



IX WORKSPOT
WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA, EQUIPAMENTOS, SUBESTAÇÕES E MATERIAIS

Desenvolvimento de Sistema Especialista para Gerenciamento de Transformadores instalados em Subestações	
Carlos Alves da Silva, Adonias Pereira da Silva Júnior, Rodrigo Lira Prado Borges	
carlos.alves@eletropaulo.com.br	
Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A	
Brasil	
A2	
PS2	
Esta linha é para uso CIGRÉ	Esta linha é para uso CIGRÉ

RESUMO

As mudanças no sistema elétrico proporcionaram o desenvolvimento de novas formas para gerenciar os ativos, através da aplicação de tecnologias que, associadas à inteligência embarcadas em softwares, possibilitam a preservação e aumento da vida útil.

Tradicionalmente, as ferramentas de gerenciamento dos ativos são geridas de forma descentralizada, em centrais de operações, nas áreas de manutenção e etc., cujas análises de dados são realizadas individualmente, desconsiderando outros dados relevantes. Mas, exigências do público de relacionamento, tais como, o poder público, clientes, órgãos regulatórios, têm levado os gestores a analisar os dados e tomar decisões mais assertivas.

Muitas vezes as variáveis disponíveis para análise demandam uma grande quantidade em horas, sendo que o desenvolvimento de um sistema especialista como ferramenta computacional se apresenta como uma solução para a previsão de eventos, celeridade na ação e confiabilidade da operação.

A arquitetura deste projeto prevê a instalação de um software em servidor da distribuidora de energia, capaz de monitorar todos os ativos.

O projeto permitirá a integração de novos ativos à medida que estes sejam dotados de sensores e integrados a uma ferramenta computacional, possibilitando a realização de diagnósticos e prognósticos e permitindo à concessionária gerir seus ativos com mais propriedade.

PALAVRAS CHAVE

Sistema especialista, Redes Neurais, Inteligência Artificial, SCADA, OMS, SAP, Dashboards, Integração com sistemas legados

1. Introdução

Com a desregulamentação do setor elétrico as distribuidoras de energia devem ter um conhecimento profundo de seu sistema e ter ferramentas ágeis para o estudo de manobras, contingências, ações e estratégias com vistas ao fornecimento de energia elétrica.

Entretanto, a maioria das distribuidoras possuem modelos de análise de gerenciamento “off-line” baseados em apontamento de campo e/ou dados históricos calculados.

Porém, um controle eficaz e a governança dos ativos pelas distribuidoras são essenciais para obter valor por meio do gerenciamento, a fim de atingir o equilíbrio desejado entre o investimento e o desempenho (lucro).

Adicionalmente, os ambientes regulatório e legislativo nos quais as distribuidoras operam são cada vez mais desafiadores, e os riscos inerentes que muitos ativos apresentam estão em constante evolução.

Por outro lado, os constantes avanços tecnológicos tem possibilitado o desenvolvimento de máquinas e equipamentos utilizados no sistema de distribuição de energia, cada vez mais sofisticados.

Também, com o desenvolvimento de novas ferramentas de gerenciamento, a operação das subestações não se baseia somente na ação manual do homem, o qual se apoiava aos sentidos para tomar decisões, mas em equipamentos e sistemas totalmente automatizados e instrumentados, dotados de vários sensores e atuadores que auxiliam nessa tomada de decisões.

Quando em operação, os ativos devem ser preservados através de um plano de manutenção assertivo. Mas, o termo manutenção evoluiu muito com o advento da automação industrial e deixou de ser um simples conceito de reparação ou de uma reação quando um equipamento falhava ou avariava, para algo muito mais complexo que envolve ações estudadas e planejadas a fim de evitar avarias ou até mesmo tentar prever paradas, antes mesmo de acontecerem, aumentando assim a “vida útil” dos equipamentos instalados nos diversos sistemas de potência.

Nesse novo conceito de manutenção, aplicada na prevenção da necessidade de reparos ou não de um determinado equipamento, surge o conceito de gerenciamento de ativos, definido através da aplicação de técnicas de manutenção com a finalidade de melhorar a qualidade nos processos produtivos e ainda diminuir os custos de manutenção.

