



UM DESAFIO DA MANUTENÇÃO: FERRAMENTA DE CONFIABILIDADE DE ATIVOS BASEADA NA CONDIÇÃO

Tema: Subestações de Distribuição

Autores: Fernando Neves de Souza Costa; Daniela Alves Leite; Mathaus de Lira Rodrigues de Melo

Co-Autores: -

Empresa: Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Neoenergia Coelba

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo mostrar uma filosofia de manutenção em ativos de subestações baseada na confiabilidade e voltada à predição de defeitos. Para tanto, foi desenvolvida uma ferramenta para detecção de parâmetros específicos através do monitoramento e coleta de dados, tanto online quanto offline, capazes de indicar o risco de ocorrência de uma falha. Inicialmente esta ferramenta e seus respectivos procedimentos foram desenvolvidos e aplicados às famílias de Banco de Capacitores e Disjuntores e já, em seus momentos iniciais, detectando a necessidade de intervenção em 15 Bancos de Capacitores e 18 Disjuntores, antecipando possibilidade de falhas.

1. Introdução

O setor elétrico brasileiro passou por uma série de reestruturações, sendo o modelo vigente o resultado de ações do governo que visam incentivar a modernização e a competição nesse segmento. A criação da ANEEL resultou no desenvolvimento de indicadores de continuidade de distribuição de energia, sendo a resolução 024 da ANEEL (1), a responsável por estabelecer essa disposição nos aspectos de duração e frequência de interrupções (2). O aumento das exigências quanto à qualidade da energia entregue aos consumidores resultou na necessidade de aprimoramento das distribuidoras.

Uma das formas de garantir os novos padrões impostos foi assegurar o desempenho ótimo dos ativos. Assim, a manutenção cada vez mais passou a adotar um papel estratégico para melhoria e eficiência dos processos internos nas empresas de energia.

A manutenção evoluiu e seu conceito progrediu de intervenções que objetivam apenas assegurar a integridade física do item, para uma área em que ações técnicas e administrativas estão envolvidas visando a preservação funcional do sistema de forma sustentável e eficiente (3). Historicamente, a manutenção direcionava suas forças na correção das falhas, baseando-se em um modelo sistematizado para atuar no reparo do equipamento após a perda de sua funcionalidade (3). Esta estratégia reativa de manutenção provoca um período maior de indisponibilidade do ativo e maiores custos para normalização do evento

Neste contexto, as políticas de gerenciamento da manutenção moderna estão direcionadas na ciência para entendimento do comportamento dos ativos (3). A sistemática consiste na identificação de defeitos incipientes antes da evolução para uma falha e nas intervenções programadas em intervalos fixos para redução das falhas que não podem ser detectadas antecipadamente (4). Esta estratégia proativa minimiza a indisponibilidade dos equipamentos e o próprio custo da manutenção, uma vez que intervenções programadas e sistemáticas são mais fáceis de controlar e serem realizadas, além de propiciar o aumento ou a não redução da vida útil do ativo.

Neste trabalho, são apresentados a metodologia, a ferramenta analítica e os ganhos obtidos com a implementação da manutenção por condição nos ativos de subestações. Dessa forma, inicia-se uma nova etapa de atuação, a intensificação de ações preditivas em equipamentos e a redução de intervenções baseadas apenas na periodicidade ou na falha. O objetivo deste trabalho é mostrar a eficiência através do aumento da assertividade nas manutenções de subestações e consequente redução de falhas, de custos e dos indicadores DEC e FEC, aumentando a qualidade dos serviços prestados aos consumidores e a vida útil dos ativos.

A base para a implementação da metodologia do trabalho elaborado foi a manutenção centrada em confiabilidade. Este é um método estruturado para estabelecer a melhor estratégia de manutenção do ativo. A metodologia sugere planos de manutenção e define qual o melhor tipo de manutenção para cada situação baseado em probabilidade de ocorrência de falhas (5). Em busca do desenvolvimento assertivo do projeto, houve a criação de uma célula específica para a manutenção por condição. Assim, ficando esse grupo com o objetivo desenvolver e consolidar as iniciativas de manutenção por condição, definir ferramentas, tratar os dados monitorados, reportar relatórios e programar intervenções em campo.

