



MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Modelagem estatística e simulação analítica aplicadas à previsão de custos de manutenção preventiva de ativos

Autor: Luiz Araujo de Souza Junior

Disciplina: Métodos Estatísticos para Modelos de Transporte

Professores: Cel QEM Refm Paulo Afonso Lopes da Silva, Ph.D.

Resumo

Este artigo apresenta uma proposta de modelagem estatística e simulação analítica aplicada à previsão de custos da manutenção preventiva de ativos, estruturada a partir da lógica do Plano de Manutenção Avançado (PMAV). O estudo parte do entendimento de que registros preventivos organizados por sistemas, subsistemas, periodicidade, criticidade, frequência e custos podem ser convertidos em base quantitativa para apoio ao planejamento técnico e financeiro. Metodologicamente, a pesquisa adota abordagem quantitativa e aplicada, combinando panorama bibliométrico exploratório, estruturação de base de dados, regressão linear múltipla e operacionalização dos resultados em simulador analítico funcional. A aplicação foi aprofundada no recorte do ativo Edifício Corporativo Atlântico, com comparação entre os cenários Base e Ambiente agressivo. Os resultados indicaram elevação do custo total previsto de R\$ 12.695.387 para R\$ 16.050.954 e do custo total ajustado de R\$ 11.429.442 para R\$ 14.425.399, correspondendo a acréscimos aproximados de 26,4% e 26,2%, respectivamente, sem alteração substancial da hierarquia dos sistemas prioritários. O simulador permitiu ainda integrar indicadores sintéticos, comparação entre cenários, ranking de sistemas, painel de alertas e relatórios exportáveis, ampliando a capacidade de leitura analítica da manutenção. Conclui-se que a proposta é metodologicamente consistente e aplicada de forma promissora ao apoio à decisão em manutenção preventiva, desde que seus resultados sejam interpretados por profissional tecnicamente capacitado.

Palavras-chave: manutenção preventiva; previsão de custos; regressão linear múltipla; simulação analítica; gestão de ativos; apoio à decisão.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Abstract

This article presents a proposal for statistical modeling and analytical simulation applied to forecasting preventive maintenance costs for assets, structured according to the logic of the Advanced Maintenance Plan (PMAV). The study is based on the premise that preventive maintenance records organized by systems, subsystems, periodicity, criticality, frequency, and costs can be transformed into a quantitative basis for technical and financial planning support. Methodologically, the research adopts a quantitative and applied approach, combining an exploratory bibliometric overview, structured database organization, multiple linear regression, and the operationalization of results in a functional analytical simulator. The application was examined through a building asset case study, comparing the Base and Aggressive Environment scenarios. Results showed that the change in scenario increased the total predicted cost from R\$ 12,695,387 to R\$ 16,050,954 and the total adjusted cost from R\$ 11,429,442 to R\$ 14,425,399, corresponding to increases of approximately 26.4% and 26.2%, respectively, without substantial changes in the hierarchy of priority systems. The simulator also enabled the integration of key performance indicators, scenario comparisons, system rankings, alerts, and exportable analytical reports, thereby expanding the analytical interpretation of preventive maintenance data. The study concludes that the proposed approach is methodologically consistent and promising as a support tool for decision-making in preventive maintenance, provided that its results are interpreted by technically qualified professionals.

Keywords: preventive maintenance; cost forecasting; multiple linear regression; analytical simulation; asset management; decision support.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Figura 1- <i>Panorama temático exploratório do campo, com destaque para os termos mais recorrentes associados à manutenção preventiva, manutenção preditiva, confiabilidade, gestão de ativos e métodos analíticos, a partir de levantamento no Lens.org.</i>	7
Figura 2- <i>Evolução temporal das publicações no recorte bibliométrico exploratório, evidenciando crescimento da produção científica relacionada ao tema ao longo do período analisado.</i>	8
Figura 3- <i>Distribuição geográfica das publicações no recorte bibliométrico exploratório, com maior concentração em polos internacionais de pesquisa e ausência de destaque do Brasil entre os principais grupos da amostra analisada.</i>	9
Figura 4- <i>Visão geral do simulador analítico desenvolvido para apoio ao planejamento da manutenção preventiva de ativos.</i>	16
Figura 5 - <i>Relatório de simulação do cenário Base para o ativo Edifício Corporativo Atlântico.</i>	19
Figura 6 - <i>Relatório de simulação do cenário Ambiente agressivo para o ativo Edifício Corporativo Atlântico.</i>	20
Figura 7 - <i>Comparação entre os cenários Base e Ambiente agressivo, com destaque para custo total previsto, custo total ajustado e estabilidade da hierarquia de priorização.</i>	20
Fonte: <i>Elaboração própria.</i>	20
Figura 8 - <i>Ranking de sistemas prioritários e alertas operacionais dos cenários analisados.</i>	21

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

1. Introdução

A gestão da manutenção de ativos demanda instrumentos capazes de reduzir incertezas, ampliar a previsibilidade dos custos e apoiar decisões técnicas e gerenciais ao longo do tempo. Em diferentes contextos operacionais, a manutenção ainda é conduzida sob forte influência de eventos emergenciais, intervenções reativas e restrições orçamentárias, o que compromete a racionalidade do planejamento e dificulta a priorização adequada das ações. Nesse cenário, a previsão de custos de manutenção deixa de representar apenas uma necessidade contábil e passa a constituir elemento estratégico para a sustentabilidade técnica, econômica e operacional dos ativos.

Entre as abordagens correntes, a manutenção preventiva ocupa posição central por permitir a programação prévia das intervenções, reduzindo a probabilidade de falhas inesperadas e ampliando a previsibilidade do processo de gestão. Contudo, sua relevância não se limita ao plano operacional. Quando estruturada por sistemas, subsistemas, periodicidades, criticidade e histórico de intervenções, a manutenção preventiva também passa a desempenhar função informacional, produzindo uma base de dados capaz de sustentar análises quantitativas mais robustas. Nessa condição, o registro preventivo deixa de ser apenas documentação de rotina e passa a constituir uma fonte analítica para compreensão do comportamento dos ativos e de seus custos associados.

A manutenção preditiva, por sua vez, pode ser compreendida como um estágio de maior maturidade da gestão da manutenção, no qual a tomada de decisão se aproxima das condições reais de desempenho do ativo e depende da qualidade, continuidade e consistência dos dados históricos disponíveis. Em outras palavras, a transição entre uma lógica preventiva e uma lógica preditiva não ocorre de forma automática, mas requer uma base preventiva bem estruturada, passível de ser tratada analiticamente. Sob essa perspectiva, a previsão estatística de custos não representa apenas um resultado útil em si, mas também um passo intermediário para o avanço em direção a estratégias mais sofisticadas de monitoramento, priorização e intervenção.

Apesar desse potencial, observa-se que muitos contextos de manutenção ainda utilizam seus registros de forma predominantemente documental ou operacional, sem explorar de maneira suficiente ferramentas estatísticas e ambientes digitais que permitam transformar dados históricos em previsões úteis ao planejamento. Em particular, a previsão de custos futuros de manutenção permanece como desafio relevante, pois depende da articulação entre variáveis técnicas, temporais e econômicas, bem como da existência de uma base estruturada e comparável ao longo do tempo. Essa lacuna torna-se ainda mais evidente em ativos complexos, nos quais coexistem sistemas com ciclos preventivos heterogêneos, diferentes níveis de criticidade e demandas de intervenção distribuídas em horizontes temporais distintos.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

É nesse contexto que se insere o conceito de Plano de Manutenção Avançado (PMAV), entendido neste estudo como uma estrutura ampliada de planejamento da manutenção em horizonte plurianual, concebida para organizar intervenções recorrentes e não recorrentes ao longo do tempo. Diferentemente de um plano de manutenção restrito ao curto prazo, o PMAV permite incorporar atividades preventivas de diferentes frequências e complexidades técnicas, inclusive aquelas associadas a sistemas com ciclos mais longos de inspeção, reparo ou substituição. Essa lógica é especialmente relevante porque possibilita observar o comportamento da manutenção em horizonte estendido, favorecendo a organização de dados históricos e a análise comparativa entre sistemas e subsistemas.

A proposta desenvolvida neste trabalho parte de uma base estruturada de manutenção inspirada em aplicações práticas reais, inclusive em ambiente digital de gestão, mas é concebida de forma genérica e transferível, podendo ser aplicada a diferentes classes de ativos e a diferentes fontes de dados. Assim, a modelagem não depende de uma plataforma específica, podendo operar com informações provenientes de softwares de gestão da manutenção, aplicativos especializados, bases institucionais ou mesmo planilhas estruturadas preenchidas por usuários, desde que preservadas as variáveis mínimas de organização por sistemas, subsistemas, periodicidade, criticidade, frequência e custos.

Com base nessa estrutura, o estudo propõe a articulação entre modelagem estatística e simulação analítica aplicadas à manutenção preventiva de ativos. A modelagem foi operacionalizada por meio de regressão linear múltipla, complementada pela construção de cenários analíticos, indicadores comparativos e mecanismos de alerta. Como desdobramento aplicado, foi desenvolvido um simulador analítico funcional, concebido como prova de conceito da operacionalização da proposta, permitindo traduzir a base preventiva estruturada em projeções de custo, rankings de prioridade, painéis de alerta e sínteses executivas de apoio à decisão. Nessa perspectiva, o simulador não constitui o objeto central do artigo, mas sim a materialização prática da lógica metodológica proposta.

A originalidade do trabalho reside, portanto, na integração entre quatro dimensões que frequentemente aparecem de forma dissociada na prática da manutenção: a estruturação preventiva em horizonte ampliado pelo PMAV, a organização comparável dos dados por sistemas e subsistemas, a aplicação de modelagem estatística para previsão de custos e a operacionalização dessa lógica em ambiente de simulação analítica. Em vez de tratar a manutenção preventiva apenas como rotina operacional, o estudo a reposiciona como base quantitativa e computacionalmente explorável, capaz de sustentar análises prospectivas e apoiar a evolução metodológica em direção à manutenção preditiva.

