

## **GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

### **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA GESTÃO DE ATIVOS APLICADA A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DA REDE BÁSICA**

**FILIFE POSSATTI CAMPANHOLA(1); DION LENON PREDIGER FEIL(1); SANTOS PEDROZO  
VIANA(2); RAFAEL CONCATTO BELTRAME(1); RODINEI CARRARO; RICARDO JOCHANN FRANCESCHI  
BORTOLINI; TIAGO BANDEIRA MARCHESAN; RUBENS ALESSANDRO SELINKE  
UFSM(1); MEGASOFTWARE SOLUÇÕES EM INFORMÁTICA LTDA(2)**

#### **RESUMO**

O setor elétrico vem passando por um envelhecimento dos seus ativos, principalmente em seus transformadores de potência. Assim, torna-se necessária a criação de metodologias que auxiliem as concessionárias de energia na tomada de decisão sobre a manutenção e/ou a substituição destes equipamentos. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um software para gestão de ativos, aplicada aos transformadores de potência na área de concessão da CEEE Geração e Transmissão. O software foi desenvolvido utilizando programação em linguagem Java e com interface gráfica elaborada através da ferramenta PowerBI, permitindo apresentação clara dos resultados e facilidade de navegação ao usuário.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Transformadores de Potência, Metodologia Computacional, Gestão de Ativos, Planejamento, Analytic Hierarchy Process, Análise de Gases.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

Diversas alterações estruturais vêm sendo realizadas no sistema elétrico brasileiro nos últimos anos, buscando melhorar a qualidade dos serviços prestados, através de um processo de desverticalização, com separação entre os segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Tais mudanças tiveram início em 1995 com a publicação das leis nº 8.987 e 9.074 que tinham por objetivo alterar as condições de concessão e permissão para a prestação de serviços públicos, visando melhorar a qualidade dos serviços prestados [1, 2]. Desde então, diversas mudanças foram implementadas, visando um aumento da competitividade do setor, com melhoria da qualidade dos serviços prestados e redução dos custos envolvidos. Uma das mais recentes alterações, com forte impacto na gestão de equipamentos, ocorreu em 2011, através da resolução normativa Nº 443/2011, revisada pela resolução Nº 643/2014, na qual a ANEEL estabeleceu que as concessionárias de transmissão devem encaminhar à ANEEL, ao ONS, à EPE e ao Ministério de Minas e Energia – MME, a cada ano, a relação de equipamentos em fim de vida, com vida útil remanescente de até quatro anos, incluindo também os equipamentos com vida útil já esgotada, considerando-se a vida útil calculada a partir das taxas de depreciação estabelecidas no Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico - MCPSE e também dos equipamentos que não possuem mais condições técnicas de continuar em operação [3, 4].

Paralelamente às exigências regulatórias, a competitividade do setor elétrico tem levado as concessionárias de energia a buscarem estratégias para uma operação confiável de seus ativos, com o menor custo possível ao longo de sua vida útil [5, 6]. Devido à grande presença de ativos físicos, pela natureza dos serviços prestados, as concessionárias devem buscar manter seus ativos operacionais, em boas condições de uso e gerando valor para a empresa. A gestão de seus ativos é de extrema importância para que as mesmas possam atender aos requisitos de confiabilidade e qualidade da prestação de serviços, com as menores tarifas possíveis para os consumidores e gerando retorno financeiro para seus investidores [7].

Dentro do setor elétrico, os transformadores de potência de alta tensão ocupam um papel de destaque, devido tanto à sua importância ao sistema, como ao custo dos equipamentos, sendo que o mesmo pode representar cerca de 60% do custo de uma subestação [8]. Devido a necessidade de ferramentas que auxiliem na gestão dos ativos, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de melhorar a gestão dos ativos, principalmente com foco em transformadores de potência, tanto com foco na adequada manutenção, como na substituição dos equipamentos, como os apresentados em [9-13] que tratam do efeito da manutenção na substituição dos transformadores, gestão de transformadores e momento ótimo para sua substituição.

Apesar de muitos estudos estarem sendo realizados na área de gestão de ativos, esses estudos não apresentam uma ferramenta mais ampla, analisando os diversos fatores envolvidos e dando uma ferramenta de aplicação prática que possa auxiliar os gestores na tomada de decisão de maneira prática e objetiva. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional com aplicação em uma concessionária de transmissão, considerando as condições de operação dos equipamentos, a importância estrutural na rede elétrica e os aspectos financeiros envolvidos. Esse estudo tem a finalidade de fornecer uma ferramenta de apoio para gestão dos ativos transformadores de potência instalados em suas subestações.

## 2.0 METODOLOGIA PARA RANQUEAMENTO DOS TRANSFORMADORES

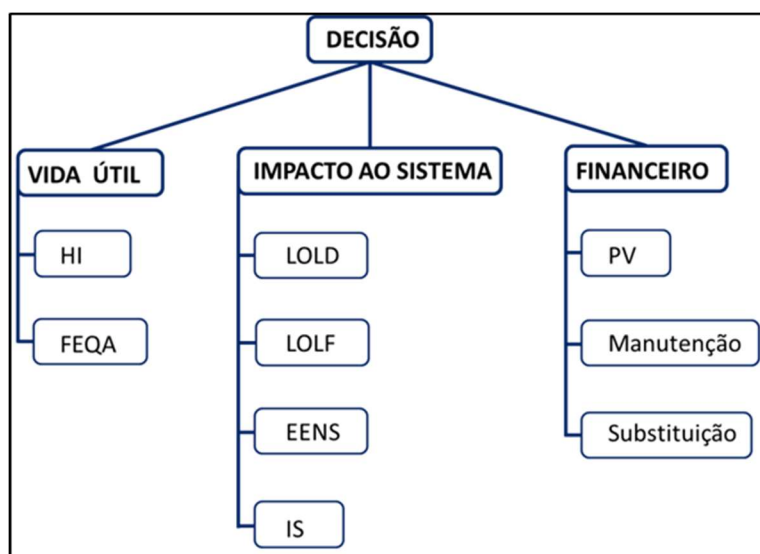
O ambiente competitivo em que as concessionárias de energia estão imersas, traz grandes desafios na busca por uma gestão mais adequada de seus ativos, melhorando o atendimento às demandas, com menor custo e maior eficiência. Assim, um grande desafio é a tomada de decisão sobre a gestão dos transformadores de potência, analisando do ponto de vista técnico e econômico as ações a serem tomadas na manutenção e substituição destes equipamentos. O presente trabalho tem como objetivo principal fornecer uma ferramenta computacional ampla, que auxilie as concessionárias na tomada de decisão, fornecendo um subsídio de informações de maneira clara, facilitando a interpretação dos dados por parte dos gestores.

