



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA



**MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE PÁRA-RAIOS A ZNO
ATRAVÉS DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

ALUNO:
ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO

ORIENTADOR:
EDSON GUEDES DA COSTA, D. SC.

CAMPINA GRANDE, AGOSTO DE 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios a ZnO
através de Redes Neurais Artificiais

© Estácio Tavares Wanderley Neto

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Agosto de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

W245m

2007 Wanderley Neto, Estácio Tavares.

Monitoramento e diagnóstico de pára-raios a ZnO através de redes neurais artificiais / Estácio Tavares Wanderley Neto.— Campina Grande: 2007.

115f.: il.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador : Dr. Edson Guedes da Costa.

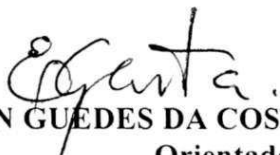
1. Pára-Raios – Supressores de Surto. 2. Redes Neurais Artificiais. 3. Monitoramento. 4. Óxido de Zinco. I. Título.

CDU - 621.316.933(043)

**MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE PÁRA-RAIOS A ZnO ATRAVÉS DE
REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO

Tese Aprovada em 13.08.2007



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



SÉRGIO KUROKAWA, Dr., UNESP
Componente da Banca

IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES, Ph.D., UFMG
Componente da Banca (Ausência Justificada)



ROBERTO CÉLIO LIMÃO DE OLIVEIRA, Dr., UFPA
Componente da Banca



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



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO - 2007

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que me concedeu o dom da vida e a capacidade de estar hoje aqui, concluindo este trabalho.

À minha família pelo amor, educação e lições de vida. Minha mãe, Socorro, exemplo de força, fé e determinação. Meu pai, Ednaldo, que mesmo ausente, sei que segue ao meu lado. Minhas irmãs, Suzy e Silvy, e meu irmão, Ednaldo, minha avó, Ana Maria, e a minha mãezinha de coração, Célia.

Aos meus amigos, antigos ou recentes, agradeço pela força, amizade e respeito. Saibam que vocês, mais que amigos, acabam por se tornar irmãos que a vida colocou em meu caminho. Não citarei nomes, mas sei que cada um que merece estar aqui reconhecerá este agradecimento.

Ao meu orientador, Prof. Edson Guedes, agradeço mais do que pela orientação, pela confiança depositada em mim.

Aos integrantes do GSE: Luciano, Djane, Ângelo, Alex, Camila, Kalina, companheiros de estudo. Professores Washington, Benemar, Núbia, Genoilton e Damásio pelo auxílio nas mais diversas dúvidas. E em especial a Max, Tarso, George, Eduardo e Chico pela ajuda com os inúmeros e extensivos ensaios. E a Kleber pela sua “co-orientação” no campo das redes neurais.

Aos colegas engenheiros que conheci no decorrer deste trabalho, os quais representarei na pessoa de Jorge de Franco.

A Chesf, pelo apoio técnico e financeiro, e em especial a Marcelo Maia, Tereza Galindo, Alice Helena, Max Norat e Josué Beltrão.

A Eletrosul, na pessoa do Eng. Lúcio Galvani, pelos pára-raios tão importantes para a realização dos ensaios.

A CAPES pelo suporte financeiro.

E a todos aqueles a quem eu pude auxiliar ou pedir auxílio no decorrer destes 4 anos.

Resumo

Pára-raios integram o sistema de proteção de linhas de transmissão e equipamentos de potência. A operação e a manutenção corretas destes equipamentos assegura a integridade de equipamentos fundamentais, como transformadores de potência. Durante a ocorrência de surtos atmosféricos ou de manobra, um nível de tensão acima do nível da isolação do equipamento pode ser alcançado. Um pára-raios, trabalhando corretamente, pode limitar este nível de tensão que evita os danos ao equipamento protegido, enquanto que um pára-raios defeituoso deixa exposto às sobretensões os equipamentos que deve proteger. As inspeções rotineiras são a melhor maneira de avaliar a integridade e a operação apropriada dos pára-raios. Sua monitoração geralmente é feita por análise térmica ou medição da corrente de fuga. Entretanto não há nenhum procedimento padrão para a condução e a análise dos resultados obtidos. Via de regra, quando alguma anormalidade é detectada, o pára-raios é substituído por um novo e nenhum estudo adicional é conduzido para avaliar que tipo do problema aconteceu. Este trabalho propõe um método para a análise de pára-raios de ZnO pelo uso de redes neurais artificiais - RNA. Uma RNA pode analisar o perfil térmico, detectar e classificar padrões que poderiam passar despercebidos por uma análise visual. Além disso, se a RNA for treinada corretamente com uma amostra que englobe a maior variabilidade possível de defeitos em pára-raios, é possível detectar que tipo da falha está acontecendo aos equipamentos de uma determinada subestação. Assim, os resultados obtidos são uma ferramenta útil para engenheiros e fabricantes porque dão uma informação adicional sobre o problema, ajudando em uma tomada de decisão e indicando a possível origem do problema.

Abstract

Lightning arresters provide protection for transmission lines and power equipments. The correct operation and maintenance of these equipments is an important task in substations as they can assure the integrity of important equipments, like power transformers. During the occurrence of lightning or switching surges, a voltage level above the equipment insulation level can be reached. An arrester, properly working, is able to limit this voltage level avoiding damages to the protected equipment. A defective arrester may not be able to provide the proper protection level in substations, exposing to damage the equipments it should protect. Besides that, it can be a risk for the integrity of other equipments and nearby people as one of the consequences of a defective arrester is the possibility of its explosion. Routine inspections are the better way to evaluate the integrity and proper operation of arresters. Monitoring of surge arresters is usually conducted by means of current measurement or thermal images acquisition. But, among power companies, there is no model procedure for the monitoring conduction and analysis of the obtained results. Besides that, when some abnormality is detected, the arrester is replaced by a new one and no further study is conducted to evaluate what kind of problem happened to it. This work proposes a method for analysis of ZnO arresters by the usage of artificial neural networks - ANN. The ANN is able to analyse the thermal profile and detect and classify patterns that could be undetected by a simple visual analysis. Besides that, if the ANN is properly trained with a wide range of different possible arrester failures, it can also be able to detect what kind of failure is usually happening to the equipments of a certain plant. It is a useful tool for engineers as they give further information about the problem, aiding in a maintenance decision and also indicating the possible origin of the problem, which allows the proper resolution to be taken as a preventive assessment.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	11
1. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	11
2. MOTIVAÇÃO.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
CAPÍTULO 2.....	15
1. O PÁRA-RAIOS A ZNO.....	15
HISTÓRICO.....	15
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	17
VARISTORES.....	19
CARACTERÍSTICAS ELÉTROTÉRMICAS.....	20
ÁREAS DE ESTUDO.....	27
MONITORAMENTO DE PÁRA-RAIOS.....	35
CAPÍTULO 3.....	50
1. REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS.....	50
2. TÉCNICAS DE APRENDIZAGEM.....	53
3. PERCEPTRON.....	55
4. RETROPROPAGAÇÃO E RESILIENT PROPAGATION.....	57
CAPÍTULO 4.....	62
1. DEFEITOS NOS PÁRA-RAIOS A ZNO.....	62
DEFEITOS COMUNS.....	62
ESTUDO DE DEFEITOS.....	70
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	72
2. ENSAIOS DE DEFEITOS.....	76
DEFEITO 1 – CURTO-CIRCUITO INTERNO SOBRE UM ÚNICO VARISTOR.....	76
DEFEITO 2 – CURTO-CIRCUITO SOBRE UM CONJUNTO DE VARISTORES.....	78
DEFEITO 3 – CURTO-CIRCUITO SOBRE VARISTORES SEPARADOS.....	80
DEFEITO 4 – CURTO-CIRCUITO SOBRE CONJUNTO DE VARISTORES SUBSEQÜENTES.....	82
DEFEITO 5 – VARISTOR QUEBRADO.....	84
DEFEITO 6 – PERDA DE ESTANQUEIDADE.....	85
DEFEITO 7 – UMIDADE INTERNA.....	87
DEFEITO 8 – DESALINHAMENTO DA COLUNA ATIVA.....	88
DEFEITO 9 – POLUIÇÃO SUPERFICIAL.....	90
3. RNA DESENVOLVIDA.....	93
CAPÍTULO 5.....	104
1. CONCLUSÕES.....	104
2. TRABALHOS FUTUROS.....	105
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Estrutura de um pára-raios de ZnO com invólucro de porcelana [HINRICHSEN, 2001].	17
Fig. 2 – Varistores de ZnO em diversas dimensões.	20
Fig. 3 – Estrutura microscópica dos varistores de ZnO.	20
Fig. 4 – Pára-raios inserido no sistema elétrico.	21
Fig. 5 – Curva característica de um pára-raios a ZnO - 420 kV [HINRICHSEN, 2001].	22
Fig. 6 – Circuito equivalente ao pára-raios.	24
Fig. 7 – Correntes circulando entre os terminais do pára-raios.	24
Fig. 8 – Curva de estabilidade térmica do pára-raios [CARLSON, 1986].	26
Fig. 9 – Estrutura do pára-raios gerada com multiblocos e coordenadas generalizadas.	34
Fig. 10 – Obtenção da corrente através de uma sonda de campo.	36
Fig. 11 – Sistema de monitoramento HI-VARC. [COFEEN e MCBRIDE, 1991]	37
Fig. 12 – Sistema de monitoramento on-line. [KLEIN et al., 1999]	40
Fig. 13 – Ponte para compensação capacitiva.	42
Fig. 14 – Sistema SAW. [HINRICHSEN et al., 1999]	44
Fig. 15 – Exemplos do uso da termovisão.	45
Fig. 16 – Exemplo de uma saída gerada pelo programa de simulação eletrotérmica [NÓBREGA, 2006]	46
Fig. 17 – Sistema de mapeamento de corrente. [PERROT, 1999]	47
Fig. 18 – Mapeamento de corrente para varistor degradado [PERROT, 1999].	48
Fig. 19 – Estrutura de um neurônio artificial.	51
Fig. 20 – RNA representada por um grafo orientado.	53
Fig. 21 – Estrutura do perceptron.	55
Fig. 22 – Perceptron visto como um combinador linear.	55
Fig. 23 – Hiperplanos linearmente separáveis.	56
Fig. 24 – Perceptron de múltiplas camadas.	57
Fig. 25 – Base do pára-raios após abertura.	64
Fig. 26 – Descargas internas em um pára-raios (CHRZAN, 2003).	65
Fig. 27 – Desgaste provocado por poluição superficial e formação de bandas secas (CHRZAN, 2003).	66
Fig. 28 – Degradação superficial em varistor (WEISE, 2000).	67
Fig. 29 – Termografia de um pára-raios em operação.	72
Fig. 30 – Termografia de um pára-raios defeituoso.	72
Fig. 31 – Esquema da estrutura interna do pára-raios SIEMENS.	73
Fig. 32 – Curva característica para o pára-raios PR1.	74
Fig. 33 – Imagem térmica para pára-raios PR1.	75
Fig. 34 – Perfil de temperaturas para o pára-raios PR1.	75
Fig. 35 – Degradação do isolamento lateral.	76
Fig. 36 – Marca de descarga elétrica.	76
Fig. 37 – Diagrama esquemático para curto-circuito sobre um varistor.	77
Fig. 38 – Curto-circuito interno.	77
Fig. 39 – Imagem térmica da coluna interna do PR5 para defeito da Fig. 38.	77
Fig. 40 – Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado com defeito	78
Fig. 41 – Perfil térmico antes do defeito	78
Fig. 42 – Perfil térmico com o defeito	78
Fig. 43 – Diagrama esquemático para um curto circuito sobre os dois primeiros varistores da coluna ativa.	79
Fig. 44 – Curto-circuito sobre os dois primeiros varistores da coluna ativa.	79
Fig. 45 – Imagem térmica da coluna interna do PR4 para defeito da Fig. 44.	79
Fig. 46 – Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.	80
Fig. 47 – Perfil térmico antes do defeito.	80
Fig. 48 – Perfil térmico com o defeito.	80
Fig. 49 – Diagrama esquemático.	81
Fig. 50 – Varistores com defeito.	81
Fig. 51 – Imagem térmica da coluna interna do PR1 para defeito da Fig. 50.	81
Fig. 52 – Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.	81
Fig. 53 – Perfil térmico antes do defeito.	82
Fig. 54 – Perfil térmico com o defeito.	82
Fig. 55 – Diagrama esquemático.	82
Fig. 56 – Varistores subsequentes sob curto-circuito.	83
Fig. 57 – Imagem térmica da coluna interna do PR2 para defeito da Fig. 56.	83

Fig. 58 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado	83
Fig. 59 - Perfil térmico antes do defeito	83
Fig. 60 - Perfil térmico com o defeito	83
Fig. 61 - Diagrama esquemático do pára-raios com um varistor quebrado.	84
Fig. 62 - Imagem térmica da coluna interna do PR3 para um varistor quebrado.	85
Fig. 63 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.	85
Fig. 64 - Perfil térmico antes do defeito.	85
Fig. 65 - Perfil térmico com o defeito.	85
Fig. 66 - Imagem térmica para PR1 com perda de estanqueidade.	86
Fig. 67 - Imagem térmica para PR2 com perda de estanqueidade.	86
Fig. 68 - Perfil térmico antes do defeito.	86
Fig. 69 - Perfil térmico com o defeito.	86
Fig. 70 - Perfil térmico antes do defeito.	86
Fig. 71 - Perfil térmico com o defeito.	86
Fig. 72 - Imagem térmica para PR4 com umidade interna.	87
Fig. 73 - Imagem térmica para PR5 com umidade interna.	88
Fig. 74 - Perfil térmico antes do defeito.	88
Fig. 75 - Perfil térmico com o defeito.	88
Fig. 76 - Perfil térmico antes do defeito.	88
Fig. 77 - Perfil térmico com o defeito.	88
Fig. 78 - Coluna ativa com varistores desalinados.	89
Fig. 79 - Imagem térmica para PR1 com defeito.	89
Fig. 80 - Perfil térmico antes do defeito.	89
Fig. 81 - Perfil térmico com o defeito.	89
Fig. 82 - Pára-raios PR4 e PR5 cobertos por poluição salina.	90
Fig. 83 - Descarga elétrica superficial em pára-raios coberto com poluição salina.	90
Fig. 84 - Imagem térmica para PR4 com defeito.	91
Fig. 85 - Imagem térmica para PR5 com defeito.	91
Fig. 86 - Perfil térmico antes do defeito.	91
Fig. 87 - Perfil térmico com o defeito.	91
Fig. 88 - Perfil térmico antes do defeito.	92
Fig. 89 - Perfil térmico com o defeito.	92
Fig. 90 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 1.	95
Fig. 91 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 2.	95
Fig. 92 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 3.	96
Fig. 93 - Perfil de temperaturas para um pára-raios.	98
Fig. 94 - Perfil de temperaturas da Fig. 93 após uma seleção de pontos de máximo.	99
Fig. 95 - Imagem térmica classificada erroneamente.	101

CAPÍTULO 1

- INTRODUÇÃO -

1. Delimitação do Tema

Os pára-raios de subestação ou supressores de surto são dispositivos fundamentais em sistemas de potência, atuando na proteção de equipamentos elétricos contra surtos atmosféricos e de manobra e auxiliando na coordenação de isolamento de subestações elétricas. Seu papel é limitar o nível de tensão a que são submetidos equipamentos importantes da subestação, como os transformadores de potência, evitando que os mesmos sejam atingidos por uma sobretensão inadequada a sua operação.

Conectados entre o condutor fase da linha e a terra, os pára-raios caracterizam-se por uma curva $V \times I$ não-linear, apresentando uma condução muito baixa para níveis normais de tensão e uma condução elevada na presença de sobretensões. Desta forma, exercem muito pouca influência no sistema, quando em regime permanente; mas devem atuar de maneira rápida e eficiente quando necessários, ou seja, na ocorrência de surtos. Na prática, os pára-raios absorvem parte da energia elétrica destes surtos e a convertem em energia térmica através do efeito joule, dissipando-a para o meio ambiente.

São diversos os tipos de pára-raios atualmente utilizados em subestações. De pára-raios a carboneto de silício (SiC), cujo uso está em declínio, a pára-raios a óxido de zinco (ZnO), mais eficientes e com uso cada vez mais freqüente, inclusive em substituição aos equipamentos a SiC. Isto porque o ZnO apresenta uma alta não-linearidade e características térmicas melhores para a utilização como supressores de surto (SAKSHAUG, 1991).

Os pára-raios a ZnO têm seu desenvolvimento relativamente recente, de modo que há muito a ser feito para aprimorar seu uso e manutenção. Eles são equipamentos de estrutura simples, constituídos basicamente do empilhamento de blocos cilíndricos semicondutores, compostos de óxido de zinco, os varistores. Estes blocos, comumente chamados pastilhas, são alocados no interior de um invólucro isolante de porcelana ou material polimérico.

As pastilhas de ZnO representam a parte principal do pára-raios, sendo responsáveis pela não-linearidade do mesmo. Possuem uma forte dependência com a temperatura, a qual está associada a sua capacidade de absorção de energia. Assim, a

correta especificação do equipamento e a integridade dos varistores são aspectos fundamentais para sua utilização de maneira adequada.

Muito tem sido feito no sentido de se conseguir uma melhoria nas características desses varistores, seja no seu processo de fabricação, na escolha de materiais mais eficientes, desenvolvimento de configurações mais adequadas ou de métodos que permitam o acompanhamento destes dispositivos em seu uso normal. Além disso, hoje, os primeiros pára-raios a ZnO instalados nos sistemas elétricos estão chegando ao final de sua vida útil, estimada em 30 anos, de modo que o estudo destes varistores é uma nova oportunidade de se compreender seu processo de degradação e envelhecimento, fornecendo ferramentas adequadas para o acompanhamento das suas condições de uso e indicando diagnósticos adequados para sua manutenção ou retirada do serviço.

Desta forma o seu estudo se dá em três aspectos diferentes, visando aperfeiçoamento e manutenção:

- Desenvolvimento de varistores mais eficientes: buscando-se desenvolver pastilhas de óxido de zinco com estrutura interna mais uniforme e maior capacidade de dissipação de energia;
- Desenvolvimento de modelos para estudo: pára-raios geralmente são estudados através de seções de teste ou modelos computacionais, devido à inviabilidade financeira de se realizar testes e ensaios com equipamentos completos;
- Técnicas de monitoramento para equipamentos em uso: permitindo avaliar o desempenho dos equipamentos já em campo, antecipando possíveis falhas e necessidade de substituição.

Além disso, incidentes envolvendo pára-raios geralmente são bastante prejudiciais, pois, no caso mais crítico, pode ocorrer a sua explosão, danificando equipamentos próximos, prejudicando o fornecimento de energia e, principalmente causando danos pessoais. Dessa forma, o correto acompanhamento das suas condições de uso se torna imprescindível para uma operação segura e confiável dos sistemas de potência. Tal acompanhamento geralmente é feito através do monitoramento das grandezas elétricas e térmicas envolvendo o pára-raios, e da simulação de condições adversas, mediante uma modelagem adequada. Esse acompanhamento serve ainda como diagnóstico, indicando a necessidade de manutenção ou de caminhos a serem seguidos nas diversas áreas de estudo dos pára-raios: desenvolvimento de novos materiais, de modelos e configurações estruturais.

Cada uma destas áreas de estudo citadas tem suscitado inúmeras pesquisas resultando em subsídios importantes ao estado da arte no âmbito dos varistores a ZnO e apontando novas necessidades de aprimoramento no desenvolvimento e aplicação destes equipamentos. Com base nestas necessidades, neste trabalho apresenta-se um projeto na área de monitoramento e diagnóstico de pára-raios em campo que, espera-se, seja útil para fabricantes, engenheiros e técnicos da área de operação e manutenção de equipamentos.

2. Motivação

Apesar do seu baixo custo, quando comparado a outros equipamentos de uma subestação, o pára-raios apresenta uma importância fundamental na subestação, garantindo a correta operação dos demais equipamentos. Dessa forma, a princípio, poderia se pensar em deixar em segundo plano a inspeção e manutenção destes equipamentos, substituindo-os sempre que necessário. Entretanto, a grande quantidade de pára-raios presentes num sistema elétrico torna proibitiva a sua substituição indiscriminada, tornando necessário um acompanhamento criterioso de sua operação no sistema elétrico a fim de se conseguir prolongar sua vida útil o máximo possível.

Um correto monitoramento e diagnóstico de defeitos em pára-raios surgem então como uma necessidade real nos sistemas elétricos, pois, dessa forma, é possível acompanhar o nível de degradação destes equipamentos e garantir a sua correta operação. Diversas são as técnicas atualmente desenvolvidas para o monitoramento de pára-raios (HEINRICH e HINRICHSEN, 2001). Entretanto, não existe ainda um consenso em relação a melhor técnica de monitoramento a ser aplicada, devido às diversas vantagens e desvantagens apresentadas por cada uma delas, nem tampouco há uma análise posterior que possa identificar e classificar os possíveis problemas detectados através do monitoramento.

Os objetivos propostos neste trabalho surgem como uma ferramenta alternativa que possibilite um monitoramento mais preciso e uma análise mais criteriosa dos possíveis problemas que possam surgir em um pára-raios em operação. Alcançados os objetivos propostos, engenheiros e técnicos de manutenção de equipamentos poderão contar com um instrumento importante para a manutenção de equipamentos elétricos.

3. Objetivos

Pretende-se, neste trabalho, apresentar uma metodologia para monitoramento e diagnóstico de defeitos em pára-raios a ZnO a partir de uma técnica de uso já consolidado em subestações – a termovisão. Para isso serão aplicados recursos de inteligência artificial – redes neurais artificiais, para a análise e reconhecimento de falhas a partir de imagens térmicas obtidas dos pára-raios em campo.

Uma ferramenta para auxílio na manutenção dos inúmeros pára-raios existentes nas subestações elétricas foi desenvolvida e testada, de forma que os engenheiros possam contar com um suporte confiável quando for necessário tomar decisões relacionadas ao estado dos pára-raios em campo.

Nesta tese estão descritas as etapas de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho, a começar por um breve histórico e uma revisão bibliográfica aprofundada sobre pára-raios. A seguir é são apresentadas as ferramentas utilizadas para o monitoramento e a obtenção do diagnóstico de defeitos em pára-raios a ZnO. Por fim, são mostrados os resultados obtidos e indicadas algumas sugestões de aprimoramento para a pesquisa desenvolvida.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

1. O Pára-raios a ZnO

Histórico

Os sistemas de transmissão de energia elétrica surgiram há pouco mais de 100 anos. Desde então, muito têm sido feito em termos de proteção dos seus componentes contra surtos dos mais variados tipos, como mostra SAKSHAUG (1991). De maneira geral, linhas de transmissão e transformadores recebem atenção especial quanto ao nível de proteção a que estão submetidos. No caso das linhas de transmissão, o fenômeno de propagação de ondas resulta em surtos que podem danificar os equipamentos conectados nestas linhas. Já no caso dos transformadores, seu custo elevado justifica o alto investimento destinado a sua proteção.

Os pára-raios ou supressores de surto surgiram como uma alternativa para proteger os sistemas elétricos contra surtos temporários de tensão, evitando que os mesmos se propaguem através das linhas e cheguem aos equipamentos da subestação. Inicialmente, utilizavam-se centelhadores separados pelo ar para a proteção dos sistemas elétricos contra descargas atmosféricas e de manobra. Nestes centelhadores, a ignição do arco elétrico ocorria a um nível de tensão relativamente baixo, além de ser dependente das condições atmosféricas e do seu estado de conservação. Eram associados a resistências, disjuntores e fusíveis, sendo esta associação necessária para a extinção do arco elétrico.

Na primeira década do século XX passaram a ser utilizados os resistores não-lineares na proteção de sistemas elétricos. Estes novos pára-raios eram compostos de um *gap* esférico em série com um tanque contendo as células não-lineares a base de alumínio. Estas células eram formadas por cones invertidos preenchidos por um eletrólito e eram imersos em óleo isolante. Este tipo de dispositivo promovia uma boa limitação de corrente, mas as tensões de descarga eram altas e aleatórias, havendo ainda o inconveniente do tamanho exagerado do pára-raios [SAKSHAUG, 1991].

Por volta de 1920, células de peróxido de chumbo passaram a ser utilizadas como elemento não-linear dos pára-raios. Os terminais das células eram ainda revestidos por uma camada de filme isolante. Na ocorrência de um surto, a camada isolante era perfurada e a descarga poderia fluir livremente através das células que

apresentavam baixa resistência. Com a passagem da corrente elétrica o peróxido aquecia, mudando suas características físicas ao mesmo tempo em que aumentava sua resistividade promovendo a extinção do arco.

Na década de 1930 surgiram os resistores não-lineares a base de carboneto de silício (SiC). Estes resistores apresentavam uma característica $V \times I$ que, quando associadas a um conjunto de centelhadores, promoviam a proteção contra surtos de maneira bem mais eficaz em relação aos pára-raios até então utilizados. Com este tipo de pára-raios obteve-se uma redução na tensão de descarga de cerca de 40%, além de uma redução de cerca de 30% na altura e 80% no volume do mesmo em relação aos dispositivos anteriores. Por volta de 1954, estes dispositivos foram aperfeiçoados com a introdução de centelhadores ativos. Estes centelhadores eram construídos em conjunto com uma bobina que promovia um campo magnético intenso na região de formação do arco elétrico. Este campo magnético tinha duas finalidades principais: alongar o arco e fazer com que ele se movesse sobre a superfície do eletrodo, saindo do seu ponto inicial para um ponto de maior afastamento entre os seus terminais, facilitando dessa forma a sua extinção [SAKSHAUG, 1991].

O surgimento de sistemas de extra-alta tensão possibilitou uma evolução ainda maior dos dispositivos de proteção a carboneto de silício, de forma que diferentes variações de suas configurações básicas foram desenvolvidas com a finalidade de atender as necessidades de proteção destes novos sistemas.

Em meados da década de 1970 surgiram os varistores de ZnO, capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos sem a necessidade de uso de centelhadores. Esse novo material, empregado inicialmente na proteção de dispositivos eletrônicos, passou a ser utilizado na composição de supressores de surtos representando um grande avanço dado na proteção dos sistemas elétricos. Com eles, foi possível obter dispositivos com uma capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos dispositivos de carboneto de silício [SAKSHAUG, 1991].

Os dispositivos de ZnO têm sua utilização em franca expansão, sendo há muito tempo utilizado para substituir os dispositivos a SiC. Desde sua aplicação a sistemas de alta tensão, inúmeros estudos vêm sendo submetidos com a finalidade de se aprimorar suas características e compreender seu processo de degradação, tornando o seu uso mais seguro e confiável.

Características Construtivas

Os pára-raios a óxido de zinco são equipamentos de estrutura simples. Basicamente são constituídos de uma coluna de varistores envolvida por uma coluna de porcelana ou material polimérico, havendo ainda alguns outros componentes estruturais. Sua configuração depende do sistema ao qual será aplicado, mas no aspecto geral, segue o esquema mostrado na Fig. 1.

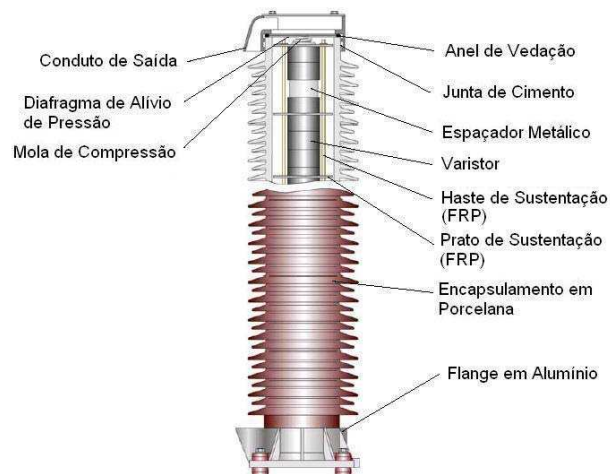


Fig. 1 – Estrutura de um pára-raios de ZnO com invólucro de porcelana [HINRICHSEN, 2001].

Os principais componentes do pára-raios são as pastilhas de óxido de zinco – varistores. Seu formato geralmente é cilíndrico, e seu diâmetro é escolhido de acordo com a capacidade de absorção de energia desejada para o equipamento, variando de 30 mm para sistemas de distribuição até 100 mm ou mais para sistemas de alta ou extra-alta tensão [HINRICHSEN, 2001]. A altura das pastilhas geralmente varia entre 20 mm e 45 mm, dependendo dos métodos de produção utilizados e sua altura geralmente é limitada pela homogeneidade dos grãos de ZnO – quanto maior as dimensões do varistor mais difícil conseguir uma boa homogeneidade na distribuição interna do óxido de zinco.

Geralmente, a altura total das pastilhas de ZnO empilhadas não é suficiente para alcançar a altura do invólucro de porcelana, a qual é mais alta devido à necessidade de se atingir um nível de isolamento adequado compatível com os demais equipamentos elétricos da subestação. Por isso são utilizados espaçadores metálicos em alguns pontos da coluna interna com a finalidade de fazê-la atingir a mesma altura da coluna de porcelana. Estes espaçadores geralmente são cilindros ocos de alumínio, ou mesmo

cilindros maciços, caso em que funcionam também como absorvedores de calor, ajudando a dissipar de maneira mais rápida a energia térmica gerada nos varistores.

Para evitar o deslizamento das pastilhas, mantendo-as fixas no interior do pára-raios, são utilizados varetas e suportes de fibra de vidro. Além disso, em uma das extremidades da coluna de varistores utiliza-se uma mola a qual exerce uma forte compressão sobre a mesma. Esta mola ajuda a manter as pastilhas fixas e aumenta o contato mecânico entre as suas superfícies transversais reduzindo a resistência elétrica da coluna de varistores como um todo.

A coluna isolante pode ser constituída de porcelana ou material polimérico. No caso da porcelana, utiliza-se quartzo ou alumina, sendo que a alumina proporciona maior resistência mecânica à coluna isolante. A resistência mecânica depende também do diâmetro da coluna e da espessura de suas paredes. De maneira geral, quanto maior o nível de tensão do sistema, maior o diâmetro da coluna. Um outro aspecto importante da porcelana é a vitrificação da sua superfície através da aplicação de vernizes especiais. Com isso, evita-se a infiltração de umidade e dificulta-se o acúmulo de sujeira proveniente da poluição.

A coluna de porcelana, externamente, apresenta saias ao longo de todo o seu comprimento. Com isso, aumenta-se a distância entre os terminais para o caso de uma descarga superficial, devido à presença de sujeira ou umidade. Por razões técnicas e econômicas, o comprimento da coluna de porcelana não deve ultrapassar uma altura em torno de 2 metros, pois a partir desta altura sua rigidez estrutural pode ser comprometida devido às solicitações mecânicas às quais o pára-raios é submetido (tração dos cabos elétricos e rajadas de vento). Para o caso de pára-raios de alta tensão, situação em que o nível de isolamento exige uma altura do pára-raios superior a 2 metros, utilizam-se duas ou mais colunas, cada uma delas formando um pára-raios independente, conectadas em série, uma sobre a outra.

A base e o topo do pára-raios com invólucro de porcelana são constituídos de flanges de alumínio, fixados com a ajuda de cimento do tipo *Portland* ou a base de enxofre, sendo este último uma melhor escolha. O cimento a base de enxofre, além de não causar corrosão no alumínio, tem uma aplicação mais fácil e atinge mais rapidamente o seu estado final de rigidez mecânica.

