



# TOTEX 4.0: SISTEMA INTELIGENTE DE GESTÃO ANALÍTICA E COMPUTACIONAL

**Tema:** Gestão Ativos e Manutenção

**Autores:** Renan Franco De Moraes (EDP Brasil)

**Co-Autores:** Fabrício Expedito Viana (EDP Brasil), Julia Prado (EDP Brasil), Jader Kayque Marques De Campos (EDP Brasil), Fernando Vargas Baldotto (EDP Brasil), Willamy Siqueira Conde (EDP Brasil)

**Empresa:** EDP São Paulo Distribuição de Energia S.A

---

## Resumo

O projeto aborda um dos principais desafios enfrentados pelas concessionárias de energia: garantir a confiabilidade do fornecimento de energia em redes de média e baixa tensão. Este trabalho visa otimizar a alocação de recursos e fortalecer a resiliência das redes frente a interrupções focando na modernização das operações de manutenção, substituindo práticas tradicionais por uma abordagem inovadora fundamentada em Inteligência Artificial e hiperautomação de dados. Através dessa transformação, buscamos aprimorar a capacidade das concessionárias de prever falhas na rede elétrica e implementar medidas preventivas de forma proativa, reduzindo significativamente as interrupções no fornecimento. Com isso, é esperado uma otimização nos indicadores de fornecimento de energia para milhões de consumidores, promovendo o desenvolvimento de uma rede mais eficiente e sustentável com um uso mais consciente dos recursos. O desenvolvimento posiciona-se como uma solução estratégica que contribui para redes de distribuição mais resilientes e sustentáveis.

## 1. Introdução

O aumento da pressão regulatória e social para um serviço cada vez mais eficiente e econômico leva à necessidade das distribuidoras se reinventarem e promoverem inovações com sustentabilidade. Em paralelo, o envelhecimento da rede, que é uma das variáveis consideradas pelo sistema para a otimização do plano de ações preventivas, traz desafios significativos pela sua maior propensão à falha e consequente necessidade de revisar os processos clássicos de manutenção, processos os quais normalmente representam cerca de 50% da totalidade de custos operacionais e de investimentos de uma distribuidora.

Os custos operacionais e de investimento dedicados ao processo de manutenção preventiva e corretiva são crescentes e nem sempre eficazmente aplicados, portanto, aumentar a eficiência significa oportunidades de reduzir custos por alocação de esforços imprecisa.

Além disso, a transição energética que o Brasil e o mundo enfrentam leva a uma alteração do consumo e fator de carga, trazendo uma nova tendência de comportamentos da rede e maior complexidade nas atividades de gestão de ativos. Não é incomum na Distribuição identificar-se um aumento sucessivo dos custos sem que reflitam necessariamente na melhoria sustentável da rede de distribuição, assim como nos indicadores regulatórios de continuidade. Dado que a manutenção da rede e todos os seus ativos é ex-

tremamente complexa pela grande escala, dispersão geográfica e heterogeneidade dos ativos, entende-se que modelos quantitativos avançados são ferramentas reconhecidamente eficazes para evoluir a gestão de ativos para a operação 4.0, baseados em dados.

Este projeto permitiu endereçar os processos da área de gestão de ativos, tornando-a mais eficaz e eficiente por meio do uso de modelos quantitativos avançados, a fim de aumentar a assertividade na seleção de manutenções com base em premissas e cenários pré-definidos de acordo com a necessidade do usuário.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1 METODOLOGIA

O projeto consistiu na elaboração e apresentação de uma solução analítica avançada para a gestão de ativos da distribuição, com foco na otimização de planos de manutenção para redes de média tensão (MT) e baixa tensão (BT). A pesquisa envolveu a análise de métricas estatísticas de predição e a apresentação de uma solução superior baseada em métodos quantitativos. O sistema desenvolvido, além de testar diversos métodos para modelagem do problema, permite criar planos de manutenção otimizados, oferecendo uma abordagem inovadora para a gestão de ativos baseada em dados.

