



UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA VLF PARA DIAGNÓSTICO DE CABOS ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO ¹

Flávio Costa Martinez ²
Wilson Pereira de Pinho ³

Resumo

A presente contribuição técnica apresenta uma nova tecnologia utilizada na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) para diagnosticar condições operacionais, vida útil e falhas incipientes em cabos elétricos de média tensão. O Very Low Frequency (VLF) é um ensaio elétrico não destrutível, realizado em cabos elétricos de média tensão, que permite avaliar o estado global da isolação dos cabos, bem como a localização precisa do defeito antes da ocorrência da falha. Através de dois tipos de testes, Tangente Delta e Descargas Parciais, é possível traçarmos um diagnóstico da performance integral do isolamento do cabo e também detectar o ponto de falta. A implantação desta técnica preditiva, permitirá o acompanhamento da vida útil dos cabos de média tensão, evitando possíveis pontos de futuras falhas nos circuitos elétricos da Usina Presidente Vargas (UPV), possibilitando a atuação da manutenção antes da falha, que levariam a interferências no processo produtivo.

Palavras-chave: Cabos elétricos; Ensaio.

USE OF VLF TECHNOLOGY FOR ELECTRIC DIAGNOSTICS IN MEDIUM VOLTAGE CABLES

Abstract

The present technical contribution presents a new technology used in the Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) to diagnose operating conditions, useful life and faults in medium voltage electrical cables. The Very Low Frequency (VLF) is a non-destructive electrical testing, conducted in medium voltage electrical cables, designed to measure the overall state of insulation of the cables, and the precise location of the fault before the failure. Through two types of tests, Delta Tangent and Partial Discharge, it is possible to make a complete diagnosis of insulation performance of the cable and also detect the fault. The implantation of this predictive technique, will monitor the useful life of medium voltage cables, avoiding potential failures in electrical circuits of Usina Presidente Vargas (UPV), allowing the intervention of maintenance before the failure, that result in interference in the production process.

Key words: Electrical cables; Testing.

¹ Contribuição técnica ao 31º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 25º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 17 a 20 de agosto de 2010, Foz do Iguaçu, PR

² Engenheiro Eletricista – Engenheiro de Produção da Gerência de Distribuição de Energéticos

³ Técnico Eletricista – Técnico de Desenvolvimento da Gerência de Distribuição de Energéticos



1 INTRODUÇÃO

Atualmente há cerca 1,5 milhão de metros de cabos elétricos de média tensão instalados nas dependências da CSN, sendo que parte destes cabos podem estar próximos do limite de sua vida útil, ou sofrem processo de degradação acelerado devido as condições dos dutos e galerias por onde passam, podendo assim provocar paradas indesejáveis da produção. Diante destes fatos, a Gerência de Distribuição de Energéticos – Alta Tensão (GDE-AT) buscou no mercado mundial uma tecnologia que possibilitasse um novo tipo de diagnose, não destrutível, para saber as reais condições de suas linhas de distribuição, visando oferecer maior confiabilidade operacional ao processo produtivo.

Anteriormente à implantação desta nova tecnologia de diagnóstico em cabos elétricos, para se fazer medições do isolamento e corrente de fuga, utilizava-se aparelhos conhecidos como “Megger” e “Hipot”, metodologias estas, consideradas como destrutíveis à integridade dos cabos elétricos.

Na Figura 1 pode ser observado as partes constituintes de um cabo elétrico de média tensão.