O conceito de gerenciamento de ativos está diretamente ligado tanto à manutenção preditiva, descrito como o conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção.

Nos últimos anos a manutenção alcançou o seu nível mais elevado, de forma que são realizados estudos a respeito do tempo de vida útil do componente a fim de determinar o período, no qual ocorrerá a sua falha, realizando apenas a manutenção necessária, tornando assim os custos de manutenção menores.

Atualmente, além de se estudar o tempo de vida útil do equipamento, também se busca encontrar os motivos pelos quais este equipamento apresente falha, buscando assim aumentar o seu tempo de vida útil, o que engloba o conceito de manutenção proativa, caracterizada como sendo o próximo estágio da manutenção industrial, onde além de estudar o desempenho do equipamento a fim de prever quando ele apresentará uma falha, também são estudados os motivos que levam a degradação desse equipamento aumentando assim o seu tempo de duração [1].

Desta forma, este artigo visa apresentar os aspectos que levaram a maior distribuidora do Brasil em termos de energia distribuída, responsável pelo atendimento de 24 municípios, constituídos de vinte milhões de pessoas, através de 43.000 metros de redes, suprimos pela potência instalada de 14.372 MVA, a buscar novas ferramentas de gerenciamento dos ativos [2], bem como a aplicação de tecnologias ao seu parque de ativos, com auxílio de um sistema especialista dotado de capacidade de efetuar a monitoração em tempo real de todo o parque de transformadores de potência e, futuramente, dos demais ativos, acompanhando as condições operativas e servindo assim, de suporte nas decisões às áreas de Planejamento, Operação, Manutenção e Engenharia.

2. O sistema especialista e suas características

O Sistema Especialista determinará a condição atual de um equipamento, identificará os problemas, através de uma variedade de métodos (tendências, limites, variação de mudanças, correlação estatísticas e teorias probabilísticas), oferecerá recomendações para ações corretivas e determinará o tempo em que estas ações deverão ser tomadas, de forma a prevenir falhas críticas ao equipamento.

Esta será a primeira solução completamente operativa do setor elétrico, pois oferecerá uma visão completa da condição e criticidade de toda a frota de ativos independente da classe ou fabricante.

Isso facilitará uma mudança fundamental de paradigma – de manutenção periódica ou manutenção baseada em tempo para uma estratégia de manutenção mais proativa baseada na condição do ativo e risco. Além disso, o Sistema Especialista permitirá a distribuidora identificar a importância relativa de um equipamento em relação aos demais equipamentos de uma determinada subestação ou de toda a área de concessão, de tal maneira a priorizar o plano de manutenção com base em uma subestação ou de maneira interconectada.

Adicionalmente, o monitoramento de condição, às análises preditivas, diagnósticos prescritivos utilizando modelagem é um tema complexo, mas o sistema especialista simplificará ao gestor a compreensão da “saúde” de um determinado ativo, apresentado de maneira gráfica e intuitiva a sua condição, probabilidade de falha contra a sua criticidade ou nível de importância (risco), conforme ilustra a figura 1:

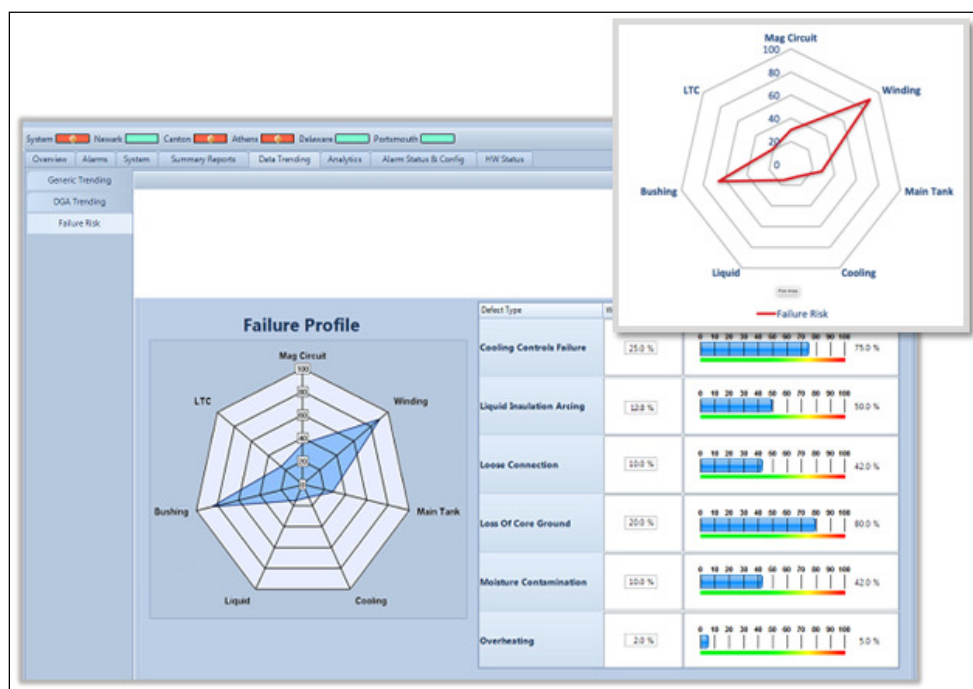


Figura 1. Ilustração do modelo de cálculo de risco de falha

Além disso, oferecerá os benefícios descritos a seguir:

2.1 Otimização da Manutenção e Monitoramento de Condição

O sistema especialista estabelecerá as bases para otimização da manutenção baseada em condição e risco para todo o portfólio de ativos. Ao recomendar ações de manutenção baseadas nas condições de um ativo e determinar um prazo onde esta ação deva acontecer permite ao planejamento de manutenção possa alocar recursos com mais eficiência com relação a qual ativo manter e quando. Isso tem um enorme ganho de eficiência em termos de gerenciamento de serviços e gastos associados. O sistema especialista utilizará o

conhecimento e experiência adaptável que prioriza os serviços baseados em fatores que Incluirão urgência, custos e benefícios de uma determinada atividade.

Ainda, no contexto da manutenção, o sistema será composto de uma tela individual para cada transformador contendo as seguintes funcionalidades:

- a) Alarme ativo: Permitirá o reconhecimento dos alarmes com inserção do responsável, data e providencias tomada, bem como, a exportação dos dados armazenados. Para os alarmes de desligamento ou condições emergenciais que levem a situação de risco operativo ao transformador, deve ser previsto o envio de alertas a usuários especificados (email e SMS - *Short Message Service*);
- b) Planejamento e programação da manutenção: Os alarmes reconhecidos pelo usuário responsável, cuja providencia envolva intervenções da equipe de manutenção serão enviados ao sistema supervisorio SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*, no qual, uma interface existente entre o sistema SCADA e o sistema corporativo de gestão da manutenção (SAP - *Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung*) deverão proporcionar que este receba e emita as respectivas ordens de serviços para executar as intervenções [3]. A figura 2 apresenta a arquitetura do sistema de gerenciamento;