A parte ativa do pára-raios, constituída da coluna de varistores e espaçadores é isolada de influências do meio externo através de anéis de vedação e de um diafragma de alívio de pressão. Eles evitam a entrada de umidade e impurezas do meio ambiente

que possam afetar o isolamento do pára-raios internamente. O diafragma de alívio de pressão é projetado para romper no caso de uma atuação mais severa do pára-raios em que o aumento de pressão interna ponha em risco a integridade de seus componentes. Os gases produzidos são expelidos através de saídas existentes nos flanges, tanto na base quanto no topo do pára-raios, evitando a explosão do mesmo e o conseqüente estilhaçamento da coluna de porcelana. O rompimento do diafragma representa a perda de estanqueidade do pára-raios, de modo que o mesmo deve ser substituído.

Uma possível variação em relação ao invólucro do pára-raios é a utilização de materiais poliméricos em substituição à porcelana. Este tipo de material apresenta como vantagens a hidrofobicidade, a leveza e a elasticidade, não havendo riscos de quebra no transporte ou estilhaçamento durante uma atuação. Além disso, o polímero é moldado diretamente sobre a coluna de varistores não havendo espaço para problemas de vedação dos flanges, salvo em casos de problemas de fabricação ou ruptura do polímero devido a solicitações elétricas ou mecânicas. O uso do material polimérico em pára-raios ainda não é muito freqüente quando comparado aos invólucros de porcelana. Ainda assim, devido às vantagens apresentadas pelo material polimérico a instalação de pára-raios deste tipo está se tornando cada vez mais freqüente, principalmente para baixa e média tensão.

Varistores

Os varistores de óxido de zinco são o que se pode chamar de a “alma” do pára-raios. São constituídas, além do ZnO, por outros óxidos aditivos, tais como óxidos de alumínio, antimônio, bismuto e manganês. Estes outros óxidos, principalmente os de bismuto e o de antimônio, são responsáveis pela formação da camada intergranular, ou seja, as camadas entre os grãos de ZnO que proporcionam ao material características exclusivas. As características dos varistores variam em função de sua composição e pureza [ABB, 2001][FRANCO, 1993]. A Fig. 2 mostra alguns varistores a ZnO de diversas dimensões.

Os componentes dos varistores passam por um processo de mistura e moagem até que as partículas atinjam o tamanho adequado (da ordem de 10^{-6} cm). Esta mistura é prensada no formato de pastilhas e sinterizada em fornos com tempo e temperatura programados. A pastilha já resfriada é então submetida a um processo de metalização de sua superfície e aplicação de um colar isolante em sua lateral. O disco varistor completo é recozido para proporcionar maior estabilidade das suas características no tempo.

Finalmente, cada varistor é testado nas regiões de baixa e alta corrente, definindo assim as suas características. Desse modo, os varistores de óxido metálico tornam-se materiais policristalinos compostos de grãos de ZnO, semicondutores, com contornos de grãos bem definidos [COSTA, 1999]. A região intergranular apresenta características de materiais semicondutores de modo que a condução elétrica nos varistores pode ser explicada a partir da teoria de formação de barreiras de potencial [GUPTA, 1990]. Na Fig. 3, pode ser observada a estrutura microscópica dos varistores com os grãos de óxido de zinco e camadas intergranulares.



Fig. 2 – Varistores de ZnO em diversas dimensões.

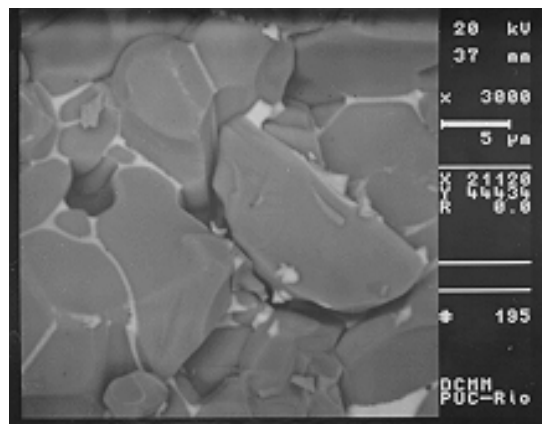


Fig. 3 – Estrutura microscópica dos varistores de ZnO.

Características Elérotérmicas

Curva característica

A principal característica do pára-raios a ZnO é a sua não-linearidade em relação a curva $V \times I$. Esta característica representou um avanço em relação aos pára-raios convencionais a carboneto de silício, isto porque, sua curva característica, ao contrário

do que ocorre com o SiC, permite sua conexão direta com o sistema elétrico gerando apenas uma corrente de fuga desprezível em condições de operação normal. Assim, dispensou-se o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores. A Fig. 4 mostra a configuração típica de um pára-raios no sistema elétrico.

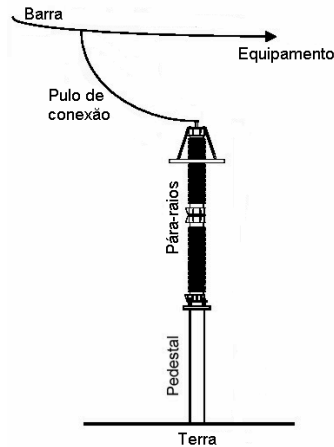


Fig. 4 – Pára-raios inserido no sistema elétrico.

Uma curva característica típica, para um pára-raios a ZnO de 420 kV, pode ser vista na Fig. 5, onde são destacados os seus principais aspectos.

A parte 1 do gráfico mostra a região de baixa corrente, o pára-raios opera em regime permanente. A curva característica, nesta região, apresenta-se como uma função de comportamento aproximadamente linear, conforme descrito por PHILIPP e LEVINSON (1977). O primeiro ponto em destaque nesta região é a corrente de fuga. Como dito anteriormente, o pára-raios a ZnO dispensa o uso de centelhadores em série, entretanto, devido à formação de um caminho de condução permanente entre o sistema elétrico e a terra, haverá sempre a presença de uma corrente de fuga passando pelo mesmo. Esta corrente é constituída de uma componente capacitiva e uma pequena corrente resistiva, sendo a componente capacitiva praticamente constante da ordem de 100 μA . Nesta região, o ponto de operação contínua do pára-raios corresponde a uma tensão em torno de 340 kV.

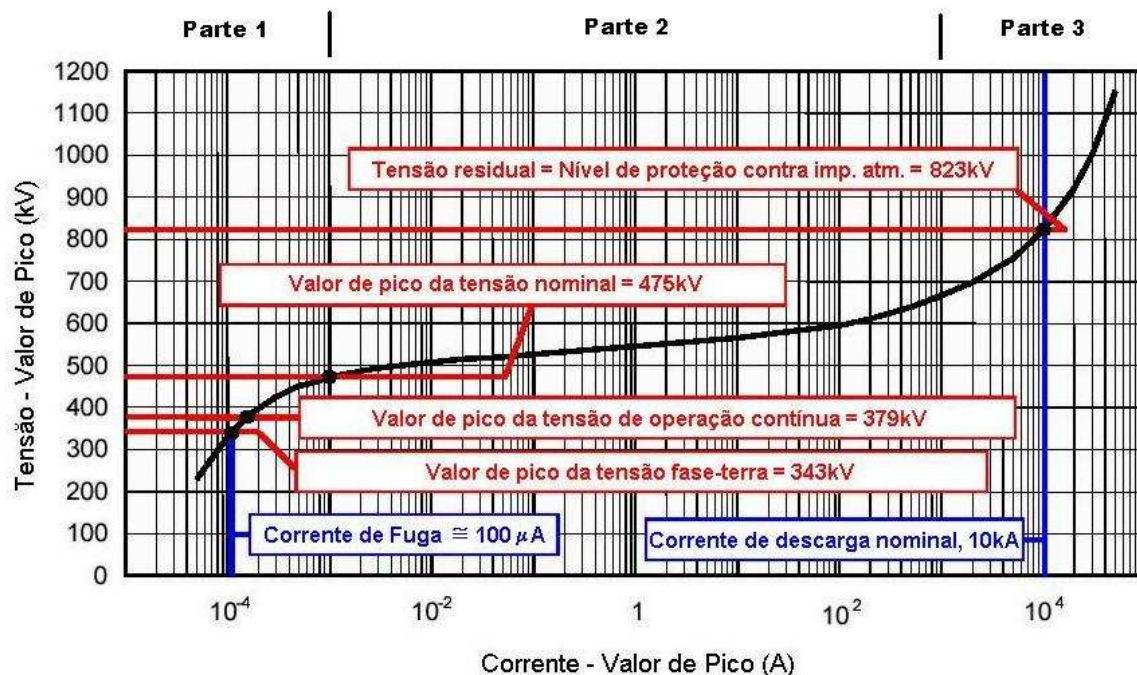


Fig. 5 – Curva característica de um pára-raios a ZnO - 420 kV [HINRICHSEN, 2001].

Um pouco abaixo do joelho da curva fica o ponto de máxima tensão de operação contínua (em torno de 380 kV para este caso). Este ponto representa o nível de tensão na qual o pára-raios opera sem qualquer tipo de restrição. Geralmente, o valor para esta tensão é definido em 5% acima da máxima tensão fase-terra do sistema. Dessa forma, são levados em consideração os possíveis harmônicos presentes na tensão do sistema [HINRICHSEN, 2001].

A segunda parte do gráfico é a região de alta não-linearidade. Nesta região, o pára-raios conduz uma grande corrente, mesmo para pequenas variações de tensão. O primeiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do pára-raios não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim tensão que pode ser aplicada temporariamente sobre o mesmo (geralmente por um período de 10 s) sem causar danos aos varistores. Dessa forma, consegue-se uma medida da capacidade do pára-raios de lidar com sobretensões temporárias [HINRICHSEN, 2001]. Quando submetido a este nível de tensão por um período de tempo mais extenso, a corrente de fuga associada provoca o aquecimento das pastilhas de ZnO e, conseqüentemente, o aumento da corrente de fuga, num efeito chamado de avalanche térmica, o qual pode levar à destruição do pára-raios. O valor da tensão nominal corresponde geralmente a 1,25 vezes o valor da máxima tensão de operação.

A terceira parte do gráfico é a região de alta corrente, diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo pára-raios. É uma região de condução aproximadamente linear e o seu principal ponto é o nível de proteção contra impulsos atmosféricos, representando a queda de tensão no pára-raios quando uma descarga de corrente nominal flui entre seus terminais. Nesta região, o pára-raios pode entrar em processo de avalanche térmica e não se pode assegurar a manutenção de suas características.

ABB (2001) explica o mecanismo de condução no óxido de zinco em termos de sua microestrutura. Conforme visto anteriormente (Fig. 3), o material é composto de duas regiões distintas – os grãos de ZnO e a região intergranular, composta de outros óxidos metálicos. A região entre grãos é de fundamental importância na primeira parte da curva característica, sendo que a intensidade da corrente de fuga depende essencialmente dos materiais constituintes desta camada. O processo de condução na primeira parte da curva característica é explicado pelos mecanismos de barreiras de potencial na região entre os grãos, característicos de dispositivos semicondutores. A temperatura exerce forte influência na condutividade nesta região, já que temperaturas mais elevadas aumentam a energia dos elétrons facilitando sua passagem através das barreiras de potencial. Tal dependência com a temperatura explica o crescimento da corrente de fuga quando os varistores são submetidos a algum tipo de aquecimento.

A segunda parte da curva característica é explicada pela condução através dos grãos de óxido de zinco. Neste ponto da curva, a energia absorvida pelos elétrons da camada intergranular se torna tão alta que os impactos causados pelo seu movimento criam lacunas na barreira de potencial nos contornos dos grãos. A corrente de lacunas diminui a largura da barreira de potencial, permitindo o aumento da corrente. A continuidade deste processo leva à destruição das barreiras de potencial e, conseqüentemente, destruição dos varistores, chegando-se então a terceira parte da curva característica.

Corrente harmônica

Devido a sua alta-não linearidade, a corrente que atravessa o pára-raios possui um elevado conteúdo harmônico, principalmente de 3ª ordem. Um circuito elétrico equivalente para um pára-raios de ZnO pode ser visto na Fig. 6:

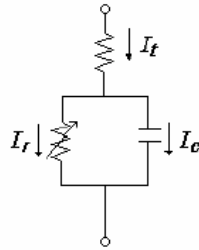


Fig. 6 – Circuito equivalente ao pára-raios.

Para este circuito, percebe-se que a corrente de fuga total, I_t , é composta por uma componente capacitiva, I_c , e por uma componente resistiva, I_r , sendo que a corrente resistiva é dependente da tensão (Fig. 7):

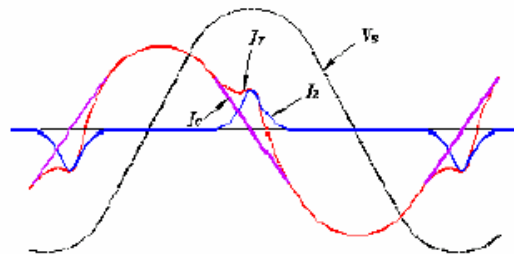


Fig. 7 – Correntes circulando entre os terminais do pára-raios.

A componente resistiva da corrente de fuga é produzida pelas mudanças na barreira de potencial formada na região intergranular dos varistores, esta barreira muda de acordo com a intensidade do campo elétrico aplicado, causando as distorções harmônicas captadas pelos instrumentos de medição. O crescimento da componente resistiva de 3ª ordem está diretamente ligada ao envelhecimento dos varistores de ZnO, sendo extremamente sensíveis ao seu grau de degradação, dessa forma, seu estudo é fundamental para monitoração e diagnóstico do estado dos varistores [ZHU e RAGHUVVEER, 1999; LINDE e SWIFT, 1999; KIL at al., 2003].

Distribuição de tensão

Um outro aspecto a ser considerado no estudo das características elétricas do pára-raios é a distribuição de tensão ao longo da coluna de varistores. Medições mostram que esta distribuição não é uniforme, de modo que os varistores mais próximos do terminal de alta tensão estão sujeitos a uma diferença de potencial superior aos varistores da base. Conseqüentemente, os varistores superiores estão sujeitos a uma

maior solitação térmica, degradando-se mais rapidamente que os demais [CHRZAN e GIELNIAK, 2003]. Tal irregularidade na distribuição de tensão pode ser explicada através da presença de capacitâncias parasitas ou pela existência de campos elétricos mais intensos nas proximidades do terminal de alta tensão.

A distribuição de tensão ao longo do pára-raios depende principalmente da sua geometria e das propriedades elétricas dos materiais utilizados. A existência de capacitâncias parasitas entre a estrutura do pára-raios e a terra e entre as partes metálicas do próprio pára-raios cria caminhos alternativos para a passagem de corrente, através do ar, entre os terminais de alta e baixa tensão. Estas correntes, embora de valor extremamente reduzido, contribuem para a formação de uma distribuição irregular de campo elétrico ao longo do pára-raios de modo a provocar uma maior concentração de campo nas proximidades do terminal de alta tensão e, conseqüentemente, uma maior queda de tensão sobre os varistores que se encontram nesta região do pára-raios. Deve-se levar em conta ainda que a presença de poluição sobre a superfície do pára-raios é um fator que pode apresentar alteração significativa sobre a distribuição de tensão, a medida em que cria, sobre o pára-raios, regiões de condução preferencial.

Para melhorar a distribuição de tensão ao longo do pára-raios pode-se alterar a configuração do equipamento e/ou inserir anéis equalizadores no mesmo. Em termos de alteração na configuração, observa-se que, a partir de um certo nível de tensão, os varistores são distribuídos de maneira diferenciada ao longo da coluna ativa. Em geral observa-se que no topo do pára-raios, onde o campo elétrico é maior, há uma menor concentração de varistores, existindo mais elementos condutivos como espaçadores metálicos. Dessa forma, os varistores colocados nas partes superiores do pára-raios são mais preservados, havendo apenas um pequeno número deles submetidos a uma queda de tensão maior. Já a utilização de anéis equalizadores, comum em diversos equipamentos de subestação, melhora a distribuição do campo elétrico ao longo do equipamento. Dessa forma, há uma menor diferença nos valores da queda de tensão para elementos na parte superior e na parte inferior do pára-raios.

Comportamento térmico

Uma das características mais desejadas de um varistor de ZnO é a estabilidade térmica. Um varistor é considerado estável termicamente quando:

- após a ocorrência de um surto, ele retorna as suas condições normais, ou seja, as condições nas quais ele se encontrava antes da ocorrência do surto;
- quando consegue manter sua capacidade de dissipação de calor durante o regime de operação contínua sem apresentar aquecimento excessivo.

Durante sua operação normal, em meio a surtos produzidos por descargas atmosféricas ou operações de manobra e chaveamentos, o pára-raios deve ter capacidade de absorver e dissipar a energia para o ambiente sem que sua temperatura aumente excessivamente [CARLSON et al., 1986; GUPTA, 1990].

Em regime contínuo, uma pequena corrente de fuga atravessa o pára-raios em direção a terra. Esta corrente provoca um aquecimento nos varistores através do efeito Joule, o qual é dissipado numa taxa que não permite o aumento excessivo na temperatura das pastilhas. Desta forma, o pára-raios encontra-se em equilíbrio térmico.

Na ocorrência de sobretensões ou surtos, a corrente de fuga que percorre os elementos de óxido de zinco sofre um aumento significativo, o que implica no aumento de energia absorvida pelo pára-raios e, conseqüentemente, aumento de temperatura. O seu comportamento térmico pode ser analisado através das curvas de estabilidade térmica mostradas na Fig. 8 [CARLSON, 1986].

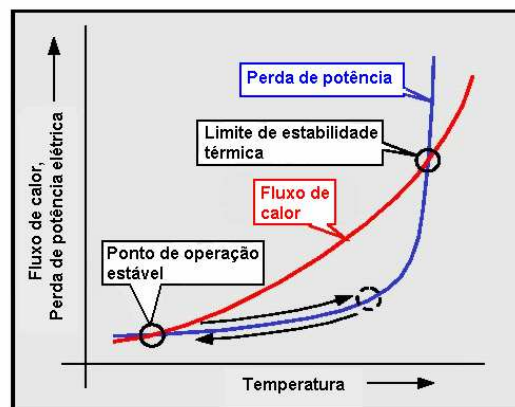


Fig. 8 – Curva de estabilidade térmica do pára-raios [CARLSON, 1986].

O pára-raios é projetado para suportar o aumento de temperatura durante sobretensões temporárias ou durante a ocorrência de surtos isolados, voltando à sua condição de operação normal sem aquecimento excessivo. Se esta sobretensão perdurar

por um tempo maior ou, no caso da ocorrência de surtos de maneira subsequente, as pastilhas tendem a sofrer um aquecimento maior, chegando ao ponto em que a quantidade de energia térmica gerada nos varistores se torna maior que a sua capacidade de dissipação térmica. Neste caso, o pára-raios entra num processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, denominado avalanche térmica, que pode causar a sua destruição.

Tensão, temperatura e corrente de fuga são grandezas que, juntas definem a vida útil de um pára-raios. Deste modo, estudos devem ser feitos para verificar se cada um destes fatores se encontra dentro de um nível apropriado para que o pára-raios mantenha sua estabilidade térmica diante das condições de operação previstas para o mesmo.

Áreas de Estudo

O desenvolvimento de equipamentos elétricos em geral, envolve pesquisas em diversas áreas do conhecimento. No caso dos pára-raios, além da engenharia elétrica propriamente dita, seu estudo envolve ainda pesquisas na área da engenharia dos materiais e na engenharia mecânica. Pois os mesmos são projetados de modo que os varistores utilizem materiais que apresentam uma boa capacidade de absorção de energia elétrica e dissipação térmica. Os pára-raios devem também apresentar uma estrutura resistente a solicitações elétricas severas e as condições ambientais aos quais são submetidos.

Estudos de Caracterização

Os pára-raios a ZnO surgiram no início da década de 1970, sendo que MATSOUKA (1971) foi o pioneiro no estudo das cerâmicas semicondutoras a base de óxido de zinco e sua aplicação em pára-raios de alta tensão. Através do seu trabalho, pôde-se especificar as características elétricas dos varistores a ZnO, os quais apresentavam uma alta não-linearidade e características térmicas superiores em relação aos pára-raios de SiC, permitindo a eliminação dos centelhadores série e obtendo-se uma grande capacidade de absorção de energia. Entre as melhorias apresentadas pelos novos varistores podem ser citadas a alta não-linearidade, a baixa tensão residual, a alta capacidade de absorção de calor e a rápida resposta mediante a ocorrência de surtos. Além disso, o pára-raios de ZnO é compacto, podendo ser utilizado em vários meios (gás, líquido e sólido), permite o aumento da capacidade de absorção de energia, permite a redução do nível de isolamento dos equipamentos e é um ótimo dispositivo

para proteção contra surtos em transmissão de potência em CC com alta tensão [KOBAYASHI et al. 1986].

A eliminação dos centelhadores foi uma das principais vantagens obtidas com o uso dos pára-raios a SiC. Com isto se conseguiu uma melhor confiabilidade, já que a estrutura do pára-raios se tornou mais simples, além de se evitar centelhamentos indevidos devido à presença de poluição ou necessidade de lavagem dos pára-raios.

A dependência da corrente resistiva com o tempo e o seu reflexo na temperatura dos varistores são os parâmetros mais significativos na determinação do tempo de vida dos varistores e foi objetivo de uma ampla variedade de estudos. A maioria deles é relacionada à corrente gerada mediante a aplicação de diferentes formas de tensão e o aumento de temperatura provocado. Com base nesses estudos, foi possível também definir as equações relacionadas ao comportamento não-linear dos varistores de ZnO, conforme visto a seguir.

PHILIPP e LEVINSON (1977, 1979, 1986) definiram uma equação que relaciona a corrente e a temperatura do pára-raios na sua região de pré-ruptura, ou seja, a primeira parte do gráfico $V \times I$ (Fig. 5). Esta equação relaciona a dependência da temperatura com a energia de ativação (energia necessária para o deslocamento dos elétrons entre as camadas do átomo), e é dada por:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{-e_\varphi}{k_b T}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

em que, e_φ é a energia de ativação; I_0 é a corrente à temperatura de 0 K; k_b é a constante de Boltzman e T é a temperatura em Kelvin. O valor da energia de ativação para diferentes temperaturas pode ser aproximado através da curva característica do pára-raios para cada uma destas temperaturas.

Já o comportamento da corrente na região de alta não-linearidade da curva característica dos varistores a ZnO pode ser obtida através de uma equação empírica desenvolvida por MATSOUKA (1971):

$$I = C_0 V^\alpha \quad \text{Eq. 2}$$

Na Eq. 2, C_0 é uma constante que depende do material e α é o expoente de não-linearidade. O expoente de não-linearidade α pode ser definido a partir de dois pontos da curva através da expressão:

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\log\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Eq. 3

Um dispositivo desejável deve ter um alto valor do coeficiente de não-linearidade, uma aceitável tensão residual, baixa corrente de fuga, vida longa, boa uniformidade e grande capacidade de absorção/dissipação de energia [COSTA, 1999]. Dessa forma, outra característica fundamental no pára-raios é a sua capacidade de absorção de energia e estabilidade térmica. Estas características estão diretamente relacionadas à corrente que passa pelos varistores e a eficiência do pára-raios no que diz respeito a fazer a transferência de calor para o meio-ambiente. Da relação entre a energia absorvida e a energia dissipada pelo pára-raios depende a sua estabilidade térmica.

Para se manter dentro da área de estabilidade térmica, o pára-raios deve, em primeiro lugar, apresentar uma boa integridade dos seus componentes, ou seja, os seus varistores não devem apresentar defeitos no que diz respeito a fraturas ou mesmo pontos de queima. Tais falhas podem se transformar em canais de condução, ou seja, caminhos preferenciais para a condução de corrente elétrica no interior dos varistores, contribuindo para o aumento da corrente de fuga e aquecimento excessivo nas regiões próximas a estes canais. Isto causa um aquecimento localizado, provocando a dilatação irregular do varistor o que pode levar a sua quebra.

No regime permanente à temperatura ambiente, o pára-raios apresenta uma pequena corrente de fuga resistiva fluindo através dos varistores. Quanto maior for a tensão aplicada, maior será a taxa de crescimento da corrente com o tempo, pois haverá maior geração de calor à medida que a temperatura aumenta. Este fenômeno tem implicações sérias, considerando que a intensidade da corrente de fuga é proporcional à potência absorvida pelos varistores. Se a potência absorvida exceder a capacidade de dissipação do pára-raios, a corrente e temperatura aumentarão indefinidamente, isto é, o pára-raios entrará em processo de avalanche térmica. Em tensão constante, o efeito do tempo na corrente é análogo ao da temperatura na corrente sendo acelerado em tensões elevadas e agravado ainda mais com a elevação da temperatura [W. E. CORPORATION, 1983].

GUPTA (1990) explica o crescimento da corrente com o tempo com base na difusão térmica dentro da camada de depleção do zinco intersticial (Zn^{i+}). Segundo GUPTA, a corrente I_r em função do tempo pode ser expressa por:

$$i_{rt} = i_{ro} + K_{TE} t^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 4}$$

em que: i_{rt} é a corrente resistiva no tempo, i_{ro} é a corrente resistiva inicial e K_{TE} é uma constante adimensional que representa a inclinação da curva. CARLSON et al. (1985) relacionou o processo de crescimento da corrente de fuga descrito na Eq. 4 com a temperatura absoluta a partir da equação de Arrhenius, de modo que:

$$K_{TE} = C_A \exp\left(\frac{-e\phi}{k_b T}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

em que C_A é uma constante dependente do material.

Uma forma de se avaliar a capacidade de absorção de energia do pára-raios é através de suas curvas de estabilidade térmica (Fig. 8, pp. 25), as quais relacionam a potência absorvida com a capacidade de dissipação de energia do pára-raios. Entretanto, LAT (1985) mostrou que o cálculo da capacidade de absorção de energia com base nas curvas de estabilidade térmica se aplica apenas quando a taxa de entrada de energia é lenta e o crescimento da temperatura é uniforme em todo o material, dependendo também da forma como a energia é absorvida pelo elemento não-linear. EDA (1984), estudando a relação do tamanho do varistor com a probabilidade de destruição do mesmo durante uma descarga, mostrou que não há relação direta entre a energia de destruição e a área do eletrodo. Dessa forma, a baixa capacidade de absorção de energia e as diferenças entre a energia de destruição obtida e a esperada para diferentes varistores são provavelmente causadas pela não-uniformidade da estrutura microscópica das pastilhas de ZnO, o que aumenta a probabilidade do varistor ter regiões preferencialmente condutivas.

Diversos outros estudos foram desenvolvidos buscando relacionar as condições limite de um pára-raios em relação à máxima corrente que passa por seus terminais e a sua capacidade de absorção de energia, ou seja, o quanto ele pode suportar antes de sua destruição térmica. TOMINAGA et al. (1980), por exemplo, analisaram as condições críticas para que ocorra um desencadeamento térmico relacionando uma potência de entrada (absorvida) crítica ou uma corrente crítica em função da área transversal do elemento não-linear. Contudo, nos seus experimentos, eles consideraram

exclusivamente uma coluna de varistores em contato direto com o ambiente, isto é, não consideraram o invólucro dos pára-raios, o qual possui uma resistência térmica bem mais elevada, dificultando a dispersão de energia para o ambiente.

MIZUKOSHI (1983), STENSTROM (1992), RINGLER et al. (1997) e BARTKOWIAK (2001) estudaram a capacidade de absorção térmica dos varistores. Entre os resultados destes estudos descobriu-se a importância da uniformidade da microestrutura dos varistores para a estabilidade térmica dos mesmos, comprovando que para varistores não uniformes, a falha por perfuração é bastante comum, havendo também um aumento da probabilidade de falha por quebra.

Conforme se pode observar, os estudos realizados em relação à caracterização do pára-raios comprovam que a degradação dos varistores, seja por envelhecimento ou por solicitações severas, e a não-uniformidade dos materiais diminuem a sua capacidade de absorção de energia e aumentam a corrente de fuga que circula pelos mesmos. Dessa forma, o varistor passa a se tornar inadequado para o uso, já que perde as suas características fundamentais, necessárias à proteção dos sistemas elétricos. Justifica-se assim a necessidade de compreensão dos fenômenos que regem o comportamento eletrotérmico desses dispositivos, à medida que fornecem os subsídios necessários para a sua melhoria e o seu uso correto.

Estudo dos Materiais

Os primeiros varistores a ZnO, utilizados para baixa tensão, eram compostos basicamente de óxido de zinco, óxido de bismuto e alguns outros aditivos em menor quantidade. A expansão do uso dos pára-raios a ZnO para sistemas de alta tensão levou a necessidade de melhoria de sua composição, com a finalidade de uma maior suportabilidade para as aplicações em tensões mais elevadas.

MUKAE et al. (1988), GANGOPADHYAY et al. (1996), SHICHIMIYA et al. (1998) e IMAI et al. (1998) concentraram seus estudos na aplicação de novos materiais utilizados na composição dos varistores a ZnO. Como resultado, apresentaram pastilhas com características eletrotérmicas mais eficientes, permitindo uma maior absorção de energia e uma maior tensão de ruptura além da obtenção de uma microestrutura mais homogênea aumentando a confiabilidade e a vida útil dos varistores. Uma aplicação prática destes resultados é a construção de pára-raios com dimensões mais reduzidas,

facilitando o transporte e o manuseio nas subestações, apesar de apresentarem um custo inicial um pouco mais elevado.

Desenvolvimento de Modelos Eletrotérmicos

A utilização de pára-raios completos de alta tensão para estudos do seu comportamento eletrotérmico em condições de operação possibilitaria a análise das condições de regime e sua associação com surtos e sobretensões. Entretanto, o estudo experimental do comportamento térmico dos pára-raios completos de alta tensão é prejudicado devido à falta de condições de se reproduzir as condições de operação do mesmo no campo. Para superar estas dificuldades são utilizados os modelos eletrotérmicos.

Um modelo eletrotérmico é constituído de secções representativas do pára-raios ou de modelos matemáticos que descrevem o comportamento eletrotérmico do mesmo por meio de elementos de circuito ou de equações evoluídas por meio de métodos computacionais. O uso de modelos eletrotérmicos é sem dúvida a forma mais difundida para a realização de estudos envolvendo pára-raios. Uma das primeiras modelagens para os pára-raios a ZnO foi proposta por TOMINAGA et al. (1980). Este era um modelo matemático simples utilizado para expressar o balanço de energia no pára-raios. A energia absorvida nos elementos era representada por uma função exponencial e a energia dissipada por uma função linear.

Até há pouco tempo, uma das formas mais comuns de se modelar os pára-raios era a partir de modelos de seção, que nada mais são do que secções representativas do pára-raios completo, envolvendo seus elementos construtivos principais: varistores, invólucro, espaçadores e terminais. Estas secções são submetidas a condições normalmente impostas a um pára-raios completo.

Os primeiros modelos de seção foram construídos por MIZUNO et al. (1981), na tentativa de observar o comportamento dos seus elementos simulando as condições normalmente impostas a um pára-raios completo. Estes modelos se prestaram para ensaios de surto de manobra e tensão aplicada.

As secções de teste apresentam alguns inconvenientes, tais como a falta de confiabilidade nos resultados, quando se faz necessária à transposição dos resultados obtidos para o modelo real e a inadequabilidade para alguns tipos de pára-raios, como aqueles de maior porte. Dessa forma, surgem os modelos computacionais como uma

ferramenta mais prática para o estudo dos pára-raios, apresentando mais confiabilidade e custos mais reduzidos. Além disso, os modelos computacionais apresentam uma grande versatilidade, pois permitem a simulação das mais diversas situações às quais um pára-raios pode ser submetido sem a necessidade da mobilização de equipamentos de grande porte ou mesmo recursos pessoais.

LAT (1983) propôs um modelo eletrotérmico para a representação dos pára-raios a ZnO utilizando uma analogia entre grandezas elétricas e térmicas. Neste modelo, a corrente elétrica era utilizada para representar o fluxo de calor; a tensão, a temperatura; e os elementos físicos, representando as resistências e capacitâncias térmicas do equipamento são representadas por resistências e capacitâncias elétricas. Foram calculados analiticamente os valores das resistências térmicas para 6 configurações de pára-raios de distribuição, utilizando-se as características dos materiais envolvidos, a configuração física e a equação do modo de transferência de calor correspondente.

LAT (1985), ST-JEAN e PETIT (1990) e PETIT (1991) passaram a estudar os pára-raios através de modelos computacionais. Estes modelos apresentam mais versatilidade que seções de teste, pois permitem de maneira rápida e a um baixo custo, simular as mais diversas situações de solicitações elétricas e ciclos de ensaios em pára-raios.

HUANG (1993) e STOCKUM (1994) inovaram utilizando o método das diferenças finitas (MDF) para analisar o comportamento eletrotérmico dos pára-raios. A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada para a determinação das temperaturas em diversos pontos de um pára-raios. No entanto, este modelo apresenta algumas hipóteses simplificadoras (tais como a desconsideração das aletas do pára-raios e a hipótese de que a entrada de energia é fixa) que fazem com que o mesmo represente adequadamente o pára-raios.

COSTA (1999), também utilizando o método das diferenças finitas, desenvolveu um modelo eletrotérmico computacional que possibilita estudar a capacidade de absorção de energia e dissipação térmica em pára-raios de óxido de zinco. O modelo considera as transferências de calor radial e axial, as variações do calor específico com a temperatura, as capacitâncias e resistências térmicas distribuídas, indução das aletas, diversidade nos tipos de entrada de energia, entrada simplificada para os dados e configuração dos pára-raios. Apesar de todas as considerações o modelo não contempla o efeito da distribuição não uniforme de potencial nos pára raios de grande porte. A não uniformidade do potencial acarreta a concentração dos campos elétricos nos varistores,

promovendo uma circulação excessiva de corrente e conseqüentemente o aquecimento dos varistores.

Novos modelos representativos do pára-raios têm surgido buscando superar as limitações dos modelos existentes. Uma das áreas mais promissoras continua sendo a da simulação digital. Possíveis alternativas em relação ao método das diferenças finitas para o desenvolvimento de modelos eletrotérmicos são o método dos volumes finitos (MVF) e o método dos elementos finitos (MEF). Enquanto o MDF sempre foi empregado pelos analistas na área de escoamentos de fluidos, o MEF o foi para a área estrutural. O MEF, assim como o MVF, garante a conservação das propriedades físicas envolvidas no volume elementar (massa, entalpia, entre outros) [MALISKA, 1995]. Estas características tornam a utilização de um destes métodos mais adequada para o estudo eletrotérmico dos pára-raios, representando uma possível melhoria na análise da distribuição de calor no interior destes equipamentos e oferecendo resultados mais precisos que contemplem uma maior diversidade de fontes e distribuição de calor ao longo dos seus elementos semicondutores e invólucro de porcelana.

NÓBREGA (2006) aprimorou a metodologia desenvolvida por COSTA (1999) para a simulação eletrotérmica de pára-raios. Nesta nova metodologia, o método dos volumes finitos foi utilizado com base na técnica de multiblocos e coordenadas generalizadas para simular a transferência de calor em todo o equipamento (Fig. 9). Estes métodos permitem que a configuração do pára-raios possa ser gerada com mais detalhes permitindo, por exemplo, que as aletas sejam representadas em sua configuração real, e não mais aproximadas por volumes retangulares. Como resultado, é possível acompanhar a evolução dos valores de temperatura no pára-raios, de acordo com a entrada de energia simulada, ou estipular os valores de temperatura em um ponto específico de acordo com os valores de temperatura obtidos na superfície externa.

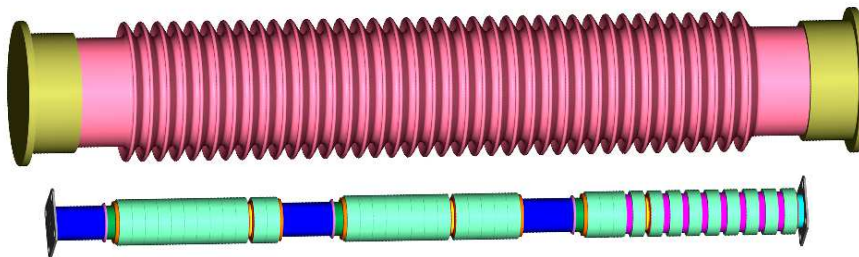


Fig. 9 - Estrutura do pára-raios gerada com multiblocos e coordenadas generalizadas.

Monitoramento de Pára-Raios

O monitoramento é uma ferramenta de grande importância para se avaliar o estado dos pára-raios que estão em uso em campo. Pode-se dizer que o monitoramento é uma manutenção preditiva, pois a mesma permite detectar anomalias que podem ocasionar a falha do pára-raios. Deste modo, evita-se que o equipamento falhe e comprometa a segurança do sistema no qual está inserido.

Por motivos de caráter prático e econômico, é preferível que a análise do estado dos pára-raios em uso seja feita sem que haja necessidade da retirada do mesmo, de modo a não comprometer a segurança e a operação.

São várias as técnicas utilizadas para o monitoramento dos pára-raios. Desde aquelas utilizáveis apenas em laboratório, nas quais é possível abrir o pára-raios; até aquelas realizadas em campo, a distância, sem que haja necessidade de qualquer interação com o equipamento. Nos tópicos seguintes serão abordadas algumas técnicas de monitoramento utilizadas, entre elas a termovisão e a medição da corrente de fuga, as quais são, hoje em dia, as técnicas mais difundidas e confiáveis para realização do monitoramento destes equipamentos.

Medição da Corrente de Fuga

Diversas são as técnicas utilizadas no monitoramento de pára-raios. Uma das mais comuns é a medição da corrente de fuga. Esta técnica se baseia na medição da corrente que flui através da conexão com a terra, pois a componente resistiva da corrente de fuga é um bom indicador das condições do pára-raios. Um aumento permanente da corrente de fuga resistiva pode indicar perda da estanqueidade do equipamento ou envelhecimento prematuro dos varistores, enquanto que um crescimento temporário da corrente indica um aquecimento repentino dos varistores devido a alguma solicitação elétrica.

Além disso, as características altamente não-lineares dos pára-raios resultam no surgimento de correntes contendo uma grande quantidade de harmônicos. Dentre estes, destaca-se o harmônico de 3ª ordem, cuja amplitude está ligada ao grau de não-linearidade do pára-raios. Dessa forma, devido ao crescimento da componente harmônica de 3ª ordem da corrente de fuga do pára-raios diante da degradação dos

varistores, esta corrente pode ser utilizada para o diagnóstico do estado do pára-raios [KIL et al., 2003].

A vantagem deste tipo de técnica é a possibilidade de monitoramento sem que o pára-raios seja retirado de serviço. Devido a suas características diversos estudos vêm contemplando essa forma de se diagnosticar os pára-raios de ZnO.

Dentro desta linha de pesquisa, LUNDQUIST et al. (1989) desenvolveram um método para análise da corrente de fuga baseado na análise das suas componentes harmônicas. O método se baseia na técnica da compensação, no qual a corrente harmônica de terceira ordem gerada pela tensão do sistema é eliminada de modo que apenas a componente de terceira ordem gerada pelo pára-raios é utilizada na medição. Para isso, é estabelecida uma relação entre a componente harmônica de terceira ordem da corrente resistiva e a corrente de fuga total do sistema. Tudo isto é feito através de um aparelho chamado *Leakage Current Monitor* (Monitor de Corrente de Fuga) ou LCM.

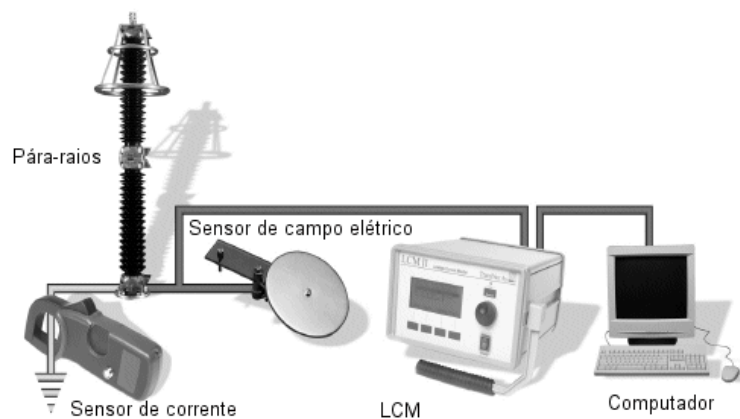


Fig. 10– Obtenção da corrente através de uma sonda de campo.

De modo geral, a corrente resistiva de terceiro harmônico é considerada como sendo a diferença entre a corrente total e a corrente capacitiva de terceiro harmônico. Uma sonda imersa no campo elétrico ao redor do pára-raios (Fig. 10) fornece a corrente de fuga total, enquanto através de análise de Fourier obtêm-se a componente harmônica de terceira ordem. A amplitude e a fase da componente de terceira ordem da corrente total podem ser analisadas para a obtenção da corrente capacitiva. A corrente resistiva é obtida a partir da diferença entre a total e a capacitiva. A principal vantagem do método desenvolvido é a baixa sensibilidade aos harmônicos da tensão do sistema.

COFEEN e MCBRIDE (1991) desenvolveram uma técnica para cálculo da corrente de fuga resistiva através da medição da perda de potência e da tensão RMS

aplicada ao pára-raios chamada de técnica HI-VARC (*High Voltage AC Resistive Current – Corrente Resistiva Alternada de Alta Tensão*). Esta técnica permite a obtenção da corrente de fuga mesmo com a presença de harmônicos, tanto na onda de tensão aplicada como na de corrente. A vantagem da técnica é que não há necessidade de se compensar a corrente de fuga capacitiva nem há a necessidade de se repetir a exata configuração da geometria do sistema para a realização de testes sucessivos.

O sistema utilizado é constituído basicamente de um osciloscópio digital, o qual é utilizado para a obtenção da tensão através de um divisor resistivo; um shunt de corrente, cuja tensão é utilizada para se obter o valor da corrente que passa pelo pára-raios e um computador pessoal, o qual armazena e processa os sinais obtidos pelo osciloscópio. O sistema calcula o valor RMS verdadeiro para a tensão e corrente obtidos ao longo de um período de tempo pré-definido, sendo armazenados para o caso de haver necessidade de uma futura consulta. Um esquema da montagem utilizada pode ser visto na Fig. 11.

Os valores RMS são calculados através de uma fórmula aproximada dada por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [V(k)]^2} ; \quad \text{Eq. 6}$$

em que $V(k)$ são os pontos de tensão digitalizados e n é o número de pontos utilizados. É importante garantir que as medições sejam feitas na ausência de efeito corona ou influência de correntes temporárias sobrepostas a corrente de operação.

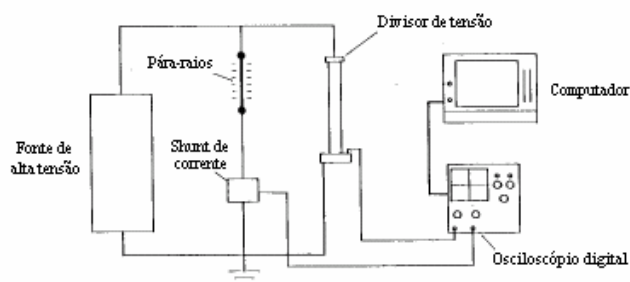


Fig. 11 – Sistema de monitoramento HI-VARC. [COFEEN e MCBRIDE, 1991]

A corrente resistiva é obtida através do cálculo da potência média, dada por:

$$P_M = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V(k)I(k) ; \quad \text{Eq. 7}$$

em que $V(k)$ e $I(k)$ são os valores de tensão e corrente obtidos com o osciloscópio e n é o número de pontos utilizados. Dividindo-se a Eq. 7 pela Eq. 6, obtém-se o valor da corrente resistiva.

Esta técnica está sujeita a determinados erros que podem inviabilizar os resultados. Dentre os principais erros podem-se citar erros na medição da corrente e da tensão e erros de truncamento durante a digitalização dos valores, além de erro de atraso de tempo diferencial devido ao sistema de conversão A/D. Uma vantagem é que se trata de uma técnica de propósito geral, podendo ser utilizada para a medição da perda de isolamento em diversos tipos de equipamentos.

SPELLMAN e HADDAD (1997) desenvolveram uma técnica de monitoramento *on-line* na qual a corrente de fuga resistiva é determinada através da análise de um ciclo completo da tensão aplicada e da corrente de fuga total, sem a necessidade de análise das componentes harmônicas da corrente. A técnica, chamada de *point-on-wave* (POW) se baseia em um sistema de equações, através do qual a corrente resistiva é determinada a partir dos valores da tensão e da corrente de fuga.

A técnica baseia-se no circuito equivalente do pára-raios. Deste modo, a partir da Eq. 6, pode-se escrever a corrente de fuga como sendo:

$$I_t(t) = I_c(t) + I_r(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + I_r(t) \quad ; \quad \text{Eq. 8}$$

em que I_t é a corrente de fuga total; I_c , a sua componente capacitiva e I_r , a sua componente resistiva.

A cada meio ciclo, numa onda sem harmônicos, um mesmo valor de tensão irá se repetir duas vezes, com exceção do valor de pico que ocorre apenas uma única vez. Tomados os valores da corrente nos tempos t_1 e t_2 , para os quais a tensão tem o mesmo valor, obtém-se:

$$I_t(t_1) = I_c(t_1) + I_r(t_1) = C \frac{dV(t_1)}{dt} + I_r(t_1) \quad \text{Eq. 9}$$

e

$$I_t(t_2) = I_c(t_2) + I_r(t_2) = C \frac{dV(t_2)}{dt} + I_r(t_2) \quad \text{Eq. 10}$$

Como $V(t_1) = V(t_2)$, tem-se que $I_r(t_1) = I_r(t_2)$. Dessa forma, subtraindo-se a Eq. 10 da Eq. 9:

$$C = \frac{I_t(t_1) - I_t(t_2)}{\frac{dV(t_1)}{dt} - \frac{dV(t_2)}{dt}} \quad \text{Eq. 11}$$

Combinando-se as Eq. 9, Eq. 10 e Eq. 11:

$$I_r(t_1) = I_r(t_2) = \left(\frac{I_t(t_1) + I_t(t_2)}{2} \right) - \left(\frac{I_t(t_1) - I_t(t_2)}{2} \right) \cdot \left(\frac{\frac{dV(t_1)}{dt} + \frac{dV(t_2)}{dt}}{\frac{dV(t_1)}{dt} - \frac{dV(t_2)}{dt}} \right) \quad \text{Eq. 12}$$

Através da Eq. 12, pode-se calcular a componente resistiva da corrente de fuga num ciclo completo para qualquer forma de onda desde que se tome alguns pontos da tensão e da corrente. Deve-se considerar ainda que a tensão fornecida seja senoidal, sem componentes harmônicas ou apenas com componentes ímpares e sem deslocamento de fase.

Esta técnica foi testada em laboratório para pára-raios submetidos a diferentes condições de tensão apresentando resultados bastante satisfatórios quando comparados aos valores instantâneos medidos através de outros métodos. No entanto, algumas dificuldades vêm sendo encontradas na tentativa de se levar este método do laboratório para a subestação para que o mesmo seja aplicado com o pára-raios no sistema. Entre estas dificuldades pode se citar a necessidade de se desenvolver equipamentos adequados para a obtenção dos sinais de corrente e tensão na subestação de modo a não influir no sistema e evitar a interferência dos inúmeros ruídos presentes no ambiente.

KLEIN et al. (1999) desenvolveram um sistema de monitoramento *on-line* capaz de acompanhar e armazenar os sinais de corrente obtidos através de sensores sem haver necessidade de contato com o sistema elétrico. Este sistema é constituído de duas partes principais: um sensor de correntes e um computador pessoal. Um diagrama geral do sistema de monitoramento pode ser visto na Fig. 12.

Os sensores que medem a corrente de fuga e os impulsos de corrente são sensores indutivos colocados no aterramento de cada um dos pára-raios de um sistema trifásico. Para a corrente de fuga, os sensores são elementos toroidais com núcleo de ferrite. No caso das correntes impulsivas, o núcleo é de ar, evitando o efeito de saturação na ferrite.

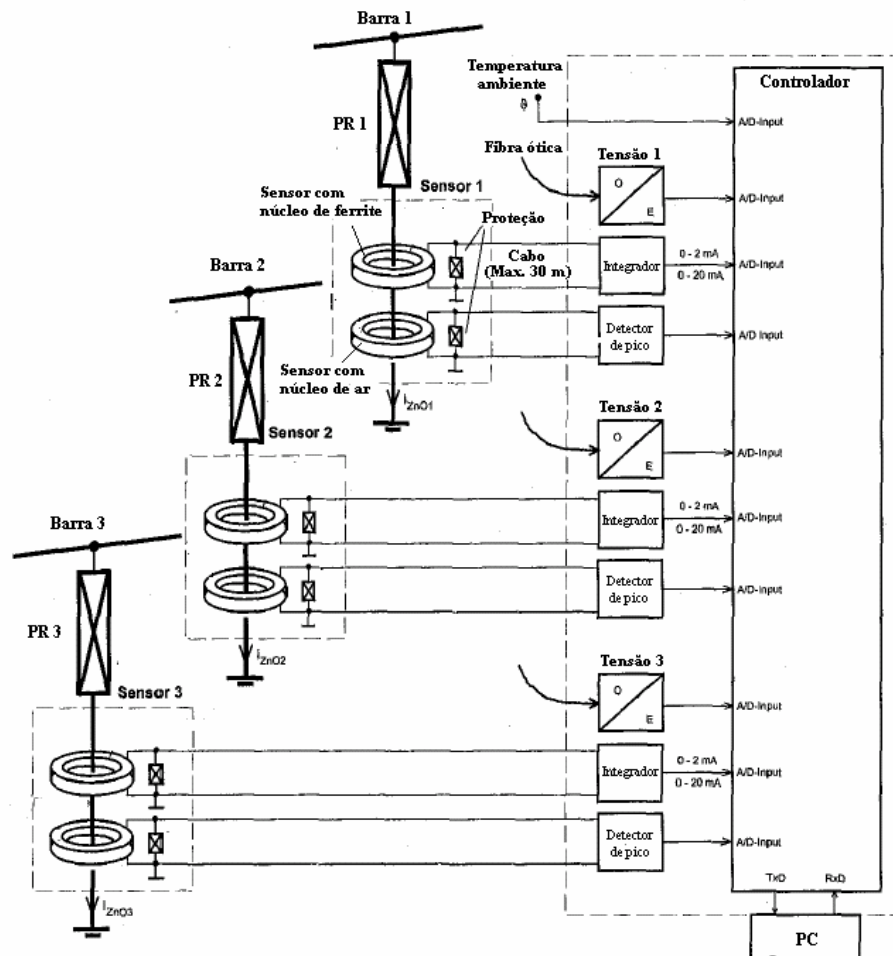


Fig. 12 – Sistema de monitoramento *on-line*. [KLEIN et al., 1999]

Um microcontrolador associado a um computador executa o processamento e armazenamento dos sinais obtidos. Os valores de pico da corrente de fuga e tensão do sistema e a temperatura ambiente são armazenados em intervalos de tempo regulares pelo computador, de modo que em intervalos maiores de tempo, uma amostra de um período do sinal é armazenada e esses dados são utilizados para cálculo dos harmônicos e da componente resistiva da corrente de fuga. Na ocorrência de sobretensões, a polaridade e o valor de pico da corrente são medidos e classificados.

Um sensor de temperatura também é utilizado de modo que variações na temperatura ambiente possam ser acompanhadas. Dessa forma, é possível distinguir se um aumento na corrente de fuga é causado pela temperatura ou por mudanças na característica do pára-raios.

A vantagem deste sistema é a possibilidade de se realizar um monitoramento constante, armazenando informações a respeito do comportamento do pára-raios ao

mesmo tempo em que alerta para irregularidades. Dessa forma, pode-se criar uma espécie de histórico do equipamento. O maior inconveniente desta técnica é a necessidade de se medir as tensões de fase que, além de apresentar um custo elevado, nem sempre é possível.

YAN et al. (2002) realizaram um estudo no qual são analisadas as principais metodologias de monitoramento através da análise da corrente de fuga. Basicamente, os métodos de análise da corrente de fuga se baseiam na compensação da componente capacitiva ou na análise das componentes harmônicas, sendo este último caso mais conveniente para o processamento numérico através de programas computacionais. No primeiro caso, a componente capacitiva da corrente de fuga é filtrada, de modo que o equipamento de medição detecta apenas a parcela resistiva da corrente. Este tipo de monitoramento se torna inadequado quando há a presença de harmônicos provenientes da tensão do sistema. O segundo caso se baseia na propagação de harmônicos devido a não-linearidade dos varistores, os quais aumentam com o aumento da corrente de fuga capacitiva.

No geral, YAN et al. (2002) concluem que a medição da corrente resistiva é um excelente parâmetro para se medir o estado de degradação do pára-raios, já que a tendência é que estes valores se tornem maiores à medida que os varistores envelhecem. Entretanto, a simples informação da amplitude da corrente, obtida pelos medidores instalados, nem sempre é um indicativo adequado para avaliar pára-raios, sendo necessário conhecer não somente a amplitude da corrente de fuga, mas também a sua forma de onda e, se possível, o conteúdo de harmônicos. Para isso, é necessária a utilização de equipamentos específicos para a obtenção e manipulação dos dados, sendo geralmente indicados para a utilização em pára-raios já em uso. Além disso, devido as diferentes configurações de projeto, torna-se importante o conhecimento prévio das características de corrente de fuga do projeto analisado.

No caso da análise do harmônico de 3ª ordem da corrente de fuga, algumas vezes o monitoramento se torna inadequado. Se houver a presença de harmônicos na tensão fornecida ao pára-raios faz-se necessária à utilização de métodos de correção com a utilização de equipamentos de custo elevado. Além disso, quando a degradação se dá por redução da quantidade interna de oxigênio, há um crescimento diferenciado apenas da componente fundamental da corrente, sendo imprópria à utilização de um diagnóstico com base na componente de 3ª ordem [HEINRICH e HINRICHSEN, 2001].

SOUZA (2004) desenvolveu um método computacional para compensação da componente capacitiva da corrente de fuga do pára-raios chamado de Ponte Virtual. Este método utiliza o princípio da ponte de compensação capacitiva tradicionalmente utilizada (Fig. 13) sendo que o ramo RC presente na montagem é dispensado, e valor correspondente a sua capacitância é calculado iterativamente através de uma rotina computacional. O método está sendo implementado em um protótipo para a medição *on-line* da corrente de fuga de pára-raios em campo.

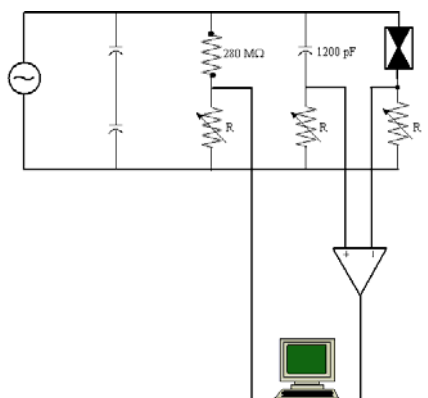


Fig. 13 – Ponte para compensação capacitiva.

LIRA (2006) vem desenvolvendo um sistema de monitoramento remoto em tempo real da corrente de fuga de pára-raios de ZnO que possibilita a avaliação destes sinais a distância. O sistema proposto permite a aquisição de dados usando técnicas de processamento analógico e digital de sinais para estudar o desempenho elétrico de um pára-raios de ZnO em operação a partir da monitoração contínua da sua corrente de fuga. A análise do desempenho elétrico será desenvolvida através do uso de métodos computacionais usando microprocessadores, utilizando para isto a técnica desenvolvida por SOUZA (2004). O perfil da corrente de fuga do pára-raios de ZnO e o espectro das suas componentes harmônicas serão avaliadas para diversas condições de operações e de ensaios em laboratório. Os resultados destas análises deverão ser transmitidos diretamente para uma central de operação através de um sistema de comunicação de dados. Uma importante inovação neste sistema é a aplicação de ligas amorfas nanocristalinas para a criação dos toróides responsáveis para a leitura da corrente. Essas ligas apresentam uma permeabilidade magnética bastante elevada e uma baixa coercividade, permitindo a medição de correntes da ordem de microampéres, sendo,

portanto adequadas para a medição da corrente de fuga em regime permanente em pára-raios.

Levantamento da Curva Característica

A análise da curva característica é uma boa maneira de se avaliar a degradação dos varistores em laboratório, pois esta é uma forma de se verificar as mudanças ocorridas no seu comportamento após a última avaliação. Num pára-raios degradado, a inclinação da curva, na região de baixa corrente, se torna menor resultando em uma corrente de fuga mais elevada para o regime permanente. Este é um método que requer um custo mais elevado para sua realização, pois necessita de equipamentos capazes de fornecer um sinal de tensão de boa qualidade assim como um equipamento de medição adequado para se levantar a curva característica, além de não poder ser aplicado em campo.

Medição da Temperatura

A medição da temperatura pode fornecer a maioria das informações desejadas durante o monitoramento de um pára-raios – absorção de energia, aumento da perda de potência devido ao envelhecimento dos varistores e perda da estanqueidade, sendo a variação na temperatura dos varistores o resultado do efeito de todas estas influências sobre o pára-raios. Isso se deve ao fato de que qualquer anormalidade que venha a ocorrer na operação dos varistores se reflete em aumento de temperatura.

Existem várias técnicas para se analisar a variação de temperatura nos varistores durante a realização de ensaios ou em operação normal. Estas técnicas vão desde a inserção de termômetros entre as pastilhas, até a utilização de ultra-som e termovisores. HINRICHSEN et al. (1999) desenvolveram um sistema de monitoramento de pára-raios baseado na medição de temperatura a partir da emissão de ondas de alta frequência denominado Surface Acoustic Wave (SAW). Sensores do tipo SAW já são utilizados há algum tempo em dispositivos de alta frequência tais como receptores de satélite, telefones sem-fio, controles remotos, entre outros. Seu uso também pode ser estendido para sensores de temperatura, pressão ou torque. Neste caso, o sistema funciona utilizando os efeitos físicos propagados no meio material em que se encontra: dilatação

ou mudança na velocidade de propagação das ondas na superfície à atuação de forças mecânicas ou mudanças de temperatura.

No caso do monitoramento de pára-raios, basicamente, o sistema SAW é composto por um sensor instalado no interior do espaçador metálico da coluna de varistores, o qual se comunica através da emissão de ondas de alta frequência com um sistema receptor que fornece as informações desejadas. Dessa forma, não há a necessidade de nenhum contato entre o sensor e o sistema receptor, de modo que não há nenhuma interferência no funcionamento normal do pára-raios.

Variações no padrão das ondas enviadas indicam mudanças na temperatura interna do pára-raios. Mudanças bruscas de temperatura acima de um nível pré-determinado podem ser interpretadas como ocorrência de surtos isolados, enquanto que uma elevação lenta e contínua da temperatura indica degradação dos varistores. A verificação da intensidade da elevação da temperatura fornece indicativos sobre a capacidade de absorção de energia do equipamento. O sistema desenvolvido funciona então como um contador de surtos, monitor de entrada de energia, monitor do envelhecimento e monitor de desempenho, sendo que cada uma destas funções está relacionada a diferentes parâmetros ligados à entrada de energia no pára-raios. Todas estas funções são executadas por um sensor instalado no interior do espaçador metálico da coluna de varistores (Fig. 14), o qual se comunica através da emissão de ondas de alta frequência com um sistema receptor que fornece as informações desejadas.

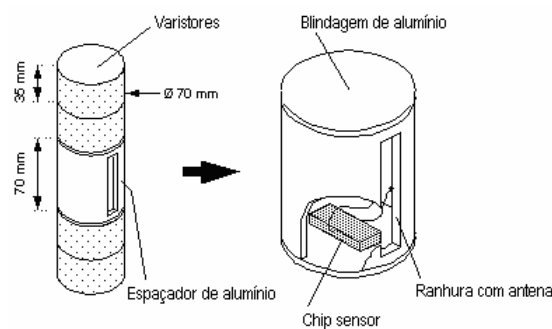


Fig. 14 – Sistema SAW. [HINRICHSEN et al., 1999]

A utilização deste sistema vem sendo testada com sucesso, em uma subestação na Alemanha, e necessita ainda de algumas melhorias para que possa ser feita amplamente. A técnica se torna inadequada para os pára-raios já em utilização, devido à impossibilidade de se inserir o sensor nestes equipamentos. Um outro inconveniente é a

impossibilidade de se obter a temperatura em pontos diversos ao longo da coluna ativa, já que o sensor só pode ser instalado no interior dos espaçadores. Assim, torna-se difícil a localização do ponto de degradação em varistores específicos quando necessário.

Uma outra alternativa para a medição de temperatura em pontos de interesse no pára-raios é a utilização de fibras ópticas. Um sistema de medição a fibra óptica que é imune a interferências eletromagnéticas e apresenta uma excelente sensibilidade e precisão, sendo testado com sucesso em alguns ensaios realizados em laboratório. Entretanto, sua aplicabilidade em campo se torna restrita devido à impossibilidade de se introduzir as fibras nos pára-raios em operação, pois os mesmos são completamente selados.

Termovisão

A utilização da termovisão é uma técnica que vem sendo amplamente difundida para a monitoração, tendo inclusive o seu uso bastante incentivado para os pára-raios de ZnO. De maneira simplificada, a termovisão consiste em “fotografar” o calor emitido pelos equipamentos, e se baseia no fato de que qualquer objeto irradia energia sob a forma de ondas infravermelhas (Fig. 15). Os custos para sua utilização são relativamente baixos, já que as empresas de transmissão e distribuição de energia já a utilizam havia bastante tempo como técnica de manutenção preditiva para os equipamentos das subestações e linhas de transmissão, sendo utilizada inclusive como técnica rotineira para a detecção de anormalidades na operação dos pára-raios.



Fig. 15 – Exemplos do uso da termovisão.

De acordo com empresas de distribuição de energia, esta técnica tem se mostrado consistente para o diagnóstico do estado de pára-raios de SiC com riscos de falha, tornando possível a retirada desses pára-raios de operação de forma programada. Sua principal vantagem é o fato de ser uma técnica não-destrutiva e não-invasiva realizada a distância, indicada para o monitoramento de equipamentos operando sob altos níveis de tensão ou conduzindo uma corrente elevada [KORENDO e FLORKOWSKI, 2001]. A dificuldade de utilização deste método consiste em

determinar com exatidão o valor de temperatura a partir do qual um determinado projeto de pára-raios pode ser considerado como defeituoso.

Uma grande vantagem das imagens térmicas é a possibilidade de se fazer uma varredura completa da temperatura na superfície de todo o equipamento sob inspeção. Assim é possível detectar pontos de aquecimento normalmente imperceptíveis a olho nu. Além disso, mesmo fornecendo apenas as temperaturas na superfície externa do equipamento, a termovisão, quando associada a um sistema de simulação eletrotérmica, (COSTA, 1999; NÓBREGA, 2006) permite estimar a temperatura em pontos internos ao invólucro do pára-raios, tais como a superfície dos varistores (Fig. 16).

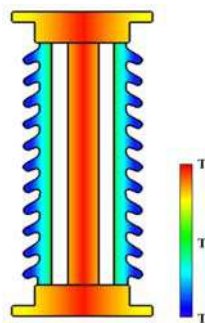


Fig. 16 - Exemplo de uma saída gerada pelo programa de simulação eletrotérmica [NÓBREGA, 2006]

Diversas implementações têm sido realizadas com o intuito de melhorar o uso da termovisão, possibilitando a apresentação de um diagnóstico mais preciso. A utilização desta técnica requer determinados cuidados para se evitar que influências externas alterem os resultados. Desta forma, é indicado o treinamento específico daquelas pessoas que se propõem a utilizá-la. O tratamento dos dados obtidos é feito através da utilização de programas computacionais específicos os quais oferecem diversas opções com o intuito de tornar mais acessíveis os resultados obtidos.

Outras Técnicas

PERROT (1999) desenvolveu um método de diagnóstico dos varistores que considera a homogeneidade da estrutura intergranular dos varistores – aspecto importante tanto no processo de fabricação das pastilhas quanto no controle de qualidade dos mesmos. Sabe-se que a homogeneidade intergranular das pastilhas de óxido de zinco contribui para uma melhor distribuição do fluxo da corrente elétrica e do fluxo de calor através das mesmas.

Uma estrutura granular heterogênea pode levar a uma condução não-uniforme das pastilhas, contribuindo para o surgimento de canais de condução internos e pontos

de aquecimento, acelerando a degradação do material nestes locais, ou mesmo a sua quebra, além de provocar uma severa limitação na sua capacidade de absorção de energia. Além disso, a não-uniformidade das pastilhas de ZnO é um dos efeitos causados pelo seu envelhecimento ou pela sua degradação devido a vários tipos de estresses sofridos [ZANDER, 1987]. Dessa forma, um método que seja capaz de fornecer um diagnóstico da uniformidade microscópica dos varistores é também uma ferramenta capaz de analisar o seu estado de envelhecimento e degradação.

Uma forma de se analisar a distribuição intergranular dos varistores é através de um mapeamento da condução elétrica na sua superfície transversal de modo que os possíveis canais de condução no interior do varistor possam ser detectados. Com base nessa possibilidade, PERROT (1999) desenvolveu uma nova técnica chamada de Varistor Bulk Current Distribution Mapping (Mapeamento da Distribuição de Corrente do Volume do Varistor) capaz de fazer a varredura e o mapeamento da condução nos varistores. Para isso foi utilizada uma sonda cujo terminal é constituído de um eletrodo esférico capaz de se mover sobre a superfície de condução do varistor, conforme esquematizado na Fig. 17. Um sistema de controle foi desenvolvido para atuar sobre o nível de tensão aplicado e sobre a movimentação da sonda. Um plotter recebe os sinais fornecidos pela sonda e faz um mapeamento tridimensional da corrente, no qual os eixos coordenados XY representam a superfície do varistor e o eixo Z indica a intensidade da corrente sobre a sua superfície.

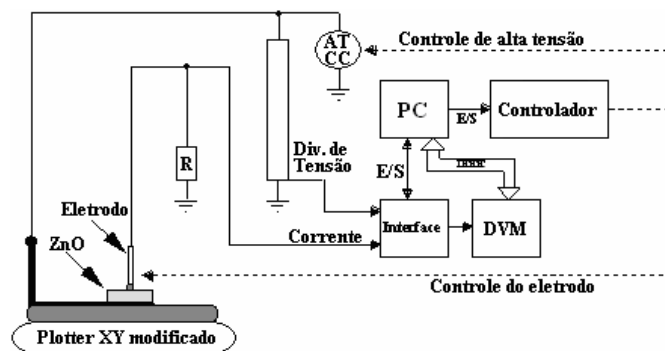


Fig. 17 – Sistema de mapeamento de corrente. [PERROT, 1999]

PERROT (1999) realizou testes em várias amostras de varistores considerando diferentes tipos de ensaio de tensão. Varistores em bom estado apresentaram uma distribuição bastante uniforme de corrente ao longo de todo o mapeamento. Distribuições não-uniformes de correntes, representadas por picos de valor elevado,

foram detectadas em alguns elementos varistores indicando falhas, seja na superfície do varistor, seja internamente. Dessa forma, canais de condução, aparecem no mapeamento como impulsos destacados. Na Fig. 18, estão ilustrados o mapeamento de corrente para um varistor apresentando uma degradação localizada próxima a superfície lateral (Fig. 18-a). Na Fig. 18-b pode ser observada a evolução da degradação após a aplicação de impulsos elétricos sobre a amostra, indicando que um simples ponto de condução transformou-se numa falha severa, tornando o varistor inapropriado para utilização.

É interessante destacar que este método de mapeamento detecta a presença de algumas irregularidades antes mesmo que elas sejam grandes o suficiente para causar alguma variação elevada na corrente do varistor como um todo, de modo que não podem ser detectadas pelos métodos usuais de monitoramento. Isso pôde ser comprovado através de ensaios feitos com amostras de varistores novas e após um processo de envelhecimento. A monitoração através de métodos usuais, por exemplo, não detectou mudanças significativas no comportamento do varistor, enquanto que o mapeamento de corrente detectou o surgimento de pontos de falha no varistor resultando em picos de corrente.

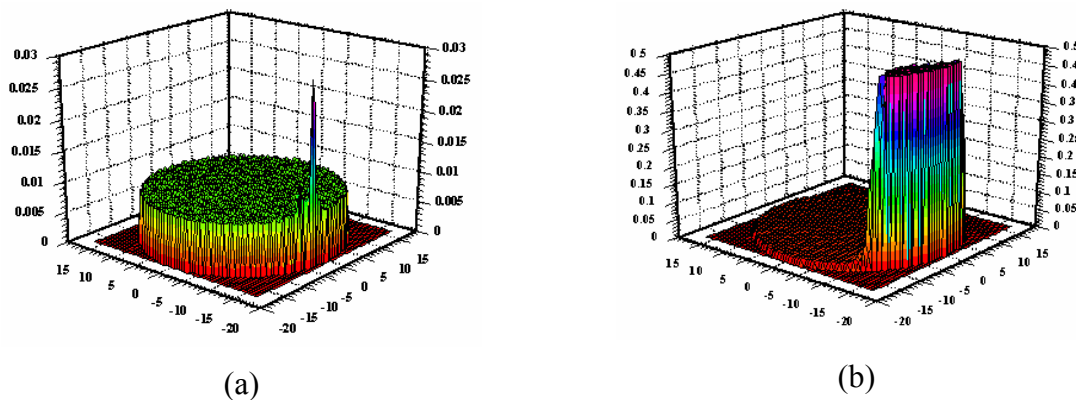


Fig. 18 - Mapeamento de corrente para varistor degradado [PERROT, 1999].

A utilização desta técnica está restrita aos laboratórios, já que os varistores devem ser analisados um a um, necessitando a abertura do pára-raios e retirada dos mesmos. Entretanto ela se apresenta como uma alternativa bastante viável tanto para controlar a qualidade de novos varistores produzidos ou para descobrir a causa de falhas de varistores em uso.

Uma outra contribuição do trabalho de PERROT (1999) foi a observação que de forma geral, as heterogeneidades na estrutura dos varistores encontram-se próximas a

sua periferia e que, para varistores com estrutura perfeitamente homogênea, o início da sua degradação também se faz pela periferia, provavelmente como resultado do efeito pelicular da condução elétrica.

Conforme se pode verificar, diversas são as metodologias utilizadas nesta área de estudo do pára-raios. HEINRICH e HINRICHSEN (2001) realizaram um estudo comparativo com os principais métodos de monitoramento de pára-raios, apontando suas principais vantagens e desvantagens. Foram analisados cinco métodos diferentes: medição da tensão residual, medição da curva característica, medição da perda de potência, determinação da componente harmônica de 3ª ordem da corrente de fuga e medição interna da temperatura.

Destes métodos, HEINRICH e HINRICHSEN (2001) descartam o uso da medição da tensão residual, apontando-a como inadequada para a avaliação do grau de degradação do pára-raios, isto porque a mudança no seu valor, com a degradação do pára-raios, pode ser positiva, negativa ou mesmo nula, dependendo da forma como a corrente de referência é especificada em relação ao joelho da curva característica. Por outro lado, a medição de temperatura do pára-raios é apontada como o método mais indicado para a avaliação e diagnóstico do mesmo. Através deste método é possível diagnosticar a degradação dos varistores independentemente do fenômeno que causou a degradação, uma vez que todos eles resultam no aumento da temperatura interna do pára-raios.

Várias empresas ligadas à produção de equipamentos de alta tensão têm implementado sistemas de monitoramento de corrente de fuga em pára-raios de acordo com os novos métodos que vêm sendo desenvolvidos. Hoje é possível encontrar, comercialmente, desde sistemas bastante simplificados, para medição da corrente que flui através do fio terra e do número de atuações do pára-raios; até sistemas altamente informatizados que analisam a corrente e os diversos surtos que ocorrem, armazenando informações mais importantes.

Consideradas as características dos métodos de medição da corrente de fuga e obtenção de imagens térmicas, principalmente em relação a objetividade dos resultados obtidos – ou seja, medição e visualização direta das grandezas analisadas, tais métodos constituem a base do trabalho desenvolvido e aqui mostrado. Mais especificamente, o estudo foi centrado na obtenção das imagens térmicas pela sua facilidade de utilização e por ser um método amplamente utilizado em subestações.

CAPÍTULO 3 - REDES NEURAIS ARTIFICIAIS -

1. Redes Neurais Artificiais

Uma rede neural artificial (RNA) ou simplesmente, rede neural, é uma estrutura de processamento computacional inspirada no funcionamento do cérebro humano. O cérebro pode ser visto como uma estrutura computacional altamente complexa e eficiente, apresentando características de processamento não-linear e paralelo. Se forem observadas as tarefas desempenhadas pelo mesmo, tais como reconhecimento e controle, pode-se perceber que ainda não se conseguiu desenvolver nenhuma estrutura de processamento artificial – computadores ou algoritmos – capazes de desempenhar estas mesmas funções de maneira tão rápida e precisa.

Um sistema neural biológico é composto basicamente de três estruturas – os receptores, a rede neural propriamente dita e os atuadores. A estrutura principal deste sistema é o cérebro, representado pela rede neural, que recebe continuamente informação, percebe-a e toma decisões apropriadas. Os receptores convertem estímulos do corpo humano ou do ambiente externo em impulsos elétricos que transmitem informações para a rede neural. Os atuadores convertem impulsos elétricos gerados pela rede neural em respostas discerníveis como saídas do sistema. (HAYKIN, 2001).

O cérebro, a rede neural propriamente dita, é composto de uma imensa rede de estruturas sensoras e transmissoras interligadas, os neurônios, capazes de armazenar grande quantidade de informações e selecioná-las de acordo com os estímulos recebidos pelas suas estruturas receptoras. Para formar uma rede neural, os neurônios são interligados através de sinapses ou ligações sinápticas, que são responsáveis pela transmissão de informações entre os neurônios através da propagação dos impulsos elétricos resultantes dos estímulos externos recebidos.

Características importantes, tais como a plasticidade e a generalização, permitem a adaptação do sistema neural biológico aos mais diversos ambientes. A plasticidade ou adaptação permite que o sistema nervoso se adapte ao meio ambiente através do surgimento de novas sinapses entre os neurônios, ou modificação das sinapses existentes. Dessa forma, o cérebro é capaz de se adaptar a novas situações representadas por estímulos nunca antes presenciados pelo sistema nervoso. Já a generalização é o resultado da interação entre as inúmeras conexões sinápticas existentes, permitindo que

estímulos nunca antes recebidos, mas de alguma forma semelhantes a estímulos já reconhecidos, possam ser interpretados corretamente.

Como dito anteriormente, uma RNA nada mais é do que uma tentativa de reproduzir artificialmente a rede neural biológica. Através de algoritmos computacionais, desenvolve-se um sistema de processamento que apresenta as principais características do cérebro: não-linearidade, paralelismo, plasticidade e generalização, resultando em um sistema com capacidade de aprendizagem e armazenamento de informações.

Para atingir seu objetivo, uma RNA é estruturada em unidades básicas que, por semelhança ao seu correspondente biológico, são chamadas de neurônios. Cada neurônio é composto de uma entrada e uma saída, e eles são interligados entre si através de pesos sinápticos.

A estrutura de um neurônio artificial é mostrada na Fig. 19. Basicamente, o modelo de neurônio é composto por três estruturas principais – as sinapses (e respectivos pesos sinápticos), o somador (junção aditiva) e a função de ativação.

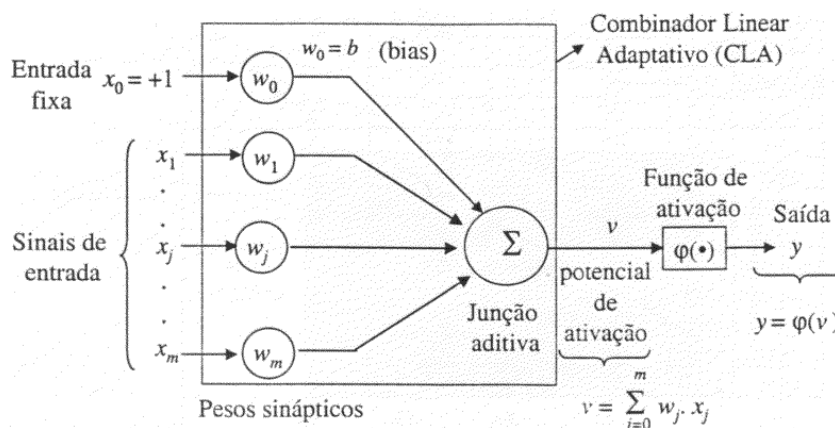


Fig. 19 - Estrutura de um neurônio artificial.

As sinapses, responsáveis pela transmissão dos sinais de entrada são caracterizadas por um peso sináptico que, de maneira simplificada, indica o grau de importância do sinal de entrada. Os sinais de entrada, que em uma rede biológica são representados por impulsos elétricos, aqui são representados por valores numéricos, geralmente numeração binária, que podem ser processados pelo computador. Os pesos sinápticos são responsáveis pelas características de plasticidade e armazenamento dos neurônios. Durante a fase de aprendizagem ou treinamento dos neurônios, estes pesos

são modificados de acordo com os valores de entrada de forma que diferentes saídas podem ser obtidas para os mais variados estímulos.

O somador é responsável pela soma dos sinais de entrada multiplicados por seus respectivos pesos sinápticos.

A função de ativação, ou função restritiva, tem por objetivo limitar o valor da saída da rede, chamado de campo local induzido. Dessa forma, os valores obtidos estarão sempre dentro de um intervalo máximo permissível, o qual geralmente é $[0, 1]$ ou $[-1, 1]$. As funções de ativação mais utilizadas são a função de limiar brusco, a função linear por partes e a função sigmóide.

A função de limiar brusco é a mais simples delas, sendo definida por:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq 0; \\ 0 & \text{se } v < 0. \end{cases} \quad \text{Eq. 13}$$

A função linear por partes, ou função de limiar lógico, apresenta um estágio de transição linear, sem variação brusca, entre os limites máximos e mínimos da função. Esta função representa uma aproximação de um amplificador linear e é dada por:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq \frac{1}{2}; \\ v & \text{se } \frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2}; \\ 0 & \text{se } v \leq -\frac{1}{2}. \end{cases} \quad \text{Eq. 14}$$

Por fim, a função sigmóide representa uma função de ativação não-linear de variação suave entre os limites máximo e mínimo da função. Esta é o tipo de função mais utilizada em RNA, podendo ser definida por uma série de funções diferentes que, em comum, apresentam forma de s. Um exemplo é a função logística, a qual é definida por:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}; \quad \text{Eq. 15}$$

em que a é o parâmetro de inclinação da função sigmóide.

Em complemento a estas três estruturas principais, o neurônio artificial apresenta ainda um bias, aplicado externamente. Este bias pode ser representado por um valor positivo ou negativo e tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação. (HAYKIN, 2001). Alternativamente, o bias pode ser representado como mais uma entrada sináptica do neurônio.

Como representação alternativa mais simplificada, o neurônio artificial pode ainda ser representado como um grafo orientado, como mostrado na Fig. 20.

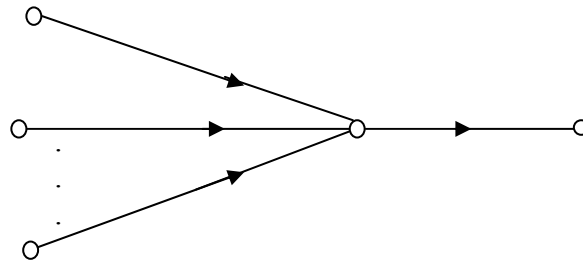


Fig. 20 - RNA representada por um grafo orientado.

Na prática, o neurônio artificial deve ser representado de forma matemática para que possa ser utilizado em um processo computacional. Assim, o neurônio da Fig. 19 pode ser representado matematicamente por:

$$y_k(n) = \sum_{l=0}^{\infty} w^{l+1} x_j(n-1) \quad \text{Eq. 16}$$

Basicamente, o que um neurônio artificial faz é multiplicar o valor da entrada pelo peso sináptico e enviar para a saída, a qual é limitada pela função de ativação. Dessa forma, em uma grande malha de neurônios interligados, o valor do peso atribuído a cada uma das ligações confere maior ou menor grau de importância à entrada daquele neurônio específico de modo que a saída final da RNA será resultado do processamento das entradas e pesos sinápticos de todos os neurônios integrantes da rede.

A grande diferença entre a rede neural biológica e a artificial é a capacidade de processamento. Apesar de as portas lógicas a base de silício utilizadas no processamento computacional serem cerca de 5 vezes mais rápidas que as sinapses nervosas, a grande quantidade de neurônios e conexões existentes no cérebro (cerca de 10 bilhões de neurônios e 60 trilhões de sinapses) confere uma capacidade de processamento ao cérebro humano altamente eficiente e inatingível em termos de processamento computacional. Além disso, o ser humano encontra-se em constante e ininterrupto processo de aprendizagem e adaptação, o que não ocorre com a utilização de RNA, por mais complexas que sejam.

2. Técnicas de Aprendizagem

Desde a fase embrionária, os seres vivos são submetidos aos mais diversos tipos de estímulos, desenvolvendo diferentes reações para cada um destes estímulos. Dessa forma, um bebê é capaz de reconhecer a voz dos pais ao nascer, uma criança aprende

que fogo causa dor ao se queimar pela primeira vez e assim por diante, num aprendizado constante que prossegue até o fim da vida. Pode-se dizer que o cérebro humano é constantemente treinado, através dos estímulos externos, de modo a aprender a desempenhar suas funções apresentando respostas que possam garantir a integridade e o bem estar de toda a estrutura biológica da qual faz parte, o ser humano.

Em relação a técnicas de inteligência artificial, as redes neurais artificiais se destacam devido a sua propriedade primordial que é a sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente e de melhorar o seu desempenho através da aprendizagem (PANDYA, 1996). Para que uma RNA possa aprender, é necessário que haja um processo iterativo de ajustes aplicados aos seus pesos sinápticos e bias. Com isso, a rede vai se tornando cada vez mais instruída em relação ao seu ambiente e as variáveis de importância ao seu processamento.

O processo de aprendizagem das RNA é feito através de uma etapa chamada de treinamento na qual a rede “aprende” os diversos parâmetros utilizados para a classificação dos padrões. Para isto utiliza-se um algoritmo de aprendizagem, constituído por um conjunto de regras pré-estabelecidas para a solução de um determinado problema. Uma das formas simples de processo de aprendizagem é a aprendizagem por correção de erro.

Na aprendizagem por correção de erro, um banco de dados, contendo sinais de entrada e a resposta desejada para estes sinais, é utilizado. Inicialmente um sinal de entrada é utilizado pela rede uma primeira vez e o resultado gerado é comparado com a resposta desejada. Com isso, um sinal de erro é gerado e aciona um mecanismo de controle com a finalidade de aplicar um ajuste corretivo aos pesos sinápticos e bias do neurônio. Cada um desses ajustes tem a finalidade de fazer com que em um novo processamento do sinal de entrada, a resposta se aproxime da resposta desejada, o que é obtido com a minimização da função erro.

Métodos de treinamento, como a aprendizagem por correção de erro, estão classificados como técnicas de aprendizagem supervisionada ou aprendizagem com um professor. Neste caso, o professor é representado pelo conhecimento prévio das respostas corretas para um determinado conjunto de entradas para a rede neural, integrantes do banco de dados ou vetor de treinamento. O sinal de erro, gerado a cada iteração, permite que o erro seja reduzido, até que a rede “aprenda” as respostas indicadas pelo professor. São várias as estruturas que utilizam este tipo de treinamento,

dentre elas os perceptrons, que são a forma mais simples de rede neural utilizada para a classificação de padrões.

3. Perceptron

O perceptron (Fig. 21), estrutura proposta por ROSENBLATT (1958), foi o primeiro modelo de RNA a utilizar a aprendizagem supervisionada. Basicamente, consiste de um único neurônio com pesos sinápticos ajustáveis e bias, sendo utilizado para a classificação de padrões linearmente separáveis (padrões opostos em um hiperplano) (HAYKIN, 2001).

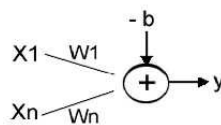


Fig. 21 - Estrutura do perceptron.

Esquemáticamente, o perceptron pode ser visto como um combinador linear seguido por um limitador abrupto (Fig. 22). Seu objetivo é classificar corretamente o conjunto de estímulos aplicados externamente (x_1, x_2, \dots, x_m) em uma classe dentre duas (C_1 ou C_2). Para isto, é usada uma regra de decisão que atribui os pontos de entrada à classe C_1 se a saída final do perceptron for +1 ou a classe C_2 a saída for -1 (HAYKIN, 2001).

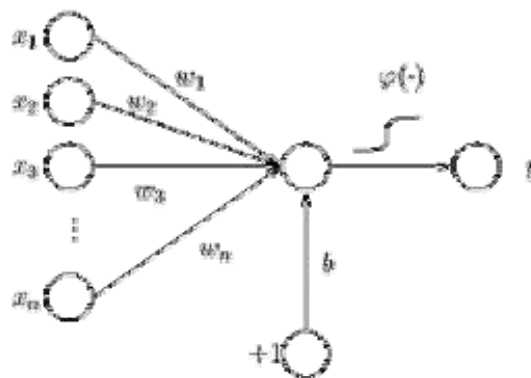


Fig. 22 - Perceptron visto como um combinador linear.

O perceptron assim definido delimita um hiperplano, contendo regiões linearmente separadas, representado por:

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i + b = 0$$

Eq. 17

Uma maneira simples de se verificar isto é através da utilização de apenas duas variáveis de entrada. Neste caso temos um plano cujas regiões são separadas por uma linha reta, conforme ilustrado na Fig. 23. A disposição da fronteira entre as regiões é modificada pela alteração dos pesos sinápticos da RNA.

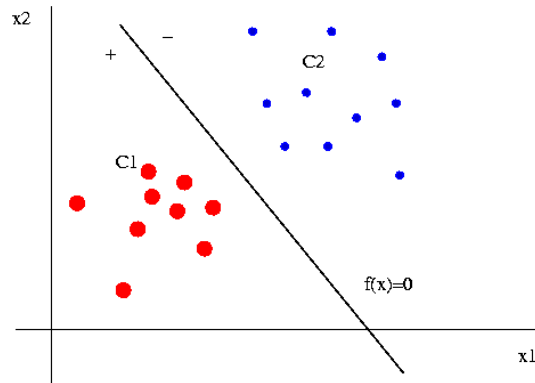


Fig. 23 - Hiperplanos linearmente separáveis.

O algoritmo utilizado para o perceptron, como disposto na Fig. 22 é bastante simples, constituindo-se dos seguintes passos:

- i – Inicialização: Ajustar todos os pesos sinápticos como zero ($w_{kj}=0$);
- ii – Ativação: Para o passo de tempo, n , ativar o perceptron aplicando o primeiro conjunto de valores de entrada ($x_j(n)$) e a resposta, $d_k(n)$, desejada para o mesmo;
- iii – Cálculo da resposta real: Calcular a resposta final do perceptron, $y_k(n)$, dada pela aplicação da função de ativação, $\phi(v)$, sobre o campo local induzido $v_k(n)$.
- iv – Adaptação dos pesos sinápticos: Atualização dos pesos sinápticos do perceptron de acordo com o erro calculado:

$$w(n+1) = w(n) + \eta[d(n) - y(n)]x(n), \quad \text{Eq. 18}$$

em que η é o parâmetro da taxa de aprendizagem e a diferença $d(n) - y(n)$ assume o papel de um sinal de erro.

v – Incrementar o passo de tempo, $n = n+1$, e retornar para o item **ii** até que um critério de parada pré-estabelecido seja atingido.

Um perceptron composto de um único neurônio limita-se a fazer a separação de padrões em duas classes apenas. Entretanto, a sua expansão em várias camadas permite a classificação em mais de duas classes, desde que estas classes sejam linearmente separáveis. Sendo esta expansão uma simples extensão do funcionamento do perceptron com um único neurônio. Como exemplo, pode-se ver na Fig. 24, um perceptron de

múltiplas camadas, o qual consiste de uma camada de entrada, duas camadas ocultas e uma camada de saída.

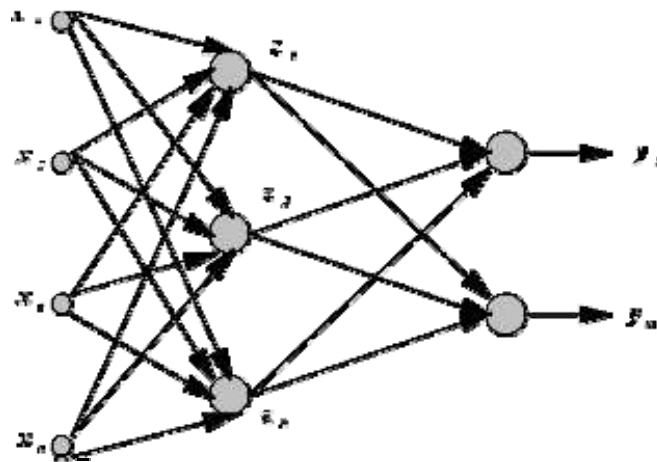


Fig. 24 - Perceptron de múltiplas camadas.

4. Retropropagação e Resilient Propagation

Os perceptrons de múltiplas camadas utilizam um algoritmo de aprendizagem chamado de algoritmo de retropropagação, que se baseia na aprendizagem por correção de erro. A retropropagação consiste de dois passos através das diferentes camadas da rede. No primeiro passo, para frente, chamado de propagação, um conjunto de sinais é aplicado na camada de entrada da rede e se propaga, camada por camada até a saída, recebendo os efeitos dos pesos sinápticos e dos somadores presentes em cada uma dessas camadas. No segundo passo, para trás, chamado de retropropagação, um sinal de erro obtido da diferença entre o sinal de saída gerado e o sinal de saída desejado é propagado, no sentido contrário. Nesse processo, os pesos sinápticos são ajustados de modo que, em uma próxima iteração, a saída obtida se encontre mais próxima da saída desejada.

Como visto anteriormente, o sinal de erro na saída de um neurônio j , durante a iteração n , é dado por:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n); \quad \text{Eq. 19}$$

O valor instantâneo da energia do erro para o neurônio j , é dado por:

$$erro = \frac{1}{2} e_j^2(n) \quad \text{Eq. 20}$$

Dessa forma, a energia de erro total seria o somatório de todos os valores instantâneos de energia do erro para a camada de saída, o que pode ser obtido através de:

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad \text{Eq. 21}$$

Em que C representa o conjunto contendo todos os neurônios da camada de saída da RNA.

Se N representa o número de padrões do conjunto de treinamento, a energia média do erro quadrado é obtida através da soma e normalização de $E(n)$ em relação ao tamanho total do conjunto de treinamento:

$$\varepsilon_{med} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon(n) \quad \text{Eq. 22}$$

A energia média do erro quadrático representa uma função cuja minimização é o objetivo do ajuste de parâmetros (pesos sinápticos e bias) durante o processo de aprendizagem. O ciclo de processamento do sinal de entrada, cálculo do erro e ajuste dos pesos sinápticos são realizados para todos os padrões do conjunto de treinamento é chamado de época. O algoritmo de retropropagação utiliza o ajuste dos parâmetros de padrão em padrão até que se complete uma época. A partir daí os padrões são reapresentados à rede neural para um novo ciclo de ajustes. O número de épocas vai depender do número de ajustes necessários para que os valores dos pesos sinápticos se estabilizem, ou seja, quando não há mudanças significativas em seus valores entre uma época e outra.

O modo como os ajustes de parâmetros são feitos depende do tipo de neurônio envolvido. Considere, por exemplo, um neurônio pertencente à camada de saída. Para este neurônio, o campo local induzido é dado por:

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^m w_{ji}(n) y_i(n) \quad \text{Eq. 23}$$

onde m é o número total de entradas do neurônio.

A saída final do neurônio, ou sinal funcional, é dada por:

$$y_j(n) = \varphi_j(v_j(n)) \quad \text{Eq. 24}$$

A correção dos valores dos parâmetros é feita proporcionalmente à derivada parcial $\frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w_{ji}(n)}$, utilizando-se a regra da cadeia. O valor obtido representa um

fator de sensibilidade, determinando a direção de busca no espaço de pesos para o peso sináptico, w_{ji} .

A resolução das derivadas através da regra da cadeia resulta em uma fórmula para o ajuste dos pesos sinápticos dada por:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad \text{Eq. 25}$$

e

$$\delta_j(n) = e_j(n) \varphi'_j(v_j(n)) \quad \text{Eq. 26}$$

Em que η é o parâmetro da taxa de aprendizagem do algoritmo de retropropagação. O sinal negativo indica a descida do gradiente no espaço de pesos, ou seja, a busca de uma direção para mudança de peso que reduza o valor do erro.

Já o gradiente local, $\delta_j(n)$, é dado por:

$$\delta_j(n) = e_j(n) \varphi'_j(v_j(n)) \quad \text{Eq. 27}$$

Para o ajuste dos pesos, como visto na Eq. 25, é necessário que se tenha o conhecimento do sinal de erro da saída do neurônio em questão. Para os neurônios das camadas de saída, o ajuste é feito diretamente através da comparação entre as respostas obtidas e desejadas, já que, neste caso cada saída da rede é suprida com uma resposta desejada particular, permitindo o cálculo direto do sinal de erro.

Para o caso dos neurônios pertencentes às camadas ocultas, não há uma resposta desejada específica para cada um deles. Desse modo, o reajuste dos pesos para estes neurônios deve ser determinado recursivamente, considerando todos os sinais de erros dos outros neurônios aos quais o neurônio em questão está diretamente conectado. Neste caso, é utilizada a fórmula da retropropagação (HAYKIN, 2001), dada por:

$$\delta_j(n) = \varphi'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad \text{Eq. 28}$$

O treinamento da rede neural através do algoritmo de retropropagação pode ainda ser feito de maneira seqüencial ou por lote. No modo seqüencial os pesos sinápticos são ajustados após a apresentação de cada padrão de entrada do conjunto de treinamento. No ajuste por lote, todos os padrões de entrada do conjunto de treinamento são apresentados, só então é feito o ajuste dos pesos sinápticos. Neste caso, algumas modificações são feitas na formulação utilizada para o cálculo do erro e do erro médio.

O ajuste seqüencial apresenta a vantagem de apresentar menos necessidade de memória de armazenamento para os valores das conexões sinápticas, já que os valores são mudados a cada sinal apresentado. Entretanto, essa forma de ajuste torna mais

difícil a obtenção das condições de convergência do algoritmo. De qualquer forma, a utilização deste tipo de algoritmo tem sido bastante utilizada por sua simplicidade de implementação.

Uma variação baseada na retropropagação é o algoritmo de aprendizagem chamado *resilient propagation* ou simplesmente RPROP desenvolvido por RIEDMILLER e BRAUN (1993). O RPROP torna a convergência da rede neural mais rápida, pois ajusta os pesos localmente de acordo com o comportamento dos erros obtidos em cada época de processamento da rede. Assim, diferentemente do algoritmo de retropropagação tradicional, o RPROP possui uma taxa de variação para cada peso, definida por:

$$\Delta_{ji}^k(m) = \begin{cases} \eta^+ \cdot \Delta_{ji}^k(m-1), & \text{se } \frac{\partial \xi_{med}^k}{\partial w_{ji}^k}(m-1) \cdot \frac{\partial \xi_{med}^k}{\partial w_{ji}^k}(m) > 0 \\ \eta^- \cdot \Delta_{ji}^k(m-1), & \text{se } \frac{\partial \xi_{med}^k}{\partial w_{ji}^k}(m-1) \cdot \frac{\partial \xi_{med}^k}{\partial w_{ji}^k}(m) < 0 \\ \Delta_{ji}^k(m-1), & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad \text{Eq. 29}$$

em que $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$, sendo seus valores mais usuais 0,5 e 1,2; respectivamente, $\xi_{med}(m)$ é a função energia de erro média para uma época m , dada por:

$$\xi_{med}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n), \quad \text{Eq. 30}$$

em que N é o número total de padrões do conjunto de treinamento e $\xi(n)$ é a função energia de erro para um padrão de entrada n pertencente ao conjunto de treinamento.

Já os gradientes locais podem ser obtidos por:

$$\frac{\partial \xi_{med}^k}{\partial w_{ji}^k}(m) = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \delta_j^k(n) \cdot y_i^{k-1}(n).$$

Uma mudança no sinal dos gradientes locais, de uma iteração para outra, indica que a adaptação dos pesos foi suficiente para se ultrapassar um ponto extremo da função energia de erro médio. Dessa forma, o valor do peso anterior a última adaptação é retomado e o novo reajuste é calculado com base na Eq. 29. Assim, é possível fazer um ajuste mais refinado dos pesos. De modo geral:

$$\Delta w_{ji}^k(m) = \begin{cases} -\Delta_{ji}^k(m), se \frac{\partial \xi_{med}}{\partial w_{ji}^k}(m) > 0 \\ +\Delta_{ji}^k(m), se \frac{\partial \xi_{med}}{\partial w_{ji}^k}(m) < 0 . \\ 0, caso contrário \end{cases} \quad \text{Eq. 31}$$

Tal adaptação permite uma maior eficiência do algoritmo mesmo para condições em que o gradiente seja muito pequeno, ou seja, casos em que a superfície de erro tenha uma forma plana (SILVA et. Al., 2006).

CAPÍTULO 4

- METODOLOGIA DESENVOLVIDA E RESULTADOS OBTIDOS -

1. Defeitos nos pára-raios a ZnO

Os pára-raios a ZnO são equipamentos de uso relativamente recente nos sistemas elétricos. Surgiram como uma evolução de cerâmicas semicondutoras utilizadas em eletrônica, se tornando então uma alternativa mais eficiente em relação às cerâmicas a base de carboneto de silício (SiC) utilizadas até então em pára-raios de alta tensão. Isto porque, em relação ao SiC, o ZnO apresenta uma curva característica $V \times I$ mais bem definida para as diferentes regiões de atuação do pára-raios, além disso, sua baixa condutividade em baixas tensões dispensa a utilização de equipamentos auxiliares como os centelhadores, necessários nos pára-raios a SiC.

Além dos problemas relacionados à falhas nos pára-raios, também são poucos os dados relativos ao comportamento dos varistores de ZnO diante do seu envelhecimento natural. Isto porque a vida útil estimada para os pára-raios a ZnO é de 30 anos, de forma que esse é o tempo de instalação aproximado dos primeiros equipamentos nos sistemas elétricos.

Um fato curioso é o procedimento tomado pela maioria das companhias de transmissão de energia quando alguma anormalidade é detectada por meio do termovisor. Normalmente, quando não se trata de um caso crítico, executa-se a limpeza do equipamento seguida de sua reenergização. No caso do comportamento anormal voltar a ocorrer, ou em casos críticos, o pára-raios simplesmente é substituído. Nenhum estudo posterior é feito no sentido de se avaliar o problema causador da anormalidade detectada, seja ela proveniente do sistema, seja ela no próprio equipamento. Isso resulta em um número muito reduzido de informações sobre o estado dos pára-raios retirados do sistema elétrico após o defeito, dificultando a realização de estudos relativos ao diagnóstico destes equipamentos em subestações.

Defeitos Comuns

De modo geral, quando se disponibiliza alguns equipamentos para análise após sua retirada do sistema, ou quando são realizados ensaios de degradação e envelhecimento, há uma série de defeitos cuja ocorrência é observada com mais

freqüência. Dentre os defeitos observados, sem duvida alguma, o mais freqüente é a perda de estanqueidade. Observando-se ainda defeitos referentes à degradação dos varistores, há ainda a poluição externa, a presença de umidade interna e o desalinhamento da coluna de varistores. Além disso, o aquecimento anormal do pára-raios muitas vezes é também detectado como resultado da distribuição irregular de tensão ao longo do seu comprimento.

Alguns dos defeitos citados podem ainda ser considerados decorrências de outros defeitos: por exemplo, perda de estanqueidade pode permitir a entrada de umidade, sendo que um alto teor de umidade pode causar degradação prematura dos varistores. Dessa forma, é preciso ter um cuidado especial na análise de cada uma das ocorrências de falhas em pára-raios a fim de que se possa distinguir com mais precisão qual o principal defeito presente, bem como as suas causas. Uma decorrência disto é que alguns destes defeitos podem não apresentar características bem definidas, de modo que é possível que as conseqüências por eles trazidas, na forma do aquecimento excessivo do pára-raios, sejam semelhantes ao serem detectados pelo termovisor. Espera-se com o resultado final deste trabalho que a RNA desenvolvida para classificação de imagens térmicas possa distinguir estes diferentes defeitos, ou grupos de defeitos que apresentem uma causa em comum.

A seguir, serão analisados os principais defeitos detectados nos pára-raios a ZnO. Estes defeitos aqui apresentados foram selecionados a partir da análise de alguns estudos realizados e divulgados no meio acadêmico. Dessa forma, espera-se que este grupo de defeitos atenda, satisfatoriamente, ao que se espera que seja observado em campo.

Perda de estanqueidade

A perda de estanqueidade é caracterizada pela perda do isolamento físico entre o meio ambiente e o meio interno do pára-raios, possibilitando a troca de gases entre eles. Este problema geralmente é causado por desgaste da borracha de vedação ou por oxidação das partes metálicas que compõem o sistema de alívio de pressão, ou ainda, em casos mais raros, pela deterioração do cimento ou enxofre, responsáveis pela fixação dos terminais e vedação do pára-raios. A Fig. 25 mostra a flange do pára-raios após a sua abertura. Na foto, podem ser vistas as principais estruturas passíveis de sofrer problemas com falta de vedação e perda de estanqueidade: borracha de vedação, diafragma de alívio de pressão e fechamento à base de enxofre.



Fig. 25 – Base do pára-raios após abertura.

A falta de vedação no pára-raios provoca alterações no seu padrão de aquecimento devido ao favorecimento da circulação de gases. É sabido que, com o aumento de temperatura, há um aumento da pressão interna do pára-raios. Se houver uma fissura ou falha na vedação, o gás que constitui o meio interno do pára-raios estará livre para circular. Uma decorrência desse efeito é a diminuição do nível de segurança na atuação do equipamento. Isto porque, como há um escape contínuo de gases, o sistema de proteção contra explosões se torna ineficiente, podendo até mesmo não atuar frente a um aquecimento excessivo.

Do mesmo modo em que a perda de estanqueidade permite a saída de gases, ela é também a porta de entrada para outros gases e para umidade. Dependendo do tipo de gás ou do teor de umidade a penetrar no pára-raios, seu isolamento interno pode ser comprometido com a ocorrência de descargas superficiais, como será visto mais adiante. Além disso, o processo de entrada de gases facilita a formação de outros gases prejudiciais ao isolamento como o nitrato de zinco e o ácido nítrico no caso da ocorrência de descargas parciais (KANUS e LAHTI, 2003).

Esse tipo de falha é o mais comum observado em pára-raios retirados de serviço. Mesmo porque boa parte dos outros defeitos observados, como por exemplo, a entrada de umidade, são decorrências diretas da perda de estanqueidade do pára-raios.

Entrada de umidade

A umidade interna em um pára-raios a ZnO pode decorrer de duas causas principais. A primeira seria um problema de fabricação, resultado de alguma falha

ocorrida durante o fechamento do mesmo. A causa seria a perda de estanqueidade ou falha na vedação do equipamento, como visto anteriormente.

O principal problema causado pela umidade é a ocorrência de descargas parciais, causadas pela formação de vapor de água no meio interno (Fig. 26). O acúmulo de água na base do pára-raios pode se transformar em vapor, seja por aquecimento externo (radiação solar), seja por aquecimento interno (efeito joule). Como resultado, podem ocorrer descargas tanto ao longo da coluna de varistores, como entre os varistores e o invólucro do pára-raios. Além disso, em períodos em que a temperatura interna do pára-raios esteja mais amena, como no período noturno, o vapor de água acumulado no interior do pára-raios pode condensar. Esta condensação ocorre com a formação de gotículas que se acumulam sobre a superfície dos varistores ou da porcelana, formando-se então um caminho úmido o qual favorece a falha no isolamento seguida de ruptura elétrica.

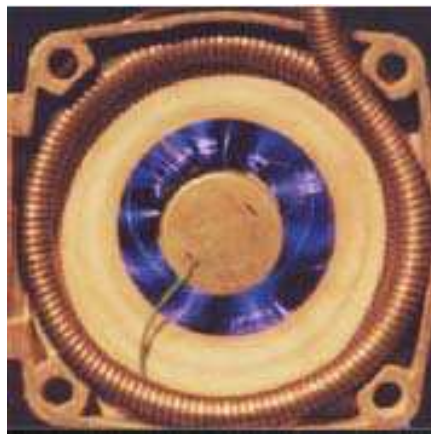


Fig. 26 - Descargas internas em um pára-raios (CHRZAN, 2003).

Um outro problema relacionado à entrada de umidade diz respeito a possíveis gases estranhos ou partículas de poluição as quais podem acompanhar a umidade no interior do equipamento. Dependendo do tipo de gás ou partículas, pode haver uma brusca redução no isolamento interno com o favorecimento das descargas superficiais.

Por fim, a umidade interna pode também ser responsável pela degradação prematura dos varistores. Os efeitos causados pela degradação serão analisados posteriormente.

Poluição superficial

A poluição superficial é um problema comum não apenas em pára-raios, mas em grande parte dos equipamentos ou estruturas que necessitam prover um nível mínimo de

distância de isolamento entre terminais energizados e terminais aterrados, como é o caso de isoladores e buchas de equipamentos em geral. Dependendo da localização dos equipamentos, este é um problema que pode se tornar ainda mais acentuado, caso haja uma alta umidade do ar ou um alto nível de salinidade.

Basicamente, a poluição superficial é classificada em poluição seca ou poluição úmida, sendo esta a mais prejudicial. Seu principal efeito é diminuir a distância de escoamento superficial para a corrente elétrica possibilitando a ocorrência de descargas na superfície da porcelana ou polímero que constitui o invólucro do pára-raios.

A poluição superficial pode também provocar o surgimento de bandas secas na superfície da porcelana (Fig. 27). Essas bandas secas geram descargas superficiais na porcelana alterando o campo elétrico na região e provocando o aquecimento dos varistores localizados na altura em que essas bandas secas são formadas. Este aquecimento favorece a estabilização das mesmas de modo que elas podem se manter mesmo em condições de umidade elevada (HARASYM et al., 1997). Como resultado há o aquecimento excessivo em uma região limitada do pára-raios e a influência na distribuição de tensão ao longo da coluna de varistores.



Fig. 27 – Desgaste provocado por poluição superficial e formação de bandas secas (CHRZAN, 2003).

A presença de poluição na superfície de porcelana dos supressores de surtos é uma das causas mais comuns de falhas ou aquecimento excessivo destes equipamentos em subestações. Tanto que, como citado anteriormente, ao se detectar um aquecimento incomum através da termovisão, a primeira providência a ser tomada é a limpeza do equipamento e sua reenergização para realização de uma nova inspeção. Em boa parte dos casos, a execução da lavagem do equipamento é suficiente para que o mesmo volte a sua condição de operação normal.

Degradação dos varistores

A degradação dos varistores pode ser resultado do seu envelhecimento natural, do seu envelhecimento precoce ou mesmo da sua fratura. Entretanto, em muitos casos, ao se fazer o diagnóstico de um varistor degradado, são encontrados vestígios de vários fatores que podem ter causado a sua degradação.

O primeiro caso é representado por uma parcela de pára-raios a ZnO mais antigos, estando eles entre os primeiros a serem instalados nos sistemas de potência. Pouco se sabe a respeito do comportamento dos varistores nestas condições, a não ser o que se refere aos resultados de ensaios de envelhecimento precoce. Esta degradação ocorre devido à exposição contínua aos campos elétricos e a corrente e, em uma parcela bem menos significativa, ao envelhecimento natural dos materiais.

O segundo grupo é representado pelos varistores que apresentam um nível elevado de degradação antes do prazo estimado para a sua vida útil. Estes varistores geralmente são aqueles que sofreram solicitações mais severas por parte do sistema elétrico ou estiveram submetidos a condições ambientais desfavoráveis. Neste caso, o envelhecimento se dá principalmente devido aos estresses térmicos e está diretamente ligado à capacidade de absorção térmica do varistor, resultando em quebra ou formação de caminhos preferenciais para a corrente (Fig. 28).

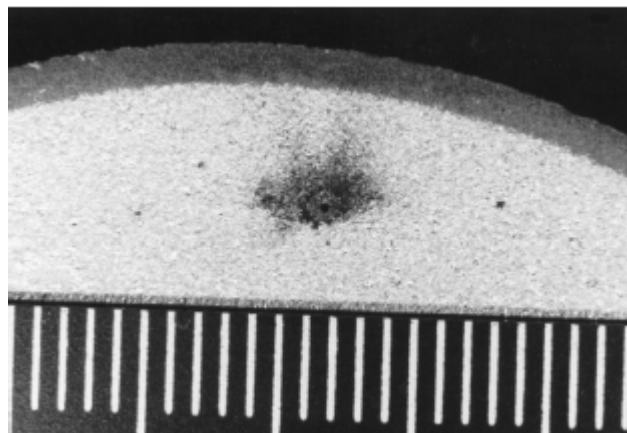


Fig. 28 - Degradação superficial em varistor (WEISE, 2000).

A degradação precoce dos varistores é um fator que pode contribuir para que um pára-raios entre em processo de avalanche térmica. A avalanche térmica é uma condição intrínseca na qual qualquer pára-raios de óxido metálico chegará ao fim de sua vida útil, sendo que algumas condições operacionais podem acelerar este processo (MONTENEGRO, J.C. e RAMIREZ, J. L., 1995). Este processo é caracterizado por um aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, da temperatura. O aumento da

temperatura, por sua vez, propicia o aumento da corrente de fuga, de modo que essas duas grandezas estão diretamente ligadas. Se os varistores de um pára-raios apresentarem altos níveis de degradação, o pára-raios não terá capacidade de dissipar a energia absorvida e pode entrar em um processo de avalanche térmica, caracterizado por um aumento contínuo de corrente e temperatura, de modo a provocar a atuação do sistema de alívio de pressão do equipamento. Em alguns casos, quando o sistema de alívio de pressão não atua satisfatoriamente, pode até mesmo ocorrer a quebra do invólucro de porcelana na forma de uma explosão causada pelas altas pressões internas.

No grupo dos varistores degradados devido a ocorrências elétricas, podem-se citar ainda aqueles submetidos às descargas parciais. Neste caso, a degradação se dá pela erosão da superfície dos varistores ou pela formação de gases internamente (nitrato de zinco e ácido nítrico) com a ocorrência das descargas elétricas (KANUS e LAHTI, 2003).

Há ainda alguns fatores externos que devem ser considerados ao se avaliar o envelhecimento precoce dos varistores. Entre eles a temperatura ambiente e a entrada de umidade. Sabe-se que esses fatores favorecem o aumento da corrente de fuga e, como visto anteriormente, como consequência há um aumento de temperatura e aceleração no processo de envelhecimento.

No caso dos varistores fraturados, podem-se citar aqueles que apresentam desde uma falha superficial, até aqueles que apresentam uma quebra total. Estes defeitos podem ser resultados de solicitações elétricas severas, ou até mesmo do manuseio e transporte inadequado do pára-raios.

Desalinhamento da coluna ativa

O desalinhamento dos varistores ao longo da coluna é um defeito pouco comum, embora seja observado em alguns equipamentos após sua abertura. Geralmente é resultado do transporte e armazenamento inadequado do equipamento, mas pode também ser decorrente de uma falha durante a montagem do equipamento. Esta última possibilidade, no entanto, apresenta uma probabilidade de ocorrência muito baixa, já que a maioria dos fabricantes de pára-raios de alta tensão apresenta um alto nível de controle de qualidade no processo de montagem.

O desalinhamento dos varistores provoca o surgimento de caminhos condutivos preferenciais nas regiões em que eles fazem contato, de forma que há um sobreaquecimento nessas regiões provocando o seu desgaste prematuro. Para reduzir o

risco de ocorrência deste problema, é importante observar com rigor as condições de transporte e armazenamento dos pára-raios, principalmente aqueles que já estão há algum tempo em estoque.

Distribuição irregular de tensão

A distribuição irregular de tensão é característica de equipamentos elétricos que apresentam um maior comprimento, havendo um maior distanciamento entre os terminais de alta e baixa tensão tais como colunas de TP e TC e buchas de isolamento. Nos pára-raios, ela se caracteriza pela ocorrência de níveis mais altos de tensão para os varistores próximos ao terminal de alta tensão, enquanto que os varistores mais próximos do terminal aterrado são submetidos a níveis menores de tensão.

A não uniformidade na distribuição de tensão depende da geometria do equipamento e dos materiais utilizados. Em qualquer caso, a existência de capacitâncias parasitas é a principal responsável por esta irregularidade. Sabe-se, através de experimentos e cálculos, que o aumento excessivo da temperatura e os níveis de corrente no varistor apresentam uma relação direta com o nível das capacitâncias parasitas existentes (HARASYM et al., 1997).

Uma solução relativamente simples para anular, ou pelo menos reduzir, os efeitos das capacitâncias parasitas é a utilização de anéis equalizadores, permitindo que a tensão seja distribuída de modo mais regular entre os diversos varistores da coluna do pára-raios. Parte da solução deste problema é indicada pelos próprios fabricantes às empresas de transmissão e distribuição de energia através do fornecimento de especificações técnicas e recomendações para utilização dos anéis equalizadores ou mesmo fornecendo os equalizadores juntamente com os pára-raios.

Além disso, com a finalidade de se reduzir os efeitos negativos da distribuição irregular de tensão, durante a montagem do pára-raios, os elementos da coluna ativa são empilhados de modo que, nas proximidades do terminal de alta tensão, haja uma menor concentração de varistores e um maior número de espaçadores e absorvedores de calor. Com isso, há uma redução dos esforços elétricos sobre os varistores do topo do pára-raios.

A presença de poluição ao longo do invólucro do pára-raios é um fator agravante no que se refere à irregularidade na distribuição de tensão ao longo do equipamento, pois leva a criação de capacitâncias parasitas mais intensas entre a porcelana e os varistores. A formação de bandas secas (Fig. 27) contribui para intensificar ainda mais

essas capacitâncias parasitas, criando regiões de condução preferencial. (HARASYM et al., 1997).

Estudo de Defeitos

Com a finalidade de se analisar a influência dos defeitos mais comuns em pára-raios a ZnO sobre o seu perfil térmico, foram realizados alguns ensaios em laboratório. Nestes ensaios, os defeitos foram criados propositadamente em alguns pára-raios de ZnO doados pela Chesf e Eletrosul.

O primeiro grupo de ensaios foi realizado com pára-raios de 96 kV cedidos pela CHESF. Deve-se levar em conta que cada um dos pára-raios existentes no laboratório foi cedido pela CHESF por apresentar uma não conformidade técnica durante a sua operação, ou seja, cada um deles provavelmente já se apresenta com um ou mais defeitos dentre aqueles que se pretende simular. Um ensaio inicial foi feito com cada um deles com o intuito de se fazer o conhecimento das variáveis que serão analisadas. De posse destes dados, o pára-raios foi aberto e analisado na tentativa de se descobrir algum defeito visível. Só então, os defeitos simulados foram aplicados, sendo observadas as mudanças em cada uma das variáveis anteriormente analisadas.

Um segundo grupo de ensaios foi feito com alguns pára-raios doados pela ELETROSUL. Estes pára-raios, conforme verificado através do levantamento da curva característica, não apresentavam indícios de degradação elevada apesar de todos eles terem sido retirados de serviço por apresentar alguns pontos de quebra nas aletas de porcelana.

No total, foram ensaiados 5 pára-raios de 96 kV da SIEMENS, 1 pára-raios de 192 kV da Tridelta, 1 pára-raios de 550 kV da ASEA (dividido em dois módulos) e 2 pára-raios de 96 kV da Tranquel.

Defeitos simulados

Cada um dos defeitos citados foi inserido propositadamente nos pára-raios de teste através de artifícios como a criação de curtos-circuitos internos, a vedação precária proposital e a inserção de umidade no interior do equipamento. A seguir, pode ser vista uma breve descrição da criação de cada um destes defeitos.

Poluição

Neste caso, será analisada a poluição seca e a poluição úmida, analisando-se a variação nos padrões de imagem térmica de acordo com o grau de poluição. O ensaio de poluição úmida poderá ser realizado com a utilização de uma mistura salina a ser vaporizada sobre a coluna do pára-raios.

Distribuição de potencial

Neste ensaio será analisado o comportamento do pára-raios diante da distribuição irregular de tensão ao longo de sua coluna de varistores. Para isto serão utilizadas diferentes configurações de montagem com e sem anéis equalizadores. Em outra parte do ensaio, condutores metálicos serão utilizados para provocar o curto circuito em seções internas e externas do pára-raios a fim de se provocar uma alteração no campo elétrico que o envolve.

Perda de estanqueidade

Serão criados canais de comunicação abertos entre o meio interno e o meio externo possibilitando a saída de gases e troca de calor através do mesmo.

Umidade interna

O pára-raios será aberto e será borrifada água limpa sobre a coluna de varistores.

Varistor defeituoso

Um ou mais varistores de uma coluna serão submetidos a estresses elétricos através da aplicação de impulsos de corrente provocando a sua degradação de forma acelerada. Estes varistores serão repostos na coluna em posições pré-determinadas para a realização dos ensaios.

Deslocamento da coluna ativa

Este ensaio visa simular o deslocamento de elementos da coluna de varistores que pode acontecer devido a trepidações durante o transporte, ou a acomodação da coluna completa devido ao armazenamento inadequado do equipamento na horizontal.

Ensaio de caracterização

Para cada um dos pára-raios utilizados, foi feita uma análise do seu estado e comportamento elétrico antes de sua abertura, ou seja, no estado em que foram entregues ao laboratório. Para cada um deles foi feito o levantamento da curva característica, a análise térmica e a análise do estado da coluna de varistores.

A curva característica foi obtida através do procedimento padrão de aplicação de tensão e medição de corrente até um ponto próximo ao que corresponde ao limiar da região de baixa corrente do pára-raios. A análise térmica foi feita através da obtenção de imagens térmicas e levantamento do perfil de temperaturas na superfície do pára-raios.

A monitoração de pára-raios através de termografias fornece um perfil de temperaturas ao longo de toda a superfície externa do seu invólucro. A análise detalhada deste perfil térmico pode indicar que tipo de problema está ocorrendo com o pára-raios de acordo com a variação do perfil térmico em relação ao perfil apresentado por um equipamento em bom estado. Isto pode ser visto na Fig. 29 e na Fig. 30, nas quais são mostrados um pára-raios em bom estado e um pára-raios com perda de estanqueidade.

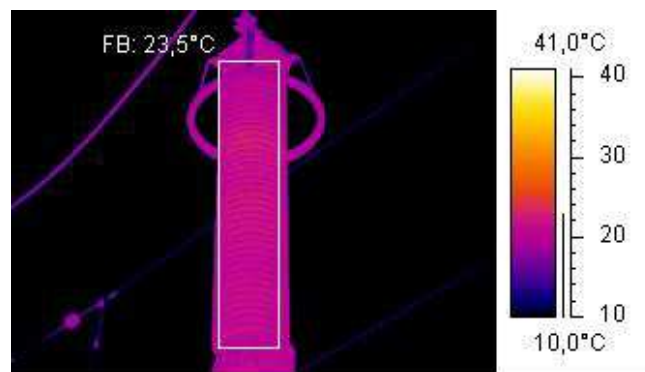


Fig. 29 – Termografia de um pára-raios em operação.

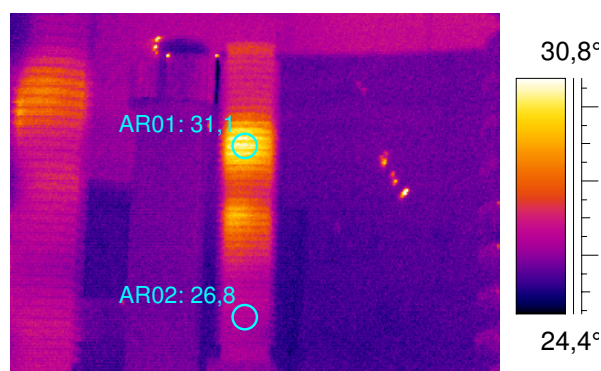


Fig. 30 - Termografia de um pára-raios defeituoso.

De modo geral, quando se disponibiliza alguns equipamentos para análise após sua retirada do sistema, ou quando são realizados ensaios de degradação e

envelhecimento, há uma série de defeitos cuja ocorrência é observada com mais frequência. Os mais comuns seriam a perda de estanqueidade, a degradação prematura dos varistores, a poluição externa, a presença de umidade interna e o desalinhamento da coluna de varistores. Além disso, o aquecimento anormal do pára-raios muitas vezes é também detectado como resultado da distribuição irregular de tensão ao longo do seu comprimento. Cada um dos defeitos citados apresenta causas e características bem definidas, de modo que é possível que as conseqüências por eles trazidas, na forma do aquecimento excessivo do pára-raios, sejam perceptíveis através da análise por termovisão.

Alguns dos pára-raios utilizados já apresentavam um grau elevado de degradação, como pôde ser verificado através do levantamento de suas curvas características (Fig. 32, pp. 74). Além disso, alguns deles já apresentavam algumas características defeituosas, as quais puderam ser registradas em foto e através do perfil térmico.

Para analisar o aquecimento do pára-raios é importante que se conheça a sua estrutura interna. A estrutura interna dos pára-raios Siemens utilizados pode ser observada na Fig. 31. A coluna interna do pára-raios é estruturada em varistores e espaçadores. No topo do pára-raios, devido à distribuição irregular de tensão, utiliza-se alternadamente um espaçador e um varistor, identificados por E1 a E5 e V1 a V4. Após esta parte, utilizam-se grupos de 10 varistores (G1, G2 e G3) separados por espaçadores. Deve-se lembrar ainda que os varistores são responsáveis pela absorção e dissipação de energia, de modo que é esperado nos ensaios que os conjuntos G1, G2 e G3 apresentem-se mais aquecidos do que o restante do pára-raios.

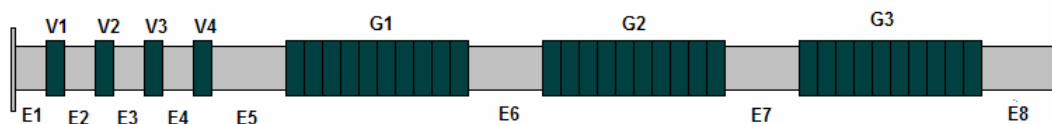


Fig. 31 - Esquema da estrutura interna do pára-raios SIEMENS.

Para o perfil de temperaturas, deve-se considerar que o ponto zero do comprimento corresponde ao topo do pára-raios. Para a criação dos gráficos foi considerada uma temperatura normalizada, ou seja, os valores mostrados nos gráficos correspondem aos valores de temperatura reais obtidos divididos pelo menor valor de

temperatura obtida para o equipamento em análise. Esta normalização se tornou necessária para criar uma padronização entre os valores dos gráficos facilitando a comparação dos mesmos, pois, durante a realização dos ensaios, não era possível ter o controle completo sobre a entrada de energia no equipamento.

Por fim, a análise dos varistores foi feita com a abertura do equipamento por meio da retirada de um dos seus terminais. Esta abertura seria necessária também para a inclusão de defeitos internos como será visto mais adiante.

Na Fig. 32 pode ser vista a curva característica para um pára-raios de 96 kV ensaiado antes de sua abertura. A curva característica indica degradação dos varistores, pois os valores de corrente são elevados mesmo para tensões bastante inferiores a tensão nominal, lembrando que, de acordo com os fabricantes, para tensão nominal do sistema, um pára-raios em bom estado apresenta um corrente de fuga de cerca de 1 mA, no máximo. É de se esperar, portanto, que este equipamento se apresente fora dos padrões necessários para sua utilização no sistema elétrico se analisado de acordo com os critérios definidos pelas empresas de transmissão de energia elétrica.

Para a análise de defeitos o ideal seria utilizar equipamentos novos, em perfeito estado de conservação e sem falha alguma. Como isto não é possível, é importante registrar com cuidado a imagem e o perfil térmico do equipamento para que qualquer alteração após a criação dos defeitos seja facilmente percebida. Para este equipamento, a imagem térmica apresenta três regiões bem definidas onde se pode perceber um maior aquecimento - Fig. 33. Estas regiões representam as regiões da coluna ativa onde há uma maior concentração de varistores e, conseqüentemente, uma maior geração de calor, conforme era esperado.

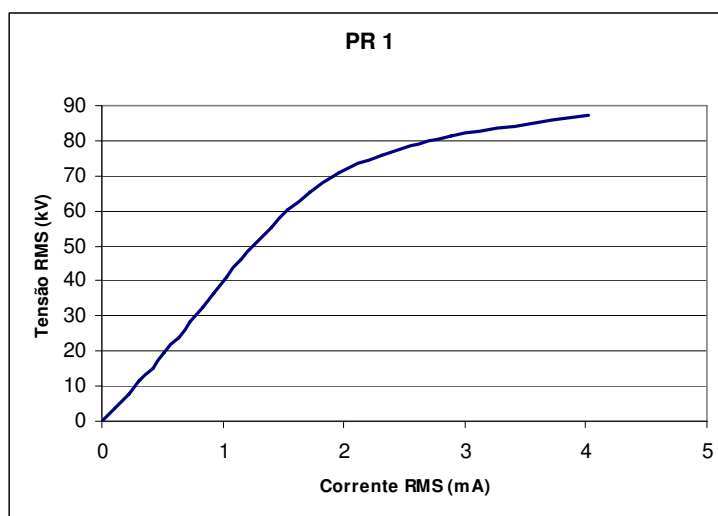


Fig. 32 - Curva característica para o pára-raios PR1.

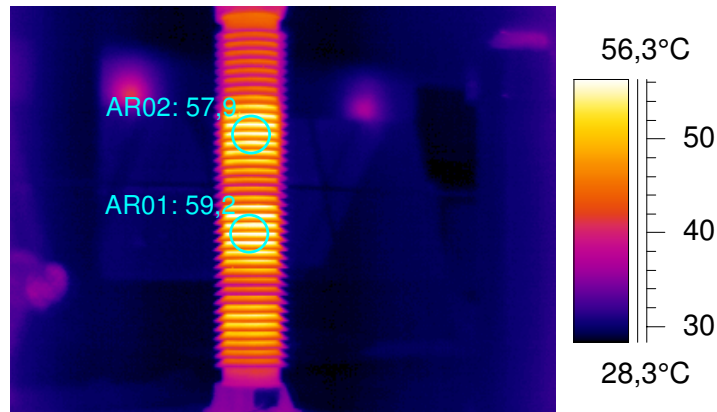


Fig. 33 - Imagem térmica para pára-raios PR1.

O perfil de temperaturas obtido, mostrado na Fig. 34, representa bem o resultado esperado a partir da imagem térmica, apresentando regiões de maior e menor aquecimento de acordo com a distribuição dos varistores ao longo da coluna. Como dito anteriormente, as regiões de maior aquecimento estão ligadas a uma maior concentração de varistores. Para o perfil de temperatura, percebe-se no gráfico gerado uma série de pontos de valor máximo e mínimo. Estas variações são justificadas pela presença das aletas na superfície de porcelana. Os pontos de máxima temperatura representam as regiões entre as aletas, enquanto que os pontos de mínima temperatura representam as extremidades das aletas.

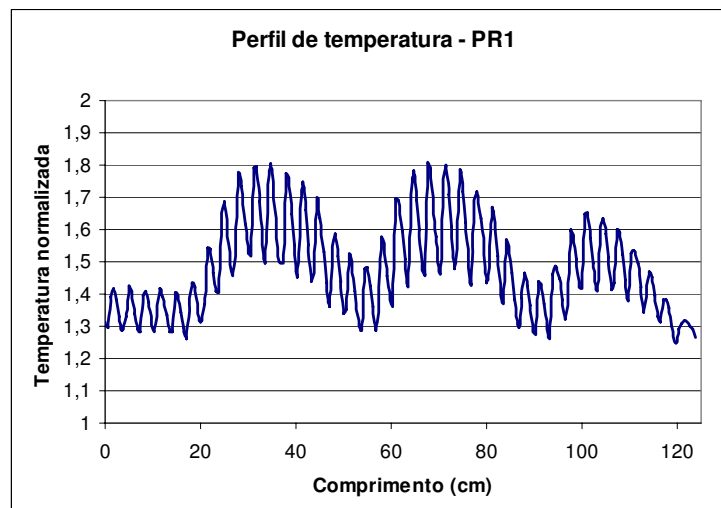


Fig. 34 - Perfil de temperaturas para o pára-raios PR1.

Neste pára-raios, boa parte dos varistores apresentava falhas no colar isolante, como mostrado na Fig. 35. É possível que esta falha, caracterizada pela formação de bolhas e desprendimento da camada superficial tenha sido causada por aquecimentos excessivos ou pela umidade, a qual levaria ao depósito de gotículas de água na superfície isolante ou até mesmo infiltração entre o colar isolante e o material semicondutor. Além disso, quando comparados com varistores dos outros pára-raios, estes apresentam uma coloração bem mais escura em suas laterais. Em um dos grupos de varistores há uma marca semelhante a um caminho formado por uma descarga elétrica. Tal marca pode ser vista na Fig. 36.



Fig. 35 - Degradação do isolamento lateral.



Fig. 36 - Marca de descarga elétrica.

Cada um dos pára-raios ensaiados passou pelo ensaio de caracterização e abertura, conforme mostrado para pára-raios PR1.

2. Ensaio de Defeitos

Cada um dos pára-raios foi submetido a uma série de inclusão de defeitos, conforme exemplificado para os pára-raios da Siemens a seguir. Procurou-se aplicar um mesmo tipo de defeito em vários pára-raios diferentes, aumentando a variabilidade das imagens térmicas. Além disso, cada um dos pára-raios foi submetido, em seqüência, a mais de um tipo de defeito, desde que o defeito aplicado anteriormente pudesse ser removido de modo a não tornar o equipamento inadequado para a realização de novos ensaios.

Defeito 1 – Curto-circuito interno sobre um único varistor.

Neste defeito, um anel de cobre envolve um varistor no topo do pára-raios provocando o seu curto-circuito (ver Fig. 37). Uma fotografia da montagem e as

termografias associadas para um dos pára-raios submetidos a este defeito podem ser vistas, respectivamente, na Fig. 38 - Fig. 40. Os perfis de temperatura antes e depois da inclusão do defeito são mostrados nas Fig. 41 e Fig. 42.

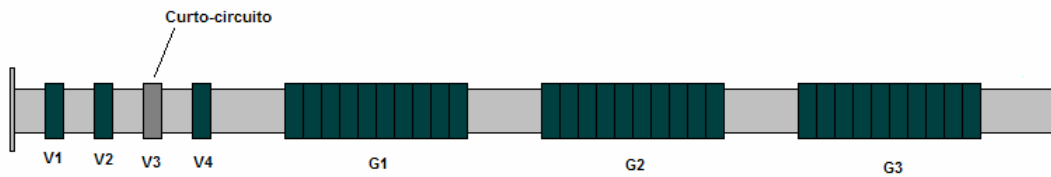


Fig. 37 - Diagrama esquemático para curto-circuito sobre um varistor.

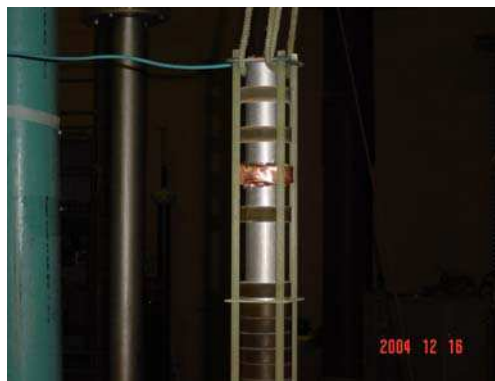


Fig. 38 – Curto-circuito interno.

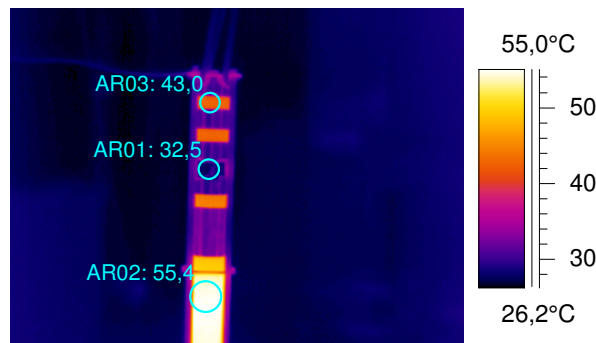


Fig. 39 - Imagem térmica da coluna interna do PR5 para defeito da Fig. 38.

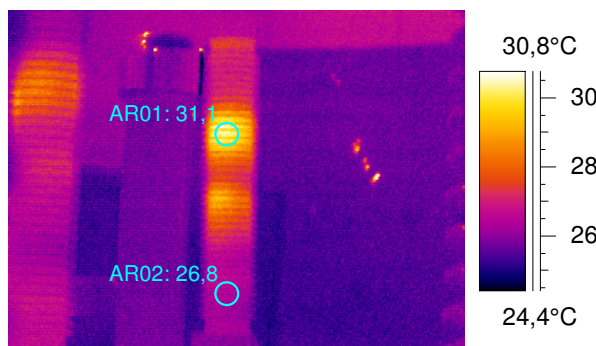
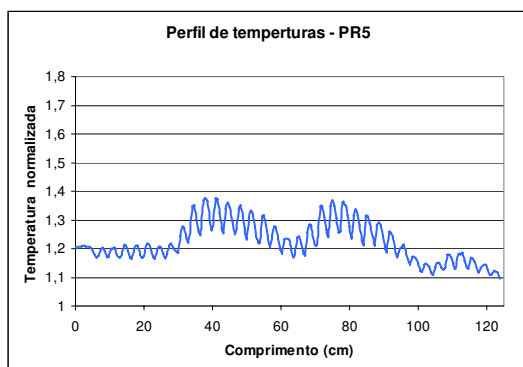
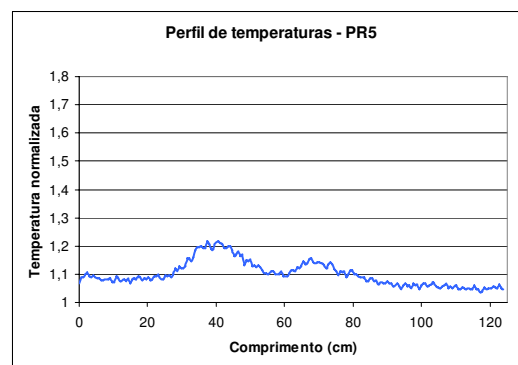


Fig. 40 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado com defeito**Fig. 41 - Perfil térmico antes do defeito****Fig. 42 - Perfil térmico com o defeito**

Com a criação do curto-circuito sobre o varistor, a corrente de fuga circula externamente, através do cobre. Deste modo, não há aquecimento por efeito joule devido à circulação de corrente através do varistor. Além disso, há uma redistribuição de potencial ao longo da coluna de varistores.

Neste caso, quando se compara as imagens térmicas da Fig. 39 e da Fig. 40, verifica-se que há uma redução na intensidade da temperatura nas primeiras aletas do pára-raios, além de uma queda de temperatura também no último grupo de varistores (G3).

Tal fato era esperado, já que, o varistor curto-circuitado não apresenta aquecimento significativo. A redistribuição de tensão ao longo dos demais varistores, faz com que haja um maior aquecimento nos demais elementos do pára-raios, sobretudo no grupo de varistores G1, pois este grupo provavelmente está suportando a maior solitação de tensão.

A primeira vista, essa redução de temperatura no topo do pára-raios pode passar despercebida. Entretanto, uma análise mais detalhada, com a observação das temperaturas a cada aleta, mostra que há realmente uma diferença nas intensidades das temperaturas nos dois casos. Além disso, a redução da temperatura pode também ser observada através da análise do perfil térmico mostrado na Fig. 42.

Defeito 2 – Curto-circuito sobre um conjunto de varistores.

Um fio de cobre é colocado na coluna de varistores de modo a provocar um curto-circuito sobre os dois primeiros varistores do conjunto. Uma foto da montagem, as respectivas imagens térmicas e os perfis de temperatura antes e depois da inclusão

dos defeitos para um dos pára-raios podem ser observados nas ilustrações mostradas em seguida (Fig. 43 a 48).

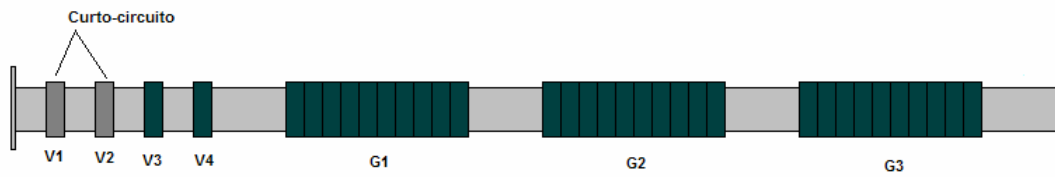


Fig. 43 - Diagrama esquemático para um curto circuito sobre os dois primeiros varistores da coluna ativa.



Fig. 44 – Curto-circuito sobre os dois primeiros varistores da coluna ativa.

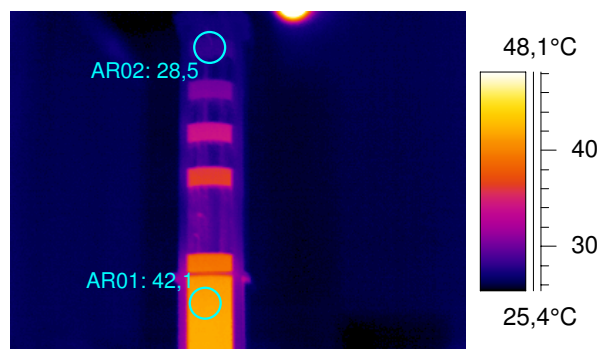


Fig. 45 - Imagem térmica da coluna interna do PR4 para defeito da Fig. 44.

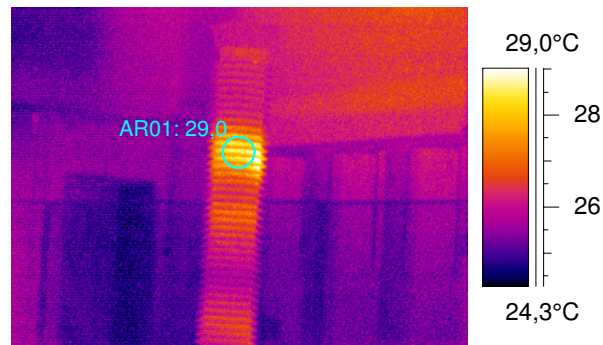


Fig. 46 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.

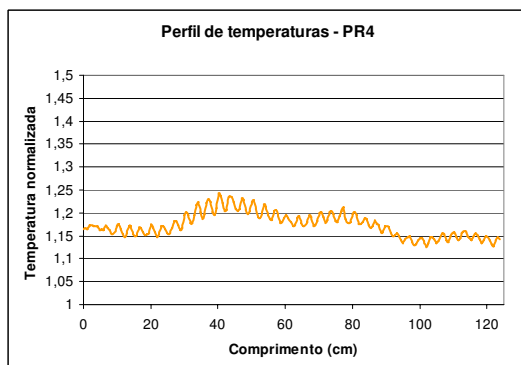


Fig. 47 - Perfil térmico antes do defeito.

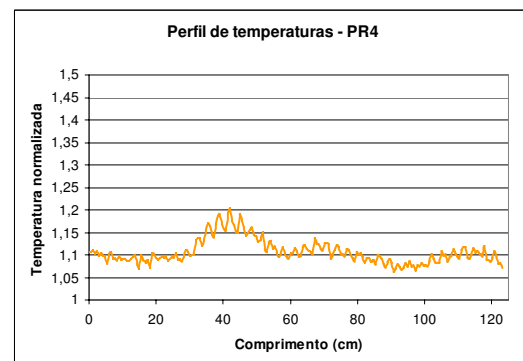


Fig. 48 - Perfil térmico com o defeito.

Neste caso, assim como para o Defeito 1, observou-se uma menor intensidade de temperatura no topo do pára-raios, o que corresponde à região onde o curto-circuito está localizado (V1 e V2). A explicação seria a mesma do caso anterior: redistribuição da tensão ao longo da coluna e redução do aquecimento por efeito joule na sua região superior. A região correspondente ao grupo G1 de varistores apresentou o maior aquecimento, o que pode ser explicado por uma maior concentração de campo neste grupo, devido à redistribuição de tensão provocada pelo curto circuito. Além disso, há a transferência de calor axial da região inferior para a região superior do pára-raios. A Fig. 48 evidencia melhor a dissipação de calor gerada por G1, apresentando um pico de temperatura na altura de G1.

Defeito 3 – Curto-circuito sobre varistores separados.

Nesta montagem utilizou-se papel alumínio para provocar o curto-circuito em dois varistores. Cada um dos varistores pertence a uma dos dois conjuntos intermediários de varistores da coluna ativa, conforme pode ser observado na Fig. 49 e Fig. 50.

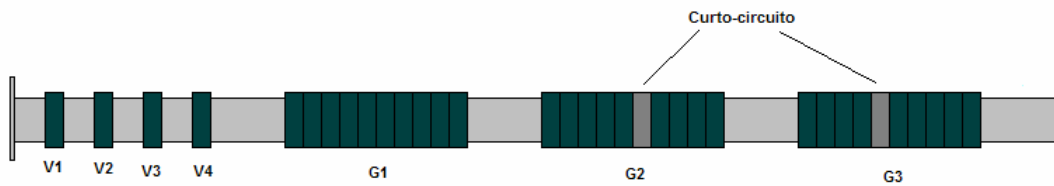


Fig. 49 - Diagrama esquemático.



Fig. 50 – Varistores com defeito.

Nas Fig. 51 a 54 são mostradas as imagens térmicas do pára-raios e os perfis de temperatura antes e depois da inclusão do defeito.

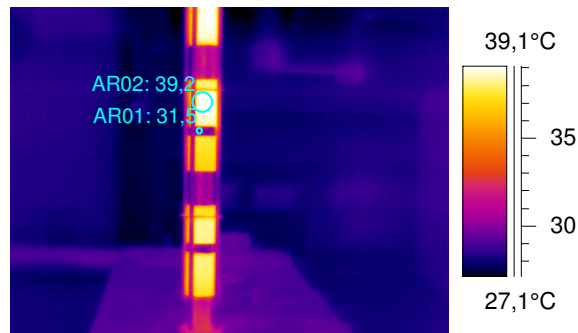


Fig. 51 - Imagem térmica da coluna interna do PR1 para defeito da Fig. 50.

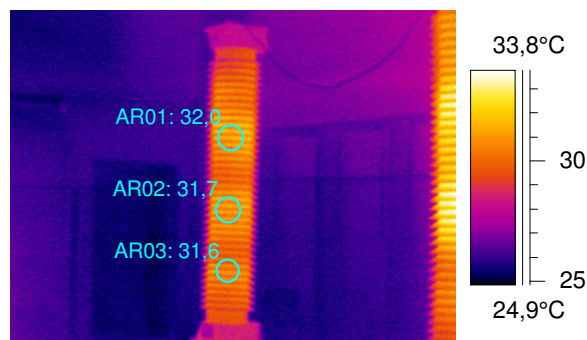


Fig. 52 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.

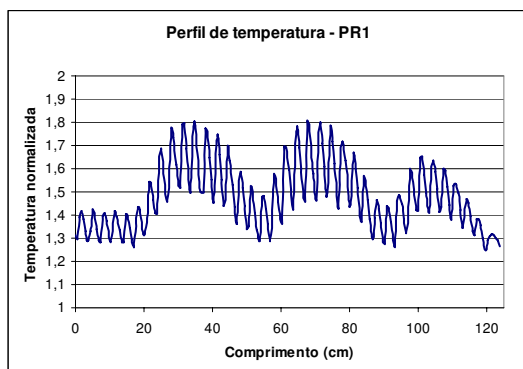


Fig. 53 - Perfil térmico antes do defeito.

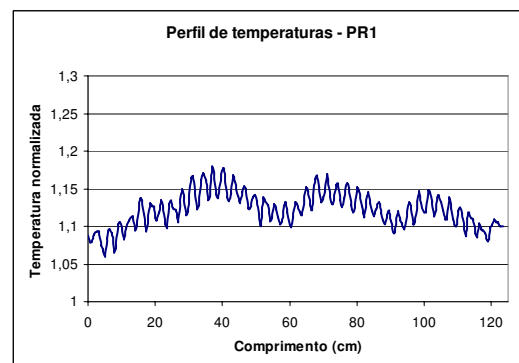


Fig. 54 - Perfil térmico com o defeito.

Neste caso, houve uma diminuição na diferença entre as temperaturas máximas e mínimas. Supõe-se que a existência de um curto circuito em varistores pertencentes aos G2 e G3, diminuiu o estresse sobre os mesmos redistribuindo-o sobre o restante da coluna. As regiões de aquecimento referentes aos grupos de varistores continuaram bem definidas, sendo facilmente distinguíveis através do perfil de temperatura. O grupo G1 continuou apresentando a maior temperatura, enquanto que o grupo G2 apresenta temperaturas menos intensas devido ao curto circuito. A taxa de crescimento da temperatura no topo do pára-raios evidencia uma difusão térmica mais acentuada para o terminal superior e/ou uma maior geração de calor pelos varistores V1, V2, V3 e V4 devido à nova distribuição de tensão.

Defeito 4 – Curto-circuito sobre conjunto de varistores subseqüentes.

Neste caso, utilizou-se também o papel alumínio para provocar o curto-circuito sobre dois varistores. A diferença em relação ao Defeito 3 é que os dois varistores estão juntos, conforme Fig. 55 e Fig. 56.

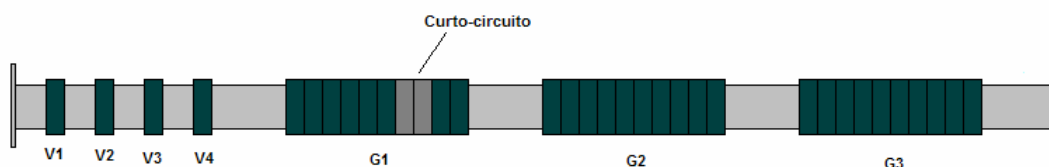


Fig. 55 - Diagrama esquemático.



Fig. 56 - Varistores subsequentes sob curto-circuito.

As imagens térmicas e perfis de temperatura podem ser vistos nas Fig. 57 a 60.

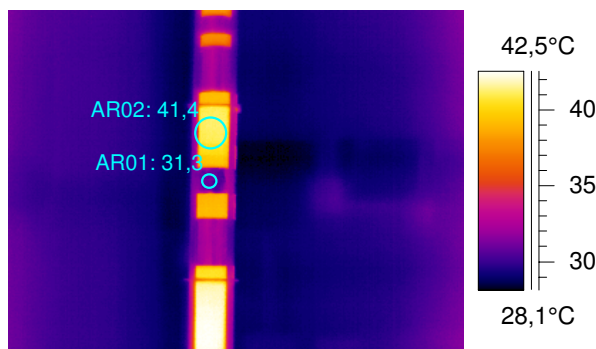


Fig. 57 - Imagem térmica da coluna interna do PR2 para defeito da Fig. 56.

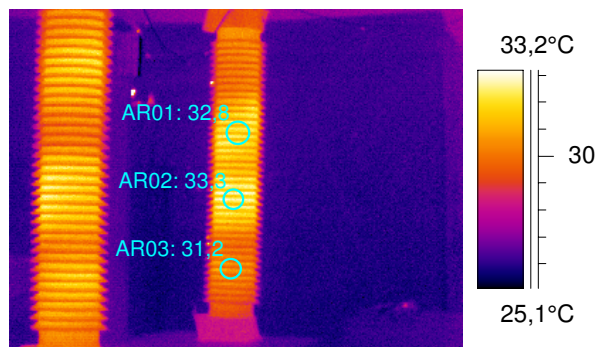


Fig. 58 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado

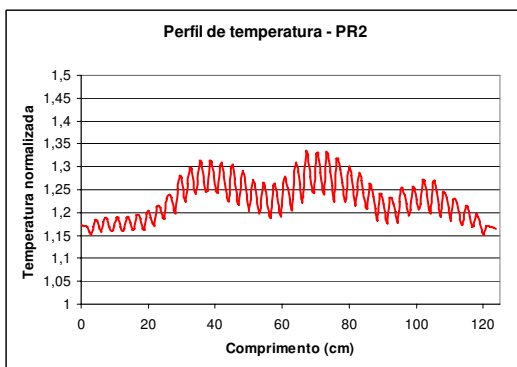


Fig. 59 - Perfil térmico antes do defeito

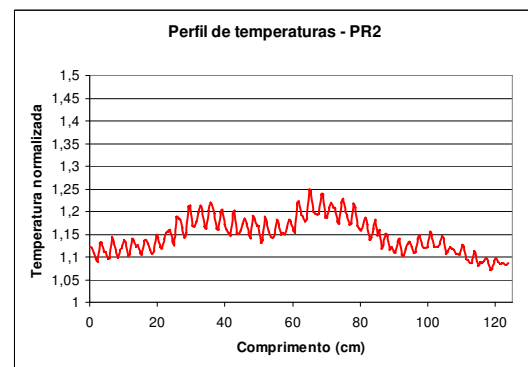


Fig. 60 - Perfil térmico com o defeito

Conforme indicado nos perfis de temperatura, há uma redução na diferença entre os máximos e mínimos de temperatura. Percebe-se também que a região referente ao grupo G1, onde se encontra o defeito, não se encontra bem definida, provavelmente em decorrência da diminuição de temperatura causada pelos varistores em curto-circuito, conseqüentemente pela redução da geração de calor, no local.

Defeito 5 – Varistor quebrado.

Neste caso, um varistor pertencente ao segundo conjunto de varistores da coluna ativa foi substituído por um varistor apresentando uma fissura na região mostrada na Fig. 61.

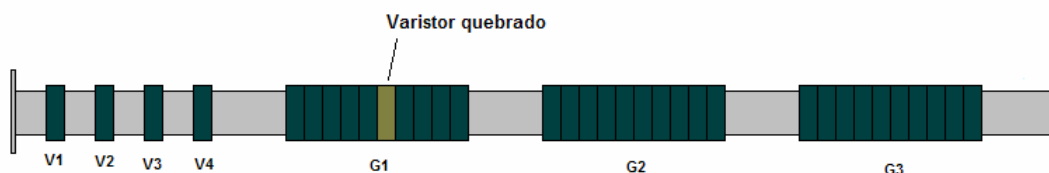


Fig. 61 - Diagrama esquemático do pára-raios com um varistor quebrado.

A imagem térmica do varistor defeituoso pode ser observada na Fig. 62. Conforme se pode observar na imagem térmica correspondente à coluna interna do pára-raios, não há variação significativa da temperatura na região do varistor quebrado. Entretanto, com o pára-raios fechado, percebe-se uma temperatura maior sobre a região do grupo G1, ao qual pertence o varistor quebrado. A Fig. 63 mostra a imagem térmica do pára-raios defeituoso, cujos aquecimento se evidencia comparando os perfis de temperatura mostrados nas Fig. 64 e 65, sendo possível, nesta última se perceber claramente um pico de temperatura na região do grupo G1. Tal aquecimento pode ser explicado pelo maior estresse elétrico sofrido pelo varistor quebrado o qual pode apresentar dificuldade para a condução de corrente e dissipação de calor.

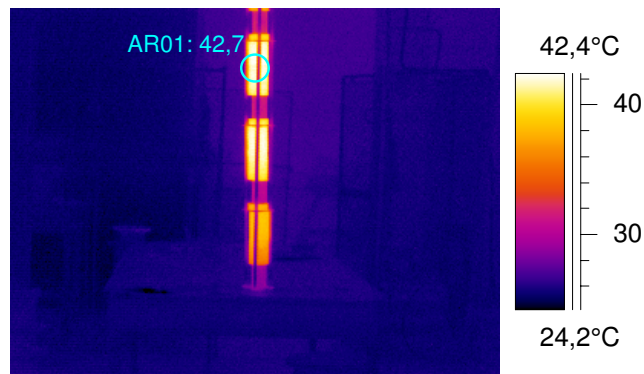


Fig. 62 - Imagem térmica da coluna interna do PR3 para um varistor quebrado.

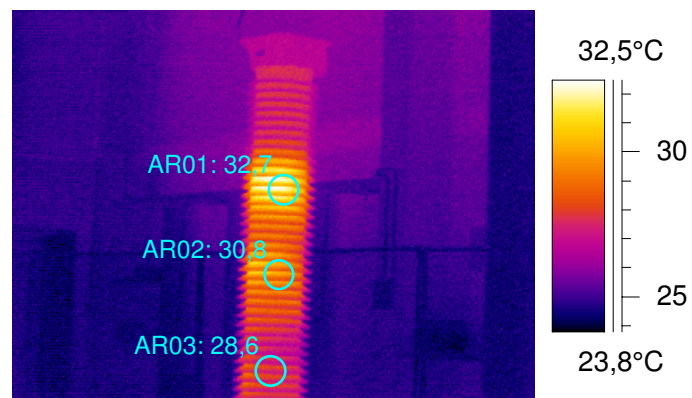


Fig. 63 - Imagem térmica obtida com o pára-raios fechado.

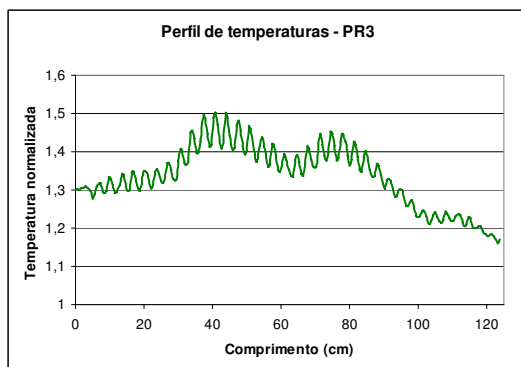


Fig. 64 - Perfil térmico antes do defeito.

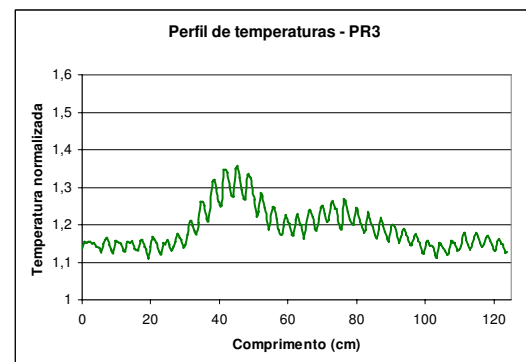


Fig. 65 - Perfil térmico com o defeito.

Defeito 6 – Perda de estanqueidade.

Os pára-raios foram propositadamente vedados de maneira precária com a finalidade de provocar perda de estanqueidade, permitindo a troca de gases com o exterior. Na Fig. 66 e na Fig. 67 é possível observar as imagens térmicas para os dois pára-raios. A Fig. 68 e a Fig. 69 mostram os perfis de temperatura antes e depois da

criação do defeito para o PR1, enquanto que os perfis para o PR2 podem ser vistos na Fig. 70 e na Fig. 71.

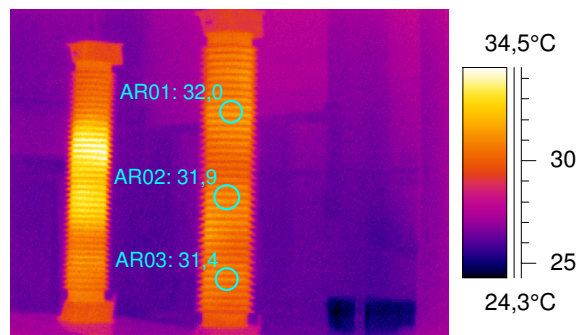


Fig. 66 - Imagem térmica para PR1 com perda de estanqueidade.

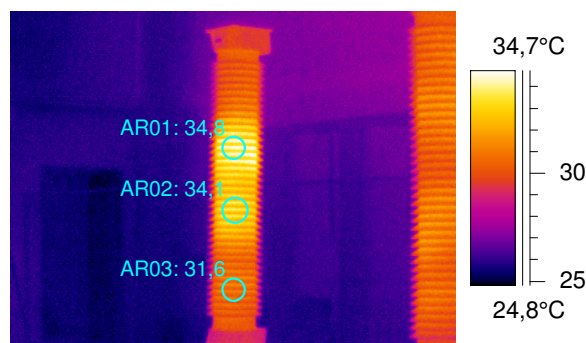


Fig. 67 - Imagem térmica para PR2 com perda de estanqueidade.

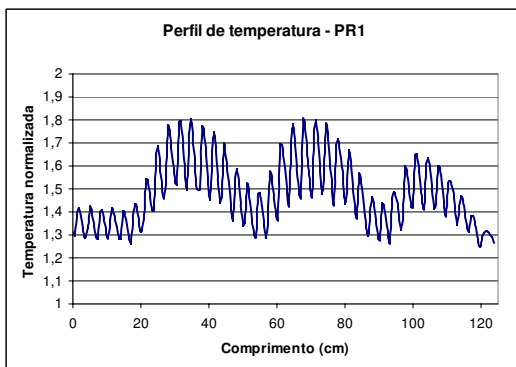


Fig. 68 - Perfil térmico antes do defeito.

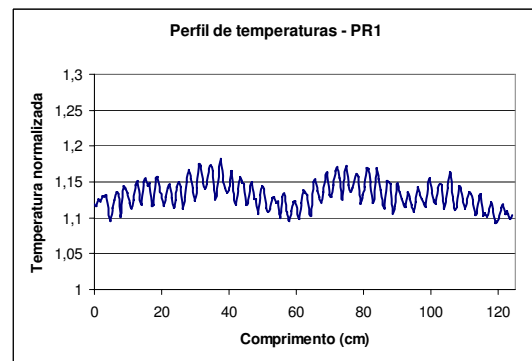


Fig. 69 - Perfil térmico com o defeito.

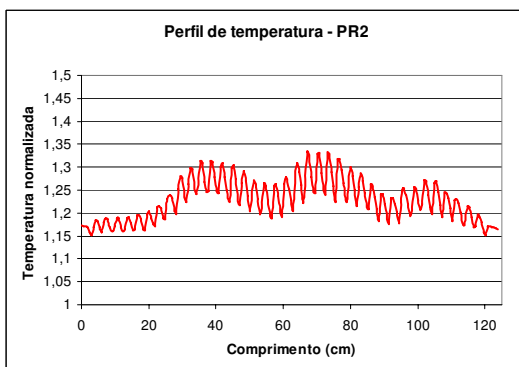


Fig. 70 - Perfil térmico antes do defeito.

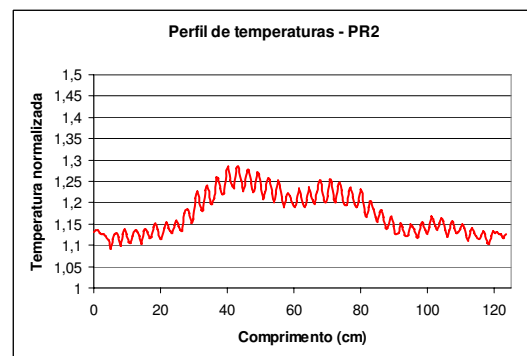


Fig. 71 - Perfil térmico com o defeito.

O principal efeito observado nas curvas de distribuição de temperaturas é a redução no valor dos picos de temperatura correspondentes as regiões de maior aquecimento (grupos de varistores). De modo que estas regiões de aquecimento perdem um pouco a sua distinção. Tal fato se explica pela circulação e troca de gases no interior do pára-raios, o que provoca uma perda mais rápida de calor por parte dos varistores, principalmente na região inferior.

Defeito 7 – Umidade interna.

Neste ensaio, água limpa foi borrifada sobre colunas internas dos pára-raios para simular a presença de umidade no interior do equipamento. Imagens térmicas para os dois pára-raios podem ser vistas na Fig. 72 e Fig. 73. Os perfis de temperatura antes e depois da inclusão dos defeitos são mostrados entre a Fig. 74 e a Fig. 77.

Analisando-se as imagens térmicas e os perfis de temperatura, percebe-se que efeitos distintos foram obtidos para os dois casos ensaiados. Em ambos os casos houve o surgimento de picos de aquecimento em algumas regiões. Para o PR4, houve um aumento significativo do aquecimento para a região sobre o grupo de varistores G1 e na região do terminal inferior. Para o pára-raios PR5, o aumento no aquecimento, embora pequeno, concentrou-se no terminal superior e na metade inferior do equipamento. Estas regiões sofreram este aumento de temperatura provavelmente devido à circulação de vapor e ao surgimento de descargas internas, como explicado anteriormente. É interessante destacar que, durante a realização destes ensaios, era possível distinguir o som de água em ebulição, o que indica a presença de um teor muito elevado de umidade no interior do equipamento, provavelmente bem maior do que o que seria possível encontrar em um pára-raios em operação.

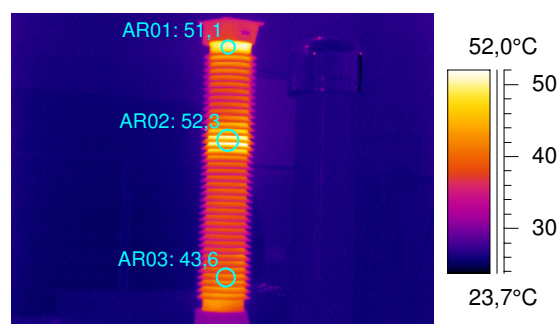


Fig. 72 - Imagem térmica para PR4 com umidade interna.

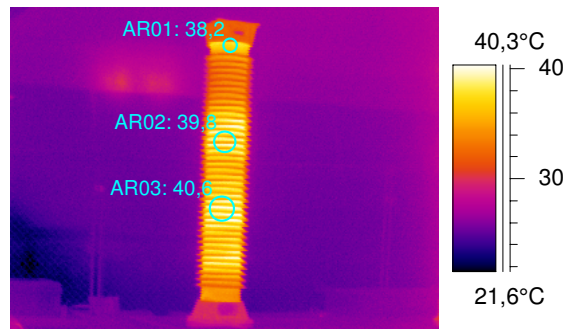


Fig. 73 - Imagem térmica para PR5 com umidade interna.

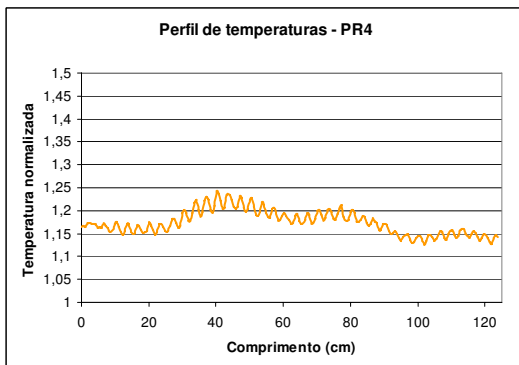


Fig. 74 - Perfil térmico antes do defeito.

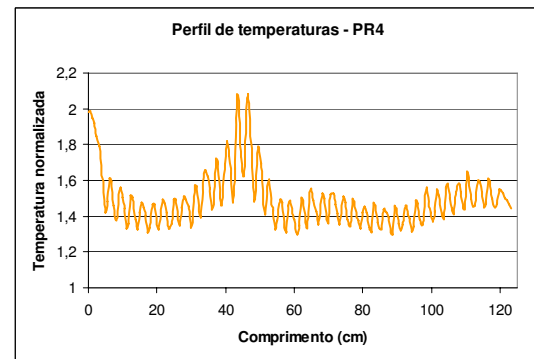


Fig. 75 - Perfil térmico com o defeito.

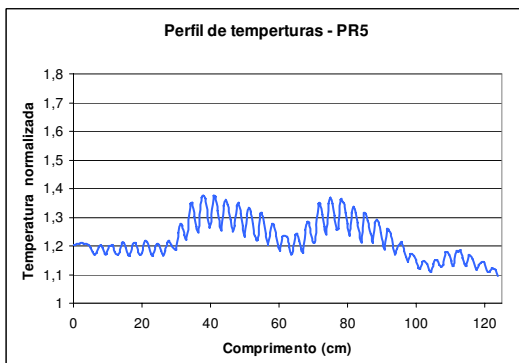


Fig. 76 - Perfil térmico antes do defeito.

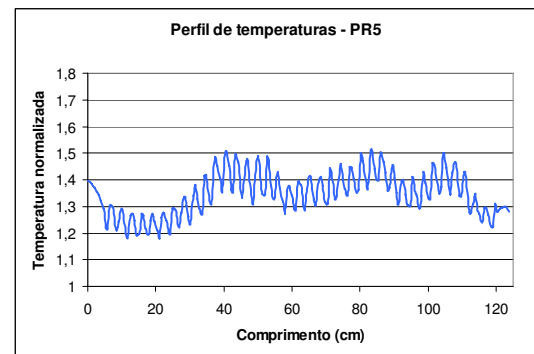


Fig. 77 - Perfil térmico com o defeito.

Defeito 8 – Desalinhamento da coluna ativa.

Os pára-raios tiveram alguns de seus varistores posicionados em desalinhamento com o restante dos elementos da coluna interna. Um diagrama dos varistores desalinhados pode ser visto na Fig. 78. A imagem térmica para o pára-raios defeituoso é mostrada na Fig. 79. Neste caso, através da imagem térmica não foi observada nenhuma

alteração significativa no perfil de temperaturas ao longo da coluna de porcelana do pára-raios, conforme comparação entre as Fig. 80 e Fig. 81.

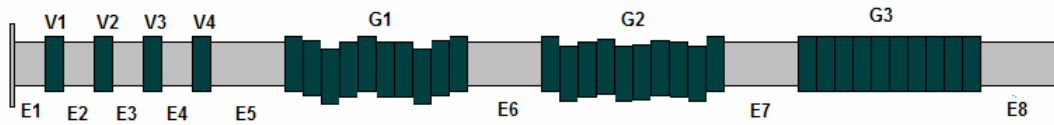


Fig. 78 – Coluna ativa com varistores desalinhados.

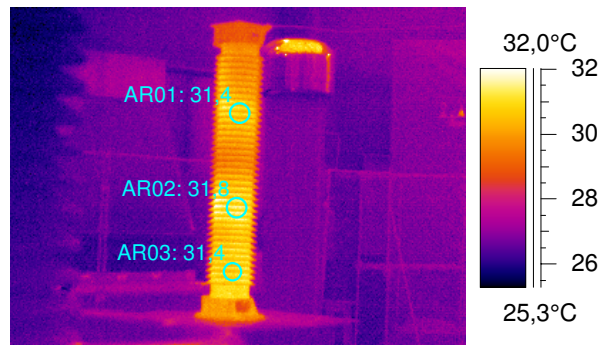


Fig. 79 - Imagem térmica para PR1 com defeito.

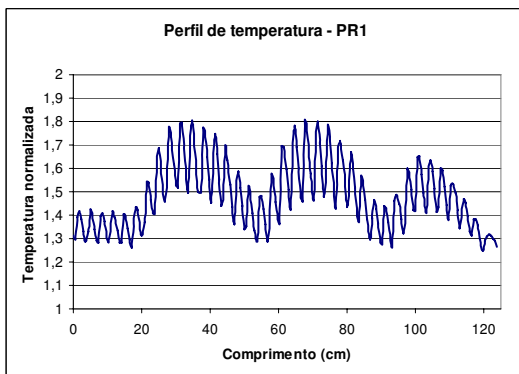


Fig. 80 - Perfil térmico antes do defeito.

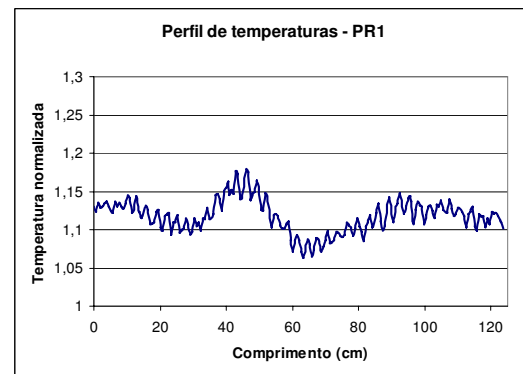


Fig. 81 - Perfil térmico com o defeito.

Já análise dos perfis de temperatura, vistos em seguida, mostra que houve uma alteração significativa na distribuição de temperatura, sobretudo na metade inferior do equipamento. As regiões correspondentes aos grupos de varistores G2 e G3 não apresentaram os picos de temperatura característicos, distinguindo-se apenas a região de pico para o grupo G1. Em compensação, entre os grupos G1 e G2 observa-se uma menor intensidade nos valores de temperatura medidos. Uma possível explicação seria a redistribuição de tensão ou a formação de canais de condução preferencial nas regiões

em que os varistores desalinhados fazem contato. Os varistores do topo da coluna e o grupo G1 sofrem os maiores estresses elétricos, além de receber o calor vindo dos grupos de varistores inferiores.

Defeito 9 – Poluição superficial.

Uma solução salina foi preparada e borrifada sobre os pára-raios simulando assim a presença de poluição mais severa sobre a porcelana dos equipamentos. A Fig. 82 mostra uma foto dos dois pára-raios cobertos por poluição salina. A Fig. 83 mostra uma descarga superficial a partir do terminal de alta-tensão do pára-raios PR2. Esta descarga provavelmente é resultante da presença de gotículas de solução salina nas proximidades do terminal. As imagens térmicas para os dois pára-raios defeituosos podem ser vistas na Fig. 84 e na Fig. 85.



Fig. 82 - Pára-raios PR4 e PR5 cobertos por poluição salina.



Fig. 83 – Descarga elétrica superficial em pára-raios coberto com poluição salina.

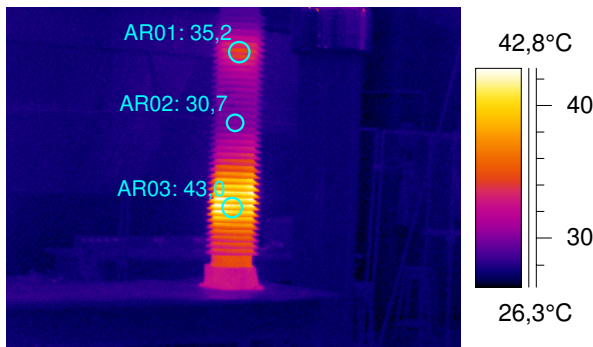


Fig. 84 - Imagem térmica para PR4 com defeito.

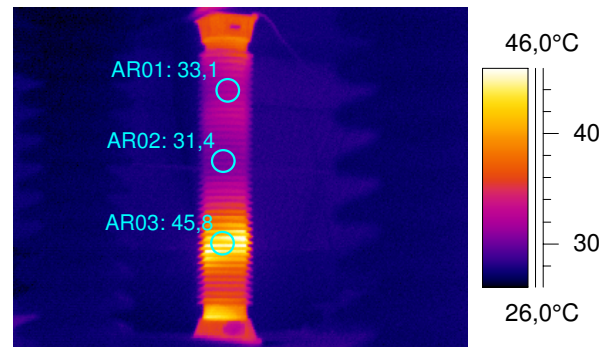


Fig. 85 - Imagem térmica para PR5 com defeito.

Conforme se pode observar nas imagens térmicas obtidas, ocorre um aquecimento maior nos terminais do pára-raios e na sua porção inferior. Havendo ainda um baixo aquecimento na metade superior da coluna de porcelana, quando comparada a sua metade inferior.

Os perfis de temperatura analisados (Fig. 86 a 89) comprovam as observações feitas visualmente através das imagens térmicas. É possível que a poluição tenha se concentrado na parte inferior do pára-raios provocando descargas parciais nesta região. Tal fato pode ser observado nos gráficos de perfil de temperatura mostrados a seguir. Uma outra possibilidade é a ocorrência de uma corrente superficial elevada na parte superior do pára-raios a qual, a partir de uma determinada altura do equipamento, migra através do invólucro para a coluna de varistores, fazendo com que esta região apresente um maior aquecimento quando comparada com a metade superior do pára-raios. Em ambos os casos, este foi um dos defeitos simulados a apresentar a maior variação no padrão de temperatura perceptível tanto através da termografia quanto através do perfil térmico. Além disso, a caracterização deste defeito foi bastante precisa, distinguindo-se facilmente a alteração térmica provocada.

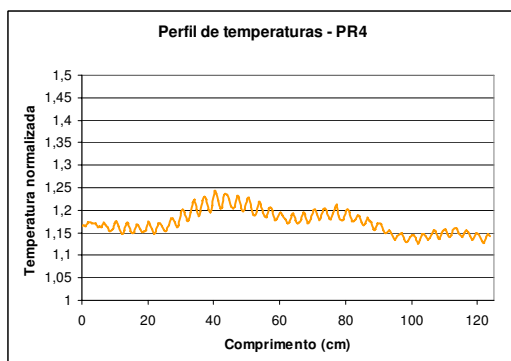


Fig. 86 - Perfil térmico antes do defeito.

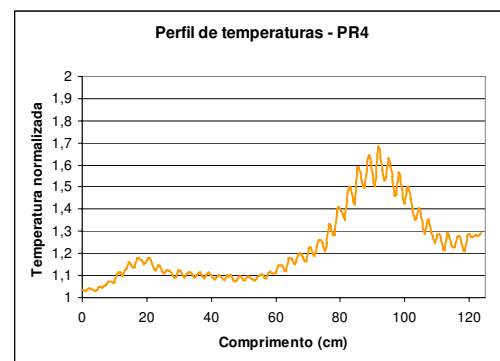


Fig. 87 - Perfil térmico com o defeito.

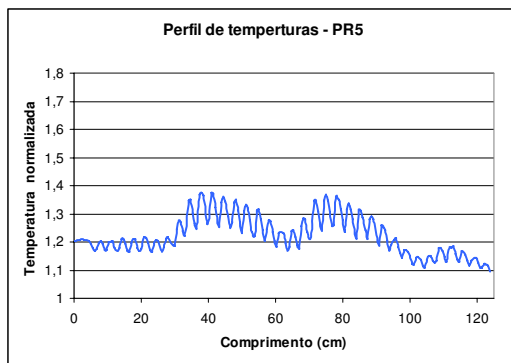


Fig. 88 - Perfil térmico antes do defeito.

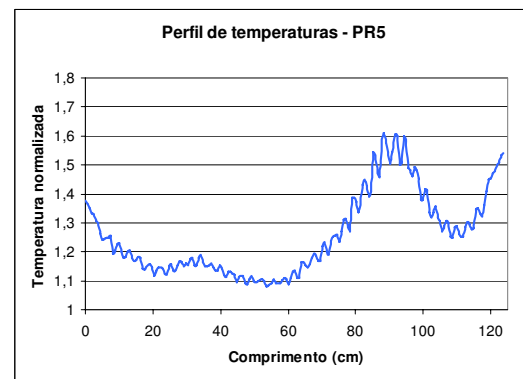


Fig. 89 - Perfil térmico com o defeito.

3. RNA desenvolvida

Com base no que foi discutido anteriormente, foi construída uma RNA do tipo perceptron com uma camada oculta e aprendizagem baseada no algoritmo de retropropagação de erro.

Os dados utilizados para alimentação da RNA foram obtidos por meio de uma busca no banco de dados da Chesf através do sistema TermoSis, utilizado para armazenamento e emissão de relatórios técnicos para inspeções térmicas em todo o sistema Chesf. Além disso, foram realizados, em laboratório, ensaios com pára-raios cedidos pela Chesf para enriquecimento do banco de dados, de modo que um conjunto inicial de 60 imagens térmicas foi criado. Este conjunto foi incrementado, posteriormente, com a realização dos ensaios de defeitos, de modo que um banco de dados com um total de 150 imagens térmicas contemplando pára-raios em bom estado e apresentando os mais variados defeitos foi criado. De cada imagem térmica obtida, foi feito um gráfico do perfil de temperaturas ao longo do pára-raios através da obtenção dos valores de temperatura na imagem. Estes mesmos valores de temperatura utilizados para a criação dos gráficos foram utilizados como entradas da RNA.

Inicialmente, foi criada uma RNA para o processamento de todos os pontos do perfil de temperatura, sem a seleção dos pontos de temperatura máxima. Esta rede inicial serviu para testar o objetivo aqui proposto, identificando, entre as imagens térmicas aquelas que indicavam algum tipo de falha no pára-raios. Esta RNA inicial apresentou uma estrutura contendo 120 entradas, as quais correspondem a uma seqüência de 120 pontos de temperatura obtidos a partir do perfil de temperaturas, e duas saídas, indicando se o pára-raios estava ou não apresentando algum problema. Apenas uma camada oculta foi utilizada, contendo quatro neurônios. Este número de neurônios ocultos foi escolhido após uma série de testes feitos com um número maior de neurônios na camada oculta a fim de se verificar o número mais adequado.

Este algoritmo inicial para processamento dos perfis de temperatura foi criado de maneira bastante simplificada utilizando a linguagem FORTRAN, a qual foi escolhida por sua robustez, simplicidade de programação e eficiência matemática. Todo o processo utilizado para o desenvolvimento final da RNA pode ser visto a seguir:

Parte 1: Criação do banco de dados

i – Obtenção de imagens térmicas de pára-raios sem defeitos;

ii – Criação de defeitos em pára-raios pré-selecionados e obtenção das respectivas imagens térmicas;

iii – Criação dos perfis de temperatura com base na obtenção dos pontos de temperatura ao longo do comprimento do invólucro do pára-raios;

Parte 2: Treinamento da RNA

i – Programação da rede neural: escolha do número de neurônios ocultos, número de entradas, número de saídas, algoritmo de aprendizagem.

ii – Treinamento da rede: 70% dos dados disponíveis serão utilizados para treinamento da rede. É importante que este conjunto de dados possua a maior variedade possível de diferentes casos.

iii – Processamento dos sinais de entrada e cálculo do erro no sinal de saída.

iv – Ajuste dos pesos sinápticos de acordo com o erro calculado;

v – Repetição dos passos iii e iv até que o número máximo de iterações seja atingido ou até que o erro atinja o valor mínimo estabelecido.

Parte 3: Teste da RNA

i – Utilização dos 30% restantes dos casos existentes no banco de dados para testar a eficiência e exatidão da rede neural treinada.

ii – Processamento dos sinais de entrada e comparação com os resultados esperados;

iii – Cálculo do percentual de acertos;

iv – Mudança de estrutura: Caso a rede não tenha um desempenho satisfatório, fazer a mudança de parâmetros estruturais, tais como número de neurônios ocultos, e número de iterações.

Um fluxograma de todo o processo pode ser visto nas Fig. 90 e Fig. 91 a seguir.

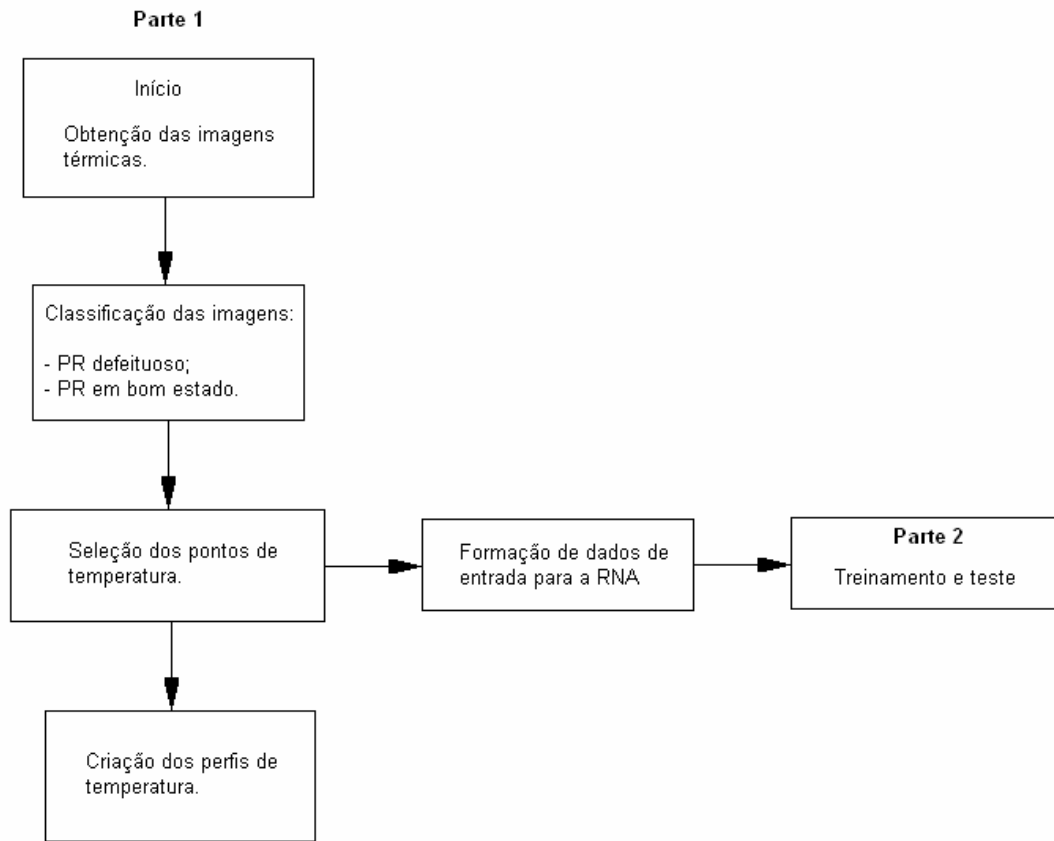


Fig. 90 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 1.

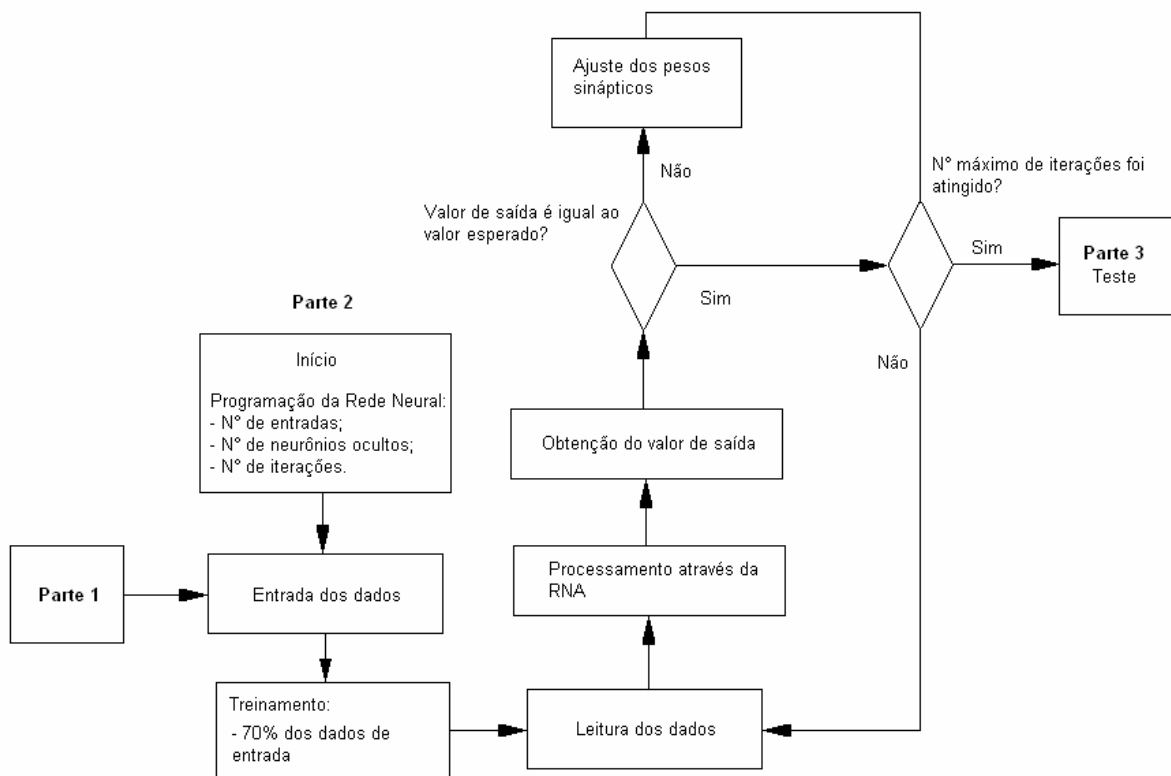


Fig. 91 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 2.

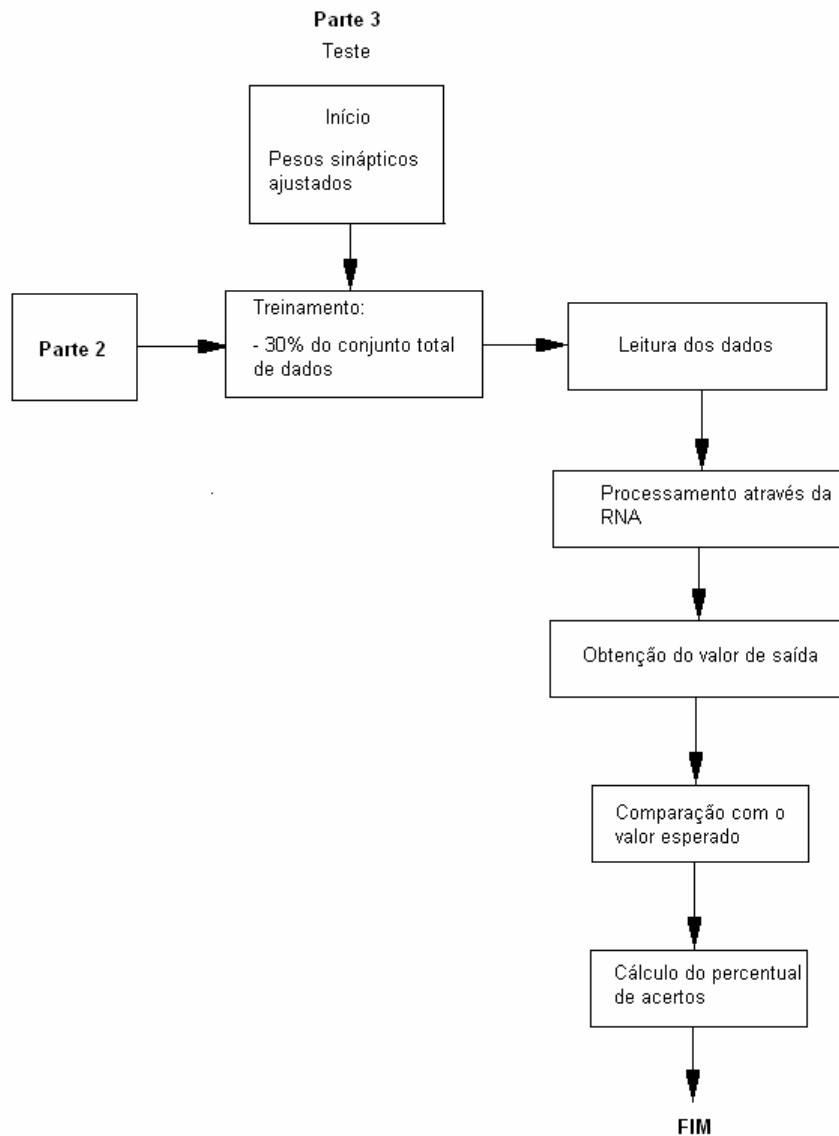


Fig. 92 - Fluxograma para o algoritmo de análise de imagens térmicas – Parte 3.

Com base no primeiro algoritmo desenvolvido, um segundo algoritmo foi criado considerando uma seleção dos pontos de maior aquecimento nos perfis de temperatura. Esta nova rotina de processamento seguiu os mesmos passos da rotina anterior, sendo que a única diferença foi a redução do número de pontos na entrada da rede neural, já que agora apenas os pontos de temperatura máxima foram considerados. Esta nova rede neural apresentou uma estrutura com 39 entradas, correspondentes aos 39 pontos de temperatura máxima obtidos no perfil de temperaturas. Para a camada oculta, foram testadas configurações com 4, 8 e 16 neurônios ocultos.

Com a chegada dos pára-raios doados pela ELETROSUL, uma nova série de ensaios foi realizada, tomando por base os mesmos procedimentos de avaliação e testes adotados anteriormente para o primeiro grupo de pára-raios. Com a realização destes

ensaios, o banco de dados foi aumentado para 409 padrões. É interessante observar que devido as diferentes estruturas apresentadas pelos pára-raios de fabricantes diversos a rede neural artificial deverá ser capaz de fazer a generalização da padronização térmica extraindo características que sejam comuns em todos os modelos de pára-raios apresentados.

Com o aumento do banco de dados, diversas configurações de redes neurais foram testadas utilizando o as rotinas existentes no Matlab, com a finalidade de se obter os melhores resultados para classificação dos padrões existentes no banco de dados.

CAPÍTULO 5

- RESULTADOS OBTIDOS -

Conforme visto anteriormente, a imagem térmica de um pára-raios permite a construção de um perfil gráfico das temperaturas ao longo do seu invólucro externo. O gráfico obtido diretamente a partir da imagem térmica apresenta um número elevado de pontos em torno de 120, correspondente a todos os pontos existentes no perfil de temperaturas. Além disso, o perfil do invólucro, com suas aletas, gera uma série de oscilações com pontos de máxima e de mínima temperatura, correspondentes às regiões entre as aletas e as suas extremidades. Um exemplo deste gráfico pode ser visto na Fig. 93.

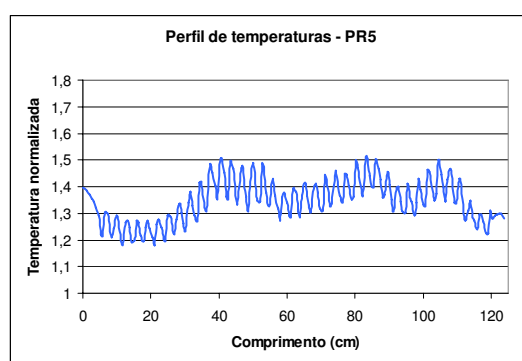


Fig. 93 - Perfil de temperaturas para um pára-raios.