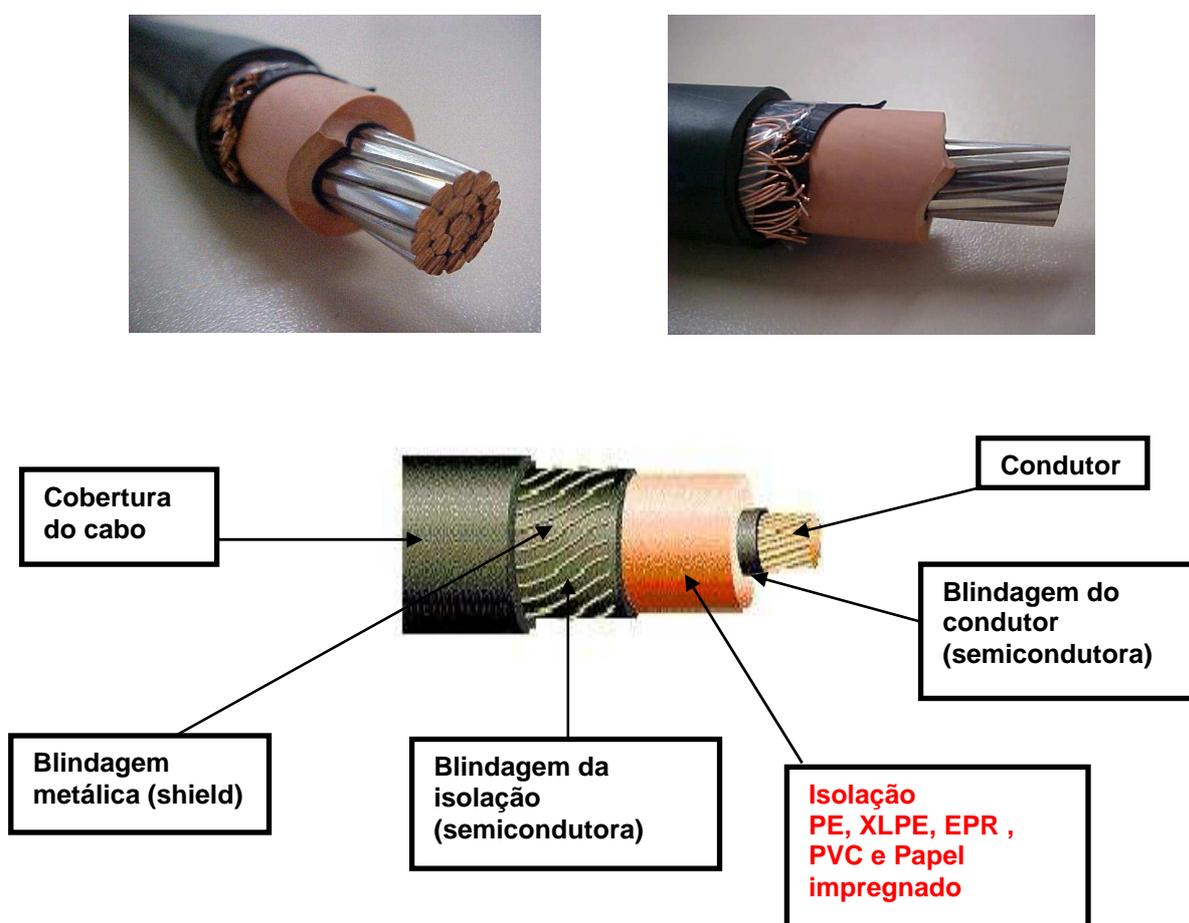


Figura 1. Cabo elétrico de média tensão.

As técnicas de diagnósticos apresentadas neste trabalho, possuem a tecnologia Very Low Frequency (VLF), ou seja, frequência muito baixa (0,1Hz), método não destrutivo que permite avaliar o estado global dos cabos e a localização precisa do(s) defeito(s), antes da ocorrência da falha. Esta nova tecnologia empregada na



CSN veio a substituir os métodos tradicionais dos testes de resistência de isolamento e correntes de fuga, considerados destrutíveis aos cabos elétricos, popularmente conhecidos como “Megger” e “Hipot”.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A técnica de Preditiva e a Manutenção Baseada na Condição, usam dados de testes e de monitoração dos parâmetros de diagnose em equipamentos elétricos em intervalo fixados de manutenção. De acordo com as estatísticas de falhas, estes intervalos são adotados individualmente.

Os benefícios alcançados com a “otimização” dos custos do programa de manutenção, devem objetivar a alta confiança e atender aos padrões de segurança da empresa. Fatores como o tempo de falha, qualidade de energia, manutenção e apoio são funções fundamentais para satisfazer atualmente as exigências das áreas. A frequência de teste e diagnóstico podem variar de 6 meses a 3 anos, dependendo das condições encontradas nos ensaios. Normalmente as instruções dos fabricantes especificam a frequência de inspeção e ou de manutenção.

