

# Desenvolvimento de Novos Processos e Algoritmos para Avaliação da Vida Útil Remanescente Real de Transformadores para o Planejamento da Revitalização.

Carlos Eduardo Vizeu Pontes, Light Serviços de Eletricidade S/A - Rio de Janeiro - RJ, Gilcinea Rangel Pesenti, Light Serviços de Eletricidade S/A - Rio de Janeiro - RJ, David W. Sundin, Quantum Tecnologia e Inovação - Campinas - SP, Flávio Faria, Quantum Tecnologia e Inovação - Rio Claro - SP, José Mak, Quantum Tecnologia e Inovação - Campinas - SP, Newton José Guaraldo, Quantum Tecnologia e Inovação - Campinas - SP, Roberto Luiz Crespo Maciel, Quantum Tecnologia e Inovação - Campinas - SP, Victor Sokolov, Quantum Tecnologia e Inovação - Campinas - SP

**Resumo** – O artigo apresenta uma proposta de técnica e ferramenta computacional associada para estabelecimento da vida útil remanescente de transformadores de potência que permitam priorizar de ações de manutenção, que resultem em maior flexibilidade da operação e permitam reorientação nas necessidades de obras de reforço, considerando critérios técnicos e econômicos para investimentos em todos os níveis do sistema de alta e média tensão.

**Aspecto inovador:** a técnica proposta neste projeto tem seu ineditismo no fato de estar levando em consideração o estudo em campo e em banco de dados com resultados laboratoriais de amostras do sistema isolante de transformadores envelhecidos em serviço, para obtenção dos algoritmos de envelhecimento real até então estudadas isoladamente em condições laboratoriais que incluem e correlacionam os resultados laboratoriais físico-químicos, gás cromatografia, partículas, umidade, furfuraldeído, grau de polimerização (GP) e um gás cromatografia em nova base que não necessite de histórico e evolução dos valores.

**Palavras-chave** – Transformador de Potencia, Vida Útil, Papel Kraft, Sistema Isolante, Vida Útil Remanescente.

## I. INTRODUÇÃO

O projeto desenvolveu metodologia para implementar novos paradigmas técnicos na área de engenharia de sistemas elétricos através do estudo dos principais parâmetros que afetam o desempenho em longo prazo do sistema isolante de transformadores de potência instalados e em operação em subestações. O isolamento desses equipamentos é constituído principalmente por óleo e papel isolante Kraft atuando em condições adversas de preservação ao longo do tempo, denotadas pela presença de agentes nocivos tais como oxigênio e ácidos. O objetivo é avaliar a vida útil remanescente destes equipamentos de modo energizado, determinando as suas condições de servicibilidade de modo manter a capacidade nominal durante toda vida útil no sistema elétrico, a qualidade e

continuidade de serviços e obrigações da concessionária

A metodologia propõe o estabelecimento de novo processo de avaliação da vida remanescente real de transformadores de potência que permitirão identificar aspectos técnicos prioritários para a melhoria de resultados econômico-financeiros. Dentre algumas dessas variáveis técnicas críticas, pode-se citar a introdução de novos processos voltados para a extensão da vida útil de transformadores, associado à racionalização de despesas em manutenção; a implementação de processos de avaliação de riscos em razão do desgaste e do potencial de falhas de transformadores por envelhecimento e a utilização de modelos possibilísticos para aumentar a confiabilidade de transformadores.

A metodologia desenvolvida possibilita integrar os estudos de planejamento de curto, médio e longo prazo à minimização dos custos operacionais e de manutenção ao redirecionar e otimizar os investimentos para atendimento de novos paradigmas técnicos em substituição a antigos critérios pré-estabelecidos.

## II. METODOLOGIA.

O projeto se desenvolveu num período de dois anos. Inicialmente foi procedido um levantamento do estado da arte sobre transformadores de potência e dos algoritmos de cálculo de vida na literatura nacional e internacional relacionando os principais parâmetros para acompanhamento e diagnóstico da vida útil remanescente com o equipamento energizado baseados em dados de ensaios, de projeto, ciclos de temperatura e correlação dos dados com métrica de desgaste em transformadores protótipos e em materiais a partir de ensaios laboratoriais de simulação de envelhecimento acelerado.

