os resultados estão alinhados à fundamentação teórica. De acordo com Mankiw (2019), o custo de oportunidade é definido como o melhor benefício abandonado ao se escolher uma alternativa. Portanto, o custo de oportunidade de se escolher a manutenção preditiva é baixo, porque as alternativas abandonadas (corretiva e preventiva) são mais onerosas e implicam maior indisponibilidade do equipamento. Gitman (1984) reforça que decisões de investimento devem considerar os retornos potenciais sacrificados, aqui materializados no custo evitado pela intervenção preditiva.

Sob a perspectiva da racionalidade limitada de Simon (1963), a intervenção corretiva realizada em 2014 ocorre em um contexto de informações restritas acerca da condição do ativo. Em 2022, a utilização do monitoramento por descargas parciais proporciona informações objetivas sobre o estado do isolamento elétrico, ampliando a qualidade das informações disponíveis para a tomada de decisão em 2025 e contribuindo para a redução das incertezas associadas à gestão da manutenção no turbogerador.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo analisa a aplicação do custo de oportunidade na tomada de decisão entre as estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em um ativo de alta criticidade com redundância, considerando os custos diretos de intervenção, e como dimensão complementar, a indisponibilidade operacional. Com base em dados reais de ordens de serviço do turbogerador, atualizados para dezembro de 2025, é possível avaliar os impactos econômicos associados às diferentes estratégias de manutenção.

A manutenção preditiva apresenta o menor custo total entre as estratégias analisadas, R$688.019,84, frente aos R$1.014.728,95 da manutenção preventiva e aos R$1.855.717,59 da manutenção corretiva. Os diferenciais de R$326.709,11 e R$1.167.697,75 representam o custo de oportunidade associado à escolha de alternativas mais onerosas e evidenciam o benefício econômico preservado pela estratégia preditiva. Essa análise é complementada, de forma qualitativa e não monetizada, pela disponibilidade operacional adicional de 30 e 180 dias, respectivamente. Esses resultados corroboram a definição de Mankiw (2019), segundo a qual o custo de oportunidade corresponde ao melhor benefício renunciado ao se optar por determinada alternativa.

A identificação precoce da degradação do isolamento elétrico por meio do monitoramento de descargas parciais amplia a qualidade das informações disponíveis para a tomada de decisão e permite planejar a intervenção antes da ocorrência de

uma falha semelhante à registrada em 2014. Esse resultado reforça a perspectiva de Simon (1963) de que decisões mais eficazes dependem da qualidade das informações disponíveis ao decisor.

Como contribuição, o estudo demonstra a aplicabilidade do custo de oportunidade como critério de apoio à comparação econômica entre estratégias de manutenção. Ao integrar esse conceito ao processo de tomada de decisão em um caso real, amplia a avaliação para além dos custos diretos de intervenção e fornece uma aplicação prática da teoria econômica na gestão de ativos industriais críticos, oferecendo subsídios para decisões de investimento em monitoramento por condição.

Como limitações, os resultados referem-se à análise de um único ativo e pressupõem paradas programadas para a execução dos reparos no cenário preditivo. Além disso, a indisponibilidade operacional não é monetizada, tornando conservadoras as estimativas do custo de oportunidade.

Para pesquisas futuras, recomenda-se aplicar a metodologia a outros ativos críticos e setores produtivos, bem como incorporar a monetização da indisponibilidade operacional ao cálculo do custo de oportunidade.

REFERÊNCIAS

ABNT – **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 5462: confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ARAÚJO, A. M. P.; ASSAF NETO, A. **A contabilidade tradicional e a contabilidade baseada em valor.** Revista Contabilidade & Finanças, São Paulo, n. 33, p. 16-32, set./dez. 2003.

AVEN, T. **Reliability and risk analysis**. 2. ed. London: Springer, 2009.

BAMPOULA, X.; NIKOLAKIS, N.; ALEXOPOULOS, K. **Condition monitoring and predictive maintenance of assets in manufacturing using LSTM-autoencoders and transformer encoders**. **Sensors**, v. 24, n. 10, p. 3215, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24103215. Acesso em: 10 jul. 2026.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. Brasília, DF: BCB, [s.d.]. Disponível em: https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice. Acesso em: 29 maio 2026.

BAZERMAN, M. H.; MOORE, D. A. **Judgment in managerial decision making**. 9. ed. New York: Wiley, 2020.

BEUREN, I. M. **Gerenciamento da informação**: **um recurso estratégico no processo de gestão empresarial**. São Paulo: Atlas, 1993.

DAVENPORT, T. H. **Ecologia da informação**. São Paulo: Futura, 1998.

DILDA, V. et al. **Digital manufacturing**: the revolution will be individualized. [S. l.]: McKinsey & Company, 2017.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 3. ed. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1984.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 55000**: **asset management – overview, principles and terminology.** Geneva: ISO, 2014.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica.** 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

MANKIW, N. G. **Introdução à economia**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**: **métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
ROBBINS, L. **An essay on the nature and significance of economic science**. London: Macmillan, 1932.
SIMON, H. A. **Administrative behavior**. 2. ed. New York: Free Press, 1963.
SMITH, A. M.; HAWKINS, B. **Lean maintenance**. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2004.
VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2000.
VIANA, H. R. G. **PCM: planejamento e controle de manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
WIESER, F. von. **Natural value**. London: Macmillan, 1889.
WIREMAN, T. **Developing performance indicators for managing maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2010.
YIN, R. K. **Estudo de caso**: **planejamento e métodos.** 5. ed. Tradução de Cristhian Matheus Herrera. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Apêndice A – Manutenção Preditiva

Tabela A.1: Composição dos Custos do Sistema de Monitoramento Contínuo

Item	Descrição	Qtd.	Valor total dez/2022 (R$)	Valor atualizado dez/2025 (R$)
1	Sistema de descargas parciais com 03 sensores capacitores (80 pF, 16 kV) e kit de instalação	1	42.548,00	48.962,25
2	Caixa de ligação fibreglass polyester com 03 saídas	1	7.430,00	8.550,10
3	Monitor portátil TGA-B (periódico)	1	466.000,00	536.250,99
4	Serviços de instalação por motor	1	39.992,00	46.020,92
5	Treinamento	1	28.900,00	33.256,77
6	Mão de Obra	1	13.016,53	14.978,80
TOTAL			**597.886,53**	**688.019,84**

Fonte: dados da pesquisa (2022–2025), ajustados por coeficiente de sigilo.

Apêndice B – Manutenção Preventiva

Tabela B.1: Ordens de serviço Preventivo

Item	Categoria	Percentual (%)	Valor total dez/2025 (R$)
1	Materiais e equipamentos	60,0	608.837,37
2	Mão de obra	20,0	202.945,79
3	Outros serviços	20,0	202.945,79
TOTAL			**1.014.728,95**

Fonte: dados da pesquisa (2025), ajustados por coeficiente de sigilo.

Apêndice C – Manutenção Corretiva

Tabela C.1: Composição dos Custos da Manutenção Corretiva

Descrição do item	Valor dez/2014 (R$)	Valor atualizado dez/2025 (R$)
Materiais	2.770,80	5.108,03
Rebobinamento do motor e equipamentos	584.450,02	1.077.446,82
Serviços de terceiros	118.195,98	217.896,96
Mão de obra	146.582,94	270.228,96
Remoção, transporte e instalação – Pedido 4505	59.327,81	109.372,16
Transporte e reinstalação – Pedido 4506	95.287,50	175.664,66
TOTAL	**1.006.615,05**	**1.855.717,59**

Fonte: dados da pesquisa (2014–2025), ajustados por coeficiente de sigilo.