



## GRUPO XII SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

### FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÕES PARA RENOVAÇÃO DE ATIVOS UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO

**DIRCEU LAUBE\* (1); ANA GABRIELA BEZERRA BENITEZ(2); FLÁVIA LIMA DURANS PITTA MARINHO(3);  
FELIPE RIBEIRO MIRANDA(2); HEMIR DA CUNHA SANTIAGO(4); MARCELO APARECIDO PELEGRINI(2);  
STARCH MELO DE SOUZA(4)**

**COPEL DISTRIBUIÇÃO(1); SINAPSIS(2); CENTRO DE EXCELÊNCIA EM TECNOLOGIA DE SOFTWARE DO  
RECIFE(3); IN FORMA SOFTWARE S/A(4)**

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão para a manutenção ou renovação de ativos. A partir da integração de dados contábeis, de georreferenciamento e de manutenção de equipamentos de subestações, é possível gerar relatórios utilizando *business intelligence*, e indicar os ativos mais depreciados e seu impacto na base de remuneração da empresa. A integração de todas essas bases de dados possibilita a visualização das localizações dos ativos mais depreciados e a medição do resultado de cada ativo para a base de remuneração da empresa. Portanto, a ferramenta possibilita o estabelecimento de um plano periódico de renovação.

**PALAVRAS-CHAVE:** renovação de ativos; avaliação multicritério; *machine learning*; vida útil

## 1.0 INTRODUÇÃO

Um dos desafios das empresas do setor elétrico é determinar o momento ótimo de substituição de seus equipamentos. Na medida em que os equipamentos instalados em campo se degradam, seja por sua idade ou por situações externas ao sistema, eles tendem a apresentar maior número de falhas, colocando a operação em risco. Assim, um plano eficiente de renovação de ativos tem como objetivo auxiliar a troca destes equipamentos, não permitindo que todo o sistema elétrico chegue a situações críticas, mas possibilitando uma visão antecipada dos comportamentos dos ativos utilizando estratégias de avaliação das manutenções, análises estatísticas e monitoramento da vida útil.

Uma possível técnica para realizar este tipo de avaliação é a estimativa de vida útil remanescente. Este parâmetro pode ser entendido como a quantidade de tempo em que o ativo pode operar antes de requerer substituição. Por meio da obtenção deste valor, pode-se planejar a troca do equipamento e otimizar a sua operação, a partir da estimativa de seu período final de vida técnica e quais custos e retornos financeiros que ainda podem gerar para a empresa.

Portanto, o objetivo da ferramenta apresentada neste artigo é o de auxiliar no plano de renovação de ativos, a partir da análise multicritério de equipamentos de subestações de distribuição, apresentando como principais premissas de desenvolvimento: estimativa de vida útil remanescente e frequência de manutenções de equipamentos utilizando técnicas de *machine learning*; estimativa dos custos de manutenções; cálculo de receitas dos equipamentos (a partir da regulação vigente); avaliação de criticidade de regiões (via indicadores de continuidade dos conjuntos elétricos), e criticidades individuais (a partir de notas de obsolescências). Adicionalmente, com a utilização de diferentes fontes de dados e criação de notas utilizando os critérios de análise, cria-se um *ranking* de priorização de subestações para um plano de substituição de equipamentos, apresentando os resultados em mapas interativos aplicando *business intelligence* e estudo de caso com a base de ativos da COPEL Distribuição.

## 2.0 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção serão descritas as diretrizes teóricas utilizadas no modelo proposto por este trabalho, além da especificação geral da solução criada.

## 2.1 Diretrizes metodológicas

Uma definição para gestão de ativos é a de operar um grupo de ativos durante todo o ciclo de vida útil técnica, garantindo um retorno adequado de investimentos e assegurando serviço e segurança de acordo com os padrões estabelecidos por normas (Schneider, 2006). Dentro do contexto da distribuição de energia, esta tarefa pode se tornar complexa à medida que as empresas devem atingir diversos objetivos, tendo que procurar pelo equilíbrio entre os retornos adequados de seus investimentos e a manutenção dos níveis de qualidade de fornecimento de energia à população.

Alguns dos pontos que um plano eficiente de gestão de ativos deve apresentar: 1) Escopo e diretrizes de plano; 2) Dados e descritivos dos ativos considerados; 3) Atividades, tarefas, responsáveis e priorizações; 4) Estratégias do ciclo de vida; 5) Previsões financeiras; 6) Práticas de avaliação; 7) Ações de melhoria contínua. Ou seja, a boa gestão de ativos deve acompanhar os ativos ao longo de seu ciclo de vida, recolhendo informações do estado dos equipamentos, avaliando esses dados e predizendo informações importantes de maneira a entender seu funcionamento e realizar previsões de falhas e retornos econômicos. A partir de um histórico de informações de monitoramento dos ativos, é possível aplicar um modelo que caracteriza os ativos a partir de retornos monetários, além de análises de confiabilidade e risco, como ilustra a Figura 1.