A maior causa de falhas em cabos elétricos é a degradação da isolação. Existem várias causas básicas para degradação do isolamento, tais como:

- esforço elétrico (sobretensão, flutuação, descarga parcial etc.);
- esforço térmico (condição de carga);
- esforço mecânico (estiramento, dobras acentuadas, compressão); e
- ataque químico (água, sal, óleo, ácidos).

Esforços elétricos, particularmente sustentados por sobretensões ou impulsos causados por ocorrência de faltas produzem descargas, podendo desenvolver uma arvore elétrica.

O envelhecimento do isolamento, especialmente causado pela interação da água com o campo elétrico é um processo lento de degradação, produzindo gradualmente o fenômeno chamado de arvore de água ou arborescência elétrica.⁽¹⁾

O Sistema de Diagnose PHG 70/80 utilizado pela GDE-AT, permite avaliar através de ensaios elétricos não destrutíveis, o estado global da isolação dos cabos, bem como a localização precisa do defeito antes da ocorrência da falha.

Através de dois tipos de testes, Tangente Delta e Descargas Parciais, é possível traçarmos um diagnóstico da performance integral do isolamento do cabo e também detectar os pontos de descargas (arborescência elétrica).



Figura 2. Fotos do Laboratório Móvel com o PHG 70/80 – Baur.



2.1 Testes de Tangente Delta (TD)

Tangente Delta é um fator matemático que determina a temperatura de colapso isolante do material, também considerada como um fator de perdas calculado através da divisão da potência aparente pela potência reativa.

Além das perdas de energia devido à circulação de corrente nos condutores (efeito Joule), há aquelas devidas à existência de tensão aplicada, com conseqüente circulação de corrente pelo interior da isolação (perdas dielétricas). Estas perdas são diretamente proporcionais ao produto da constante dielétrica do material pelo seu fator de perdas $\tan \delta$, onde δ é o ângulo de defasagem entre a corrente no condutor e a corrente capacitiva na isolação.⁽¹⁾

Os testes de Tangente Delta permite avaliar o grau de envelhecimento dos cabos elétricos, quantificado a partir de uma tensão aplicada, definida conforme a classe de tensão do cabo. A degradação de cabos elétricos tem como principais causas os seguintes fatores:

- processo de fabricação e/ou transporte inadequado;
- instalação de forma inadequada;
- utilização acentuada de testes elétricos destrutivos;
- local das instalações (má conservação das galerias, dutos); e
- arborescência elétrica.

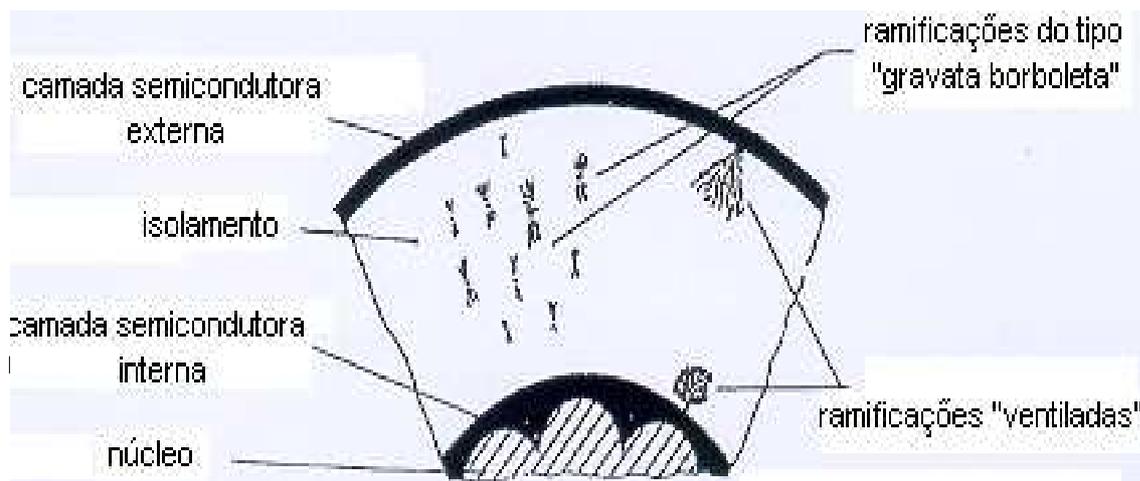


Figura 3. Tipos de ramificações (arborescências) em cabos elétricos de média e alta tensão.⁽³⁾