Em seguida, na etapa 3, foi feito um levantamento de dados reais de ensaios de transformadores, através da força

tarefa contatando fabricantes, oficinas de reparo, concessionárias e entidades de pesquisas nacionais e internacionais, para levantar dados reais de transformadores envelhecidos em serviço ao longo do tempo, que pudessem permitir correlação dos parâmetros de maior potencial no estabelecimento da vida remanescente.

Em seguida foi estabelecida amostra representativa através do levantamento dos dados de um grupo de transformadores de potência da LIGHT classificados por famílias, que foram divididas por nível de tensão, tipo de sistema de conservação do óleo (conservação por membrana/sílica gel/nitrogênio) e faixa de potência.

Para fácil recorrência a esses dados foi feita também a montagem do banco de dados para permitir correlacionar as informações sobre transformadores avaliados e resultados de análises e ensaios disponíveis.

Na fase seguinte se procedeu a um estudo de correlações partindo do estudo dos modelos já desenvolvidos em condições laboratoriais (correlações/curvas pré-existentes na literatura) evoluindo de forma inovadora para adaptação desses modelos para condições reais de operação (novas e inéditas correlações/curvas estabelecidas nesse projeto), correlacionando temperaturas do sistema isolante sólido/líquido e os agentes de degradação.

Foi feita também a definição dos parâmetros válidos que foram utilizados para implementar os processos mais eficientes de diagnóstico de vida remanescente de transformadores e também a escolha dos excluídos.

Foi então desenvolvida uma nova ferramenta computacional com a inclusão dos novos algoritmos e parâmetros adequados, e implementados os processos de diagnóstico de vida remanescente de transformadores.

Testes foram efetivados para verificar a nova ferramenta computacional e para levantar possíveis problemas. Os problemas encontrados logo após a implantação do aplicativo foram resolvidos e o software passou por várias adequações durante os últimos 3 meses do projeto.

Foram avaliados os procedimentos funcionais dos novos processos sobre dados obtidos em campo, em amostras de famílias típicas de transformadores preservadas a sílica, as preservadas por bolsa/membrana e as preservadas por nitrogênio.

Para conclusão do projeto foi feita avaliação conjunta de seus produtos pela equipe de pesquisadores juntamente com profissionais da concessionária da Área de Manutenção e da Área de Tecnologia da Informação. Desde a fase de implantação do software no sistema da concessionária foi procedido o treinamento do pessoal envolvido.

O desenvolvimento do projeto contou com o acompanhamento de profissionais da concessionária durante todo o seu desenvolvimento, sendo divulgados seu andamento e seus resultados através de dois workshops internos.

Resumo das Etapas que foram estabelecidas por essa metodologia:

Estado da arte sobre vida útil de Transformadores de Potência;

Estado da arte sobre algoritmos;

Levantamento de dados reais de envelhecimento de transformadores em operação;

Estabelecer amostra representativa;  
Montagem do banco de dados;  
Estudo de novas correlações;  
Workshop interno.  
Definição dos parâmetros adequados para implementação;  
Confecção de software;  
Diagnóstico de vida remanescente de transformadores;  
Avaliação dos resultados;  
Avaliação em caso de determinação de não conformidades  
Treinamento, implantação e divulgação do projeto.

### III. RESULTADOS DO PROJETO.

Processo inédito voltado para avaliação da vida útil remanescente de transformadores de potência que permite priorizar ações de revitalização ou reposição dos mesmos.

Até o início desse projeto o setor elétrico dispunha do valor do Grau de Polimerização do transformador através de amostra de seu papel isolante e tinha uma curva empírica que correlaciona GP X Tempo obtida em laboratório, através de envelhecimentos simulados. Assim, uma extrapolação entre o dado e o fim da vida não dava a confiabilidade suficiente para inferir de modo determinístico (para equipamentos envelhecidos em serviço) a sua vida remanescente.