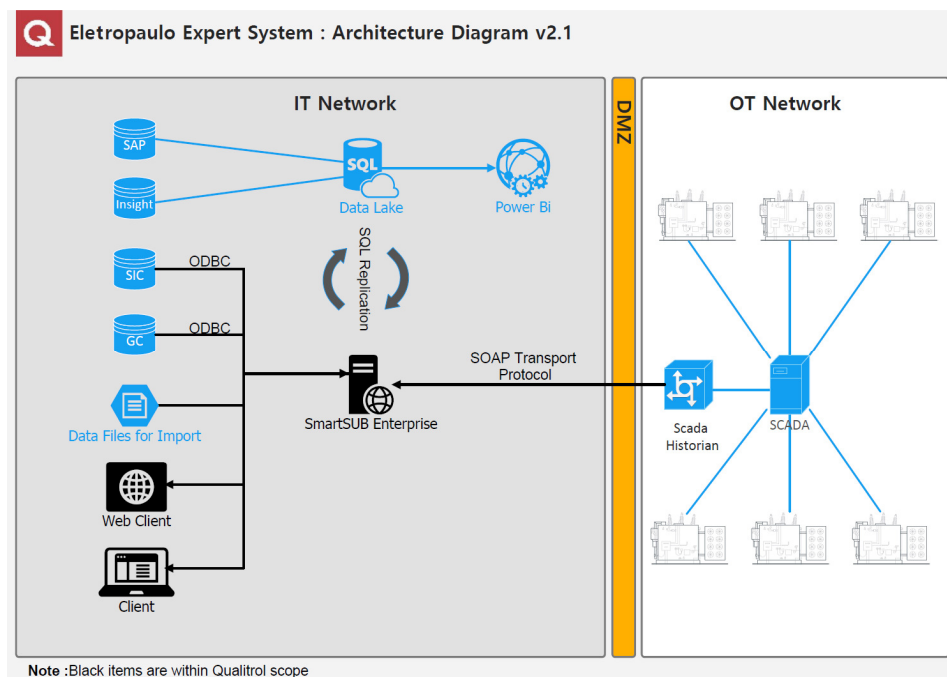


Figura 2. Arquitetura do sistema de gerenciamento

- c) Gestão de risco: O módulo de manutenção será contemplado de uma ferramenta para avaliação de criticidade e priorização dos transformadores monitorados permitindo definir planos e estratégias de manutenção e modernização do sistema.

2.2 Otimização de Planejamento de Renovação

A funcionalidade de planejamento e otimização serão projetados para suportar a estratégia de substituição/atualização de ativos, sendo que configurações específicas permitirão que a distribuidora customize as recomendações de investimentos futuros de renovação direcionando a um plano de investimento de renovação otimizado.

O sistema especialista poderá gerenciar e acompanhar as ações necessárias para cada recomendação, sendo que a integração padronizada com o SAP permitirá a criação de notas e/ou solicitações de serviço e bem como o rastreamento de ordens de serviço quanto o seu status e datas.

2.3 Informação Colaborativa

Além dos vários *dashboards* e informações que o sistema disponibilizará, conforme ilustrado na figura 3, a distribuidora poderá expandir a solução desenvolvendo seus próprios *dashboards* através do *Microsoft Power BI – Business Intelligence* e técnicas de mineração de dados para aprender com os dados históricos de operação e desenvolver vários perfis operacionais normais para cada equipamento específico. Os perfis operacionais aprendidos deverão então ser usados na comparação com os dados em tempo real para detectar alterações sutis no comportamento do ativo.

O sistema também fornecerá os meios para que os usuários acessem os dados pela exibição de gráficos e interface amigável do usuário, além de fornecer um gerenciador de alarmes, sistema de notificação por e-mail e recursos de análise e diagnóstico para identificar os motivos de um desempenho anormal.