Dessa forma, o objetivo deste artigo é apresentar uma proposta de modelagem estatística e simulação analítica aplicadas à previsão de custos da manutenção

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

preventiva de ativos, tomando como base dados estruturados em horizonte ampliado de manutenção. Busca-se demonstrar que a combinação entre planejamento preventivo de longo prazo, organização sistemática dos registros, regressão linear múltipla e operacionalização em simulador analítico pode contribuir para uma gestão mais planejada, comparável e orientada por evidências, com aplicação potencial em diferentes classes de ativos e diferentes ambientes de informação.

2. Referencial teórico

2.1 Panorama bibliométrico exploratório do tema

Com o objetivo de contextualizar a inserção científica do presente estudo, realizou-se um levantamento bibliométrico exploratório a partir de busca temática na plataforma Lens.org, com posterior apoio do software VOSviewer para visualização das relações entre termos. O procedimento teve caráter exploratório e buscou identificar, de forma sintética, os principais núcleos temáticos associados à manutenção preventiva, à manutenção preditiva, à confiabilidade, à gestão de ativos e à previsão de custos. O propósito desta etapa não foi desenvolver uma revisão bibliométrica exaustiva, mas oferecer um panorama inicial do campo e situar a proposta do artigo em relação às conexões temáticas mais recorrentes na literatura recente.

A visualização de coocorrência de termos indicou que o debate científico relacionado ao tema se estrutura em torno de um conjunto articulado de eixos conceituais. Entre os termos de maior destaque no recorte analisado, observam-se expressões ligadas à manutenção preventiva, à manutenção preditiva, à confiabilidade, à gestão de ativos, à análise de risco e aos métodos computacionais e analíticos. Esse resultado sugere que a discussão contemporânea sobre manutenção não se restringe à execução operacional de intervenções, mas se desenvolve em interface com confiabilidade, modelagem, otimização e apoio à decisão. Tal configuração reforça a aderência temática da presente pesquisa, que propõe justamente a articulação entre planejamento preventivo, modelagem estatística e simulação analítica.

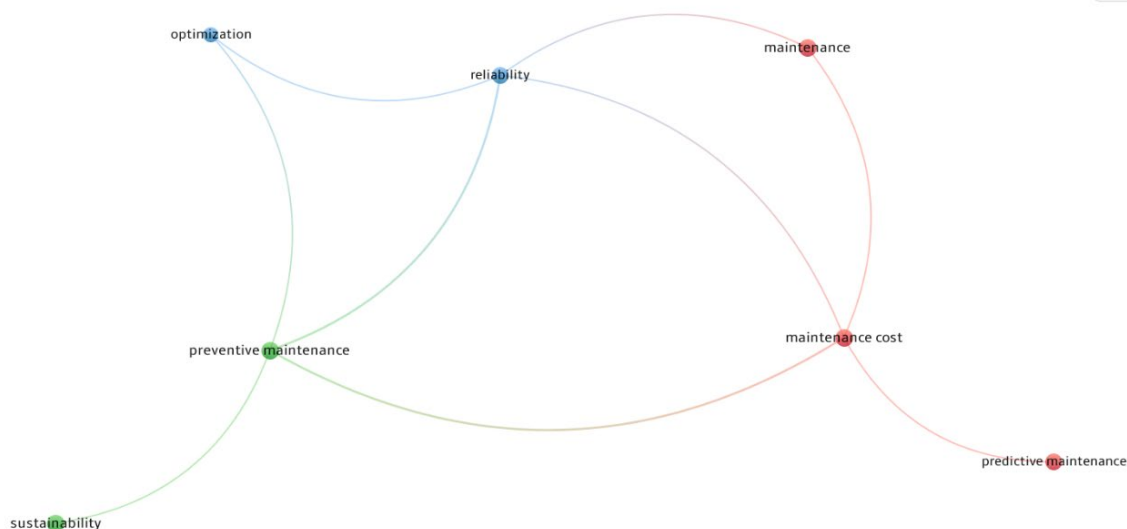


Figura 1- *Panorama temático exploratório do campo, com destaque para os termos mais recorrentes associados à manutenção preventiva, manutenção preditiva, confiabilidade, gestão de ativos e métodos analíticos, a partir de levantamento no Lens.org.*

Além da estrutura temática, o levantamento exploratório também evidenciou a evolução temporal das publicações no recorte analisado. Observa-se crescimento gradual da produção ao longo do período considerado, com maior concentração de trabalhos entre 2020 e 2022. Esse comportamento sugere fortalecimento recente do interesse acadêmico por temas relacionados à manutenção, confiabilidade, predição e suporte analítico à gestão de ativos. Os anos mais recentes devem ser interpretados com cautela, uma vez que a quantidade de registros pode refletir atualização parcial da base, indexação em andamento ou menor maturação temporal das publicações mais novas.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

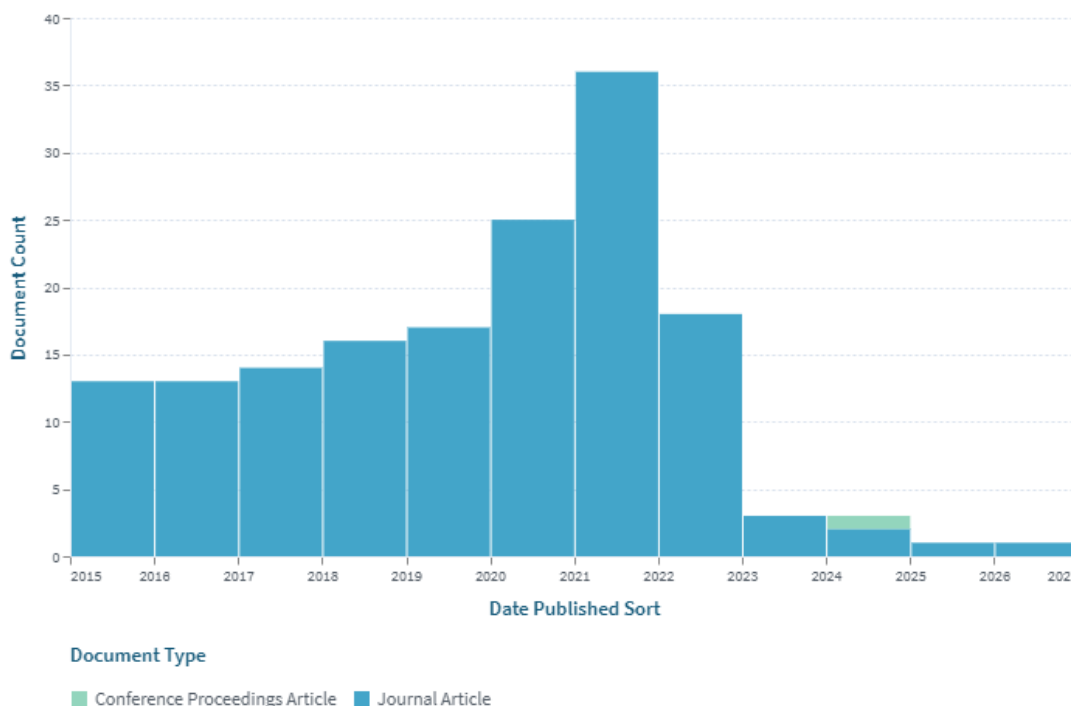


Figura 2- *Evolução temporal das publicações no recorte bibliométrico exploratório, evidenciando crescimento da produção científica relacionada ao tema ao longo do período analisado.*

A distribuição geográfica dos registros também indica concentração mais intensa em países como Estados Unidos, China e parte da Europa, com presença relevante ainda em outros polos internacionais. No recorte analisado, o Brasil não apareceu entre os destaques principais da distribuição geográfica, o que deve ser interpretado com prudência, pois depende diretamente da estratégia de busca, dos filtros empregados e da cobertura da base utilizada. Ainda assim, esse resultado sugere uma oportunidade de ampliação da contribuição nacional em pesquisas que articulem manutenção preventiva, custos, confiabilidade e abordagens analíticas.

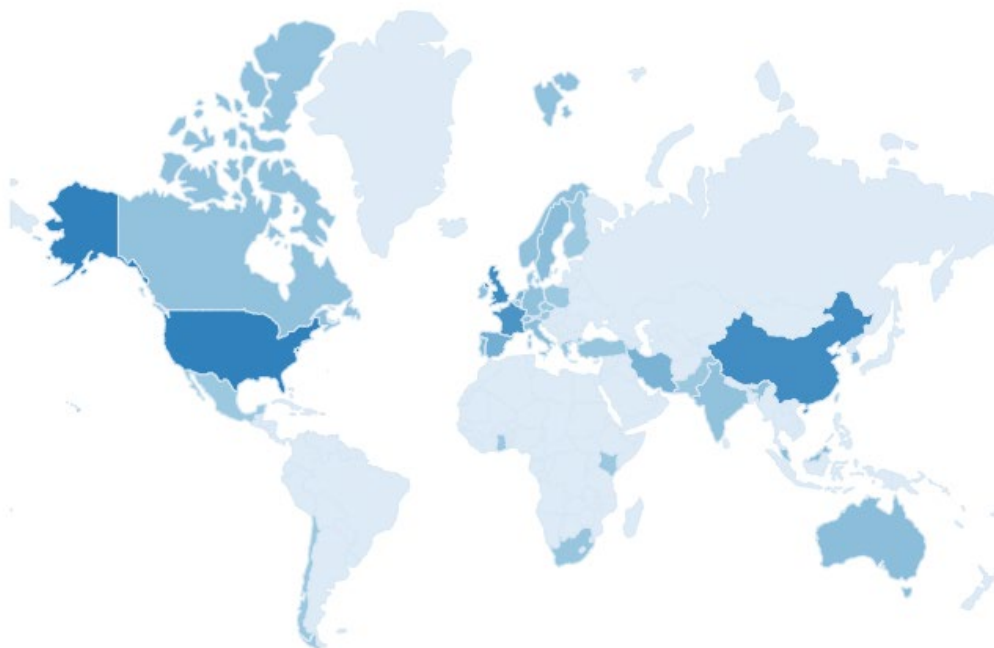


Figura 3- Distribuição geográfica das publicações no recorte bibliométrico exploratório, com maior concentração em polos internacionais de pesquisa e ausência de destaque do Brasil entre os principais grupos da amostra analisada.