O primeiro passo para a criação da ferramenta foi desenvolver um Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) especificamente para cada família de equipamento, mapeando as suas funções, modos e causas de falha, identificando seus efeitos, analisando os métodos de detecção e as ações recomendadas para cada item de manutenção do respectivo ativo. O segundo momento foi marcado por reuniões com fornecedores e estabelecimento de benchmarking, com outras empresas do setor elétrico, para definição das variáveis monitoradas e o modelo para identificação de falhas. Por fim, houve o desenvolvimento de uma ferramenta de Data Analytics e a criação um banco de dados para o tratamento e armazenamento das informações.

A implementação das definições estabelecidas nos passos precedentes iniciou-se pelas famílias de disjuntores e capacitores. Eficiências inerentes às estratégias anteriores de manutenção desses ativos e a possibilidade de desenvolvimento de parâmetros a serem monitoradas foram as razões para essa escolha. As variáveis escolhidas para monitoramento remoto dos equipamentos mencionados são tempo de abertura e desgaste dos contatos para os disjuntores, e a corrente de desequilíbrio de neutro para os bancos de capacitores. Para os disjuntores, somando-se aos parâmetros coletados online, é acrescentado variáveis offline, como notas de defeito, meio de extinção e contador de operações, que auxiliam na tomada de decisão para uma intervenção.

O desenvolvimento da ferramenta tornou possível mudar a estratégia desses ativos que era centrada unicamente em manutenção periódica. A partir das implementações em cada equipamento, os bancos de capacitores passam a possuir uma manutenção voltada na condição da corrente de neutro, enquanto os disjuntores em uma manutenção híbrida, agregando informações da condição do ativo (variáveis online e offline) para definição de postergações ou antecipações das periodicidades existentes.

2. Desenvolvimento

2.1 FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS - FMEA

Segundo a NBR 5462, os defeitos e falhas são ocorrências que devem ser tratadas pela equipe de manutenção, sendo que, um defeito é considerado como qualquer desvio em relação a uma característica do ativo, enquanto a falha é definida como a incapacidade do item de realizar a função ao qual foi designado (6). Neste sentido, com a finalidade de dar sequência à metodologia de manutenção centrada em confiabilidade (identificação de defeitos incipientes antes de se transformarem em falhas) e desenvolver uma base de conhecimento para cada equipamento, foi criado a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA). Neste método, são mapeadas as funções do equipamento, bem como todos os modos de falha e respectivas causas (7). A partir disso, tem-se os efeitos, o método de detecção e ação recomendada para cada item.

2.1 FMEA EM BANCO DE CAPACITORES

Para a construção do FMEA, o primeiro passo é a consideração de todas as partes e componentes de cada equipamento e, em seguida, são mapeados todos os modos de falha. Para a família banco de capacitores foram mapeados 41 parte/componente. Os modos de falha e os métodos de detecção, para cada modo de falha, estão detalhados na Figura 1, respectivamente à esquerda e à direita.