Para o desenvolvimento dessa ferramenta, é de grande importância a criação de uma metodologia que avalie diversos critérios técnicos e econômicos sobre os equipamentos. Em diversos casos esses critérios podem ser conflitantes entre si, sendo necessária uma metodologia de ponderação para os mesmos. Assim, essa metodologia pode trazer como resultado um ranking dos equipamentos mais críticos do sistema, destacando os mesmos para que possam ser avaliadas providências a serem tomadas. Como se tratam de vários indicadores, é necessária a aplicação de um método multicritério de apoio a decisão, evitando a influência de uma distorção por percepções momentâneas no momento da análise.

No presente trabalho, é utilizada a metodologia AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para auxílio a tomada de decisão, pois se trata de um dos métodos mais amplamente utilizados, principalmente quando são analisados fatores com aspectos conflitantes. Segundo estudos recentes, o método AHP é o método mais utilizado na tomada de decisão sobre problemas na área energética, possuindo boa aplicabilidade para o tipo de estudo proposto neste estudo [14, 15].

### 2.1 Definição dos Critérios

A aplicação do método AHP possui como primeiro passo a definição dos critérios a serem analisados. A seleção dos critérios a serem abordados foi realizada através de consultas bibliográficas, discussões entre os participantes do projeto, incluindo o meio acadêmico e membros da concessionária e pela disponibilidade de dados com histórico disponível na concessionária. Foram considerados critérios de vida útil do equipamento, impacto ao sistema e impacto financeiro gerado pelo equipamento, assim como seus subcritérios, conforme apresentado na Figura 1.



**Figura 1 – Critérios e Subcritérios da Tomada de Decisão.**

Dentro do critério vida útil, a avaliação global da condição de operação dos transformadores é realizada através do *Health Index* (HI). O *Health Index* é um método para quantificar os resultados obtidos de testes químicos e

elétricos, inspeções de campo, observações operacionais, histórico de carregamento, em um índice objetivo e quantitativo, capaz de fornecer a condição geral de operação de transformadores de potência. Ainda no critério de vida útil, é realizada uma análise do envelhecimento adicional, através do FEQA, a que está sendo submetido o transformador, com base nas condições de operação destes equipamentos, tais como, curva de carregamento, temperatura ambiente e características físicas da unidade transformadora.

O critério impacto no sistema tem a finalidade de verificar a importância de cada transformador no sistema em que opera. Nesse trabalho, a verificação do impacto no sistema elétrico de cada unidade transformadora é realizada através da análise da importância estrutural de índices de confiabilidade composta (NH2). A importância estrutural do transformador consiste em analisar os índices de confiabilidade composta do sistema com o equipamento operando sem probabilidade de falhar, e com a unidade transformadora sob condição de indisponibilidade operativa. A diferença dos índices de confiabilidade composta nestes dois casos se denomina importância estrutural. Os índices de confiabilidade composta analisados nesse trabalho são: *Loss of Load Frequency* (LOLF), *Loss of Load Duration* (LOLD), *Expected Energy Not Supplied* (EENS) e Índice de Severidade (IS). A obtenção desses índices é realizada por meio do programa NH2®, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Quanto ao impacto financeiro, foram considerados os descontos através da Parcela Variável (PV), os custos de manutenção e os custos de substituição do equipamento. A Parcela Variável é o mecanismo através do qual a ANEEL realiza descontos devido a não disponibilidade de um sistema de transmissão. Essa não disponibilidade pode ser parcial, suprimindo apenas parte de sua capacidade, ou total, assim como existem desligamentos programados e não programados, cada um possuindo um fator multiplicador do desconto em relação a RAP (Receita Anual Permitida) contratada [16]. Os custos de manutenção, por sua vez, envolvem todos os custos envolvidos diretamente na manutenção dos equipamentos, como materiais, equipe técnica, deslocamento, dentre outros, sendo fundamentais para a gestão do equipamento. Já os custos de substituição, englobando o custo do transformador, adequação da estrutura e mão de obra de instalação, possuem grande importância no planejamento financeiro da concessionária, devido ao elevado valor envolvido.

## 2.2 Julgamento dos Critérios

O passo seguinte é a submissão dos critérios ao julgamento dos especialistas. O método AHP trata como especialistas membros com amplo conhecimento do assunto abordado e sem vícios na tomada de decisão, devendo ser participantes técnicos, com conhecimento amplo dos critérios abordados. O número ideal de especialistas não deve ser inferior a 10, porém não é recomendado um número muito elevado, dificultando o encontro de pessoas com amplo conhecimento e a análise devido ao grande número de dados, geralmente sendo consultado um número inferior a 30 especialistas [17, 18].

O julgamento dos critérios é realizado através de um questionário com comparação pareada entre todos critérios e subcritérios. O questionário foi submetido a um conjunto de especialistas com formação e atuação na área de transformadores de potência atuantes em diversas regiões do Brasil, sendo respondido por 22 participantes, incluindo profissionais atuantes em concessionárias de energia, profissionais atuantes em empresas fabricantes de equipamentos ou empresas de consultoria e professores de curso superior e pós-graduação atuantes na área de sistemas de potência.

Para o cálculo do peso de cada fator, os dados dos respondentes são agregados em uma matriz única, sendo considerada a média geométrica dos valores, com o objetivo de manter as características dos pesos e seus valores recíprocos [19]. Após a agregação, são realizados os passos descritos em [20] para cálculo dos pesos relativos de cada subcritério, assim como a análise de consistência dos resultados.

As respostas obtidas apresentaram elevado grau de consistência, com razão de consistência máxima de 2,4%, sendo que a metodologia considera valores abaixo de 10% como resultados consistentes. Os resultados obtidos mostram a maior importância dos aspectos ligados à confiabilidade e impacto no sistema, correspondendo a um peso de 59,3% (IS = 20,5%, EENS = 14,7%, LOLD = 14,6% e LOLF = 9,6%), seguido pelo impacto financeiro com peso de 23,0% (PV = 11,2%, Substituição = 7,6% e Manutenção = 4,2%) e vida útil com peso de 17,6% (HI = 13,8% e FEQA = 3,8%).

## 2.3 Cálculo do Ranking

A etapa final da priorização consiste na elaboração do ranking de ativos mais críticos do sistema. Para isso, é necessário que sejam levantados os dados de cada um dos subcritérios utilizados para a priorização. Após o levantamento de dados, como os mesmos possuem escalas diferentes e devem ser comparados, deve ser realizada a normalização dos dados, a qual é realizada através da Equação 1:

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

Onde:

$x'$  – valor normalizado do indicador;  
 $x_{\max}$  – valor máximo apurado;  
 $x_{\min}$  – valor mínimo apurado;  
 $x$  – valor apurado para o indicador.

