

Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Ciências e Tecnologia – CCT

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Avaliação de Técnicas de Monitoramento de
Isoladores Poliméricos**

Max Gleison Gonçalves Neri

Campina Grande, junho - 2005

Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Ciências e Tecnologia – CCT

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às
exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:
Professor Edson Guedes da Costa

Campina Grande, junho - 2005



N445a Neri, Max Gleison Goncalves
Avaliacao de tecnicas de monitoramento de isoladores polimericos / Max Gleison Goncalves Neri. - Campina Grande, 2005.
70 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Isoladores Eletricos 2. Isoladores Polimericos 3. Monitoramento de Isoladores 4. Dissertacao I. Costa, Edson Guedes da II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.315.6(043)

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES
POLIMÉRICOS.**

MAX GLEISON GONÇALVES NERI

Dissertação Aprovada em 07.07.2005



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Julho - 2005

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e pelos talentos que me concedeu, os quais pretendo multiplicar ainda mais.

A minha família pelo incentivo nas horas difíceis e por suportar minhas ausências. A Elida pelo apoio, incentivo e compreensão.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica. Especialmente aos do Grupo de Sistemas Elétricos pelo agradável convívio, respeito, amizade, reconhecimento e incentivo.

Ao Prof. Edson Guedes da Costa pelo incentivo, e pela contribuição intelectual no decorrer do curso. Ana Luisa Guedes pela boa vontade e disposição em ajudar sempre que necessário.

A Isabele Larouche da Consol, que gentilmente enviou uma amostra do software Femlab©, para avaliação.

Aos muitos amigos e colegas do DEE, especialmente a: Kleber, José Antônio, George, Tomás, Tarso, Estácio, Darlan, Fabiano, Eduardo, Edmilson, Karcius, Flávio, Elon, Ângelo, Luciano e Diana.

Aos colegas Osvaldo Leite Simões Paiva e Miguel Simões Paiva (Chesf), Ricardo Wesley Salles Garcia (Cepel) pela suas inestimáveis contribuições para o trabalho, Max Norat Cavalcante (Chesf) e Wladimir Cezarino (Chesf) pela oportunidade de conhecer um pouco da prática de inspeções técnicas no sistema de potência.

Ao CNPq e ao GSE pelo suporte financeiro concedido durante o curso.

Resumo

As falhas em isolamentos elétricos são as principais causas das interrupções no fornecimento de energia elétrica aos diversos consumidores. O desempenho das linhas de transmissão de energia está diretamente relacionado com o desempenho dos seus isoladores. Os isoladores poliméricos começaram a ser utilizados no decênio de 1980, quando surgiu sua primeira versão comercial para linha de transmissão. Desde então, o uso de isoladores poliméricos vem aumentando devido as suas diversas vantagens sobre isoladores de porcelana ou de vidro. Entretanto, seu desempenho em longo prazo não é conhecido, tornando-se difícil avaliar a expectativa de vida do isolador. Atualmente, não existe uma técnica consolidada de monitoramento dos isoladores poliméricos. Foram avaliadas diversas técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. As técnicas avaliadas fazem uso da medição de descargas parciais, em laboratório, da radiação ultravioleta, emitida pelas descargas de corona, e da radiação infravermelha, emitida pelos corpos aquecidos. Isoladores poliméricos com e sem defeitos foram submetidos a ensaios elétricos e térmicos e simulações de campo elétrico. Com o trabalho foi possível a criação de um vasto banco de dados sobre o comportamento dos isoladores poliméricos. Analisando os resultados dos ensaios, para medição de descargas parciais, é possível classificar os defeitos apresentados pelos isoladores como de baixa, média ou alta gravidade. Analisando os resultados das simulações do comportamento do campo elétrico é possível perceber que o campo elétrico nos isoladores defeituosos foi mais intenso que no isolador perfeito. A inspeção de isoladores poliméricos com detectores de corona e infravermelho mostrou-se ser uma promissora técnica para detecção de isoladores defeituosos.

Abstract

Fails in insulates of electrical apparatus are among the main causes of energy interruptions in power systems to its customers. The line transmission performance is directly related with insulates performance. The polymeric insulates has been used since the 1980's when the first commercial version for line transmission was released. Since then, the usage of polymeric insulates has been increasing due to many advantages over the porcelain insulates or the glass one. Nevertheless its long term performance is not known, raising difficulties for evaluating the lifetime expectancy. Nowadays there is no consolidated technique for monitoring polymeric insulates. Several monitoring techniques were evaluated to detected defective or pending defective insulates. The evaluated techniques are partial discharge, UV radiation, IR radiation emitted by heated bodies. Both defective and non-defective polymeric insulates were analyzed in electrical and thermic tests as well in electrical field simulations. Therefore a great data bank of polymeric insulates behavior was raised. Taking into account the results of the tests of partial discharge, is possible to classify the fails of the insulates in low, high and medium seriousness. Analyzing the electrical field simulations, we concluded the electrical field in defective insulates was higher than in non defective ones. The survey of polymeric insulates with corona detector and IR technique has shown good results to detect defective insulates.

Lista de Figuras

Figura 2.1	Espectro típico de uma descarga corona no ar	11
Figura 2.2	Princípio de funcionamento do DayCor	12
Figura 2.3	Superfície hidrofóbica	15
Figura 2.4	Isolador polimérico	16
Figura 2.5	Fotografia de uma Brittle Fracture ocorrida em um isolador	17
Figura 2.6	Modelo elétrico básico do material sob ensaio	21
Figura 2.7	Diagrama elétrico do circuito equivalente	21
Figura 2.8	Gráfico representativo de um processo estático de descargas parciais em um dielétrico	22
Figura 3.1	Fotografia de um dos isoladores utilizados nos ensaios	24
Figura 3.2	Desenho ilustrativo dos defeitos	25
Figura 3.3	Circuito experimental para medição de descargas parciais	27
Figura 3.4	Fotografia do arranjo experimental de detecção de descargas parciais	28
Figura 3.5	Isolador Polimérico e suporte utilizado	28
Figura 3.6	Vista lateral da câmara de névoa	30
Figura 3.7	Isolador no interior da cabine, com aplicação de névoa	31
Figura 3.8	Circuito experimental para medição de temperatura com névoa	31
Figura 4.1	Nível de descargas parciais no primeiro dia, com isolador perfeito	35
Figura 4.2	Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio, com isolador perfeito	35
Figura 4.3	Campo elétrico no isolador perfeito	36
Figura 4.4	Imagem térmica do isolador perfeito, ensaio a seco	37
Figura 4.5	Imagem térmica do isolador perfeito, ensaio com névoa	38
Figura 4.6	Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 1	39
Figura 4.7	Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 1	40
Figura 4.8	Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 1	41
Figura 4.9	Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 1	41
Figura 4.10	Imagem térmica no isolador Tipo 1, ensaio a seco	42
Figura 4.11	Imagem térmica no isolador Tipo 1, ensaio com névoa	43
Figura 4.12	Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 2	44
Figura 4.13	Nível de descargas parciais no quarto dia de ensaio com isolador Tipo 2	45
Figura 4.14	Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 2	46
Figura 4.15	Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 2	46
Figura 4.16	Imagem térmica do isolador Tipo 2, ensaio a seco	47
Figura 4.17	Ponto quente, após 180 minutos de ensaio	48
Figura 4.18	Imagem térmica no isolador Tipo 2, ensaio com névoa	48
Figura 4.19	Fotografia do isolador Tipo 4, após o termino do ensaio	49
Figura 4.20	Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 3	50
Figura 4.21	Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 3	51
Figura 4.22	Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 3	52
Figura 4.23	Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 3	52

Figura 4.24	Imagem térmica do isolador Tipo 3, ensaio a seco	53
Figura 4.25	Imagem térmica no isolador Tipo 3, ensaio com névoa	54
Figura 4.26	Fotografia do isolador Tipo 3	54
Figura 4.27	Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 4	55
Figura 4.28	Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 4	56
Figura 4.29	Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 4	57
Figura 4.30	Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 4	57
Figura 4.31	Imagem térmica do isolador Tipo 4, ensaio a seco	58
Figura 4.32	Imagem térmica no isolador Tipo 4, ensaio com névoa	59
Figura 4.33	Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 5	60
Figura 4.34	Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 5	61
Figura 4.35	Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 5	62
Figura 4.36	Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 5	62
Figura 4.37	Figura 4.37 - Imagem térmica do isolador Tipo 5, ensaio a seco	63
Figura 4.38	Imagem térmica no isolador Tipo 5, ensaio com névoa	64
Figura 4.39	Fotografia do isolador Tipo 5	64

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Critérios de avaliação NETA MTS	14
Tabela 4.1	Comportamento dos isoladores durante ensaio com névoa limpa	64

Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	9
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	11
Detector de ultravioleta	11
Termografia.....	14
Descoberta do Infravermelho	14
Termovisor.....	14
Critérios de avaliação	15
Isoladores Poliméricos.....	16
Vantagens.....	16
Desvantagem.....	17
Constituição	17
Descargas Parciais	21
Modelo	21
Capítulo 3 - Materiais e Métodos.....	25
Materiais.....	25
Métodos.....	27
Medição de descargas parciais.....	27
Medição de temperatura a seco	29
Medição de temperatura com névoa	30
Simulação do comportamento do campo elétrico	32
Capítulo 4 - Resultados e Análises.....	33
Resultados	33
Isolador Perfeito.....	34
Isolador Tipo 1.....	39
Isolador Tipo 2.....	44
Isolador Tipo 3.....	50
Isolador Tipo 4.....	55
Isolador Tipo 5.....	60
Resumo da Análise dos Resultados.....	65
Capítulo 5 - Conclusão	67
Referências Bibliográficas.....	70

Capítulo 1 - Introdução

Atualmente, as interrupções no fornecimento de energia não programadas são duramente punidas pela Aneel, além de provocarem grandes prejuízos para consumidores e concessionárias.

A proposta de uma melhor qualidade no fornecimento de energia elétrica oferecida pelas concessionárias tem como uma das ênfases a redução de suas interrupções. Para assegurar a continuidade no fornecimento de energia elétrica é importante monitorar os equipamentos que compõem o sistema para se antecipar as possíveis falhas.

Segundo Bezerra (2004), as falhas em isolamentos elétricos são as principais causas pelas interrupções no fornecimento de energia elétrica aos diversos consumidores supridos por um sistema de potência. No caso de linhas de transmissão, segundo Nigri (1999), seu desempenho está diretamente relacionado com o desempenho dos seus isoladores.

Os isoladores poliméricos começaram a ser utilizados no decênio de 1980, quando surgiu a primeira versão comercial de isoladores poliméricos para linha de transmissão (HALL, 1993). Desde então, o seu uso vem aumentando devido as suas diversas vantagens sobre isoladores de porcelana ou de vidro. As três principais vantagens, apontadas pelas empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica, em uma pesquisa realizada por Kikuchi et al (1999), são a sua fácil instalação, seu peso reduzido e sua resistência ao vandalismo.

Entretanto, os isoladores poliméricos também possuem desvantagens em relação aos isoladores de porcelana ou vidro. Eles, muitas vezes, não apresentam, aparentemente, indícios de que houve uma falha interna (HACKAM, 1999), dificultando a identificação por uma inspeção feita do solo. Também, seu desempenho em longo prazo não é conhecido, tornando-se difícil avaliar a expectativa de vida do isolador. Além disso, eles estão sujeitos a alterações químicas em seu revestimento, devido às condições ambientais ou a formação de arcos voltaicos em sua superfície.

Pesquisadores em diversas partes do mundo buscam desenvolver técnicas mais eficazes para detectar isoladores poliméricos defeituosos ou na iminência de falhar, contudo, até o presente não existe uma técnica consolidada capaz de identificar os isoladores com defeitos ou na iminência de falhar. Atualmente, muitas empresas de transmissão realizam inspeções durante a madrugada, quando a umidade aumenta, e em noites de lua nova, devido

a pouca iluminação favorecer a identificação de possíveis falhas. As inspeções somente detectam isoladores em estágio avançado de deterioração ou mesmo após a falha.

Muitas das técnicas desenvolvidas para avaliar o estado dos isoladores utilizam ensaios em laboratório, com amostras de isoladores retiradas de operação. Outras técnicas de inspeção fazem uso de análises químicas realizadas em pequenas partes da superfície do isolador para diagnosticar as condições do mesmo, como em Birtwhistle et al. (1999). As amostras dos isoladores são retiradas com os mesmos energizados.

Segundo Osvaldo L. S. Paiva e Miguel S. Paiva, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) possui atualmente entre 20 e 30 mil isoladores poliméricos instalados nas suas linhas de transmissão. O monitoramento dos isoladores poliméricos é realizado utilizando binóculos em inspeções noturnas ou diurnas ao nível do solo, outro tipo de inspeção é realizada da torre que suporta os isoladores (informação verbal).

O objetivo deste trabalho é avaliar técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. As técnicas avaliadas fazem uso da medição de descargas parciais, em laboratório, da radiação ultravioleta, emitida pelas descargas de corona, e da radiação infravermelha, emitida pelos corpos aquecidos. O aumento da quantidade de descargas parciais, que podem ocorrer no interior do isolador, pode ser um indicio de falha. Tais descargas geram calor, que pode ser detectado pelo detector de radiação infravermelha. Entretanto, a sujeira que se acumula na superfície do isolador, ou pequenas imperfeições podem gerar descargas de corona, externas ao isolador, tais descargas também geram calor, e assim podem dificultar a identificação de defeitos internos ao isolador, que são mais difíceis de identificar. Torna-se assim necessário uso dos detectores de infravermelho e ultravioleta, conjuntamente, para uma correta identificação dos defeitos internos.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Este capítulo é iniciado com uma revisão bibliográfica sobre o detector de ultravioleta e a termografia, onde são abordados os seus princípios básicos de funcionamento. Em seguida é realizada uma revisão bibliográfica sobre isoladores poliméricos e descargas parciais.

Detector de ultravioleta

As descargas de corona ocorrem em torno de um eletrodo energizado, quando o campo elétrico criado pelo mesmo ultrapassa a energia de ionização do meio isolante (gás). As descargas de corona podem provocar a degradação das características do material. Elas geram ondas de ultra-som, radiação ultravioleta, ozônio, oxigênio, erosão mecânica da superfície, ondas eletromagnéticas na faixa de radio recepção, entre outros fenômenos (BARTNIKAS; McMAHON, 1979). Existem diversas maneiras de detectar a descarga de corona, seja por ultra-som, por instrumentos de medição de descargas parciais ou pela emissão de luz. É possível identificar, com exatidão, o local onde ocorre a descarga de corona pela emissão de luz e pelo seu ruído, entretanto, tal procedimento restringe-se a ambientes silenciosos e com pouca luminosidade e a descargas relativamente intensas. Para detectar descargas de pequena intensidade é necessário utilizar um equipamento especial, o detector de ultravioleta (detector de corona).

A visão humana é sensível à radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 400 e 700 nm, este intervalo é o da luz visível. Os comprimentos de onda mais curtos correspondem à luz violeta, e os mais longos à vermelha (TIPLER, 1995).

As descargas de corona emitem radiação ultravioleta entre 230 e 405 nm no ar. Na Figura 2.1 apresenta-se um gráfico típico da emissão de radiação eletromagnética produzido pela descarga de corona no ar, é importante notar que a intensidade relativa encontra-se multiplicada por 100, na faixa de 200 a 290 nm. O detector de corona, *DayCor Camera*®, capta radiação de 240 até 280 nm, apesar de ser uma faixa em que a intensidade da emissão é relativamente menor que na faixa de 280 a 400 nm. Na faixa de 240 a 280 nm a radiação solar não consegue atingir a superfície da terra, devido à camada de ozônio. Assim o *DayCor Camera*® pode detectar descargas de corona durante o dia (LINDNER et al, 1999). Entretanto, as medições de corona em ambientes chuvosos são fortemente influenciadas,

devendo ser evitada (De NIGRIS, 2004). As medições de corona também são prejudicadas pela presença da névoa.

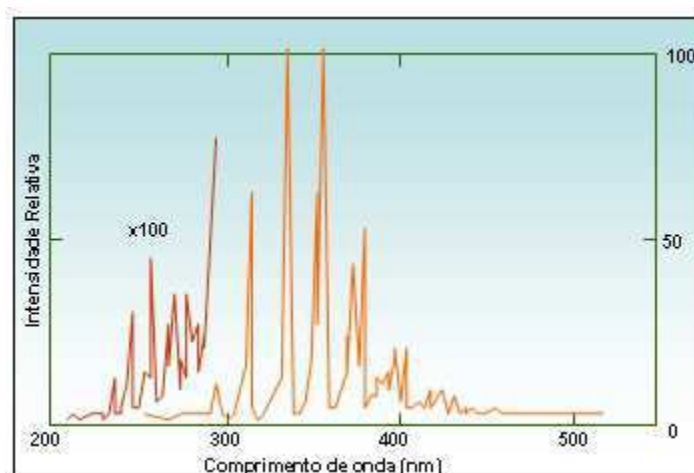


Figura 2.1- Espectro típico de uma descarga corona no ar (LINDNER at al, 1999).