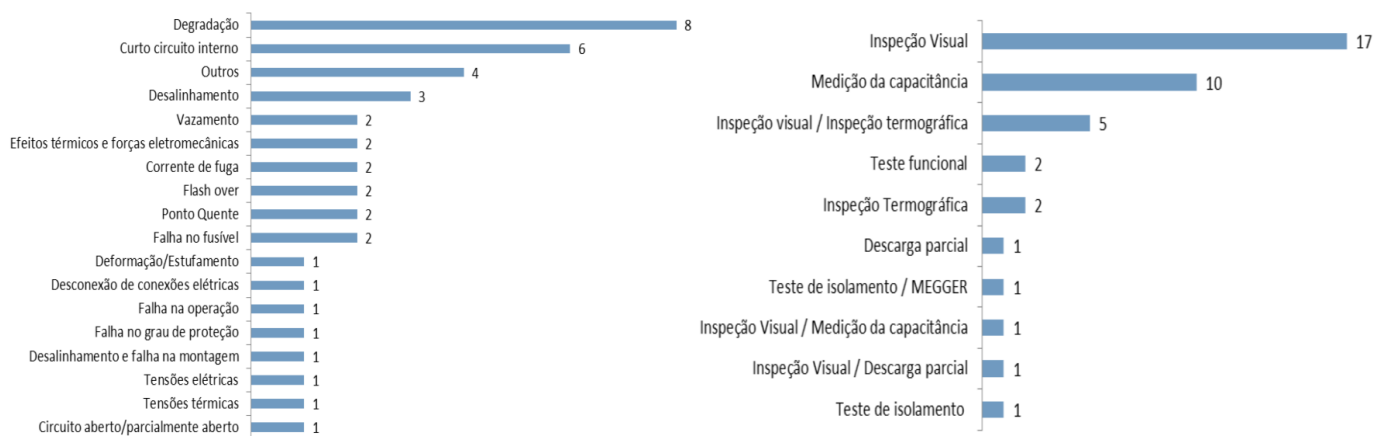


Figura 1 - Modos de falhas e métodos de detecção identificados para banco de capacitores.

2.2 FMEA EM DISJUNTORES

O mesmo processo realizado para a família banco de capacitores foi realizado para a família disjuntores, para qual foram mapeados 381 parte/componente. Os modos de falha e os métodos de detecção, para cada modo de falha, estão evidenciados na Figura 2, respectivamente à esquerda e à direita.

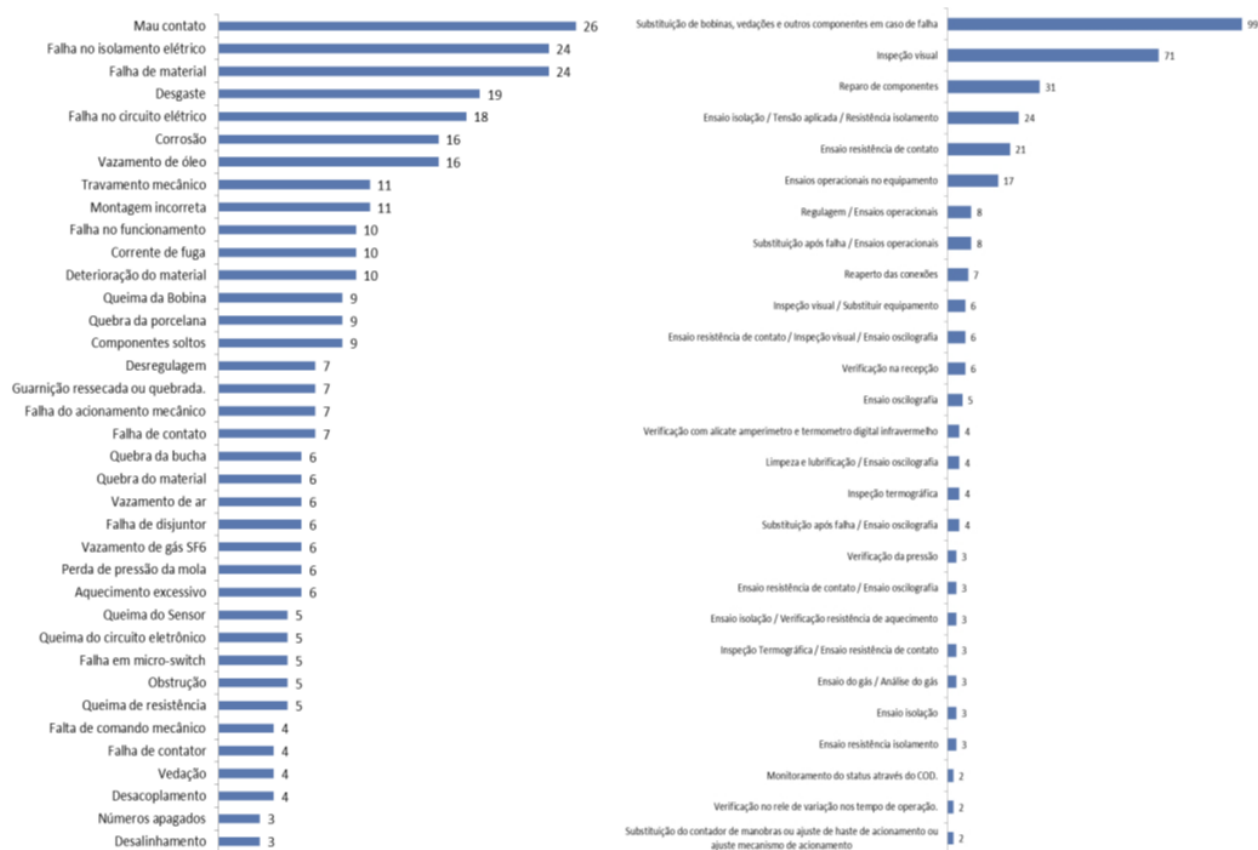


Figura 2 - Modos de falhas e métodos de detecção identificados para disjuntores.

2.3 AVALIAÇÃO DE SENSORES DE MONITORAMENTO

A etapa após a conclusão do FMEA foi a identificação dos modos de falha que podem ser monitorados, bem como os respectivos sensores, ou dispositivos, aplicáveis. O monitoramento de pontos chaves pôde permitir a redução de custos de manutenção, a diminuição da frequência das visitas de rotina e identificação de defeitos incipientes, de forma que a atuação precisa e antecipada evitasse a parada do equipamento, minimizando assim danos à companhia e transtornos aos clientes (8).

Para a família banco de capacitores foram identificados 41 modos de falha. Dessas falhas, tem-se uma parcela onde é possível a identificação por sensores ou demais requisitos de monitoramento (34%) e uma outra parcela que não é passível de monitoramento (66%). O maior detalhamento pode ser visto na imagem abaixo (Figura 3).

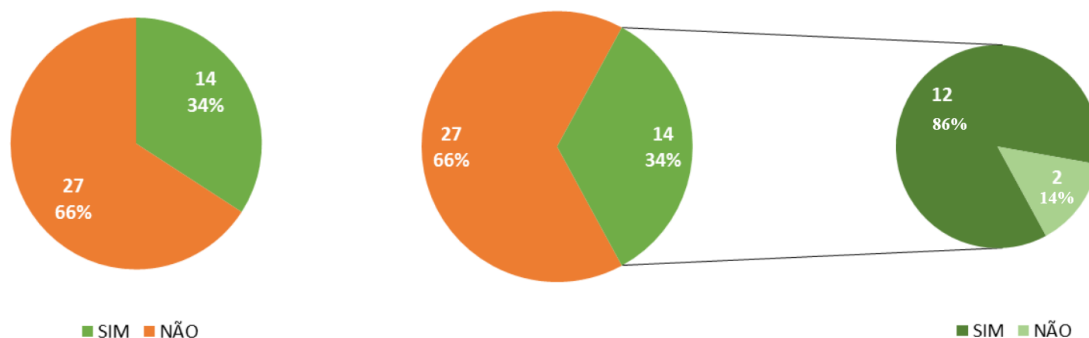


Figura 3 - Possibilidade de monitoramento por sensores em banco de capacitores.

Após a identificação dos 14 modos de falha em que há a viabilidade de monitoramento, foram identificados quais deles já possuíam implementação em ativos da companhia (12 modos de falha) e quais seriam passíveis de desenvolvimento para uma futura implementação (2 modos de falha), conforme gráfico à direita na Figura 3. Na Tabela 1, é possível visualizar os monitoramentos que representam esses dois grupos de modos de falha expostos.

Tabela 1 – Cenário de monitoramento de banco de capacitores.

VARIÁVEIS DE MONITORAMENTO/SENSORES	
EXISTENTE	DESENVOLVIMENTO FUTURO
CORRENTE DE DESEQUILÍBRIO DE NEUTRO	CÂMERA TERMOGRÁFICA FIXA
RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO	

Seguindo a mesma linha de desenvolvimento dos bancos de capacitores, para os disjuntores foram identificados quais modos de falha haveria e não haveria a viabilidade de monitoramento por sensores ou outros dispositivos. A conclusão foi que 195 modos de falha eram passíveis de monitoramento, sendo que 79 destes já possuíam implementação de monitoramento em algum ativo da companhia (Figura 4). Os pontos de falha que não eram passíveis de monitoramento (116) eram identificados basicamente por inspeções visuais, inspeções de termografia e ensaios elétricos locais durante as visitas aos equipamentos. Na Tabela 2 é possível observar a relação de sensores e monitoramentos que já possuíam a implementação em algum ativo da empresa e quais necessitarão de desenvolvimento futuro.