Com os valores dos dados dos indicadores de cada subcritério já normalizados e o peso dos mesmos, parte-se para a elaboração do ranking final, cujo valor que define sua posição é dado pela Equação 2:

$$R = (x'_1 * P_1) + (x'_2 * P_2) + \dots + (x'_n * P_n) \quad (2)$$

Onde:

$R$  – valor final utilizado para o ranqueamento dos equipamentos;  
 $x'_n$  – valor normalizado apurado para o subcritério  $n$ ;  
 $P_n$  – peso calculado para o subcritério  $n$ .

Realizados os cálculos do valor de “R” para todos os ativos a serem avaliados, os mesmos são ordenados em ordem decrescente de valor, tendo assim a ordenação dos ativos mais críticos.

### 3.0 ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS

Os transformadores de potência necessitam de um sistema de isolamento entre suas bobinas e também de arrefecimento para a dissipação do calor gerado pelas perdas nos enrolamentos e no núcleo, garantindo o correto funcionamento do equipamento. A grande maioria desses equipamentos emprega um isolante sólido, como o papel isolante Kraft, e um isolante líquido, geralmente óleo mineral [21]. Esse óleo isolante, no qual os componentes internos do transformador ficam imersos, sofre diversas influências geradas pelas condições de operação do equipamento, levando a alterações físico-químicas que geram diferentes tipos de gases dissolvidos. A análise de gases, apesar de não estar contida na metodologia de ranqueamento dos transformadores, traz dados muito importantes que complementam o software desenvolvido, permitindo uma análise técnica mais ampla das condições de operação dos equipamentos.

O sistema de isolamento de um transformador precisa ser monitorado ao longo da operação do equipamento, permitindo que sejam realizadas manutenções preditivas, preventivas ou corretivas, evitando interrupções não planejadas no sistema elétrico [22]. A análise dos gases dissolvidos no óleo (DGA – *Dissolved Gas Analysis*) é realizada a fim de monitorar as condições do óleo isolante, verificando a concentração de diversos gases presentes na amostra. No desenvolvimento deste sistema computacional, foram utilizadas as duas metodologias mais difundidas para DGA, a primeira, derivada da proposta por Duval [23], é descrita detalhadamente na norma IEEE Std C57.104 [24], enquanto que a segunda metodologia, derivada da proposta por Rogers [25], é detalhada na norma IEC 60599 [26]. As duas metodologias apresentadas possuem caráter complementar, podendo ser utilizadas simultaneamente para uma melhor identificação das condições de operação do equipamento.

A metodologia descrita na norma IEEE Std C57.104 [24] classifica as faltas através do método do “Triângulo de Duval 1” com base nas concentrações em partes por milhão (ppm) dos gases Acetileno ( $C_2H_2$ ), Etileno ( $C_2H_4$ ) e Metano ( $CH_4$ ). O cálculo das concentrações relativas de cada gás é realizado através das equações 3, 4 e 5. Estes valores são plotados em cada um dos 3 eixos de um gráfico triangular, posicionando o ponto em uma região do gráfico que indica a condição de operação do transformador.

$$\%CH_4 = 100 \cdot \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \quad (3)$$

$$\%C_2H_4 = 100 \cdot \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \quad (4)$$

$$\%C_2H_2 = 100 \cdot \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \quad (5)$$

A identificação das condições de operação do equipamento é realizada através das concentrações relativas calculadas para os gases, seguindo as condições estabelecidas no Quadro 1, as quais podem ser representadas graficamente, demarcando as regiões conforme os critérios estabelecidos.

**Quadro 1 – Interpretação da DGA conforme a IEEE Std C57.104 [24].**

| Condição | Característica da Falta                           | Concentrações Relativas |                                |                                |
|----------|---------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|          |                                                   | %CH <sub>4</sub>        | %C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | %C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
| PD       | Descargas parciais                                | ≥ 98                    | –                              | –                              |
| T1       | Falta térmica com temperatura inferior a 300°C    | < 98                    | < 20                           | < 4                            |
| T2       | Falta térmica com temperatura entre 300°C e 700°C | –                       | ≥ 20 e < 50                    | < 4                            |
| T3       | Falta térmica com temperatura superior a 700°C    | –                       | ≥ 50                           | < 15                           |
| DT       | Falta elétrica e térmica                          | –                       | < 50                           | ≥ 4 e < 13                     |
|          |                                                   | –                       | ≥ 40 e < 50                    | ≥ 13 e < 29                    |
|          |                                                   | –                       | ≥ 50                           | ≥ 15 e < 29                    |
| D1       | Descargas de baixa energia                        | –                       | < 23                           | ≥ 13                           |
| D2       | Descargas de alta energia                         | –                       | ≥ 23                           | ≥ 29                           |
|          |                                                   | –                       | ≥ 23 e < 40                    | ≥ 13 e < 29                    |

Enquanto isto, a metodologia apresentada na norma IEC 60599 [21] necessita, como dados de entrada, a concentração dos gases Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Para identificação da condição de operação do equipamento, a norma estabelece que sejam utilizadas as razões entre os gases Acetileno e Etileno, Metano e Hidrogênio e Etileno e Etano, com as concentrações apresentadas no Quadro 2 sendo utilizadas para a classificação das características das faltas ocorridas no equipamento.

**Quadro 2 – Interpretação da DGA conforme a IEC 60599 [26].**

| Condição | Característica da Falta                           | Concentrações Relativas |                    |                         |
|----------|---------------------------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
|          |                                                   | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ |
| PD       | Descargas parciais                                | NS                      | < 0,1              | < 0,2                   |
| D1       | Descargas de baixa energia                        | > 1                     | 0,1 – 0,5          | > 1                     |
| D2       | Descargas de alta energia                         | 0,6 – 2,5               | 0,1 – 1            | > 2                     |
| T1       | Falta térmica com temperatura inferior a 300°C    | NS                      | > 1                | < 1                     |
| T2       | Falta térmica com temperatura entre 300°C e 700°C | < 0,1                   | > 1                | 1 – 4                   |
| T3       | Falta térmica com temperatura superior a 700°C    | < 0,2                   | > 1                | > 4                     |

#### 4.0 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O sistema computacional é composto pela metodologia de ranqueamento dos transformadores, onde são apresentados dados sobre os diversos indicadores utilizados e parâmetros de comparação, e pela análise de gases dissolvidos, que complementa o software de gestão trazendo informações sobre as condições de operação dos equipamentos.