O *DayCor Camera*® possui duas câmeras acopladas, uma câmera comum e outra para captar as imagens na faixa de ultravioleta, na qual ocorre a emissão de sinais de descarga corona. Os sinais são processados separadamente por processadores digitais. As câmeras são alinhadas para que registrem a mesma imagem e gerem dois sinais de vídeo (PAL ou NTSC). Os sinais podem ser exibidos separadamente ou de forma composta, permitindo a perfeita localização do ponto onde ocorre o corona (LINDNER at al, 1999). Na Figura 2.2 é possível observar um desenho do princípio de funcionamento do *DayCor Camera*®. A imagem ultravioleta passa por um filtro de radiação solar de faixa estreita e vai diretamente para o detector de ultravioleta, enquanto a imagem visível é refletida pelos espelhos E_1 e E_2 e finalmente captada pela câmera de vídeo convencional. O filtro de radiação solar é utilizado para assegurar que os sinais luminosos fora da faixa de 240 a 280 nm não serão detectados, eliminando assim a sensibilidade à radiação solar. A alta filtragem da luz visível permite intensificar a imagem ultravioleta até que se consiga observar individualmente os fótons (LINDNER at al, 1999).

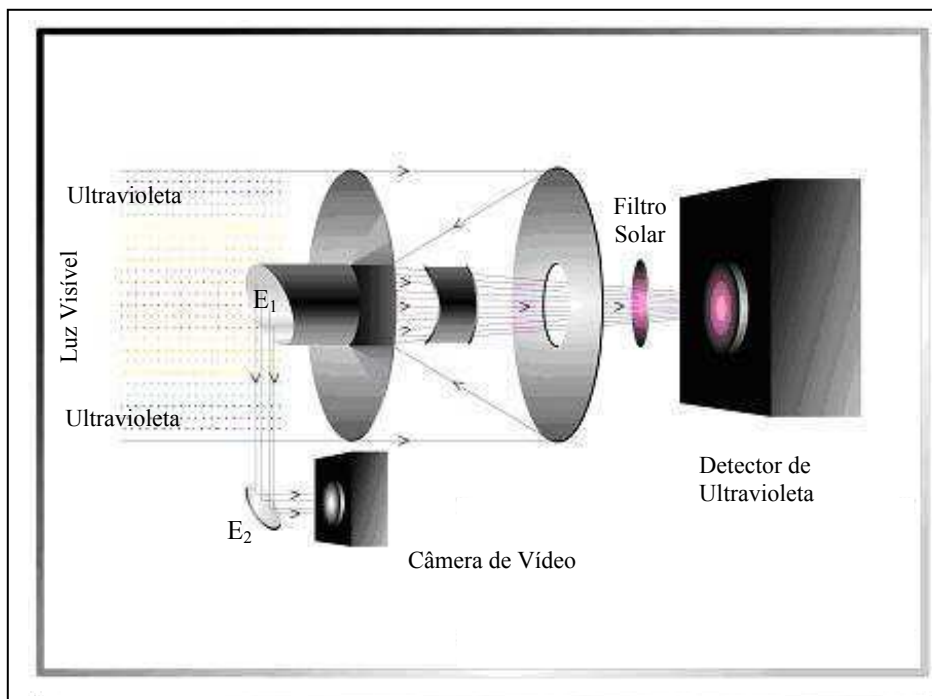


Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do DayCor (LINDNER, 2004).

Testes realizados com o *DayCor Camera*® comprovaram que o equipamento é capaz de medir sinais com até 30 pC de intensidade a 6 m de distância. O equipamento pode ser utilizado para medir descargas de corona a uma distância de 3 a 100 m, com boa relação sinal-ruído (LINDNER et al, 1999).

Termografia

Descoberta do Infravermelho

O astrônomo inglês Sir William Herschel (1738-1822), descobriu o infravermelho em 1800. Sabendo que a luz solar continha todas as cores do espectro e que era também uma fonte de calor, Herschel queria descobrir qual ou quais eram as cores responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Idealizou um experimento usando um prisma, papelão e termômetros com bulbos pretos onde mediu as temperaturas das diferentes cores. Herschel observou um aumento de temperatura à medida que movia o termômetro de violeta para o vermelho, no espectro criado pela luz do sol atravessando o prisma. Descobriu que a temperatura mais quente ocorria, de fato, além da luz vermelha. A radiação que causou esse aquecimento não era visível; Herschel denominou a radiação invisível como “raios caloríficos”. Hoje, ela é conhecida como infravermelha (FLIR SYSTEMS, 2005).

Termovisor

Todos os objetos emitem radiação infravermelha proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta e com comprimento de onda inversamente proporcional à mesma. Entre 600 e 700°C há energia suficiente no espectro visível para que o corpo adquira uma cor vermelho escura. Em temperaturas mais elevadas fica vermelho-cereja ou mesmo brilhante (TIPLER, 1995).

Um termovisor converte a radiação infravermelha, emitida pelos objetos que estejam sendo focalizados, em uma escala de cores. Na imagem térmica, a temperatura dos corpos pode ser identificada pela sua cor. Em muitas situações, uma anormalidade pode ser indicada pelo aumento ou diminuição na temperatura da superfície de um equipamento (EPPERLY et al, 1999). As imagens térmicas devem ser registradas para posterior comparação com imagens anteriores, para identificar possíveis anormalidades.

A emissividade superficial dos materiais é um importante fator para a correta medição da temperatura na superfície dos materiais. Emissividade é a relação entre a radiação emitida por um corpo e a radiação emitida por um corpo negro, na mesma temperatura. A emissividade é aproximadamente unitária para superfícies de cores escuras, e aproximadamente zero para superfícies de cores claras.

A termografia é uma técnica prática de inspeção em equipamentos elétricos, ela permite inspecionar diversos equipamentos em um curto espaço de tempo. É também relativamente segura, pois as inspeções são realizadas à distância.

Entretanto, uma cuidadosa interpretação dos resultados deve ser feita para evitar medições equivocadas de aquecimentos secundários, que podem ser detectados devido à condução, convecção, radiação ou reflexão de calor (EPPERLY, 1999).

Critérios de avaliação

Depois de realizada uma inspeção termográfica em determinado equipamento, uma recomendação deve ser feita para especificar os procedimentos a serem adotados. Existem normas e recomendações de associações profissionais e de concessionárias que estabelecem critérios para determinar a necessidade e urgência para manutenção preditiva, ou reparo. Na Tab. 2.1 é possível observar um exemplo de recomendações feitas pela 'InterNational Electrical Testing Association' (apud EPPERLY at al, 1999, p. 34).

Tabela 2.1 - Critérios de avaliação NETA MTS (apud EPPERLY at al, 1999, p. 34).

Diferença de temperatura entre equipamentos similares, nas mesmas condições de carga.	Diferença entre a temperatura do equipamento e a ambiente.	Ação recomendada
1°C a 3°C	1°C a 3°C	Possível deficiência; justifica investigação.
4°C a 15°C	11°C a 20°C	Indica provável deficiência; reparar quando possível.
---	22°C a 40°C	Monitorar continuamente até que uma manutenção corretiva possa ser efetuada.
> 16°C	> 40°C	Reparar imediatamente.
Obs.: As temperaturas especificadas variam dependendo do tipo do equipamento.		

Isoladores Poliméricos

Os isolantes poliméricos começaram a ser utilizados no decênio de 1940 em ambientes fechados, quando foi construído o primeiro isolador para alta tensão com material orgânico (epóxi). Entretanto, apenas no início do decênio de 1980 surgiu a primeira versão comercial de isoladores poliméricos para linha de transmissão (HALL, 1993). Desde então, o uso de isoladores poliméricos vem aumentando devido as suas diversas vantagens sobre isoladores de porcelana ou vidro. A seguir, são citadas algumas vantagens e também desvantagens dos isoladores poliméricos em relação aos isoladores cerâmicos.

Vantagens

Uma das maiores vantagens dos isoladores poliméricos, em relação aos cerâmicos, é a capacidade de manter a sua hidrofobia, mesmo em ambientes poluídos, quando então a hidrofobia é transmitida à camada de poluentes depositados na superfície do isolador. Hidrofobia é a propriedade que permite a superfície do material repelir a água, evitando a formação de uma película de água, assim, ela reduz as correntes de fuga (RODURFLEX, 2004a). Na Figura 2.3 é possível observar uma fotografia da superfície de um isolador com característica hidrofóbica.



Figura 2.3 - Superfície hidrofóbica (Rodurflex, 2004b).

Outras vantagens dos isoladores poliméricos podem ser mencionadas: (1) São mais leves, assim reduzem o tempo gasto em sua instalação e conseqüentemente seu custo. (2) são menos susceptíveis ao vandalismo, que pode causar a queda de uma linha de transmissão cujos isoladores tenham sido alvejados por projéteis de arma de fogo. (3) reduz os custos com manutenção, pois não precisa ser lavado periodicamente (HACKAM, 1999). (4) Não emitem tanta interferência eletromagnética quanto os isoladores cerâmicos (FONTGALLAND et al, 2004).

Desvantagem

Diferentemente dos isoladores de vidro temperados, que se esfarelam quando quebrados, os isoladores poliméricos muitas vezes não apresentam, aparentemente, indícios de que houve uma falha interna. Assim, uma inspeção feita do solo pode não detectar problemas no isolador. É difícil avaliar a expectativa de vida do isolador e seu comportamento em longo prazo é desconhecido (HACKAM, 1999). Eles estão sujeitos a alterações químicas em seu revestimento devido às condições ambientais ou à formação de arcos voltaicos em sua superfície (KIM et al, 1994). A expectativa de vida útil dos isoladores poliméricos é de 30 a 40 anos, enquanto nos isoladores cerâmicos a expectativa de vida útil é de 60 a 90 anos.

Constituição

Os isoladores poliméricos são constituídos por três elementos principais: núcleo de fibra de vidro, revestimento de borracha e ferragens terminais. Na Figura 2.4 é possível observar o desenho de um isolador polimérico com alguns tipos mais comuns de terminais.

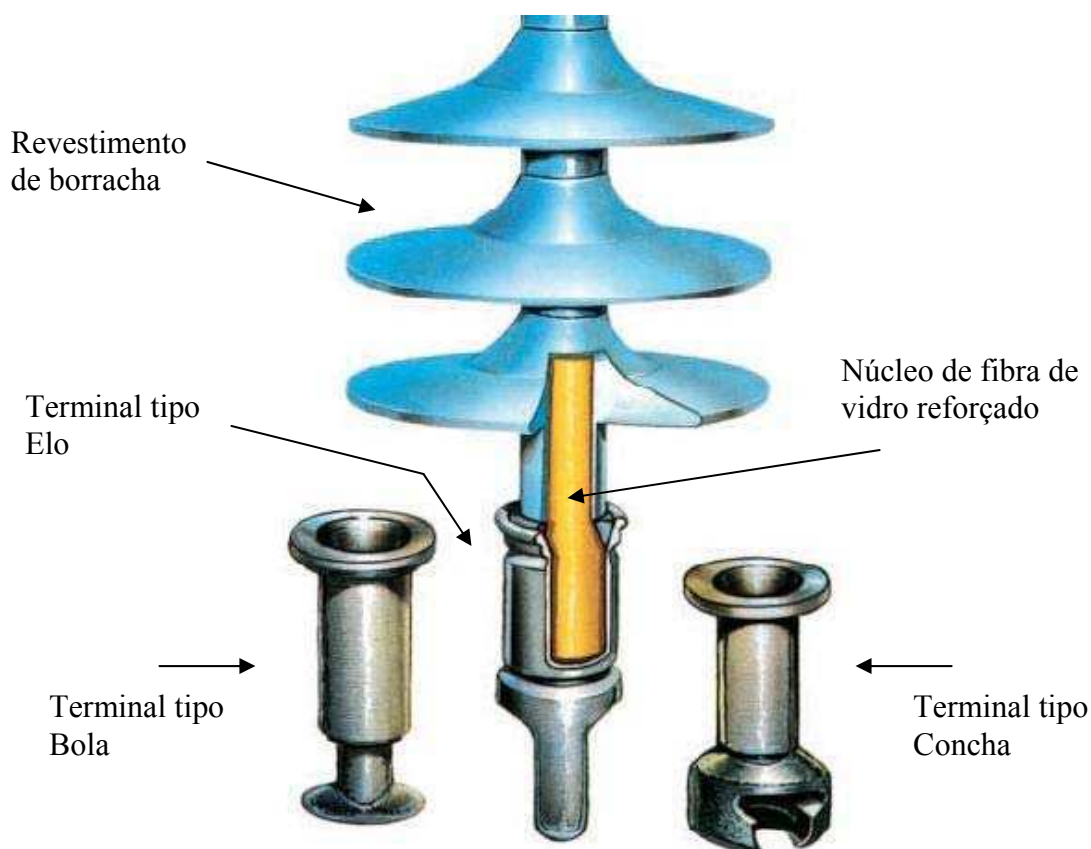


Figura 2.4 - Isolador polimérico (RODURFLEX, 2004b).

Núcleo de Fibra de Vidro Reforçada

O núcleo dos isoladores poliméricos é um bastão de fibra de vidro reforçada (FRP – “*Fiber Reinforced Plastic Rod*”) e tem como função suportar os esforços mecânicos provenientes do condutor, conservando ao mesmo tempo características elétricas perfeitas. O núcleo de fibra de vidro reforçada é composto basicamente pela fibra de vidro e por uma resina impregnante. A resina utilizada pode ser de poliéster, vinil ou epóxi. Sendo preferivelmente utilizada a epóxi, devido a seu excelente desempenho (De TOURREIL at al, 2000). A resina epóxi base é adicionada um endurecedor, utilizado para controlar a cura do material.

No núcleo de fibra de vidro reforçado pode ocorrer a fratura por esfarelamento, provocadas por corrosão (*Brittle Fracture*). *Brittle Fracture* é uma falha mecânica do núcleo de fibra que conduz a fraturas irreversíveis, podendo ocasionar a queda da linha de transmissão.

Na Figura 2.5 é possível observar a fotografia de uma *Brittle Fracture* ocorrida em um isolador polimérico utilizado em linhas de 230 kV.

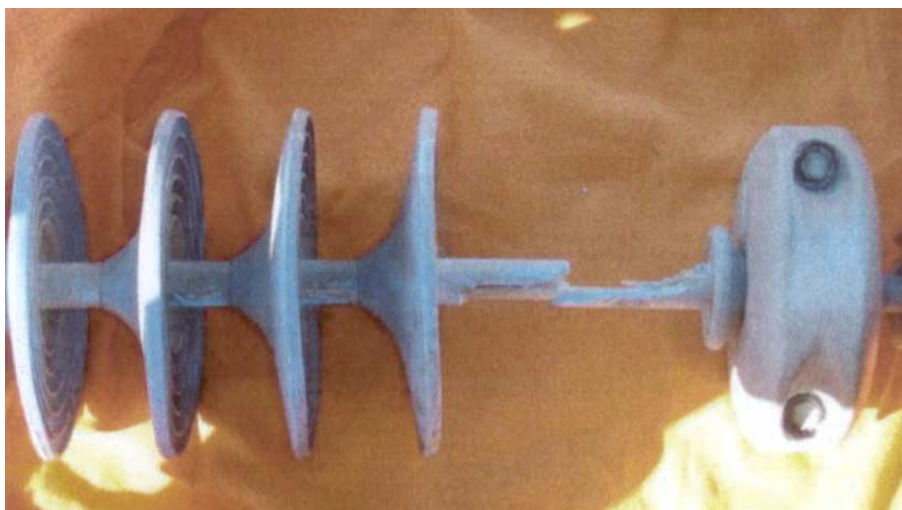


Figura 2.5 - Fotografia de uma *Brittle Fracture* ocorrida em um isolador.

O mecanismo da *Brittle Fracture* vem sendo estudado por vários pesquisadores. Aparentemente existem três modelos concorrentes para explicar o mecanismo da *Brittle Fracture*. Os três modelos são brevemente expostos a seguir.

Modelo 1

De acordo com De Turreil at al (2000), a *Brittle Fracture* ocorre devido à corrosão causada pelo ataque de ácidos à fibra de vidro, simultaneamente tensionada pela carga de tração. Segundo De Turreil at al (2000), o ácido estaria presente, na forma cristalizada, no

bastão FRP. Se os cristais de ácido forem atingidos pela umidade pode ocorrer uma reação química, da qual resulte o ácido que conduziu a uma fratura no núcleo por *Brittle Fracture*. Os prováveis caminhos para a umidade ter acesso às partículas de ácido cristalizado são através de alguma perfuração no revestimento ou microfissura no selo. A função do selo é garantir a estanqueidade do isolador, o material utilizado é geralmente silicone, ele é colocado na confluência do revestimento, do bastão FRP e das ferragens terminais. Por estar em contato com três materiais diferentes, o selo pode desenvolver microfissuras devido a variação de temperatura, que provoca a expansão ou contração dos materiais.