Foram gerados novos algoritmos de correlação de GP ou 2FAL com o ponto determinante da falha de transformador (entrada dos lides de alta tensão) por fim de vida, com base em dados reais em transformadores envelhecidos em serviço. Pode-se agora, de maneira confiável, determinar o quanto tempo de vida resta para o transformador.

Também no âmbito do desenvolvimento do projeto foi criado um novo aplicativo/software para estabelecimento da vida útil remanescente de transformadores de potência.

### IV. NOVOS ALGORITMOS.

A melhor informação e mais confiável para estimar a vida remanescente do transformador das subestações de distribuição 132-13,8kV, como os da Light, é o valor do grau de polimerização (GP) no ponto de saída dos enrolamentos de alta tensão (AT), local de maior solicitação dielétrica e mecânica, onde ocorre falha entre espiras durante esforços de curto circuito na rede, característica de fim de vida.

O conhecimento desse valor proporcionaria que se faça a análise da vida remanescente do transformador ao se entrar com o valor do GP na fórmula específica validada pelo Cigré e explicitada mais à frente.

Não havendo a disponibilidade dessa informação seria necessário então dispor-se dos valores de GP correspondentes aos pontos dos rabichos das buchas de AT, o que só se obteria através de amostragem de papel; necessariamente com o desligamento e abertura do transformador. Ou utilizando-se as correlações obtidas no desenvolvimento desse projeto, e apresentadas abaixo:

- Correlação entre Grau de Polimerização (GP) na saída do Enrolamento de Alta Tensão com o GP no Rabicho da Bucha para transformadores com sistemas “Aberto”, com Sílica.

$$y = 0,999x + 52,374$$

sendo X – GP Saída AT e Y – GP Rabicho.

Correlação entre Grau de Polimerização na saída do Enrolamento de Alta Tensão com o GP no Rabicho da Bucha de transformadores com sistema do tipo selado com Bolsa/Membrana.

$$y = 1,1797x + 6,6067$$

sendo X – GP Saída AT Y – GP Rabicho

- Correlação entre Grau de Polimerização (GP) na saída do Enrolamento de Alta Tensão com o GP no Rabicho da Bucha para transformadores com Sistema Selado a Nitrogênio.

Não tendo sido obtidos elementos suficientes para a curva de correlação entre os GP's para essa família de transformadores utilizou-se a curva de todos os transformadores com dados de campo disponíveis, uma vez que a curva de todos os transformadores é mais conservativa do que a curva específica, para esse caso.

$$y = 1,0044x + 50,164$$

sendo X – GP Saída AT Y – GP Rabicho

Não havendo a disponibilidade de nenhuma informação de GP (a partir de ensaios de papel) serão utilizados como primeira alternativa os resultados de ensaios de 2FAL. E esse caso, utilizando-se as correlações obtidas no desenvolvimento desse projeto, e apresentadas no Relatório da Etapa 6, itens 4.5,4.6 e 4.7 ou 4.8:

Nesse caso os parâmetros necessários a ser usados são os valores de teor de 2FAL obtidos de ensaios no óleo isolante dos transformadores.

- Correlação entre Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão com o Furfural – Transformadores com Sistema “Aberto”, com Sílica.

$$y = 666,43e^{-0,338x}$$

Sendo X – Furfural Y – GP Saída AT

- Correlação entre Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão com o teor de furfuraldeído para Transformadores com Sistema Selado com Bolsa/Membrana.

$$y = 596,05e^{-0,2208x}$$

Sendo X – Furfural Y – GP Saída AT

- Correlação entre Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão com o teor de furfuraldeído para Transformadores com Sistema Selado a Nitrogenio.

Não tendo a curva de correlação entre o GP e o 2FAL para essa família de transformadores pode-se utilizar a curva de todos os transformadores, uma vez que a curva de todos os transformadores é mais conservativa do que a curva específica, para esse caso, assim:

$$y = 647,06e^{-0,3034x}$$

Sendo X – Furfural Y – GP Saída AT

Não havendo a disponibilidade de nenhuma informação de GP (a partir de ensaios de papel) e nem dos resultados de ensaios de 2FAL, deverá ser utilizada a idade e as correlações com o GP obtidas no desenvolvimento desse projeto.