Inicialmente, foi criada uma rede neural simples do tipo perceptron, com aprendizagem baseada no algoritmo de retropropagação, contendo 120 neurônios (todos os pontos do perfil de temperaturas) na entrada. Após alguns testes detectou-se que um número de 4 neurônios em uma camada oculta seriam suficientes. Para esta rede neural, foi utilizado um banco de dados contendo 60 exemplos de perfis de temperatura completos (todos as imagens térmicas existentes até então), como os da Fig. 93, baseados em imagens térmicas. Este banco de dados contemplava exemplos de pára-raios em campo e em laboratório. Esta rede neural, um perceptron, foi utilizada apenas para classificar os pára-raios entre defeituosos e não-defeituosos, o que constitui uma separação simples e evidente em dois hiperplanos distintos, como é necessário para uma classificação adequada por parte de um perceptron.

A RNA desenvolvida apresentou um índice de 89% de acerto, sendo que um conjunto de 60 exemplos foi utilizado (70% dos exemplos para o treinamento e 30% para o teste). Em um conjunto utilizado de 18 exemplos para teste, este resultado indica

que 2 dos pára-raios foram classificados erroneamente. Um número maior de exemplos de treinamento e teste, contemplando uma maior variedade de padrões térmicos, provavelmente resultaria em um erro percentual menor.

Na análise térmica, entretanto, o principal aspecto a ser observado é a presença de temperaturas muito elevadas, as quais representam um indicativo de falha. Isto porque falhas no pára-raios geralmente resultam em aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, aquecimento por efeito joule. Por isto, no levantamento gráfico, uma adaptação que pode ser feita é a suavização da curva e a redução do número de pontos através da seleção dos pontos de maior temperatura. Tal seleção, não apresenta prejuízos para o processamento da RNA construída para a análise térmica porque os pontos de principal interesse estarão presentes. Além disso, a curva mantém o mesmo perfil apresentado anteriormente, mas sem as oscilações. Um exemplo disto está na Fig. 94 onde está apresentado o mesmo gráfico do perfil térmico da Fig. 93 depois da seleção de pontos. As imagens, assim padronizadas, apresentam 39 pontos, correspondentes aos máximos locais do perfil de temperaturas.

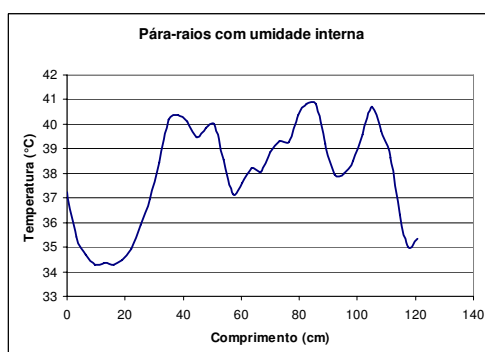


Fig. 94 - Perfil de temperaturas da Fig. 93 após uma seleção de pontos de máximo.

Com base na rede neural inicial, foi desenvolvida uma nova rede neural com o intuito de, além de indicar a presença de falhas, indicar também o tipo mais provável de falha. Para esta nova RNA passou-se a utilizar o conjunto selecionado de pontos como exemplificado na Fig. 94, de modo que o número de entradas que era de 120 pontos, sem a seleção, passou a ser de apenas 39 pontos. Com isso, esperava-se fazer uma classificação com um maior número de acertos, já que a rede agora processa apenas os pontos de real interesse. O número de saídas planejado foi de 8: uma saída indicando se há ou não defeito, 6 saídas indicando cada um dos defeitos mais comuns, e uma última saída indicando algum defeito que não pôde ser identificado.

A nova rede neural foi inicialmente estruturada apenas com duas saídas, indicando a existência ou não de algum problema. Ao contrário do esperado, esta nova rede apresentou um percentual menor de acerto. Classificando corretamente entre defeituosos e não-defeituosos apenas 45% dos exemplos analisados. É possível que a redução no número de pontos, através da qual se pretendia melhorar o desempenho da rede no que diz respeito à rapidez, tenha piorado o desempenho geral, já que o número de variáveis disponíveis para processamento se tornou menor. Ou seja, ao que tudo indica, os pontos intermediários entre os pontos de máxima e mínima temperatura não são desprezíveis, como se imaginava.

Mudanças na estrutura da rede, no sentido de se aumentar o número de camadas ocultas ou o número de iterações, foram realizadas no intuito de melhorar o desempenho sem que houvesse progresso. Uma nova tentativa foi feita, usando-se desta vez os pontos de máximo e mínimo locais dos gráficos de perfil de temperatura, passando-se a utilizar agora 77 pontos de temperatura como entrada da RNA. Houve uma melhoria de modo que o percentual de acerto subiu para 70%, não sendo ainda satisfatório.

Como o desempenho da rede não foi satisfatório para a classificação em apenas dois grupos distintos, não foi testada a estrutura planejada com 6 saídas indicando diferentes defeitos, já que esta classificação um pouco mais complexa envolve a separação dos exemplos de entrada e conjuntos que, muitas vezes, não são facilmente distinguíveis, já que alguns dos defeitos apresentam características semelhantes.

Uma nova abordagem foi estabelecida com base na utilização de um algoritmo de aprendizagem mais eficiente e, ainda assim, apresentando uma estrutura simplificada. Dessa forma, passou-se a utilizar o algoritmo *resilient propagation* como algoritmo de aprendizagem para a RNA. Além disso, o conjunto de dados para análise foi incrementado com a realização dos novos ensaios de modo que agora uma avaliação mais criteriosa poderá ser feita a respeito dos resultados obtidos pela rede.

Para o novo conjunto de dados, observada a variação entre os modelos de pára-raios utilizados, preferiu-se obter os perfis de temperatura com 200 pontos, os quais correspondem às entradas da RNA. Foram utilizados 255 padrões para o treinamento e 154 padrões para testar a rede treinada. Várias configurações foram testadas, sendo que o melhor resultado apresentado foi para uma rede neural contendo 3 camadas ocultas, cada uma com 16 neurônios.

Um teste inicial com esta nova rede, treinada para indicar apenas a existência ou não de defeitos classificou erroneamente apenas um dos padrões de testes, o que resulta

em um erro de apenas 0,65%. É interessante perceber que o padrão para o qual a rede apresentou o erro, mostrado na Fig. 95, não indica grandes variações de temperatura. Sabe-se que há um defeito porque o mesmo foi criado, entretanto, este defeito não foi suficiente para apresentar alteração significativa no padrão térmico.

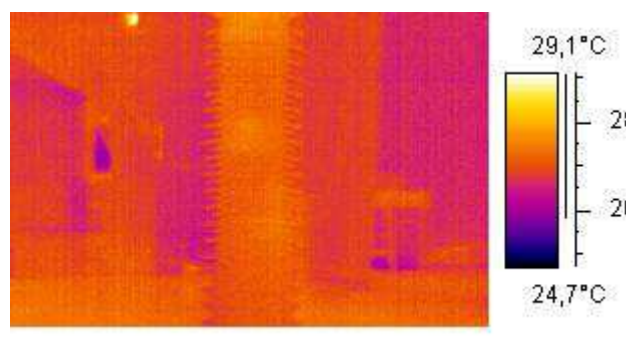


Fig. 95 – Imagem térmica classificada erroneamente.

Um novo treinamento foi realizado, agora com a rede apresentando um tipo de saída para cada defeito classificado: poluição externa, umidade, estanqueidade, varistor danificado, curto circuito interno. A rede treinada desta forma classificou erroneamente 60 dos padrões presentes no conjunto de teste, o que corresponde a um erro de 39%, o que pode ser considerado bastante alto. Tal índice de erros se justifica pelas diferenças estruturais existentes entre os pára-raios ensaiados e pela semelhança existente entre os perfis de temperatura para alguns defeitos. Neste caso, uma alternativa é o agrupamento dos defeitos que apresentem resultados semelhantes entre si. Por exemplo, perda de estanqueidade, poluição externa e umidade seria um grupo de defeitos. Varistor quebrado e curto circuito interno, corresponderiam a um segundo grupo de defeitos. A rede modificada forneceu um índice de erro de 22%, representando uma melhoria em relação ao caso anterior.

No intuito de melhorar o índice de acertos considerando a classificação em diferentes grupos de defeitos, foi realizado um novo treinamento considerando apenas um tipo de pára-raios. Neste caso, foram utilizados apenas os padrões referentes aos pára-raios de 96 kV da Siemens, já que este pára-raios disponibiliza o maior número de ensaios. O novo treinamento reduziu significativamente o índice de erros em relação ao caso anterior, obtendo-se um percentual de erro de 11% na classificação de acordo com o tipo de defeito.

Observa-se que é possível fazer a classificação desejada, no entanto é imprescindível que se obtenha um conjunto de treinamento significativo para cada tipo diferente de pára-raios sob análise. Isto porque, conforme observado durante os ensaios, diferentes fabricantes utilizam-se de diferentes estruturas físicas para a construção de seus pára-raios, sendo estas estruturas responsáveis pela maneira como o perfil térmico é detectado externamente.

Um aspecto a ser observado é o fato de que a classificação de acordo com o tipo de defeito não é imprescindível para o monitoramento dos equipamentos em uso em subestações, sendo suficiente a indicação ou não de defeito. No entanto, a indicação do tipo de defeito se torna uma informação auxiliar na medida em que é possível ter conhecimento das principais vulnerabilidades dos pára-raios em diferentes regiões ou mesmo diferentes subestações. Além disso, esta informação se tornaria valiosa também para os fabricantes na medida em que seria possível melhorar a estrutura ou o processo de fabricação dos pára-raios no intuito de se reduzir a incidência de determinado tipo de defeito.

Na Tabela 1 podem ser visto um resumo das principais abordagens utilizadas no treinamento das redes neurais e os resultados obtidos na classificação dos padrões.

Tabela 1 - Resumo dos resultados obtidos.

Rotina	Resumo – Características e resultados obtidos
1	<p>Perceptron:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 120 entradas (todos os pontos de temperatura); - 1 camada oculta; - 4 neurônios na camada oculta; - Algoritmo <i>Backpropagation</i>; - Banco de dados com 60 padrões. <p>Resultado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 89% de acerto, classificando de acordo com a existência ou não de defeitos.
2	<p>Perceptron:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 39 entradas (pontos de temperatura máximos locais); - 1 camada oculta; - 4 neurônios na camada oculta; - Algoritmo <i>Backpropagation</i>; - Banco de dados com 60 padrões. <p>Resultado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 45% de acerto, classificando de acordo com a existência ou não de defeitos.
3	<p>Perceptron:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 77 entradas (pontos de temperatura máximos e mínimos locais); - 1 camada oculta; - 4 neurônios na camada oculta; - Algoritmo <i>Backpropagation</i>; - Banco de dados com 60 padrões. <p>Resultado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 70% de acerto, classificando de acordo com a existência ou não de defeitos.
4	<p>Perceptron:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 200 entradas (todos os pontos de temperatura); - 3 camadas ocultas; - 16 neurônios em cada camada oculta; - Algoritmo <i>Resilient propagation</i>; - Banco de dados com 409 padrões. <p>Resultado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 99,35% de acerto, classificando de acordo com a existência ou não de defeitos; - 61% de acerto, indicando o tipo de defeito individualmente para cada um dos tipos de defeitos analisados; - 78% de acerto, indicando o tipo de defeito para agrupamentos de defeitos de acordo com as suas semelhanças.

CAPÍTULO 5

- CONSIDERAÇÕES FINAIS -

1. Conclusões

O trabalho desenvolvido atingiu o objetivo proposto de desenvolver uma metodologia para análise e classificação de imagens térmicas de pára-raios a ZnO. Partindo dos resultados obtidos com a realização dos ensaios, concluiu-se que através da análise das imagens térmicas e dos perfis de temperatura na superfície de um pára-raios, é possível detectar irregularidades que geralmente estão associadas a defeitos ou falhas provocadas por meios externos, como a poluição. Estas irregularidades geralmente são percebidas ao se fazer a comparação entre perfis térmicos, considerando-se o pára-raios defeituoso e o mesmo tipo de pára-raios em bom estado operacional.

Para a realização deste trabalho, foram utilizados cinco pára-raios de 96 kV, retirados de serviço pela Chesf por apresentarem-se fora do padrão utilizado pela empresa após a realização de inspeções térmicas; um pára-raios de 192 kV, um de 550 kV e dois de 96 kV cedidos pela Eletrosul. Estes pára-raios foram submetidos a ensaios de caracterização, nos quais foi constatada a presença de problemas que justificaram a sua retirada da operação. Diversos defeitos foram criados propositalmente com a finalidade de se analisar as variações no seu comportamento.

Em todos os casos ensaiados, foi possível detectar variações resultantes dos defeitos criados nos equipamentos utilizando-se a imagem térmica e o gráfico de perfil térmico. Sendo este último uma ferramenta mais precisa para diagnosticar as variações de temperatura existentes ao longo da coluna de porcelana do pára-raios. Assim, foi possível detectar pequenas variações no padrão as quais, se bem caracterizadas podem servir como um meio de diagnosticar problemas com o equipamento.

A utilização de redes neurais artificiais mostrou-se um recurso adequado para o reconhecimento dos padrões térmicos em pára-raios a ZnO. Os resultados obtidos confirmam a eficiência das redes neurais na classificação dos padrões, já que 99,35% dos padrões foram classificados corretamente entre defeituosos e não-defeituosos, resultado de um único padrão classificado erroneamente em um conjunto de 154 padrões analisados. Tal resultado é excelente, levando-se em conta ainda que para o diagnóstico completo do pára-raios não se deve descartar o seu histórico e a própria experiência dos engenheiros envolvidos na manutenção.

A utilização do número total de pontos no perfil de temperaturas mostrou-se a mais adequada para análise por RNA. A filtragem do número de pontos, através da seleção dos pontos de máximo e mínimo reduziu a eficiência da rede, no sentido de que houve uma redução no número de parâmetros a serem analisados e, conseqüentemente, no número de variáveis que podem definir diferentes situações de defeitos.

Os resultados obtidos representam a confirmação de que a inspeção térmica através da termovisão é um método adequado para prevenção e detecção de falhas que, apesar de não ser utilizado em todo o seu potencial, pode ser aprimorado de modo a se tornar mais eficiente e preciso. Neste sentido, este trabalho é o passo inicial para o desenvolvimento de uma ferramenta de análise e diagnóstico baseado na leitura das imagens térmicas obtidas. É importante destacar ainda que, sendo este um trabalho pioneiro, muito ainda pode ser feito no intuito de se melhorar os resultados obtidos, principalmente em relação a classificação dos padrões de acordo com o tipo de defeito.

Buscando consolidar os resultados aqui obtidos é possível tentar melhorar a classificação das imagens de acordo com o tipo de defeito ensaiado. Entretanto, a maior dificuldade encontrada para se obter esta melhoria é a falta de dados em número suficiente para um treinamento adequado da rede neural.

2. Trabalhos Futuros

É importante destacar que, paralelamente a este trabalho, um projeto envolvendo o desenvolvimento de uma ferramenta para monitoramento contínuo da corrente de fuga e análise de suas componentes harmônicas está sendo desenvolvida. Desta forma, a análise térmica e a medição da corrente de fuga poderão ser utilizadas conjuntamente, como técnicas complementares, constituindo uma ferramenta poderosa para monitoramento e diagnóstico de falhas em pára-raios a ZnO.

Como melhoria a esta ferramenta, pretende-se aperfeiçoar o processo de classificação dos padrões de acordo com o tipo de defeito existente. Além disso, pretende-se desenvolver uma metodologia automatizada para extração de características das imagens térmicas, de modo a tornar possível a obtenção de padrões mais significativos relacionados a própria imagem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABB Switchgear: “Physical properties of zinc oxide varistors”. ABB Power Technology Products AB, 2001.
- BARTKOWIAK, M., COMBER, M. G., MAHAN, G. D.: “Influence of Nonuniformity of ZnO Varistors On Their Energy Absorption Capability”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, N° 4, pp. 591-598, October 2001.
- CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K; SWEETANA, A.: “A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 1, N° 2, pp. 67-73, April 1986.
- CHRZAN, K. L.: “Concentrated discharges and dry bands on polluted outdoor insulators”. 13th International Symposium on High Voltage Engineering. August 25 – 29, 2003. Delft, Netherlands.
- CHRZAN, K. L., GIELNIAK, J.: “Voltage distribution along metal oxide surge arresters”. 13th International Symposium on High Voltage Engineering. August 25 - 29, 2003. Delft, Netherlands.
- COFEEN, L. T., MCBRIDE, J. E.: “High Voltage AC Resistive Current Measurements Using a Computer Based Digital Watts Technique”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, N° 2, pp. 550-556, April 1991.
- COSTA, E. G.: “Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco”. Tese de Doutorado, COPELE/UFPB, Campina Grande, Abril, 1999.
- EDA, K.: “Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Currents”. *J. Appl. Phys.*, Vol. 56, N° 10, pp. 2948 - 2954, November 1984.
- FERNANDO, S. N., RAGHUVeer, M. R.: “Simulation of Metal Oxide Arrester Diagnostics including Stray Capacitance Effect”. 12th International Symposium on High Voltage Engineering. August 20 – 24, 2001. Bangalore, India.

- FERREIRA, T. V., COSTA, E. G., NERI, M. G. G., WANDERLEY NETO, E. T.: “Application of an Optical Temperature Measurement System on ZnO Surge Arrester”. Proceedings of the 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006, Sorrento, Italy.
- FRANCO, A. T., LUERSEN, M.: “Métodos Numéricos para a Engenharia. Introdução aos Métodos: Diferenças Finitas, Volumes Finitos e Elementos Finitos”. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Departamento Acadêmico de Mecânica, 2000.
- FRANCO, J. L. **Estudo das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993
- GANGOPADHYAY, T. K., ROY, S. N., ROY, C. K., BHATTACHARYA, P. K.: “Development of Metal Oxide Varistor Element for Power Systems”. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 1, pp. 537-541, June 17-20, 1996.
- GARCÍA-GRACIA, M., BALDOVINOS, S., SANS, M.: “Evaluation of The Failure Probability for Gapless Metal Oxide Arresters”. IEEE Transmission and Distribution Conference. Volume 2. April 11-16, 1999. Pp. 700 – 705.
- GUMZ, R. A.: Protótipo de Um Sistema de Identificação de Minúcias em Impressões Digitais Utilizando Redes Neurais Artificiais Feedforward Multicamada. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Ciências da Computação. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, junho de 2002.
- GUPTA, T. K.: “Application of zinc oxide varistors”. *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, N° 7, pp. 1817-1840, 1990.
- HARASYM, S., BROSZ, H. Z., SHUR, S. S., SHELEPETEN, T., JANISCHEWSKYJ, W.: “Pollution Performance and Voltage Distribution in Surge Arresters Enclosed in Porcelain Housing – Measured and Calculated”. 10th International Symposium on High Voltage Engineering. August, 25 – 29, 1997. Montreal, Canada.

- HARASYM, S. SHUR, S. S.: “Behavior of Metal Oxide Surge Arresters under Pollution”. 10th International Symposium on High Voltage Engineering. August 25 – 29, 1997. Montreal, Canada.
- HARASYM, S., HARASYM, A.: “The Specifics of Behavior of Surge Arrester Outdoor Insulation with Polluted Surface”. 12th International Symposium on High Voltage Engineering. August 20 – 24, 2001. Bangalore, India.
- HAYKIN, S.: *Redes Neurais – Princípios e prática*. 2^a Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HEINRICH, C., KALKNER, W.: “Return Voltage Measurement on Metal Oxide Surge Arresters”. *Proceedings of The 10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Montreal, Canada, August 25-29, 1997.
- HEINRICH, C., HINRICHSEN, V.: “Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks - Comparison of Existing and Newly Developed Procedures”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, N° 1, January 2001.
- HINRICHSEN, V., SCHOLL, G., SCHUBERT, M., OSTERTAG, T.: “Online Monitoring of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters by Wireless Passive Surface Acoustic Wave (SAW) Temperature Sensors”. *Proceedings of The 11th International Symposium on High-Voltage Engineering*, London, UK, August 23-27, 1999.
- HINRICHSEN, V.: “Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals”. 1st Edition. Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.
- HUANG, L.: “Electro-Thermal Simulation of MOSA and Derivation of Thermal Equivalent Test Sections”. Master of Science, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Canada, April 1993.
- IMAI, T., UDAGAWA, T., ANDO, .H., TANNO, Y., KAYANO, Y., KAN, M.: “Development of High Gradient Zinc Oxide Nonlinear Resistors and their Application to Surge Arresters”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, N° 4, pp. 1182-1187, October 1998.

- IZUMI, K., HONMA, H., TANAKA, J.: “Deterioration of Metal oxide Surge Arrester Element Caused by Internal Partial Discharges under Polluted Conditions”. Proceedings of The 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Pp. 517 – 520. July 8 – 12, 1991. Tokyo, Japan.
- KANNUS, K., LAHTI, K.: “Possible Failure Tendency of Metal Oxide Surge Arrester with Internal Air Space”. 13th International Symposium on High Voltage Engineering. August 25 – 29, 2003. Delft, Netherlands, 2003.
- KIL, G. S., HAN, J. S., LEE, J. H., KIM, J. B., CHO, H. G.: “Influence of the third harmonic component in power system voltage on arresters diagnostics”. *Proceedings of The 13th International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft, Netherlands, August 25-29, 2003.
- KIRKBY, P., ERVEN, C. C., NIGOL, O.: “Long-term stability and energy discharge capacity of metal oxide valve elements”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, N° 4, p. 1656-1665, October 1988.
- KLEIN, T., KÖHLER, W., FESER, K., SCHMIDT, W., BEBENSEE, R.: “A New Monitoring System for Metal Oxide Surge Arresters”. *11th International Symposium on High-Voltage Engineering*, London, UK, August 23-27, 1999.
- KOBAYASHI, M., MIZUNO, M., HAYASHI, M., SUGHITA, Y.: “Metal Oxide Surge Arrester”. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 21, N° 6, December 1986.
- KORENDO, Z., FLORKOWSKI, M.: “Thermography based diagnostic of power equipment”. *IEE Power Engineering Journal*, February 2001.
- KUMAR, U., MOGAVEERA, U.: “Voltage distribution studies on ZnO arresters”. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, N° 4, pp. 457 – 462. July 2002.
- LAT, M. V.: “Thermal properties of metal oxide surge arresters”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, N° 7, pp. 2194-2202, July 1983.

- LAT, M. V.: “Analytical method for performance prediction of metal oxide surge arresters”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, N° 10, pp. 2665-2674, October 1985.
- LEVINSON, L. M., PHILIPP, H. R.: “Zinc Oxide Varistors - A Review”. *Ceramic Bulletin*, Vol. 65, N° 4, pp. 639-646, 1986.
- LIRA, G. R. S., FERNANDES JÚNIOR, D., WANDERLEY NETO, E. T., MAIA, M. J. A.: “Métodos de Cálculo da Entrada de Energia em Pára-Raios - Um Estudo Comparativo”. Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005, Curitiba, Brasil.
- LIRA, J. G. A.: “Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára-raios de óxido de zinco”. Exame de Qualificação submetido e aprovado pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. UFCG, Campina Grande, Brasil, Março de 2006.
- LUNDQUIST, J., STENSTRÖM, L., SCHEI, A., HANSEN, B.: “New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arrester in Service”. *IEEE/PES Summer Meeting*, California, USA, July 1989.
- LINDE, F. J. Van der, SWIFT, D. A.: “The Modelling and Harmonic Content of the Resistive Component of Current in ZnO Varistors”. *Proceedings of The Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 2, pp. 258-261, August 23-27, 1999.
- MALISKA, C. R.: “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 1995.
- MATSUOKA, M.: “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics”. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 10, N° 6, June 1971.
- MIZUKOSHI, A., OZAWA, J., SHIRAKAWA, S., NAKANO, K.: “Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, N° 5, pp. 1384-1390, May 1983.

- MIZUNO, M., HAYASHI, M., MITANI, K.: "Thermal stability and life of the gapless surge arrester". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 100, N° 5, pp. 2664-2669, May 1981.
- MONTENEGRO, J. C., RAMIREZ, J. L.: "Degradation of Zinc Oxide Varistors". First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems. Dec. 12 - 14, 1995. Caracas, Venezuela.
- MUKAE, K., TSUDA, K., SHIDA, S.: "Zinc Oxide-Praseodymium Oxide Elements for Surge Arresters". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, N° 2, pp. 591-598, April 1988.
- NISHIWAKI, S., KIMURA, H., SATOH, T., MIZOGUSHI, H., YANABU, S.: "Study of Thermal Runaway/Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 103, N° 2, pp. 413-421, February 1984.
- NÓBREGA, R. S. da: Modelo eletrotérmico de um pára-raios de óxido de zinco: simulação e experimentos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, março de 2006.
- PANDYA, A. S., MACY, R. B.: **Pattern recognition with neural network in C++**. CRC Press, 1996.
- PERROT, F.: "An Efficient Method to Characterise the Performance of Metal Oxide Varistors". *Proceedings of the 11th International Symposium on High-Voltage Engineering*, London, England, August 23-27, 1999.
- PETIT, A., DO, X. D., ST-JEAN, G.: "An Experimental Method to Determine the Electro-Thermal Model Parameters of Metal Oxide Surge Arresters". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, N° 2, pp. 715-721, April 1991.
- PHILIPP, H. R., LEVINSON, L. M.: "Low-Temperature Electrical Studies on Metal-Oxide Varistors - A Clue to Conduction Mechanisms". *Journal Applied Physics*, Vol. 48, N° 4, pp. 1621-1627, April 1977.

- PHILIPP, H. R., LEVINSON, L. M.: “High-Temperature Behavior of ZnO-Based Ceramic Varistors”. *Journal Applied Physics*, Vol. 50, N° 1, pp. 383-389, April 1979.
- RIEDMILLER, M., BRAUN, H.: “A Direct Adaptative Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm”. *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks*. Pp. 586-591. San Francisco, USA, 1993.
- RINGLER, K. G., KIRKBY, P., ERVEN, C. C., LAT, M. V., MALKIEWICZ, T. A.: “The Energy Absorption Capability and Time-to-Failure of Varistors Used in Station-Class Metal-Oxide Surge Arresters”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, N° 1, pp. 203-212, January 1997.
- ROMÁN F., ALARCÓN, A., GAMBOA, L. C., MARTÍNEZ, J. M.: “A New Method to Obtain the Degradation of Surge Arresters Using an Extra High Impedance DC Current Source”. *13th International Symposium on High Voltage Engineering*, , Delft, Netherlands, August 25-29, 2003.
- SAKSHAUG, E. C.: “A Brief History of AC Surge Arresters”. *IEEE Power Engineering Review*, August, 1991.
- SHICHIMIYA, S., YAMAGUSHI, M., FURUSE, N., KOBAYASHI, M., ISHIBE, S.: “Development of Advanced Arresters for GIS with New Zinc-Oxide Elements”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, N° 2, pp. 465-471, April 1998.
- SHIRIKAWA, S., ITOU, M., EJIRI, I., WATAHIKI, S., IIMURA, N., OISHI, K.: “DC and AC Contamination of Two Stage Porcelain Type Surge Arresters”. *10th International Symposium on High Voltage Engineering*. August, 25 – 29, 1997. Montreal, Canada.
- SILVA, K. M., SOUZA, B. A., and BRITO, N. S. D., Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2058-2063, October 2006.

- SOUZA, R. T.: “Medição e Análise Harmônica da Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2004.
- SPELLMAN, C. A., HADDAD, A.: “A Technique for On-Line Monitoring of ZnO Surge Arresters”. *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Montreal, Canada, August 1997.
- STENSTRÖM, L.: “Proposal for A Test Procedure to Determine The Arrester Energy Capability as Function of The Duration of Current Flow”. *CIGRÉ- SC33-92 (WG11)*, 1992.
- ST-JEAN, G., PETIT, A.: “Metal-Oxide Surge Arrester Operating Limits Defined by A Temperature-Margin Concept”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, N° 2, pp. 627-633, April 1990.
- STOCKUM, F. R.: “Simulation of Nonlinear Thermal of Metal Oxide Surge Arresters Using A Hybrid Finite Difference and Empirical Model”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, N° 1, pp. 306 - 313, January 1994.
- THE MATHWORKS – Neural Network Toolbox. User’s Guide – Version 4. www.mathworks.com. Copyright 1992-2002 by The MathWorks, Inc.
- TOMINAGA, S., SHIBUYA, Y., FUJIWARA, Y., IMATAKI, M., NITTA, T.: “Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 99, N° 4, pp. 1548-1556, July/August 1980.
- VIPIN, P. M., NAGABHUSHANA, G. R., JAYARA, M. B. N.: “Investigations on Electro-Thermal Ageing of Metal Oxide Surge Arrester Elements: A Realistic Laboratory Simulation”. *Proceedings of The 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Pp. 1152 – 1155. July 8 – 12, 1991. Tokyo, Japan.
- VIPIN, P. M., KISHORE, N. K., NAGABHUSHANA, G. R., JAYARAM, B. N.: “Degradation of Metal Oxide Surge Arresters under Simulated Natural

Conditions”. Proceedings of the XVI Annual Convention and Exhibition of the IEEE In India. January 22-25, 1990. Pp. 165 – 169. India.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., MAIA, M. J. A.: “Artificial Neural Networks Used for Failure Diagnosys in ZnO Arresters”. WSEAS TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. , v.1, p.1513 - 1518, 2006.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., SOUZA, R. T., MACEDO, E. C. T., MAIA, M. J. A.: Monitoração e Diagnósticos de Pára-Raios a ZnO . Revista IEEE América Latina. , v.4, p.26 - 32, 2006.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., MAIA, M. J. A.: “Artificial neural networks used for failure diagnosys in ZnO arresters”. Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on POWER SYSTEMS - PE'06, 2006, Lisboa.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., FERREIRA, T. V., MAIA, M. J. A.: “Diagnóstico de defeitos em pára-raios a ZnO”. Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2006, 2006, Campina Grande, Brasil.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., MAIA, M. J. A.: “Failure Analysis in ZnO Arresters using Thermal Images”. Proceedings of IEEE/PES Latin America Transmission & Distribution Conference and Exposition – T&D2006, Caracas, Venezuela.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., MAIA, M. J. A.: “Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging”. Proceedings of IEEE/PES Latin America Transmission & Distribution Conference and Exposition – T&D2006, Caracas, Venezuela.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., SOUZA, R. T. de, MAIA, M. J. A.: “Monitoração e Diagnósticos de Pára-Raios a ZnO”. 6º Encuentro de Potencia, Instrumentation y Medidas, 2005, Montevideo, Uruguay.

WANDERLEY NETO, E. T., COSTA, E. G., MAIA, M. J. A., GALINDO, T. C. L., COSTA, A. H. S.: “Electro-thermal Simulation of ZnO Arresters for Diagnosis Using Thermal Analysis”. Proceedings of IEEE/PES Latin America Transmission & Distribution Conference and Exposition - T&D 2004, 2004, São Paulo, Brasil.

- WEISE, B., HEINRICH, C., KLINGBEIL, L., KALKNER, W.: “High Energy Lightning Impulse Stress on MO Arresters and their Degradation”. 25th International Conference on Lightning Protection. September 18 – 22, 2000. Rhodos, Greece. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION: “Gapless Surge Arresters for Power Systems Applications”. *EPRI-EL-3166, Project 657-1, Final Report*, Vol. 1-2, September 1983.
- YAN, X., WEN, Y., YI, X.: “Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOV Surge Arresters”, *Proceedings of The Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002*, Vol. 2, pp 683-687, Asian Pacific, October 2002.
- ZANDER, W.: “Influence of material heterogeneity on the ageing of ZnO arrester material”. 5th *International Symposium on High Voltage Engineering*, Braunschweig, Germany, August 1987.
- ZHU, H., HAGHUVVEER, M. R.: “Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics”. *Proceedings of The 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Vol. 2, pp. 542-545, October 1999.