De acordo com o fabricante (Baur) do equipamento utilizado na CSN, deve-se adotar o seguinte critério para avaliação dos testes de Tangente Delta em cabos de polietileno reticulado (XLPE), borracha etilenopropileno (EPR), polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC):

Adota-se U_0 como a tensão eficaz fase-terra.

Cabo XLPE

Cabo Novo $TD(2U_0) < 1,2 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 0,6 \times 10^{-3}$

Cabo em Atenção $1,2 \times 10^{-3} \leq TD(2U_0) < 2,2 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 0,6 \times 10^{-3}$

Cabo Crítico $TD(2U_0) \geq 2,2 \times 10^{-3}$ ou $TD(2U_0) - TD(U_0) > 1,0 \times 10^{-3}$

Cabo EPR

Cabo Novo $TD(2U_0) < 12,0 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 1,0 \times 10^{-3}$

Cabo em Atenção $12 \times 10^{-3} \leq TD(2U_0) < 22 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 1,0 \times 10^{-3}$

Cabo Crítico $TD(2U_0) \geq 22 \times 10^{-3}$ ou $TD(2U_0) - TD(U_0) > 2,0 \times 10^{-3}$



Cabo PE

Cabo Novo $TD(2U_0) < 0,7 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 0,3 \times 10^{-3}$

Cabo em Atenção $0,7 \times 10^{-3} \leq TD(2U_0) < 1,4 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 0,3 \times 10^{-3}$

Cabo Crítico $TD(2U_0) \geq 1,4 \times 10^{-3}$ ou $TD(2U_0) - TD(U_0) > 0,6 \times 10^{-3}$

Cabo PVC

Cabo Novo $TD(2U_0) < 50 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 2,0 \times 10^{-3}$

Cabo em Atenção $50 \times 10^{-3} \leq TD(2U_0) < 70 \times 10^{-3}$ e $TD(2U_0) - TD(U_0) < 2,0 \times 10^{-3}$

Cabo Crítico $TD(2U_0) \geq 70 \times 10^{-3}$ ou $TD(2U_0) - TD(U_0) > 4,0 \times 10^{-3}$

Como pode ser observado acima, há duas exigências para o critério de avaliação dos cabos testados, ou seja, para se saber se o cabo encontra-se em estado novo, de atenção ou crítico deve ser avaliado tanto o valor da Tangente Delta encontrada quando se aplica duas vezes a tensão eficaz fase-terra do cabo, quanto o valor da diferença entre duas vezes e uma vez a tensão eficaz fase-terra aplicada, sendo que se uma dessas exigências não for atendida, o cabo não poderá ser considerado como novo.

2.2 Testes de Descargas Parciais (PD)

Descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa.

Um tipo particular de descargas parciais são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas.

A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior da isolação de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo.⁽²⁾

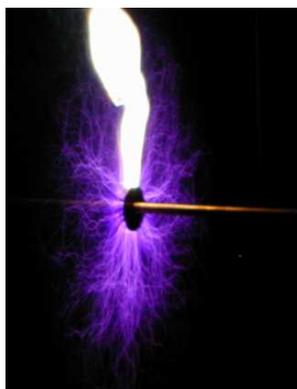


Figura 4. Descarga parcial em cabo elétrico em uma estação experimental.⁽²⁾

A realização deste ensaio, permite visualizar os pontos onde ocorrem fugas elétricas (descargas) ao longo do cabo, o que causa gradativa deterioração e posterior rompimento do mesmo.