Esse sistema foi programado através de linguagem *JavaScript*, por ser uma linguagem com ampla utilização, permitindo futuras melhorias no software por qualquer usuário que tenha permissão e conhecimento da linguagem. Os dados de entrada foram carregados em formato de planilha eletrônica, podendo ser gerados através de relatórios do SAP (software de ERP utilizado na concessionária), geração manual ou outros programas utilizados que permitam a exportação dos dados via planilha eletrônica.

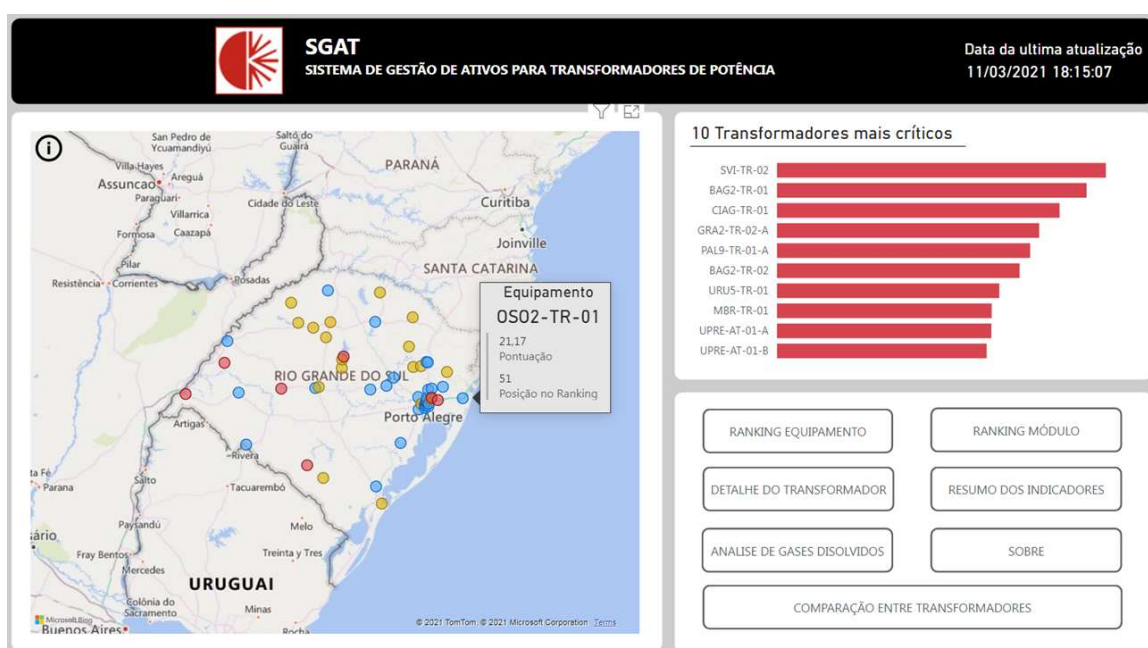
Após o carregamento dos dados e a programação da rotina de cálculos, conforme apresentado na seção 2.0, foi desenvolvida uma interface gráfica em *PowerBI*, criando uma interface prática para o usuário.

##### 4.1 Interface Gráfica do Sistema

A elaboração de uma interface gráfica para o Sistema de Gestão de Ativos para Transformadores de Potência (SGAT) buscar apresentar os dados de forma clara, permitindo fácil navegação por qualquer usuário que possua um conhecimento básico do assunto abordado, não necessitando de conhecimento específico sobre as configurações do programa.

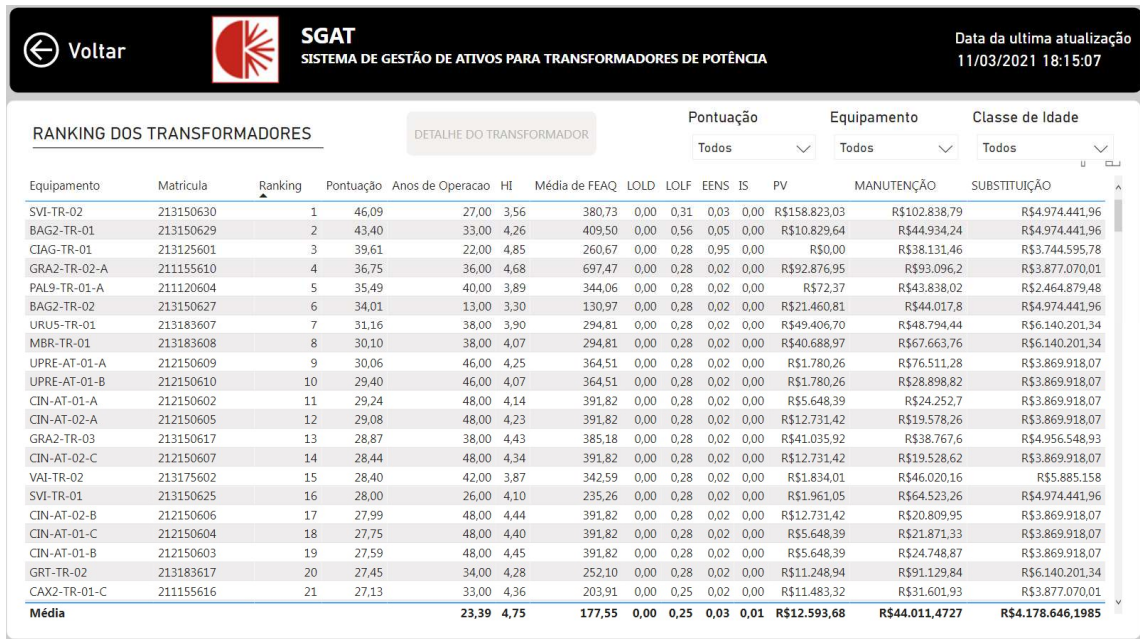
A tela inicial, mostrada na Figura 2, apresenta um mapa dinâmico onde são destacados todos os transformadores na área de concessão da concessionária, marcados através de pontos georreferenciados, com as cores dos pontos indicando a criticidade do equipamento. Os pontos mostrados em vermelho na tela apresentam os 10 equipamentos mais críticos do ranking. Em destaque, também é apresentada uma lista contendo os 10 equipamentos com maior pontuação no ranking, representando os transformadores mais críticos do sistema. Complementando a tela inicial do sistema, tem-se um Menu com botões de acesso rápido às funcionalidades implementadas.

A navegação no mapa também permite a visualização rápida da pontuação e posição no ranking através de uma janela pop-up quando o cursor é colocado sobre o ponto do transformador.