- Correlação entre Idade e o Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão para Transformadores com Sistema “Aberto”, com Sílica.

$$y = -9,222\ln(x) + 76,44$$

Sendo X – GP Saída AT Y – Idade

- Correlação entre Idade e o Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão para transformadores com Sistema Selado com Bolsa/Membrana.

$$y = 1,1116\ln(x) + 22,668$$

Sendo X – GP Saída AT Y – Idade

- Correlação entre Idade e o Grau de Polimerização (GP) no ponto de saída do Enrolamento de Alta Tensão para Transformadores com Sistema Selado a Nitrogenio.

Não tendo a curva de correlação entre a Idade e o 2FAL para essa família de transformadores pode-se utilizar a curva de todos os transformadores. Uma vez que a curva de todos os transformadores é mais conservativa do que a curva específica, para esse caso, assim:

$$y = -8,4283\ln(x) + 72,888$$

Sendo X – GP Saída AT Y – Idade

Outras correlações possíveis que foram preparadas para

ser utilizadas para cada família referem-se aos parâmetros idade correlacionada com o 2FAL, obtidas no desenvolvimento desse projeto:

- Correlação entre Idade e o teor de furfural para Transformadores com Sistema Aberto, com Sílica.

$$y = 3,9316\ln(x) + 21,963$$

Sendo X – Furfural Y – Idade

- Correlação entre Idade e o teor de furfural para Transformadores com Sistema Selado com Bolsa/Membrana

$$y = 1,1992\ln(x) + 21,491$$

sendo X – Furfural Y – Idade

- Correlação entre Idade e o teor de furfural para todos os Trafos

$$y = 3,0188\ln(x) + 21,642$$

Sendo X – Furfural Y – Idade

Fórmula para o cálculo da vida remanescente a partir do grau de polimerização.

Obtido o valor de GP, seja diretamente de resultados de ensaios em amostras do papel isolante, seja indiretamente com recurso aos parâmetros e pelas correlações acima, pode-se então entrar com esse dado na fórmula já disponível; conforme recomendado pela força tarefa do CIGRE WG 12.18 "Life Management", incumbido pelo CIGRE internacional para estabelecer processos de gerenciamento de vida para transformadores de potência, a vida útil remanescente pode ser calculada pelos seguintes algoritmos:

$$Vida (horas) = \frac{1}{\frac{1}{200} - \frac{1}{Dp}} \cdot \frac{1}{K}$$

Onde Dp = GP Atual

$$K \cong \frac{1}{\frac{1}{Dp} - \frac{1}{1100}} \cdot \frac{1}{t}$$

- k estabelecido para diversas temperaturas e condições operativas:

- K varia com o ponto de amostragem (temperatura) e altura em relação ao ponto dentro do transformador

- isso permite associar o valor de 2FAL (que é uma média de todo o sistema isolante) com um ponto específico no isolamento sólido (papel) – que, para efeito desse estudo e desse projeto tem como ponto ideal localizado na saída de enrolamento de AT.

Tabela 1 - Determinação do fator k

Amostra	GP Atual	GPo Novo	1/GPAtual – 1/GPNovo	k	Temperatura e Condição Estimada
LV1-LV2 Topo	320	1100	0.00221	2.52 10-8	Média 90C Óleo ácido
LV1-LV2 Fundo	420	1100	0.00147	1.68 10-8	Média 70C Óleo ácido
HV1 Topo	550	1100	9.09 10-4	1.03 10-8	Média 70C
HV1 Topo	600	1100	7.57 10-4	8.64 10-9	

Assim, para um transformador com 350 de GP, com carga alta ao longo de sua vida operativa e óleo com acidez próxima ao limites recomendados:

$$Vida = \frac{1}{\frac{1}{200} - \frac{1}{1100}} \cdot \frac{1}{2.52 \times 10^{-8}} \cong 18.5 \text{ anos}$$

Vida útil prevista nestas condições operativas

$$Vida Residual \cong \frac{1}{\frac{1}{200} - \frac{1}{350}} \cdot \frac{1}{2.52 \times 10^{-8}} \cong 9.7 \text{ anos}$$

Vida remanescente prevista se persistirem estas condições operativas.