Como critério de avaliação, a GDE-AT estabelece que todos os cabos com valores de descargas parciais acima de 600 pC e com concentração acentuada, deverão ser analisados minuciosamente (terminações, emendas, etc) para uma melhor avaliação da gravidade do problema.



2.2.1 Condições para a ocorrência de descargas parciais

Para uma descarga parcial ocorrer em um vazio preenchido com gás duas condições devem ser satisfeitas. Uma condição necessária, mas não suficiente, é que o campo elétrico no interior do vazio, isto é, o campo elétrico local (E_l), deve ser igual ou superior a um campo mínimo de ruptura (E_r), determinando assim o campo de início de ocorrência das descargas (E_i). Além disso, deve existir um campo residual ou campo de extinção (E_e), abaixo do qual a atividade da descarga cessa.

Os valores de E_i e E_e dependem de diversos fatores, entre os quais estão as propriedades do gás (temperatura e, principalmente, pressão), a forma e o tamanho do vazio e o mecanismo específico de descarga. Se o valor de E_i puder ser relacionado com a tensão aplicada, levando em conta a geometria e localização do vazio, assim como a presença de cargas superficiais, a tensão de início da ocorrência de descargas, V_i, pode ser estimada. Da mesma forma que para E_i, um valor de tensão, denominado tensão de extinção (V_e), pode ser relacionado ao campo E_e.

Devido a analogia frequentemente estabelecida entre a ocorrência de descargas parciais em vazios circundados por dielétrico e a ocorrência de descargas entre eletrodos metálicos, os valores de E_r e, conseqüentemente, de tensão de ruptura V_r descritos pela curva de Paschen são empregados com freqüência em estudos de descargas em vazios. Uma típica curva de Paschen para o ar é mostrada na Figura 5.

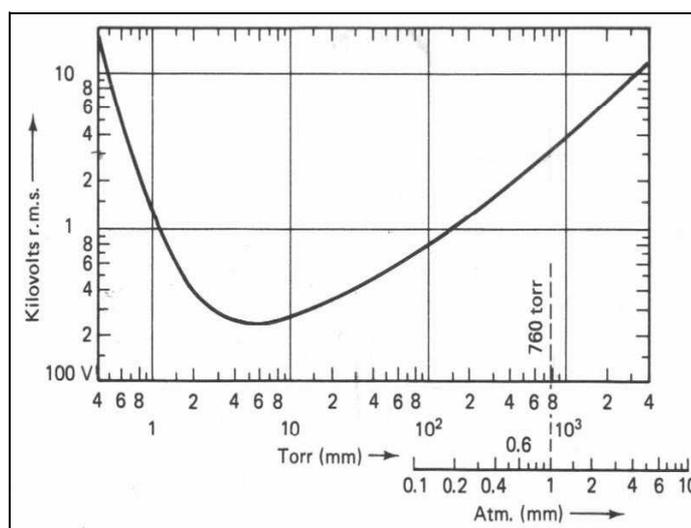


Figura 5. Curva de Paschen para o ar.⁽²⁾

Vale ainda ressaltar que o valor de V_i não necessariamente é igual ao valor de V_r devido à existência de um tempo de atraso (t_a), para a ocorrência da primeira descarga. A diferença entre V_i e V_r é denominada sobretensão (ΔV). A Figura 6 ilustra o início da ocorrência de uma descarga parcial.