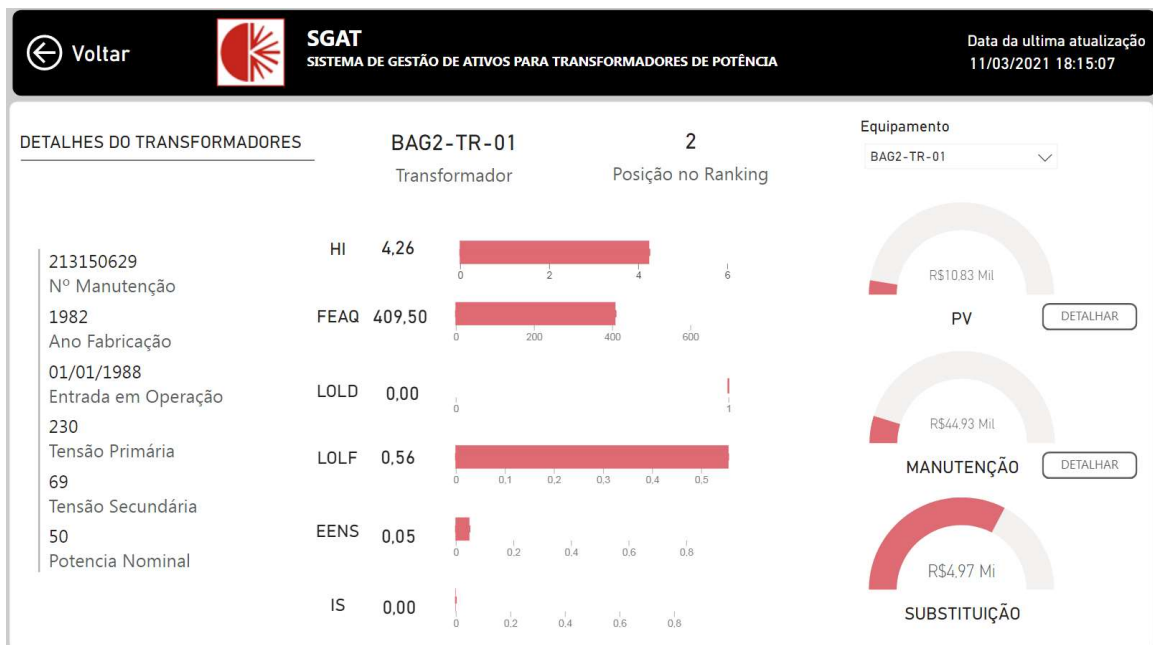
**Figura 2 – Tela inicial do SGAT.**

Acessando a opção “Ranking Equipamento”, é possível analisar uma lista completa dos transformadores presentes no sistema, podendo ser listados em ordem crescente ou decrescente de seu grau de criticidade ao sistema. Na Figura 3 pode-se observar que são mostrados todos os indicadores utilizados, apresentando os valores antes da normalização para uma melhor análise dos resultados. Além dos indicadores, são apresentados os códigos dos equipamentos, número de registro e posição no ranking geral. Para uma melhor navegação, a tela também apresenta filtros onde podem ser selecionados equipamentos individualmente, por faixa de idade ou pontuação. A seleção de qualquer equipamento permite que seja acessada a tela de Detalhes do Transformador, apresentada na Figura 4.



**Figura 3 – Tela de Ranking dos Transformadores.**

O ranking dos equipamentos traz uma visão detalhada da condição de operação dos equipamentos, mostrando todos os indicadores analisados, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico. A ordenação conforme critérios pré-definidos e ponderados por um grupo de especialistas, permite uma análise mais técnica dos resultados, eliminando vieses do ponto de vista de cada gestor. A apresentação de todos os indicadores em uma mesma tela permite que possa ser realizada uma análise visual rápida dos principais fatores que estão influenciando a posição no ranking de cada equipamento, tornando possível que ações sejam tomadas diretamente no fator mais crítico ao equipamento, tornando mais ágil e precisa a análise.

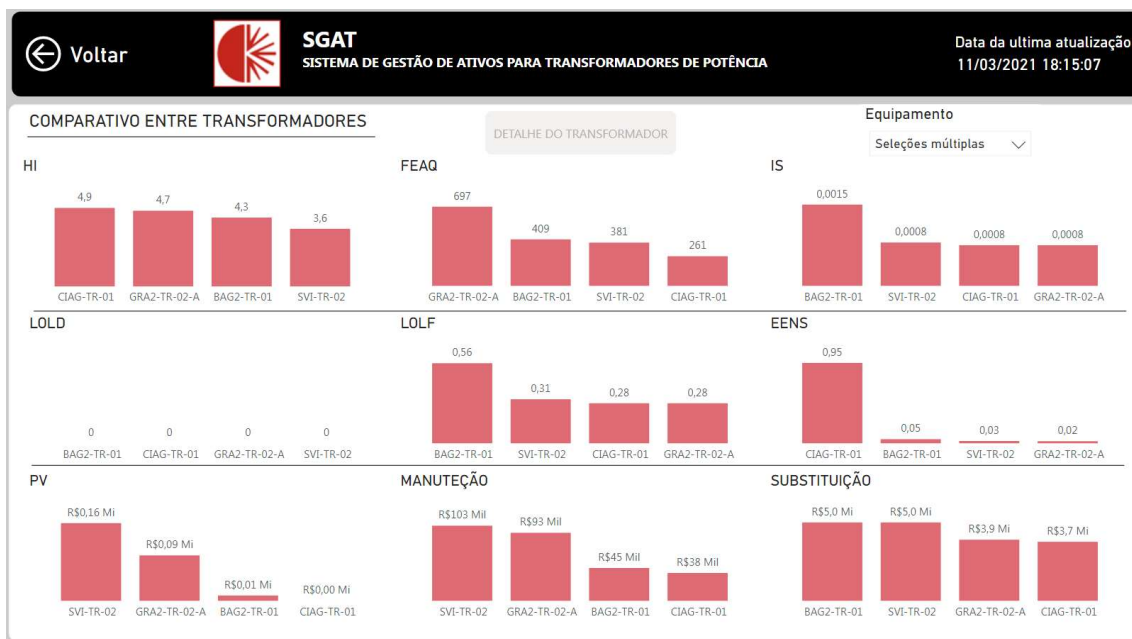


**Figura 4 – Tela de Detalhes do Transformador.**



A tela de detalhes do transformador mostra de maneira isolada, para cada equipamento, seus dados de cadastro no sistema como o código, número de registro, ano de fabricação e início de operação, tensão primária, secundária, potência nominal do equipamento e posição no ranking. Além disso são mostrados os dados de todos indicadores em gráficos, onde o maior valor da escala é o maior valor encontrado entre os equipamentos monitorados, facilitando uma análise relativa aos mais críticos. Para a navegação, é utilizado um seletor simples para busca do equipamento a ser visualizado e também botão de retorno a tela anterior, como utilizado em todas telas do sistema.