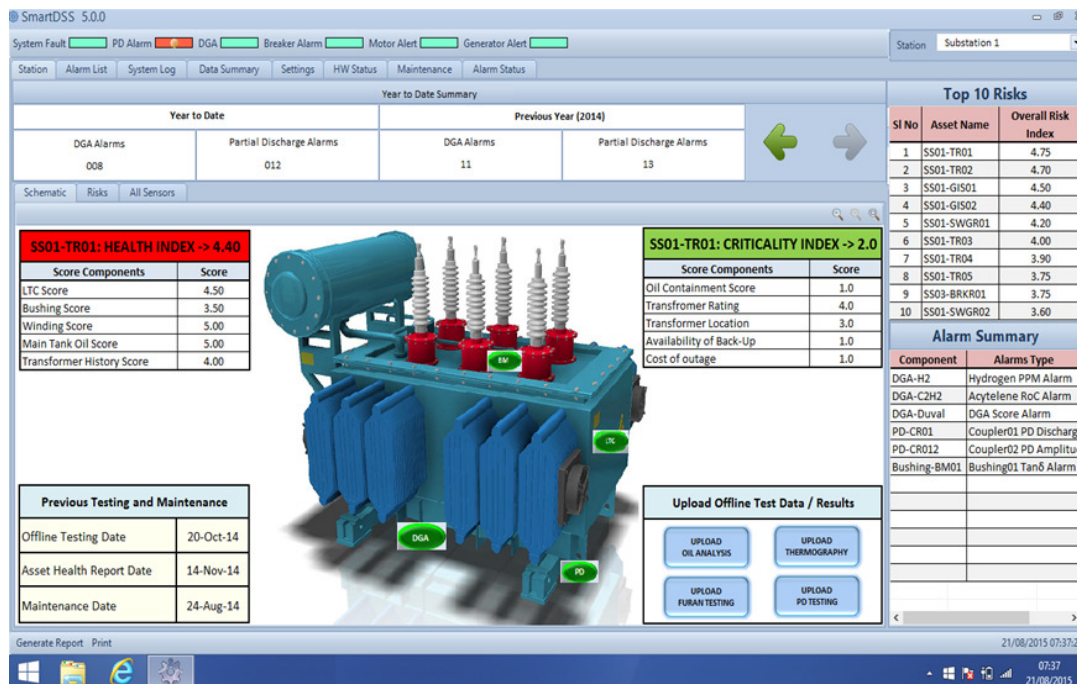


Figura 3. *Dashboard* do Planejamento da manutenção

Também, novos *dashboards* e relatórios poderão ser facilmente definidos e incorporados ao sistema especialista em minutos, permitindo que a distribuidora seja autossuficiente na expansão e melhoria da solução “Sistema especialista”.

O sistema especialista possibilitará a distribuidora desenvolver e expandir os modelos de análise através de codificação pelas funcionalidades *Microsoft Azure Machine Learning*. Os modelos aprimorados e estendidos permitirão que a distribuidora incorpore uma ferramenta de autodiagnóstico para cada modelo de engenharia para que os algoritmos possam ser recalibrados conforme suas necessidades.

2.4 Algoritmos e Diagnósticos

O módulo de engenharia do sistema especialista conterá os algoritmos e modelos matemáticos necessários para efetuar o diagnóstico das condições operativas de um determinado transformador e permitir elaborar prognósticos e simulações para condições futuras e hipotéticas. Dentre eles:

- a) Cálculo das temperaturas de óleo e de enrolamento, conforme o método de equações diferenciais, cujo diagrama é apresentado na figura 4 [4];

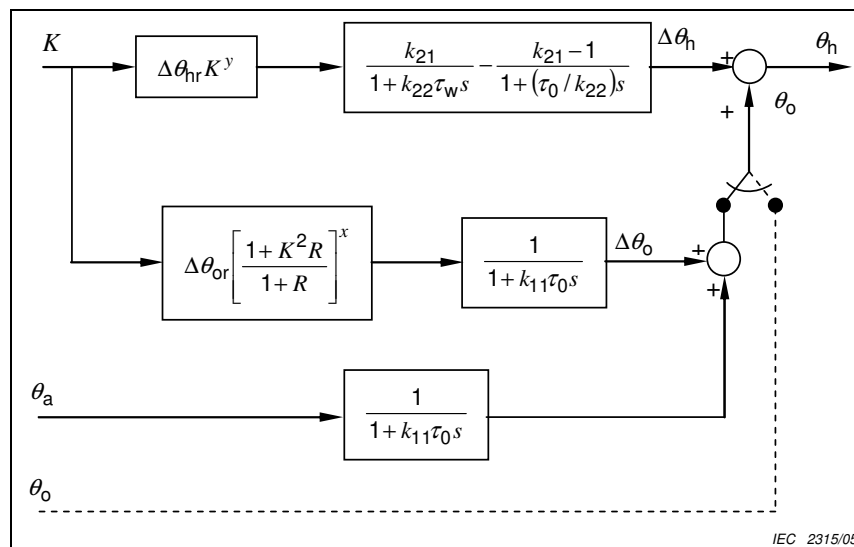


Figura 4. Representação do diagrama de blocos das equações diferenciais

- b) Cálculo da umidade na isolação em função da umidade e temperatura do óleo conforme Fabre & Pichon;
- c) Avaliação da formação de bolhas nos transformadores em operação conforme Lei de Henry;
- d) Cálculo da taxa de envelhecimento e perda de vida para transformador com papel termoestabilizado e não termoestabilizado [5], [6];
- e) Cálculo da vida útil com base no grau de polimerização e norma vigente [4];
- f) Algoritmo para avaliação de risco operativo do transformador baseado nas informações de vida remanescente, carregamento, curto circuitos externos, condições de manutenção, evolução de gases, teor de umidade, etc.;
- g) Algoritmo para avaliação da regulação de tensão com base no número diário de operações do OLTC – *On Load Tap Changer*, nível de variação de tensão no sistema, tempo de permanência na derivação etc.;
- h) Algoritmo para avaliação das temperaturas medidas e do sistema de resfriamento do transformador baseado nas temperaturas calculadas, operação do sistema de resfriamento forçado, etc.[7];
- i) Algoritmo para avaliação do OLTC com base no número de operações, desgaste dos contatos, curva característica do mecanismo de acionamento, umidade e gradiente de temperatura do óleo, óleo do transformador e etc.