Em conjunto, o panorama bibliométrico exploratório reforça que a proposta desenvolvida neste artigo se insere em uma agenda de pesquisa interdisciplinar, situada na convergência entre manutenção preventiva, manutenção preditiva, confiabilidade, gestão de ativos e métodos quantitativos de apoio à decisão. Dessa forma, o levantamento bibliométrico não apenas contextualiza o estudo, mas também contribui para justificar a relevância de investigar a previsão de custos da manutenção preventiva a partir de bases estruturadas e de sua operacionalização em ambiente de simulação analítica.

2.2 Manutenção de ativos: abordagem corretiva, preventiva e preditiva

A manutenção de ativos pode ser compreendida como o conjunto de estratégias e ações voltadas à preservação da funcionalidade, da segurança, da confiabilidade e do desempenho de sistemas, componentes e estruturas ao longo do tempo. Na literatura, é recorrente a distinção entre manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva, cada uma associada a diferentes formas de relação entre falha, tempo e decisão (Molêda et al., 2023; Achouch et al., 2022).

A manutenção corretiva caracteriza-se pela intervenção após a ocorrência da falha, assumindo caráter predominantemente reativo. Já a manutenção preventiva se baseia em ações planejadas antes da falha, normalmente associadas a calendários, uso ou rotinas previamente definidas. A manutenção preditiva, por sua vez, depende de dados, monitoramento e análise da condição do ativo para indicar

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

o momento mais adequado de intervenção, aproximando a gestão de uma lógica mais antecipatória e menos reativa (Molêda et al., 2023; Achouch et al., 2022).

Sob a ótica da maturidade gerencial, essas abordagens não devem ser vistas apenas como categorias isoladas, mas como estágios progressivos de sofisticação da gestão da manutenção. Enquanto a corretiva tende a operar sob urgência e maior incerteza, a preventiva introduz planejamento e regularidade, e a preditiva amplia a capacidade de decisão por meio da leitura analítica do comportamento do ativo e de seus sinais de degradação (Molêda et al., 2023; Ali et al., 2022).

2.3 Manutenção preventiva como base para estruturação de dados

Embora frequentemente tratada apenas como prática operacional, a manutenção preventiva também possui relevante função informacional. Ao registrar intervenções, periodicidades, ocorrências, custos e histórico de sistemas e subsistemas, ela produz uma base de dados estruturada que pode ser utilizada para análise comparativa, acompanhamento de recorrência e apoio à tomada de decisão. Nessa perspectiva, a manutenção preventiva deixa de ser apenas rotina de execução e passa a constituir base analítica para estudos mais avançados (Ali et al., 2022).

A literatura sobre manutenção baseada em condição e manutenção preditiva mostra que o uso de dados históricos, registros operacionais e variáveis de monitoramento é central para melhorar a programação das intervenções, reduzir custos e ampliar a disponibilidade dos ativos. Isso significa que a qualidade da base informacional influencia diretamente a capacidade de evolução da gestão, especialmente quando se busca sair de uma lógica predominantemente preventiva para uma lógica analítica e preditiva (Ali et al., 2022; Achouch et al., 2022).

Desse modo, a manutenção preventiva é tratada neste estudo como fonte primária de dados para modelagem. Sua importância não se restringe à prevenção de falhas, mas inclui a organização sistemática de registros que possibilitam identificar padrões, estimar custos futuros, comparar cenários e construir instrumentos de priorização e alerta. Esse entendimento é coerente com a ampliação contemporânea do papel da informação no campo da manutenção de ativos (Ali et al., 2022).

2.4 Planejamento da manutenção em horizonte ampliado

Em ativos complexos, diferentes sistemas apresentam frequências distintas de inspeção, reparo, substituição e reavaliação. Alguns elementos demandam intervenções recorrentes de curto prazo, enquanto outros entram em ciclos mais espaçados, porém de maior impacto técnico e econômico. Por essa razão, a literatura de planejamento e programação da manutenção destaca a necessidade de considerar horizontes temporais ampliados, especialmente em ativos sujeitos à degradação contínua e em contextos com múltiplos componentes ou grandes frotas de ativos (Schulze Spüntrup et al., 2022; Petchrompo et al., 2019).

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Nesse contexto, adota-se neste estudo o conceito de Plano de Manutenção Avançado (PMAV), entendido como uma estrutura ampliada de planejamento da manutenção em horizonte plurianual. Diferentemente de planos limitados ao curto prazo, essa abordagem permite incorporar atividades preventivas recorrentes e não recorrentes, inclusive aquelas associadas a sistemas com ciclos mais longos de intervenção, observando a manutenção em escala compatível com o comportamento do ativo ao longo do tempo. A relevância dessa lógica está em tornar comparáveis sistemas com dinâmicas preventivas distintas e em fortalecer a base histórica necessária para análise quantitativa e simulação. Essa interpretação é convergente com a literatura que trata a manutenção como parte do planejamento de ativos em longo prazo e em múltiplos níveis de decisão (Schulze Spüntrup et al., 2022; Petchrompo et al., 2019).

Assim, o PMAV é utilizado neste artigo como conceito metodológico de organização da manutenção preventiva em horizonte ampliado. Sua contribuição teórica reside em estruturar o planejamento de modo a acomodar sistemas, subsistemas e intervenções com diferentes ciclos, favorecendo a consolidação de uma base de dados passível de tratamento estatístico e simulação analítica.

2.5 Modelagem estatística aplicada à previsão de custos

A aplicação de métodos estatísticos ao campo da manutenção permite transformar registros históricos em informação prospectiva. Em vez de utilizar os dados apenas para documentação ou controle operacional, a modelagem quantitativa possibilita examinar relações entre variáveis e estimar o comportamento futuro de indicadores relevantes, entre eles o custo de manutenção. Nesse sentido, técnicas de regressão se mostram particularmente úteis quando se deseja relacionar uma variável quantitativa a um conjunto de fatores explicativos de natureza técnica, temporal e operacional (Plebankiewicz et al., 2022; Chen et al., 2023).

A literatura recente mostra que a previsão de custos de manutenção possui papel importante no ciclo de vida dos ativos e depende da identificação de fatores influentes, tais como características do sistema, frequência de intervenção, comportamento operacional e condições associadas ao planejamento. Em aplicações distintas, autores têm empregado modelos de regressão e métodos de previsão para estimar custos anuais de renovação ou custos de manutenção em sistemas complexos, reforçando a utilidade dessas abordagens em contextos de planejamento e decisão (Plebankiewicz et al., 2022; Chen et al., 2023).

No presente estudo, a modelagem estatística é tratada como elo entre a manutenção preventiva estruturada e a leitura prospectiva dos custos. A escolha por regressão linear múltipla decorre de sua capacidade de combinar interpretabilidade, comparabilidade entre cenários e aderência ao objetivo gerencial da pesquisa, permitindo relacionar custo previsto com variáveis como periodicidade, criticidade, frequência e horizonte de manutenção. Nessa

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

perspectiva, a estatística não aparece como fim em si mesma, mas como instrumento de apoio ao planejamento e à priorização.

2.6 Da manutenção preventiva à manutenção preditiva: maturidade informacional e simulação analítica

A manutenção preditiva depende de condições que vão além da simples adoção de tecnologias de monitoramento. Sua efetividade requer dados consistentes, infraestrutura de informação, continuidade histórica de registros e capacidade analítica para interpretar sinais, tendências e cenários. Por isso, a literatura recente enfatiza que a transição entre manutenção preventiva e preditiva envolve não apenas mudança técnica, mas também amadurecimento organizacional e informacional (Achouch et al., 2022; Rezae et al., 2024).

Nesse percurso, a simulação analítica exerce papel relevante. Ao traduzir resultados estatísticos em painéis, rankings, alertas e comparações entre cenários, ela amplia a utilidade prática dos modelos quantitativos e facilita sua incorporação pela gestão. A simulação não substitui a modelagem, mas a torna operacionalizável, permitindo que a base preventiva estruturada seja interpretada sob diferentes premissas e convertida em apoio mais direto à decisão. Isso é compatível com a literatura que associa manutenção preditiva a uso intensivo de dados, modelos e infraestrutura analítica voltada à antecipação de falhas e otimização das intervenções (Achouch et al., 2022; Ali et al., 2022).

Dessa forma, a passagem da manutenção preventiva para a manutenção preditiva pode ser entendida como trajetória de maturidade informacional. Quanto mais estruturados forem os registros e quanto maior for a capacidade de tratá-los estatisticamente, maior tende a ser a viabilidade de construir mecanismos de previsão, simulação e priorização. É precisamente nessa transição que se situa a proposta deste artigo, ao articular planejamento preventivo em horizonte ampliado, modelagem estatística e simulador analítico.

3. Metodologia

3.1 Natureza e delineamento da pesquisa

A presente pesquisa adota abordagem quantitativa, de caráter aplicado, com ênfase em modelagem estatística e simulação analítica voltadas à previsão de custos da manutenção preventiva de ativos. Do ponto de vista do delineamento, o estudo combina revisão conceitual, estruturação de base de dados, modelagem quantitativa e operacionalização computacional da proposta em ambiente de simulação.