Para realizar a comparação entre os equipamentos, foi elaborada uma interface com gráficos de barras para cada um dos 9 indicadores utilizados, Figura 5. Nela pode ser realizada uma seleção múltipla de equipamentos, podendo ser apresentados simultaneamente todos os equipamentos desejados na análise. Os gráficos de barras são ordenados de forma decrescente para cada indicador, permitindo que o usuário analise o conjunto de transformadores de maneira detalhada para cada fator utilizado no ranqueamento dos equipamentos.



**Figura 5 – Tela de Comparativo entre Transformadores.**

Paralelamente às configurações envolvendo a análise multicritério dos transformadores de potência, foi desenvolvida uma interface gráfica para análise dos gases dissolvidos, sendo uma ferramenta complementar com grande importância na gestão dos equipamentos.

#### 4.2 Gases Dissolvidos

A análise de gases dissolvidos foi configurada como uma aplicação do sistema computacional desenvolvido. Os dados de entrada de todas as amostras foram importados na forma de tabela, onde cada linha contém todos os registros da concentração de gases de cada equipamento cadastrado, sendo importados, além das concentrações dos gases, dados de localização e código do equipamento, número e data da amostra.

A interface gráfica para a apresentação dos resultados foi desenvolvida em *PowerBI*, sendo apresentadas as visualizações com base na norma IEEE Std C57.104 [24], IEC 60599 [26] e uma visualização adicional onde são apresentadas graficamente as concentrações dos gases de forma individual, podendo ser selecionadas as amostras ou equipamentos desejados.

A Figura 6 apresenta o resultado das análises conforme a norma IEEE Std C57.104 [24], sendo o resultado da análise exibido em um gráfico bidimensional na forma de um triângulo, onde cada eixo representa a concentração relativa de um determinado gás. A área do gráfico tem regiões demarcadas conforme a condição de operação, seguindo a interpretação apresentada no Quadro 1. Esta metodologia possui como característica a ausência de regiões que indiquem a “Operação Normal” do transformador. Portanto, o “Triângulo de Duval” pode indicar falsos positivos, pois, independente da concentração de gases da análise físico-química, sempre uma região de falta será selecionada. Desse modo, é recomendável empregar o “Triângulo de Duval” como uma confirmação da interpretação da DGA pelo método descrito na IEC 60599 [26].



Quanto a configuração da interface, foram adicionados alguns recursos para facilitar a navegação do usuário, como:

- Botão com link para a aplicação principal (SGAT) e para navegação entre telas (Anterior e Próximo);
- Filtro “Localização” para selecionar um ou mais equipamentos com base em seu local de instalação;
- Filtro “Código do Transformador” para selecionar um ou mais equipamentos com base em seu código de identificação;
- Filtro por “Período de Análise” para restringir a exibição dos resultados a um determinado intervalo de tempo;
- Caixa com “Resultados da Pesquisa” contendo um resumo, na forma de texto, das faltas exibidas nos gráficos.

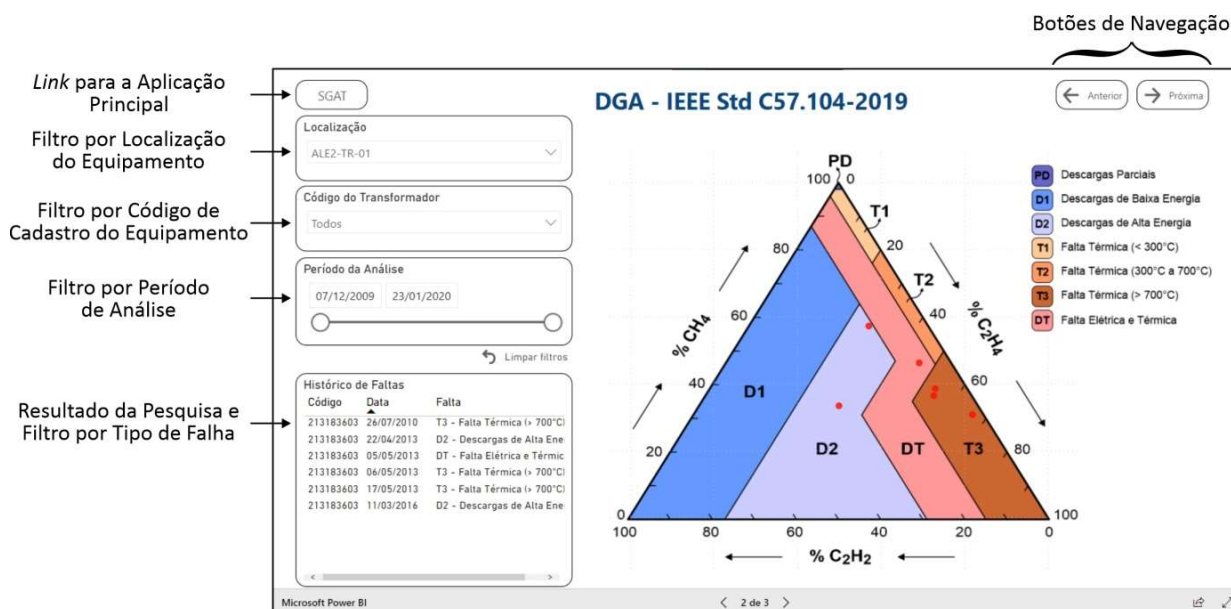


Figura 6 – Interface gráfica com resultados da DGA conforme a norma IEEE Std C57.104.

A Figura 7 apresenta a interface gráfica desenvolvida para a DGA conforme a norma IEC 60599 [26]. Cabe destacar que a norma apresenta duas formas de visualização dos dados, com possibilidade do uso de um gráfico tridimensional ou de dois gráficos bidimensionais. Para facilitar a visualização e interpretação dos dados, optou-se pela visualização através de dois gráficos bidimensionais, onde as áreas são demarcadas conforme a condição de operação do equipamento.