Porém, se não houver o contato entre a umidade e núcleo, é extremamente difícil ocorrer a *Brittle Fracture*, mesmo que existam partículas de ácido cristalizado na superfície do núcleo (De TOURREIL et al, 2000).

Modelo 2

O ácido não é necessário a *Brittle Fracture*, podendo ocorrer a ruptura do núcleo na presença de água e tensão mecânica, aplicadas simultaneamente. Montesinos et al (2002), acreditam que a ruptura tem maior probabilidade de ocorrer quando exposta a água do que quando exposta ao ácido.

Modelo 3

De acordo com Kumosa et al (2004), o ácido que provoca a *Brittle Fracture* é o ácido nítrico, produzido pelas descargas de corona na superfície do isolador. Por esse motivo, a maioria das fraturas ocorre nas proximidades do terminal de alta tensão, onde o campo elétrico é mais intenso.

Entretanto, atualmente existem núcleos de fibra de vidro reforçado que são resistentes a *Brittle Fracture*. Os núcleos de fibras de vidro construídos sem óxido de boro são quimicamente resistentes aos ácidos que podem provocar a *Brittle Fracture* (RODURFLEX, 2004a).

Revestimento de Borracha

Os isoladores poliméricos possuem um revestimento de um composto especial de borracha que protege o núcleo de fibras de vidro reforçado contra agentes externos (umidade, contaminadores químicos, radiação ultravioleta, etc.), assegurando a estanqueidade do conjunto e dando ao isolador as distâncias elétricas necessárias para um bom desempenho nas

condições normais de operação. A borracha do isolador polimérico deve ser capaz de suportar efetivamente os efeitos causados pelo sol, ozônio e pela poluição.

Os materiais comumente utilizados no revestimento de isoladores poliméricos são: etileno-propileno monômero (EPM), etileno-propileno dieno monômero (EPDM), borracha de silicone (SIR), acetato de vinil-etileno (EVA) e ligas de EPDM (ou EPM) e silicone (ZHAO; BERNSTORF, 1998).

Ferragens Terminais

As ferragens terminais são os componentes metálicos do isolador, cuja função é transmitir ao núcleo os esforços mecânicos do condutor, fazendo as interligações condutor/isolador e isolador/estrutura. Existem diversos tipos de ferragens terminais, conforme pode ser observado na Figura 2.4. O formato da ferragem também é importante para equalizar o campo elétrico em torno do mesmo, evitando possíveis descargas de corona ou estresse elétrico no material.

Descargas Parciais

Descargas parciais são micro-descargas elétricas que curto-circuitam parte da isolação entre dois eletrodos. As descargas parciais são decorrentes do fenômeno de ionização na região do dielétrico do material isolante que apresenta um defeito/imperfeição (cavidades, impurezas condutoras). A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da amplitude e da forma de onda da tensão aplicada, da forma do eletrodo e das características do dielétrico ou dielétricos envolvidos.

A isolação de qualquer equipamento submetido a tensões elevadas está sujeito à ocorrência das descargas parciais. Em isolamento a base de compostos orgânicos o efeito das descargas parciais podem ser extremamente danoso e causar a sua perfuração total. Entretanto, na maioria dos casos, a atividade de descargas localizadas e de baixa intensidade não conduzirá a ruptura total do isolamento. O equipamento mesmo com descargas parciais poderá operar por um longo período sem que efeitos danosos sejam notados.

Em dielétricos gasosos as descargas não representam problema maior devido à capacidade autoregenerativa do gás. Entretanto em isolantes sólidos e líquidos o nível da energia contido nas descargas provoca uma degradação do material.

De forma generalizada, as descargas elétricas que ocorrem em um só dielétrico (descargas parciais em gases, em torno de um condutor, por exemplo) são normalmente referidas como corona. Quando as microdescargas ocorrem em isolamentos envolvendo dois ou mais dielétricos são referenciadas como descargas parciais.

Os ensaios com medição de descargas parciais podem ser realizados no controle de qualidade de empresas para detectar equipamentos defeituosos ou em ensaios de recebimento, por parte das empresas (NERI et al, 2004).

Modelo

A modelagem de descargas parciais (TETREX, 1984) pode ser feita, inicialmente, considerando um material dielétrico com uma cavidade em seu interior, geralmente preenchida com ar. Na Figura 2.6 é mostrado o modelo elétrico básico de um material isolante sob ensaio para o estudo da descarga parcial.

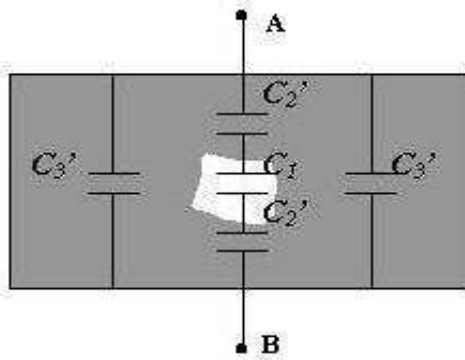


Figura 2.6 - Modelo elétrico básico do material sob ensaio.

Se uma tensão alternada $U_t(t)$ é aplicada aos eletrodos A e B, o arranjo pode ser modelado, em termos de descargas parciais, através do circuito equivalente mostrado na Figura 2.7.

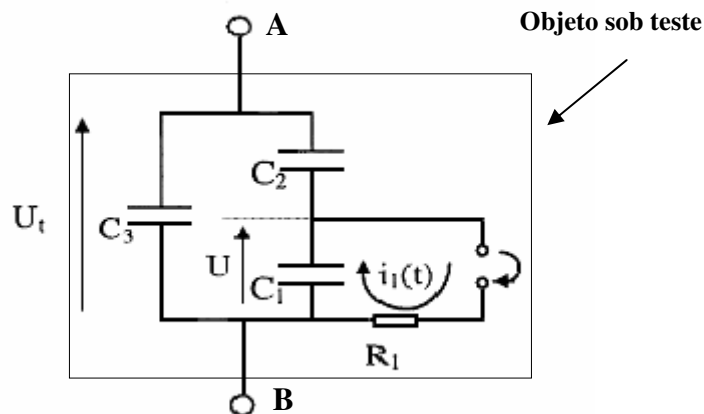


Figura 2.7 - Diagrama elétrico do circuito equivalente.

A capacitância da cavidade é representada por C_1 ; a capacitância do material que está em série com a cavidade é representada por C_2 , e C_3 representa a capacitância do resto do material. R_1 é a resistência do arco elétrico (descarga).

O processo da descarga elétrica pode ser melhor compreendido utilizando o gráfico apresentado na Figura 2.8.

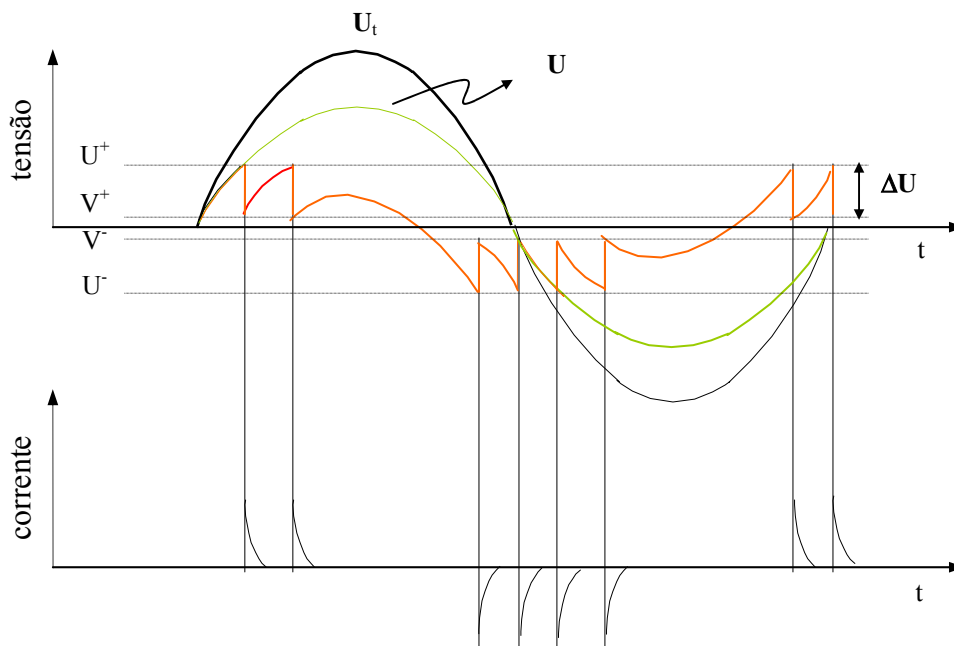


Figura 2.8 - Gráfico representativo de um processo estático de descargas parciais em um dielétrico (KREUGER, 1989).

Como dito anteriormente, $U_t(t)$ representa a tensão de alimentação alternada aplicada ao material sob ensaio; $U(t)$ a tensão aparente que deveria existir na cavidade, caso a descarga elétrica não existisse; U^+ e U^- são as tensões disruptivas da cavidade para as duas situações de polaridade da tensão de alimentação; V^+ e V^- são as tensões residuais existentes nas cavidades, após a ocorrência das descargas elétricas, devido à transferência de cargas.

O processo da descarga se inicia quando a tensão na cavidade atinge a U^+ . Neste instante ocorre a quebra da rigidez dielétrica e conseqüentemente uma descarga. Este comportamento é semelhante a aplicação de um degrau de tensão igual a $U^+ - V^+$ sobre o capacitor C_j . Após a extinção da descarga, a tensão na cavidade se reduz a V^+ , e volta a crescer. Ao atingir novamente a tensão disruptiva, ocorre outra descarga. O processo se repete várias vezes até que a tensão sobre a amostra decresça e se iguale a U^- , provocando uma nova descarga. No processo, o intervalo entre o início e a extinção da descarga é extremamente rápido. Ou seja, cada evento é acompanhado por um transitório eletromagnético da ordem de 100 ns (KREUGER, 1989). Portanto, as descargas formam pulsos de correntes de alta frequência nos terminais das amostras, como também pode ser observado na Figura 2.8. Outro fato importante a ser observado é que os pulsos se concentram nas regiões onde o gradiente de tensão em relação ao tempo é máximo.

No processo de geração das descargas parciais, as tensões disruptivas e residuais são simétricas, o que deveria provocar, teoricamente, a observação de um gráfico estático no osciloscópio, ou seja, o processo de descarga se repetiria de maneira igual em todo o período de aplicação da senóide. Caso esta simetria não ocorra, as descargas seriam intermitentes, que é o que acontece em situações reais. Portanto, sinais de descarga parcial não podem ser considerados estacionários e bem localizados no tempo.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

O capítulo é iniciado com uma descrição dos materiais utilizados nos ensaios, na seção Materiais. Em seguida, é feita uma descrição detalhada dos procedimentos adotados na realização do experimento, na seção Métodos.

Os valores de tensão citados no texto referem-se à tensão eficaz, salvo quando houver alguma especificação contrária.

Materiais

Os objetos de teste utilizados nos experimentos são isoladores poliméricos para linhas de transmissão de 69 kV. Todos os isoladores são novos, alguns perfeitos e outros com defeitos de fabricação previamente conhecidos. Cada isolador pesa 4 kg e mede 970 mm de comprimento. Seus diâmetros da saia maior, saia menor, núcleo revestido de borracha e núcleo de fibra de vidro são respectivamente 100,0; 90,0; 27,5 e 16,5 mm. O silicone foi utilizado para revestir o núcleo e compor as aletas. O isolador possui 25 aletas e pode suportar uma carga mecânica de 120 kN. Seus terminais são do tipo concha/bola. Na Figura 3.1 é exibida uma fotografia de um dos isoladores utilizados nos ensaios.

Foram avaliadas seis unidades, sendo que uma apresenta total integridade e foi considerada como referência. As demais apresentam diferentes tipos de defeitos. Em cada isolador foi implantado apenas um tipo de defeito. As amostras foram devidamente confeccionadas por um fabricante tradicional de isoladores. Os defeitos descritos a seguir ocorrem basicamente na interface entre os materiais ou na superfície. Na Figura 3.2 é possível observar um desenho ilustrando os cinco tipos de defeito, bem como uma breve descrição dos mesmos.



Figura 3.1 - Fotografia de um dos isoladores utilizados nos ensaios.

- Tipo 1 Fio de cobre com 5 cm de comprimento, colocado entre o bastão e o revestimento no sentido longitudinal, em contato com a ferragem do lado fase;
- Tipo 2 Fio de cobre com 5 cm de comprimento, colocado entre o bastão e o revestimento no sentido longitudinal, a 5 cm de distância da ferragem do lado fase;
- Tipo 3 Uma seção circular de 5 cm de comprimento, sem aderência entre o revestimento e o bastão, a partir da ferragem do lado fase;
- Tipo 4 Uma seção circular de 5 cm de comprimento, sem aderência entre o revestimento e o bastão, a 5 cm de distância da ferragem do lado fase;
- Tipo 5 Uma seção de 2 cm de largura por 0,5 cm de comprimento, no sentido longitudinal, sem revestimento polimérico, a 3 cm da ferragem do lado fase. A falha expõe o núcleo reforçado de fibra de vidro.
-

Figura 3.2 - Desenho ilustrativo dos defeitos.

Métodos

Com a finalidade de investigar seu comportamento, os isoladores poliméricos passaram por um processo de envelhecimento artificial de suas características elétricas. O seu comportamento elétrico e térmico foi observado em condições de alta e de baixa umidade. Também foram analisados, através de simulações, o comportamento do campo elétrico nos isoladores com o objetivo de identificar seus pontos de estresse.

Medição de descargas parciais

Com o objetivo de observar a evolução dos defeitos apresentados pelos isoladores poliméricos foram realizados ensaios com envelhecimento acelerado, durante os quais foram feitas medições de descargas parciais a cada 6 minutos.

Para se produzir o envelhecimento acelerado nos isoladores foi aplicado um nível de tensão de aproximadamente 60 kV, o nível de tensão aplicado supera em 50 % a tensão nominal do isolador. Dependendo do comportamento das amostras e da continuidade no fornecimento de energia, os ensaios tiveram duração de até 120 horas, para cada amostra.

Os ensaios para medição de descargas parciais foram implementados a partir do circuito específico ilustrado na Figura 3.3, em conformidade com a IEC 60270 (2000).

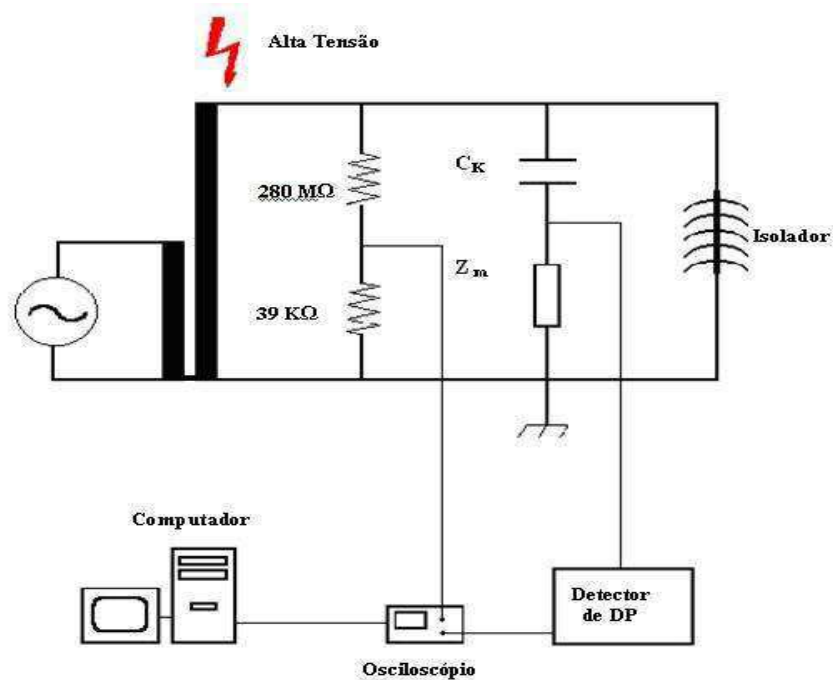


Figura 3.3 - Circuito experimental para medição de descargas parciais.

O circuito para medição de descargas parciais é constituído das seguintes partes: mesa de controle (Ferranti), filtros de linha, transformador de 220 V/100 kV-10 kVA, detector de descargas parciais (Biddle), capacitor de acoplamento (Ck) de 2 nF/100 kV imune a descargas parciais, amostras experimentais (isoladores poliméricos), resistor de 39 k Ω , resistor de alta tensão de 280 M Ω e um osciloscópio digital TDS 2014 (Tektronix). A impedância de medição (Z_m) encontra-se no interior do detector de descargas parciais. Os dois resistores foram conectados em série e formam um divisor de tensão resistivo. A relação do divisor de tensão é de 7 180,5 V. Na Figura 3.4 é apresentada uma fotografia do circuito experimental, na qual podem ser observados o transformador (à esquerda), resistor (componente central) e o capacitor de acoplamento (à direita).