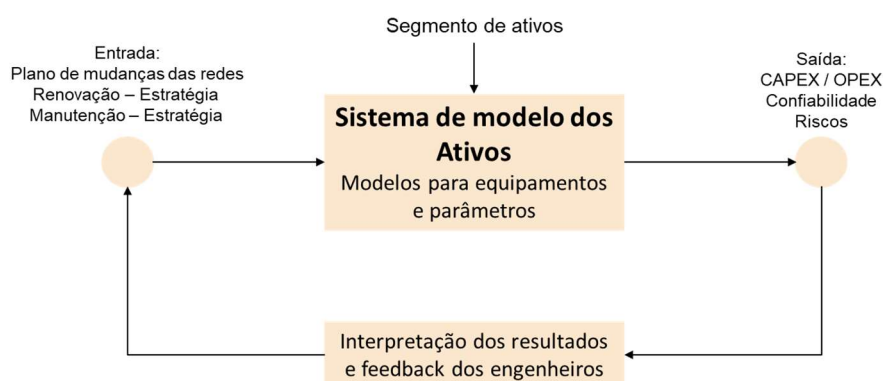


FIGURA 1: Entradas e saídas para criação de modelos e medidas. (Fonte: Schneider, 2006, adaptado)

Os ativos da rede elétrica se degradam com o passar do tempo, impactando diretamente nas metas de qualidade das concessionárias de distribuição. Por isso, investimentos devem ser realizados a fim de se substituir equipamentos, manter os níveis de qualidade exigidos pelos órgãos regulatórios e renovar a base de remuneração das distribuidoras. Para isso, uma gestão eficiente de ativos deve envolver: estratégias eficientes de manutenção, determinação das condições em que se encontram os ativos, simulações, análises estatísticas de falhas e monitoramento da vida útil técnica.

A previsão do custo de manutenção pode ser realizada por meio da modelagem de dados históricos de manutenção. Pode-se projetar, em um intervalo de tempo futuro, o custo esperado de manutenções a serem realizadas em um equipamento, ou conjunto de equipamentos. Em geral, a previsão pode ser feita de diversas formas, desde técnicas mais simples às mais complexas. Novamente, a escolha da técnica de modelagem recai sob a amostra de dados disponíveis. Caso a amostra de dados seja limitada em termos de tamanho e quantidade de atributos, é indicado o emprego de métodos mais simples, como regressão linear. Por outro lado, caso os dados disponíveis apresentem padrões como tendência ou sazonalidade, é indicado utilizar técnicas mais complexas, como modelos não-lineares de séries temporais (HIRSCHEY, 2009). A Vida Útil Remanescente (VUR) é o tempo de duração restante de um ativo em um determinado momento da operação, a sua estimativa é essencial para prever o tempo após o qual um ativo já não poderá atender a seus requisitos operacionais. A VUR é tipicamente aleatória e, como tal, deve ser estimada a partir de fontes de informação disponíveis, como as informações obtidas no monitoramento de condição e saúde (SI et al., 2011). Desta forma, planos de manutenção e/ou renovação de ativos podem ser traçados a partir da VUR, a fim de otimizar a eficiência operacional.

## 2.2 Bases de dados e integrações

As informações para utilização dos modelos propostos neste trabalho são apresentadas a seguir:

- Relatório de Controle Patrimonial, disponibilizando as informações contábeis dos equipamentos, servindo como insumo para as análises de remuneração regulatória e CAPEX da empresa (RCP);
- Base georreferenciada dos equipamentos (BDGD);

- Sistema com as informações de manutenções dos equipamentos de subestações e equipamentos especiais da rede de distribuição;
- Sistema com informações de interrupções na rede de média tensão.

A integração dos dados é apresentada na Figura 2, onde as bases gerais são ligadas pelas informações do número do equipamento e do seu número operacional.

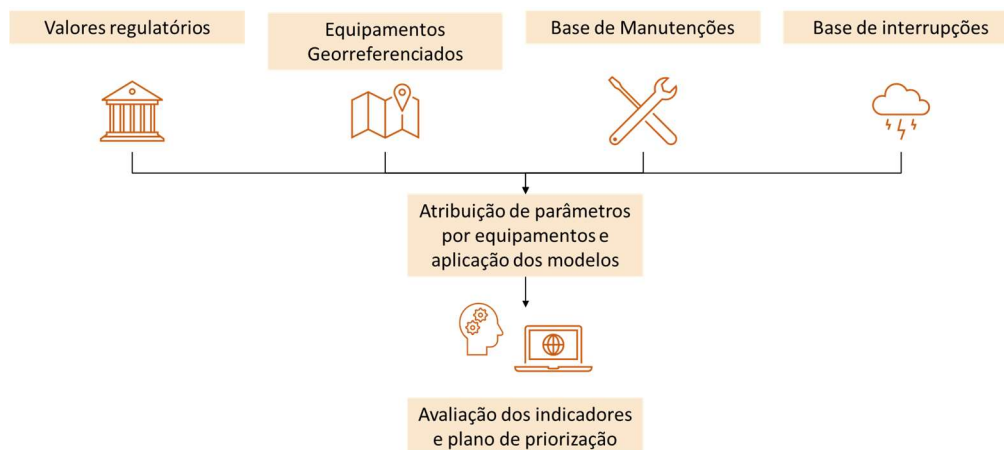


FIGURA 2: Integração dos dados. (Fonte: Autores)

## 2.3 Modelos de Machine Learning

### 2.3.1 Modelo de estimação de Vida Útil Remanescente

A Vida Útil Remanescente (VUR) pode ser realizada a partir do cálculo da diferença entre a idade do equipamento e da Vida Útil Técnica (VUT), estimada através da implementação de modelos de aprendizagem de máquina que estimam essa variável. Para estimar a VUT, utilizaram-se nove variáveis (ver Figura 3), como atributos de entrada para um modelo de aprendizagem de máquina. Esses modelos, por sua vez, realizam uma tarefa de regressão e resultam no valor da VUT de cada equipamento. Ao todo, utilizaram-se quatro algoritmos de Aprendizagem de Máquina (do inglês, *Machine Learning* - ML): Regressão Linear Múltipla, Floresta Aleatória, Árvore de Decisão e *Gradient Boosting*.

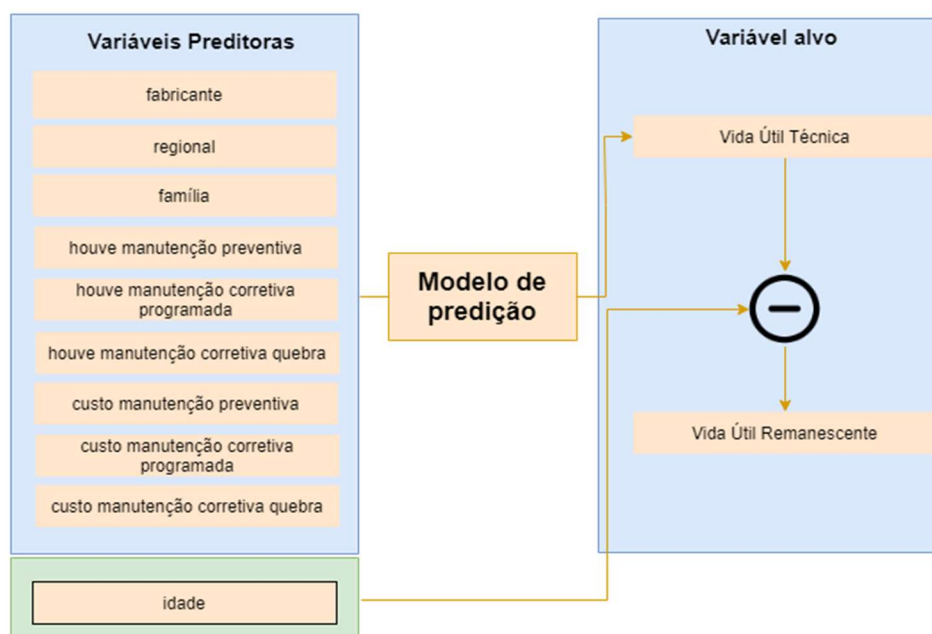


FIGURA 3: Fluxo metodológico principal. (Fonte: Autores)

Após alguns experimentos, foi utilizada Regressão Linear Múltipla para treinamento de um modelo simplificado, uma vez que os demais são algoritmos de aprendizagem de máquina de maior complexidade computacional e, consequentemente, são mais propensos a super ajuste do modelo para tarefas mais simples. A partir disso, para cada TUC (Tipo de Unidade de Cadastro), realizou-se o treinamento e a validação do modelo por meio de três etapas principais: pré-processamento, estimação da VUT via ML e análise de variáveis e erros. O fluxo de treinamento é ilustrado na Figura 4.



FIGURA 4: Fluxo de treinamento. (Fonte: Autores)

### 2.3.2 Modelo de projeções de Manutenções

Os modelos de *machine learning* para projeção da frequência de manutenção dos ativos possuem, como variáveis preditoras, cinco informações gerais sobre o equipamento (fabricante, regional, família, TUC e idade), além de dados que possuem informações sobre as manutenções realizadas anteriormente (custo e a frequência destas manutenções). Considerando estas variáveis, foram gerados dois modelos de *machine learning*: um para a frequência de manutenções corretivas e outro para as preventivas. Além disso, optou-se pela utilização de variáveis de frequência de manutenção corretiva e preventiva como dados de entrada do modelo de manutenção corretiva, uma vez que a ocorrência de manutenções preventivas pode impactar na ocorrência das corretivas. Similarmente, para o modelo de projeção de frequência de manutenção preventiva, foram utilizadas as variáveis dos dois tipos de manutenção.

## 2.4 Modelo de análise multicritério

Na literatura são encontrados diversos métodos para análise de tomada de decisão a partir de múltiplos critérios. Um dos mais utilizados é o Analytic Hierarchy Process (AHP), originário dos trabalhos do Professor Thomas L. Saaty (SAATY, 1991). É um método simples, em que se pode escolher as melhores opções em um grupo de diversas alternativas utilizando parâmetros qualitativos e quantitativos. Neste método, é realizada a comparação par-a-par dos parâmetros em análise, a partir de pesos estabelecidos pelo planejador. Como é realizada uma normalização dos valores, pode-se realizar a comparação de critérios em diferentes escalas. O objetivo é, a partir da determinação de critérios críticos, da atribuição de pesos e da comparação par-a-par desses múltiplos critérios, encontrar a alternativa prioritária em um portfólio de opções, garantindo uniformidade no método de avaliação. A Figura 5 ilustra a ideia geral do método de comparação entre os critérios de avaliação.

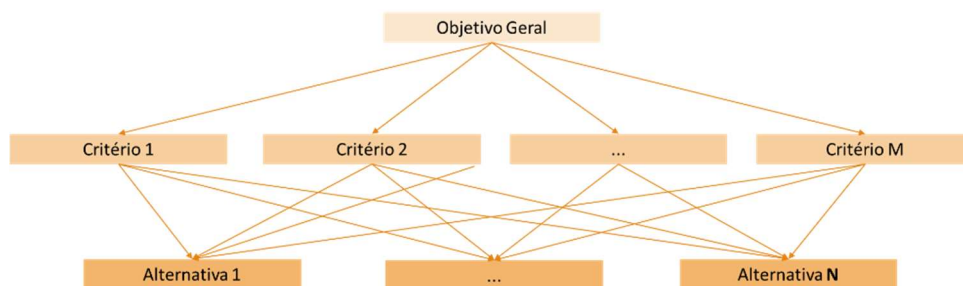


FIGURA 5: Esquema de análise multicritério para seleção de alternativas. (Fonte: SAATY, 1991, adaptado)

A Figura 6 apresenta os critérios que foram utilizados para o desenvolvimento da ferramenta, em dois níveis hierárquicos.

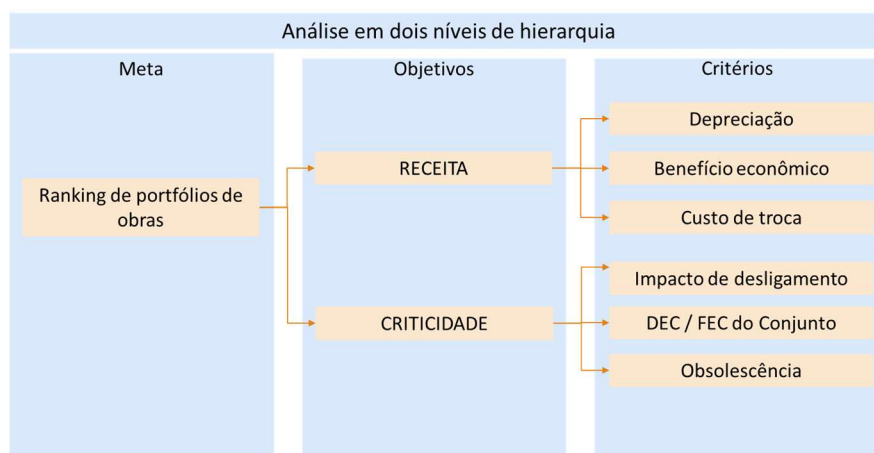


FIGURA 6: Árvore de decisão hierárquica para o projeto. (Fonte: Autores)

### 3.0 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pela implementação da metodologia descrita. Primeiramente, é descrita a ferramenta que foi desenvolvida, com demonstração de seus principais relatórios. Após isso, é apresentado o resultado da aplicação dos métodos de *machine learning* e avaliação multicritério, com discussão sobre os resultados obtidos utilizando a base de equipamentos da COPEL Distribuição.

#### 3.1 Ferramenta Especialista em Renovação de Ativos

A Ferramenta Especialista em Renovação de Ativos tem como principais objetivos apresentar resultados de diagnósticos e estudos de projeções e priorização de troca de equipamentos, com foco em equipamentos individuais de subestações de distribuição. No *dashboard* criado, os relatórios podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Diagnósticos: apresentação dos dados de manutenções realizadas e ocorrências no sistema elétrico sob análise, a fim de possibilitar uma visão da atual situação dos equipamentos e da evolução de manutenções. Além disso, apresenta dados contábeis desses equipamentos, mostrando percentuais de depreciação, receita da vida útil regulatória etc.
- Projeções: resultados dos estudos de estimação de vida útil remanescente dos ativos individuais, a partir de seus históricos de manutenção, e projeção da frequência de manutenções até sua quebra.
- Priorização de renovação: modelo de priorização de equipamentos para renovação, a partir da criação de rankings resultantes da análise multicritério.

Um dos painéis (ver Figura 7) apresenta o resultado de avaliação dos equipamentos, seja de forma individual, por subestação, por determinada região ou mesmo de toda a área de concessão, de acordo com o resultado da integração entre RCP e BDGD. Esta correlação entre equipamentos e valores contábeis foi realizada a partir de códigos de Subestação de Distribuição (SED), Regional e sequência de códigos de cadastro do MCPSE (TUC, Tipo de Instalação - TI, Atributos A1 a A6). Desta forma, pode-se identificar de maneira georreferenciada cada um dos equipamentos, a partir de suas informações de cadastro da BDGD, e associar valores de Valor Novo de Reposição (VNR), Valor de Mercado em Uso (VMU) e Depreciação Acumulada (DAC) à cada posição. Os gráficos disponíveis são: mapa de bolhas com a localização dos equipamentos, em que o tamanho da bolha é proporcional ao VNR, enquanto a cor segue uma escala proporcional à DAC; gráfico com a porcentagem de VMU e DAC dos equipamentos; valor da base; comparação entre VMU e VNR da seleção; remuneração por ano; cálculo da Quota de Reintegração Regulatória (QRR) e Remuneração Líquida do Capital (RLC) da seleção.

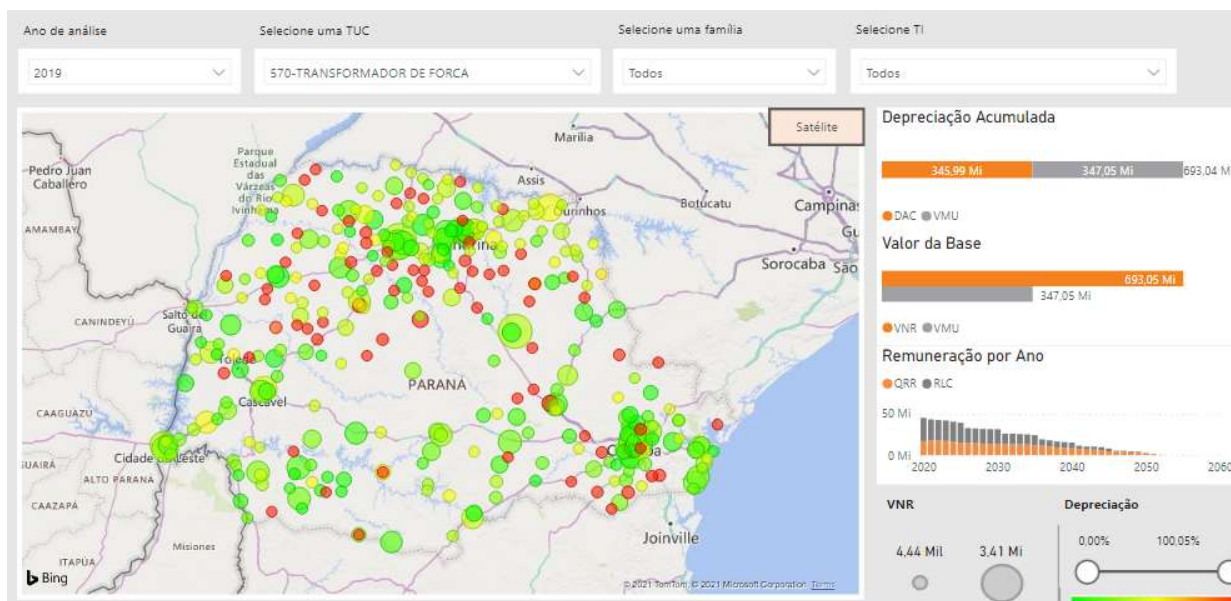


FIGURA 7: Diagnósticos - Receita. (Fonte: Autores)

### 3.2 Projeções utilizando IA

O *dashboard* de Projeções de Vida Útil Remanescente (RUL, em inglês) apresenta as comparações de idade atual dos equipamentos e projeção de vida esperada, ou seja, em quantos anos o equipamento deverá sair da base por quebra, como apresentado na Figura 8.