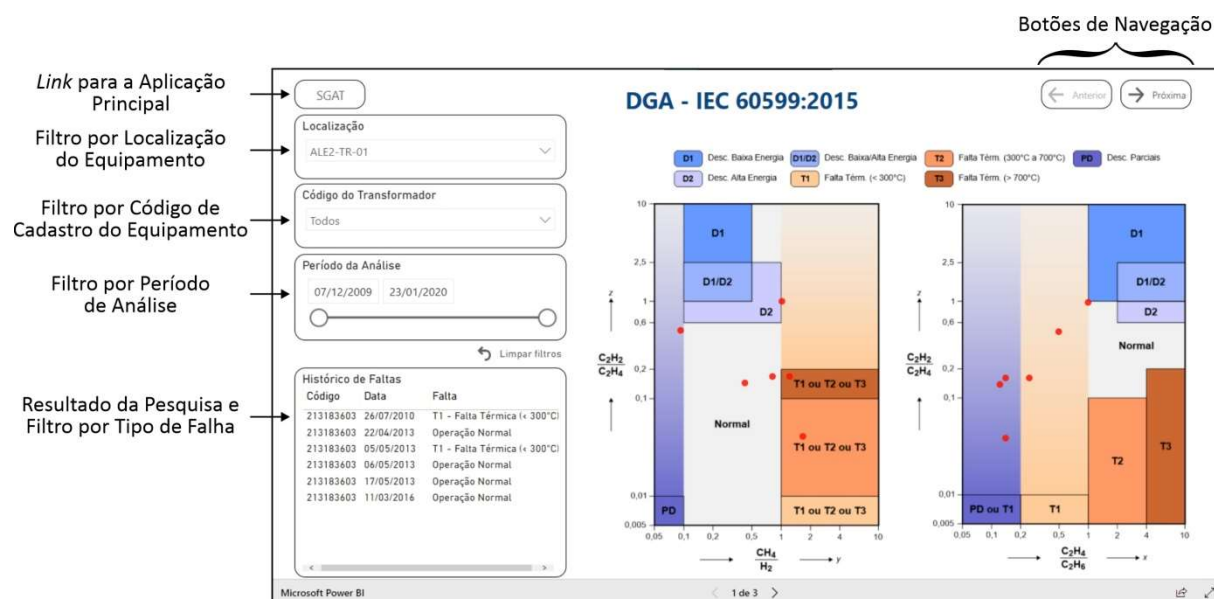
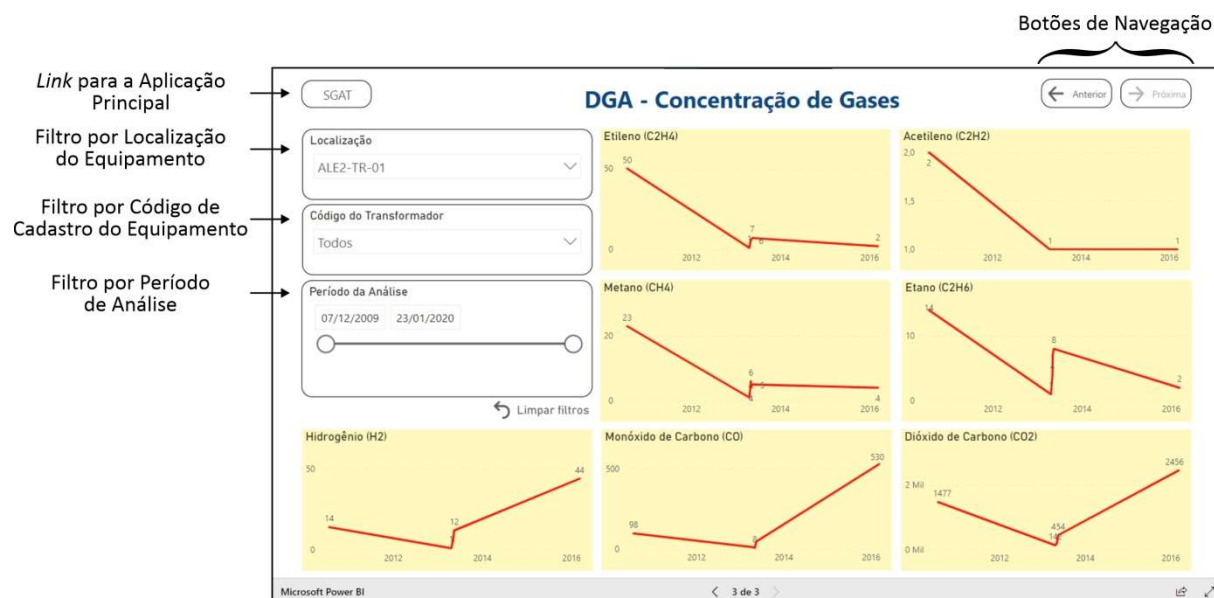


Figura 7 – Interface gráfica com resultados da DGA conforme a norma IEC 60599.

A utilização das duas visualizações permite ao usuário confirmar a condição de operação através de duas metodologias amplamente utilizadas para esse tipo de análise. Porém, caso o usuário necessite de maiores informações para analisar alguma inconsistência ou mesmo avaliar como os dados estão se comportando com o decorrer do tempo, a Figura 8 apresenta uma tela com os dados brutos coletados, apresentando a evolução da concentração de cada um dos gases, podendo ser aplicados filtros conforme a necessidade de verificação.



**Figura 8 – Interface gráfica com resultados da análise físico-química (dados brutos).**

Para facilitar a visualização dos dados, cada transformador é apresentado com os pontos (ou linhas) em uma cor distinta, permitindo comparação entre equipamentos. Além disso, um pop-up é exibido ao passar o cursor sobre o ponto de uma análise, mostrando os detalhes da amostra. Assim, chega-se a uma ferramenta completa que facilita a interpretação dos dados de gases dissolvidos, apresentando os resultados de forma clara e objetiva.

## 5.0 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta um sistema computacional amplo, abordando critérios técnicos e econômicos que podem auxiliar na gestão de ativos aplicada aos transformadores de potência. A metodologia foi desenvolvida para aplicação em qualquer concessionária de transmissão de energia elétrica atuante no Brasil, sendo necessárias apenas pequenas alterações na entrada dos dados para replicação do sistema, compatibilizando com os dados disponíveis em cada local. O sistema computacional ainda pode ser utilizado para outros equipamentos além dos transformadores de potência ou para concessionárias de outros países, bastando adequar os indicadores utilizados à realidade da aplicação e realizar consulta à especialistas com conhecimento da aplicação.

O sistema computacional desenvolvido traz importantes contribuições ao setor elétrico, principalmente ao segmento de transmissão, apresentando um sistema computacional amplo para gestão de ativos aplicada a transformadores de potência. Assim, o sistema apresentado nesse trabalho auxilia os gestores de concessionária na tomada de decisão sobre a gestão de seus equipamentos e a metodologia aplicada pode ser replicada e expandida, trazendo melhoria de desempenho e redução de custos em outras aplicações do setor.

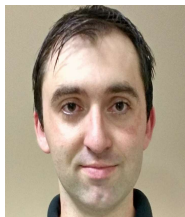
## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Lei n. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 de fev. de 1995.
- [2] BRASIL. Lei n. 9.074, de 07 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 de jul. de 1995.
- [3] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N° 443, de 26 DE JULHO DE 2011. Estabelece a distinção entre melhorias e reforços em instalações de transmissão sob responsabilidade de concessionárias de transmissão e dá outras providências. 2011.