Na Figura 3.5 é mostrada uma fotografia de um dos isoladores utilizados no experimento, suspenso por uma barra horizontal aterrada, a qual está apoiada em colunas isolantes de PVC, estando todo o conjunto inserido em uma sala blindada para aquisição dos sinais de descargas parciais.



Figura 3.4 - Fotografia do arranjo experimental de detecção de descargas parciais.



Figura 3.5 - Isolador Polimérico e suporte utilizado.

Após ensaios preliminares, em que se detectou a presença de descargas de corona nas superfícies e conexões dos componentes do circuito, procedeu-se a “uma limpeza” da superfície e coberturas especiais das conexões com o intuito de reduzir possíveis pontos de corona.

A calibração direta do sistema foi feita para garantir a correta correlação entre as descargas parciais geradas e a medida. O sinal de referência foi de 100 pC.

Com o objetivo de verificar o nível de ruído ambiente, o arranjo experimental foi montado sem o isolador polimérico, porém com todas as outras ferragens em seus devidos lugares. Em seguida foi aplicado o nível de tensão superior a 60 kV, o nível de corona e interferência eletromagnética medido foi de 5 pC.

Medição de temperatura a seco

O mesmo arranjo experimental utilizado para medição de descargas parciais foi também utilizado para a medição de temperatura na superfície dos isoladores, a seco, com instrumento de termovisão. O termovisor utilizado foi o AGEMA 570, fabricado pela FLIR Systems©. A medição de temperatura na superfície dos isoladores, a seco, é importante para observar a geração de calor produzido pelos defeitos internos aos isoladores.

As medições de temperatura na superfície dos isoladores foram realizadas após o processo de envelhecimento acelerado de até 120 horas. Para que os isoladores atingissem a temperatura normal de operação, foram energizados por pelo menos 4 horas.

Medição de temperatura com névoa

Também é importante conhecer o comportamento dos isoladores quando submetidos a uma condição de alta umidade.

Para medição de temperatura, em condição de umidade elevada, uma câmara de nevoa limpa foi construída com folha de plástico transparente com o objetivo de se realizar ensaios elétricos com aplicação de nevoa limpa. A câmara mede 3,5 x 3,5 x 3 m de largura, comprimento e altura, respectivamente. A armação da câmara foi construída com tubos de ferro de 2" e chapas de ferro com 30 mm de largura por 5 mm de espessura, toda estrutura foi montada sobre rodízios para facilitar a sua locomoção. Na Figura 3.6 é possível ver uma fotografia da lateral da câmara, com destaque para a abertura lateral para passagem do cabo de alta tensão. Para produzir a névoa foram utilizados pulverizadores, construídos conforme a norma IEC 507 (1991). Uma outra câmara, de menores dimensões, foi construída na Universidade Federal de Campina Grande (BEZERRA, 2004), servindo de inspiração para a construção da atual.

Na Figura 3.7, pode ser observada uma fotografia do isolador polimérico, no interior da câmara, durante a aplicação de névoa limpa.

As medições de temperatura na superfície dos isoladores, com aplicação de névoa limpa e tensão, foram realizadas utilizando um termovisor modelo P60, fabricado pela FLIR Systems©. O desenho do circuito elétrico utilizado no ensaio para medição de temperatura na superfície dos isoladores com névoa limpa pode ser observado na Figura 3.8. Durante a realização dos ensaios com aplicação de névoa, a presença de descargas de corona foi monitorada utilizando o detector de ultravioleta, DayCor II®. A presença de descargas de corona pode ser um indício de falhas no isolador. A tensão aplicada ao isolador foi medida através de um divisor capacitivo e um voltímetro de pico.

O ensaio com névoa foi realizado na câmara de nevoa limpa. Os ensaios tiveram duração aproximada de 4 horas com tensão aplicada de aproximadamente 60 kV. A névoa limpa foi aplicada durante os primeiros e os últimos 90 minutos de ensaio. Foram registradas três imagens térmicas durante cada ensaio, elas foram adquiridas no início do ensaio, após o período de 150 minutos e ao final do ensaio.



Figura 3.6 - Vista lateral da câmara de névoa



Figura 3.7 - Isolador no interior da cabine, com aplicação de névoa.

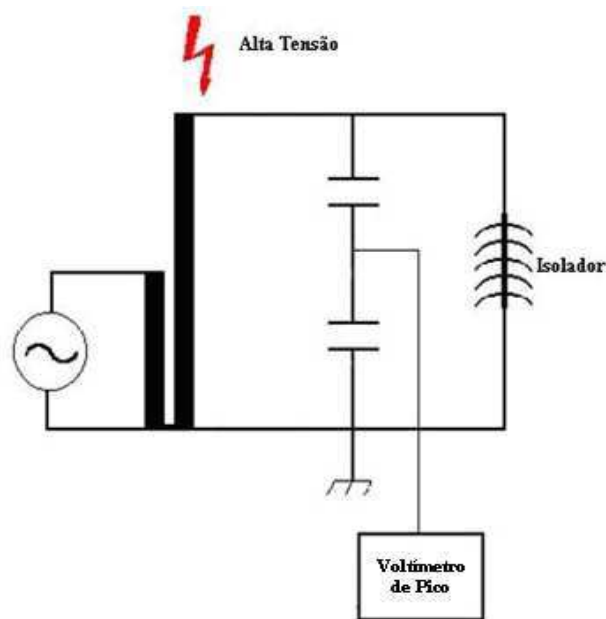


Figura 3.8 - Circuito experimental para medição de temperatura com névoa.

Simulação do comportamento do campo elétrico

Com o objetivo de confrontar os pontos de geração de calor, de corona e de descargas parciais e associá-los aos defeitos, foi realizado um estudo do comportamento do campo elétrico nos isoladores. O estudo visava a identificação dos pontos onde o campo elétrico era mais intenso, dentro ou fora dos isoladores.

O programa Femlab® foi utilizado para realizar as simulações do comportamento do campo elétrico nos isoladores, o software é um pacote computacional avançado para modelagem e simulação de processos físicos que podem ser descritos por equações parciais diferenciais.

O desenho dos isoladores foi feito com auxílio do programa Autocad®. Os arquivos foram salvos com extensão dxf e posteriormente importado pelo programa de cálculo de campo elétrico. A região de simulação foi um retângulo medindo 0,5 m de largura e 1,6 m de altura. As constantes dielétricas relativas utilizadas foram: 2,8 para o núcleo do isolador, 3,5 para o revestimento polimérico, 5×10^{18} para os terminais e um para o ar. A espessura da camada com falta de aderência e do fio de cobre foram de 0,2 mm. Nas simulações, a diferença de potencial utilizada entre os terminais dos isoladores foi 84,85 kV de pico.

Capítulo 4 - Resultados e Análises

Com o objetivo de avaliar as técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos, foram realizados ensaios em isoladores defeituosos ou não, cada um dos isoladores foi descrito em Materiais no Capítulo 3. A medição de descargas parciais foi realizada durante aproximadamente 5 dias (120 horas), durante todo o ensaio os isoladores estiveram submetidos a uma tensão que superava em 50% o valor da tensão nominal. O ensaio para medição de descargas parciais também serviu para provocar um envelhecimento acelerado das características elétricas dos isoladores. Posteriormente, foram realizados ensaios para medição de temperatura na superfície dos isoladores a seco e com aplicação de névoa limpa, cada ensaio teve duração de até 4 horas.

A seguir são apresentados e analisados, com detalhes, os resultados obtidos durante a realização dos ensaios.

Resultados

Analisando os resultados dos ensaios de descargas parciais é possível perceber que, durante a realização do ensaio, praticamente não houve evolução nos níveis de descargas parciais no isolador perfeito. Situação diferente ocorreu com os isoladores defeituosos, quando houve uma considerável evolução nos níveis de descargas parciais.

Simulações do comportamento do campo elétrico foram realizadas em cada um dos isoladores, para determinação das regiões de maior intensidade do campo elétrico e de distribuição de potencial.

O comportamento do campo elétrico dos isoladores foi simulado utilizando-se da sua simetria axial. Nos isoladores Tipo 1 e 2, o fio de cobre colocado entre o bastão e o revestimento polimérico foi representado por um anel envolvendo o núcleo. No isolador Tipo 5, a falta de material que expõe parcialmente o núcleo foi representada por uma falta de material que expõe totalmente 2 cm de comprimento do núcleo.

Com a realização dos ensaios para medição de temperatura a seco, em alguns casos, foi possível identificar o aumento da temperatura nas proximidades do defeito. Entretanto, na maioria dos casos não foi possível identificar um significativo aumento da temperatura nas proximidades do defeito.

Durante o ensaio para medição de temperatura com nevoa limpa foi observada a presença de descargas de corona na superfície de alguns isoladores. A ocorrência de descargas

de corona foi observada quando existiam defeitos externos aos isoladores. Com a medição de temperatura na superfície dos isoladores foi possível identificar o aumento da temperatura nas proximidades do defeito em alguns casos.

Isolador Perfeito

As características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas do isolador perfeito utilizado nos ensaios foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. O isolador perfeito foi ensaiado inicialmente e seus resultados serviram como referência para os ensaios seguintes.

Medição de descargas parciais

Para um melhor entendimento dos gráficos foram adotadas as escalas: vertical é dada em Volts, para os impulsos de descargas parciais 100 pC corresponde a 1 Volt; e a horizontal é dada em número de pontos adquiridos. O intervalo de tempo entre as aquisições é 10 μ s.

O nível de descargas no início do ensaio, medido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 5 pC. O sinal de descargas parciais no início do ensaio pode ser visto na Figura 4.1, ele permaneceu praticamente inalterado durante os cinco dias de realização do ensaio, apresentando valores menores que 10 pC. Apesar de ter duplicado o valor das descargas durante o ensaio, os níveis de descargas parciais não apresentam valores significativos ao final do ensaio.

O nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio pode ser visto na Figura 4.2. Comparando-se as Figura 4.1 e Figura 4.2 é possível observar que não houve significativa evolução no nível de descargas parciais.

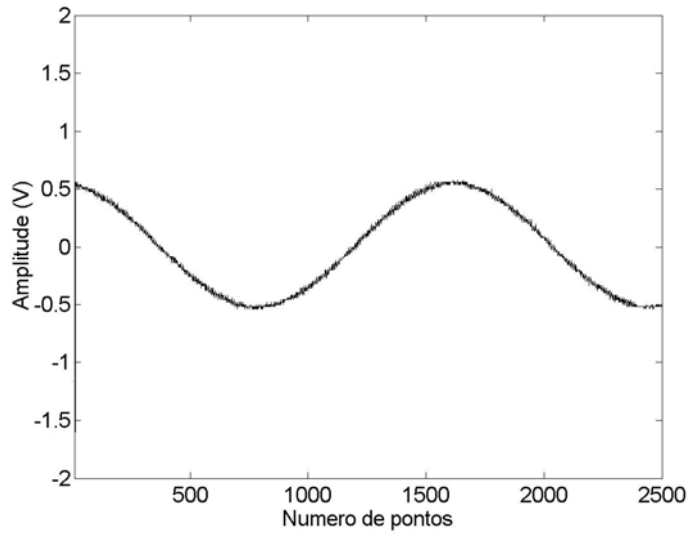


Figura 4.1 - Nível de descargas parciais no primeiro dia, com isolador perfeito.

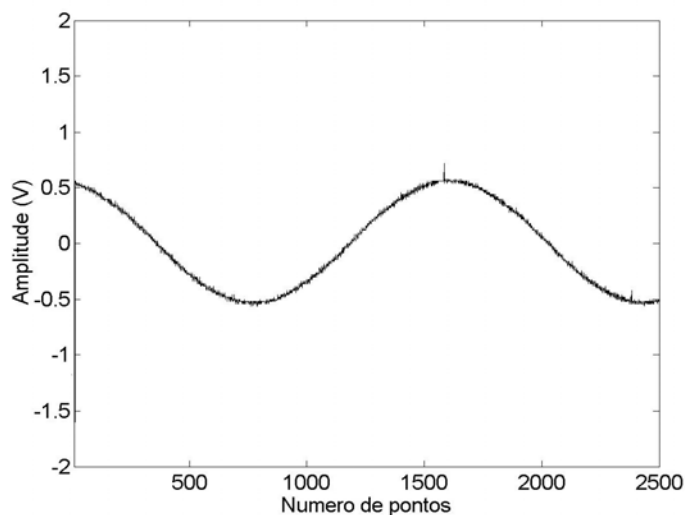


Figura 4.2 - Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio, com isolador perfeito.

Simulação de campo elétrico

O isolador perfeito foi simulado utilizando o programa Femlab®, seus resultados serviram como referência para as simulações dos outros isoladores. O resultado da simulação de campo elétrico no isolador perfeito pode ser observado na Figura 4.3, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi de 25,2 kV/cm, no terminal de alta tensão.

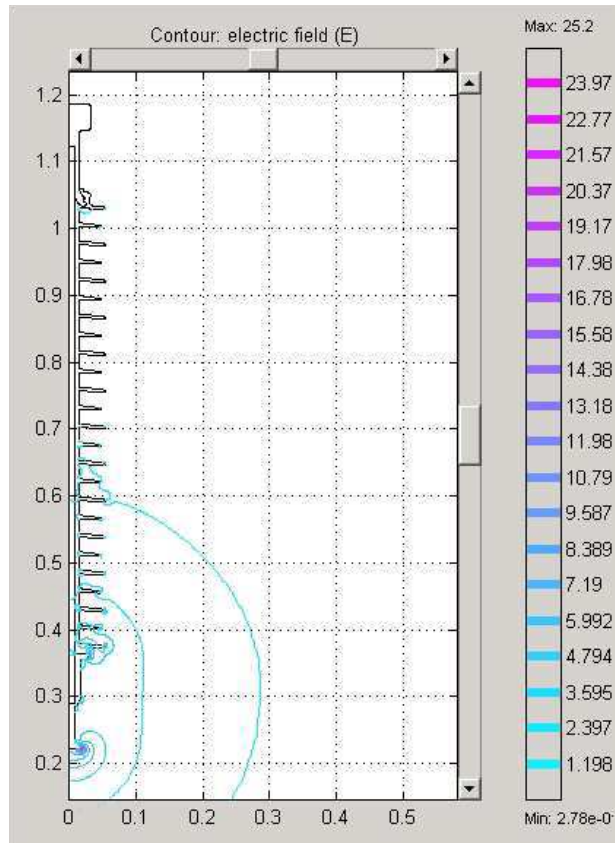


Figura 4.3 - Campo elétrico no isolador perfeito.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador perfeito é apresentada na Figura 4.4. A imagem térmica foi realizada ao final do ensaio. Como era de se esperar, a temperatura na superfície do isolador se apresentou uniformemente distribuída.

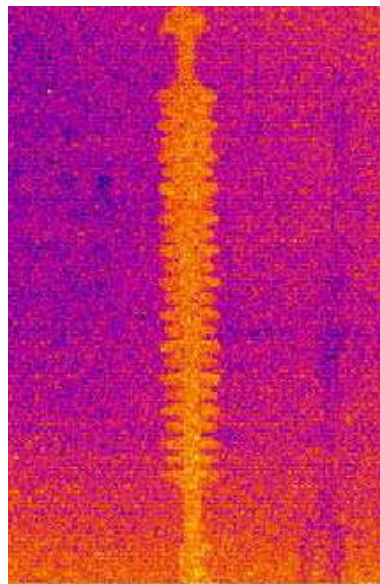


Figura 4.4 - Imagem térmica do isolador perfeito, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador perfeito foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador, e seus resultados serviram como referência para as simulações dos outros isoladores. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios pode ser encontrada no item Métodos do Capítulo 3.

Uma imagem térmica do isolador perfeito obtida no início do ensaio pode ser vista na Figura 4.5. Na imagem térmica é possível perceber um ponto mais aquecido do que o restante do isolador, a diferença de temperatura, em relação ao restante do isolador, foi de 0,6°C. Ao final do ensaio, a temperatura na superfície do isolador apresentava-se uniformemente distribuída. É possível que o aumento na temperatura, observado no início do ensaio, tenha sido causado por algum tipo de sujeira na superfície do isolador.

O detector de corona foi utilizado para verificar a ocorrência de corona no isolador. Entretanto, não foi identificada a presença de descargas de corona na superfície do isolador durante o ensaio.

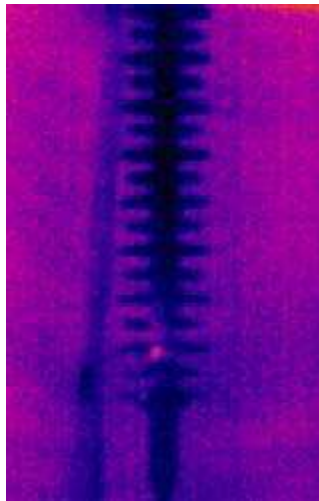


Figura 4.5 - Imagem térmica do isolador perfeito, ensaio com névoa.