#### V. NOVO APLICATIVO AVAL-EQUIP.

O nome dado ao novo sistema ou ferramenta computacional foi AVAL\_EQUIP (Figura 1), tendo sido contemplado o acesso via Internet/Intranet através do Browser Internet Explorer 6.0 ou superior.

A segurança do sistema foi integrada à segurança da Light através do uso do Active Directory da própria concessionária. A segurança se dá através de grupos de acesso, as permissões foram configuradas nos grupos e não nos usuários, após configuração do grupo indicam-se para o sistema quais usuários pertencem àquele grupo. A segurança foi dividida nos seguintes níveis de acesso: não acessa, acessa somente para consulta, acessa somente inclusão, acesso completo.

A navegação do sistema foi distribuída em duas partes: um menu horizontal com as funcionalidades do sistema e uma árvore de acesso no painel esquerdo da tela com os equipamentos instalados.



Figura 1

A árvore (à esquerda) terá três formas de visualização/organização:

Órgão/Localidade/Posição

Órgão/Localidade/Posição/Código de Identificação

Órgão/Localidade/Posição/Número de Série/Código de Identificação.

Sistema de Conservação de Óleo (sílica-gel, membrana, bolsa de nitrogênio)

Tipo do óleo isolante do equipamento.

Tipo do papel isolante do transformador.

Tipo de resfriamento.

Estado do transformador, ocorrências e intervenções.

Fabricante e Modelo do transformador, características, fotos, computador.

Registro dos resultados de ensaios.

Todas as telas de cadastro são dotadas de um campo “observação”.

A documentação do sistema é por tela do sistema, cada tela tem um ícone que irá carregar a ajuda daquela tela.

Os relatórios de saída podem, além de visualizados na tela, serem exportados nos formatos Excel e PDF;

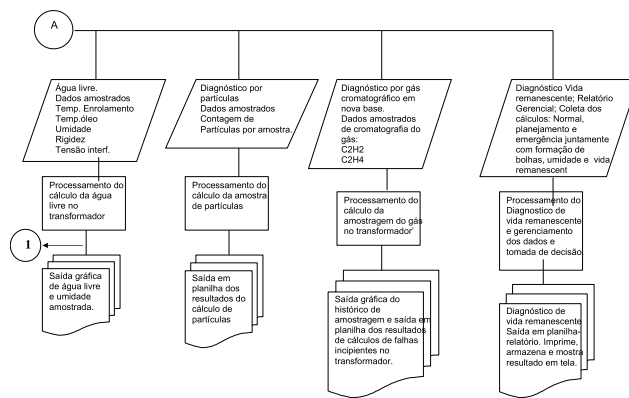
A tela de cadastro de localidade dispõe de um botão onde através da longitude e latitude poderá ser visualizada no mapa através do Google Maps.

As telas de ensaios seguem a ordem: gases; físico-químico; furfuraldeído; enxofre corrosivo; dbds; toluetriazol; pcb(método a) , pcb(método b); e demais ensaios na ordem em que estiverem na tela de captura.

Para a análise de gases foram incluídos também: critério IEC – 599/78 / ABNT – NBR – 7274, critério de Rogers, critério de Duval e critério de Donemburg.

Em um campo denominado “movimento” (do equipamento transformador) será possível localizar facilmente um equipamento pelo id, código identificação, identificador opcional, número de série, data de fabricação, ou data de início de operação.

O Fluxograma 1 a seguir apresenta toda a extensão da nova ferramenta desenvolvida.



Fluxograma 1

## VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Pode-se concluir que a gás cromatografia de produtos de decomposição do sistema isolante, análise de Furfurais presentes em óleo isolante, análise físico-química de amostras de óleo isolante e grau de polimerização de amostras de papel isolante são os candidatos mais fortes para ações e investimentos de pesquisa na busca da vida útil remanescente de transformadores.

A análise de furfural e físico químico em óleo isolante já estão suficientemente desenvolvidas e já são utilizadas por concessionárias do mundo todo. A gás cromatografia focada em CO e CO2 precisa ser melhor potencializada.