- [4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N° 643, de 16 DE DEZEMBRO DE 2014. Altera a Resolução Normativa n° 443, de 26 de julho de 2011, altera a Resolução Normativa n° 435, de 24 de maio de 2011, aprova a Revisão 1.1 do Submódulo 9.7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET, revoga a Resolução Normativa n° 491, de 5 de junho de 2012, e dá outras providências.
- [5] ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A.; IBRAHIM, M. Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, issue: 4, Oct. 2012.
- [6] PEIMANKAR, A. et al. Evolutionary multi-objective fault diagnosis of power transformers. *Swarm and Evolutionary Computation*, Corrected Proof in Press, 2017.
- [7] WENZLER, I. Development of an Asset Management Strategy for a Network Utility Company: Lessons from a Dynamic Business Simulation Approach. *Simulation & Gaming*, 2005.
- [8] JAHROMI, A. N. et al. An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, n.2, mar./abr. 2009.
- [9] ALDHUBAIB, H. A.; SALAMA, M. M. A. A novel approach to investigate the effect of maintenance on the replacement time for transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, n.4, Aug. 2014.
- [10] TAKAHASHI, T.; OKAMOTO, T. Development of asset management support tools for oil-immersed transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016.
- [11] CAMPELO, F. et al. Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.10, ISS. 9. 2016.
- [12] ZHONG, J.; LI, W.; WANG, C. ; YU, J.; XU. R. Determining Optimal Inspection Intervals in Maintenance Considering Equipment Aging Failures. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016.
- [13] PIERSON, K.; BLANC. T. The Operational Determinants of Utility Pole Decay and Optimal Replacement in the Pacific Northwest. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016.
- [14] WANG, J.-J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009.
- [15] KAYA, I.; ÇOLAK, M.; TERZI, F. Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. *International Journal of Energy Research*. 2018.
- [16] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica: Regulamentação da Parcela Variável. Brasília, 23 Mar. 2006.
- [17] POWELL, C. The Delphi technique: myths and realities. *Journal of advanced nursing*, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 376–82, 2003.
- [18] MARQUES, J. B. V. et al. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. *Proposições*, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 389–415, 2018.
- [19] ACZÉL, J.; SAATY; T. L. Procedures for synthesizing ratio judgements. *Journal of mathematical Psychology*, v. 27, n. 1, p. 93-102, 1983.
- [20] RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; LACERDA, D. P.; REDISKE, G.; ROSA, C. B. A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects. *Solar Energy*. 2020.
- [21] BARBOSA, T. M.; FERREIRA, J. G.; FINOCCHIO, M. A. F.; ENDO, W. Development of an application based on the Duval triangle method. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 8, pp. 1439-1446, Agosto 2017.
- [22] STOCCO, M. B. C. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [23] DUVAL, M. A review of faults detectable by gás-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. v. 18, n. 3, pp. 8-17, Maio/Junho 2002.
- [24] IEEE Std C57.104™. IEEE Guide for the Interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers. 98 f. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.
- [25] ROGERS, R. R. IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, v. EI-13, n. 5, pp. 349-354, Outubro 1978.
- [26] IEC 60599. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Ed. 3. 82 f. International Electrotechnical Commission, 2015.



## DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria (2012), especialização em Eficiência Energética Aplicada a Processos Produtivos pela UFSM (2015) e mestrado em Engenharia de Produção (2018) pela mesma Instituição. Atualmente é Técnico Administrativo em Educação da UFSM, ocupando o cargo de Engenheiro Mecânico com atuação em projetos de sistemas de ar condicionado e especificação e orçamento de equipamentos e Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFSM, atuando na área de Gestão de Equipamentos de Transmissão de Energia.

## (2) DION LENON PREDIGER FEIL

Possui graduação em Engenharia Elétrica (2012) pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Atuou como professor substituto na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul. Atualmente é professor Adjunto no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul. Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em: Transformadores de Distribuição, Transformadores de Potência, Sistemas de Refrigeração e Desempenho Térmico de Transformadores, Eficientização de Transformadores e em inovações na área de Transformadores de Potência.

## (3) SANTOS PEDROZO VIANA

Santos Viana nasceu em 1914 em Uruguaiana, Rio Grande do Sul (Brasil). Graduou-se em 2012 em Gestão Comercial pelo Centro Universitário do Paraná e concluiu a especialização em Gestão de Projetos em 2014 pelo Centro Universitário do Norte do Paraná. Fundou, em 2003, a empresa Megatecnologia, desenvolvedora de softwares para projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em concessionárias de energia elétrica desde 2008.

## (4) RODINEI CARRARO

Engenheiro de Manutenção, atuando em área técnica de engenharia de manutenção especializada de transformadores de potência e de instrumentos. Atua como engenheiro coordenador da Manutenção de Transformadores, área que planeja, programa e executa manutenção especializada de transformadores de Potência, Corrente e Potencial, Comutadores, Buchas, e Subestação Móvel.

## (5) RICARDO JOCHANN FRANCESCHI BORTOLINI

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação (2015) e mestrado em Engenharia Elétrica (2018) pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente é gerente técnico do laboratório de ensaios de inversores fotovoltaicos da Universidade Federal de Santa Maria (INRI/UFSM). Atuando principalmente nos seguintes temas: conversores estáticos, sistemas fotovoltaicos, sistemas supervisórios e hardware-in-the-loop

## (6) RAFAEL CONCATTO BELTRAME

Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em 2008, 2009 e 2012, respectivamente. Em 2013, ingressou como Professor Adjunto no Departamento de Processamento de Energia Elétrica (DPEE) da UFSM, lecionando para os cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Automação, Engenharia de Computação e Engenharia de Produção.

## (7) TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Tiago Bandeira Marchesan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003- with first class honours) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) pela mesma Universidade, com estágio na Universidad de Oviedo, Espanha. É diretor do Centro de Tecnologia da UFSM desde 2017. Foi Coordenador de Transferência de Tecnologia da UFSM (2014-2017). Atua como Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CAPES conceito 6) e professor do Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência da mesma Universidade. É Pesquisador no Instituto de Redes Inteligente e Unidade EMBRAPPII.

## (8) RUBENS ALESSANDRO SELINKE

Rubens Alessandro Selinke, Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica, 2002. Pós-graduação em Finanças Corporativas pela Fundação Getúlio Vargas, 2009. Engenheiro Eletricista da AES Sul (1999-2001), CEEE (2001-2021) e CPFL Transmissão (2021 - Atualmente). Foi Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA.