

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

EDUARDO LOPES DE ALBUQUERQUE

Análise e Tomada de Decisão Utilizando Sistema de
Monitoramento via Satélite para Poluição em Cadeia de
Isoladores de Alta Tensão.

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

Análise e Tomada de Decisão Utilizando Sistema de
Monitoramento via Satélite para Poluição em Cadeia de
Isoladores de Alta Tensão.

EDUARDO LOPES DE ALBUQUERQUE

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento às exigências para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.
José Maurício Barros Bezerra, D. Sc.
Orientadores

Campina Grande – PB
Agosto - 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A345a Albuquerque, Eduardo Lopes de.
 Análise e tomada de decisão utilizando sistema de monitoramento
 via satélite para poluição em cadeia de isoladores de alta tensão /
 Eduardo Lopes de Albuquerque. – Campina Grande, 2014.
 71 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
 Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e
 Informática, 2014.

 "Orientação: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza, Prof. Dr. José
 Maurício Barros Bezerra".

 Referências.

 1. Linhas de Transmissão. 2. Isolamentos Elétricos. 3. Poluição em
 Isoladores. 4. Descargas Parciais. 5. Redes Neurais Artificiais.

 I. Souza, Benemar Alencar de. II. Bezerra, José Maurício. III. Título.

CDU 621.372.2(043)

"ANÁLISE E TOMADA DE DECISÃO UTILIZANDO SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA SATÉLITE PARA POLUIÇÃO EM CADEIA DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO"

EDUARDO LOPES DE ALBUQUERQUE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/09/2014



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, D.Sc., UFPE
Orientador(a)



NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*Dedico este trabalho a minha família,
sem a qual eu nada seria.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pelas oportunidades que me foram dadas e pelo discernimento de saber qual caminho seguir para chegar até aqui. Aos meus pais Carlos Robson e Jaudecy, pelo esforço que fizeram para me educar, pelo amor e ensinamentos que guardarei comigo enquanto viver.

Aos meus irmãos Guilherme e Marcela, pela oportunidade e responsabilidade, de como irmão mais velho, dar o exemplo, aumentando meu compromisso com o estudo e o trabalho.

À minha esposa Bárbara, pela compreensão da minha ausência em viagens para aulas e pesquisas do mestrado, além do apoio em todos os meus projetos de vida.

Aos professores Benemar Souza e José Maurício Bezerra, pela orientação, apoio e confiança no meu trabalho.

Ao amigo Leonardo Herédia que contribuiu em minha candidatura a vaga no Curso de Mestrado e acreditou em mim quando eu não acreditava mais. Pelos conselhos e exemplo.

Aos amigos do Curso de Mestrado pelo companheirismo e união em especial a Antônio Carlos, Ricardo, Nicodemos, Alexandre, Lasalvia, Kécio, Elerson e Wellington.

Ao aluno da pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE, Jonata Albuquerque, pelo apoio em redes neurais.

A Chesf, em especial ao Eng^o Osveraldo Vilar pela indicação, aos Eng^o Carlos Fernando, Eng^o Flávio Motta e Eng^o Iranildo Ferreira pela disponibilização de tempo para me dedicar a este trabalho e ao Eng^o Rogério Neto, pelo apoio em todas as oportunidades que precisei me ausentar do trabalho no Serviço de Manutenção de Linhas de Transmissão de Paulo Afonso – SPML, e o mesmo assumiu toda a responsabilidade.

Eduardo Lopes de Albuquerque

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.”

Abraham Lincoln

RESUMO

O presente trabalho buscou desenvolver uma ferramenta para diagnóstico de poluição em cadeias de isoladores aéreos através da utilização de inteligência artificial e de sensores eletrônicos contadores de descargas parciais instalados em linhas de transmissão no Nordeste do Brasil. Foram utilizados experimentos de laboratório para criação de dados sobre o comportamento da corrente de fuga em isoladores submetidos a cinco níveis conhecidos e distintos de poluição. De posse desses dados foi treinada uma rede neural artificial - RNA em busca da criação de um classificador que pudesse receber como dados de entrada as informações coletadas pelos sensores eletrônicos e fornecer como saída o grau de poluição do isolador sem que fosse necessário retirar os isoladores de sua atividade no campo nem depender da presença humana nas proximidades do isolador sob estudo, uma vez que os dados são enviados via satélite pelos sensores eletrônicos. A rede neural não apresentou percentual de acerto desejado para implementação imediata do projeto, contudo este trabalho fornece importantes balizadores a seguir para o avanço da ideia proposta nesta pesquisa que trará enormes ganhos em padronização de diagnósticos de poluição em isoladores, redução de custos com mão de obra na inspeção, melhores condições de trabalho para os inspetores de LT (pois não precisarão passar madrugadas em condições perigosas e insalubres em busca de isoladores poluídos) e garantia de maior confiabilidade ao sistema elétrico de potência com a supervisão contínua e ininterrupta dos sensores do sistema de monitoramento.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Isolamentos Elétricos, Poluição em Isoladores, Descargas Parciais, Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

The present study sought to develop a tool for diagnosis of air pollution in insulators string using artificial intelligence and electronic counters partial discharge sensors installed on transmission lines in Northeastern Brazil. Laboratory experiments to generate data about the behavior of leakage current in insulators submitted to five different known levels and pollution were used. With this data was trained an artificial neural network - ANN in search of creating a classifier that could receive as input the information collected by electronic sensors and provides as output the degree of pollution of the insulator without it being necessary to remove the isolators from its activity in the field nor of human presence or depend near the insulator under study, since the data is sent via satellite by electronic sensors. The neural network showed no percentage desired for immediate implementation of the project hit, but this work provides important benchmarks below to advance the idea proposed in this research will bring huge gains in standardizing diagnostic pollution on insulators, reducing costs with labor to inspection work, better working conditions for transmission lines inspectors (because do not need to spend all night in dangerous conditions in search of polluted insulators) and ensuring greater reliability to the electric power system with continuous, uninterrupted monitoring system sensors.

Keywords: Transmission Lines, Electrical Insulation, Pollution on Insulators, Partial Discharge, Artificial Neural Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Principais causas dos desligamentos de LT na Chesf	17
Figura 2.1 Esquema do sistema de transmissão do Brasil (ONS 2014)	20
Figura 2.2 Modelos antigos de isoladores cerâmicos (JANSSEN, 2005)	22
Figura 2.3. (a) Isolador de pino rosqueável com saia interna; (b) Isolador no qual é possível a amarração do condutor (FERREIRA, 2011)	23
Figura 2.4. Diagrama esquemático de um isolador de vidro de disco (ISOLADORES SANTA TEREZINHA, 2002)	24
Figura 3.1. Isoladores de vidro temperado cobertos por poluição biológica na região sul da Bahia: (a) estrutura de ancoragem na cidade de Ibirataia-BA; (b) cadeia de isoladores no barramento da SE Funil 230kV na cidade de Ubaitaba-BA	27
Figura 3.2. Isolador cerâmico típico com indicação de localização predominante de deposição de poluição (Norma interna Chesf IM.MN.LT.M.026, 2005).....	28
Figura 3.3. Sequência das etapas do contornamento do isolador. (a) região seca, não existe atividade; (b) isolador poluído umidificado; (c) formação de bandas secas e descargas superficiais; (d) surgimento de descargas parciais superficiais (LIMA, 2010)	31
Figura 3.4. Fotos de descargas parciais durante inspeção noturna em LT 500kV na região de Petrolândia - PE. (a) cadeia de suspensão tipo I; (b) cadeia de suspensão tipo I; (c) (d) cadeia de suspensão tipo V	32
Figura 3.5. Isoladores de vidro temperado em cadeia de suspensão, linha de transmissão de 500kV na cidade de Glória - BA (a) vista superior com marca da descarga sofrida por poluição (b) vista inferior com marca de descarga sofrida por poluição	33
Figura 3.6. Isoladores de vidro temperado em cadeia de suspensão, linha de transmissão de 500kV na cidade de Águas Belas - PE (a) vista aumentada superior com marca da descarga sofrida por poluição (b) vista superior com toda a cadeia contornada	33
Figura 3.7. Isolador cerâmico típico com convenções adotadas pela Chesf (NORMA INTERNA CHESF IM.MN.LT.M.026, 2005)	35

Figura 3.8. Posicionamento do eletricista na lavagem energizada da isoladores (a) cadeia tipo I (b) cadeia de ancoragem (c) posicionamento do eletricista com pistola e de apoio (d) cadeia tipo V (NORMA INTERNA CHESF IM.MN.LT.M.011, 2010).....	37
Figura 4.1. Secagem dos isoladores após aplicação artificial dos cinco níveis de poluentes.....	40
Figura 4.2. Foto da câmara de névoa: (a) vista da câmara ilustrando as suas alimentações de tensão elétrica, água e ar comprimido; (b) bucha polimérica para passagem da alimentação de tensão elétrica; (c) par de bicos injetores (BEZERRA, 2004).....	41
Figura 4.3. Tensões de descarga para os isoladores (BEZERRA, 2004)	42
Figura 4.4. Nível 1, atmosfera limpa – ESDD 0,025 mg/cm ²	43
Figura 4.5. Nível 2, contaminação muito leve – ESDD 0,035 mg/cm ²	44
Figura 4.6. Nível 2', contaminação leve – ESDD 0,050 mg/cm ²	44
Figura 4.7. Nível 3, contaminação pesada – ESDD 0,100 mg/cm ²	45
Figura 4.8. Nível 4, contaminação muito pesada – ESDD 0,200 mg/cm ²	45
Figura 4.9. Forma de onda da corrente de fuga registrada em torre de 500 kV (FONTANA, 2006)	47
Figura 4.10. Diagrama esquemático de fixação na estrutura da LT (LIMA, 2010).	48
Figura 4.11. Diagrama esquemático do sistema de transmissão de dados (LIMA, 2010).	48
Figura 4.12. Tela inicial do aplicativo Avaliação de Desempenho Elétrico de Cadeias de Isoladores - ADECI.	50
Figura 4.13. Tela com dados do local de instalação de um medidor específico e suas opções de consulta.	50
Figura 5.1. Neurônio típico (THIBODEAU, 2002).....	55
Figura 5.2. Neurônio artificial não-linear (SANTOS, 2008).....	56
Figura 5.3. Diagrama de um classificador de padrões (SANTOS, 2008).	58

Figura 6.1. Desempenho da quarta inicialização.....	62
Figura .6.2. Treinamento da rede neural.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Indústrias de Isoladores	25
Tabela 3.1. Principais tipos de contaminantes e suas respectivas fontes	27
Tabela 3.2. Grau de severidade da poluição em cadeias de isoladores	35
Tabela 3.3. Distância de segurança da lavagem X Condutividade da água	36
Tabela 4.1. Caracterização dos níveis de poluição de acordo com EPRI (1975)*	39
Tabela 4.2. Valores escolhidos para elaboração das soluções.....	39
Tabela 4.3. Informações obtidas através do aplicativo ADECI	51
Tabela 4.4. Informações obtidas através do aplicativo ADECI	52
Tabela 6.1. Tabela de erros relacionada a cada inicialização	61
Tabela 6.2. Somatório de descargas parciais por nível de poluição	63
Tabela 6.3. Classificação crescente do número de descargas nível N1.....	63
Tabela6.4. Classificação crescente do número de descargas nível N2.....	64
Tabela 6.5. Classificação crescente do número de descargas nível N3.....	64
Tabela 6.6. Classificação crescente do número de descargas nível N4.....	64
Tabela 7.1. Comparativo de atributos de laboratório e de campo	67

LISTA DE ABREVIATURAS

SPML - Serviço de Manutenção de Linhas de Transmissão de Paulo Afonso

SF6 - Hexa-fluoreto de enxofre

CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco

LT - Linha de Transmissão

SE - Subestação

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN - Sistema Interligado Nacional

ABRATE - Associação Brasileira de Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica

ESDD – Densidade Equivalente de Sal Depositado (*Equivalent Salt Deposit Density*)

NSDD – Densidade de Sal Não Solúvel Depositado (*Non Soluble Deposit Density*)

VHF - *Very High Frequency*

EPRI - *Electric Power Research Institute*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

LAT - Laboratório de Alta Tensão

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

ADECI - Avaliação de Desempenho Elétrico de Cadeias de Isoladores

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	6
ABSTRACT	12
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS	17
SUMÁRIO	14
CAPÍTULO 1	15
INTRODUÇÃO	15
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.2 MOTIVAÇÃO	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TEXTO	18
CAPÍTULO 2	19
ISOLADORES CERÂMICOS	19
2.1 VISÃO GERAL	19
2.2 HISTÓRICO	21
2.3 PARTES CONSTITUINTES	23
CAPÍTULO 3	26
FENÔMENOS DECORRENTES DA POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES	26
3.1 POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES	26
3.2 DESCARGAS PARCIAIS	30
3.3 METODOLOGIA UTILIZADA PELA CHESF NO DIAGNÓSTICO E TRATAMENTO DA POLUIÇÃO	34
CAPÍTULO 4	38
PROJETOS DE MONITORAÇÃO DE POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES	38
4.1 PROJETO DE MONITORAÇÃO DESENVOLVIDO EM LABORATÓRIO	38

4.2 PROJETO DE MONITORAÇÃO DESENVOLVIDO PARA O USO EM CAMPO	46
CAPÍTULO 5	53
TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA RECONHECIMENTO DE PADÃO.	53
5.1 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	53
5.1.1 Introdução	53
5.1.2 Neurônio Biológico e Artificial	54
5.1.3 Aprendizagem.....	57
5.2 TRANSFORMADA WAVELET	58
CAPÍTULO 6	60
RESULTADOS OBTIDOS	60
CAPÍTULO 7	66
CONCLUSÕES	66
CAPÍTULO 8	68
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	69

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica tem um valor inquestionável no padrão de vida das sociedades modernas e esta importância tende a crescer cada vez mais. Sua capacidade de geração, tecnologia de transmissão dominada e amplamente difundida, capacidade de armazenamento, multiplicidade de formas de utilização e transformação em outras formas de energia, garantem destaque a energia elétrica, quando comparadas com outras formas de energia.

Uma característica fundamental em todo sistema elétrico de potência, seja na geração, transmissão ou distribuição, é a necessidade de isolamento para segregação de regiões com diferentes potenciais elétricos. Os isolamentos estão presentes em motores, geradores, transformadores, linhas de transmissão, capacitores, entre outros. Existem isoladores no mercado dos mais variados modelos e materiais constituintes. Alguns são sólidos como vidro, outros gasosos como o hexa-fluoreto de enxofre - SF₆ e outros ainda são líquidos como o óleo mineral isolante.

Neste trabalho serão abordados apenas os isoladores cerâmicos utilizados em linhas de transmissão e barramentos de subestações. Os isoladores orgânicos e híbridos, apesar de serem utilizados nos ativos em questão e estarem sendo cada vez mais utilizados no sistema elétrico de potência brasileiro, ainda são minoria. A preponderância dos isoladores cerâmicos no sistema é enorme e continuará sendo, durante algum tempo, pois os mesmos apresentam vantagens em relação a detecção de defeitos, sendo mais conhecidos os seus modos de falha, com isso facilitando a inspeção e a sua devida substituição. Outro ponto a destacar-se é a maior vida útil dos isoladores

cerâmicos. Observam-se no sistema de transmissão da Companhia Hidroelétrica do São Francisco - Chesf, isoladores cerâmicos que estão instalados em linhas de transmissão – LT, em áreas de baixa umidade relativa do ar e poucas chuvas, com mais de 60 anos em atividade.

1.2 MOTIVAÇÃO

Falhas na capacidade de isolamento entre as partes ativas e a terra, sejam em linhas de transmissão ou em subestações, podem resultar em curtos circuitos e conseqüente interrupção no fornecimento de energia, causando transtornos à população, prejuízos às indústrias e perda de receita à empresa transmissora, através de multa aplicada pela agência reguladora.

Um dos principais motivos para a perda na capacidade de isolamento em isoladores cerâmicos é a poluição depositada sobre os mesmos associada à umidade. Com isso, faz-se necessário inspeção freqüente, a fim de diagnosticar o fenômeno e caso necessário, proceder a lavagem ou substituição da cadeia de isoladores poluída.

O diagnóstico de poluição é difícil e dispendioso, envolvendo inspeções noturnas e com elevada umidade relativa do ar, as quais são realizadas de maneira subjetiva e dependente da experiência do inspetor. Outra opção seria realizar a lavagem das cadeias de acordo com o critério tempo de operação, ou seja, seguindo uma determinada periodicidade pré-estabelecida. Contudo, esta opção pode ser ineficiente devido à imprevisibilidade de ocorrência de lavagens naturais pela precipitação pluviométrica ou excesso de poluição devido a agentes externos atípicos como excesso de tráfego por determinada estrada não pavimentada devido interrupção de vias alternativas ou a ocorrência de uma queimada, instalação de uma indústria ou utilização de insumos agrícolas na região da linha de transmissão, por exemplo.