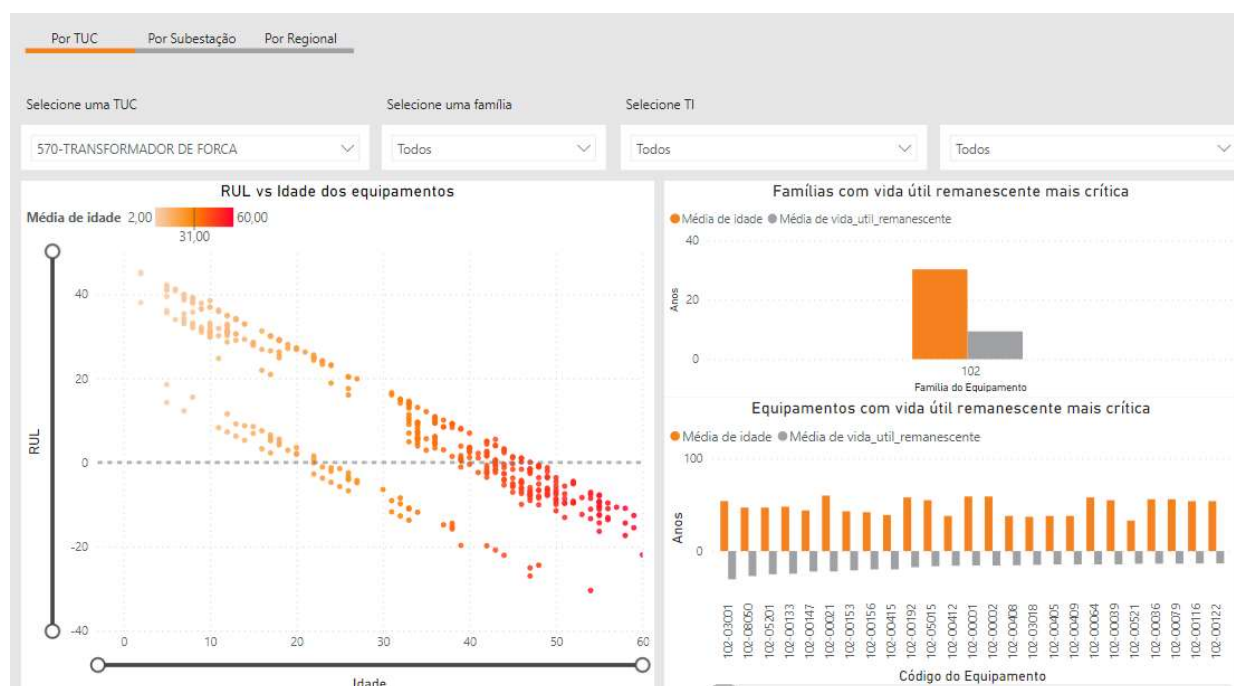


FIGURA 8: Projeções – RUL. (Fonte: Autores)

### 3.3 Plano de Priorização

A tela da Figura 9 apresenta os resultados dos cálculos dos atributos e dos pesos de cada atributo, junto com o Peso Global e o *Ranking* obtido. Além disso, é possível aplicar um filtro de equipamentos obsoletos, para apresentação do *ranking* que tiverem sido sinalizados em condição de obsolescência.



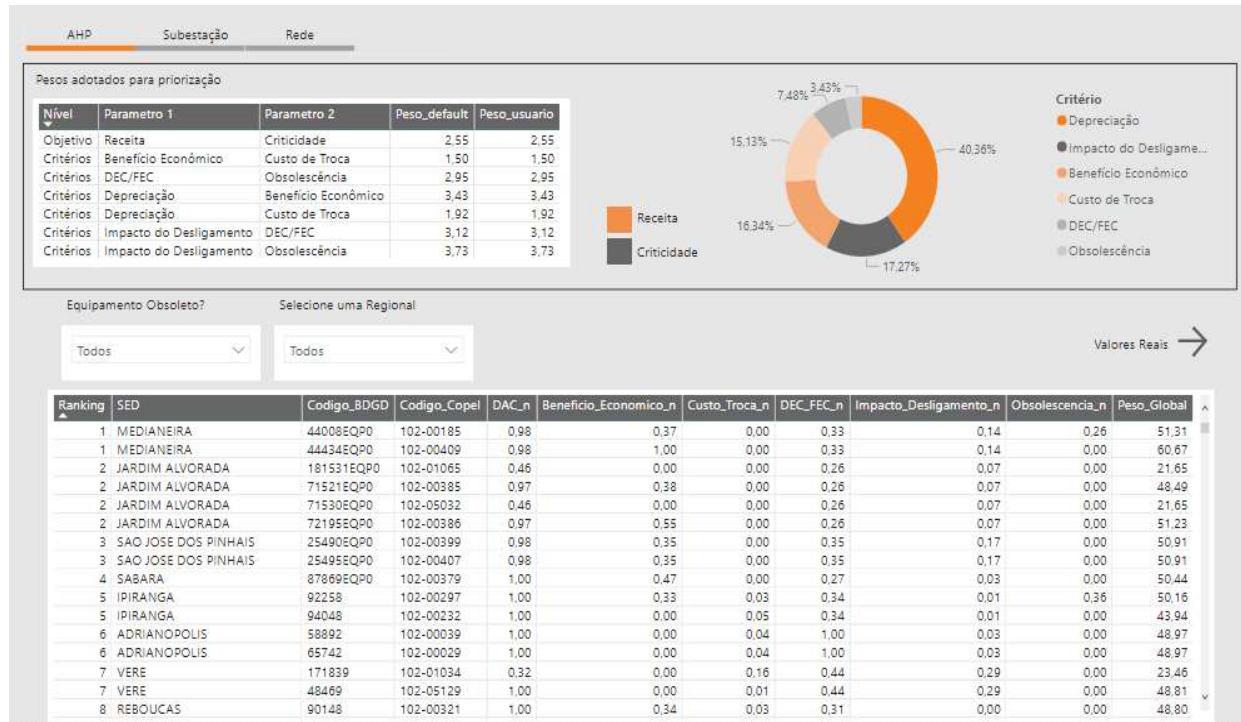


FIGURA 9: Análise de Priorização – AHP. (Fonte: Autores)