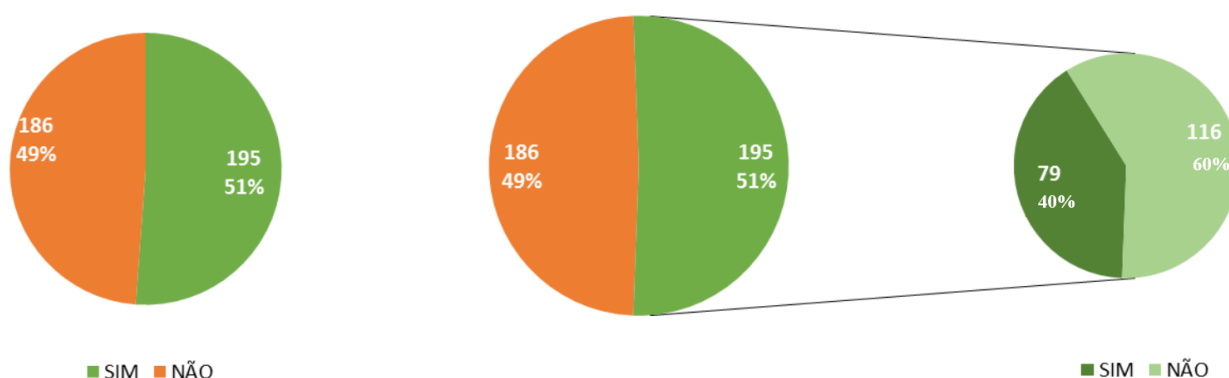


Figura 4 - Possibilidade de monitoramento por sensores em disjuntores.

Tabela 2 – Cenário de monitoramento de disjuntores.

VARIÁVEIS DE MONITORAMENTO/SENSORES	
EXISTENTE	DESENVOLVIMENTO FUTURO
TEMPO DE ABERTURA/FECHAMENTO	CÂMERA TERMOGRÁFICA FIXA
SUPERVISÃO BOBINA DE ABERTURA/FECHAMENTO	DESCARGAS PARCIAIS
QUANTIDADE DE OPERAÇÕES DE ABERTURA/FECHAMENTO	CORRENTE DO MOTOR DE CARREGAMENTO DE MOLA
ALARME DE GÁS SF6	MONITORAMENTO CC
RESISTÊNCIA DE AQUECIEMNTO	-
CORRENTE DE INTERRUPÇÃO (I ² T)	-

2.4 METODOLOGIA PARA COLETA DAS VARIÁVEIS (ENGENHARIA DE DADOS)

Para coletar e monitorar as variáveis disponibilizadas nos IEDs das subestações, foi realizado um estudo de viabilidade e diagnóstico do sistema de proteção e controle das subestações, sendo analisados um conjunto de parâmetros que pudessem nortear as respectivas análises. Os parâmetros foram:

- SPCS das subestações: levantamento dos equipamentos instalados nas subestações da Neoenergia, com o objetivo de identificar os ativos capazes de monitorar e implantar as lógicas necessárias.
- Modelos dos IEDs responsáveis pela proteção e supervisão dos disjuntores: levantamento dos equipamentos instalados nas subestações da Neoenergia, com o objetivo de identificar os IEDs que comportem os algoritmos de monitoramento do projeto.
- Sistemas supervisórios das Subestações: realizado o estudo dos modelos dos Sistemas supervisório (Nível 2) instalados nas subestações da Neoenergia. Através desse mapeamento, possibilitou identificar os protocolos de comunicação, e a características dos sistemas para o monitoramento.

A partir da análise das etapas detalhadas acima, foi definido que o monitoramento das variáveis ocorreria nas subestações que possuísssem os ativos de proteção e controle regidos pela norma IEC-61850. Essas tecnologias permitem reconhecer os modos de falha dos equipamentos monitorados. Após a conclusão da análise das subestações, foram desenvolvidas as lógicas que permitem calcular as variáveis necessárias para monitoramento e tratamento dos dados.

2.5 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA ANALÍTICA

Após a definição da metodologia para coleta das variáveis e configurações dos IEDs, a próxima etapa foi a implementação em campo dos pontos definidos. Uma vez configurados, os pontos de monitoramento remoto foram coletados no sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), enquanto os pontos de monitoramento offline foram obtidos nos demais sistemas da empresa, como o SAP, por exemplo.