O caráter aplicado da pesquisa decorre do fato de que o estudo não se limita à discussão teórica da manutenção preventiva e da previsão de custos, mas busca desenvolver uma proposta metodológica passível de uso em contextos reais de

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

gestão. Nesse sentido, a investigação articula três dimensões complementares: a organização da manutenção em horizonte ampliado, o tratamento estatístico dos dados e a tradução dos resultados em instrumentos de apoio à decisão.

Do ponto de vista procedimental, a pesquisa foi desenvolvida em etapas sucessivas: definição da estrutura conceitual do PMAV, organização das variáveis da base, seleção dos atributos relevantes para análise, aplicação de regressão linear múltipla, construção de cenários analíticos e desenvolvimento de um simulador funcional para materialização da proposta. O simulador foi concebido como desdobramento aplicado da metodologia, não como objeto central do artigo, mas como meio de demonstrar a viabilidade prática da operacionalização analítica.

3.2 Estrutura conceitual do PMAV

O estudo adota o Plano de Manutenção Avançado (PMAV) como conceito estruturante da organização da manutenção em horizonte ampliado. Neste artigo, o PMAV é compreendido como uma lógica de planejamento plurianual capaz de reunir, em uma mesma estrutura, atividades recorrentes e não recorrentes, distribuídas ao longo do tempo conforme a natureza dos sistemas, subsistemas e intervenções previstas.

Essa abordagem difere de planos de manutenção restritos ao curto prazo, pois busca incorporar tanto ações frequentes de inspeção e conservação quanto intervenções preventivas de menor recorrência e maior complexidade técnica. Com isso, torna-se possível observar o comportamento da manutenção em escala temporal mais compatível com a dinâmica real dos ativos, permitindo comparabilidade entre sistemas com ciclos distintos e maior robustez da base histórica.

No presente estudo, o PMAV não é tratado como ferramenta vinculada a uma única plataforma, mas como estrutura metodológica passível de aplicação em diferentes classes de ativos, tais como edificações, pontes, viadutos, túneis, contenções e outros ativos organizados por sistemas e subsistemas. Do mesmo modo, a proposta admite diferentes fontes de dados, desde que preservadas as variáveis mínimas necessárias ao tratamento analítico, podendo operar com registros provenientes de softwares de gestão, aplicativos especializados, bases institucionais ou planilhas estruturadas.

3.3 Base empírica e estudo de caso

Para fins de estudo de caso, a pesquisa utilizou uma base de dados estruturada a partir de registros compatíveis com a lógica do PMAV, tomando como referência prática um ambiente digital de gestão da manutenção utilizado desde 2017. Parte relevante da organização empírica dos dados decorre da experiência acumulada nesse contexto aplicado, especialmente no que se refere à classificação por sistemas e subsistemas, à definição de periodicidades, à associação entre criticidade e intervenção e ao registro de custos.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

No recorte adotado neste artigo, o estudo de caso foi desenvolvido com base em dados oriundos do ambiente VistoPred, utilizado aqui exclusivamente como referência empírica de manutenção digital e como fonte prática de estruturação inicial da base analisada. Essa escolha se justifica por sua aderência à lógica organizacional requerida pela pesquisa, especialmente no que diz respeito ao tratamento estruturado de informações de manutenção. Ressalta-se, contudo, que a proposta metodológica apresentada não depende dessa ferramenta específica, podendo ser replicada com dados provenientes de outros aplicativos, softwares ou planilhas, desde que esses dados sejam organizados de forma comparável.

A base utilizada no estudo foi tratada de forma estruturada e orientada à simulação, preservando os atributos necessários à análise estatística e à leitura prospectiva dos custos. A ênfase do trabalho, portanto, não recai sobre a plataforma de origem dos dados, mas sobre a possibilidade de transformar registros preventivos organizados em uma base quantitativa explorável, apta a sustentar previsão, comparação de cenários e apoio à decisão.

3.4 Estruturação e tratamento dos dados

A base analítica foi organizada por ativo, sistema, subsistema e horizonte temporal, reunindo variáveis de caráter técnico, operacional e econômico. Entre os atributos considerados destacam-se: tipo de ativo, sistema, subsistema, periodicidade da intervenção, frequência prevista, criticidade, custo-base, custo ajustado, horizonte anual do PMAV e status de alerta.

A criticidade foi tratada em escala ordinal, adotando-se convenção em que valores mais próximos de zero representam condições mais severas, incluindo situações de risco iminente, enquanto valores mais elevados indicam condições relativamente mais favoráveis. Essa escolha permitiu traduzir a leitura técnica da condição do sistema em variável comparável ao longo do modelo e da simulação.

O custo-base foi entendido como valor de referência associado à atividade ou ao subsistema, enquanto o custo ajustado representou valor já influenciado pelo cenário considerado. O horizonte temporal foi organizado em anos de planejamento, permitindo avaliar a evolução das variáveis ao longo do PMAV. Além disso, foram utilizados campos derivados, calculados em tempo de execução, como custo previsto, criticidade projetada, tipo de alerta e score de prioridade.

Para viabilizar a análise, a base passou por etapas de padronização e consistência, incluindo uniformização de campos, organização das categorias, associação entre sistemas e subsistemas e verificação da coerência entre periodicidade, frequência e horizonte anual. O tratamento dos dados teve como objetivo garantir comparabilidade entre registros e permitir sua utilização tanto na regressão quanto na construção do simulador analítico.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

3.5 Modelagem estatística

A previsão de custos foi operacionalizada por meio de regressão linear múltipla, escolhida em razão de sua interpretabilidade e de sua adequação ao objetivo do estudo, que consiste em estimar o comportamento do custo de manutenção a partir de um conjunto de variáveis explicativas. A formulação conceitual do modelo pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{Custo}_i = \beta_0 + \beta_1(\text{Periodicidade}_i) + \beta_2(\text{Criticidade}_i) + \beta_3(\text{Frequência}_i) + \beta_4(\text{Horizonte}_i) + \varepsilon_i$$

em que:

- Custo_i representa o custo previsto para o registro i ;
- β_0 corresponde ao intercepto;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ representam os coeficientes associados às variáveis explicativas;
- ε_i corresponde ao termo de erro.

A modelagem procurou capturar a influência conjunta da periodicidade, da criticidade, da frequência prevista e do horizonte do PMAV sobre o custo esperado. A escolha dessas variáveis decorre de sua relevância prática na organização da manutenção preventiva e de sua aderência à lógica conceitual do problema investigado.

Além da estimativa dos coeficientes, foram observadas métricas sintéticas de ajuste, como coeficiente de determinação e erro médio, utilizadas para avaliar a consistência interna da modelagem no contexto do estudo. O objetivo não foi construir um modelo universal ou definitivo, mas desenvolver uma formulação estatística interpretável, capaz de traduzir a base preventiva estruturada em uma leitura quantitativa prospectiva de custos.

3.6 Simulação analítica e construção de cenários

A etapa de simulação analítica foi desenvolvida com o propósito de transformar os resultados do modelo estatístico em instrumentos mais diretamente utilizáveis pela gestão. Para isso, foram construídos cenários analíticos capazes de alterar parâmetros relevantes da manutenção, permitindo observar o comportamento do custo previsto e da criticidade projetada sob diferentes premissas.

Foram considerados, no mínimo, os seguintes cenários: Base, Conservador, Otimista, Ambiente agressivo, Restrição orçamentária e Envelhecimento acelerado. Cada cenário atua sobre a lógica da base ao influenciar atributos como custo ajustado, frequência esperada, deterioração e criticidade projetada. O cenário Base representa a referência sem alterações externas relevantes, enquanto

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

os demais introduzem hipóteses de maior ou menor severidade operacional e econômica.

Essa estrutura de cenários permite comparar o comportamento do sistema sob diferentes condições, ampliando o potencial da metodologia como apoio ao planejamento. Em vez de limitar a análise a um único conjunto de valores, a simulação oferece uma leitura mais ampla da sensibilidade dos custos e da concentração dos riscos, contribuindo para a priorização das intervenções.

3.7 Operacionalização em simulador analítico

Como desdobramento aplicado da proposta metodológica, foi desenvolvido um simulador analítico funcional, concebido para operacionalizar os dados estruturados do PMAV, os resultados da regressão e os cenários definidos na pesquisa. O simulador foi implementado em ambiente computacional voltado à visualização interativa de informações, permitindo integrar filtros, indicadores, gráficos, rankings, alertas e sínteses executivas em uma mesma interface.



Figura 4- Visão geral do simulador analítico desenvolvido para apoio ao planejamento da manutenção preventiva de ativos.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

A aplicação foi estruturada de modo a apresentar:

- indicadores sintéticos de custo previsto, custo ajustado e quantidade de alertas;
- comparação entre cenários;
- distribuição do custo por sistema;
- comparação entre custo ajustado e custo previsto;
- distribuição de alertas por sistema;
- ranking de sistemas prioritários;
- tabela analítica detalhada;
- resumo executivo automático.

Além disso, foram incorporadas duas classes principais de alerta: alerta imediato, associado a situações de criticidade zero, e alerta preditivo, vinculado à tendência de deterioração em direção a níveis mais severos de criticidade. Dessa forma, o simulador materializa a transição entre leitura estatística e apoio operacional à decisão, demonstrando como a base preventiva estruturada pode ser convertida em informação gerencial aplicável.

Importa ressaltar que o simulador não constitui o foco central do artigo, mas sim uma prova de conceito da operacionalização da proposta metodológica. Seu papel, no contexto do estudo, é evidenciar a viabilidade prática da articulação entre planejamento preventivo em horizonte ampliado, modelagem estatística e simulação analítica.

A versão funcional do simulador desenvolvida para esta pesquisa encontra-se disponível para acesso em ambiente web no seguinte endereço:

<https://simulador-pmav-vistopred.streamlit.app>

3.8 Limitações metodológicas

Embora a proposta apresentada possua potencial de aplicação em diferentes contextos, algumas limitações devem ser reconhecidas. A primeira diz respeito à dependência de dados previamente organizados por sistemas, subsistemas, periodicidade, criticidade e custos, o que exige um nível mínimo de estruturação e consistência dos registros. Em contextos onde os dados ainda sejam fragmentados, incompletos ou predominantemente textuais, a operacionalização do método pode demandar etapa prévia de saneamento e padronização.