### 3.4 Avaliação do modelo de priorização

A partir do recorte realizado, torna-se evidente que o modelo de priorização de troca de equipamentos desenvolvido destaca a depreciação acumulada (DAC) e o benefício econ mico (VPL) como fatores de maior importância para o ranqueamento. Esse efeito pode ser igualmente observado pela dispersão das notas relativas às parcelas de depreciação e benefício econ mico normalizados ( $40,36\% \times DAC + 16,34\% \times (-VPL)$ ) com relação à nota global dos ativos, que pode ser aproximada por uma reta com  $R^2 = 0,9869$ .

O efeito da composição dos quatro critérios para ordenação dos equipamentos pode ser observado na Figura 10, com aproximação linear de  $R^2 = 0,8804$ . Dessa forma, a combinação dos critérios é fundamental para que seja possível obter a ordenação pretendida.

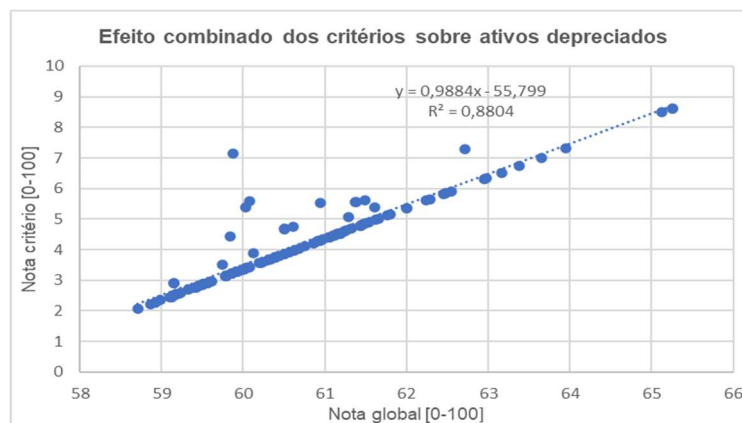


FIGURA 10: Dispersão dos ativos quando avaliados critérios combinados

Em resumo, o modelo AHP estabelecido foi desenvolvido para determinação da prioridade de troca de equipamentos de TUC 570. Aplicando a metodologia apresentada, foram utilizados os resultados de questionários junto ao corpo técnico da Copel para determinação dos pesos de seis critérios de avaliação (depreciação, benefício econ mico, custo de troca, impacto do desligamento, DEC/FEC e nível de obsolescência), perfazendo os objetivos receita e criticidade.

#### 4.0 AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu financiamento e suporte técnico da Copel - Companhia Paranaense de Energia, no âmbito do projeto "PD-02866-0514/2019 Ferramenta de Apoio à Otimização de Decisões de Renovação de Ativos", que é um programa P&D regulado pela ANEEL.

#### 5.0 CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um modelo para auxiliar nos planos de avaliação e de renovação de ativos, de maneira a avaliar o ciclo de vida dos equipamentos, realizar previsões e calcular indicadores econômicos. Este modelo utiliza bases de dados consolidadas pelas distribuidoras, o que o torna replicável.

A ferramenta desenvolvida integra as informações de bases distintas, realiza as previsões e os cálculos econômicos, aplica os pesos da metodologia de avaliação multicritério e apresenta os resultados de maneira interativa com o usuário.

Por fim, os estudos de vida útil remanescente, custo de manutenção e reposição de ativos, acrescidos da metodologia AHP, originou uma ferramenta de alto valor agregado para os planejadores, uma vez que:

- Torna possível identificar os ativos críticos e/ou com alta propensão a falhas;
- Aperfeiçoa planos de substituição de equipamentos, considerando a perda de remuneração ou por elevação dos custos operacionais; e
- Apresenta dados consistentes, que subsidiam as tomadas de decisão da empresa.

#### 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Procedimentos de Regulação Tarifária no Sistema Elétrico Nacional – PRORET Módulo 2 - Revisão Tarifária Periódica das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica, 2016.
- (2) Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório, 2016.
- (3) ANEEL, Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico - MCPSE, 2015.
- (4) HIRSCHEY, M. Fundamentals of Managerial Economics. South-Western College Pub, 2009.
- (5) SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.
- (6) SCHNEIDER, Joachim; NEUMANN, Claus; HOGRAFER, Jurgen; WELLßOW, Wolfram; SCHWAN, Michael; SCHNETTLER, Armin. Asset Management Techniques. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 643-654. 2006.
- (7) SI, X.-S., WANG, W., HU, C.-H., & ZHOU, D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. European Journal of Operational Research, 213(1), 1–14. 2011.
- (8) ZAMPOLLI, Marisa. Guia básico para implantação da gestão de ativos em empresas de energia. International Copper Association Latin America. 2012.
- (9) ZAMPOLLI, Marisa. Gestão de Ativos - Guia para aplicação da Norma ABNT ISO 55001. International Copper Association Latin America. 2015.
- (10) ZAMPOLLI, Marisa. Gestão de Ativos - Guia para aplicação da Norma ABNT ISO 55001 - Considerando as diretrizes da ISO 55002:2018. International Copper Association Latin America. 2019



## DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Eletricista formado pelo CEFET-PR (2005), pós graduado em Administração de Pessoas pela Uniasselvi (2019) e atualmente cursando MBA em Gestão de Ativos pela Abraman e Fundação Gorceix. Atuei em manutenção elétrica predial no CPD do HSBC (entre 1989 e 2005). Na Copel (a partir de 2006) trabalhei na equipe de normatização da transmissora e como gerente das equipes de pré e pós operação do COS. Gerenciei também equipe de manutenção de equipamentos em SEs, redes e linhas da região leste do Paraná. Atualmente desenvolvo estudos de gestão de ativos da Distribuidora, do ponto de vista técnico, financeiro e regulatório.

(2) ANA GABRIELA BEZERRA BENITEZ  
Possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas de Energia e Automação pela Universidade de São Paulo (2018). Atualmente trabalha como consultora para a Sinapsis Inovação Energia, CEEAC e Softex Recife. Possui experiência nas áreas de Planejamento da Distribuição e Cálculo de Perdas, incluindo tratamento de dados de redes elétricas para simulações, cálculo de perdas e análise de dados, com aplicação de técnicas avançadas, machine learning e business intelligence.

(3) FLÁVIA LIMA DURANS PITTA MARINHO  
Formação: 1) Mestranda em Engenharia de Software, UFPE, iniciado em 2004. 2) Graduada em Ciência da Computação. UNICAP/PE, conclusão em 1998. 3) Participação em congressos e seminários na área de energia - SNPTEE; Méritos: Aluna laureada da turma 98.1 de Ciência da Computação da UNICAP/PE. Experiência Profissional: 1) Projetos de P&D para a proposição de um plano de renovação de ativos da distribuição. 2) Projetos de P&D na área de comunicação entre centros de operação e ONS. 3) Projetos para implantação de regulações da ANEEL. 4) Projetos P&D, especificamente na área de operação da transmissão.

(4) FELIPE RIBEIRO MIRANDA  
Possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas de Energia e Automação pela Universidade de São Paulo (2013). Atualmente é engenheiro pesquisador na Sinapsis Inovação em Energia. Tem experiência na área de Engenharia de Energia, com ênfase em Planejamento Energético, Regulação e Cálculo de Perdas. Participou de diversos projetos de consultoria e P&D. Aluno de mestrado na escola politécnica desde de 2018, no tema Viabilidade econômica para substituição de ativos e expansão da rede elétrica.

(5) HEMIR DA CUNHA SANTIAGO  
Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Católica de Pernambuco (2004), Mestre e Doutor em Ciência da Computação pela UFPE (2009, 2017). Trabalhei como coordenador de cursos técnicos, superiores e de pós-graduação na Faculdade IBRATEC (2012 a 2019). Tenho 12 anos de experiência como professor de diversas disciplinas nas áreas de Engenharia de Software, Programação e Computação Gráfica. Atualmente, ocupo o cargo de pesquisador em projetos de P&D na In Forma Software. Desde junho/2020, participo de estágio de pós-doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas - PPGES, na Universidade de Pernambuco (UPE).

(6) MARCELO APARECIDO PELEGRINI  
Marcelo Aparecido Pelegrini é graduado, mestre e doutor em Sistemas de Potência pela USP (2003). Membro do IEEE e Cigré. É sócio-diretor da Sinapsis Inovação em Energia, onde coordenou mais de trinta projetos de consultoria e P&D nas áreas de Distribuição de Energia Elétrica, Comercialização de Energia, Redes Subterrâneas, Planejamento da Distribuição, Eletrificação Rural, Regulação Técnica e Econômica do setor de energia elétrica e gás canalizado e Redes Elétricas Inteligentes, para organizações públicas e privadas, como ENEL, EDP Brasil, FECOERGS, OCB/SESCOOP, Cemig, Celesc, CPFL, Neoenergia, Equatorial, Energisa, Eletrobras, CTG, AES Brasil, ARSESP, ANEEL, BID, LuxDev, Banco Mundial.

(7) STARCH MELO DE SOUZA  
Doutorando pelo Centro de Informática CIn/UFPE. Possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal da Paraíba (1997) e mestrado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Pernambuco (2014). Atualmente é Consultor Independente e pesquisador em projetos P&D ANEEL. Experiência em Diretoria de Operações em TI, Gerenciamento de Projetos, Captação e Gestão de Projetos de Inovação, Institucionalização de Processos de Melhoria da Qualidade, Desenvolvimento de Software e Fábrica de Software.