Isolador Tipo 1

A segunda amostra ensaiada foi o isolador Tipo 1, suas características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. Ele possui um fio de cobre, com 5 cm de comprimento, colocado entre o bastão e o revestimento no sentido longitudinal, em contato com a ferragem do lado fase. Na Figura 4.6 é possível ver o desenho do isolador inteiro, e uma ampliação focalizando a parte defeituosa.

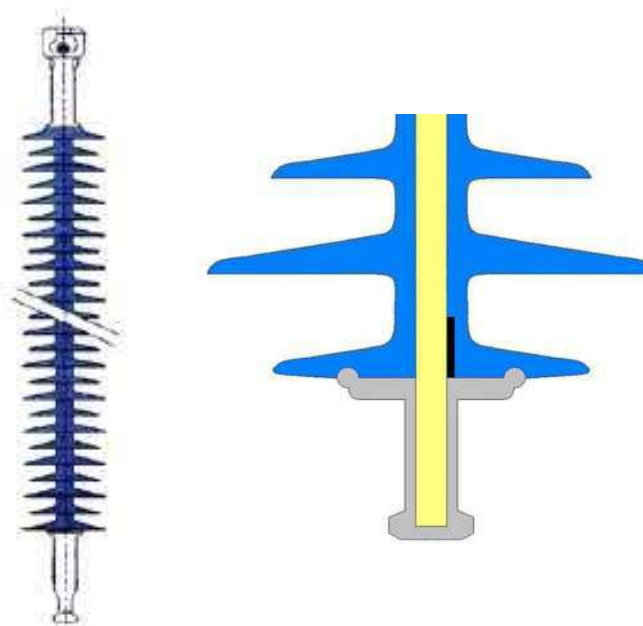


Figura 4.6 - Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 1.

Medição de descargas parciais

O nível de descargas parciais, no início do experimento, foi semelhante ao do isolador perfeito. O valor medido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 10 pC.

O nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio é mostrado na Figura 4.7. É possível observar que houve uma considerável evolução nos níveis e no número de descargas parciais. Comparando os resultados obtidos neste experimento com os obtidos no experimento com isolador perfeito, é possível concluir que no isolador defeituoso, Tipo 1, a evolução nos níveis de descargas parciais foi mais rápida. Ao final do ensaio, nível de descargas parciais atingiu 50 pC.

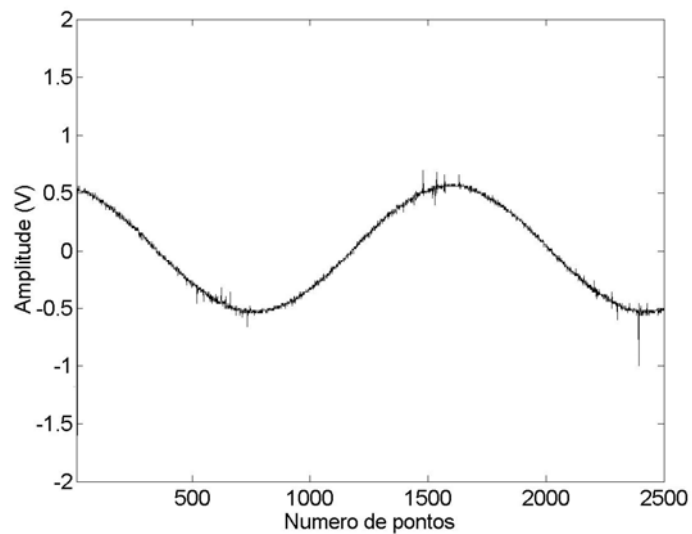


Figura 4.7 - Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 1.

Simulação de campo elétrico

O resultado da simulação de campo elétrico no isolador Tipo 1 pode ser visto na Figura 4.8, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi de 41,8 kV/cm, exatamente na extremidade superior do condutor que se encontra interligado ao terminal de alta tensão. Uma ampliação da figura anterior pode ser vista na Figura 4.9, onde o ponto de maior intensidade do campo elétrico pode ser melhor observado.

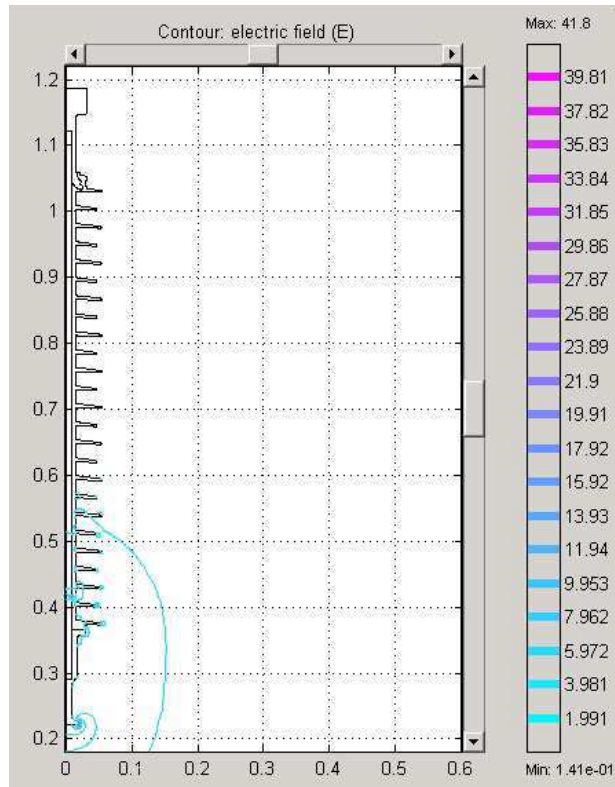


Figura 4.8 - Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 1.

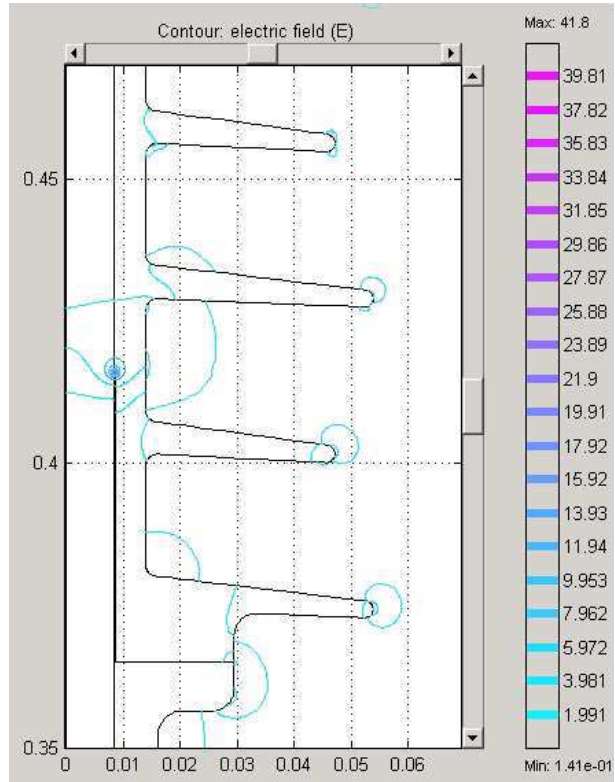


Figura 4.9 - Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 1.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador Tipo 1 é apresentada na Figura 4.10. Um aumento de temperatura da ordem de $1,4^{\circ}\text{C}$ na região exata do defeito pode ser observado, em relação ao restante do isolador. Como o fio de cobre possui uma de suas extremidades em contato com a ferragem do lado fase, na sua outra extremidade surge um intenso campo elétrico, como pode ser observado na Figura 4.9. Assim, o aumento da temperatura na região de defeito foi causado pela ação da emissão eletrônica ou por descargas parciais.

É possível fazer a suposição de que o alto valor da temperatura, na região do defeito pode ter sido agravado pelo processo de envelhecimento acelerado. O isolador utilizado no ensaio de termovisão havia sido submetido a um processo de envelhecimento acelerado, que normalmente perdurou por 120 horas.

Entretanto, para investigar melhor esta hipótese, um isolador novo, semelhante ao primeiro inclusive no tipo de defeito, foi submetido ao mesmo tipo de ensaio. O isolador não havia sido submetido ao processo de envelhecimento acelerado. A medição de temperatura a seco foi realizada após quatro horas de aplicação da tensão. O isolador apresentou resultados idênticos ao anterior. Portanto, o aquecimento foi mesmo provocado pela ação da emissão eletrônica ou por descargas parciais na região do defeito.

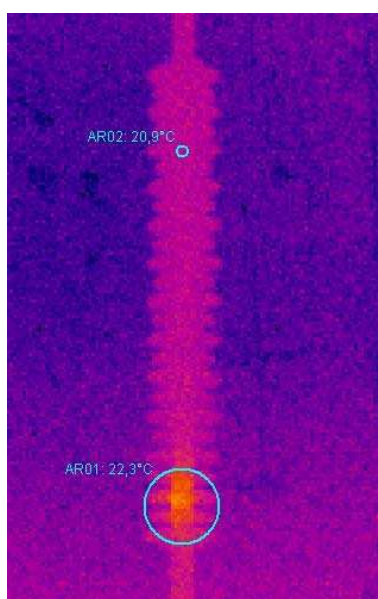


Figura 4.10 - Imagem térmica no isolador Tipo 1, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador defeituoso foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A distribuição de temperatura no início do ensaio se apresentou uniforme. Uma imagem térmica do isolador polimérico Tipo 1 pode ser vista na Figura 4.11. A imagem foi registrada ao final do ensaio, nela pode ser observado um aumento de temperatura da ordem de 0,6°C na região exata do defeito, em relação ao restante do isolador. O valor relativamente baixo da temperatura, quando comparado com a temperatura obtida no ensaio a seco, pode ser atribuído à presença do vapor de água. A presença do vapor provocou uma maior dissipação de calor.

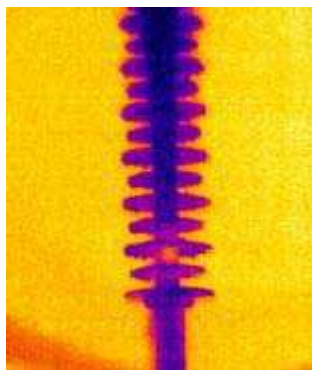


Figura 4.11 - Imagem térmica no isolador Tipo 1, ensaio com névoa.

O detector de corona foi utilizado para verificar a ocorrência de corona no isolador. Entretanto, não foi identificada a presença de descargas de corona na superfície do isolador durante o ensaio.

Isolador Tipo 2

A terceira amostra ensaiada foi o isolador Tipo 2, suas características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. Ele possui um fio de cobre com 5 cm de comprimento, colocado entre o bastão e o revestimento no sentido longitudinal, a 5 cm de distância da ferragem do lado fase conforme descrito em Materiais e Métodos. O desenho do isolador inteiro, e uma ampliação focalizando a parte defeituosa podem ser vistos na Figura 4.12.

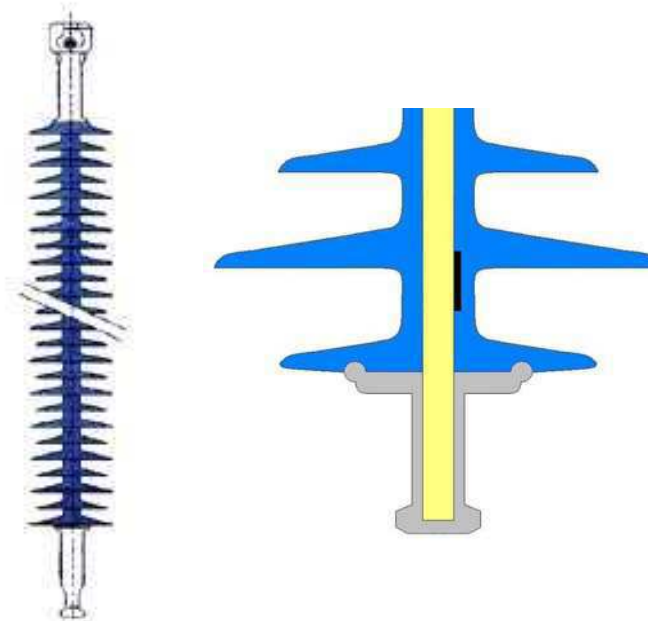


Figura 4.12 - Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 2.

Medição de descargas parciais

O nível de descargas parciais, no início do experimento, foi semelhante ao do isolador perfeito. O valor obtido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 10 pC. O nível de descargas parciais no quarto dia de ensaio é mostrado na Figura 4.13.

O experimento foi prematuramente interrompido no quarto dia devido à interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Comparando os resultados obtidos neste experimento com os obtidos no experimento com o isolador perfeito, é possível concluir que tanto a amplitude das descargas quanto à taxa de repetição das descargas aumentaram. Ao final do ensaio, nível de descargas parciais era de até 60 pC.

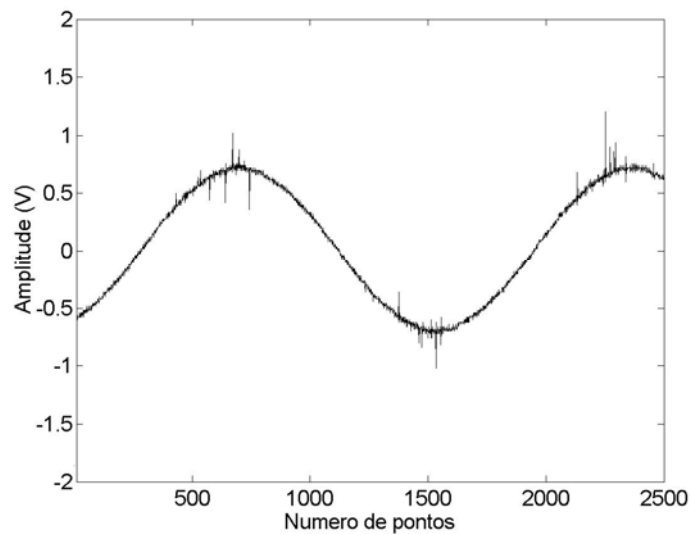


Figura 4.13 - Nível de descargas parciais no quarto dia de ensaio com isolador Tipo 2.

Simulação de campo elétrico

O resultado da simulação de campo elétrico no isolador Tipo 2 pode ser observado na Figura 4.14, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi 178 kV/cm, exatamente na extremidade inferior do condutor que se encontra a 5 cm de distância do terminal de alta tensão, na extremidade superior o campo elétrico é de 27 kV/cm. O condutor possui um potencial de 434,8 V. Uma ampliação da figura anterior pode ser observada na Figura 4.15, onde o campo máximo pode ser melhor observado.

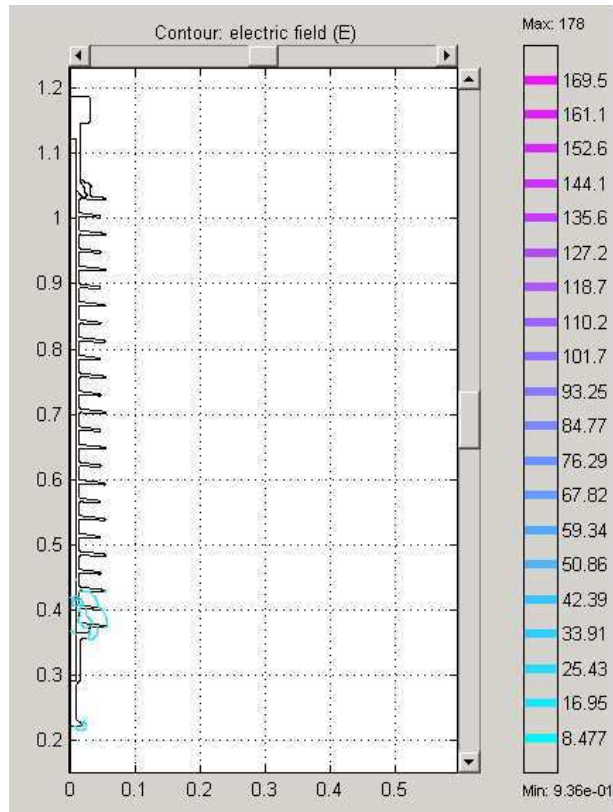


Figura 4.14 - Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 2.