Para tanto, o trabalho foi organizado em três grandes blocos metodológicos:

- **Fundamentação teórica:** realização de revisão bibliográfica detalhada sobre os algoritmos utilizados na otimização de planos de manutenção das redes de média e baixa tensão (MT e BT). Além da componente bibliográfica decorrente do estudo de trabalhos científicos já realizados, tiveram duas componentes qualitativa e quantitativa. A fundamentação quantitativa preocupou-se com a análise descritiva de dados da gestão de ativos, portanto, incluiu o mapeamento de dados e sistemas, bem como a preparação de processos ETL (*Extract, Transform, Load*), essenciais para a análise e descrição profunda do problema em questão. Paralelamente, a abordagem qualitativa foi crucial para levantar informações sobre o funcionamento do negócio e tomada de decisão, que são aspectos importantes para a atribuição de significado aos resultados alcançados e mapeamento dos aspectos controláveis do problema;

- **Desenvolvimento de algoritmos (hipóteses):** abrangeu uma série de atividades voltadas à implementação de modelos e algoritmos estudados da fundamentação bibliográfica. Além de desenvolver diversos algoritmos de aprendizado de máquina e otimização, nessa série de produtos foram aplicados métodos de pré-processamento, juntamente com o balanceamento de dados utilizando SMOTE (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) e variantes, para garantir a representatividade dos dados minoritários. Além disso, foi utilizada a técnica de otimização por *Grid Search* para melhorar os parâmetros dos modelos de aprendizado de máquina e, assim, garantir a seleção ótima de modelos. Estas técnicas foram fundamentais para permitir que os modelos identificassem padrões e correlações entre variáveis e eventos, trazendo incrementos à precisão das previsões;

- **Análise comparativa dos algoritmos:** a avaliação dos modelos abrangeu uma série de atividades para comparar quais os melhores modelos, bem como verificar a adequabilidade na tomada de decisão dentro da empresa, portanto, envolveu aspectos qualitativos e quantitativos. As primeiras comparações foram realizadas com os dados históricos e utilização de métricas de backtesting, como AUC (Area Under the Curve), precision e recall, para comparar a eficácia dos modelos de predição. Em sequência, com previsões refinadas, foi realizada validação em campo, que incluiu um experimento de inspeção de falhas na

rede de manutenção e um experimento comparativo do uso dos modelos desenvolvidos, proporcionando uma avaliação prática e robusta dos resultados obtidos. Os experimentos em campo foram essenciais para verificar a aplicabilidade e a eficiência da solução proposta em situações reais, garantindo que as melhorias observadas nos modelos se traduzissem em benefícios tangíveis na gestão de ativos.

Por fim, foi desenvolvida uma plataforma digital com o objetivo de viabilizar o uso prático do sistema por com encapsulamento dos modelos em telas de software de sistemas institucionais da EDP.

A pesquisa demonstrou a eficácia da aplicação de analítica avançada na otimização de planos de manutenção para redes de distribuição MT-BT. Os resultados indicam que a solução proposta oferece melhorias significativas em relação às abordagens tradicionais, contribuindo para a melhoria na gestão de ativos. Este estudo não só confirma a viabilidade da solução, mas também destaca o potencial da analítica avançada para transformar a gestão de ativos no setor de distribuição de energia, proporcionando substanciais benefícios econômicos e operacionais.

A estrutura do projeto de planejamento anual de manutenção para uma empresa de distribuição de energia foi fundamentada em quatro componentes principais: o Preditor de Falhas, o Preditor de Impactos, o Modelo de Ações Corretivas e Preditivas, e o Seletor de Manutenção. Esses componentes são interdependentes e colaboram para garantir a eficiência e a eficácia das operações de manutenção, atendendo às exigências regulatórias e otimizando os recursos disponíveis. A figura a seguir apresenta a estrutura geral da solução.