Com base nestes algoritmos, modelos e das informações disponíveis, a tela do módulo de engenharia deverá permitir a obtenção das seguintes condições, através de telas específicas para cada transformador:

- Carregamento admissível do transformador nas condições normais de operação;
- Simulações para obter limites de carregamento em condições hipotéticas, com seleção de variáveis de entrada (temperatura ambiente, fator de carga, curva de carga);

- Cálculo de perda vida e vida remanescente nas condições acima;
- Nível de risco operativo do transformador;
- Avaliação da eficiência da regulação de tensão;
- Avaliação do sistema de medição de temperatura do óleo e enrolamento do transformador e da eficiência do sistema de resfriamento, permitindo assim, efetuar ajustes nos modelos matemáticos e nos tempos de operação do sistema de resfriamento forçado;
- Avaliação de desempenho e risco operativo do OLTC;
- Deve ser possível ainda, sempre que cabível, obter a visualização gráfica das informações, compor e emitir relatórios e exportar os dados para planilha Excel.
- Dentro do módulo de engenharia, deve ser criada uma tela de manutenção do sistema com as seguintes funcionalidades, cujo acesso deve estar condicionado ao tipo de perfil de administrador:
- Parametrização dos sensores e monitores digitais de temperatura (ajustes de alarme e desligamento, ajustes de imagem térmica, etc.);
- Parametrização do regulador de tensão (tensão de referencia, compensação de queda na linha, e tensão, tipo de temporização, etc.)
- Parametrização de algoritmos e modelos matemáticos (constantes de cálculo, ajustes de variáveis, etc.).

O sistema especialista poderá entregar valor imediato à distribuidora com o mínimo de dados disponíveis *off-line* ou *on-line*. Além disso, sistemas especialistas vêm sendo utilizados em várias empresas, como parte de seus programas de melhoria de qualidade de dados. Assim, a distribuidora poderá evoluir na qualidade e coleta de dados dos sensores, bem como na qualidade dos cálculos dos modelos de desempenho e a confiabilidade do sistema poderá evoluir exponencialmente.

2.5 Lista de Equipamentos e Diagnósticos

O sistema de gerenciamento disponibiliza um *dashboard* com a listagem dos ativos organizados pela sua identificação de placa e subestação, acompanhados dos aspectos, tais como prioridade de manutenção ou substituição, importância ou criticidade, condição e risco de falha [8].

Não obstante, outro *dashboard* apresentará a lista de eventuais problemas identificados para cada ativo, bom base nas variáveis colhidas através dos sensores, conforme ilustrado na figura 5 - arquitetura dos sensores instalados no transformador. Mas também será possível registrar problemas manualmente, além daqueles criados pelos modelos de performance (ações preditivas), sendo que mais de uma ação para solução poderá ser criada, baseada em recomendações do sistema.