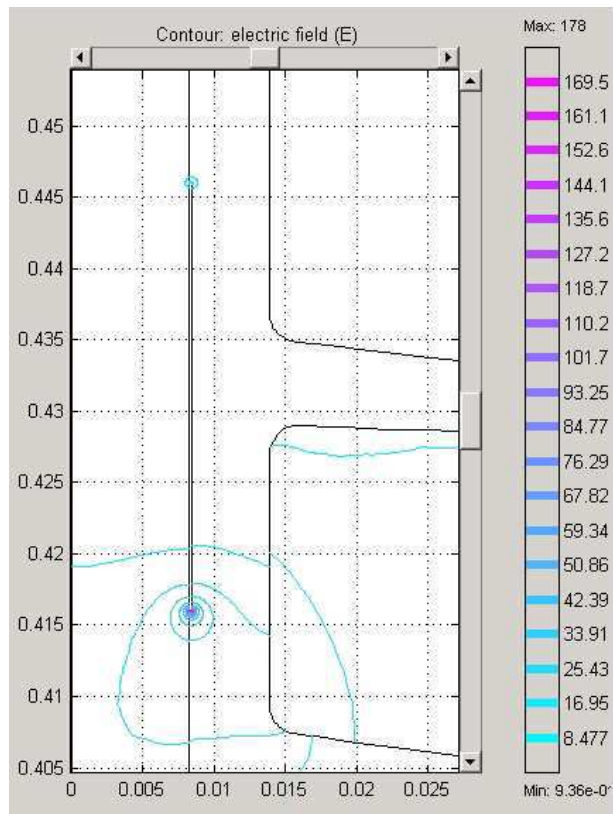


Figura 4.15 - Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 2.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador Tipo 2 é apresentada na Figura 4.16, nela pode ser observada uma elevação na temperatura de $0,2^{\circ}\text{C}$, em relação ao restante do isolador. Entretanto, o aumento na temperatura é muito pequeno para ser utilizado como embasamento em diagnósticos.

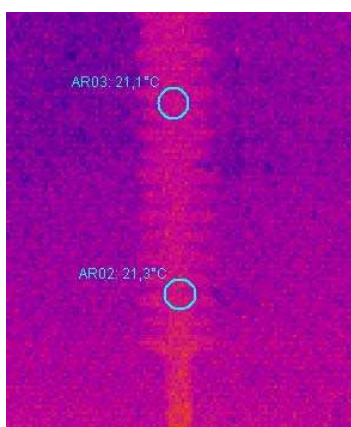


Figura 4.16 - Imagem térmica do isolador Tipo 2, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador defeituoso foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A distribuição de temperatura no início do ensaio se apresentou uniforme. Após 180 minutos de ensaio, era possível perceber a presença de um ponto mais aquecido em relação ao restante do isolador. Com o auxílio do detector de corona foi possível identificar a presença de descargas de corona, justamente no ponto onde foi registrado o aquecimento. Na Figura 4.17 é possível ver uma imagem térmica do isolador, após 180 minutos de ensaio. Na imagem térmica, o ponto apresenta-se mais aquecido em relação ao restante do isolador, a diferença de temperatura observada é de $2,3^{\circ}\text{C}$.

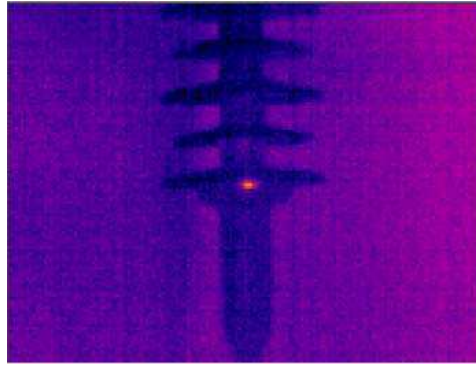


Figura 4.17 - Ponto quente, após 180 minutos de ensaio.

Uma outra imagem térmica do isolador polimérico Tipo 2 é exibida na Figura 4.18. A imagem foi registrada ao final do ensaio, nela é possível observar uma região mais aquecida em relação ao restante do isolador. A diferença de temperatura, em relação ao restante do isolador, é de $0,9^{\circ}\text{C}$, próximo à extremidade inferior do condutor e de 1°C , próximo à extremidade superior do condutor.

O ponto quente que apareceu aos 180 minutos de ensaio desapareceu completamente ao final do ensaio, assim como desapareceram também as descargas de corona. Portanto, é possível associar o ponto quente que apareceu aos 180 minutos a presença de descargas de corona.

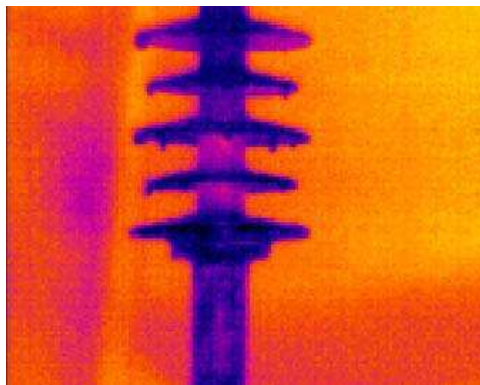


Figura 4.18 - Imagem térmica no isolador Tipo 2, ensaio com névoa.

Após o término do ensaio, o isolador foi minuciosamente inspecionado, na Figura 4.19 é possível observar uma fotografia do isolador, nela é possível perceber a presença de algumas rebarbas ou imperfeições na superfície do isolador, no local onde houve aquecimento aos 180 minutos de ensaio.

É possível que as descargas de corona tenham deixado de ocorrer ao final do ensaio devido à queima da borracha de silicone do revestimento do isolador.



Figura 4.19 - Fotografia do isolador Tipo 2, após o termino do ensaio.

Isolador Tipo 3

A quarta amostra ensaiada foi o isolador Tipo 3, suas características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. Ele possui uma seção circular de 5 cm de comprimento, sem aderência entre o revestimento e o bastão, a partir da ferragem do lado fase. O desenho do isolador inteiro, e uma ampliação focalizando a parte defeituosa podem ser observados na Figura 4.20.

Medição de descargas parciais

O nível de descargas parciais, no início do experimento, foi semelhante ao do isolador perfeito. O valor obtido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 10 pC. Após duas horas do início do ensaio, o nível de descargas aumentou para aproximadamente 30 pC. Foi um aumento representativo, não só em relação ao isolador perfeito, mas também em relação aos outros isoladores defeituosos ensaiados anteriormente.

No segundo, terceiro e quarto dia de ensaio, o nível de descargas parciais continuou a aumentar. O nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio pode ser observado na Figura 4.21. Comparando os resultados obtidos neste experimento com os obtidos nos experimentos anteriores, é possível concluir que houve uma evolução maior e mais rápida nos níveis de descargas parciais. Ao final do ensaio, o nível de descargas era de até 100 pC.

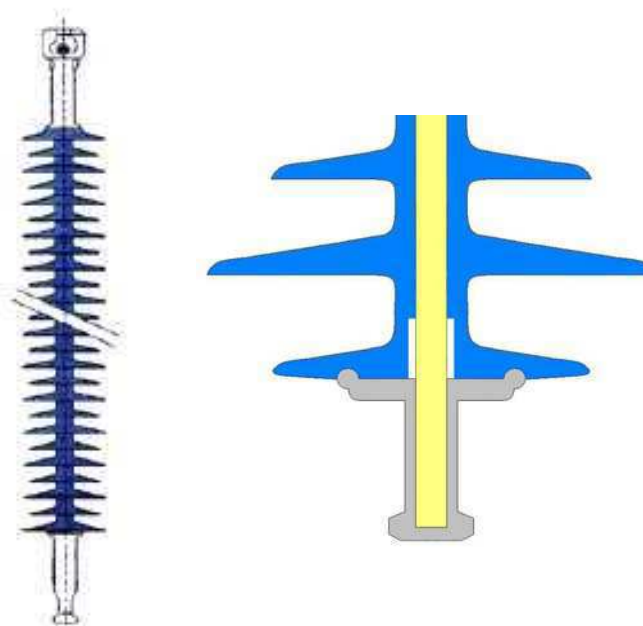


Figura 4.20 - Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 3.

Uma possível explicação para o fato é que a falta de aderência causada pelo espaço vazio entre o bastão e o revestimento facilitou a evolução do nível de descargas parciais. O espaço vazio no interior do isolador favoreceu o surgimento e a evolução acelerada nos níveis de descargas parciais.

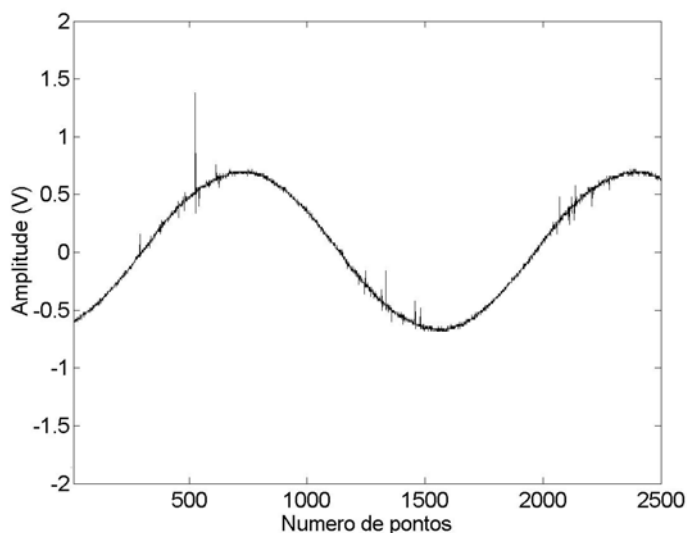


Figura 4.21 - Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 3.

Simulação de campo elétrico

O resultado da simulação de campo elétrico no isolador Tipo 3 pode ser observado na Figura 4.22, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi de 25,2 kV/cm, no terminal de alta tensão.

Uma ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 3 pode ser observada na Figura 4.23. O campo elétrico na extremidade inferior do defeito é de 8,32 kV/cm. A diferença de potencial entre as superfícies do núcleo e do revestimento polimérico é de 140 V, a distância que separa as superfícies é de 0,2 mm. A reprodução computacional deste defeito é extremamente difícil. O processo de produção da falta de aderência não permite que o fabricante realize com exatidão em termos de local e espessura a falta de aderência imposta ao isolador.

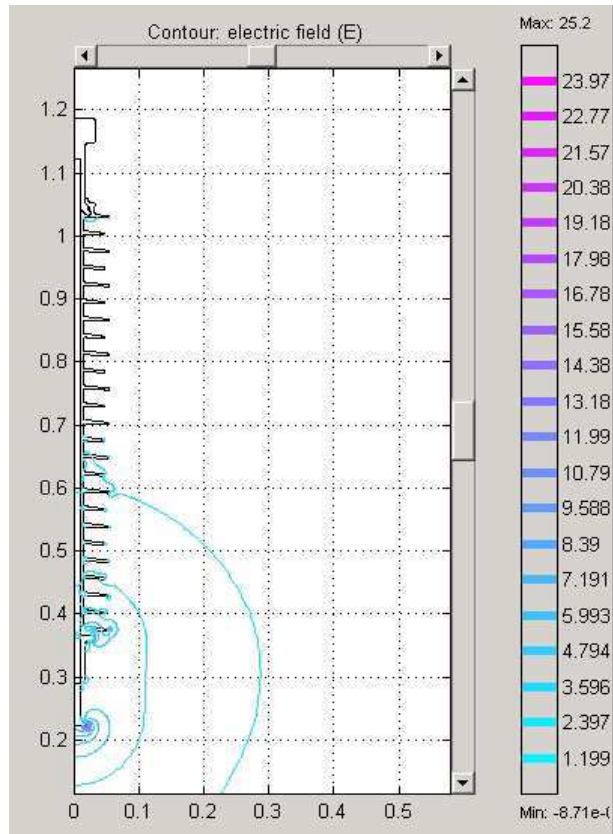


Figura 4.22 - Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 3.

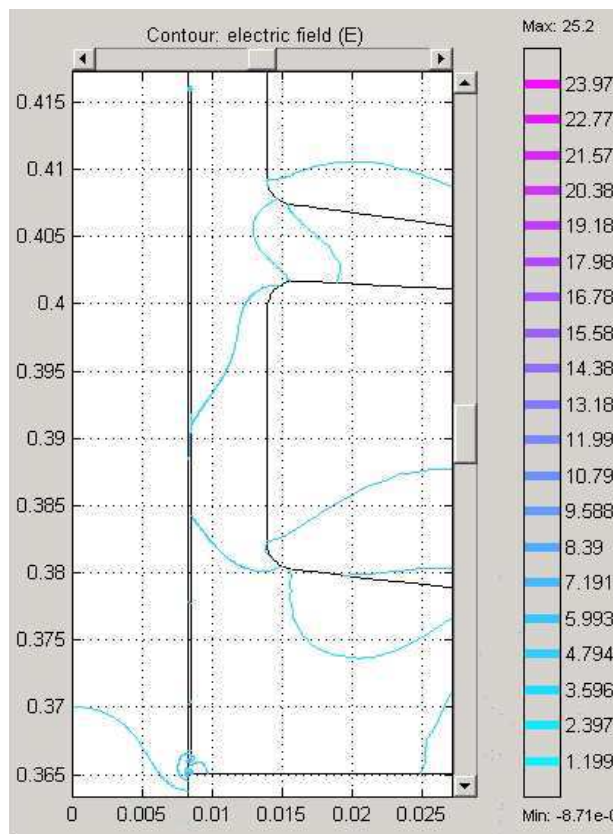


Figura 4.23 - Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 3.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador Tipo 3 é apresentada na Figura 4.24. Um pequeno aumento na temperatura, da ordem de $0,1^{\circ}\text{C}$, pode ser observado, o qual apresenta um valor muito pequeno para ser utilizado como embasamento em diagnósticos.

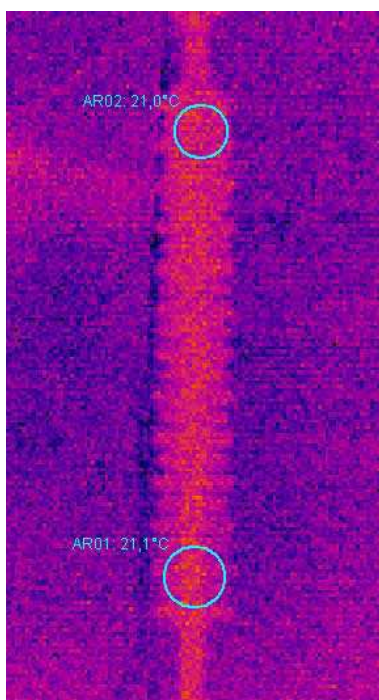


Figura 4.24 - Imagem térmica do isolador Tipo 3, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador defeituoso foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A distribuição de temperatura no início do ensaio se apresentou uniforme. Durante a realização do ensaio surgiram alguns pontos mais aquecidos que o restante do isolador, na Figura 4.25 é possível observar tais pontos ao final do ensaio. O ponto mais aquecido, em relação ao restante do isolador, foi de $2,9^{\circ}\text{C}$.

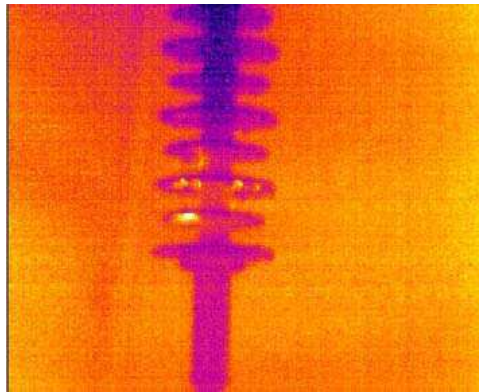


Figura 4.25 - Imagem térmica no isolador Tipo 3, ensaio com névoa.

O detector de corona foi utilizado para verificar a ocorrência de corona no isolador. Durante a realização do ensaio foi verificada a presença de descargas de corona abaixo da segunda aleta, onde foi identificado o ponto mais aquecido em relação ao restante do isolador.

Após o término do experimento, o isolador foi examinado minuciosamente. Na Figura 4.26 é possível observar na fotografia do isolador pequenas rebarbas ou imperfeições na superfície do isolador, conforme indicado pelas setas.

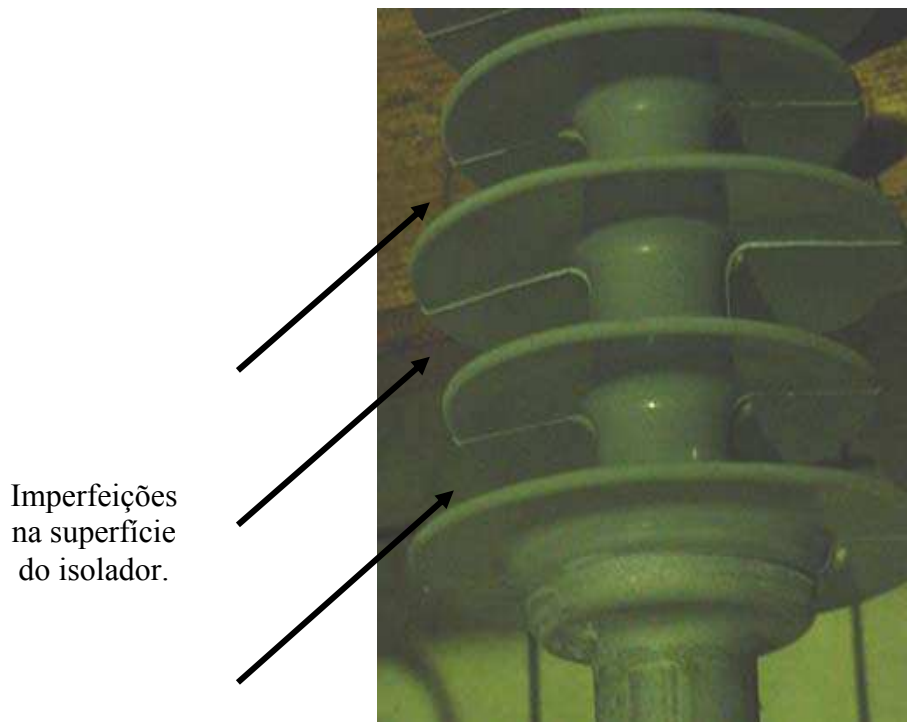


Figura 4.26 - Fotografia do isolador Tipo 3.

Novamente, é possível que as descargas de corona tenham sido provocadas pelas rebarbas ou imperfeições que aparecem na superfície do isolador.

Isolador Tipo 4

A quinta amostra ensaiada foi o isolador Tipo 4, suas características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. Ele possui uma seção circular de 5 cm de comprimento, sem aderência entre o revestimento e o bastão, a 5 cm de distância da ferragem do lado fase. O desenho do isolador inteiro, e uma ampliação focalizando a parte defeituosa podem ser vistos na Figura 4.27.

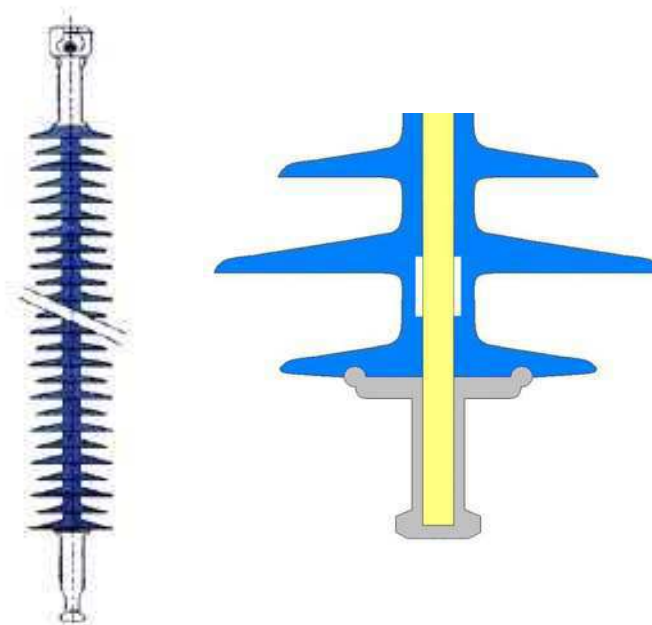


Figura 4.27 - Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 4.

Medição de descargas parciais

O nível de descargas parciais, no início do experimento, foi semelhante ao do isolador perfeito. O valor obtido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 10 pC.

Após cinco dias de ensaio, o nível de descargas parciais não evoluiu significativamente, em relação aos experimentos realizados anteriormente. Ao final do ensaio, nível de descargas parciais era de 20 pC. O nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio pode ser observado na Figura 4.26.

O resultado era esperado, visto que, a 5 cm de distância da ferragem do lado fase, o campo elétrico não é tão intenso quanto nas proximidades da ferragem do lado fase, como no defeito implementado no isolador Tipo 3.

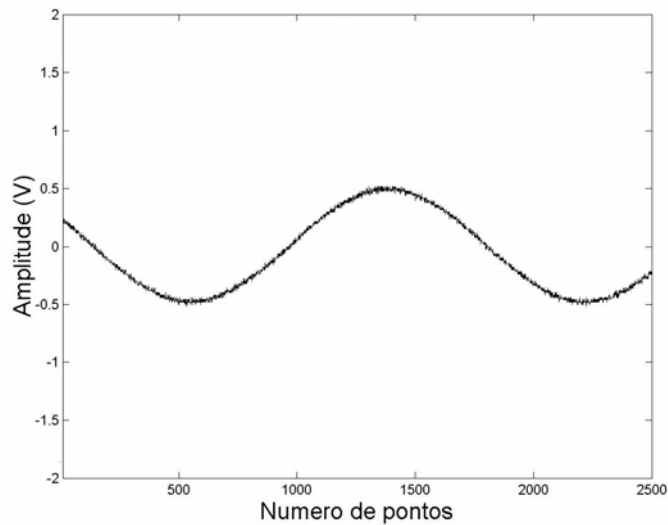


Figura 4.28 - Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 4.

Simulação de campo elétrico

O resultado da simulação de campo elétrico no isolador Tipo 4 pode ser observado na **Figura 4.29**, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi de 25,2 kV/cm, no terminal de alta tensão.

Uma ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 4 pôde ser observada na **Figura 4.30**. O campo elétrico na extremidade inferior do defeito é de 5,26 kV/cm. A diferença de potencial entre as superfícies do núcleo e do revestimento polimérico é de 10 V, a distância que separa as superfícies é de 0,2 mm. A reprodução computacional deste defeito é extremamente difícil. O processo de produção da falta de aderência não permite que o fabricante realize com exatidão em termos de local e espessura a falta de aderência imposta ao isolador.

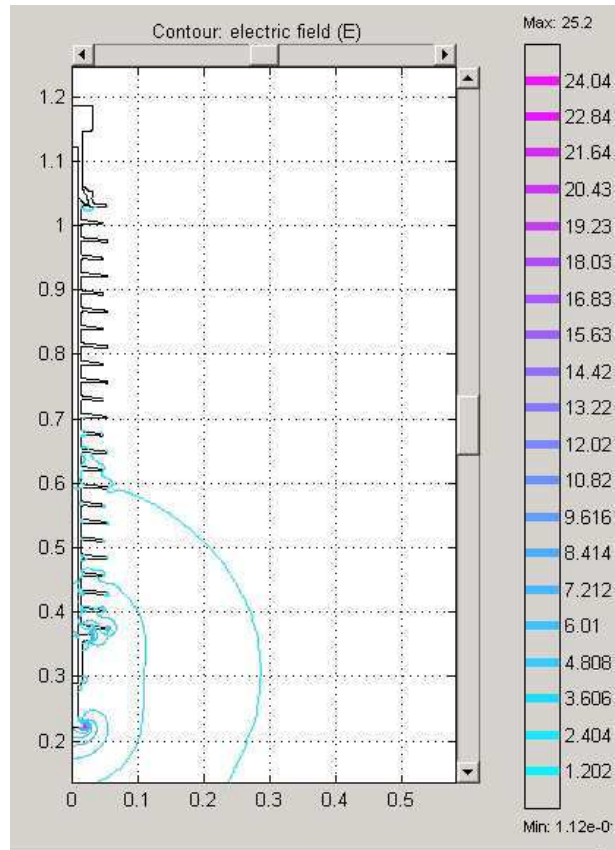


Figura 4.29 - Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 4.

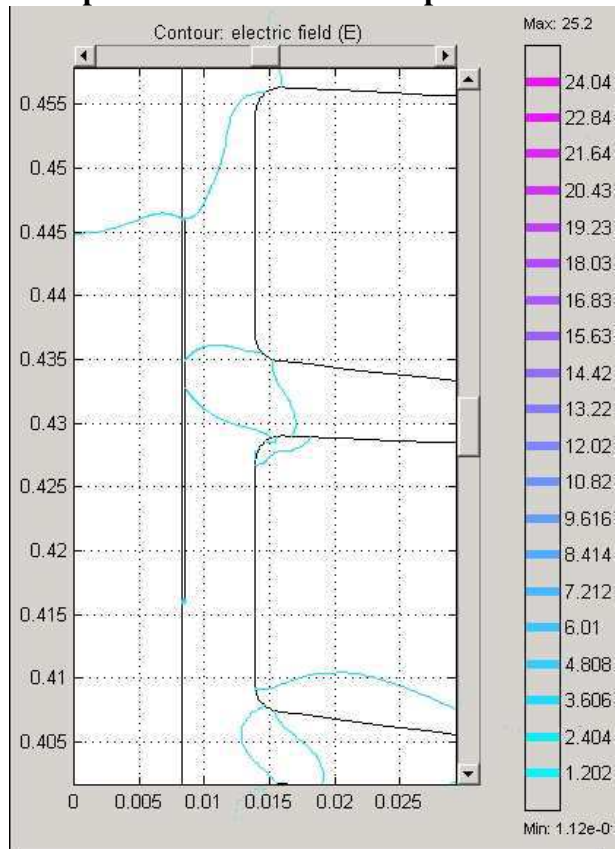


Figura 4.30 - Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 4.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador Tipo 4 é apresentada na Figura 4.31, nela pode ser observado um aumento de temperatura da ordem de $0,3^{\circ}\text{C}$, em relação ao restante do isolador. Entretanto, o valor é muito pequeno para ser utilizado como embasamento para algum diagnóstico.

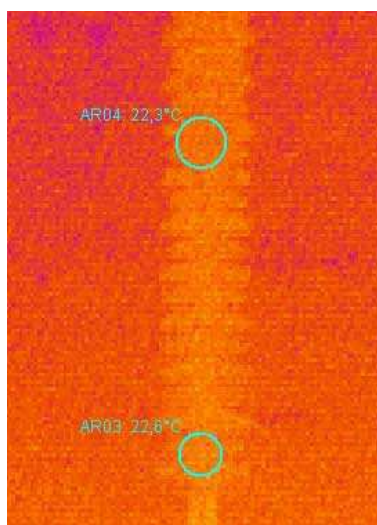


Figura 4.31 - Imagem térmica do isolador Tipo 4, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador defeituoso foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A distribuição de temperatura no início do ensaio se apresentou uniforme. Uma imagem térmica do isolador polimérico Tipo 4 é apresentada na Figura 4.32. A imagem foi registrada ao final do ensaio, nela é possível observar uma região mais aquecida em relação ao restante do isolador. A diferença de temperatura, em relação ao restante do isolador, é de $0,5^{\circ}\text{C}$, aproximadamente na região do defeito.

O detector de corona foi utilizado para verificar a ocorrência de corona no isolador. Entretanto, não foi identificada a presença de descargas de corona na superfície do isolador durante o ensaio.

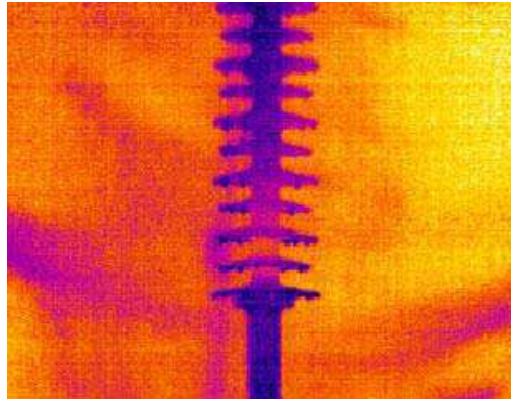


Figura 4.32 - Imagem térmica no isolador Tipo 4, ensaio com névoa.

Isolador Tipo 5

A sexta amostra ensaiada foi o isolador Tipo 5, suas características elétricas, mecânica, de materiais e dimensões físicas foram descritas no item Materiais do Capítulo 3. Ele possui uma seção de 2 cm de largura por 0,5 cm de comprimento, no sentido longitudinal, sem revestimento polimérico, a 3 cm da ferragem do lado fase. A falha expõe o núcleo reforçado de fibra de vidro. O desenho do isolador inteiro, e uma ampliação focalizando a parte defeituosa podem ser vistos na Figura 4.33.

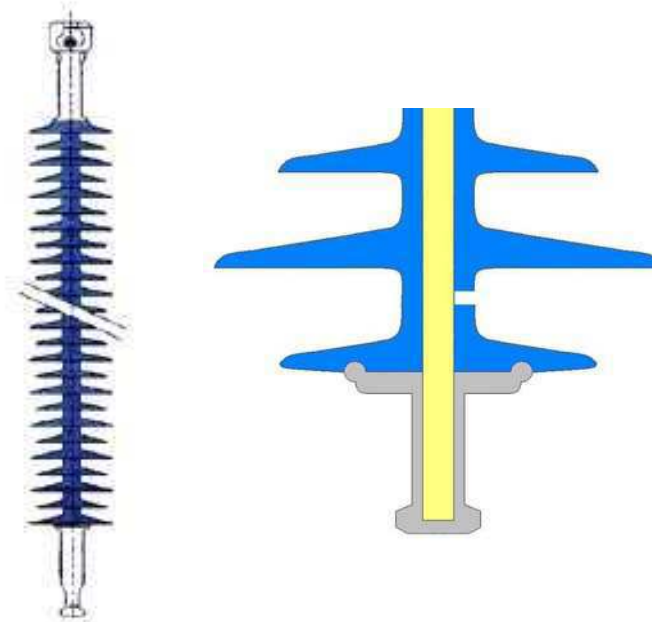


Figura 4.33 - Isolador inteiro e ampliação da imagem do isolador Tipo 5.

Medição de descargas parciais

O nível de descargas parciais, no início do experimento, foi semelhante ao do isolador perfeito. O valor obtido por leitura direta, no indicador analógico do detector de descargas parciais, foi de aproximadamente 10 pC. O nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio pode ser observado na Figura 4.34.

Após cinco dias de ensaio, o nível de descargas parciais não evoluiu significativamente, em relação aos primeiros experimentos realizados com isoladores defeituosos. Ao final do ensaio, nível de descargas parciais era de 30 pC.

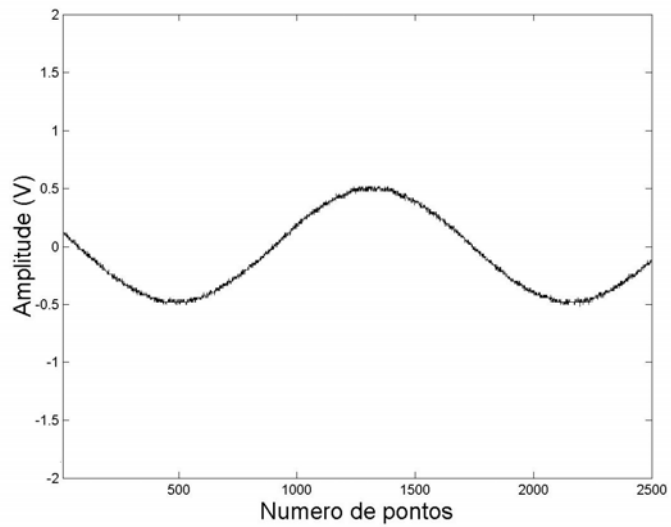


Figura 4.34 - Nível de descargas parciais no quinto dia de ensaio com isolador Tipo 5.

Simulação de campo elétrico

O resultado da simulação de campo elétrico no isolador Tipo 5 pode ser observado na Figura 4.35, as escalas verticais e horizontais são dadas em metros e o campo elétrico está representado por uma escala de cores, em kV/cm. O máximo campo elétrico encontrado foi de 25,1 kV/cm, no terminal de alta tensão.

Uma ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 5 pode ser observada na Figura 4.36. O máximo campo elétrico no defeito é de 9,64 kV/cm.

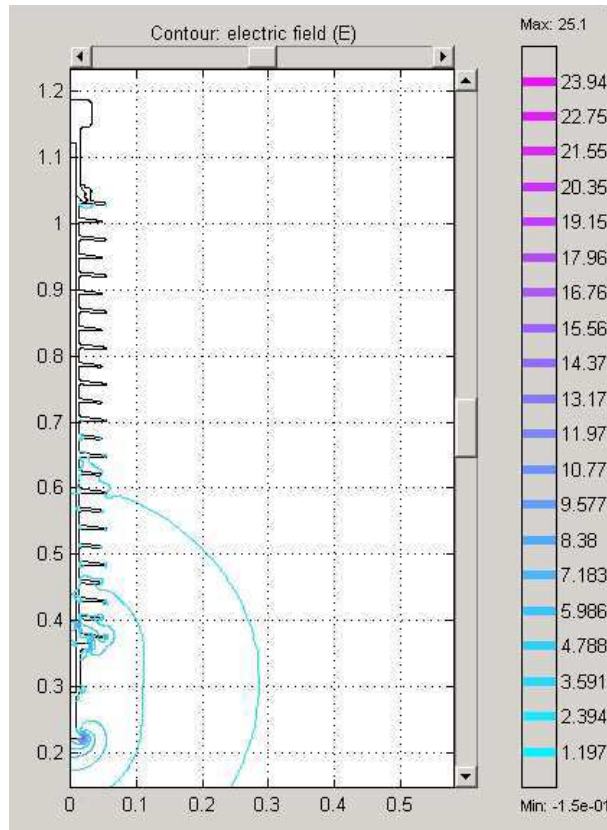


Figura 4.35 - Simulação de Campo Elétrico no isolador Tipo 5.

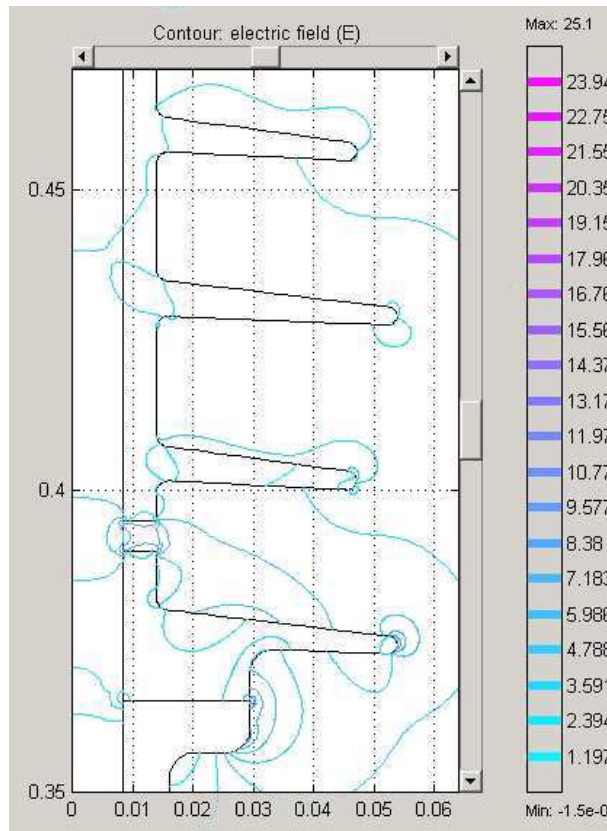


Figura 4.36 - Ampliação da região defeituosa no isolador Tipo 5.

Medição de temperatura a seco

O isolador perfeito foi ensaiado a seco e foram realizadas medições de temperatura na sua superfície. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A imagem térmica realizada no isolador Tipo 5 é apresentada na Figura 4.38, nela pode ser observado um aumento da temperatura nas proximidades da região defeituosa. A diferença de temperatura entre a o ponto mais aquecido e o restante do isolador é de 0,6°C. O aumento da temperatura é considerável, entretanto, deve ser analisado com cuidado pois a margem de erro do equipamento é da ordem de 0,5°C.

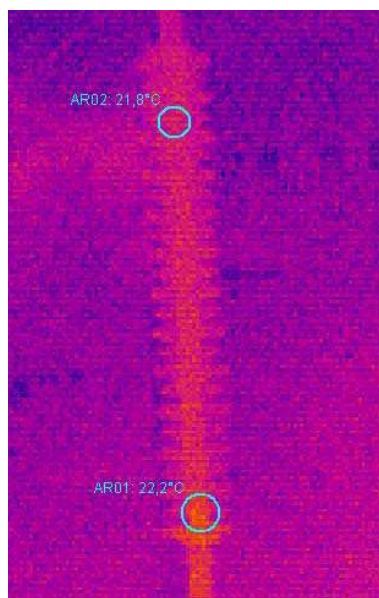


Figura 4.37 - Imagem térmica do isolador Tipo 5, ensaio a seco.

Medição de temperatura com névoa limpa

O isolador defeituoso foi ensaiado com névoa limpa e foram realizadas medições de temperatura na superfície do isolador. A descrição da metodologia utilizada para realização dos ensaios se encontra no item Métodos do Capítulo 3.

A distribuição de temperatura no início do ensaio se apresentou uniforme. Uma imagem térmica do isolador polimérico Tipo 5 pode ser observada na Figura 4.38, nela pode ser observado um aumento de temperatura, em relação ao restante do isolador, da ordem de 1,4°C abaixo da terceira aleta. A imagem foi registrada ao final do ensaio.

No mesmo local onde foi observado o aumento da temperatura, também foi identificada a presença de descargas de corona de pouca intensidade. Não foi identificado

aquecimento ou presença de descargas de corona no local onde existe o defeito previamente fabricado.

Uma fotografia do isolador após o término do ensaio pode ser observada na Figura 4.39, na fotografia percebe-se que abaixo da terceira aleta, local onde foi observado o gradiente de temperatura e a presença de descargas de corona, existe uma identificação do isolador, feita com tinta. Tal marcação pode ter originado as descargas de corona que provocaram o aumento da temperatura abaixo da terceira aleta.

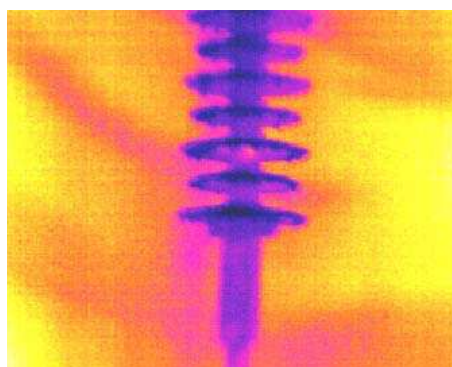


Figura 4.38 - Imagem térmica no isolador Tipo 5, ensaio com névoa.



Figura 4.39 - Fotografia do isolador Tipo 5.

Resumo da Análise dos Resultados

Com a realização dos ensaios foi possível a criação de um extenso banco de dados, com os resultados dos diversos ensaios utilizando os isoladores poliméricos disponíveis. Além dos defeitos previamente estabelecidos, os ensaios evidenciaram imperfeições na fabricação dos isoladores. As imperfeições se mostraram como defeitos que poderiam induzir a resultados errôneos. Estes resultados também enriqueceram ainda mais o banco de dados.

Analisando os resultados dos ensaios dos isoladores com névoa, com ou sem defeitos, foi possível perceber que a presença de descargas de corona pode ser relacionada à presença de imperfeições na fabricação dos isoladores (trincas, marcas e principalmente rebarbas). Dos resultados também se pode concluir que os defeitos internos não podem ser relacionados a atividade do corona.

Na Tabela 4. 1 é mostrado um resumo do comportamento dos isoladores durante o ensaio com névoa limpa.

Tabela 4. 1 – Comportamento dos isoladores durante ensaio com névoa limpa.

Isolador	Defeito interno	Defeito externo	Medição de temperatura	Medição de corona
Perfeito	-	Sim	0,6°C	Sem atividade
Tipo 1	Fio de cobre junto ao terminal	Não	0,6°C	Pouca atividade
Tipo 2	Fio de cobre próximo ao terminal	Não	1,0°C	Atividade temporária
Tipo 3	Falta de aderência junto ao terminal	Sim	2,9°C	Houve atividade
Tipo 4	Falta de aderência próxima ao terminal	Não	0,5°C	Sem atividade
Tipo 5	Núcleo exposto	Sim	1,3°C	Houve atividade

É possível que os defeitos externos no isolador Perfeito e no isolador Tipo 2 tenham ocorrido de maneira intermitente em ambos os casos. No isolador Perfeito o ponto mais aquecido desapareceu ao final do ensaio, é possível que tenha sido causado por alguma sujeira na superfície do isolador. No isolador Tipo 2 é possível que tenha ocorrido a queima de uma

rebarba do revestimento do isolador, assim, as descargas teriam sido geradas pela rebarba durante parte do ensaio.

Conforme a evolução evidenciada durante a realização dos ensaios de medição de descargas parciais nos isoladores é possível classificar os defeitos apresentados pelos isoladores. Os defeitos dos Tipos 4 e 5 são considerados como de baixa gravidade, os defeitos apresentados pelos isoladores Tipo 1 e 2 como de média gravidade e o defeito do isolador Tipo 3 como de alta gravidade.

Analisando os resultados das simulações do comportamento do campo elétrico é possível perceber que o campo elétrico nos isoladores defeituosos foi mais intenso que no isolador perfeito.

Capítulo 5 - Conclusão

O objetivo do trabalho foi atingido, foram avaliadas diversas técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. As técnicas avaliadas fazem uso da medição de descargas parciais, em laboratório, da radiação ultravioleta, emitida pelas descargas de corona, e da radiação infravermelha, emitida pelos corpos aquecidos.

Isoladores poliméricos com e sem defeitos foram submetidos a ensaios elétricos e térmicos e simulações de campo elétrico. Com o trabalho foi possível a criação de um vasto banco de dados sobre o comportamento dos isoladores poliméricos. Entretanto, os defeitos investigados neste trabalho não são normalmente encontrados nos isoladores em operação. Outros tipos de defeitos poderiam ser investigados em laboratório, tais como: imperfeições nos terminais, pequenas exposições do núcleo de fibra de vidro, isoladores retirados de operação com defeito.

Analisando os resultados dos ensaios, para medição de descargas parciais, é possível perceber que praticamente não houve evolução nos níveis de descargas parciais no isolador perfeito. Com os isoladores defeituosos a situação foi diferente, houve uma considerável evolução dos níveis de descargas parciais, nos isoladores Tipo 1, 2 e 3. O nível de descargas parciais evoluiu mais na amostra que apresenta falta de aderência entre o bastão e o revestimento, do lado da ferragem do lado fase. Conforme os resultados obtidos, é possível classificar os defeitos apresentados pelos isoladores Tipo 4 e 5 como de baixa gravidade, os defeitos apresentados pelos isoladores Tipo 1 e 2 como de média gravidade e o defeito do isolador Tipo 3 como de alta gravidade. Os ensaios para medição de descargas parciais são extremamente dificultados em ambientes sujeitos a interferência eletromagnética, como ocorre em campo. Entretanto, a técnica pode ser utilizada eficientemente em laboratórios, em ensaios de recebimento ou no controle de qualidade nas fábricas.

Analisando os resultados das simulações do comportamento do campo elétrico é possível perceber que o campo elétrico nos isoladores defeituosos foi mais intenso que no isolador perfeito. Os isoladores Tipo 1 e 2 apresentaram um campo elétrico intenso na extremidade do condutor. Os isoladores Tipo 3, 4 e 5 apresentaram campo elétrico de intensidade semelhante a do isolador perfeito. As simulações foram feitas utilizando-se de duas dimensões e simetria de revolução.

A medição da temperatura nos isoladores, a seco, não produziu resultados expressivos na maior parte dos casos, somente no isolador Tipo 1 foi detectado um gradiente de temperatura superior a 1,0 °C.

A medição da temperatura nos isoladores, com aplicação de névoa limpa, produziu resultados expressivos na maior parte dos casos, entretanto, alguns dos pontos aquecidos encontrados, podem ser atribuídos a defeitos externos aos isoladores, tais como: sujeira ou imperfeições na superfície do isolador. Analisando os resultados dos ensaios foi possível perceber que a presença de descargas de corona ocorre quando existem defeitos externos ao isolador.

Nos ensaios realizados foi possível perceber que a eficiência do detector de corona em ambientes chuvosos é prejudicada.

A inspeção de isoladores poliméricos associando os detectores de corona e infravermelho é uma promissora técnica para detecção de isoladores defeituosos, entretanto é necessário confirmar a eficácia da técnica em situações reais. A inspeção com apenas o detector de infravermelho não é exata, pois existem situações em que o aquecimento provocado pelas descargas de corona é confundido com um defeito interno. A recíproca também é verdadeira, pois um defeito interno não será identificado pelo detector de corona. Dessa forma, o ideal seria realizar inspeções em isoladores poliméricos utilizando os dois detectores.

Como sugestões para continuidade da pesquisa sugerem-se a confirmação da eficácia das técnicas de medição de corona e temperatura em situações reais e a utilização de técnicas de reconhecimento de padrões para identificar defeitos nos resultados de medição de corona e temperatura.

Durante o decorrer do curso de mestrado foram publicados ou aceitos os seguintes artigos relacionados com o trabalho desenvolvido:

1. “The 10Th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics”, realizado em Ottawa, no Canada, em julho de 2004. O título do trabalho foi “**On the behavior of Electromagnetic interference measured from glass insulator**”;
2. “Transmission and Distribution Conference 2004 Latin América”, realizado em São Paulo, em outubro de 2004. O título do trabalho foi “**Monitoramento de Isoladores Poliméricos por Descargas Parciais**”;

3. “ The 14th International Symposium on High Voltage Engineering”, será realizado em Tsinghua na China, em agosto de 2005. Foram aceitos dois artigos com os seguintes títulos: “**Outdoor Insulation and Composite Insulators**” e “**A Simple Open Source Data Acquisition System Based on MATLAB® for Tektronix TDS Series® Oscilloscopes**”.

Referências Bibliográficas

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J.; **Engineering Dielectrics - Corona Measurement and Interpretation**. vol. I, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.

BEZERRA, J. M. B.; **Caracterização de Atributos de Sinais para Utilização de Técnicas de Reconhecimento de Padrões na Avaliação do Isolamento de Instalações e de Equipamentos Elétricos**. Tese de Doutorado. COPELE. UFCG, Brasil. 2004.

BIRTWISTLE, D.; BLACKMORE, P.; KRIVDA, A.; CASH, G.; GEORGE, G.; **Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol: 6. Number: 5. Oct. 1999. Pages: 612 – 619.

De NIGRIS. **CESI research activities in the field of corona visualisation**. Third UV Inspection User's Group Meeting. Orlando, Florida, USA. February 11-13, 2004.

De TOURREIL, C.; PARGAMIN, L.; THEVENET, G.; PRAT, S.; **“Brittle fracture” of composite insulators: why and how they occur**; Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 16-20 July 2000. Pages: 2569 – 2574. Volume 4.

EPERLY, R.A.; HEBERLEIN, G.E.; EADS, L.G.; **Thermography, a tool for reliability and safety**. Industry Applications Magazine, IEEE, Volume: 5, Issue: 1, Jan.-Feb. 1999. Pages: 28 – 36.

FLIR SYSTEMS; **História do Infravermelho**. Disponível na Internet via URL: http://www.flirthermography.com/brazil/about/ir_history.asp. Arquivo capturado em janeiro de 2005.

FONTGALLAND, G.; SILVA, E. M.; BEZERRA, J. M. B.; NERI, M. G. G.; DO VALLE, R. R. M.; DE MELO, M. A. B.; **On the behavior of Electromagnetic interference measured from glass insulator**. The 10TH International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, 2004, Winnipeg, Manitoba, Canada. p. 301 – 304. ISBN-0-9692563-9-6.

HACKAM, R.; **Outdoor HV Composite Polymeric Insulators**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Volume 6 NO. 5, pp. 557-585, October 1999.

HALL, J.F.; **History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications**. IEEE Transactions on Power Delivery. Volume: 8, Issue: 1, Jan. 1993. Pages: 376 – 385.

IEC 507; **Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on a.c. Systems**. IEC, Second Edition. 1991.

IEC 60270; **High-voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements**. IEC. 2000.

KIKUCHI, T.; NISHIMURA, S.; NAGAO, M.; IZUMI, K.; KUBOTA, Y.; SAKATA, M.; **Survey on the use of non-ceramic composite insulators** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 6, Issue: 5, Oct. 1999. Pages: 548 – 556.

KIM, SEOG-HYEON; CHERNEY, E.A.; HACKAM, R.; RUTHERFORD, K.G.; **Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Volume: 1. Issue: 1. Feb. 1994. Pages: 106 – 123.

KREUGER, F.H.; **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. Butterworth & Co. (Publisher) Ltd, 1989

KUMOSA, M.; KUMOSA, L.; ARMENTROUT, D.; **Causes and potential remedies of brittle fracture failure of composite (nonceramic) insulators**. IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 11, Issue: 6, Dec. 2004. Pages: 1037 – 1048.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J.M.; PHILLIPS, A.J.; **Daylight corona discharge imager**. High Voltage Engineering Symposium. (Conf. Publ. No. 467), Volume: 4, 23-27 Aug. 1999 Pages: 349 - 352.

LINDNER, M.; **Third UV Inspection User's Group Meeting**. Orlando, Florida, USA. February 11-13, 2004.

MONTESINOS, J.; GORUR, R. S.; MOBASHER, B. and KINGSBURY, D.; **Mechanism of brittle fracture in nonceramic insulators**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 9, Issue: 2, April 2002. Pages:236 – 243.

NERI, M. G. G.; COSTA, E. G.; GARCIA, R. W. S.; PAIVA, O. L. S. P.; **Monitoramento de Isoladores Poliméricos por Descargas Parciais**. Transmission and Distribution Conference 2004 Latin America, São Paulo, SP, 2004.

NIGRI, A. I., **Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção**. XV-SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.

RODURFLEX; **Hihg-Voltage Insulators**. Disponível na Internet via URL: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>. Arquivo capturado em setembro de 2004b.

RODURFLEX; **The history of RODURFLEX® – quite a long story covering more than 3 decades**. Disponível na Internet via URL: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>. Arquivo capturado em setembro de 2004a.

TETREX Information N°. 21; **Partial Discharge Measuring Techniques**. TETREX AG Instruments, Zürich, 1984

TIPLER, PAUL A.; **Física**. Editora Guanabara Koogan S.A. Volume 4. 3° edição, 1995.

ZHAO, TIEBIN; BERNSTORF, R.A.; **Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators**. Electrical Insulation Magazine, IEEE, Volume: 14, Issue: 2, March-April 1998. Pages:26 – 33.