A segunda limitação refere-se à heterogeneidade dos ativos. Diferentes classes de ativos podem apresentar estruturas funcionais próprias, exigindo adaptações na composição dos sistemas, na definição dos subsistemas e na interpretação da

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

criticidade. Por essa razão, a proposta é genérica em sua lógica, mas depende de parametrização contextual para aplicação mais precisa a cada tipo de ativo.

A terceira limitação decorre do caráter aplicado e demonstrativo do estudo de caso. Embora o simulador funcional tenha sido desenvolvido como prova de conceito, a integração nativa da metodologia a ambientes operacionais reais, com atualização contínua de dados, ainda constitui etapa futura. Ainda assim, a pesquisa demonstra que a combinação entre registros estruturados, modelagem estatística e simulação analítica é tecnicamente viável e metodologicamente promissora para ampliar a capacidade de planejamento da manutenção preventiva.

4. Aplicação da proposta e análise dos resultados

4.1 Recorte aplicado e organização da análise

A aplicação da proposta metodológica foi realizada em ambiente de simulação analítica, tomando como recorte o ativo Edifício Corporativo Atlântico, classificado como edificação, com horizonte de análise correspondente aos anos 1 a 10 do PMAV. Embora o simulador opere com múltiplos cenários analíticos, optou-se por aprofundar, no corpo do artigo, a comparação entre os cenários Base e Ambiente agressivo, por se tratar de um contraste suficientemente representativo entre condição de referência e condição de severidade ampliada. Os relatórios completos desses cenários foram exportados diretamente pelo simulador em formato PDF, o que também evidencia sua capacidade de documentação analítica.

Nos dois cenários analisados, o recorte permaneceu estável em termos estruturais: 15 sistemas avaliados, 1 ativo, 300 registros, além da manutenção do sistema Estrutural como aquele de maior concentração de criticidade e do sistema Eletromecânico como principal concentrador de custo previsto. Essa estabilidade é importante porque permite observar com maior nitidez o impacto do cenário sobre o comportamento econômico e analítico da base, sem que a comparação seja distorcida por mudanças de escopo ou de composição do ativo analisado.

4.2 Resultados do cenário Base

No cenário Base, o relatório aponta custo total previsto de R\$ 12.695.387 e custo total ajustado de R\$ 11.429.442, distribuídos em 15 sistemas de 1 ativo. O resumo executivo também informa a presença de 10 alertas imediatos, 50 alertas preditivos, sistema mais crítico igual a Estrutural e maior custo previsto em Eletromecânico, com priorização principal em Eletromecânico, Incêndio e Estrutural.

No ranking de sistemas prioritários, o cenário Base confirma a liderança do sistema Eletromecânico com custo previsto de R\$ 3.402.825 e score 0,81, seguido por Incêndio com R\$ 2.418.871 e score 0,67, e por Estrutural com R\$ 219.102 e score 0,52. Na página seguinte do relatório, o quadro do modelo estatístico apresenta os coeficientes $\beta_0 = -38.166,03$, $\beta_1 = 789,15$, $\beta_2 = -248,28$, $\beta_3 = 50.381,41$ e $\beta_4 = 870,29$, com $R^2 = 70,8\%$, $RMSE = R\$ 27.754,820$ observações e motor statsmodels.

Relatório de Simulação

Cenário: Base

Gerado em 07/06/2026 04:16

Filtros aplicados: Ativo: Edifício Corporativo Atlântico · Tipo: Edificação · Horizonte: anos 1–10

Resumo executivo

No cenário **Base**, o custo total previsto pelo modelo é de **R\$ 12.695.387** (custo ajustado de referência: R\$ 11.429.442), distribuído em **15 sistema(s)** de **1 ativo(s)**. A maior concentração de criticidade está no sistema **Estrutural**, e o maior custo previsto no sistema **Eletromecânico**. Sistemas prioritários: **Eletromecânico, Incêndio, Estrutural**. Há **10 alerta(s) imediato(s)** (criticidade 0): recomenda-se **intervenção corretiva prioritária** e **inspeção especializada** antes da continuidade operacional.

Indicadores (KPIs)

Indicador	Valor
Custo total previsto	R\$ 12.695.387
Custo total ajustado	R\$ 11.429.442
Sistemas avaliados	15
Ativos	1
Registros	300
Alertas imediatos	10
Alertas preditivos	50
Sistema mais crítico	Estrutural
Maior custo previsto	Eletromecânico

Figura 5 - Relatório de simulação do cenário Base para o ativo Edifício Corporativo Atlântico.

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Comparação entre os cenários Base e Ambiente agressivo

No cenário Ambiente agressivo, o custo total previsto elevou-se para R\$ 16.050.954, enquanto o custo total ajustado passou para R\$ 14.425.399. Em comparação ao cenário Base, isso representa aumento aproximado de 26,4% no custo previsto e de 26,2% no custo ajustado, indicando que a intensificação das condições de exposição do ativo desloca de forma relevante o comportamento econômico da manutenção preventiva.

Apesar desse aumento expressivo, a estrutura geral da leitura analítica permaneceu estável: o sistema Estrutural continuou sendo o de maior concentração de criticidade, o sistema Eletromecânico permaneceu como maior concentrador de custo previsto, e os sistemas prioritários continuaram sendo Eletromecânico, Incêndio e Estrutural. Também se mantiveram 10 alertas imediatos e 50 alertas preditivos, o que sugere que o cenário agressivo não alterou a lógica básica de priorização, mas ampliou a pressão financeira e a sensibilidade do ativo à manutenção ao longo do horizonte do PMAV.

A leitura da tabela “Modelo estatístico” reforça esse comportamento. No cenário agressivo, os coeficientes passaram para $\beta_0 = -50.625,99$, $\beta_1 = 998,49$, $\beta_2 = -316,13$, $\beta_3 = 63.688,98$ e $\beta_4 = 1.531,75$, com $R^2 = 70,5\%$ e $RMSE = R\$ 35.390$. Em relação ao cenário Base, houve aumento dos coeficientes associados à periodicidade, à frequência e, de forma mais intensa, ao horizonte, indicando que,

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

em ambiente mais severo, o custo previsto se torna ainda mais sensível à recorrência das intervenções e à progressão temporal do plano.

VISTOPRED · SIMULADOR ANALÍTICO PMAV

Relatório de Simulação

Cenário: Ambiente agressivo

Gerado em 07/06/2026 04:16

Filtros aplicados: Ativo: Edifício Corporativo Atlântico · Tipo: Edificação · Horizonte: anos 1–10

Resumo executivo

No cenário **Ambiente agressivo**, o custo total previsto pelo modelo é de **R\$ 16.050.954** (custo ajustado de referência: R\$ 14.425.399), distribuído em **15 sistema(s)** de **1 ativo(s)**. A maior concentração de criticidade está no sistema **Estrutural**, e o maior custo previsto no sistema **Eletromecânico**. Sistemas prioritários: **Eletromecânico, Incêndio, Estrutural**. Há **10 alerta(s) imediato(s)** (criticidade 0): recomenda-se **intervenção corretiva prioritária** e inspeção especializada antes da continuidade operacional.

Indicadores (KPIs)

Indicador	Valor
Custo total previsto	R\$ 16.050.954
Custo total ajustado	R\$ 14.425.399
Sistemas avaliados	15
Ativos	1
Registros	300
Alertas imediatos	10
Alertas preditivos	50
Sistema mais crítico	Estrutural
Maior custo previsto	Eletromecânico

Figura 6 - Relatório de simulação do cenário Ambiente agressivo para o ativo Edifício Corporativo Atlântico.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 7 - Comparação entre os cenários Base e Ambiente agressivo, com destaque para custo total previsto, custo total ajustado e estabilidade da hierarquia de priorização.

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Leitura por sistema, ranking de prioridade e alertas

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

A leitura por sistema mostra que, nos dois cenários, os maiores custos previstos permanecem concentrados em Eletromecânico, Incêndio, Climatização e Drenagem. No cenário Base, os custos previstos desses sistemas foram, respectivamente, R\$ 3.402.825, R\$ 2.418.871, R\$ 1.957.441 e R\$ 968.522. No cenário agressivo, esses valores passaram para R\$ 4.301.517, R\$ 3.057.692, R\$ 2.474.389 e R\$ 1.224.241, o que confirma a ampliação do peso econômico dos sistemas já mais relevantes no cenário de referência.

Os alertas também ajudam a dar materialidade ao resultado. Nos dois relatórios, o conjunto “top 15” apresenta repetidamente alertas Imediatos no sistema Incêndio, Hidrantes, com recomendação de “intervenção corretiva imediata e inspeção especializada antes da próxima operação”. Ao mesmo tempo, aparecem alertas Preditivos em sistemas como Estrutural, Lajes e Eletromecânico, Escadas rolantes, com recomendação de antecipação de manutenção preventiva e reavaliação da periodicidade do PMAV. Isso mostra que o simulador não atua apenas na camada agregada dos custos, mas também produz leitura operacional voltada à priorização e à ação.



Figura 8 - Ranking de sistemas prioritários e alertas operacionais dos cenários analisados.

Fonte: Elaboração própria.