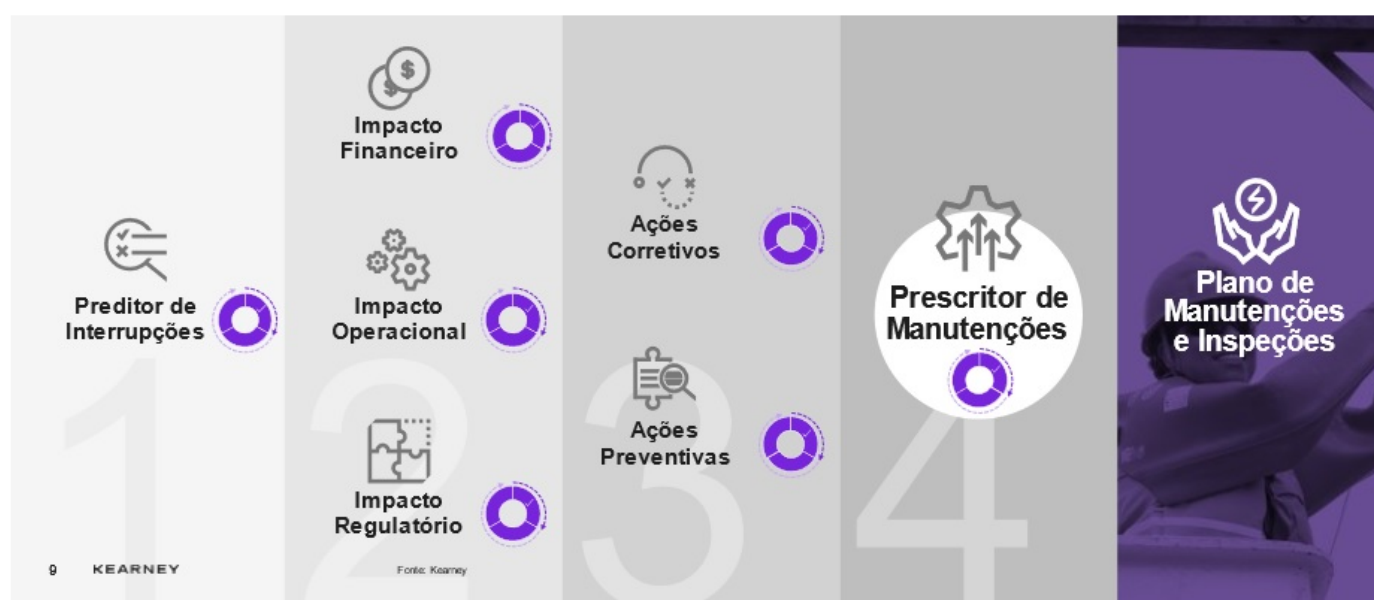


Figura 1: Estrutura geral da solução TOTEX 4.0

Dentre os blocos citados na estrutura do projeto, destacam-se os seguintes:

- **Preditor de Falhas:**

O primeiro componente do projeto é o Preditor de Falhas, uma ferramenta crucial que utiliza algoritmos de *machine learning* e análise de dados históricos para prever quando e onde falhas podem ocorrer na rede de distribuição. Ao identificar padrões e sinais que precedem as falhas, o sistema permite a antecipação de problemas, possibilitando intervenções antes que ocorram interrupções no serviço. Esse preditor é alimentado por dados coletados da rede, registros de manutenção, eventos passados de falha e informações exógenas, garantindo um modelo robusto e confiável.

- **Preditor de Impactos (regulatórios, financeiros e operacionais):**

O segundo componente é o Preditor de Impactos, que avalia as consequências potenciais das falhas previstas em três dimensões: regulatória, financeira e operacional. Do ponto de vista regulatório, o sistema analisa como as falhas afetarão os indicadores de continuidade do serviço (DEC e FEC), que são críticos para a conformidade com as normas da ANEEL. Financeiramente, estima os custos associados às falhas, incluindo reparos, multas e compensações aos consumidores. Operacionalmente, avalia o impacto nas operações e a necessidade de recursos humanos para a operação do sistema elétrico. Esses sistemas permitem uma visão holística das consequências das falhas e o dimensionamento das ações mitigatórias, facilitando uma tomada de decisão informada.

• **Modelo de Ações Corretivas e Preditivas:**

Baseado nas previsões de falhas e nos impactos associados, o sistema de Ações Corretivas e Preditivas define a composição de atividades possíveis intrínsecas à necessidade de remediar causas de falhas ou evitar a incidência de falhas. As ações corretivas são reativas, incluindo reparos e substituições após a ocorrência de falhas, enquanto as ações preditivas são proativas, buscando evitar a ocorrência de falhas por meio de manutenções preventivas e obras de infraestrutura. Este modelo equilibra as necessidades de intervenção imediata com as estratégias de longo prazo, visando a redução do número e da gravidade das falhas ao longo do tempo.