Diante das dificuldades apresentadas, faz-se necessário o desenvolvimento de uma nova técnica mais padronizada, assertiva e menos subjetiva.

Na Figura 1.1 apresenta-se a relevância do problema da poluição para a disponibilidade da linha de transmissão. As principais causas responsáveis por desligamentos transitórios e permanentes nas linhas de transmissão da Companhia

Hidroelétrica do São Francisco – Chesf (entre 01/01/2009 e 10/08/2014), uma das maiores empresas de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil, onde a maior parte dos seus ativos encontra-se na região Nordeste do país.

Vale salientar, que devido às dificuldades no diagnóstico de saídas de linhas de transmissão por poluição, muitas das ocorrências indeterminadas foram ocasionadas por poluição em cadeias de isoladores.

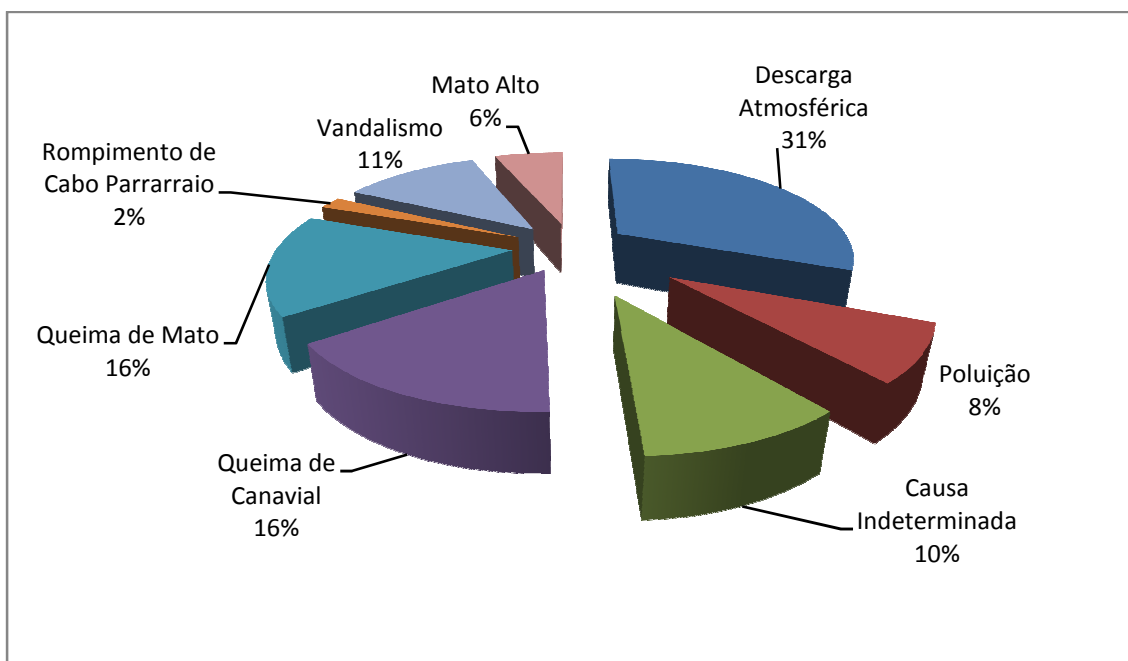


Figura 1.1 Principais causas dos desligamentos de LT na Chesf

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é contribuir com o diagnóstico de poluição em cadeias de isoladores cerâmicos e no processo de tomada de decisão quanto à necessidade de lavagem energizada do isolamento das linhas de transmissão ou dos barramentos de subestações. Para se alcançar tais objetivos, utilizou-se um sistema de monitoração de descargas parciais e emissão de dados via satélite para criação de um banco de dados com:

- Número de descargas parciais ocorridas por hora,

- Intensidade da corrente das descargas parciais,
- Temperatura ambiente no local onde está instalado o sensor,
- Umidade relativa do ar no local onde está instalado o sensor

Com o tratamento desses dados será inferido, através do uso de ferramentas de inteligência artificial, o estado de poluição de cadeias de isoladores de alta tensão, gerando assim uma grande contribuição para a disponibilidade do sistema elétrico de potência e conseqüente otimização dos custos com as intervenções da manutenção.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

No capítulo 2, a seguir, é apresentada a importância das linhas de transmissão para o sistema elétrico de potência, o histórico da evolução dos isoladores, suas partes constituintes e características.

O capítulo 3 apresenta o efeito da poluição nas cadeias de isoladores desde o surgimento das correntes de fuga até o contornamento total da cadeia de isoladores. Apresenta-se ainda neste capítulo, a técnica de diagnóstico da poluição utilizada pela Chesf.

O capítulo 4 relata o experimento desenvolvido em laboratório, visando estudar o comportamento da corrente de fuga em isoladores poluídos artificialmente e o sistema desenvolvido para contagem de descargas parciais ocorridas em cadeias de isoladores poluídas em campo.

O capítulo 5 apresenta as ferramentas computacionais de inteligência artificial utilizadas para reconhecimento de padrões e classificação de dados utilizadas neste trabalho, a saber: redes neurais artificiais e transformadas wavelet.

Os capítulos 6 e 7 respectivamente apresentam os resultados obtidos, conclusões, e por fim, sugestões para novos trabalhos.

CAPÍTULO 2

ISOLADORES CERÂMICOS

2.1 VISÃO GERAL

As linhas de transmissão têm o papel de transportar a energia elétrica gerada nas usinas, situadas em locais de melhor aproveitamento dos recursos naturais, principalmente quando se trata de energia renovável como hidroelétrica, eólica ou solar, até os centros de consumo. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, o Sistema Interligado Nacional - SIN possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. Num país de dimensão continental como o Brasil e onde a base da geração de energia elétrica é hidroelétrica, com grandes blocos de geração afastados dos centros consumidores, faz-se necessária uma extensa malha de linhas de transmissão para atender a essa configuração. Segundo a Associação Brasileira de Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica – ABRATE, o país conta com mais de 100.000 km de linhas de transmissão com nível de tensão igual ou superior a 230 kV, conforme ilustra o mapa apresentado na Figura 2.1.

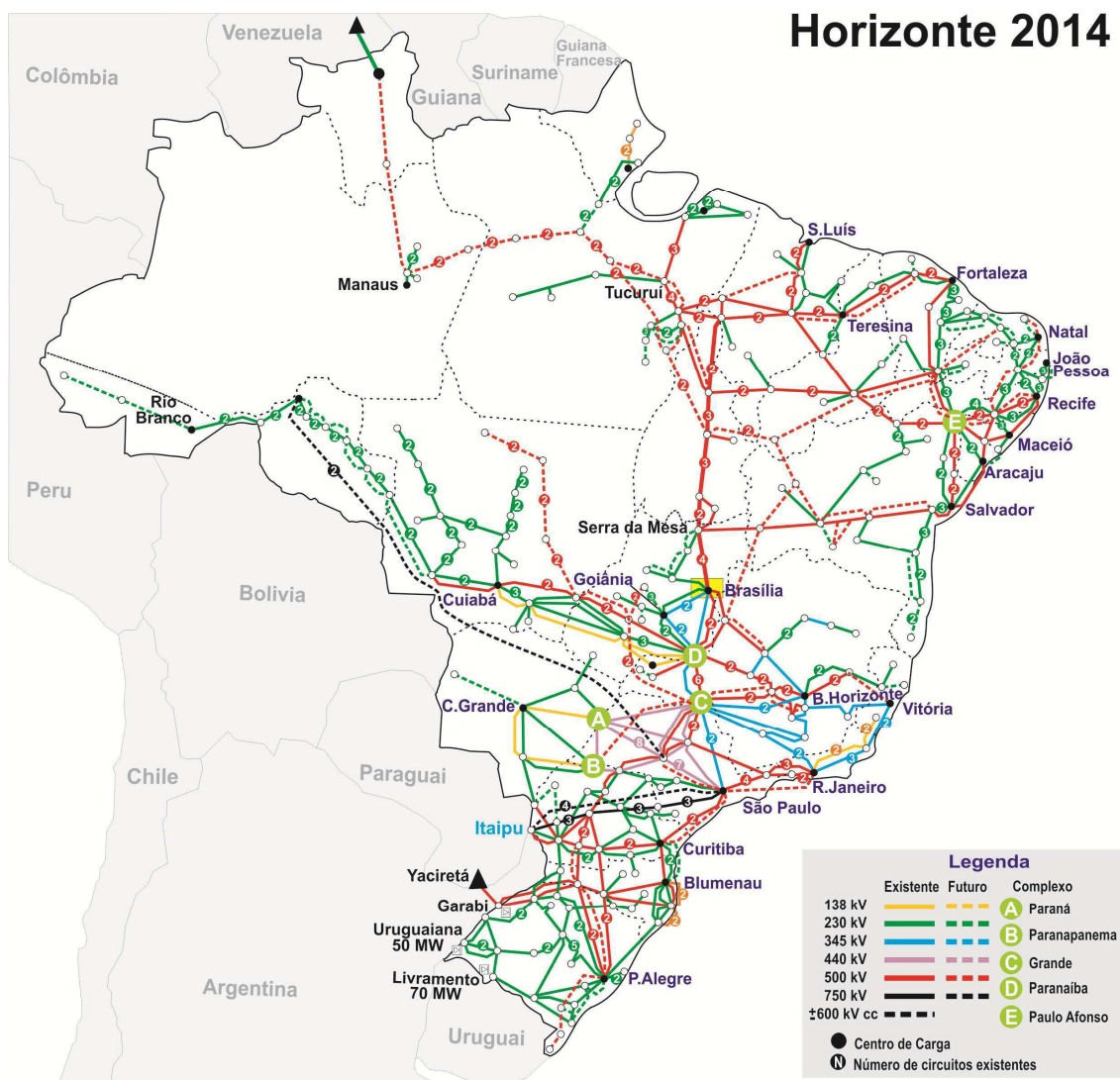


Figura 2.1 Esquema do sistema de transmissão do Brasil (ONS 2014)

Entre as partes componentes das linhas de transmissão destacam-se as torres, que podem ser de concreto ou aço; cabos condutores, geralmente de alumínio com alma de aço e isoladores, de porcelana, vidro ou polímeros. As torres desempenham papel puramente mecânico de sustentação dos condutores. Os condutores são responsáveis pelo transporte da energia elétrica. A diferença de potencial elétrico entre os condutores e as torres requer a presença de um dielétrico que, ao mesmo tempo isole eletricamente

o condutor e sustente-o mecanicamente, papel desempenhado pelos isoladores, que normalmente formam cadeias a fim de obter a rigidez dielétrica necessária para isolação adequada.

De modo sucinto: “um isolador elétrico tem a principal finalidade de isolar um corpo condutor de outro corpo qualquer, possuindo um grande valor de resistência elétrica e poucos elétrons livres em sua estrutura (à temperatura ambiente), não permitindo a livre circulação de cargas elétricas, portanto, atua inversamente ao condutor elétrico. Simplificando, é totalmente o contrário de um corpo condutor que possui muitos elétrons livres em sua estrutura (à temperatura ambiente) (JUNIOR, 2010).

2.2 HISTÓRICO

As primeiras porcelanas utilizadas como materiais elétricos surgiram a partir de 1830 (LIEBERMANN, 2000), quando as linhas telegráficas passaram a oferecer demanda por isoladores elétricos. Os primeiros isoladores tinham a forma de blocos de vidro (Guthrie, 1997) e eram fixados com a ajuda de buchas, pois não tinham rosca interna, conforme mostrado na Figura 2.2. Com o passar do tempo adquiriram outros desenhos, tornando-se peças fundamentais em várias outras áreas.



Figura 2.2 Modelos antigos de isoladores cerâmicos (JANSSEN, 2005)

Em 25 de julho de 1865, Louis Cauvet patenteou o isolador de pino com furo rosqueado (CAUVET, 1865). Dezoito anos depois, Samuel Oakman patenteou o isolador de pino rosqueado com saia interna (Figura 2.3.a). Em 1890, Oakman patenteou os isoladores com formato que permite a amarração dos cabos (Figura 2.3.b) (FERREIRA, 2011).

Mais tarde, com a invenção de suspensão para isoladores tornou-se possível a transmissão de alta tensão.

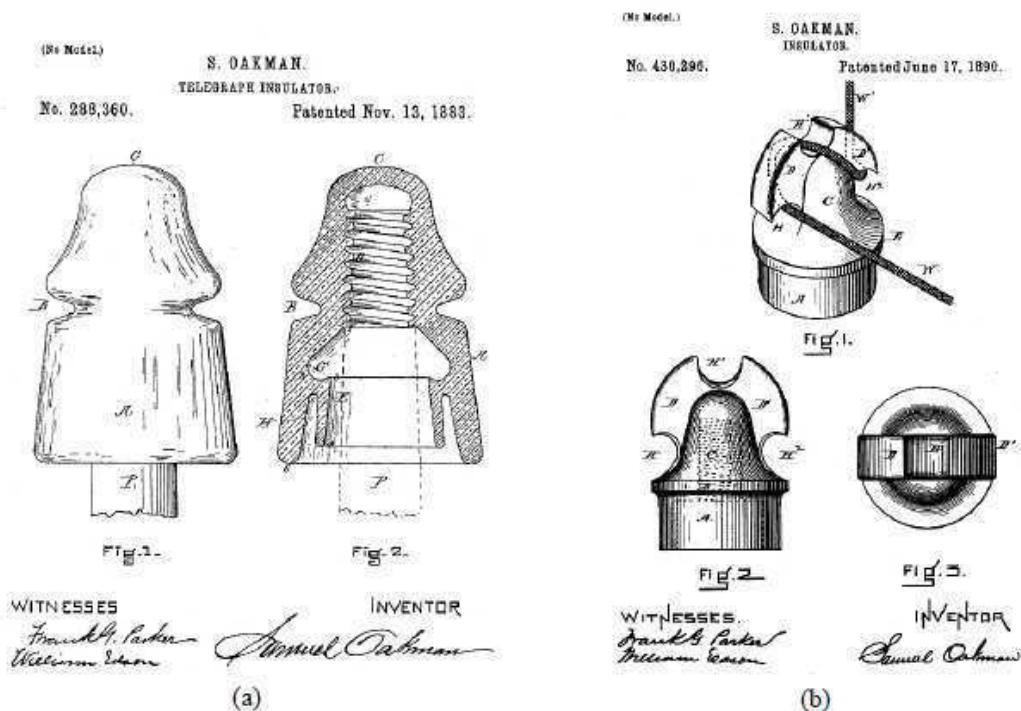


Figura 2.3. (a) Isolador de pino rosqueável com saia interna; (b) Isolador no qual é possível a amarração do condutor (FERREIRA, 2011)

“No Brasil, em 11 de maio de 1852, Guilherme Schuch, nascido na mesma época que o segundo imperador brasileiro, formado em engenharia na Escola Politécnica de Viena, fundou uma repartição chamada Telégrafo Nacional, instalando os primeiros fios telegráficos no país. Devido ao clima úmido e quente nos trópicos, os isoladores foram rapidamente se deteriorando, fato que estimulou o barão de Capanema (assim chamado Guilherme Schuch), a inventar um novo tipo de isolador para linhas telegráficas terrestres. Esse isolador era basicamente feito de vidro, porcelana, ebonite entre outros materiais, contudo, o seu diferencial é que não possuía nenhuma peça metálica. Capanema recebeu em seu nome a patente e o invento foi divulgado por toda a Europa. Capanema foi um dos maiores engenheiros, da época, no Brasil” (JUNIOR, 2010).

2.3 PARTES CONSTITUINTES

Com o passar do tempo os isoladores foram aumentando de comprimento, em uma configuração monocorpo, em conformidade com a sua classe de tensão. A

evolução desses componentes passou pela aplicação de unidades multicorpo, convergindo tecnologicamente para unidades que podem ser agrupadas em cadeias de isoladores, em dimensões compatíveis com a classe de tensão da linha de transmissão e das características do meio ambiente.

Atualmente os isoladores cerâmicos, utilizados em linhas de transmissão e barramentos de subestações - SE, são do tipo disco de porcelana ou vidro temperado, cujos componentes estão ilustrados na Figura 2.4.

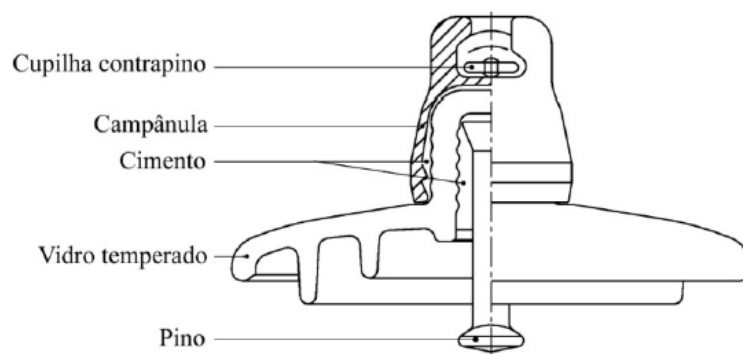


Figura 2.4. Diagrama esquemático de um isolador de vidro de disco (ISOLADORES SANTA TEREZINHA, 2002)

- Cupilha contrapino – trava contra separação não intencional de dois isoladores constituintes de uma cadeia de isoladores.
- Campânula – tem formato que possibilita o encaixe do pino e o travamento pela cupilha contrapino a fim de possibilitar a formação de cadeias de isoladores e o acoplamento da extremidade da cadeia à ferragem da estrutura. Sua função é de sustentação mecânica.
- Cimento - possui alta resistência mecânica e com variação mínima de volume devido à mudança de temperatura e ao envelhecimento. Geralmente utiliza-se cimento aluminoso, cujo composto principal é o aluminato de cálcio
- Vidro temperado ou porcelana – é o dielétrico. Além de ser um ótimo isolante, deve possuir características que evitem o depósito de poluentes, além de ser de fácil lavagem.

- Pino – juntamente com a campânula, formam as cadeias de isoladores e dão sustentação mecânica ao arranjo, além de se conectar a ferragem ligada ao condutor.

Em levantamento feito em 2003, pela Associação Brasileira de Cerâmica - ABC, o número de indústrias de isoladores cerâmicos brasileiras, com suas respectivas produções e seus faturamentos é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Indústrias de Isoladores

ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA	
<i>Fonte: Dados levantados pela ABC referente a 2003</i>	
Número de Empresas	6
Número de Fábricas	9
Capacidade Instalada (t/ano)	44.000
Produção (t/ano)	28.000
Faturamento (US\$ milhões)	39
Exportação (US\$ milhões)	13
Importação (US\$ milhões)	1,2
Empregos Diretos	1.700

Fonte: http://www.abceram.org.br/asp/abc_285.asp

Apesar da cerâmica ainda ser muito utilizada, no ramo de isoladores ela vem perdendo espaço para materiais como polímeros, que mesmo sendo menos duradouros, mais leves, mais fáceis de obter a matéria prima, mais resistentes à corrosão, poluição, vandalismo, entre outras propriedades (JUNIOR, 2010).

CAPÍTULO 3

FENÔMENOS DECORRENTES DA POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES

3.1 POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES

Um dos principais problemas enfrentados na manutenção de linhas de transmissão é o acúmulo de poluentes na superfície dos isoladores que, juntamente com a umidade elevada, causam redução na capacidade de isolação das cadeias.

Os poluentes são predominantemente de origem industrial ou marítima, conforme pode ser observado na Tabela 3.1.

As indústrias que consomem combustíveis fósseis (como o carvão e o diesel), que fabricam fertilizantes e cimento e as refinarias de petróleo são as principais emissoras dos poluentes que prejudicam as linhas de transmissão. Em regiões úmidas pode ocorrer o surgimento da “poluição biológica”. No sistema de transmissão da Chesf, este fenômeno é bastante comum nas cadeias de isoladores instalados no sul da Bahia, (Figura 3.1). Mesmo com a morte do elemento biológico, uma camada de resíduos é deixada no isolador, que, quando umedecida, pode se tornar condutiva.



Figura 3.1. Isoladores de vidro temperado cobertos por poluição biológica na região sul da Bahia: (a) estrutura de ancoragem na cidade de Ibirataia-BA; (b) cadeia de isoladores no barramento da SE Funil 230kV na cidade de Ubaitaba-BA

Tabela 3.1. Principais tipos de contaminantes e suas respectivas fontes

Contaminantes	Fontes de poluição
Sal	<ul style="list-style-type: none"> • Regiões costeiras • Industriais
Cimento	<ul style="list-style-type: none"> • Fábrica de cimento • Locais de construção, obras • Pedreiras
Terra	<ul style="list-style-type: none"> • Locais de plantio • Estrada de terra para acesso aos locais de plantio
Fertilizantes	<ul style="list-style-type: none"> • Fábricas de fertilizantes • Uso frequente em locais de plantio
Metálicos	<ul style="list-style-type: none"> • Manipulação de processos de mineração • Processo de tratamento mineral
Carvão	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de fabricação do carvão • Combustão do carvão
Fezes	<ul style="list-style-type: none"> • Locais próximos a migrações de aves
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes variedades de produtos químicos de resíduos industriais, refinarias entre outros
Fumaça	<ul style="list-style-type: none"> • Emissão dos automóveis e caminhões, queima de processos industriais e queima em práticas agrícolas

Fonte: (LIMA, 2010)

O processo de deposição e acúmulo de contaminantes nos dielétricos é função de vários parâmetros:

- Formato das saias dos isoladores
- Dimensões dos isoladores
- Posicionamento na cadeia
- Tipos de contaminantes
- Direção do vento
- Frequência da lavagem natural

Os contaminantes, normalmente são carregados pelo vento e ficam submetidos à atração do campo elétrico e tendem a se acumularem nas dobras das nervuras, mais notadamente no lado oposto ao da incidência dos ventos (entre as nervuras, internas ou entre a nervura externa e a borda) conforme mostrado na Figura 3.2. Eventualmente, poderá ocorrer também a deposição no lado de incidência do vento, entre a nervura mais externa e a borda.

Na superfície superior do dielétrico do isolador, lado não abrigado, praticamente não há acúmulo de contaminantes devido à facilidade da lavagem pela chuva e pouca aderência do dielétrico. Nos estágios mais avançados, a tendência do isolador é apresentar poluição disseminada ao longo de todas as nervuras do dielétrico.

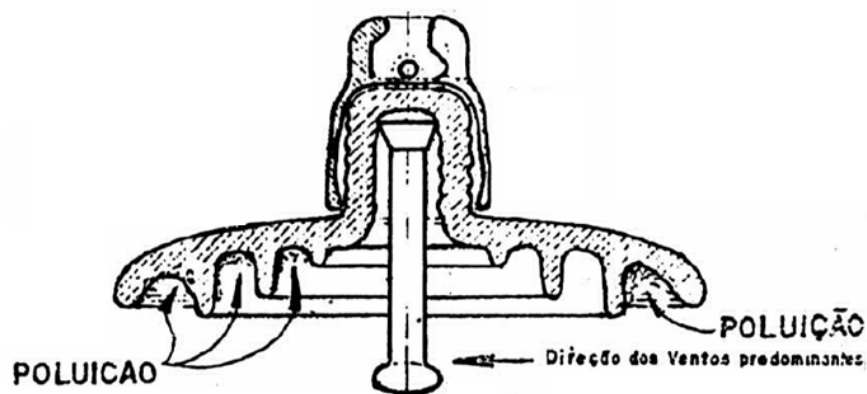


Figura 3.2. Isolador cerâmico típico com indicação de localização predominante de deposição de poluição (Norma interna Chesf IM.MN.LT.M.026, 2005)

Observa-se nas cadeias de suspensão, maior acúmulo de poluentes do que nas cadeias de ancoragem, visto que o posicionamento horizontal das cadeias de ancoragem facilita o processo de lavagem natural. Além disso, na formação das gotículas de

orvalho, o escoamento dá-se no sentido da cadeia de isoladores de suspensão (de cima para baixo) contaminando todos os isoladores. As estruturas situadas em regiões serranas e com poluição tem maior probabilidade de falha pela presença constante de alta umidade relativa do ar, em especial, nas regiões litorâneas (NORMA INTERNA CHESF IM.MN.LT.M.026, 2005).

O método usualmente utilizado para determinar a concentração de poluentes em cadeias de isoladores é a medição da densidade de depósito em equivalente de sal ou *Equivalent Salt Deposit Density* - ESDD. Esse método consiste em remover a cadeia de isoladores, lavar com um volume de água destilada conhecido, medir a condutividade elétrica e determinar qual a concentração de Cloreto de Sódio - NaCl seria necessária para observar a mesma condutividade da solução. Dividindo a quantidade equivalente em sal pela área que foi lavada, obtém-se o ESDD equivalente à concentração em miligrama de NaCl por centímetro quadrado. De forma complementar pode-se determinar a densidade de depósito de substâncias não solúveis, *Non Soluble Deposit Density* - NSDD para caracterizar a concentração de poluentes (LIMA, 2010)

Os poluentes são carregados pelo vento e se depositam sobre os isoladores de maneira estocástica, dependendo de diversos fatores ambientais, tais como: chuvas, direção e velocidade do vento, ocorrência de tempestades, localização geográfica, altitude, etc. Outros fatores como a presença humana e atividades econômicas também interferem no processo de deposição, por exemplo: atividades industriais, atividades agropecuárias, desmatamentos, etc.

Quando expostos a um ambiente com alta umidade, os poluentes solúveis em água se dissociam em íons, tornando a camada de poluentes condutiva. Através dessa camada condutiva flui uma corrente elétrica de fuga que devido ao efeito Joule, provoca aquecimento proporcional ao quadrado da corrente. O aquecimento evapora a umidade criando as bandas secas, que são pequenas regiões dielétricas circundadas de regiões condutoras. O campo elétrico intenso aplicado sobre as bandas secas quebra a rigidez dielétrica do material, criando uma descarga parcial (OLIVEIRA, 2008).

3.2 DESCARGAS PARCIAIS

As descargas parciais são classificadas conforme a seguir:

- Superficial - quando o caminho condutor se encontra na superfície do dielétrico.
- Interna - quando ocorre em cavidades no dielétrico de isolamento
- Corona - quando ocorre em superfícies pontiagudas e energizadas

O escopo deste trabalho trata das descargas parciais superficiais em cadeias de isoladores. Observa-se na prática que isoladores poluídos e sem a presença de umidade elevada, orvalho ou chuva fracas não apresentam a ocorrência de descargas e que chuvas fortes lavam os isoladores, retirando os poluentes e dispensando a intervenção por parte das equipes de manutenção. Logo o cenário crítico é quando ocorrem chuvas francas ou orvalho.

As ocorrências de descargas parciais superficiais de maneira isolada e incipiente não representam, em curto prazo, problemas para a disponibilidade do ativo, linha de transmissão, no tocante a ocorrência de contornamento da cadeia de isoladores. Contudo, essas descargas incipientes produzem a ionização do átomo de oxigênio nas gotículas da molécula da água (H_2O) que passa a ser H_2O_3 , (água ozonizada); o tri-átomo do oxigênio (ozônio) se desprende da molécula e passa a ser um átomo singelo.

O ozônio tem a capacidade de oxidar o zinco que reveste a campânula e o pino dos isoladores cerâmicos, fazendo com que ele se desprenda da superfície expondo o ferro presente sob o zinco, facilitando assim a oxidação do ferro. Diante do exposto a sustentação mecânica dos cabos condutores fica comprometida, podendo resultar em rompimento do pino e conseqüente queda dos condutores ao solo, caso não seja realizada a substituição do isolador.

Com a elevação da deposição de poluentes, associada a umidade na superfície do isolador, tem-se então a dissolução do poluente e a formação de uma solução condutiva, a qual é denominada na literatura como banda úmida. Nesta solução condutiva surgem correntes de fuga ou correntes parasitas. A circulação desta corrente provoca o aquecimento da solução condutiva, devido ao efeito Joule, causando a secagem disforme de partes da região úmida, criando assim as bandas secas entremeadas por bandas úmidas. As bandas secas, por interromper o caminho de circulação das correntes

de fuga, resultam na interrupção da circulação da corrente elétrica. A consequência desta interrupção é a concentração de cargas elétricas nas regiões de contorno das bandas secas.

O intenso campo elétrico presente nestas regiões de contorno aliado ao pequeno comprimento das bandas secas acarreta na ruptura dielétrica do ar com a formação de descargas parciais entre bandas úmidas adjacentes, ou seja, por sobre as bandas secas. Esse fenômeno ocorre inicialmente entre o pino e as regiões de banda úmida podendo se prolongar por toda extensão da cadeia de isoladores e produzir um contornamento total da cadeia de isoladores, mais conhecido pelo termo em inglês *flashover*. As etapas até a ocorrência deste fenômeno estão explicitadas na Figura 3.3 e ilustradas a partir de casos reais obtidos no campo, constantes das Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

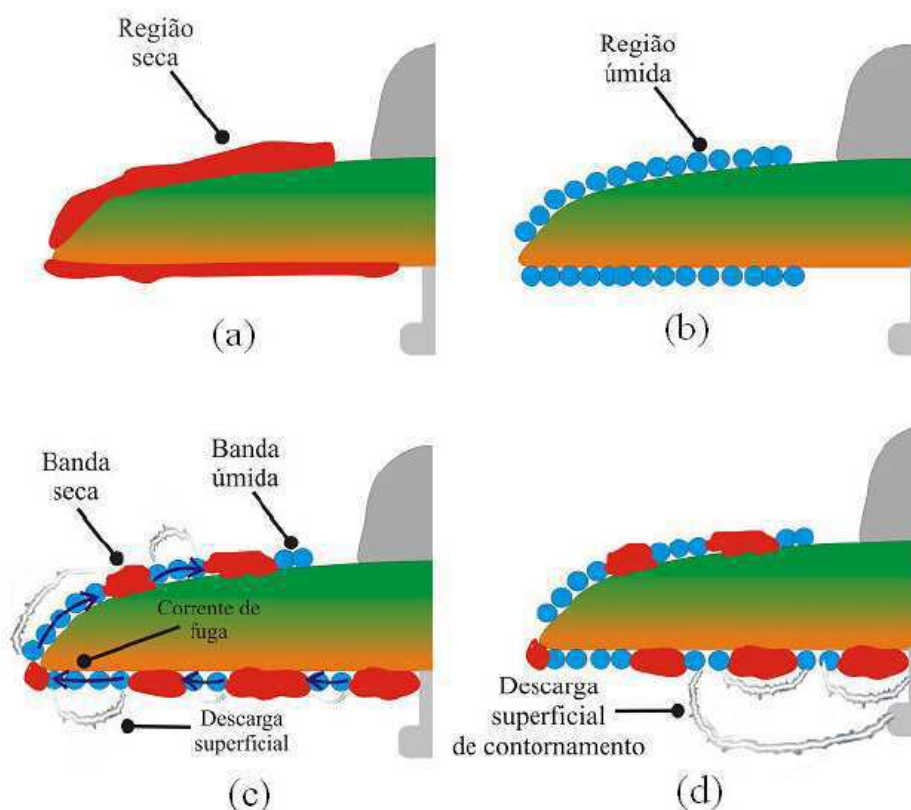


Figura 3.3. Sequência das etapas do contornamento do isolador. (a) região seca, não existe atividade; (b) isolador poluído umidificado; (c) formação de bandas secas e descargas superficiais; (d) surgimento de descargas parciais superficiais (LIMA, 2010)



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3.4. Fotos de descargas parciais durante inspeção noturna em LT 500kV na região de Petrolândia - PE. (a) cadeia de suspensão tipo I; (b) cadeia de suspensão tipo I; (c) (d) cadeia de suspensão tipo V



Figura 3.5. Isoladores de vidro temperado em cadeia de suspensão, linha de transmissão de 500kV na cidade de Glória - BA (a) vista superior com marca da descarga sofrida por poluição (b) vista inferior com marca de descarga sofrida por poluição

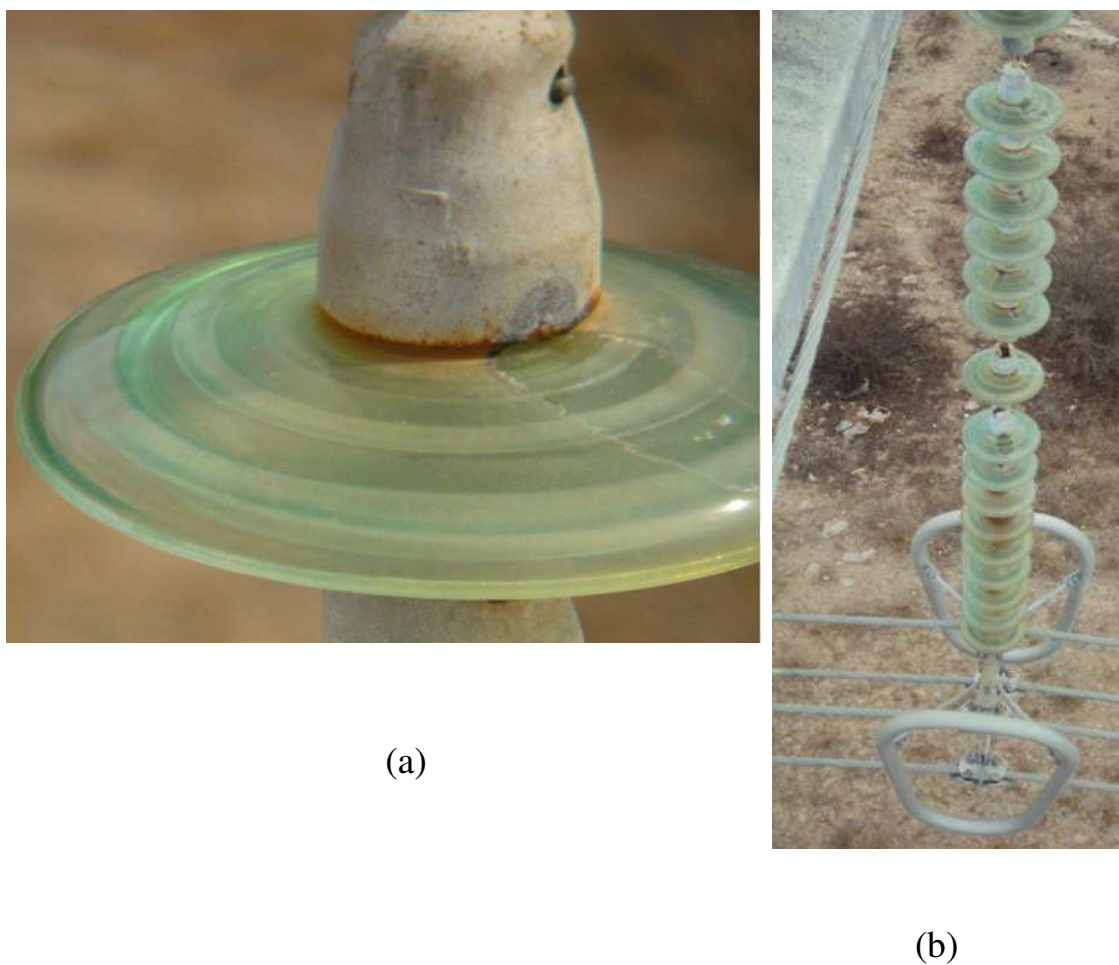


Figura 3.6. Isoladores de vidro temperado em cadeia de suspensão, linha de transmissão de 500kV na cidade de Águas Belas - PE (a) vista aumentada superior com marca da descarga sofrida por poluição (b) vista superior com toda a cadeia contornada

3.3 METODOLOGIA UTILIZADA PELA CHESF NO DIAGNÓSTICO E TRATAMENTO DA POLUIÇÃO.

A manutenção de linhas de transmissão na Chesf é preditiva, logo a mesma tem início pela inspeção, a fim de diagnosticar o estado de conservação do equipamento. No caso da inspeção para detecção de poluição em cadeias de isoladores, a mesma ocorre logo após o término da estação do ano mais chuvosa na região em análise, a fim de observar se o período chuvoso foi suficiente para a lavagem natural das cadeias de isoladores ou se será necessária a intervenção das equipes de manutenção. O horário no qual se observa a maior ocorrência das descargas parciais superficiais é entre as 23h00 e 04h00, devido à elevação da umidade relativa do ar. Para se realizar um diagnóstico adequado quanto à poluição, o melhor período do mês para se observar este fenômeno das descargas superficiais é na semana da lua nova de cada mês. A inspeção pode ser feita no período de 3 dias antes até 3 dias após a máxima escuridão da lua nova. Em noites chuvosas ou com tempo nublado, a ocorrência de descargas parciais é mais severa, devido à saturação do ar pelo aumento da umidade.

A inspeção noturna só deve ser realizada, a fim de atender os critérios técnicos estabelecidos, após a verificação através do termohigrômetro de que a umidade relativa do ar supera 80%, sendo o ideal, valores superiores a 90%.

A figura 3.7, apresenta as convenções adotadas pela Chesf relativas à nomenclatura utilizada internamente a empresa. As nervuras (N1, N2 e N3) recebem numeração crescente a partir do pino no sentido da borda (B) do dielétrico na parte abrigada do isolador. A primeira nervura (N1) é a mais próxima do pino, enquanto a última nervura (N3) é aquela próxima da borda. Tanto nas cadeias de suspensão quanto nas de ancoragem, os isoladores deverão ser identificados, em ordem crescente, partindo-se do lado energizado na direção do lado aterrado (Norma interna Chesf IM.MN.LT.M.026, 2005).

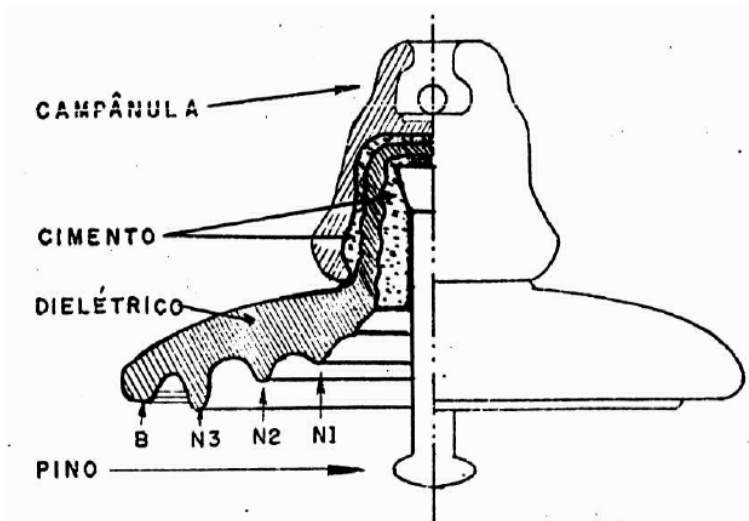


Figura 3.7. Isolador cerâmico típico com convenções adotadas pela Chesf (NORMA INTERNA CHESF IM.MN.LT.M.026, 2005)

O grau de severidade da contaminação dos isoladores pode ser classificado em S1, S2 e S3, onde, quanto maior o número, mais poluído. Esta classificação tem por objetivo subsidiar a tomada de decisão da manutenção.

Na Tabela 3.2, apresentam-se os graus de severidade da poluição em função da quantidade de isoladores com descargas parciais superficiais entre o pino e a borda (PB) ou entre o pino e a nervura 3 (PN3).

Tabela 3.2. Grau de severidade da poluição em cadeias de isoladores

TENSÃO (kV)	Nº DE ISOLADORES EM SUSPENSÃO	GRAU DE SEVERIDADE		
		S ₁	S ₂	S ₃
69	05	1	2	≥ 3
138	09	≤ 2	3 a 4	≥ 5
230	16	≤ 3	4 a 6	≥ 7
500	26	≤ 4	5 a 9	≥ 10

Fonte: (Chesf IM.MN.LT.M.026, 2005).

Além da quantidade de isoladores apresentando descargas parciais superficiais por cadeia, deverá ser considerado que caso a coloração da descarga seja amarelada ou

haja a ocorrência de fechamento de arcos em isoladores da cadeia, a severidade deverá ser considerada S3.

Para o grau de severidade S1 e S2, deve-se continuar o monitoramento e acompanhar a evolução da poluição. Para o grau de severidade S3, deve-se iniciar a lavagem de isoladores imediatamente.

As lavagens energizadas só poderão ser realizadas com tempo firme, sol forte e vento fraco. No processo de lavagem, deve-se minimizar o risco de que os respingos de uma cadeia isoladores atinja outra cadeia que não tinha sido lavada anteriormente. A Figura 3.8 mostra as posições que devem ser adotadas pelos eletricitistas quando da lavagem energizada, a fim de se evitar os respingos em cadeias de isoladores tipo I, tipo V e cadeia de ancoragem.

Para lavagem energizada, a água deve ter condutividade inferior a $20\mu\text{S}\cdot\text{cm}$ e pressão entre 400 e 800 PSI, de modo que rapidamente a contaminação impregnada nos isoladores seja retirada, não permitindo o aparecimento de correntes de fugas elevadas que possam ocasionar indesejáveis aberturas de arcos (Norma interna Chesf IM.MN.LT.M.011, 2010).

A corrente de fuga que circula no jato d'água entre a cadeia de isoladores e a pistola da lavagem deve ser controlada através da distância entre elas, do diâmetro do bico da pistola e da condutividade da água utilizada na lavagem. Como a condutividade da água após tratamento é padronizada em $20\mu\text{S}\cdot\text{cm}$, a distância mínima de lavagem para os bicos padronizados é definida conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Distância de segurança da lavagem X Condutividade da água

TENSÃO (kV)	DISTÂNCIA MÍNIMA DE LAVAGEM CONDUTOR À PISTOLA (m)		CONDUTIVIDADE MÁXIMA DA ÁGUA ($\mu\text{S} \times \text{cm}$)
	BICO 3/16"	BICO 1/4"	
69	2,00	3,00	20
138	3,25	4,20	
230	3,70	4,60	
500	4,30	5,20	

Fonte: (Chesf IM.MN.LT.M.011, 2010)

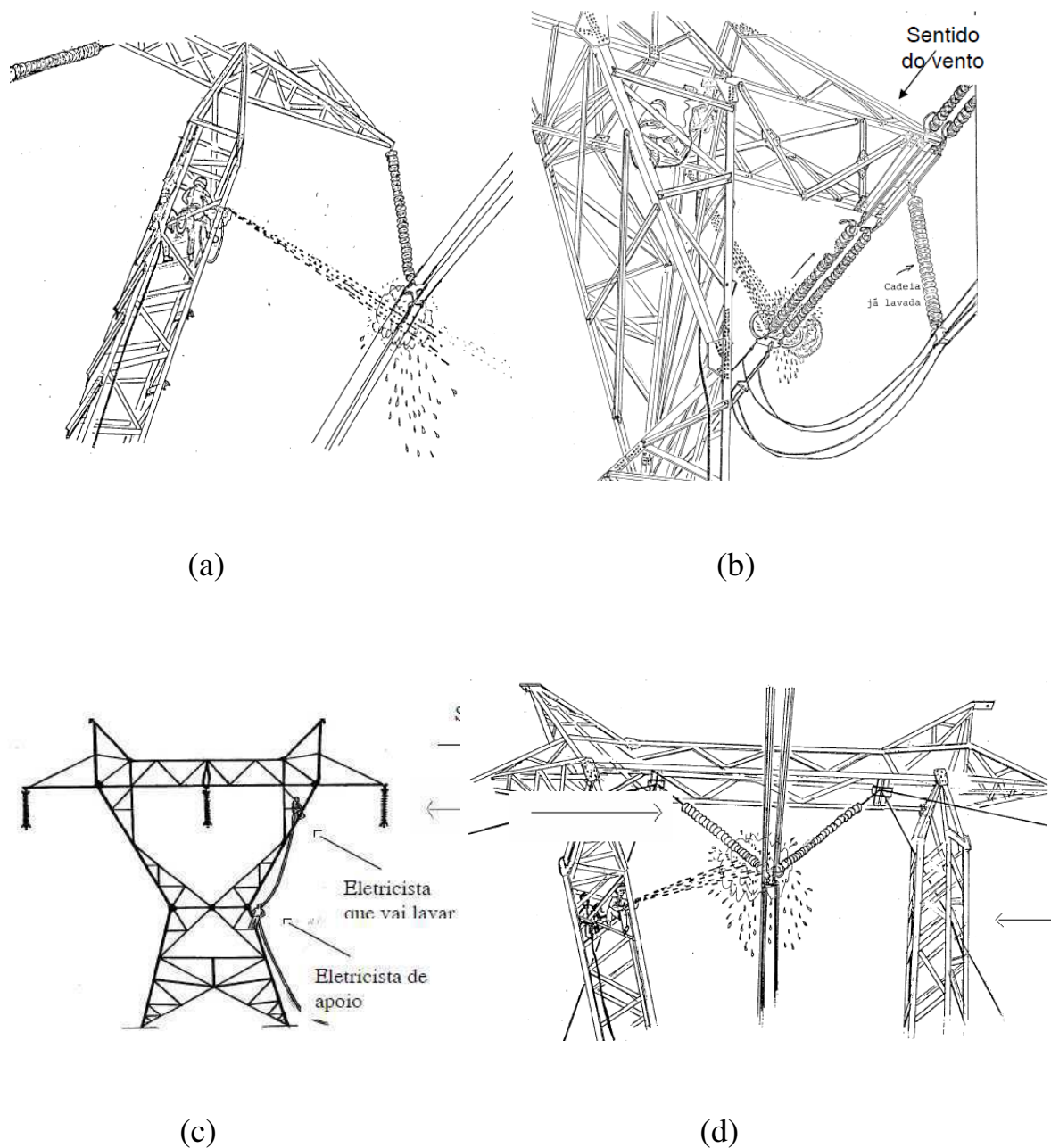


Figura 3.8. Posicionamento do eletrícista na lavagem energizada da isoladores (a) cadeia tipo I (b) cadeia de ancoragem (c) posicionamento do eletrícista com pistola e de apoio (d) cadeia tipo V (NORMA INTERNA CHESF IM.MN.LT.M.011, 2010)

Apesar dos avanços obtidos com a sistemática de monitoração e lavagem dos isoladores empregados na Chesf, a partir das constatações estatísticas registradas na Figura 1.1, observa-se que ainda há muito a ser refinado, corroborando a necessidade do desenvolvimento de tecnologia mais precisa de diagnóstico.

CAPÍTULO 4

PROJETOS DE MONITORAÇÃO DE POLUIÇÃO EM CADEIAS DE ISOLADORES

4.1 PROJETO DE MONITORAÇÃO DESENVOLVIDO EM LABORATÓRIO

Um dos projetos utilizados como fundamento para este trabalho se propunha a avaliar diversos tipos de monitoração, utilizando detector de ultrassom, infravermelho, corrente de fuga e sinais de Very High Frequency - VHF, extraído-se diversos tipos de atributos. Esses atributos tiveram suas validades aferidas trabalhando isoladamente ou utilizando-se dois ou mais processos simultaneamente, a fim de se obter o melhor diagnóstico.

O projeto tinha um caráter mais acadêmico, voltado para desenvolver e testar diversos atributos formulados, adquiridos a partir de sinais oriundos de sensores comercialmente disponíveis no mercado. Supunha-se que a aplicação prática requeria adequações específicas.

Para o escopo deste trabalho, é aderente apenas a parcela do projeto no que tange ao diagnóstico de poluição em isoladores a partir da aferição de sinais de corrente de fuga. A seguir serão relatadas as etapas para realização do experimento de laboratório para aquisição da corrente de fuga.

Para simulação de poluição nos isoladores de vidro, foi criada artificialmente uma camada de contaminação. Este contaminante foi preparado em laboratório de

química e em conformidade com os critérios estabelecidos pela *Electric Power Research Institute - EPRI (1975)*, conforme é detalhado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Caracterização dos níveis de poluição de acordo com EPRI (1975)*

Níveis	Classificação	Faixa de ESDD (mg/cm ²)
1	Atmosfera limpa.	0,00 – 0,032
2	Contaminação muito leve.	0,032 – 0,038
2'	Contaminação leve.	0,038-0,056
3	Contaminação pesada.	0,056 – 0,123
4	Contaminação muito pesada.	Maior que 0,123

Fonte: (BEZERRA, 2004)

* A classe 2' foi definida, em complemento à caracterização de EPRI (1975), com o intuito de gerar amostras mais espaçadas/diversificadas e, desta forma, poder produzir conjuntos de treinamento para o processo de classificação dos sinais bem mais próximos de situações reais encontradas em isoladores de alta tensão presentes em um sistema de transmissão.

Em função do agrupamento estabelecido na Tabela 4.1, foram aplicados níveis de poluição específicos em conformidade com os procedimentos descritos na *International Electrotechnical Commission - IEC (1991)*, tendo-se optado pela composição de caulim para formação da solução aplicada sobre a superfície do isolador: 40 g de caulim, 1000 g de água destilada e quantidade de NaCl de pureza comercial necessária para produzir a condutividade apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Valores escolhidos para elaboração das soluções

Níveis	ESDD(mg/cm ²)	Condutividade da suspensão (mS/cm)
1	0,025	10
2	0,035	14
2'	0,05	20
3	0,1	40
4	0,2	80

Fonte: (BEZERRA, 2004)

Após a produção das soluções, foram selecionados cinco isoladores de vidro de características geométricas idênticas para serem pulverizados superficialmente com as soluções adequadamente diluídas e em seguida, postos para secar conforme Figura 4.1.



Figura 4.1. Secagem dos isoladores após aplicação artificial dos cinco níveis de poluentes

A umidade saturada necessária para o experimento foi obtida através de uma câmara de névoa que foi implementada no Laboratório de Alta Tensão - LAT da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em conformidade com a IEC (1991), visando obter similaridade com as condições reais encontradas em campo. A câmara foi confeccionada em acrílico nas dimensões de 0,9 m x 0,9 m x 1,4 m, conforme se encontra ilustrada na Figura 4.1.

A alimentação do circuito se deu através de bucha polimérica, desenvolvida a partir de isolador polimérico industrial, perfurado e transpassado por haste metálica, com extremidades afixadas em conectores de latão com diâmetro aumentado e acabamentos especiais, para evitar descargas corona indesejáveis. A alimentação do circuito foi feita através do pino do isolador e o condutor terra ligado à campânula, o qual era responsável, também, por transmitir a corrente de fuga do isolador para ser devidamente registrada através de digitalizador.

A névoa salina foi formada por seis pares de bicos injetores, colocados três a três em faces opostas, no qual o bico horizontal é responsável pela alimentação de água e o vertical, pela alimentação de ar comprimido. A névoa foi formada a partir do encontro dos fluídos.

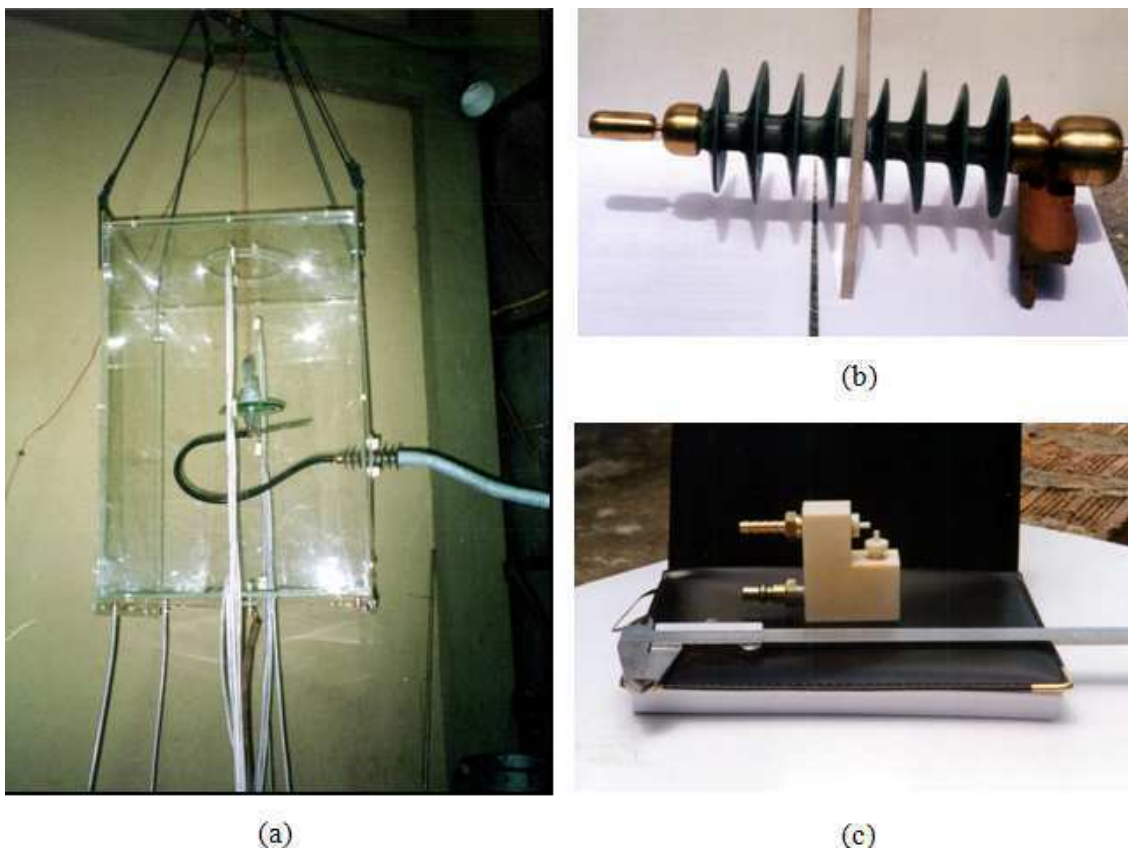


Figura 4.2. Foto da câmara de névoa: (a) vista da câmara ilustrando as suas alimentações de tensão elétrica, água e ar comprimido; (b) bucha polimérica para passagem da alimentação de tensão elétrica; (c) par de bicos injetores (BEZERRA, 2004)

Em seguida aplicou-se tensão de 7 kV (por unidade isolante) em função de análises prévias direcionadas no sentido de se identificar um valor limite que poderia ser aplicado sem o risco da ocorrência de curto circuito sobre o objeto ensaiado, a fim de se evitar a queima de algum equipamento. Essa tensão foi devidamente aferida através dos modelos descritos por (RIZK, 1981) e (SUNDARARAJAN E GORUR,1993), os quais foram adaptados/implementados para aferir a tensão de ensaio utilizada.

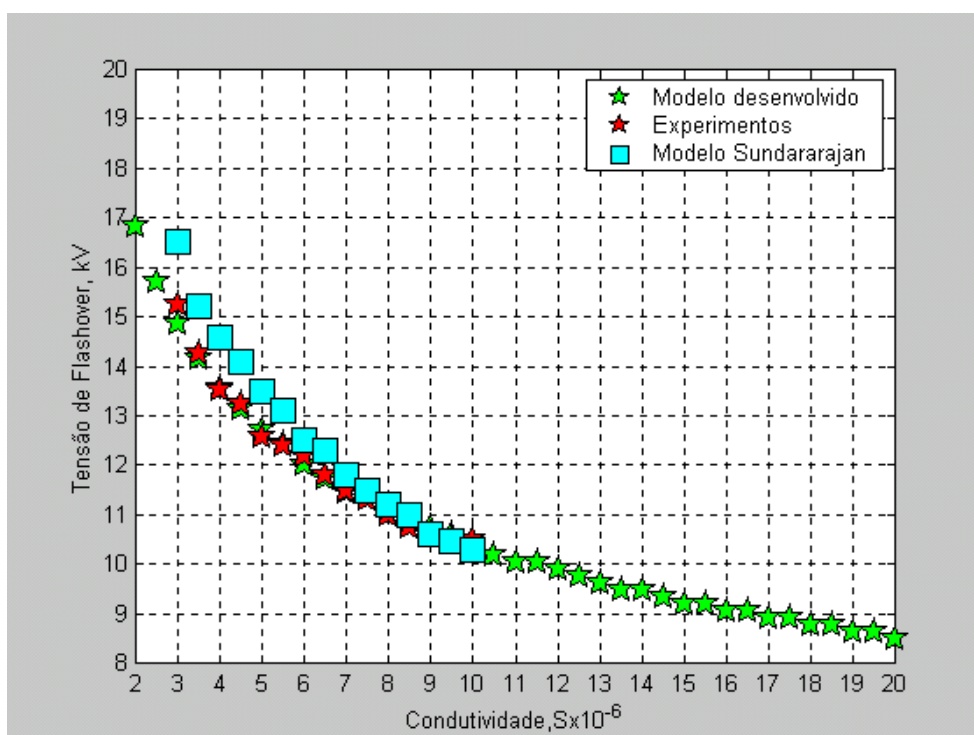
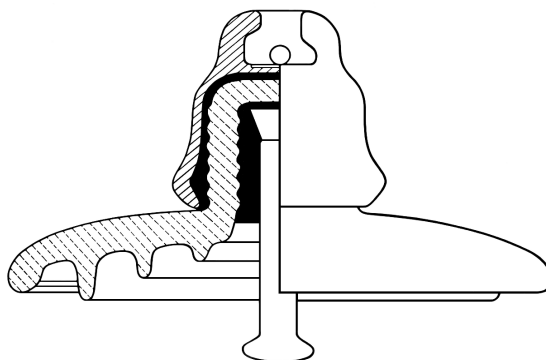


Figura 4.3. Tensões de descarga para os isoladores (BEZERRA, 2004)

Para cada um dos cinco níveis de poluição descritos na Tabela 4.1, foi montado o experimento com o isolador, câmara de névoa e aplicação da tensão especificada. Para cada uma das amostras foi aplicada a tensão de 7 kV durante um período de 100 ciclos. Nas figuras a seguir apresenta-se uma amostra da corrente de fuga para cada nível de poluição especificado.

Na Figura 4.4, isolador limpo, observa-se um comportamento capacitivo da corrente de fuga, chegando a amplitudes próximas a 80mA. Após inserção gradativa da

poluição artificial, o circuito torna-se predominantemente resistivo as amplitudes de corrente diminuem com o aumento da poluição. Este fenômeno em evolução pode ser observado conforme as Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

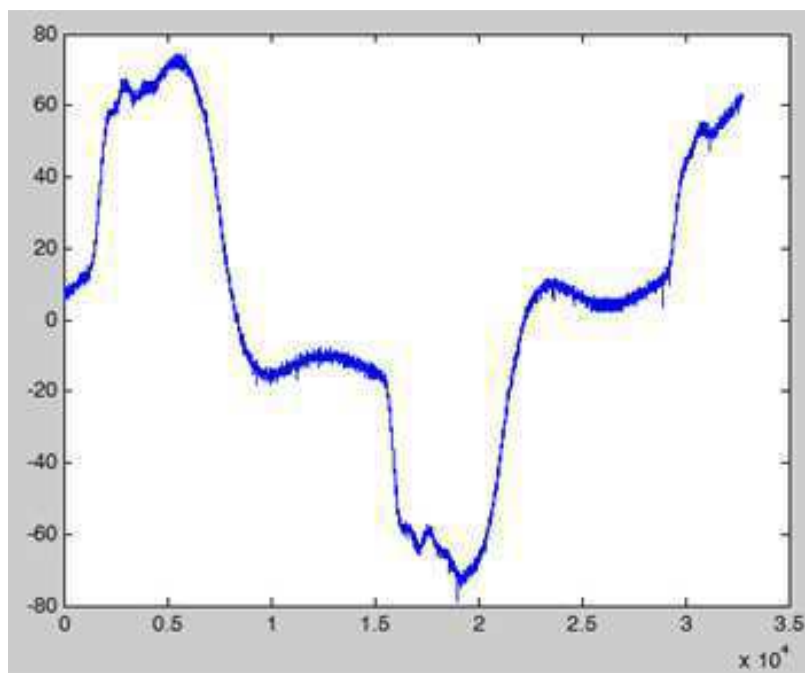


Figura 4.4. Nível 1, atmosfera limpa – ESDD 0,025 mg/cm²

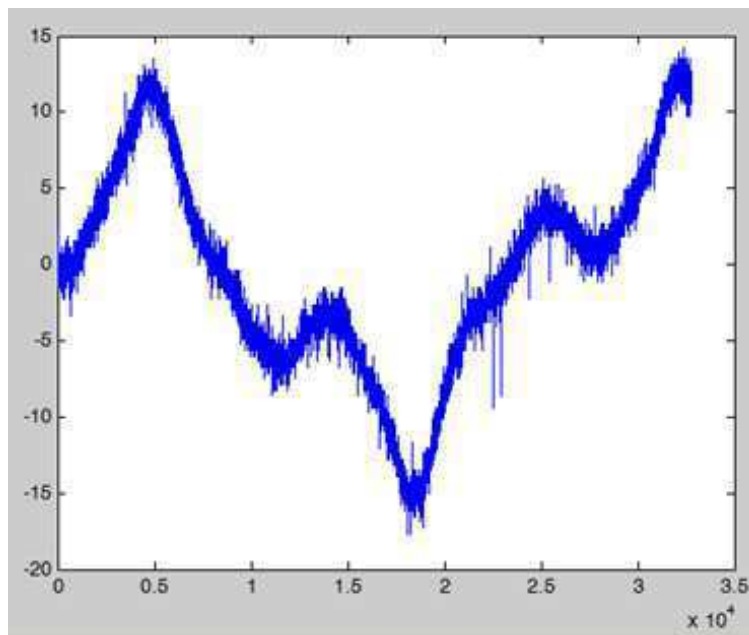


Figura 4.5. Nível 2, contaminação muito leve – ESDD 0,035 mg/cm²

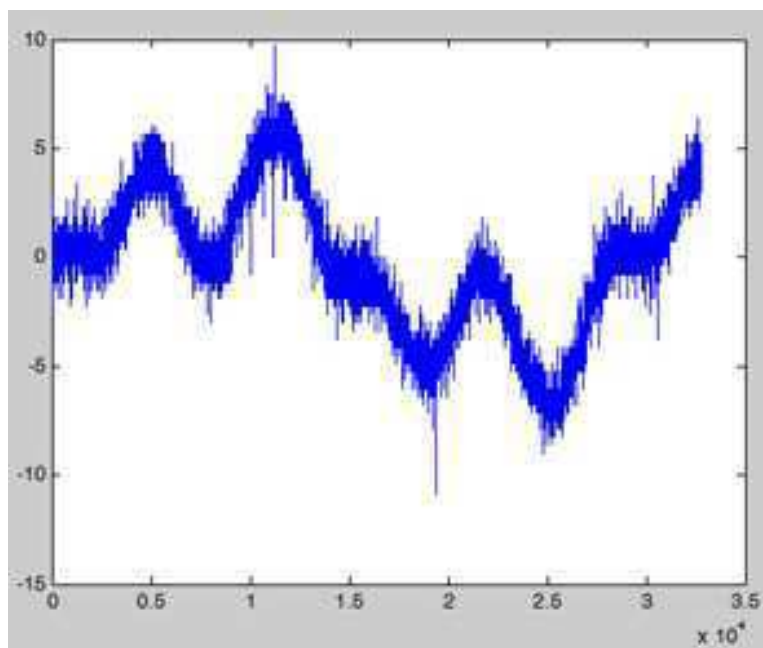


Figura 4.6. Nível 2', contaminação leve – ESDD 0,050 mg/cm²

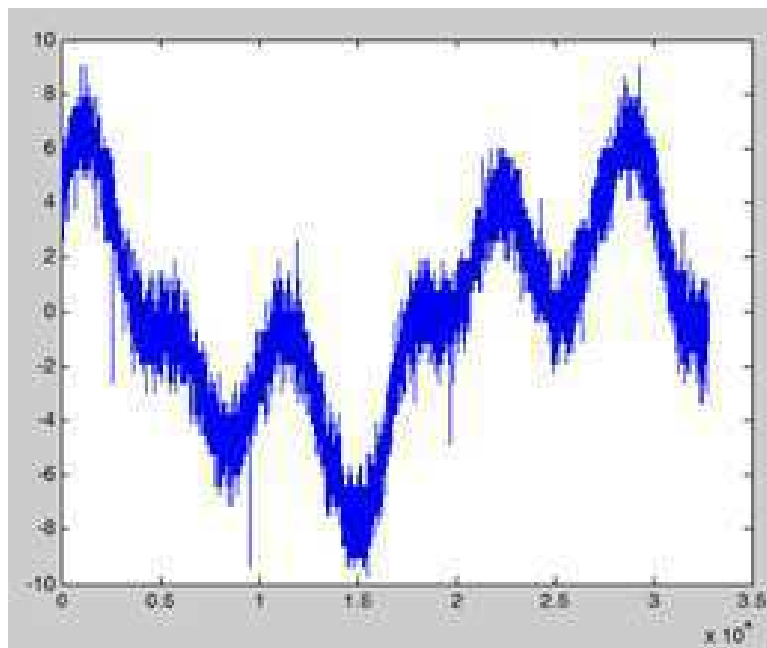


Figura 4.7. Nível 3, contaminação pesada – ESDD 0,100 mg/cm²

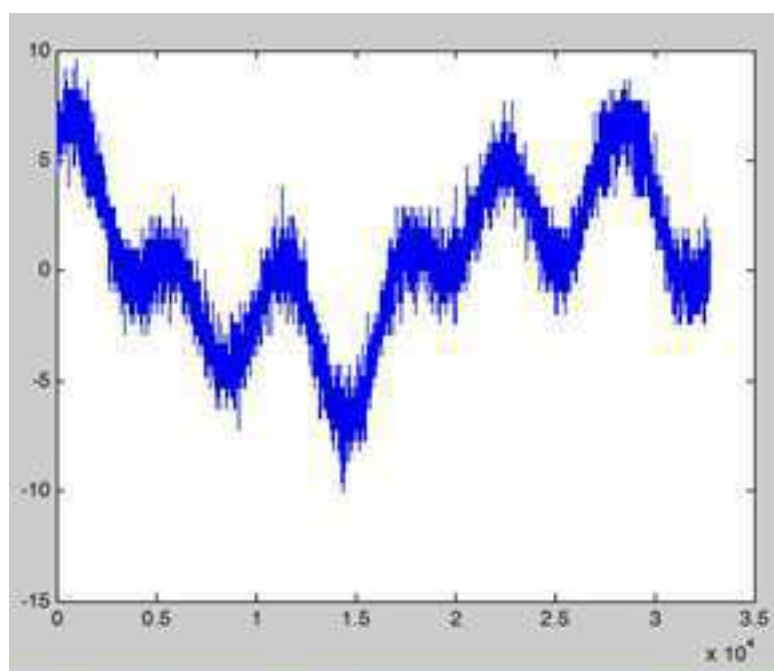


Figura 4.8. Nível 4, contaminação muito pesada – ESDD 0,200 mg/cm²

4.2 PROJETO DE MONITORAÇÃO DESENVOLVIDO PARA O USO EM CAMPO

O outro processo de monitoração utilizado neste trabalho foi desenvolvido pelo Grupo de Fotônica do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE que criou um sistema baseado na monitoração da corrente de fuga.

A monitoração da corrente de fuga como forma de avaliar a redução na capacidade de isolamento da cadeia de isoladores provocada pelo acúmulo de poluição permite a medição em tempo real, evita a remoção dos isoladores, permite a monitoração contínua, possibilitando o estudo da dinâmica de deposição dos poluentes ao longo do tempo, permite a utilização de sensores passivos e dispensa o uso de isoladores testemunha (OLIVEIRA, 2008).

O grupo de fotônica, citado anteriormente, desenvolveu um sistema óptico de monitoração e realizou uma série de experimentos em laboratório e em campo, para determinar as características da forma de onda da corrente de fuga diretamente correlacionadas com a possibilidade de ocorrência de *flashover* em cadeias de isoladores. O Grupo identificou a partir de experimentos em laboratório que a amplitude da componente senoidal não fornecia informação significativa da iminência de *flashover*. Por outro lado, observaram que a amplitude e taxa de ocorrência de pulsos de descargas superficiais estava diretamente correlacionada à iminência de *flashover*. Experimentos em campo comprovaram que a componente senoidal, mesmo em cadeias altamente poluídas e com alta ocorrência de descargas superficiais se mantinha estável com amplitude próxima a um valor típico de 1 mA. Este fato pode ser comprovado na Figura 4.9 que representa a forma de onda da corrente de fuga registrada em uma cadeia de isoladores de uma torre de 500 kV localizada na Serra de Maranguape, no estado do Ceará. A umidade relativa no instante do monitoramento era de 80,4%.

Apenas semiciclos positivos são detectados pelo sistema sensor. Conforme se pode observar, há saturação da componente senoidal da corrente de fuga em aproximadamente 1 mA e existência de pulsos intensos, a grande maioria de curta duração, devido à ocorrência de descargas superficiais ao longo dos isoladores. Os pulsos mais intensos e de mais longa duração correspondem às várias descargas parciais geradas, quase que simultaneamente, em vários isoladores. Com isso, o parâmetro

eficaz de avaliação do estado de poluição de isoladores é a monitoração da taxa de ocorrência de pulsos de descargas parciais identificados na forma de onda da corrente de fuga, em conjunção com a monitoração da umidade ambiente (LIMA, 2010).

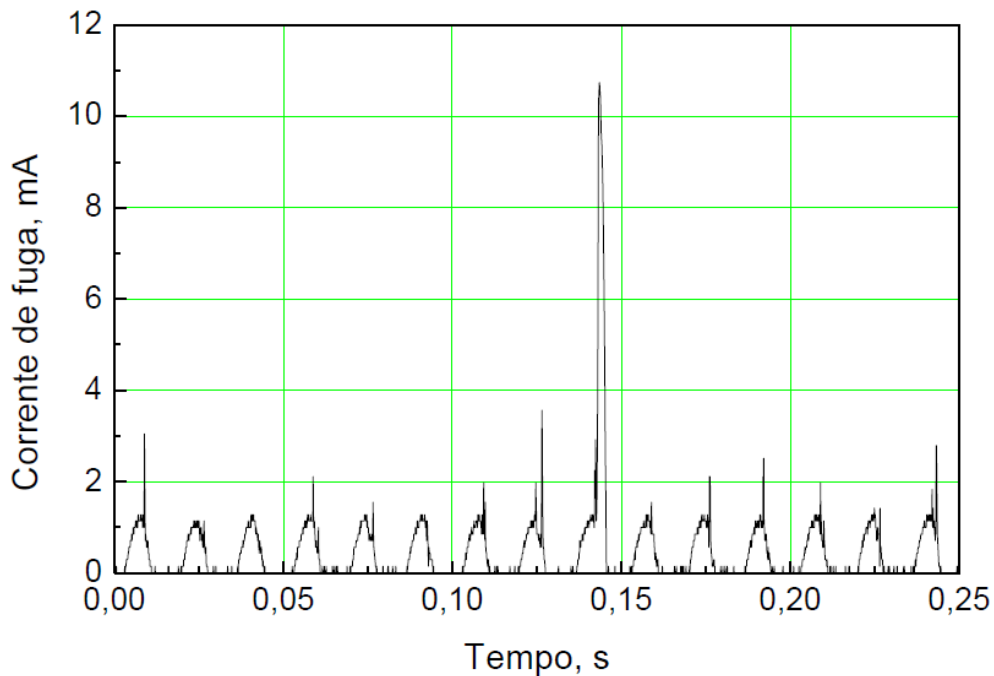


Figura 4.9. Forma de onda da corrente de fuga registrada em torre de 500 kV (FONTANA, 2006)

O sistema óptico de monitoração desenvolvido pelo Grupo de Fotônica foi instalado no isolador mais próximo da torre e capta a corrente de fuga no mesmo. No circuito do sistema óptico existe um *Light Emitting Diode* – LED, que na presença da corrente de fuga emite um sinal luminoso que é conduzido através da fibra óptica, até o circuito contador de corrente de fuga. No armário fechado, mostrado na Figura 4.10, esse sinal luminoso é processado e a contagem de ocorrência de corrente de fuga por hora, assim como dados dos sensores de umidade e temperatura são transmitido via satélite, conforme o desenho esquemático da Figura 4.11. O sistema é alimentado através de uma bateria carregada via painel solar.

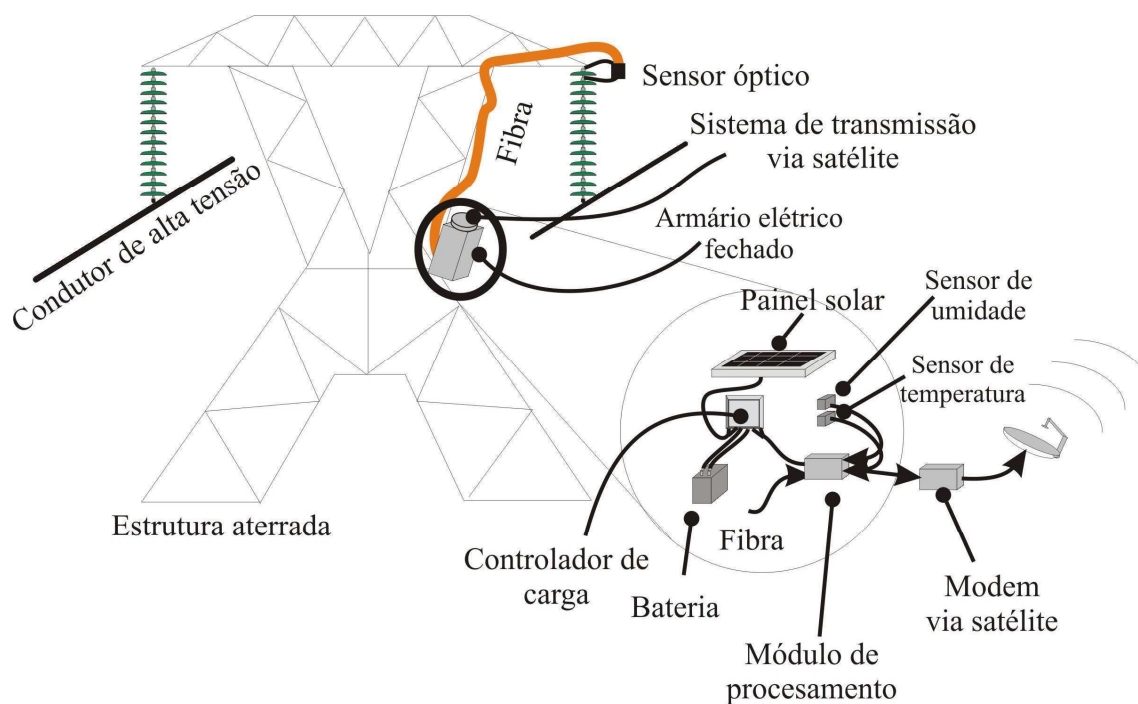


Figura 4.10. Diagrama esquemático de fixação na estrutura da LT (LIMA, 2010).

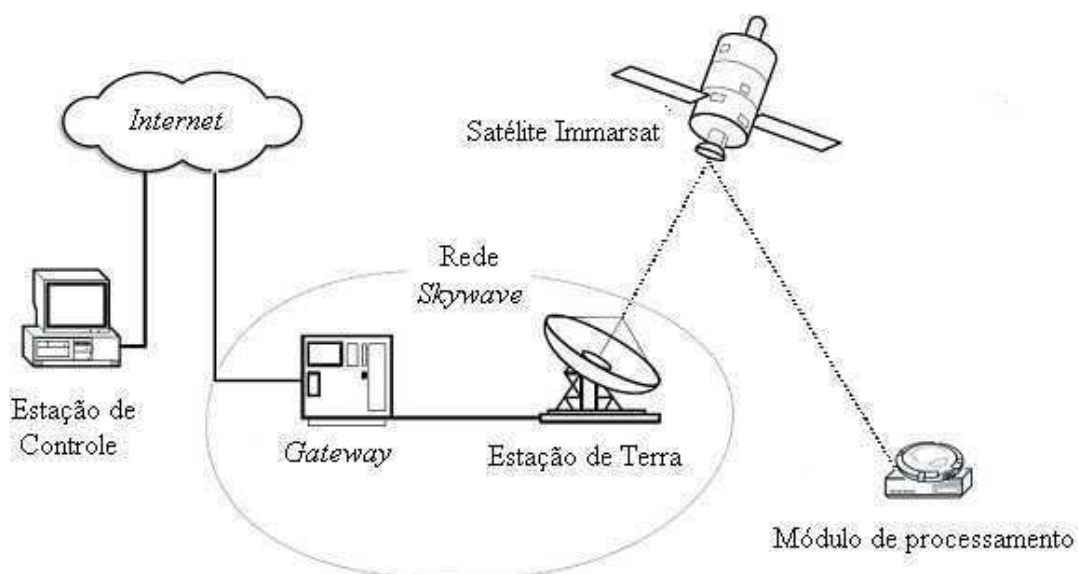


Figura 4.11. Diagrama esquemático do sistema de transmissão de dados (LIMA, 2010).

O sistema detecta o sinal óptico gerado pela corrente de fuga, e separa-o em três categorias: N1, N2, N3 para intensidades de corrente de fuga de 5, 10 e 20 mA,

respectivamente. Estes valores foram classificados como: baixa intensidade de corrente de fuga, fuga de corrente não-agressiva, e corrente de fuga altamente agressiva, respectivamente. Logo quando da ocorrência dos níveis N1 e N2, nenhuma manutenção é necessária, apenas deve-se observar a evolução do nível N2. No nível N3, ações de manutenção são imediatamente necessárias.

Se qualquer pulso de corrente for detectado com valor de pico situado nas faixas definidas pelos níveis N1, N2 ou N3, o contador temporário correspondente é incrementado (OLIVEIRA, 2009a).

No trabalho de LIMA (2010) foi acrescentado mais um nível na contagem, com isso o medidor passou a contabilizar os pulsos da seguinte forma:

- Faixa N1: $I_p > 5\text{mA}$
- Faixa N2: $I_p > 10\text{ mA}$
- Faixa N3: $I_p > 20\text{ mA}$
- Faixa N4: $I_p > 40\text{ mA}$

O número de picos registrados por unidade de tempo em cada faixa depende do grau de poluição em uma dada cadeia de isoladores, da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente. O aplicativo com banco de dados e interface gráfica de Avaliação de Desempenho Elétrico de Cadeias de Isoladores - ADECI armazena as informações e permite sua representação gráfica ou a listagem dos parâmetros medidos. A Figura 4.12 mostra a tela principal do ADECI com a localização da instalação dos medidores no sistema da Chesf. Acessando o medidor da LT, cujas extremidades são as usinas hidroelétricas de Luiz Gonzaga e a usina de Sobradinho, por exemplo, tem-se a tela mostrada na Figura 4.13, onde tem-se informações a respeito do local onde o medidor está instalado, assim como o menu com opções de consulta, na parte superior desta tela do ADECI.

Chesf
Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

OPÇÕES DE CADASTRO

- CADASTRAR USUÁRIO
- REMOVER USUÁRIO
- ATUALIZAR USUÁRIO
- ALTERAR SENHA
- CONSULTAR USUÁRIO

MONITORAMENTO DE PICOS

- INSERIR SENSOR
- VISUALIZAR SENSORES

CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES

- CONFIGURAR SENSORES
- ATUALIZAR CONFIGURAÇÃO
- VISUALIZAR CONFIGURAÇÃO
- SAIR

Escolha o sensor a ser monitorado

Nome da LT	Número da Torre	Fase
xxx.x	xxx	A
Cmd/Mtt u1 - 2012.3	UH05 - Adrt/Co	A
Sobral - Cauípe 2012.8	102/1	B
Teresina 2 - Sobral 3 - 2012.7	305/1	B
Pórtico EL SE-NTD - 2012.6	SE-NTD	C
Sobral 3 - Fortaleza 2 2012.5	153/2	A
Sobral - Cauípe 2012.4	05/1D	A
JDMCMQW1 - 2012.2	49/1	A
LGZSOBW1 - 2012.1	51/2	C
Banabuiu Mossoró II - 07	173/1	C
Sobral III- Fortaleza II-6	29/1	B
Quixadá Fortaleza II - 5	138/1	A
Sobral III-Fortaleza II -4	194/3	B
Rio Largo-Penedo-3	72/1	A
Angelim-Recife II-2	1/1	A

Figura 4.12. Tela inicial do aplicativo Avaliação de Desempenho Elétrico de Cadeias de Isoladores - ADECI.

VISUALIZAR ATIVIDADES **VISUALIZAR COMENTÁRIOS** **VISUALIZAR INTERVENÇÕES**

ALTERAR DADOS **INSERIR COMENTÁRIO** **INSERIR INTERVENÇÃO** **DETALHES**

Nome da LT: [LGZSOBW1 - 2012.1](#) **Número da Torre:** [51/2](#) **Fase:** [C](#) **Alerta** ●

Nome da LT	LGZSOBW1 - 2012.1
Código da LT	05C3
Número da Torre	51/2
Número do MODEM	4685477
Tensão na Linha	500 kV
Código de Operação	05C3
Fase	C
Tipo da Cadeia	Suspensão
Cordão	-
Tipo do Isolador	VIDRO - V12
Mantenedor	SPML
Data de Instalação	04/03/2013
RH _{min}	0,0
RH _{máx}	100,0
Calibração A da umidade	0,9024
Calibração B da umidade	0,030834

Figura 4.13. Tela com dados do local de instalação de um medidor específico e suas opções de consulta.

A partir deste aplicativo foram extraídos os dados catalogados pelos sensores instalados nas linhas de transmissão de 500 kV da Chesf, cujas extremidades são as subestações de Jardim – Camaçari Quatro e Luiz Gonzaga – Sobradinho, respectivamente. Nas Tabelas 4.3 e 4.4. podem-se observa que a afirmativa que OLIVEIRA (2009a) faz em relação à necessidade imediata de ações da manutenção quando da ocorrência de descargas acima do nível N3 não se confirmou em campo. Mesmo com a criação de mais um nível N4 por LIMA (2010), esta afirmação não se mostrou conclusiva, uma vez que mesmo quando da ocorrência deste último nível de descarga, não houve *flashover*. Isso motivou a pesquisar um processo inteligente que ajude na classificação e diagnóstico mais adequado e coerente com a realidade encontrada no campo.

Tabela 4.3. Informações obtidas através do aplicativo ADECI

JDM CMQ							
Data	Hora	N1	N2	N3	N4	Temperatura	Umidade
15/03/2013	16:00	0	0	0	0	33,57	41,11
15/03/2013	17:00	0	0	0	0	32,63	47,6
15/03/2013	18:00	0	0	0	0	30,43	58,95
15/03/2013	19:00	5493	1081	3	0	27,92	71,27
15/03/2013	20:00	20088	7870	209	0	26,98	79,06
15/03/2013	21:00	15578	7091	279	0	26,67	81,97
15/03/2013	22:00	17829	8215	1812	0	26,35	84,57
15/03/2013	23:00	23215	10696	4409	0	26,04	88,46
16/03/2013	00:00	25869	12187	4168	0	25,73	89,43
16/03/2013	01:00	26402	11391	3827	0	25,73	90,08
16/03/2013	02:00	21089	9620	3803	0	25,41	91,38
16/03/2013	03:00	22777	10559	4314	0	25,41	91,7
16/03/2013	04:00	20013	10250	3811	0	25,1	92,68
16/03/2013	05:00	15285	5338	1504	1	24,47	94,95
16/03/2013	06:00	156982	67620	12227	1967	24,16	97,87
16/03/2013	07:00	258185	189556	27890	124	25,73	93,65
16/03/2013	08:00	6690	0	0	0	32	69
16/03/2013	09:00	0	0	0	0	32,63	59,6
16/03/2013	10:00	0	0	0	0	34,51	52,14

Fonte: ADECI

Tabela 4.4. Informações obtidas através do aplicativo ADECI

LGZ SOB							
Data	Hora	N1	N2	N3	N4	Temperatura	Umidade
05/03/2013	22:00	0	0	0	0	27,92	68,35
05/03/2013	23:00	0	0	0	0	26,67	75,81
06/03/2013	00:00	22	0	0	0	25,73	78,41
06/03/2013	01:00	2450	2009	68	0	24,78	83,92
06/03/2013	02:00	5703	5901	3590	3	23,84	92,03
06/03/2013	03:00	8649	6169	6704	267	23,22	98,51
06/03/2013	04:00	8527	7624	7931	505	23,22	100,14
06/03/2013	05:00	6740	7031	7366	34	23,22	99,81
06/03/2013	06:00	8044	8510	9020	146	22,9	101,76
06/03/2013	07:00	5873	6162	6693	33	23,22	99,81
06/03/2013	08:00	2802	2718	1408	0	26,04	86,84
06/03/2013	09:00	47	0	0	0	28,24	71,27
06/03/2013	10:00	0	0	0	0	29,8	58,3

Fonte: ADECI

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA RECONHECIMENTO DE PADÃO.

Em busca da obtenção de resultados coerentes com os fenômenos observados em campo, surgiu a necessidade de se utilizar um projeto mais inteligente de reconhecimento de padrões, que é definida, formalmente, como sendo um processo pelo qual um sinal recebido é atribuído a uma classe, dentre as classes anteriormente determinadas (BEZERRA, 1995).

Este capítulo apresenta referencial teórico sobre técnicas de inteligência artificial utilizadas neste trabalho quando da busca pela caracterização entre cinco classes de intensidade de poluição, através dos dados obtidos em campo pelo contador de descargas parciais, apresentado no capítulo 4.

No capítulo 3 foi apresentado o projeto de poluição artificial de isoladores submetidos à aplicação de tensão, dentro de uma câmara de neblina. O objetivo desse experimento foi à aquisição de dados de corrente de fuga, cuja intensidade de poluição era conhecida, para treinamento da rede neural artificial.

5.1 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

5.1.1 Introdução

As redes neurais artificiais são sistemas paralelos compostos por unidades de processamento simples, neurônios, que calculam determinadas funções matemáticas, lineares ou não-lineares (BRAGA, 2000).

Os neurônios são dispostos em uma ou mais camadas, interligadas por um grande número de conexões. Na maioria dos modelos, estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. O funcionamento destas redes é inspirado em uma estrutura física concebida pela natureza: o cérebro humano é composto de aproximadamente 100 bilhões de neurônios biológicos (WASSERMAN, 1993).

Dentre as principais características das redes neurais artificiais, pode-se citar:

- Capacidade de *generalizar*, isto é, de fornecer resultados corretos a partir de entradas não exatamente iguais às utilizadas durante seu *aprendizado*;
- Possuem estrutura maciçamente distribuída, isto é, o conhecimento adquirido é armazenado de forma “pulverizada”, o que torna as redes neurais muito tolerantes a falhas;
- Permitem a avaliação da confiabilidade de suas conclusões, resultando em algoritmos de tomadas de decisão mais confiáveis;
- Conseguem se adaptar facilmente às novas condições do meio, permitindo a criação de sistemas estáveis;
- A complexidade de sua estrutura não permite visualização fácil de sua base de conhecimento, sendo muitas vezes encaradas como “caixas pretas”;
- Seu treinamento (aprendizado) pode demandar muito tempo e exigir um *hardware* de alta capacidade computacional;

5.1.2 Neurônio Biológico e Artificial

De forma simplificada pode-se dizer que o sistema nervoso humano é composto por uma central de processamento, o cérebro, e por sensores e atuadores. O cérebro, por sua vez, é formado por uma enorme quantidade de unidades básicas de processamento,

denominadas neurônios, os quais são constituídos por três partes: corpo celular, dendritos e axônio. Os dendritos são responsáveis por receber impulsos elétricos (informações) e enviá-los ao corpo celular para que sejam processados. O resultado desse processamento é também um impulso elétrico, o qual é propagado através do axônio. O local de conexão entre os neurônios é chamado de sinapse, no qual os neurônios são interligados paralelamente, formando a rede neural biológica (THIBODEAU, 2002).

Uma representação de um neurônio típico é mostrado na Figura 5.1

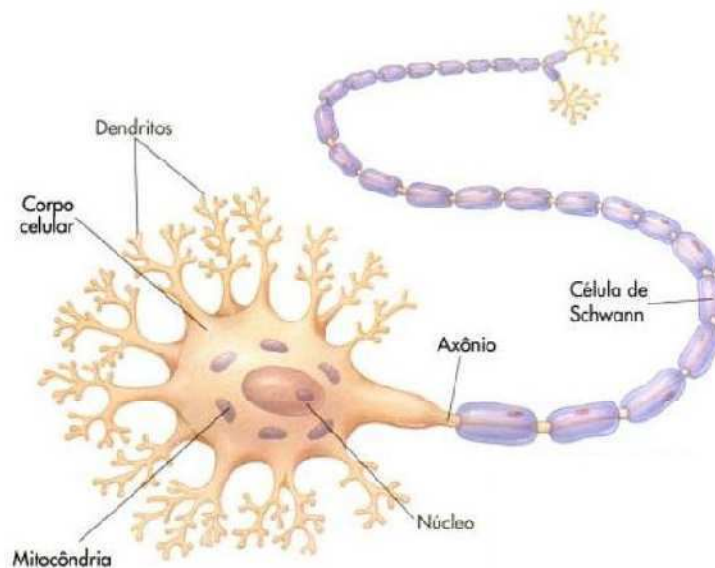


Figura 5.1. Neurônio típico (THIBODEAU, 2002).

Um neurônio pode ser comparado com uma unidade de operação básica de silício. Nesse caso, tem-se que, em média, um neurônio é cerca de um milhão de vezes mais lento que um circuito de silício (10^{-9} [s/operação] x 10^{-3} [s/operação]), porém gasta 10 bilhões de vezes menos energia (10^{-16} [J/operação.s] x 10^{-6} [J/operação.s]). Ainda assim o cérebro humano é muito mais rápido que qualquer computador já construído, compensando a baixa velocidade dos neurônios através da associação em paralelo dos mesmos.

A rede neural do cérebro humano é composta por aproximadamente 10 bilhões de neurônios e 60 trilhões de sinapses, resultando na formação de uma estrutura maciçamente paralela. O processamento de informações nessa estrutura é, portanto, bem diferente daquele realizado nos atuais computadores, onde as informações são processadas de maneira seqüencial. Também é bastante diferente a forma com que as informações são armazenadas, uma vez que no cérebro humano as informações são organizadas de acordo com suas características e estão distribuídas ao longo da estrutura (HAYKIN, 2001).

Inspirado no neurônio biológico e desenvolvido a partir de trabalhos conjuntos entre profissionais das áreas de ciências biológicas, humanas e exatas, o neurônio artificial pode ser definido como sendo a unidade de processamento fundamental de uma rede neural. Sua representação gráfica é mostrada na Figura 5.2.

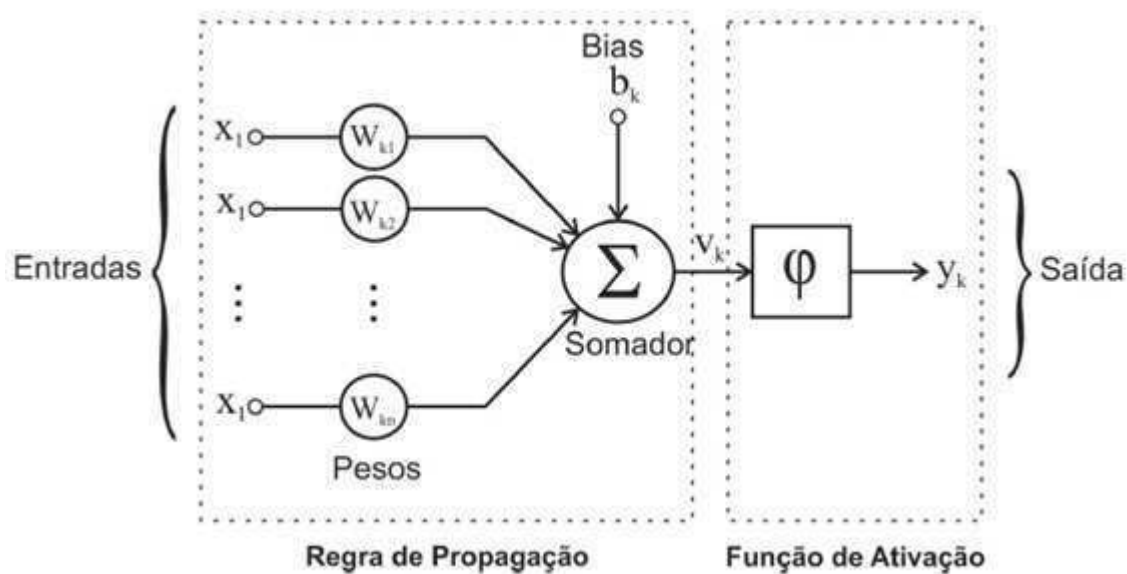


Figura 5.2. Neurônio artificial não-linear (SANTOS, 2008)

Conforme se vê, o neurônio artificial é composto por dois módulos de processamento. O primeiro módulo, denominado regra de propagação, executa uma soma ponderada das entradas x_i multiplicadas pelos pesos sinápticos, w_i , associados a cada entrada. O segundo módulo de processamento, denominado função de ativação, aplica uma função ao resultado da regra de propagação. O resultado da função de ativação é a saída y_k do neurônio artificial (HAYKIN, 2001)

5.1.3 Aprendizagem

Uma das habilidades mais importantes de uma rede neural é a capacidade de aprender, isto é, capturar informações do seu ambiente de forma a melhorar o seu desempenho.

De modo mais formal, pode-se dizer que a aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede neural são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente no qual a rede está inserida.

Para realizar a execução da etapa do reconhecimento de padrões é necessário inicialmente, treinamento, onde é apresentada à rede, uma repetição de um conjunto de padrões de entrada com suas categorias associadas. A quantidade de padrões de treinamento para uma dada classe deve ser idealmente, o mesmo para as demais classes.

Numa etapa subsequente, apresenta-se à rede um novo padrão, contudo pertencente ao mesmo conjunto utilizado no treinamento da rede. Espera-se que a rede consiga identificar a classe daquele padrão em particular, graças à informação que a rede extraiu da etapa de treinamento.

Para que o classificador seja capaz de classificar novos padrões, é necessário avaliar o desempenho da rede através da etapa de testes, onde é observado o percentual de acertos obtidos para um conjunto de padrões cujas classes sejam conhecidas. Nenhum dos padrões do conjunto de testes pode ter sido utilizado no conjunto de treinamento. O desempenho da rede é avaliado por fim, através do Erro de Classificação (EC), onde se calculam o percentual de padrões classificados corretamente e incorretamente, de acordo com a equação (1.1).

$$EC(\%) = (I/N) \cdot 100 \quad (1.1)$$

$$N = C + I$$

sendo:

N → Todos os padrões classificados

C → Padrões classificados corretamente

I → Padrões classificados incorretamente

Pode-se representar um classificador de padrões de forma sucinta e generalizada a partir do diagrama apresentado na Figura 5.3.

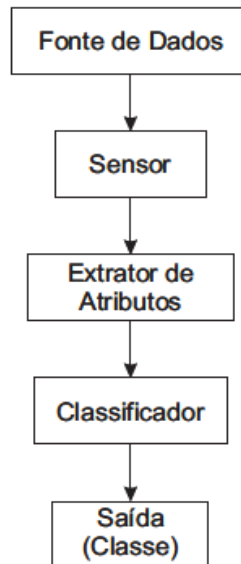


Figura 5.3. Diagrama de um classificador de padrões (SANTOS, 2008).

Devido ao fato da rede neural implementada não ter apresentado desempenho satisfatório, buscou-se uma alternativa para melhorar o desempenho da rede através do refinamento dos dados de entrada da rede. Para isso utilizou-se a transformada wavelet.

5.2 TRANSFORMADA WAVELET

Este tópico apresenta uma breve introdução à teoria de *wavelets* sob a ótica da análise de sinais. O termo *wavelet* vem da associação do termo francês *ondelette* significando onda pequena e do termo inglês *wave*, significando onda.

Este trabalho deparou-se com a necessidade da análise de sinais, que para o seu processamento, contam com uma gama de ferramentas matemáticas entre elas, as transformações matemáticas, que são empregadas no mapeamento de funções de um domínio para outro, para se obter informações adicionais que não são visíveis originalmente.

Uma das transformadas mais conhecidas é a de Fourier, que apresenta um sinal através de funções senoidais de diferentes frequências. A transformada *wavelet* se apresenta como uma ferramenta alternativa para o processamento de sinais, mudando o paradigma de representação dos mesmos, ao utilizar funções base de suporte compacto (ao invés de senoidais de Fourier) para transformar um sinal para o espaço de tempo-escala.

A transformada *wavelet* é capaz de decompor e descrever ou representar outra função (ou uma série de dados) originalmente descrita no domínio do tempo, de forma a podermos analisar esta outra função em diferentes escalas de frequência e de tempo. Graças a sua capacidade de decompor as funções tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, as funções wavelets são ferramentas poderosas de processamento de sinais, muito aplicadas na compressão de dados, eliminação de ruído, separação de componentes no sinal, identificação de singularidades e detecção de auto-semelhança.

A análise de wavelet tem vantagem sobre as análises espectrais clássicas, porque permite analisar periodicidade de eventos em diferentes escalas da variabilidade temporal e não necessita de uma série estacionária. Assim, a ferramenta é apropriada para analisar eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contenham potências não estacionárias em diferentes frequências.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS OBTIDOS

Conforme descrito no tópico 4.2, a Chesf dispõe de contadores de descargas parciais eficientes, autônomos e remotos. Esses contadores transmitem via satélite, informação de contagens de descargas parciais, temperatura e umidade relativa do ar a cada hora. Contudo, apenas esses dados não se mostraram conclusivos, logo não se devem tomar ações baseadas nesta informação, conforme comentado no tópico 4.2.

Esta constatação motivou a contribuição dada no presente trabalho em busca de uma ferramenta de diagnóstico da necessidade de intervenção pelas equipes de manutenção, de forma remota, contínua e assertiva.

Para tal, neste trabalho, foram pesquisadas soluções para contribuir com o objetivo, com isso foi criada uma rede neural artificial em busca do reconhecimento do padrão das descargas parciais que indicasse a iminência de ocorrência do *flashover* de forma que fosse possível intervir a tempo de se evitar a ocorrência do curto circuito e conseqüente desligamento da linha de transmissão ou do barramento da subestação.

Alguns requisitos mostraram-se necessários para a assertividade da rede neural proposta. Na etapa de treinamento da rede, necessita-se de um banco de dados onde se conhece o comportamento dos dados de entrada e de saída. Esses dados foram obtidos através de ensaios no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, onde todas as variáveis foram controladas e aferidas de forma criteriosa, conforme descrito no tópico 4.1.

Ao final, foram obtidas 100 formas de onda, com período de um ciclo, para cada um dos cinco níveis de poluição aplicados artificialmente sobre os isoladores ensaiados, conforme mostrado nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. Totalizando 500 curvas. Através de uma rotina em Matlab foi feito um contador para extrair as contagens do número de

pontos em cada curva onde a corrente de fuga estivesse nos intervalos de valores N1, N2, N3 e N4, descritos no tópico 4.2. Dessa forma, foram extraídas as contagens e construída uma tabela que foi utilizada como banco de dados para a rede neural. Com isso os dados estão no mesmo referencial que as intensidades de corrente de fuga dos contadores de campo. Logo, foram utilizados como referência, pois foram gerados de forma controlada e com nível de poluição conhecidos, uma vez que a poluição foi criada em laboratório de química.

Das 500 linhas da tabela constante nos dados obtidos no ensaio de laboratório, foram utilizadas 60% (300 linhas) para o treinamento, 20% (100 linhas) para validação e 20% (100 linhas) para teste. A rede neural utilizada foi a perceptron de múltiplas camadas e foram feitas 10 inicializações. A Tabela 6.1 mostra o percentual de erro de cada uma das inicializações.

Tabela 6.1. Tabela de erros relacionada a cada inicialização

Resultados do Treinamento	
Inicializações	Erro(%)
1	31,26
2	55,1
3	41,05
4	28,53
5	43,76
6	61,6
7	49,41
8	52,44
9	43,69
10	58,45

As inicializações foram feitas com 10.000 épocas e conforme Tabela 6.1, a quarta inicialização apresentou o menor erro, 28,53% na 15ª época, conforme mostrado nas Figuras 6.1 e 6.2.

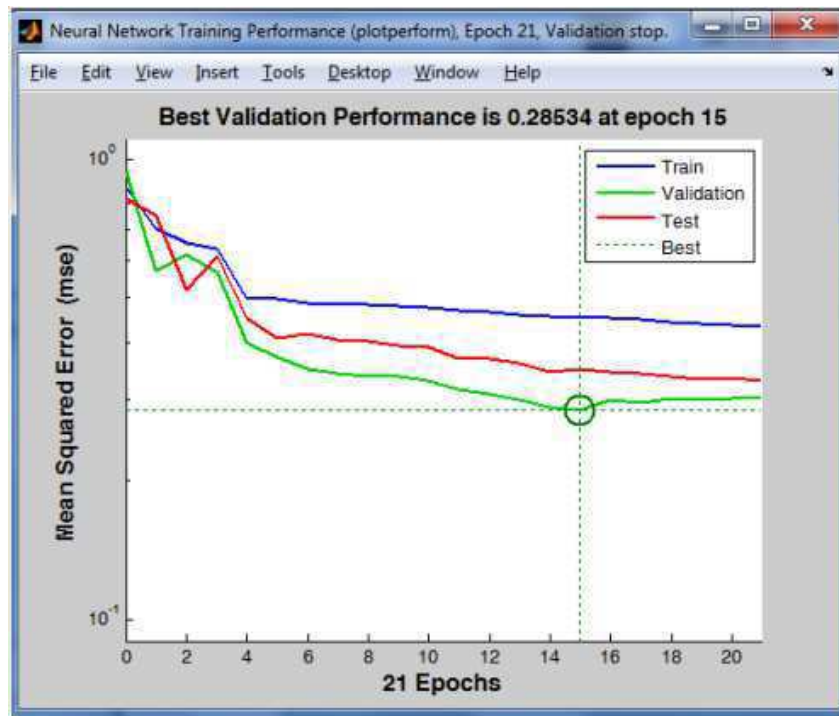


Figura 6.1. Desempenho da quarta inicialização

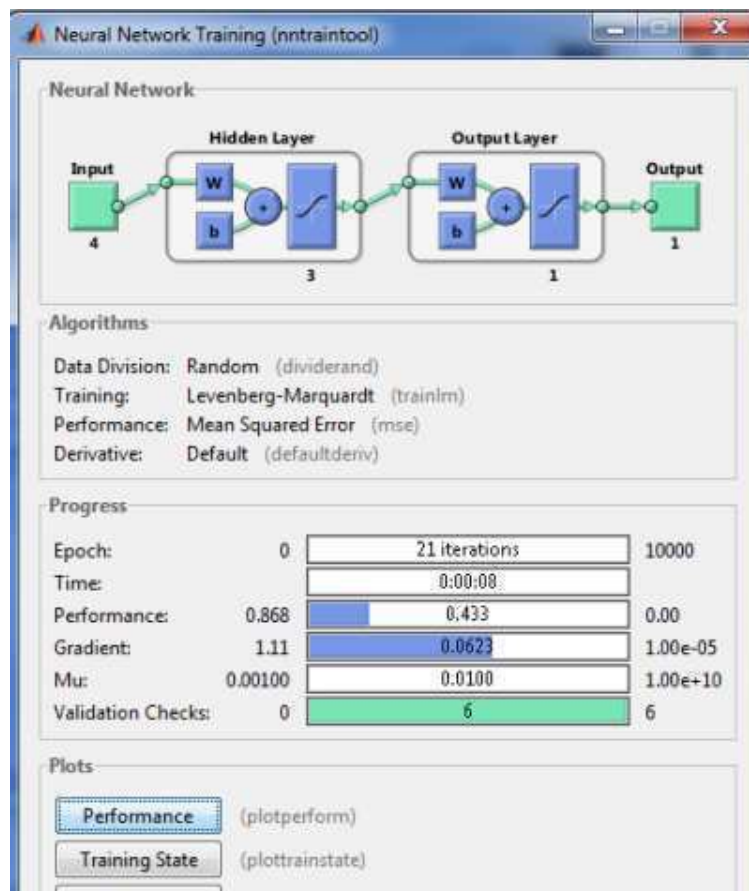


Figura 6.2. Treinamento da rede neural

A média dos erros médios absolutos das 10 inicializações, mostrada na Tabela 6.1, foi de 52,89%.

Diante deste resultado foi feita uma análise mais criteriosa nos dados utilizados na rede neural e observado que o comportamento esperado, elevação no número de descargas parciais quanto maior for o grau de poluição dos isoladores, não ocorreu de forma linear e direta.

Na Tabela 6.2 foi feito um somatório do número de ocorrências de descargas parciais superficiais por intensidade da corrente de fuga (N1, N2, N3 e N4) e considerando o grau de poluição do isolador sob ensaio.

Tabela 6.2. Somatório de descargas parciais por nível de poluição

	Somatório N1	Somatório N2	Somatório N3	Somatório N4
isol nível 1	802.659	401.474	123.701	176.568
isol nível 2	827.807	542.774	273.672	75.528
isol nível 2'	747.051	261.535	179.987	137.376
isol nível 3	756.720	334.227	86.339	207.399
isol nível 4	620.270	259.012	127.688	85.892

Pode-se observar que o isolador com poluição nível dois, a segunda menor incidência de poluentes, apresentou o maior número de descargas parciais superficiais com intensidade N1, N2 e N3. Classificando em ordem crescente por intensidade de corrente de fuga tem-se as tabelas a seguir.

Observa-se nas tabelas 6.3 e 6.4 que o isolador mais poluído apresentou o menor número de descargas nível N1, enquanto os dois menos poluídos apresentaram as maiores incidências de descargas neste nível.

Tabela 6.3. Classificação crescente do número de descargas nível N1

	Somatório N1
isol nível 4	620.270
isol nível 2'	747.051
isol nível 3	756.720
isol nível 1	802.659
isol nível 2	827.807

Tabela 6.4. Classificação crescente do número de descargas nível N2

	Somatório N2
isol nível 4	259.012
isol nível 2'	261.535
isol nível 3	334.227
isol nível 1	401.474
isol nível 2	542.774

Na Tabela 6.5 houve um comportamento um pouco mais próximo do esperado, com o isolador mais poluído saindo da primeira para a terceira posição e o mais limpo deixando a quarta e indo para a segunda posição.

Tabela 6.5. Classificação crescente do número de descargas nível N3

	Somatório N3
isol nível 3	86.339
isol nível 1	123.701
isol nível 4	127.688
isol nível 2'	179.987
isol nível 2	273.672

Na Tabela 6.6 o isolador mais sujo volta a ocupar uma das primeiras posições e o mais limpo retorna a quarta posição, a exemplo do observado nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.6. Classificação crescente do número de descargas nível N4

	Somatório N4
isol nível 2	75.528
isol nível 4	85.892
isol nível 2'	137.376
isol nível 1	176.568
isol nível 3	207.399

Esses dados de laboratório foram utilizados para o treinamento e validação da rede neural com o objetivo de que, após a rede estar devidamente treinada, a mesma fosse capaz, com um grande percentual de acerto, de classificar e reconhecer os padrões

oriundos das contagens dos contadores de campo. Dessa forma, os dados de campo poderiam ser coletados via satélite e através do classificador, indicar qual dos cinco níveis de poluição, pré-determinados pelos níveis de poluição artificial pré-determinados, a cadeia de isoladores presente no campo encontrava-se.

Diante da complexidade do problema em relação à dificuldade de utilização dos dados de campo, conforme exposto anteriormente, buscou-se na transformada *wavelet* a melhor adequação dos dados de entrada da rede neural artificial e obter, por conseguinte, um percentual de acerto satisfatório. Contudo os dados se mostraram tão aleatórios que a maior parte dele foi considerada ruído e foi suprimida. Com isso, não restou nenhum dado de contagem de descargas parciais superficiais com intensidade de corrente de fuga nos níveis N2, N3 e N4. Ou seja, não seria possível treinar a rede neural para identificar intensidades de corrente de fuga mais elevadas, ficando restrita apenas às descargas de intensidade incipiente.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A utilização dos sensores de corrente de fuga nas cadeias de isoladores instalados na CHESF, em regiões com histórico de ocorrência em LTs por poluição, assim como a criação de um banco de dados a partir destes dados, não são suficientes para o diagnóstico de poluição e tomada de decisão, devido à falta de tratamento adequado dos dados obtidos.

Diante desta constatação foram utilizadas as técnicas de processamento de dados, transformadas wavelet e RNA, nos sinais de corrente de fuga obtidos em laboratório. Os dados tratados foram gerados a partir de isoladores com nível de ESDD conhecido, conforme descrito no capítulo 4.

As técnicas de processamento de dados propostas neste trabalho se caracterizam por sua robustez e disseminação tecnológica. Contudo, os dados adquiridos no laboratório, a partir de um trabalho anterior, não se mostraram adequados para o fim esperado, conforme resumo apresentado na tabela 6.7.

A partir das contribuições levantadas neste trabalho se observam diversas melhorias que precisam ser incorporadas nos processos de diagnóstico utilizados na Chesf. O experimento de laboratório deve adequar-se aos parâmetros determinados pelos sensores instalados no campo. Após esta adequação, deve-se seguir a metodologia sugerida neste trabalho em relação a:

- aquisição dos dados através de contadores de descargas parciais similares aos utilizados em campo,
- criação dos cinco níveis de intensidade de poluição artificial sugeridos,

- utilização da câmara de neblina para criar as condições de umidade do ar necessárias para ocorrência das descargas parciais,
- compactação dos dados através da transformada wavelet e utilização da rede neural artificial como classificador.

Tabela 7.1. Comparativo de atributos de laboratório e de campo

Experimento de Laboratório	Contadores no Campo
Informação através de curvas contínuas de um ciclo	Informação através de números, discretos
Duração do sinal de 0,01667 segundos	Somatório de descargas por hora
Tensão de 7 kV aplicada sobre o isolador ensaiado	Tensão de 500 kV/ $\sqrt{3}$ aplicada na cadeia de 26 isoladores
Não simulado lavagem do isolador pela chuva	Lavagem natural da cadeia de isoladores no campo pela chuva

CAPÍTULO 8

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A título de trabalhos futuros se sugere a adequação dos experimentos de laboratório às condições dos experimentos de campo, nos quais se buscaria a construção de câmara de neblina que comportasse uma cadeia completa de 500 kV. Compor 5 cadeias de isoladores com os 5 diferentes níveis de poluição, conforme apresentado neste trabalho, aplicar a poluição artificial a todas as unidades componentes dessas 5 cadeias e em seguida submetê-las a tensão de $500 \text{ kV} / \sqrt{3}$. A partir dessa montagem, realizar as contagens dos níveis de descarga (N1, N2, N3 e N4), durante 1 hora de ensaio, utilizando um contador de descargas parciais similar aos instalados em campo. Com os dados obtidos neste experimento de laboratório, construir um conjunto de treinamento e teste, montar uma rede neural específica ou outra técnica de classificação, a exemplo da regra fuzzy, a partir do conjunto de treinamento construído. Fazer validações específicas, instalando-se todo o processo de diagnóstico no campo, retirando-se as unidades defeituosas indicadas para aferições laboratoriais dos seus níveis de poluição depositada.

REFERÊNCIAS

CHESF, **Relatório de Desempenho de Linhas de Transmissão**. Documento interno. 20014

JUNIOR, A. L. R. da R. **Isoladores Cerâmicos**. Paraná: Materiais Elétricos: Compêndio de Trabalhos, 2010

FUCHS, R. D., **Transmissão de Energia Elétrica. Linhas Aéreas**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, São Paulo, SP, Brasil. 1979

OLIVEIRA, S. C. **Sistema de detecção óptica de descargas parciais em cadeias de isoladores de linhas de transmissão de alta tensão**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2008.

OLIVEIRA, S. C., FONTANA, E., **Optical Detection of Partial Discharges on Insulator Strings of High-Voltage Transmission Lines**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 7, pp. 2328-2334 (2009a).

OLIVEIRA, S. C., FONTANA, E., CAVALCANTI, F. J. M. M., **Leakage Current Activity on Glass-Type Insulators of Overhead Transmission Lines in the Northeast Region of Brazil**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 822-827 (2009b).

OLIVEIRA, S. C., FONTANA, E., CAVALCANTI, F. J. M. M., **Real Time Monitoring of the Leakage Current of 230 kV Glass-Type Insulators During Washing**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2257-2260 (2009c).

LIMA, R. A. **Contribuições para o desenvolvimento de um sistema de monitoração via satélite do estado de poluição de cadeias de isoladores de alta tensão**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2010.

LIMA, R. A, FONTANA, E., MARTINS-FILHO, J. F., PRATA, T. L., CAVALCANTI, G. O., LIMA, R. B., OLIVEIRA, S. C., and CAVALCANTI, F. J. M. M., **Satellite Telemetry System for Pollution Detection on Insulator Strings of High-Voltage Transmission Lines**, Proceedings of the 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Vol. 1, pp. 1-4, (2009).

CHESF, Instrução de Manutenção IM.MN.LT.M.026 - **Inspeção Noturna em Isoladores de Linhas de Transmissão e Barramentos de Subestações**. 4ª Edição. Recife, 2005.

CHESF, Instrução de Manutenção IM.MN.LT.M.011 – **Lavagem de isoladores em instalações energizadas**. 8ª Edição. Recife, 2010.

BEZERRA, J. M. B. e SILVA, A. F. D., **Use of pattern recognition techniques in transmission lines defects monitoring**. IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, 1995.

BEZERRA, J. M. B. **Caracterização de atributos de sinais para utilização de técnicas de reconhecimento de padrões na avaliação do isolamento de instalações e equipamentos elétricos**. Tese de Doutorado, Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil, 2004.

BEZERRA, J. M. B.; DEEP, S. S. e LIMA, A. M. N., **Application of Risk Criteria on Transmission System Insulation Upgrade**. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. México. Anais em CD e cadastrado no IEEE/xplore. 2002a.

BEZERRA, J. M. B.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S., **The Application of Finite Elements to Accident Risk Evaluation in Hot Line EHV Insulators Maintenance**. V INDUSCON – Conferencia de Aplicações Industriais. Salvador/BA. Anais em CD. 2002b.

BEZERRA, J. M. B.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S. e COSTA, E. G., **Estudo da Distribuição de Tensão em Cadeias de Isoladores Aéreos de Alta Tensão em Ambientes Poluídos**. XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, realizado em Uberlândia, MG, Brasil. 2003a.

FONTANA, E., OLIVEIRA, S., CAVALCANTI, F. J. M. M., LIMA, R. B., MARTINS-FILHO, J. F. and MENESES-PACHECO, E., **Novel Sensor System for Leakage Current Detection on Insulator Strings of Overhead Transmission Lines**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 2064-2070 (2006).

FONTANA, E., OLIVEIRA, S., **Optical System for Flashover Prediction in High Voltage Transmission Lines**, Proceedings of the 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference. Salvador, Research Publishing Services, Vol. 1, pp. 224-228 (2007).

RIZK, F. A. M., **Mathematical Models for Pollution Flashover**. Electra, Vol. 78, pp. 71-103. 1981

SUNDARARAJAN, R. e GORUR R. S., **Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 2, pp 209 – 218. April 1993

BRAGA, A. P., LAUDEMIR, T. B., e CARVALHO, A. C. P. L. F., **Redes Neurais Artificiais: Teorias e Aplicações**. Editora LTC, 2000.

WASSERMAN, P. D., **Neural Computing: Theory and Practice**. Van Nostrand Reinhold, 1993.

HAYKIN, S., **Redes Neurais: Princípios e Prática**. Editora bookman s.a., 2001.

THIBODEAU, G. A. , PATTON, K. T., **Estrutura e funções do corpo humano**. 11 ed. Manole, 2002. p. 162 – 167

SANTOS, G. S. M. **Aplicação de Redes Neurais para Diagnóstico de Poluição em Isoladores de Alta Tensão**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2008.

DEMUTH, H., BEALE, M., HAGAN, M., **Neural Network Toolbox 6 – User Guide**, The MathWorks, Inc., 2008.

DE OLIVEIRA, H. M. **Análise de Fourier e Wavelets: sinais estacionários e não estacionários**. 1 ed. Editora universitária UFPE, 2007.