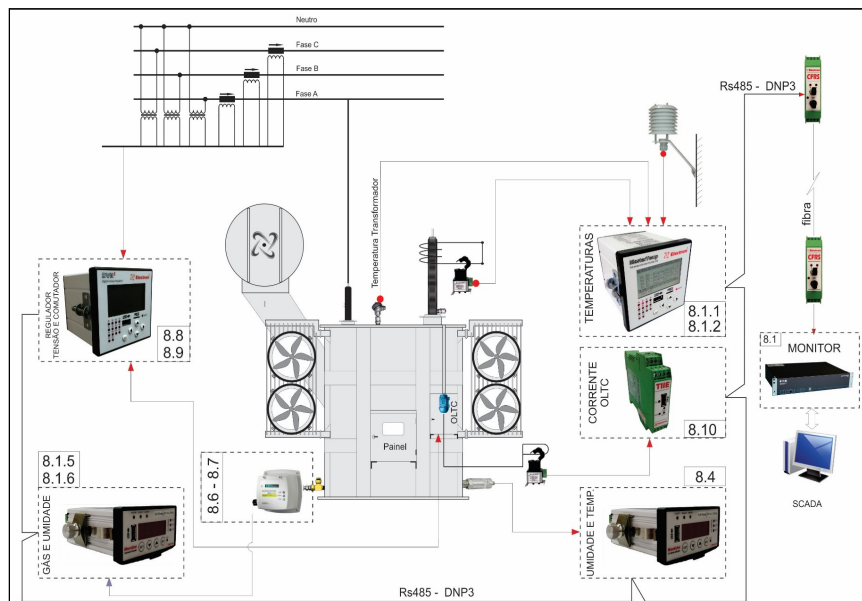


Figura 5. Arquitetura do sistema na subestação

2 Considerações e Conclusões

As exigências técnicas e comerciais que as distribuidoras são submetidas no contexto atual tem proporcionado o desenvolvimento de novas ferramentas com vistas ao atendimento de padrões de qualidade excelentes.

Neste novo cenário, as ferramentas aplicadas para manter os ativos em operação não podem ser geridas de forma descentralizada, com análises e arquivamento de dados em centrais de operações, nas áreas de manutenção, nos laboratórios, arquivos físicos ou virtuais, pois as análises de dados podem se tornar morosas. Desta forma, o desenvolvimento de um sistema especialista como ferramenta computacional para gerenciamento de ativos se apresenta como uma ótima solução para a previsão de eventos, confiabilidade da operação e precisão de dados.

Inicialmente, o projeto considerava a instalação de sensores nos transformadores e a captação de informações através do sistema SCADA e o monitoramento. Porém, com o avanço tecnológico e a disponibilidade de ferramentas de inteligência possibilitará que a distribuidora desenvolva e expanda modelos de análise e estimadores de estado, alimentados em tempo real, através de codificação pelas funcionalidades disponíveis em *Machine Learning*. Através do monitoramento de condição, os modelos aprimorados e estendidos permitirão que a distribuidora incorpore uma ferramenta de autodiagnóstico para cada modelo de engenharia para que os algoritmos possam ser recalibrados conforme suas necessidades e possibilitará a tomada correta de decisões.

Os algoritmos a serem aplicados neste projeto estão em sintonia com o que há de mais avançado e possibilitarão aos gestores, uma visão real do que está ocorrendo, número de alarmes, variáveis, indicadores e etc., disponibilizando funcionalidades para a análise das possíveis ações visando à normalidade do sistema.

Adicionalmente, a implementação do sistema de gerenciamento possibilitará a apuração dos índices de qualidade requeridos pelas normas em vigência, aplicando os mesmos critérios e interpretações, de forma a obter e manter integrados os dados confiáveis das subestações poderá melhorar os índices de qualidade DEC/FEC e contribuirá para a otimização de recursos humanos e físicos (infraestrutura e máquinas).

As próximas etapas consistirão da validação da arquitetura, desenvolvimento e aprovação de projeto elétrico, configurações e parametrizações, treinamento e testes de aceitação em campo (comissionamento).

3. Bibliografia

- [1] CARVALHO, Moisés N. Gerenciamento de ativos aplicado à manutenção de sistemas industriais, Universidade Federal de Uberlândia, julho/ 2016.
- [2] ID-7.019 – Gestão de Ativos Baseado na Condição – Transformadores de Potência, Eletropaulo, 2017;
- [3] SIMÕES, Clóvis. “Implementação de um Módulo de Gerenciamento de Energia Acoplado a um Software SCADA”, ISA 2002 - 2º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo – SP, Nov. 2002.
- [4] IEC 60076-7-2004, Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers – Revision of IEC 60354-1991
- [5] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimentos. NBR 5416/97. São Paulo, 1997.
- [6] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Transformador de potência – Especificação. NBR 5356/93. São Paulo, 2007.
- [7] IEEE Background Information on High Temperature Insulation for Liquid-Immersed Power Transformer [IEEE/PES 1994 Winter Meeting, 94 WM 005-9 PWRD.
- [8] IEC 61850-7 2003-05 - Communication networks and systems in substations Part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Principles and models.