A análise do Grau de Polimerização de papéis isolantes esbarra na possibilidade de ser realizada com equipamento energizado. Esse projeto de P&D investiu em obter correlações deste parâmetro com uma ou mais das medições acima referenciadas de modo a dispensar o desligamento do transformador.

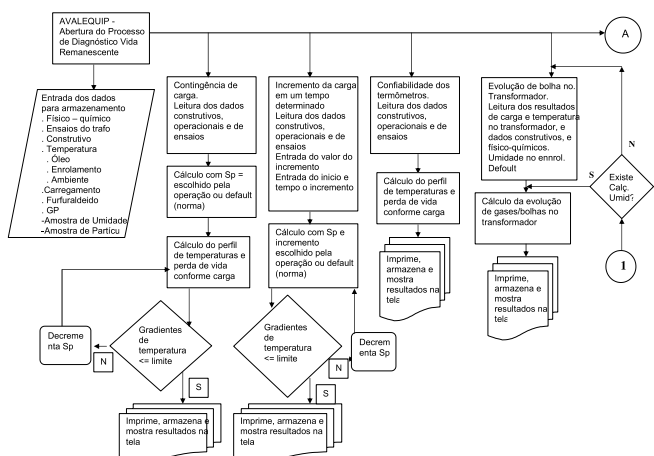
Nos transformadores de tensão nominal de até 145kV, com ou sem comutador de derivações em carga, amostras de papel isolante devem ser extraídas da região próxima dos terminais do sistema de isolamento principal. Que estão submetidas às temperaturas mais quentes do óleo, temperatura que se aproxima da temperatura média do enrolamento, e às mesmas concentrações de oxigênio e água da região dos terminais.

A maioria dos dados obtidos sobre ensaios de GP em amostras de papel referem-se a transformadores com sistema de preservação do tipo “aberto” com respiro através de sílica-gel.

Recomenda-se, em toda oportunidade que se apresentar, coletar quantidades de dados para suporte de 3 famílias de transformadores, por tipo de sistema de preservação: a) selado a nitrogênio (N2), b) selado com utilização de membrana ou bolsa, c) aberto com respiro através da sílica-gel.

## VII. REFERÊNCIAS.

[01] V. Sokolov, "Consideration in Transformer Life Management - a View from Abroad", Proceedings of the TechCon '99 Annual Conference, TJ/H2b, February 18-19, 1999, New Orleans, LA.



- [02] V. Sokolov, "Consideration on Power Transformer Condition based Monitoring", Proceedings of the VII EPRI Conference, New Orleans, 2000.
- [03] V. Sokolov, A. Bassetto, T.V. Oommen, T. Hauptert and D. Hanson, "Transformer Fluid: A Powerful Tool for the Life Management of an Ageing Transformer Population" In: TECHCON 2001, Mesa, Arizona, 2001. Anais. Sacramento, TJ/H2b, 2001
- [04] F. A. Bassetto, J. MAK ET AL. "How the Products from Insulating Oil Degradation Can Affect the Life of Transformers," CIGRE Paper 12- 104, 1992.
- [05] F. A. Bassetto and J. Mak, "Technical, economic and strategic loading issues involving the exploitation of power transformers: a proposal or the new millennium". In: TECHCON 2000, Mesa, Arizona, 2.000.
- [06] F. A. Bassetto, J. Mak, T. J. Hauptert, D. Hanson and M. Moraes, "Diagnostic Assessment of the Condition of the Insulation Systems in Power Transformers", Proceedings of the VII EPRI Conference, New Orleans, 1999.
- [07] F. A. Bassetto, J. Mak ET AL. "New software program for calculating the revenues from a more aggressive loading policy and the service reliability of power transformers". In: Techcon 97, Nova Orleans, 1.997. Anais. Sacramento, TJ/H2b, 1997.
- [08] ABNT NBR 5416/96. "Norma Brasileira de Procedimentos Para Carregamento de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante, Item 6.6.3. Revisão de 1996.
- [09] V. L. A. Silva, C. L. S. Vieira, "Correlação dos Critérios para Avaliação do Envelhecimento Térmico de Equipamentos Elétricos", XI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ/GEM/16, 1991