Para os capacitores, foi utilizada a corrente de desequilíbrio de neutro como o parâmetro a ser avaliado como condição para a realização da manutenção. Em relação aos disjuntores, foram configuradas as variáveis de desgaste do contato (I²T) e tempo de abertura como monitoramento remoto, além de variáveis offline como complemento para a tomada de decisão quanto à intervenção nesses equipamentos (Tabela 3).

Tabela 3 – Variáveis desenvolvidas no trabalho.

Variáveis online	Variáveis offline
Corrente de Desequilíbrio de Neutro	Ano previsto de renovação
Desgaste do contato	Valores elétricos dos ensaios
Tempo de abertura	Ano de manutenção
	Meio de extinção
	Risco do ativo
	Idade

Com o sistema de coleta de dados configurado, foi desenvolvida uma ferramenta de inteligência capaz de compilar e tratar as informações advindas de diversas fontes. Essa aplicação também dispõe de um banco de dados para armazenamento das informações tratadas. Os dados armazenados ficam disponíveis para visualização em um ambiente web que também permite a extração de relatórios gerenciais. Com as informações dos relatórios mencionados, foi possível tomar as decisões cabíveis para a geração, ou não, de ordens de manutenção dentro do sistema SAP. O fluxo do processo descrito pode ser observado na figura abaixo.



Figura 5 - Fluxo da ferramenta.

Diferentemente dos bancos de capacitores, em que o monitoramento da corrente de desequilíbrio de neutro representa bem a condição do equipamento, os disjuntores requerem mais parâmetros sensorizados, além do tempo de abertura e do I²T, para que a condição do equipamento seja traçada de forma eficaz. Então, devido à impossibilidade atual de realizar uma manutenção apenas por condição para os disjuntores, a estratégia adotada foi desenvolver um método híbrido.

A metodologia proposta no trabalho para os disjuntores foi mesclar as variáveis obtidas pela ferramenta com as periodicidades de manutenção já usuais para cada família de disjuntor. Dessa maneira, as periodicidades serviram como um norte para a manutenção, enquanto a interação entre os parâmetros coletados indicou a necessidade de uma antecipação ou postergação das intervenções. Assim, trazendo elementos da condição do ativo para uma manutenção que era puramente voltada ao tempo.

A tomada de decisão final foi baseada na interação entre os parâmetros coletados. A cada variável foi atribuída pesos específicos que compuseram um valor final para o ativo. As pontuações variaram dependendo dos valores limites de cada parâmetro, os quais são definidos em normas, manuais dos fabricantes e histórico comportamental. Quanto pior a condição da variável, maior é o peso atribuído a ela. Os equipamentos que no final detiveram as maiores notas, foram os mais propensos a possuírem uma antecipação no plano de manutenção, enquanto os de notas mais baixas foram mais suscetíveis a postergações. Na Tabela 4 é possível ver alguns exemplos do funcionamento das relações mencionadas.

Tabela 4 – Parâmetros de ensaios.

Variável	Valor/condição	Peso	Variável	Valor/condição	Peso
Rigidez dielétrica	> 60	20	Previsão de Renovação	(Ano obra) - (Ano atual) = OU < 0	0
	30<X<50	60		(Ano obra) - (Ano atual) = 1	10
	<30	80		(Ano obra) - (Ano atual) = 2	30
Tempo de abertura	<65	20		(Ano obra) - (Ano atual) = OU > 3	60
	65<x<75	40	Última manutenção	(Ano manutenção) - (Ano atual) > = -4	0
	75<x<80	60		(Ano manutenção) - (Ano atual) = -5	30
	>80	80		(Ano manutenção) - (Ano atual) < -5	80
Meio extinção	SF6	20	Risco	R1	0
	VÁCUO	20		R2	20
	ÓLEO	80		R3	40
Idade	>30	100		R4	60
	>25	50		R5	80
	>20	25			
	>15	12,5			

2.6 INFRAESTRUTURA DE DADOS

A infraestrutura dos dados foi desenvolvida detalhando todas as etapas para o monitoramento das variáveis.

1. Equipamentos de monitoramentos (sensores e IEDs);
2. Barramento de processos da subestação, onde os dados dos sensores e IEDs são reportados para o banco de dados da Neoenergia;
3. Banco de dados: armazenamento das variáveis geradas na subestação;
4. Servidor de dados: Tratamento dos dados armazenados no banco de dados;
- 5: Interface CBM: Emissão de Reports e relatórios técnicos.