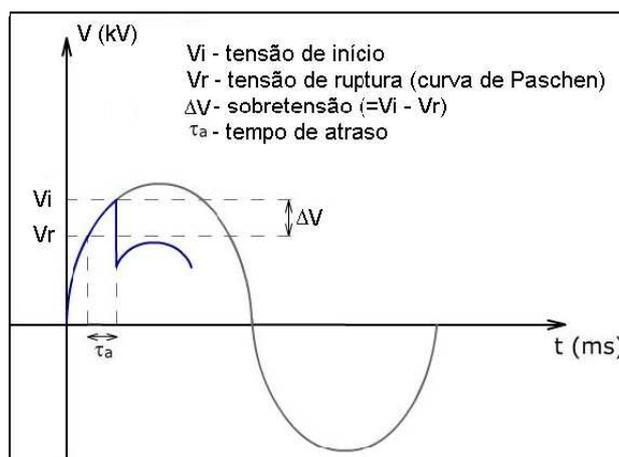


Figura 6. Representação do início da ocorrência de uma descarga parcial.⁽²⁾

2.2.2 Degradação causada por descargas parciais

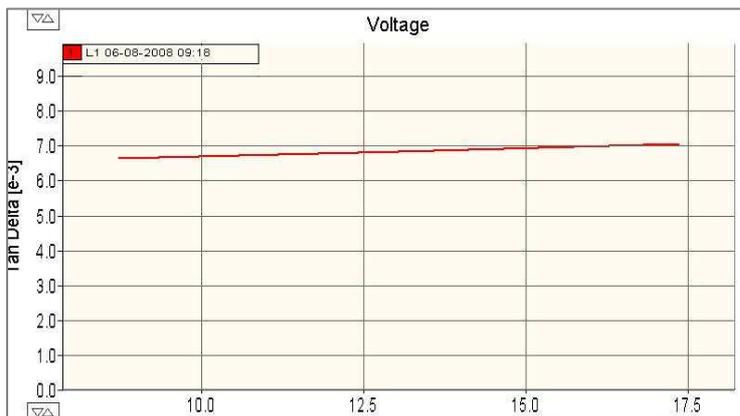
Durante atividade contínua de descargas parciais em vazios, sob a ação de campo alternado elevado, dois efeitos deletérios podem ocorrer no material dielétrico: degradação por impacto de íons de nitrogênio e oxidação do polímero. A degradação por impacto leva a formação de pits na superfície do dielétrico. Se o oxigênio estiver presente no interior do vazio, produtos altamente oxidativos (O, O₃ e O₂-) são formados no processo de descarga. Devido a reações químicas na fase gasosa, hidrogênio, monóxido de carbono, metano e dióxido de carbono são produzidos. Reações entre estes produtos e radicais poliméricos geram ácidos de natureza condutiva. Como resultado, o campo ao redor do vazio é reduzido e as descargas extintas. Vazios inicialmente preenchidos com ar são geralmente uniformemente oxidados, formando uma camada condutiva de alguns micrômetros. Quando todo o oxigênio é consumido o bombardeamento por íons de nitrogênio leva a ocorrência de pitting e, posteriormente, à formação de arborescências. A consequência destes efeitos é a redução do tempo estatístico de atraso e da tensão de início.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Solução Proposta

A substituição dos antigos métodos de testes elétricos para medição de resistência de isolamento e correntes de fuga por uma nova tecnologia trouxe à CSN ganhos tangíveis e intangíveis.

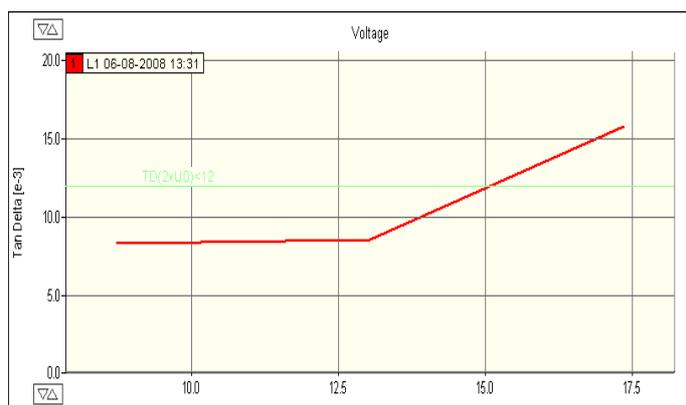
Os ganhos tangíveis referem-se à uma série de fatores como: economia gerada pelo menor tempo gasto durante as manutenções nos circuitos de média tensão, pois agora é possível prever quais são os cabos em fim de vida útil, estimando o momento adequado para sua substituição, além de um recurso disponível agora para localizar o(s) ponto(s) avariado(s), evitando trocas de todo o trecho do cabo, passando a substituir somente o trecho avariado, o que nos leva a uma economia de tempo e dinheiro. As Figuras 7 e 8 mostram o resultado de um teste de Tangente Delta para um cabo de média tensão com isolamento EPR em bom estado de funcionamento e outro em estado crítico respectivamente.



Phase	Step	Voltage kV	Avg. Value Tan Delta	Std. Dev. [e-3]	Amount
L1	1	8.7	6.639	0.003	8
L1	2	13.0	6.836	0.030	8
L1	3	17.4	7.067	0.008	8

----- Measurement Stopped -----

Figura 7. Resultado do teste de Tangente Delta para cabo de média tensão EPR em bom estado.



Phase	Step	Voltage kV	Avg. Value Tan Delta	Std. Dev. [e-3]	Amount
L1	1	8.7	8.307	0.004	8
L1	2	13.0	8.575	0.020	8
L1	3	17.4	15.808	0.852	8

----- Measurement Stopped -----

Figura 8. Resultado do teste de Tangente Delta para cabo de média tensão EPR em estado crítico.

De acordo com a Tabela 1, pode ser feito o comparativo entre os valores encontrados nos testes de Tangente Delta com a tabela de referência fornecida pelo fabricante do equipamento. Após análise dos resultados é possível emitir um diagnóstico das condições operacionais do cabo.

**Tabela 1.** Referência da Tangente Delta para cabos EPR⁽⁴⁾

Situação	Valor Máximo	Desvio
Cabo Novo	$< 12 \times 10^{-3}$	$< 1,0 \times 10^{-3}$
Cabo em Atenção	$= 12 \times 10^{-3}$ e $< 22 \times 10^{-3}$	$< 1,0 \times 10^{-3}$
Cabo Crítico	$=$ ou $> 22 \times 10^{-3}$	$> 2 \times 10^{-3}$

A Figura 9 mostra os resultados encontrados durante um teste de Descargas Parciais realizado em um cabo elétrico de média tensão. A análise do resultado encontrado mostra a quantidade, a intensidade e a que distância da ponta do cabo as descargas ocorrem, facilitando e orientando a equipe de manutenção onde agir, ganhando tempo durante as intervenções, além de possibilitar a substituição, durante paradas programadas, apenas do trecho avariado.

**Figura 9.** Resultado do teste de Descargas Parciais para cabo de média tensão EPR em estado crítico.

Outros ganhos, intangíveis, também são atribuídos ao uso da tecnologia VLF tais como:

- aumento da confiabilidade no sistema elétrico de média tensão;
- redução acentuada de paradas não programadas por falhas em cabos;
- otimização da manutenção de cabos de média tensão; e
- redução no tempo de parada por falhas em cabos.

3.2 Ganhos Financeiros

Conforme exposto no item 3.1, os ganhos tangíveis com a implantação desta nova tecnologia contribuem ainda mais para a alavancagem dos resultado da CSN, podendo todo o investimento feito, ser facilmente justificado em função dos ganhos financeiros que a tecnologia VLF vem proporcionando.

Abaixo, temos um estudo de caso mostrando o potencial de ganho com o novo método.

Cenário: Risco de interferência na produção dos Conversores “A”, “B” e “C” da Aciaria por falta de energia elétrica.

A Aciaria da CSN é composta por 3 Conversores, os quais são alimentados pelo Switchgerar 70, que por sua vez é dividido em dois barramentos, “A” e “B”.