4.5 Relatório em PDF, síntese executiva e aplicabilidade

Um aspecto particularmente relevante da aplicação foi a capacidade do simulador de gerar relatórios de simulação em PDF, consolidando cenário, filtros aplicados, resumo executivo, indicadores, ranking de sistemas prioritários, alertas e quadro do modelo estatístico. Isso reforça o caráter aplicado da ferramenta, pois ela não apenas oferece navegação interativa em ambiente web, mas também produz material exportável, útil para documentação, discussão técnica e registro de apoio ao planejamento.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que o simulador constitui uma ferramenta consistente de apoio ao planejamento técnico e financeiro da manutenção preventiva. A comparação entre cenários, a leitura por sistema, a identificação de alertas, a síntese executiva e a exportação documental ampliam a capacidade de análise do comportamento do ativo no horizonte do PMAV. Ainda assim, a ferramenta não deve ser utilizada de forma automática ou isolada: a interpretação dos resultados, das premissas e da coerência dos cenários simulados deve ser sempre submetida à avaliação de profissional tecnicamente habilitado, capaz de confrontar as saídas do simulador com a realidade do ativo e com o contexto concreto da manutenção.

4.6 Síntese dos achados

Os resultados obtidos confirmam que a combinação entre base preventiva estruturada, regressão linear múltipla, comparação de cenários e operacionalização em simulador analítico produz uma leitura útil e coerente para apoio à gestão. No recorte do Edifício Corporativo Atlântico, a passagem do cenário Base para o cenário Ambiente agressivo elevou de forma significativa os custos previstos e ajustados, sem alterar substancialmente a hierarquia dos sistemas prioritários, o que revela sensibilidade do modelo ao contexto de exposição e, ao mesmo tempo, estabilidade da lógica de priorização.

Em síntese, o simulador mostrou-se eficaz como ferramenta de apoio ao planejamento, à comparação entre cenários e à comunicação técnica dos resultados.

5. Discussão e conclusões

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa indicam que a proposta desenvolvida apresenta consistência tanto do ponto de vista metodológico quanto do ponto de vista aplicado. A articulação entre base estruturada de manutenção preventiva, regressão linear múltipla, simulação de cenários e operacionalização em simulador analítico permitiu converter registros organizados de manutenção em uma leitura integrada de custos, criticidade, alertas e priorização. Esse encadeamento constitui o núcleo da contribuição do trabalho, ao demonstrar que a manutenção preventiva pode ser tratada não apenas como rotina programada de intervenção, mas também como base quantitativa para interpretação prospectiva e apoio à decisão.

A comparação entre os cenários analisados reforça essa leitura. No recorte do ativo estudado, a passagem do cenário Base para o cenário Ambiente agressivo evidenciou aumento expressivo dos custos previstos e ajustados, sem ruptura da hierarquia geral dos sistemas prioritários. Esse comportamento é relevante porque demonstra, ao mesmo tempo, sensibilidade da proposta às condições de exposição do ativo e coerência interna da estrutura analítica. Em termos práticos, isso significa que o simulador não apenas recalcula valores sob novas premissas,

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

mas oferece uma leitura estruturada do impacto dos cenários sobre o planejamento da manutenção.

Do ponto de vista científico, a originalidade do trabalho não está na existência isolada de uma interface computacional, mas na integração metodológica proposta. O estudo reúne uma lógica de planejamento da manutenção em horizonte ampliado, representada pelo PMAV, com modelagem estatística interpretável e comparação de cenários operacionalizada em ambiente analítico. Essa combinação aproxima campos que frequentemente aparecem dissociados na literatura e na prática, como manutenção preventiva, manutenção preditiva, gestão de ativos, confiabilidade, custos e apoio à decisão. Ao estabelecer esse arranjo, o artigo contribui para reduzir a distância entre formulação conceitual e aplicação efetiva.

Do ponto de vista aplicado, o simulador demonstrou potencial como ferramenta de apoio ao planejamento técnico e financeiro da manutenção preventiva. A possibilidade de comparar cenários, identificar sistemas prioritários, visualizar alertas imediatos e preditivos, rastrear registros em tabela analítica e consolidar relatórios amplia significativamente a capacidade de leitura dos dados. Ao mesmo tempo, os resultados também deixam claro que a ferramenta não deve ser compreendida como mecanismo autônomo de decisão. Sua utilidade depende da qualidade da base de entrada, da coerência das premissas adotadas e, sobretudo, da interpretação crítica por profissional tecnicamente capacitado, apto a confrontar os resultados simulados com as condições reais do ativo.

A pesquisa apresenta, contudo, algumas limitações que precisam ser reconhecidas. A primeira delas está associada à dependência de bases minimamente estruturadas, contendo variáveis consistentes de sistema, subsistema, criticidade, periodicidade, frequência e custos. Em contextos nos quais os dados ainda estejam dispersos, incompletos ou pouco padronizados, a aplicação do método exige esforço prévio de organização e saneamento. A segunda limitação decorre do fato de que o estudo foi aprofundado a partir de um recorte específico de ativo e de dois cenários principais no corpo do artigo, ainda que a ferramenta permita análise mais abrangente. A terceira limitação está relacionada ao modelo estatístico adotado: embora a regressão linear múltipla tenha se mostrado adequada ao objetivo de transparência, interpretabilidade e apoio ao planejamento, outras abordagens poderão futuramente ampliar o tratamento de comportamentos não lineares e de dinâmicas mais complexas de degradação.

Como desdobramentos futuros, destacam-se a ampliação da aplicação para diferentes classes de ativos, a integração com bases operacionais reais, o refinamento dos modelos preditivos, a incorporação de diagnósticos estatísticos adicionais e o aprofundamento da exportação documental dos resultados. Também se mostra promissora a evolução da ferramenta em direção a leituras mais próximas da manutenção preditiva em sentido estrito, com uso progressivo de

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

dados históricos, regras de deterioração e mecanismos analíticos mais sofisticados.

Os achados deste estudo permitem concluir que a proposta apresentada é tecnicamente viável, metodologicamente consistente e aplicada de forma promissora ao problema da previsão de custos e da priorização da manutenção preventiva de ativos. O trabalho demonstra que bases estruturadas de manutenção podem sustentar não apenas programação, mas também modelagem, simulação e apoio à decisão em horizonte ampliado. Nesse contexto, o simulador analítico PMAV se afirma como uma ferramenta relevante de suporte ao planejamento técnico e financeiro, desde que utilizado com mediação crítica e interpretação especializada.

Agradecimentos

O autor agradece ao professor Paulo Afonso Lopes da Silva, Ph.D., pelas orientações ao longo da disciplina, e à equipe da VistoPred, pelo acesso aos relatórios e aos dados de manutenção utilizados no estudo.

Glossário

Alerta imediato

Indicação de criticidade máxima ou risco iminente, com necessidade de ação prioritária.

Alerta preditivo

Sinal de tendência de deterioração que sugere antecipação da manutenção preventiva.

Ativo

Elemento físico objeto da gestão da manutenção, como edificação, ponte ou viaduto.

Base estruturada de manutenção

Conjunto organizado de dados de manutenção preparado para análise e comparação.

Cenário analítico

Conjunto de premissas usado para simular diferentes comportamentos da manutenção.

Cenário Base

Cenário de referência, sem agravamentos adicionais.

Condição de exposição

Contexto ambiental ou operacional que influencia a deterioração do ativo.

Criticidade

Indicador do grau de severidade ou risco de um sistema ou subsistema.

Criticidade projetada

Valor estimado da criticidade ao longo do horizonte analisado.

Custo ajustado

Valor do custo após aplicação das premissas de um cenário.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Custo-base

Valor inicial de referência do custo de manutenção.

Custo previsto

Valor estimado pelo modelo estatístico.

Dashboard analítico

Painel visual com indicadores, gráficos, alertas e tabelas.

Dados mockados

Dados simulados usados para teste, demonstração ou prova de conceito.

Frequência

Número esperado de intervenções em determinado período.

Gestão de ativos

Prática de planejamento, operação, manutenção e avaliação de ativos ao longo do tempo.

Horizonte de manutenção

Período considerado para planejamento e análise da manutenção.

Horizonte plurianual

Período ampliado de análise, superior ao curto prazo.

Indicadores sintéticos (KPIs)

Medidas resumidas de desempenho, custo, criticidade e alerta.

Interface analítica

Ambiente visual usado para explorar resultados e comparar cenários.

Manutenção corretiva

Intervenção feita após a ocorrência de falha.

Manutenção preditiva

Manutenção orientada por dados, monitoramento e condição do ativo.

Manutenção preventiva

Intervenção planejada para reduzir falhas e aumentar previsibilidade.

Modelagem estatística

Uso de métodos quantitativos para analisar e prever comportamentos.

Modelo estatístico

Formulação matemática que relaciona custos a variáveis explicativas.

OLS (Ordinary Least Squares)

Método de estimação por mínimos quadrados ordinários.

Painel de alertas

Seção do simulador dedicada à visualização dos alertas gerados.

Periodicidade

Intervalo programado entre intervenções preventivas.

Planejamento técnico e financeiro

Organização da manutenção considerando simultaneamente critérios técnicos e econômicos.

PMAV (Plano de Manutenção Avançado)

Estrutura de planejamento da manutenção em horizonte ampliado.

Priorização

Ordenação de sistemas segundo custo, criticidade e alertas.

Prova de conceito

Implementação funcional usada para demonstrar viabilidade prática.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

R² (Coeficiente de determinação)

Medida da capacidade explicativa do modelo.

Ranking de sistemas prioritários

Classificação dos sistemas segundo sua relevância para intervenção.

Regressão linear múltipla

Técnica estatística que estima uma variável a partir de várias explicativas.

Relatório de simulação

Documento com os resultados de um cenário analisado.

RMSE (Root Mean Squared Error)

Medida do erro médio de previsão do modelo.

Score de prioridade

Indicador composto usado para ordenar sistemas ou subsistemas.

Simulação analítica

Aplicação de cenários sobre a base para observar mudanças em custo e criticidade.

Simulador analítico PMAV

Ferramenta que integra modelo estatístico, cenários, gráficos, alertas e relatórios.

Sistema

Agrupamento funcional de componentes do ativo.

Subsistema

Desdobramento interno de um sistema.

VistoPred

Ambiente digital usado como referência de estruturação da base do estudo de caso. <https://vistopred.com.br>

Declaração de uso de IA

O autor declara ter utilizado ferramentas de inteligência artificial generativa, incluindo o ChatGPT (OpenAI) e o Claude Code (Anthropic), como instrumentos de apoio em diferentes etapas do desenvolvimento deste trabalho. O uso dessas ferramentas ocorreu em atividades de revisão textual, organização discursiva, clareza expositiva e ajustes gramaticais do manuscrito, bem como no apoio à implementação computacional de partes do projeto.

No desenvolvimento do simulador analítico e da apresentação em HTML, o Claude Code, em ambiente Visual Studio Code, foi utilizado como apoio à escrita, organização e refinamento de trechos de código em Python, HTML, CSS e JavaScript. Esse uso esteve relacionado sobretudo à estruturação de arquivos, apoio à linguagem de programação, ajustes de interface e aceleração do processo de desenvolvimento. O ChatGPT também foi utilizado como ferramenta de apoio à redação, revisão, organização técnica do texto e discussão de alternativas de formulação metodológica e expositiva.

Ressalta-se, entretanto, que a concepção do problema de pesquisa, a definição da proposta metodológica, a lógica central do modelo analítico, a formulação do algoritmo principal, a definição dos cenários de simulação, a interpretação dos

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

resultados e as conclusões do estudo foram conduzidas pelo autor. As ferramentas de IA foram empregadas como suporte instrumental à escrita e à implementação, não como substitutas da autoria intelectual, da análise crítica ou da responsabilidade científica pelo conteúdo apresentado.

Todo o material produzido com apoio dessas ferramentas foi posteriormente revisado, ajustado e validado pelo autor, que assume integral responsabilidade pelo manuscrito, pelo código desenvolvido e pelas interpretações técnicas e científicas apresentadas neste trabalho.

Declaração de interesse

O autor declara possuir vínculo societário com a plataforma VistoPred, utilizada neste estudo apenas como referência para estruturação parcial da base de dados do estudo de caso e para contextualização prática da lógica de manutenção digital adotada. Tal vínculo não altera o caráter metodológico da proposta, que permanece genérica, transferível e aplicável a dados provenientes de outras fontes, como softwares de gestão, bases institucionais ou planilhas estruturadas.

Referências

- ACHOUCH, M.; DIMITROVA, M.; ZIANE, K.; SATTARPANAH KARGANROUDI, S.; DHOUIB, R.; IBRAHIM, H.; ADDA, M. On predictive maintenance in Industry 4.0: overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, v. 12, n. 16, art. 8081, 2022.
- ALI, A.; ABDELHADI, A. Condition-based monitoring and maintenance: state of the art review. *Applied Sciences*, v. 12, n. 2, art. 688, 2022.
- CHEN, X.; CHU, S.; ZHANG, G.; CHEN, X.; HUANG, J.; YI, M. Prediction of the maintenance cost of general aviation aircraft based on engineering method. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 95, n. 6, p. 932–938, 2023.
- LENS. Scholarly Search & Analysis. [S.l.]: Lens, [s.d.]. Disponível em: <https://about.lens.org/scholarly-search-analysis/>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- MOLĘDA, M.; MAŁYSIAK-MROZEK, B.; DING, W.; SUNDERAM, V.; MROZEK, D. From corrective to predictive maintenance: a review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, v. 23, n. 13, art. 5970, 2023.
- PETCHROMPO, S.; PARLIKAD, A. K. A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 181, p. 181–201, 2019.
- PLEBANKIEWICZ, E.; GRĄCKI, J. Analysis and prediction of universities' buildings renovation costs using a regression model. *Applied Sciences*, v. 13, n. 1, art. 401, 2023.



MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

REZAE, R. et al. Predictive maintenance through data-driven decision making. Chalmers University of Technology, 2024.

SCHULZE SPÜNTRUP, F.; DALLE AVE, G.; IMSLAND, L.; HARJUNKOSKI, I. Integration of maintenance scheduling and planning for large-scale asset fleets. *Optimization and Engineering*, v. 23, p. 1255–1287, 2022.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, p. 523–538, 2010.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Apêndice A – Relatórios dos cenários simulados

Este apêndice apresenta os relatórios exportados pelo simulador analítico PMAV para os cenários utilizados na análise do artigo. Os documentos a seguir complementam a discussão desenvolvida no texto principal e registram os resultados das simulações realizadas.

Cenário Base

VISTOPRED - SIMULADOR ANALÍTICO PMAV

Relatório de Simulação

Cenário: Base

Gerado em 07/06/2026 04:16

Filtros aplicados: Ativo: Edifício Corporativo Atlântico · Tipo: Edificação · Horizonte: anos 1–10

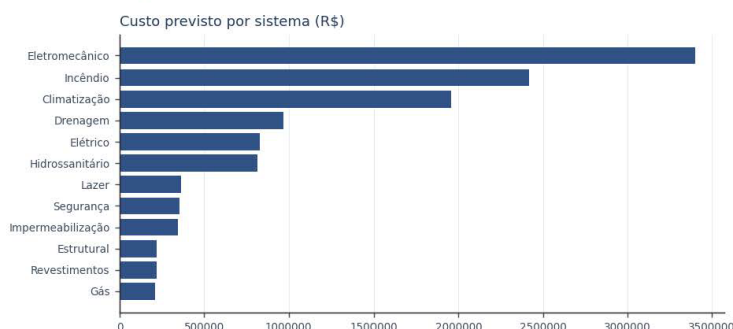
Resumo executivo

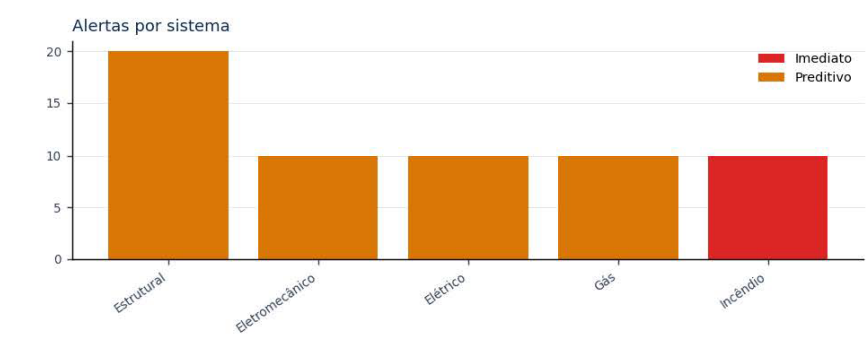
No cenário **Base**, o custo total previsto pelo modelo é de **R\$ 12.695.387** (custo ajustado de referência: R\$ 11.429.442), distribuído em **15 sistema(s)** de **1 ativo(s)**. A maior concentração de criticidade está no sistema **Estrutural**, e o maior custo previsto no sistema **Eletromecânico**. Sistemas prioritários: **Eletromecânico, Incêndio, Estrutural**. Há **10 alerta(s) imediato(s)** (criticidade 0): recomenda-se **intervenção corretiva prioritária** e inspeção especializada antes da continuidade operacional.

Indicadores (KPIs)

Indicador	Valor
Custo total previsto	R\$ 12.695.387
Custo total ajustado	R\$ 11.429.442
Sistemas avaliados	15
Ativos	1
Registros	300
Alertas imediatos	10
Alertas preditivos	50
Sistema mais crítico	Estrutural
Maior custo previsto	Eletromecânico

Custo e alertas por sistema





Ranking de sistemas prioritários

Sistema	Custo previsto	Crit. média	Alertas	Score
Eletromecânico	R\$ 3.402.825	1,34	10	0,81
Incêndio	R\$ 2.418.871	1,41	10	0,67
Estrutural	R\$ 219.102	0,83	20	0,52
Climatização	R\$ 1.957.441	2,33	0	0,45
Elétrico	R\$ 827.811	1,86	10	0,43
Gás	R\$ 207.570	1,37	10	0,38
Hidrossanitário	R\$ 816.278	2,37	0	0,29
SPDA	R\$ 205.087	1,85	0	0,25
Drenagem	R\$ 968.522	3,35	0	0,24
Impermeabilização	R\$ 342.121	2,81	0	0,20
Revestimentos	R\$ 218.221	2,82	0	0,18
CoBERTura	R\$ 200.121	2,84	0	0,18

Alertas (top 15)

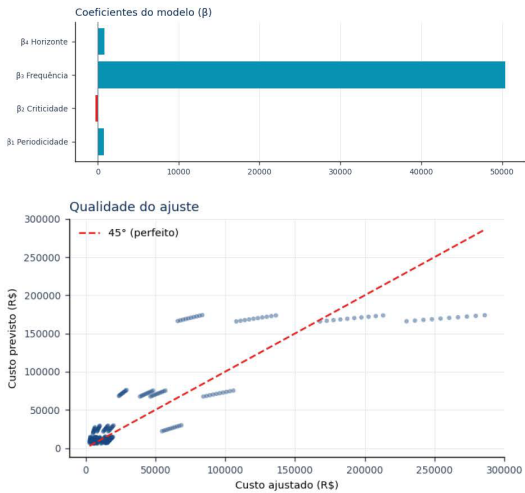
Tipo	Sistema · Subsistema	Ativo	Ano	Ação sugerida
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico1		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico2		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico3		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico4		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico5		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico6		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico7		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico8		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico9		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico10		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico10		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidad
Preditivo	Eletromecânico · Escadas rolantes	Edifício Corporativo Atlântico10		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidad



Tipo	Sistema · Subsistema	Ativo	Ano	Ação sugerida
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico9		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade
Preditivo	Eletromecânico · Escadas rolantes	Edifício Corporativo Atlântico9		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico8		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade

Modelo estatístico

Modelo	Valor
Intercepto (b0)	-38.166,03
Periodicidade (b1)	789,15
Criticidade (b2)	-248,28
Frequência (b3)	50.381,41
Horizonte (b4)	870,29
R²	70,8%
RMSE	R\$ 27.754
Observações (n)	820
Motor	statsmodels



Dados simulados para fins analíticos - modelo de regressão linear múltipla (OLS).

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

Cenário Ambiente agressivo

VISTOPRED - SIMULADOR ANALÍTICO PMAV

Relatório de Simulação

Cenário: Ambiente agressivo

Gerado em 07/06/2026 04:16

Filtros aplicados: Ativo: Edifício Corporativo Atlântico - Tipo: Edificação - Horizonte: anos 1-10

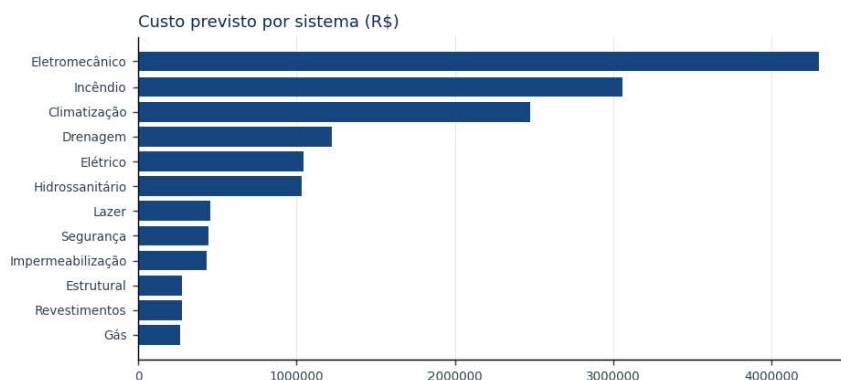
Resumo executivo

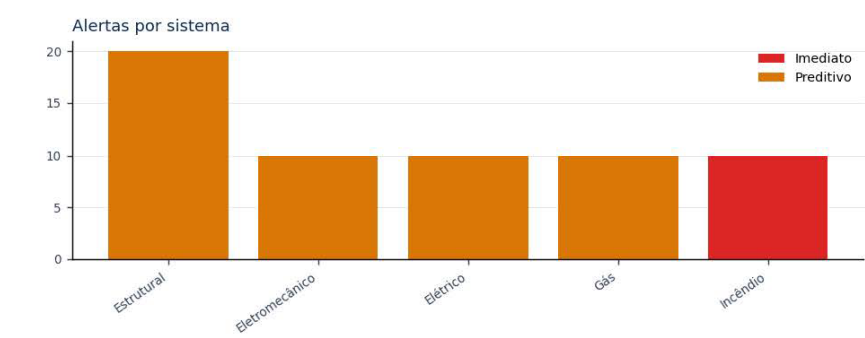
No cenário **Ambiente agressivo**, o custo total previsto pelo modelo é de **R\$ 16.050.954** (custo ajustado de referência: R\$ 14.425.399), distribuído em **15 sistema(s)** de **1 ativo(s)**. A maior concentração de criticidade está no sistema **Estrutural**, e o maior custo previsto no sistema **Eletromecânico**. Sistemas prioritários: **Eletromecânico, Incêndio, Estrutural**. Há **10 alerta(s) imediato(s)** (criticidade 0): recomenda-se **intervenção corretiva prioritária** e inspeção especializada antes da continuidade operacional.

Indicadores (KPIs)

Indicador	Valor
Custo total previsto	R\$ 16.050.954
Custo total ajustado	R\$ 14.425.399
Sistemas avaliados	15
Ativos	1
Registros	300
Alertas imediatos	10
Alertas preditivos	50
Sistema mais crítico	Estrutural
Maior custo previsto	Eletromecânico

Custo e alertas por sistema





Ranking de sistemas prioritários

Sistema	Custo previsto	Crit. média	Alertas	Score
Eletromecânico	R\$ 4.301.517	0,90	10	0,84
Incêndio	R\$ 3.057.692	1,19	10	0,69
Estrutural	R\$ 277.360	0,38	20	0,55
Climatização	R\$ 2.474.389	1,88	0	0,48
Elétrico	R\$ 1.046.645	1,42	10	0,46
Gás	R\$ 262.652	0,93	10	0,41
Hidrossanitário	R\$ 1.031.937	1,93	0	0,32
SPDA	R\$ 259.491	1,41	0	0,28
Drenagem	R\$ 1.224.241	2,90	0	0,28
Impermeabilização	R\$ 433.103	2,36	0	0,23
Revestimentos	R\$ 276.262	2,37	0	0,21
Coertura	R\$ 253.168	2,39	0	0,21

Alertas (top 15)

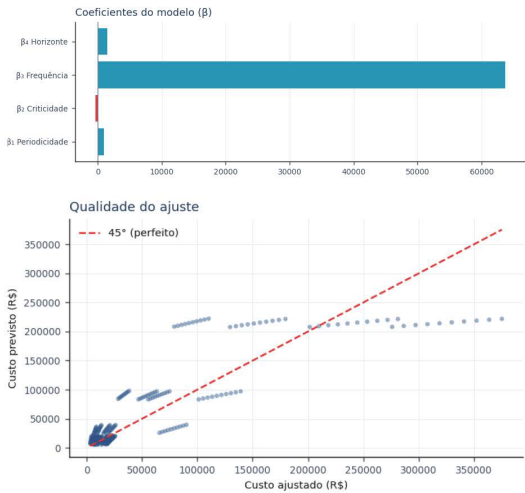
Tipo	Sistema · Subsistema	Ativo	Ano	Ação sugerida
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico1		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico2		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico3		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico4		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico5		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico6		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico7		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico8		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico9		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Imediato	Incêndio · Hidrantes	Edifício Corporativo Atlântico10		Intervenção corretiva imediata e inspeção especializada ant
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico10		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidad
Preditivo	Eletromecânico · Escadas rolantes	Edifício Corporativo Atlântico10		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidad



Tipo	Sistema · Subsistema	Ativo	Ano	Ação sugerida
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico9		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade
Preditivo	Eletromecânico · Escadas rolantes	Edifício Corporativo Atlântico9		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade
Preditivo	Estrutural · Lajes	Edifício Corporativo Atlântico8		Antecipar manutenção preventiva e reavaliar a periodicidade

Modelo estatístico

Modelo	Valor
Intercepto (b0)	-50.625,99
Periodicidade (b1)	998,49
Criticidade (b2)	-316,13
Frequência (b3)	63.688,98
Horizonte (b4)	1.531,75
R²	70,5%
RMSE	R\$ 35.390
Observações (n)	820
Motor	statsmodels



Dados simulados para fins analíticos - modelo de regressão linear múltipla (OLS).

Apêndice B – Estrutura analítica e uso do simulador PMAV

Este apêndice apresenta, de forma sintética, a estrutura analítica do simulador PMAV e um roteiro resumido de uso da ferramenta.

Estrutura analítica do simulador

O simulador foi concebido para transformar uma base estruturada de manutenção em uma leitura analítica voltada à previsão de custos, comparação de cenários e apoio à decisão. Sua lógica geral pode ser resumida no seguinte fluxo:

Base de dados estruturada → modelo estatístico → simulação de cenários → geração de indicadores, gráficos, alertas, rankings e relatórios

De forma resumida, a arquitetura do simulador compreende quatro blocos principais:

a) Base de dados estruturada

Organização dos registros de manutenção por ativo, sistema, subsistema, criticidade, periodicidade, frequência, horizonte e custos.

b) Modelo estatístico

Aplicação de regressão linear múltipla para estimativa do custo previsto a partir das variáveis explicativas adotadas na pesquisa.

c) Módulo de simulação

Aplicação dos cenários analíticos sobre a base de referência, com ajuste dos custos, projeção de criticidade e geração de alertas.

d) Interface analítica

Apresentação dos resultados em ambiente visual interativo, com indicadores sintéticos, gráficos comparativos, ranking de sistemas prioritários, painel de alertas, tabela analítica detalhada e resumo executivo.

Roteiro resumido de uso do simulador

O uso do simulador pode ser descrito, de forma simplificada, pelas seguintes etapas:

1. Seleção do cenário analítico

O usuário escolhe o cenário a ser analisado, como Base, Conservador, Otimista, Ambiente agressivo, Restrição orçamentária ou Envelhecimento acelerado.

2. Aplicação de filtros

A leitura pode ser refinada por filtros como ativo, tipo de ativo, sistema, subsistema, criticidade e horizonte do PMAV.

MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELOS DE TRANSPORTE

3. Leitura dos indicadores principais

O painel inicial apresenta os principais resultados sintéticos, como custo total previsto, custo total ajustado, sistemas avaliados, alertas imediatos, alertas preditivos, sistema mais crítico e sistema de maior custo.

4. Análise do modelo estatístico

O usuário pode observar os coeficientes da regressão, o coeficiente de determinação (R^2), o RMSE e outras informações do ajuste do modelo.

5. Análise dos gráficos comparativos

Os gráficos permitem comparar cenários, observar distribuição de custos por sistema, relação entre custo e criticidade e concentração de alertas.

6. Consulta ao ranking de sistemas prioritários

O simulador organiza os sistemas segundo score de prioridade, permitindo identificar os grupos que demandam maior atenção.

7. Verificação do painel de alertas

A ferramenta apresenta alertas imediatos e preditivos, acompanhados de motivo, impacto e ação sugerida.

8. Consulta da tabela analítica detalhada

A tabela permite rastrear os registros individualmente, com visualização de variáveis, custos, criticidade projetada, prioridade e tipo de alerta.

9. Exportação dos resultados

Os resultados podem ser exportados em formato documental para registro e comparação entre cenários simulados.

Observação

O simulador deve ser compreendido como ferramenta de apoio ao planejamento técnico e financeiro da manutenção. Seus resultados dependem da coerência da base de entrada, das premissas adotadas e da interpretação de profissional tecnicamente capacitado.