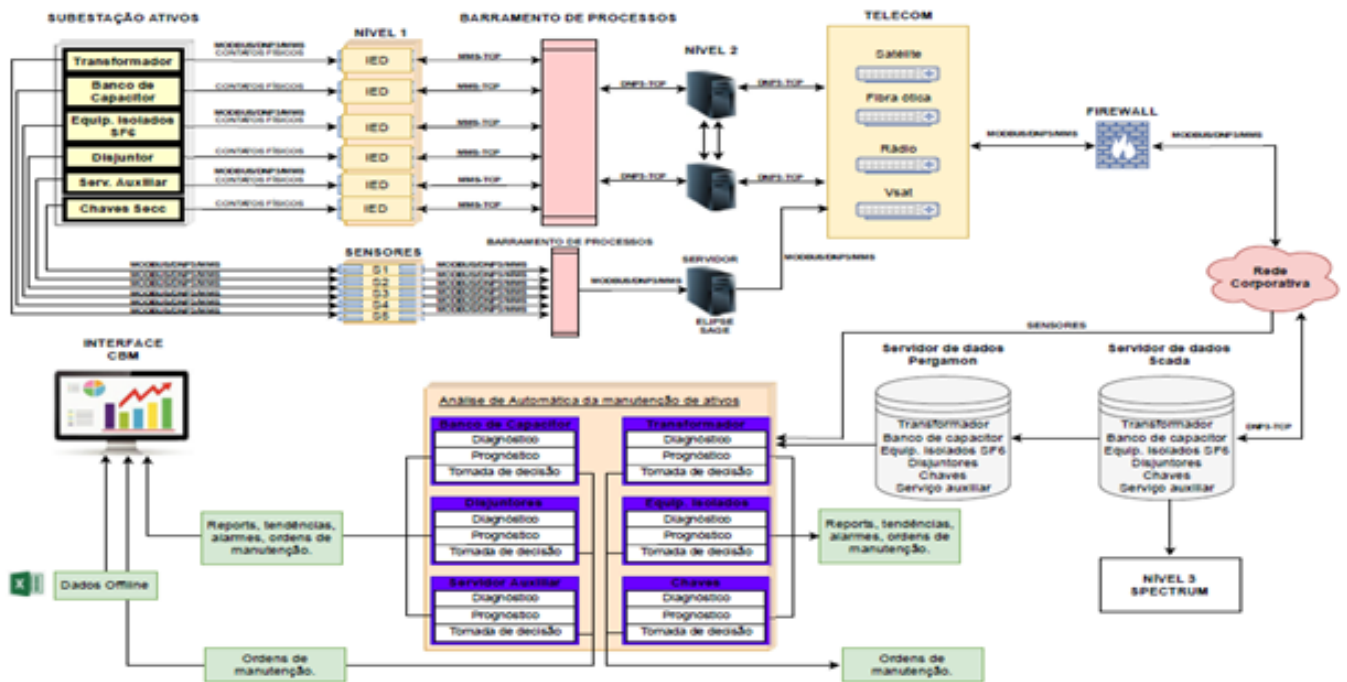


Figura 6 - Infraestrutura de dados.

2.7 RESULTADOS PRÁTICOS

Como resultado prático, realizou-se a primeira análise dos bancos de capacitores e houve a identificação de 15 bancos de capacitores com desvios. Como consequência, foram geradas ordens no SAP para verificação dos equipamentos e programação das verificações em campo.

Na subestação de Prazeres, por exemplo, foi constatado, através dos ensaios de capacitância, avarias em 05 células capacitivas. A ação realizada proporcionou à equipe de campo a antecipação ao problema, pois de forma preditiva foi possível programar a substituição das células. Com este contexto, foi possível se antever à ocorrência e evitar uma indisponibilidade no banco de capacitor.

A respeito dos disjuntores, na primeira análise foram identificados 18 equipamentos com necessidade de priorização de manutenção para 2023. Foram geradas ordens no SAP para verificação dos equipamentos e foram programadas as verificações em campo, assim como realizado para os capacitores.

Uma das situações que foram identificadas nas medições foi o caso da Subestação da Neoenergia Elektro. O disjuntor apresentou tempo de abertura de 91,7ms, fato que gerou a necessidade de manutenção. Após as verificações em campo pelas equipes, foi encontrado comando oxidado (infiltração) e foi sanado. Dessa forma, mais um desligamento de subestação foi evitado, o que representa um CHI médio salvo de 17.209. Abaixo as fotos do equipamento antes e depois da manutenção para contextualização.



Figura 7 - Disjuntor.

3. Conclusão

Os benefícios da manutenção por condição são inúmeros e muito aplicáveis à área de subestações de energia elétrica. Principalmente para a melhoria dos indicadores operacionais e redução de indisponibilidade dos clientes atendidos. Isso porque as manutenções são direcionadas para os ativos que sinalizam uma possível falha, portanto, essa manutenção é programada, não sendo necessário atuar de forma emergencial. Esse fato gera uma maior segurança para as equipes e para a instalação, além de uma redução dos custos de manutenção, pois são substituídas peças e/ou realizados reparos antes de ocorrer uma falha que gere um dano maior ao equipamento. Com isso, sua vida útil é estendida e temos um melhor desempenho do ativo.

A evolução da manutenção exige dos profissionais da área o enriquecimento da capacidade de transformar dados em informações úteis, assim possibilitar decisões assertivas quanto a intervenção em um equipamento. O tempo em que as ações eram realizadas somente para correção de falhas ficou para trás. Neste sentido, a ferramenta desenvolvida se mostra coerente com a necessidade que as empresas buscam frente às exigências atuais dos consumidores e órgãos reguladores.

Durante a elaboração deste trabalho, foram implementados em cerca de 400 bancos de capacitores o monitoramento da corrente de desequilíbrio de neutro. No caso dos disjuntores, em aproximadamente 600 equipamentos foram configuradas as variáveis de estudo. A implementação dos bancos de capacitores resultou em uma redução de 4 mil pessoas-hora em manutenções, uma vez que as manutenções deixaram de ser realizadas de forma bianual para os ativos configurados. No caso dos disjuntores, foi estimado uma redução de aproximadamente 50 mil CHI (Cliente Hora Interrompido), como consequência de já ter sido evitado 3 desligamentos que aconteceriam sem a intervenção antecipada nos disjuntores.

A evolução desse trabalho requer a ampliação das configurações aos demais ativos em operação, assim permitir a aquisição desses dados para agregar à ferramenta desenvolvida. As implementações serão realizadas aproveitando obras e intervenções nas subestações de forma a otimizar os recursos, a capacidade das equipes e modernizar o parque de ativos. Outro ponto importante, percebido durante a realização

deste trabalho, é a necessidade de desenvolvimento de sensores para as variáveis em que ainda não há a possibilidade de monitoramento remoto. Essa é uma limitação existente hoje e precisa ser superada para permitir, por exemplo, a evolução da manutenção híbrida dos disjuntores para uma manutenção totalmente por condição.

4. Referências bibliográficas

- (1) Brasil. Resolução número 024, de 27 de janeiro de 2000. **Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras – ANEEL**. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF.
- (2) Mamede, J. P. **Previsão da manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição de energia elétrica pelo método de curto-circuito probabilístico**. Tese (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004
- (3) Alves, R. P.; Falsarella, O. M. **Modelo conceitual de inteligência organizacional aplicada à função manutenção**. G&P, São Carlos, vol. 16, n 2, p.313-324, abr-jun. 2009.
- (4) Gebran, A. P. **A função da Manutenção**. In:____. Manutenção e operação de equipamentos de subestações, Porto Alegre: Bookman, 2014.
- (5) Sellito, M. A. **Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa**. ENEGEP. Curitiba, 2002.
- (6) Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- (7) Silva, S. R. C. **Metodologia FMEA e sua aplicação à construção de edifícios**. QIC2006. Lisboa, 2006.
- (8) Altwegg, J. **Implementação de novas ferramentas de monitoramento e otimização da manutenção através do uso de tecnologia baseada na rede internacional de computadores – Internet**. SNPTEE. Uberlândia, 2003.
- (9) Brasil. Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997. **Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências**. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF.
- (10) Spatti, D. H. **Automação de processos de detecção de faltas em linhas de distribuição utilizando sistemas especialistas híbridos**. Tese (Especialização em Engenharia elétrica) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.