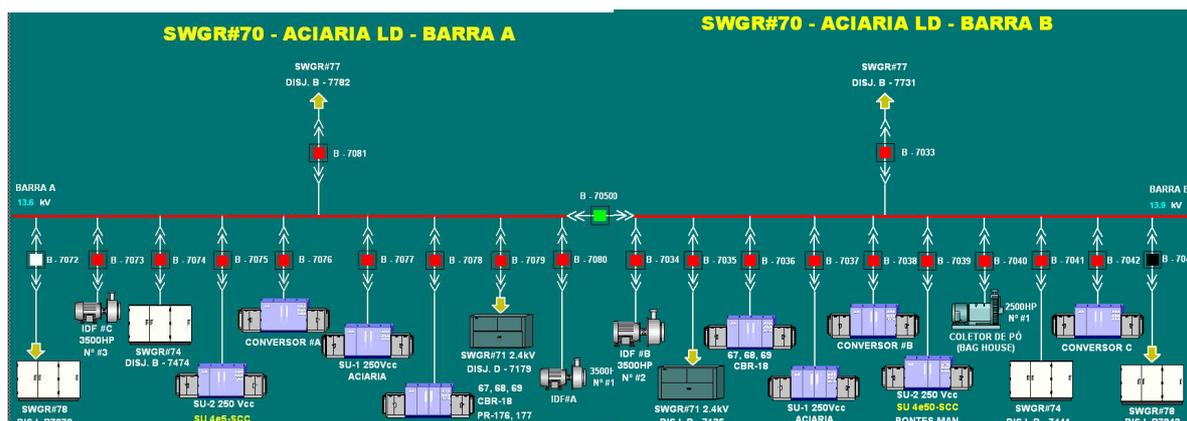


Figura 10. Barras "A" e "B" do Switchgear 70.

Durante uma manutenção preditiva nos cabos de potência que alimentam todo o Switchgear 70, foram detectados alguns cabos com valores muito críticos de Tangente Delta, ou seja, com a integridade da sua isolação completamente comprometida. Em outras palavras, estes cabos estavam na eminência de furar, fato este que acarretaria em um desarme de todo o Switchgear 70, paralisando a produção de toda a Aciaria.

Como a realização dos ensaios ocorreu durante uma parada programada da Aciaria (20 horas de parada), a manutenção teve tempo hábil para fazer a substituição dos cabos que estavam na eminência de falharem, evitando um grande prejuízo que a empresa teria com uma parada não programada para substituição dos cabos em questão.

A Tabela 2 apresenta a contabilização do prejuízo no qual a empresa arcaria em caso de uma interferência por falta de energia elétrica na Aciaria.

Tabela 2. Contabilização do prejuízo com a parada de 3 Conversores na Aciaria.

Produção de 1 Conversor	200 Toneladas/hora
Valor de margem do aço	R\$ 694,00/Tonelada
Perda de produção de 1 Conversor por 1 h	R\$ 139.000,00
Tempo de uma parada não programada para substituição de cabos avariados	10 horas
Prejuízo com a parada de 3 Conversores para a substituição de cabos avariados	R\$ 4.170.000,00

Como mostra a tabela acima, a utilização deste novo método de manutenção preditiva em cabos elétricos evitou a falha do circuito alimentador da Aciaria, permitindo que os cabos em final de vida útil fossem substituídos antes de falharem, poupando a empresa de um prejuízo de aproximadamente R\$ 4.170.000,00.

4 CONCLUSÃO

A implantação deste novo sistema de diagnose de cabos elétricos contribui com o aumento da confiabilidade dos circuitos de distribuição de energia elétrica da CSN, avaliando as condições da isolação (vida útil) dos cabos antes que seja necessária uma intervenção não programada no circuito, implicando em perdas no processo produtivo.

Além disto, esta nova tecnologia, proporciona a redução no tempo de reparo dos circuitos, a partir da localização da falta na extensão dos cabos, o que permite um ganho com a substituição apenas do trecho avariado e não de toda extensão do cabo.



REFERÊNCIAS

- 1 ASTM D-1868-93. Detection and Measurement of Partial Discharges (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems" Disponível em:
<<http://www.ebah.com.br/descargas-parciais-em-barras-bobinas-do-estator-da-maquina-sincrona-pdf-a31735>>. Acesso em: 20 set.2009
- 2 Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Guilherme.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2009.
- 3 BAUR DO BRASIL. **Apostila de Treinamento:** On Site Testing and Diagnosis of Medium Voltage Cable Systems Using Very Low Frequency. Belo Horizonte. 77p.
- 4 DATA ENGENHARIA. **Apostila de Treinamento:** Diagnóse em Cabos Elétricos de Média Tensão. Sarzedo. 12 p.