• **Seletor de Manutenção:**

O componente final é o Seletor de Manutenção, que prioriza e agenda as atividades de manutenção com base nas previsões de falhas e nos impactos esperados. Este sistema utiliza algoritmos de otimização para maximizar a eficiência das equipes de manutenção, minimizando o tempo de inatividade e os custos operacionais. O seletor considera restrições como disponibilidade de recursos, urgência das intervenções e metas regulatórias, garantindo que as atividades de manutenção sejam realizadas de maneira estratégica e eficaz.

Em conjunto, esses quatro componentes criam uma estrutura integrada e inteligente para o planejamento de manutenção em empresas de distribuição de energia: o Preditor de Falhas antecipa problemas, o Preditor de Impactos avalia suas consequências, o sistema de ações corretivas e preditivas define as estratégias de intervenção, e o Seletor de Manutenção prioriza e agenda as atividades necessárias. Esta abordagem não só melhora a confiabilidade e a eficiência da rede de distribuição, mas também assegura a conformidade regulatória e a otimização dos recursos financeiros e operacionais.

## **2.2 RESULTADOS OBTIDOS**

Após as etapas de estudos, desenho e desenvolvimentos, foram realizadas validações dos algoritmos e da plataforma digital, com o principal objetivo de validar os resultados obtidos e a acurácia dos retornos informados pelo sistema. Abaixo, abordaremos esta etapa de forma detalhada:

### **Validações dos Algoritmos**

Com o objetivo de validar a eficácia do modelo prescritivo de manutenção para redes de distribuição de energia elétrica, foi realizada uma etapa de backtesting da solução desenvolvida, utilizando-se de registros históricos detalhados de falhas e manutenções efetivadas ao longo do ano de 2023, permitindo uma análise robusta do desempenho do modelo em situações reais. Com base nos resultados positivos obtidos, foi possível avançar para a fase de testes em campo, onde o piloto foi executado nos estados do Espírito Santo e São Paulo, abrangendo tanto redes de média quanto de baixa tensão.

A metodologia de execução do piloto incluiu a seleção criteriosa de alimentadores com diferentes características operacionais, a definição de indicadores de desempenho e a execução de inspeções em campo. Foram inspecionados 71 segmentos no Espírito Santo e 38 segmentos em São Paulo, totalizando aproximadamente 75 quilômetros de rede, um volume suficiente para testar a adaptabilidade do modelo a variadas condições operacionais. Câmeras térmicas foram integradas ao processo de inspeções visuais para identificar falhas não detectáveis a olho nu, como superaquecimento.

Quanto aos resultados, o modelo prescritivo demonstrou alta precisão nas previsões de falhas, com margens de erro entre 8,0% e 16,7% em São Paulo e entre 2,7% e 8,9% no Espírito Santo, confirmando sua aderência às condições reais. Além disso, a execução do piloto ressaltou a necessidade de implementação de melhorias potenciais para otimizar o processo de manutenção e aumentar a eficácia do modelo prescritivo, como planos de horizontes de 5 anos, calendarização de manutenções e priorização de notas, entre outras.

Os dados coletados e os resultados alcançados no piloto são resumidos na tabela a seguir, que destaca os principais aspectos quantitativos e qualitativos da validação do modelo prescritivo nas redes de distribuição analisadas:

Estado	Segmentos Inspeccionados	Quilometragem Inspeccionada	Margem de Erro nas Previsões de Falhas	Margem de Erro nas Previsões de Manutenção
Espírito Santo	71 segmentos	49 km	2,7% a 8,9%	12,5% a 31%
São Paulo	38 segmentos	26 km	8,0% a 16,7%	9% a 12%

Figura 2: Resultados da execução do piloto na validação dos modelos preditivos e prescritivos

Complementando esses resultados, a tabela a seguir detalha a performance do modelo prescritivo em termos de *AUC*, porcentagem de falhas acumuladas nas 10% primeiras Estações Transformadores (ETs) e precisão, em diferentes categorias de redes distribuídas nos estados do Espírito Santo e São Paulo:

Distribuidora	Tensão da Rede	Categoria da Rede	AUC	Porcentagem de falhas acumuladas nas 10% primeiras ETs	<i>Precision</i>
ES	BT	Com secundária	69,7%	27,3%	93%
ES	BT	Sem Secundária	68,3%	29%	54%
ES	MT	Rural	71,3%	29,4%	91%
ES	MT	Urbano	74,7%	34,3%	87%
SP	BT	Com secundária	68,1%	24,6%	88%
SP	BT	Sem Secundária	68,8%	29%	49%
SP	MT	Rural	72%	29,8%	95%
SP	MT	Urbano	73,9%	35,1%	87%

Figura 3: Performance do modelo preditivo na previsão de falhas nas redes de distribuição

Esses resultados mostram que o modelo prescritivo está bem alinhado com as condições reais de operação, demonstrando potencial para ser implementado em larga escala, com a capacidade de melhorar a qualidade e a confiabilidade das redes de distribuição de energia.

### **Validações da Plataforma Digital:**

As validações da Plataforma Digital foram realizadas com o objetivo de validar as principais funcionalidades e a usabilidade do sistema desenvolvido, garantindo que esteja em conformidade com os requisitos técnicos e operacionais. A plataforma foi submetida a uma série de testes abrangentes que incluíram três principais categorias de testes: testes funcionais, testes de gráficos e testes de planos estratégicos e táticos.

Os testes funcionais foram focados na verificação das operações básicas da plataforma segundo os casos de uso desenvolvidos, os quais nortearam o desenvolvimento da aplicação, como a autenticação, controle de acesso, bem como a criação e manipulação de planos estratégicos e táticos. Estes testes foram essenciais para garantir que todas as operações fundamentais estivessem funcionando conforme o esperado, proporcionando uma base sólida para as fases subsequentes de validação.

A exibição correta dos dados foi uma prioridade durante a validação da plataforma. Foram realizados testes detalhados para verificar a precisão dos gráficos, garantindo que os valores exibidos estivessem em concordância com os dados subjacentes e que as escalas e categorias fossem corretamente aplicadas nos tipos de gráficos devidamente acordados. A interação dos usuários com os gráficos, incluindo a aplicação de filtros e seletores, também foi minuciosamente validada para assegurar que as visualizações sejam intuitivas e úteis para a tomada de decisões.

A robustez da plataforma foi avaliada com diversos cenários estratégicos e táticos, simulando condições operacionais variadas, incluindo situações de estresse máximo. Estes testes foram cruciais para validar a capacidade da plataforma de operar eficientemente em situações reais de produção, garantindo que as restrições e parâmetros estabelecidos fossem respeitados e que os resultados fossem exibidos de maneira coerente e confiável.

Todas as necessidades identificadas durante o processo foram cuidadosamente documentadas, reportadas e corrigidas, garantindo que a plataforma esteja preparada para suportar as exigências operacionais futuras. Sendo assim, garantimos a eficácia e a confiabilidade do sistema, validando sua capacidade para integrar as operações das Distribuidoras.



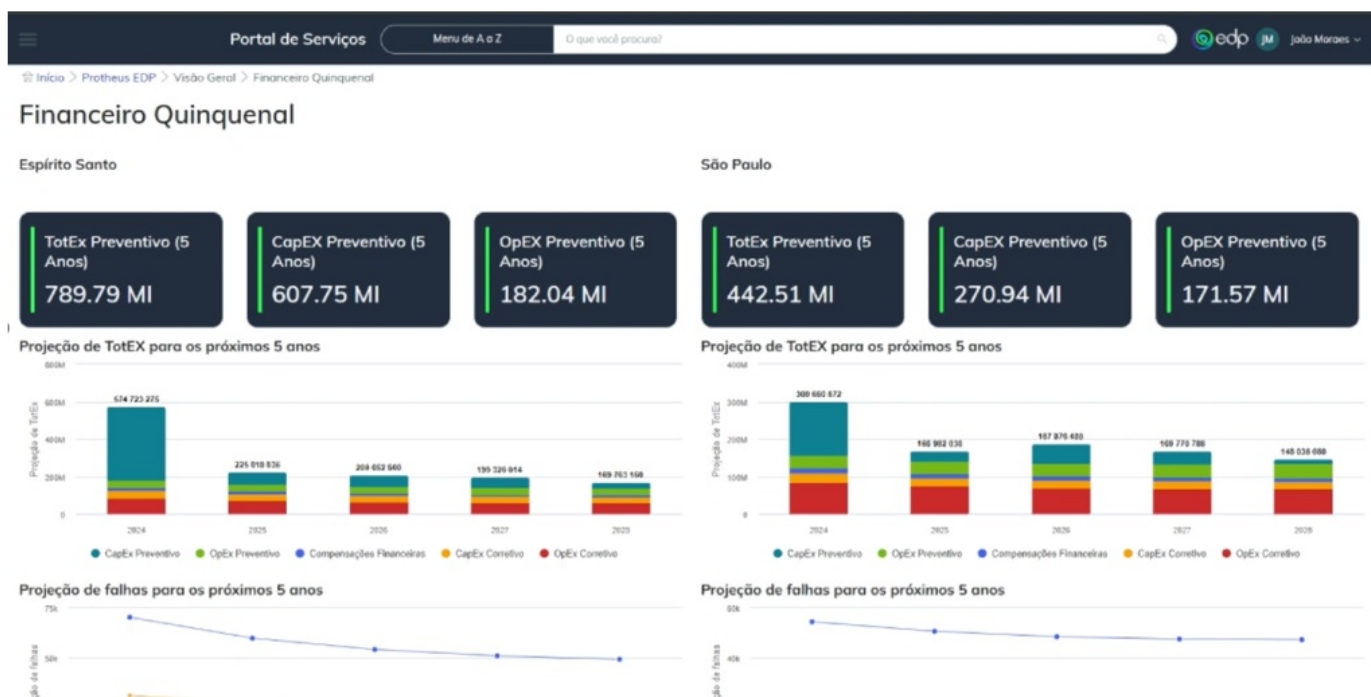


Figura 4: Tela do sistema Protheus em ambiente de Produção disponível para colaboradores EDP de acordo com perfis de acesso

### 3. Conclusão

Dado o escopo abrangente e o nível de inovação associados à metodologia aplicada neste trabalho, é possível concluir que o sistema TOTEX 4.0 possui relevantes contribuições econômicas e tecnológicas para o setor elétrico.

Do ponto de vista econômico, o investimento operacional no setor elétrico apresenta uma escala financeira que supera, em magnitude, outros setores e até mesmo outros tipos de investimento dentro do próprio setor. Uma gestão proativa e eficaz desses investimentos pode resultar em retornos substanciais, que está totalmente alinhado ao objetivo deste trabalho, o qual visa otimizar a assertividade das Distribuidoras do Grupo EDP na alocação de investimentos e custos operacionais de manutenção de ativos.

Do ponto de vista tecnológico, existe hoje no setor elétrico uma abundância de dados disponíveis, porém, esses dados ainda não são plenamente convertidos em informação útil, seja por limitações sistêmicas, multiplicidade de sistemas não integrados, inconsistências nos dados ou falta de capacidade interna para processamento. Com a metodologia implementada, é possível simplificar e estruturar a coleta, tratamento e análise de dados, permitindo discussões fundamentadas sobre os principais investimentos em manutenção de rede MT/BT.

Além disso, vale destacar que o projeto também prezou pela capacitação da equipe, garantindo a sustentabilidade e a autonomia no uso da plataforma a longo prazo. Com base nisso, podemos afirmar que o sistema TOTEX 4.0 certamente continuará a contribuir para uma gestão mais assertiva e eficaz do plano de manutenção de redes das distribuidoras.

## **4. Referências bibliográficas**

- [1] ROCCHETTA, R. et al. A reinforcement learning framework for optimal operation and maintenance of power grids. Applied Energy, 2019.
- [2] RADMER, Duane T. et al. Predicting Vegetation-Related Failure Rates for Overhead Distribution Feeders. IEEE Transactions On Power Delivery, 2002.