

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de  
Transmissão a Partir de Sinais de Descargas  
Parciais Externas**

**Renato Massoni Capelini**

**Itajubá, Agosto de 2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

Renato Massoni Capelini

**Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de  
Transmissão a Partir de Sinais de Descargas  
Parciais Externas**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez

Co-orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Agosto de 2015  
Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

Renato Massoni Capelini

**Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de  
Transmissão a Partir de Sinais de Descargas  
Parciais Externas**

Tese aprovada por banca examinadora em 12 de Agosto de 2015, conferindo ao autor o título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez  
(Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. José Feliciano Adami (Co-orientador) - UNESP

Prof. Dr. Alexandre Piantini - USP

Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki - UFPR

Prof. Dr. Credson de Salles - UNIFEI

Prof. Dr. Paulo Cesar Rosa - UNIFEI

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto - UNIFEI

Itajubá, 2015

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Maurício e Leila,*

*e*

*à minha irmã Claudia.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maurílio e Leila, por apoiar e incentivar que eu continuasse meus estudos, mesmo após a conclusão do curso de Engenharia Elétrica. A partir do exemplo que me deram através de suas ações, e não apenas palavras, compreendi que a educação é a base do desenvolvimento do cidadão e da nação. Eles me ensinaram, pelos seus exemplos de vida, que não existe sucesso sem esforço e dedicação.

Agradeço à minha irmã, Claudia, pelo companheirismo, incentivo e por proporcionar, pela nossa diferença de formação e ideias, que eu me tornasse uma pessoa mais ponderada, tolerante e compreensiva.

Aos amigos que fizeram parte em algum momento desta minha caminhada profissional, desde o CTIG-UNESP até a EFEI, e posteriormente UNIFEI, agradeço pelo grande incentivo e pelos bons momentos compartilhados. Nestas duas escolas surgiram as amizades que carrego para sempre.

Aos Professores Manuel Luis Barreira Martinez e José Feliciano Adami, orientador e co-orientador respectivamente, agradeço pela confiança, apoio e amizade. Agradeço também pela oportunidade que me foi dada de participar do desenvolvimento deste e de outros trabalhos, com os quais aprendi bastante nestes quase seis anos de convivência.

Agradeço à UNIFEI e ao Laboratório de Alta Tensão pelo suporte e confiança em meu trabalho.

À AES Sul, agradeço pelo apoio financeiro e todo o suporte dado durante as atividades que proporcionaram o desenvolvimento desta tese.

Por fim, agradeço a todos os que, de alguma maneira, contribuíram para o desenvolvimento educacional, científico e tecnológico deste país.

## RESUMO

O perfeito funcionamento das cadeias de isoladores em linhas de transmissão é vital para a integridade do sistema. A ocorrência de falhas em isoladores pode ocasionar, em casos extremos, a perda da capacidade dielétrica e o colapso mecânico da cadeia, levando à interrupção do sistema de transmissão. Dessa forma, a execução de inspeções ao longo das linhas em busca de falhas ainda em estágio inicial é uma atividade frequente e essencial. No entanto, tais inspeções são realizadas de forma presencial e apresentam resultados imprecisos.

Com o objetivo de melhorar a qualidade dessas inspeções, esta tese de doutorado trata do desenvolvimento de uma metodologia capaz de fornecer resultados mais precisos e possível de ser realizada de forma remota, isto é, a partir das subestações localizadas nas extremidades da linha, não havendo a necessidade de se deslocar equipes de inspeção para a linha de transmissão.

Para isso, a metodologia se baseia na ocorrência de descargas parciais em isoladores com falhas. Estas descargas parciais resultam em sinais de alta frequência, que podem percorrer a linha de transmissão e serem detectados por um sistema de aquisição instalado em uma subestação. Os sinais de descargas parciais apresentam um padrão, que depende do caminho elétrico entre o local onde os sinais são gerados e o ponto onde está instalado o sistema de aquisição. Partindo deste fato, a metodologia propõe a associação entre os padrões dos sinais de descargas parciais e os respectivos locais de origem dos sinais ao longo da linha de transmissão como forma de se localizar cadeias de isoladores danificadas.

Para a validação da metodologia, são realizados ensaios em uma linha de transmissão de 69 kV e 60 km de extensão, utilizando hardware e software especialmente desenvolvidos para este fim. Os resultados dos ensaios mostram que a metodologia é capaz de localizar cadeias de isoladores com falhas com alto grau de acerto, sendo possível identificar não só a estrutura que contém a cadeia, mas também o próprio isolador que apresenta falha.

**Palavras-chave:** Cadeia de isoladores, descarga parcial, linha de transmissão, redes neurais artificiais, transformador de corrente.

## ABSTRACT

The perfect condition of the insulator strings in the transmission lines is of great importance for the system integrity. In the most serious cases, the failures can cause the losses of the dielectric capacity and the mechanical strength, leading to the interruption of the transmission line. Thus, it is essential that these failures can be detected in early stages. However, the inspections applied for this purpose have to be carried out *in loco* and usually present inaccurate results.

In order to improve the quality of the failure detection, this thesis discuss a methodology to be performed from the substations located at the ends of the transmission lines, avoiding the need of scanning the line by the linemen crew and presenting more precise results.

The methodology is based on the partial discharges occurrence due to insulators failures. As an effect of the discharges, high frequency signals arise, travel through the transmission line and can be recorded at the substations. Each signal has a pattern that depends on the electrical path between the point of the discharge inception and the point of data acquisition. By changing this path, the pattern is modified as well. Thus, this methodology purposes the association of the patterns with the positions of the damaged insulators strings along the transmission line.

Tests were carried out in a 69 kV transmission line with a length of 60 km in order to validate the methodology. By applying hardware and software specially developed for this task, the results proved that the methodology allows the location of damaged insulator strings with high precision, not only identifying the tower where the string is installed but the damaged insulator as well.

**Keywords:** Artificial neural networks, insulator string, current transformer, partial discharge, transmission line.

# SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	2
1.2 Relevância do Tema .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.4 Contribuições .....	4
1.5 Preâmbulo.....	5
2. Revisão Bibliográfica .....	6
2.1 Considerações Iniciais.....	7
2.2 Revisão Bibliográfica.....	7
2.2.1 Falhas em Isoladores.....	7
2.2.2 Métodos Tradicionais de Inspeção de Isoladores.....	23
2.2.3 Métodos de Inspeção de Isoladores em Desenvolvimento.....	29
3. Metodologia .....	32
3.1 Considerações Iniciais.....	33
3.2 Metodologia Desenvolvida em (Capelini, 2011).....	34
3.2.1 Princípios da Metodologia .....	34
3.2.2 Desenvolvimento da Simulação Física - Laboratório .....	36
3.2.3 Desenvolvimento de Software - Aquisição de Sinais e Reconhecimento de Padrões.....	42
3.2.4 Ensaio em Laboratório.....	44
3.3 Metodologia Proposta para Linhas de Transmissão Reais .....	48
4. Desenvolvimento .....	52
4.1 Considerações Iniciais.....	53
4.2 Desenvolvimento de Hardware.....	53
4.2.1 Características da Linha de Transmissão .....	54
4.2.2 Especificação da Placa de Aquisição.....	73
4.2.3 Desenvolvimento do Sensor de Corrente.....	77
4.2.4 Projeto da Caixa de Aquisição e Especificação dos Demais Componentes	86
4.2.5 Instalação e Ensaio Inicial do Sistema de Aquisição de Sinais em Campo	92
4.3 Desenvolvimento de Software .....	100
4.3.1 Pré-Projeto do Software.....	100
4.3.2 Desenvolvimento do Módulo de Aquisição de Sinais .....	101
4.3.3 Desenvolvimento do Módulo de Reconhecimento de Padrões.....	104

4.3.3.1 Protótipo em Matlab® .....	104
4.3.3.2 Software Final em Linguagem C.....	113
5. Ensaios.....	118
5.1 Considerações Iniciais.....	119
5.2 Realização dos Ensaios para Coleta dos Sinais - Laboratório e Campo .....	119
5.2.1 Coleta de Sinais em Laboratório .....	119
5.2.2 Coleta de Sinais em Campo.....	120
5.3 Ensaios com Sinais Obtidos dos Ensaios de Campo e de Laboratório.....	124
5.3.2 Ensaio 1 .....	125
5.3.3 Ensaio 2.....	128
5.3.4 Ensaio 3.....	130
5.3.5 Ensaio 4.....	137
5.3.6 Ensaio 5.....	143
5.3.7 Ensaio 6.....	153
5.3.8 Ensaio 7.....	154
5.3.9 Ensaio 8.....	156
5.3.10 Ensaio 9.....	159
5.3.11 Ensaio 10.....	161
5.3.12 Ensaio 11.....	165
5.4 Ensaio Cruzado.....	167
6. Discussões e Conclusões.....	171
6.1 Sistema e Infraestrutura para Aquisição de Sinais .....	172
6.2 Ensaios .....	178
6.2.1 Desempenho em Função da Constituição dos Padrões.....	178
6.2.2 Ajuste do Sistema .....	179
6.2.3 Escolha das Estruturas a Serem Conhecidas Pelo Sistema .....	180
6.2.4 Treinamento do Sistema com Sinais Não Originados na Própria Linha de Transmissão .....	181
6.3 Algoritmos e Ferramentas Computacionais .....	184
6.4 Metodologia - Conclusões e Procedimento Sugerido .....	184
6.5 Publicações.....	186
6.6 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	187
7. Referências Bibliográficas .....	189

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Composição típica de um isolador de disco (Isoladores Santana S.A.).....	8
Figura 2.2 - Exemplo de isolador de disco de porcelana - vista superior.....	9
Figura 2.3 - Exemplo de isolador de disco de porcelana - vista inferior.....	10
Figura 2.4 - Distribuição de potencial típica de um isolador de disco. Adaptado de Fuchs (1977). .....	10
Figura 2.5 - Modelagem básica de uma cadeia de z isoladores (Fuchs, 1977). .....	12
Figura 2.6 - Distribuição de potencial para uma cadeia formada por 8 isoladores (Fuchs, 1977).....	12
Figura 2.7 - Exemplo de cadeia de isoladores contendo um isolador quebrado sob ensaio em laboratório. ....	15
Figura 2.8 - Pino de isolador de disco altamente corroído. ....	15
Figura 2.9 - Fluxo de ar em um isolador de disco. Adaptado de Looms (1988).....	17
Figura 2.10 - Exemplo de isolador de disco contaminado na região das saias internas. ....	17
Figura 2.11 - Esquema de ensaio de isolador contaminado. Adaptado de Cavallini <i>et al.</i> (2006). ....	19
Figura 2.12 - Exemplo de padrão de descarga parcial. Adaptado de Cavallini <i>et al.</i> (2006). ....	20
Figura 2.13 - Sinal típico de descarga parcial. Adaptado de Cavallini <i>et al.</i> (2006). ....	20
Figura 2.14 - Campânula de isolador de vidro em processo de corrosão devido ao acúmulo de excrementos de pássaros (Taklja; Niitsoo; Palu, 2012). ....	22
Figura 2.15 - Exemplo de resultado de inspeção termográfica em duas cadeias de isoladores (uma danificada e uma sã) para 69 kV (Mello <i>et al.</i> , 2009). ....	24
Figura 2.16 - Exemplo de imagem gerada por uma câmera de corona. A mancha branca dentro do quadrado corresponde à região da fonte de radiação ultravioleta. ..	28
Figura 3.1 - Metodologia proposta: associação do padrão de sinais com os respectivos locais de geração ao longo da linha de transmissão. Adaptado de (Capelini, 2011)...	35
Figura 3.2 - Dispositivo de simulação de descargas parciais acoplado à um dos isoladores da cadeia. (Capelini, 2011). ....	37
Figura 3.3 - Descarga parcial provocada pelo dispositivo mostrado na Figura 3.2.....	38
Figura 3.4 - Exemplo de sinal de descarga parcial obtido através da simulação física. Adaptado de Martinez (2011).....	38
Figura 3.5 - Topologia definitiva do sistema de ensaios montado em laboratório (Capelini, 2011). ....	40
Figura 3.6 - TC conectado à extremidade inicial da linha de transmissão, com o respectivo cabo de aterramento indicado pela seta (Capelini, 2011). ....	41
Figura 3.7 - Sensor de corrente instalado no cabo de aterramento do TC (Capelini, 2011). ....	41
Figura 3.8 - Padrões considerados no Ensaio 1 (Capelini, 2011).....	45
Figura 3.9 - Diagnóstico de reconhecimento dos sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011). ....	46
Figura 3.10 - Diagnóstico fornecido pelo software para os 60 sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011). ....	47

Figura 3.11 - Esquema de funcionamento da metodologia para linhas de transmissão reais.....	50
Figura 4.1 - Localização geográfica da região onde se encontra a LT Rosário x São Gabriel (Google Maps, 2015).....	55
Figura 4.2 - Painel de telemedição (à direita) disponível para instalação do sistema de aquisição de sinais (SE São Gabriel).....	56
Figura 4.3 - TCs disponíveis na SE Rosário. ....	57
Figura 4.4 - TCs disponíveis na SE São Gabriel. ....	58
Figura 4.5 - Terminal de aterramento acessível em um dos TCs da SE Rosário. ....	58
Figura 4.6 - Terminal de aterramento acessível em um dos TCs da SE São Gabriel. ....	59
Figura 4.7 - Local pré-selecionado para instalação das bobinas de bloqueio na SE Rosário. ....	59
Figura 4.8 - Local pré-selecionado para instalação das bobinas de bloqueio na SE São Gabriel.....	60
Figura 4.9 - Blocos LCC: configuração da modelagem. ....	63
Figura 4.10 - Blocos LCC: dados dos cabos e torres. ....	63
Figura 4.11 - Diagrama elétrico da bobina de bloqueio (Alstom, 2011). ....	64
Figura 4.12 - Modelagem da cadeia de isoladores utilizada nas simulações (Pavlik, 1989). ....	65
Figura 4.13 - Modelagem completa utilizada nas simulações. ....	66
Figura 4.14 - Exemplo de sinais de descargas parciais obtidos nas simulações (Amplitude x Tempo).....	68
Figura 4.15 - Detalhes do primeiro sinal de descarga parcial mostrado na Figura 4.14 (Amplitude x Tempo).....	69
Figura 4.16 - Modelagem utilizada para avaliação dos efeitos de surtos de manobra. ....	70
Figura 4.17 - Transitório lido no secundário do sensor de corrente instalado no cabo de aterramento do TC da fase C da subestação oposta (Amplitude x Tempo). ....	72
Figura 4.18 - Circuito utilizado para o ensaio de verificação das características dos sinais "puros" de descargas parciais.....	74
Figura 4.19 - Cadeia de isoladores de vidro utilizada no ensaio, dotada de dispositivo de simulação de descargas parciais no segundo isolador (contando a partir da fase). ....	75
Figura 4.20 - Osciloscópio Agilent InfiniiVision DSO-2014A utilizado no ensaio, com um sinal de descarga parcial sendo mostrado em sua tela.....	75
Figura 4.21 - Composição espectral média dos sinais obtidos a partir de descargas parciais ocorridas no primeiro isolador, mais próximo da fase, em uma cadeia de porcelana.....	76
Figura 4.22 - Composição espectral média dos sinais obtidos a partir de descargas parciais ocorridas no quinto isolador, mais afastado da fase, em uma cadeia de porcelana.....	77
Figura 4.23 - Bobina de Rogowski sob ensaio em laboratório.....	78
Figura 4.24 - Exemplo de sinal lido com a bobina de Rogowski Fluke i430 Flex®. ....	79
Figura 4.25 - Bobina de Rogowski desenvolvida em laboratório. ....	80
Figura 4.26 - Dimensões físicas do núcleo escolhido (Magmattec, 2011). ....	82
Figura 4.27 - Comportamento da permeabilidade magnética com relação à força de magnetização (Magmattec, 2011).....	82
Figura 4.28 - Comportamento da permeabilidade magnética com relação à densidade de fluxo (Magmattec, 2011). ....	83

Figura 4.29 - Comportamento das perdas no núcleo de acordo com a frequência e densidade de fluxo (Magmattec, 2011). .....	83
Figura 4.30 - Histerese do material (Magmattec, 2011). .....	84
Figura 4.31 - Sensor de corrente sob ensaio de resposta em frequência com o uso do FRAnalyzer®. .....	85
Figura 4.32 - Sensor de corrente montado com o núcleo MM002T4416 sob ensaio na linha de transmissão artificial. ....	85
Figura 4.33 - Protótipo da caixa de aquisição sob ensaio de resposta em frequência. ....	88
Figura 4.34 - Protótipo da caixa de aquisição instalada no aterramento de um dos TCs do LAT-EFEI. ....	88
Figura 4.35 - Protótipo da caixa de aquisição sob ensaio em laboratório. ....	89
Figura 4.36 - Caixas de aquisição sob ensaio no LAT-EFEI. ....	90
Figura 4.37 - Lance de cabo RG213 sob ensaio no LAT-EFEI. ....	92
Figura 4.38 - Equipamentos instalados no painel de telemedição da SE São Gabriel. ....	93
Figura 4.39 - Caixa de aquisição instalada em TC da SE Rosário (a direita). A imagem à esquerda mostra a conexão, em chapa metálica, que teve que ser seccionada para a instalação da caixa. ....	94
Figura 4.40 - Caixas de aquisição instaladas nos TCs da SE São Gabriel. ....	94
Figura 4.41 - Aplicação do garfo metálico em cadeia de porcelana da fase A da torre nº 228, próximo à SE São Gabriel. ....	96
Figura 4.42 - Sinais de descargas parciais lidos pelo sistema de aquisição (fases A e B) instalado na SE São Gabriel. As unidades dos eixos vertical e horizontal são, respectivamente, mV e $\mu$ s. ....	96
Figura 4.43 - Exemplo de surto de manobra registrado na SE São Gabriel. ....	97
Figura 4.44 - Gerador de impulsos repetitivo Haefely Type 48. ....	99
Figura 4.45 - Resultado do ensaio com impulsos repetitivos. ....	99
Figura 4.46 - Tela do software de aquisição de sinais. ....	102
Figura 4.47 - Módulo de aquisição de sinais em operação na SE São Gabriel em maio de 2012. ....	103
Figura 4.48 - Exemplo de aplicação dos algoritmos FFT e filtro de porcentagem sobre um sinal de descarga parcial. Adaptado de Capelini (2011). ....	105
Figura 4.49 - Fluxograma do algoritmo de compressão de sinais <i>Filtro de Porcentagem</i> . Adaptado de Capelini (2011). ....	106
Figura 4.50 - Fluxograma do algoritmo de treinamento. ....	108
Figura 4.51 - Fluxograma do algoritmo de reconhecimento. ....	109
Figura 4.52 - Exemplo de matriz de resposta das RNAs. ....	110
Figura 4.53 - Fluxograma da lógica de análise dos graus de similaridade. ....	111
Figura 4.54 - Tela 1 de configuração das RNAs. ....	114
Figura 4.55 - Tela 2 de configuração das RNAs. ....	115
Figura 4.56 - Tela de acompanhamento do treinamento. ....	115
Figura 4.57 - Tela principal de operação do software - módulo de aquisição em funcionamento. ....	116
Figura 4.58 - Tela principal de operação do software - módulo de localização em funcionamento. ....	117
Figura 5.1 - Aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais na Estrutura 001 (área urbana). ....	122
Figura 5.2 - Dispositivo de simulação de descargas parciais visualizado por uma câmera de coroa durante sua aplicação na Estrutura 001. ....	123

Figura 5.3 - Aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais em uma estrutura localizada na zona rural. ....	124
Figura 5.4 - Desempenho do sistema por estrutura (padrão conhecido).....	127
Figura 5.5 - Desempenho do sistema por estrutura (padrão conhecido).....	129
Figura 5.6 - Tempos de processamento das etapas de treinamento e de reconhecimento em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	132
Figura 5.7 - Desempenho do sistema para a Estrutura 001 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	133
Figura 5.8 - Desempenho do sistema para a Estrutura 017 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	133
Figura 5.9 - Desempenho do sistema para a Estrutura 051 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	134
Figura 5.10 - Desempenho do sistema para a Estrutura 086 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	134
Figura 5.11 - Desempenho do sistema para a Estrutura 106 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	135
Figura 5.12 - Desempenho do sistema para a Estrutura 144 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	135
Figura 5.13 - Desempenho do sistema para a Estrutura 166 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	136
Figura 5.14 - Desempenho do sistema para a Estrutura 176 em função da quantidade de neurônios da camada oculta. ....	136
Figura 5.15 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1400 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	139
Figura 5.16 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1200 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	140
Figura 5.17 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1000 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	140
Figura 5.18 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 800 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	141
Figura 5.19 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 600 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	141
Figura 5.20 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 400 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	142
Figura 5.21 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 200 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	142
Figura 5.22 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 100 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.....	143
Figura 5.23 - Comportamento da taxa de acerto em função do patamar mínimo de similaridade. ....	145
Figura 5.24 - Comportamento da taxa de não-reconhecimento em função do patamar mínimo de similaridade.....	145
Figura 5.25 - Comportamento da taxa de falso-positivo em função do patamar mínimo de similaridade.....	146
Figura 5.26 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,1. ....	146
Figura 5.27 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,2. ....	147

Figura 5.28 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,3. ....	147
Figura 5.29 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,4. ....	148
Figura 5.30 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,5. ....	148
Figura 5.31 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,6. ....	149
Figura 5.32 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,7. ....	149
Figura 5.33 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,8. ....	150
Figura 5.34 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,9. ....	150
Figura 5.35 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,98. ....	151
Figura 5.36 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,99. ....	151
Figura 5.37 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 1. ....	152
Figura 5.38 - Desempenho do sistema por conjuntos de sinais submetidos ao reconhecimento. ....	154
Figura 5.39 - Desempenho do sistema por conjuntos de sinais submetidos ao reconhecimento. ....	156
Figura 5.40 - Desempenho do sistema para os conjuntos formados por isoladores da Est 017 à Est 086. ....	158
Figura 5.41 - Desempenho do sistema para os conjuntos formados por isoladores da Est 106 à Est 176. ....	158
Figura 5.42 - Desempenho individual dos conjuntos de sinais para avaliação. ....	167
Figura 5.43 - Avaliação do desempenho do sistema para sinais de laboratório (aferição). ....	168
Figura 6.1 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 001 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	173
Figura 6.2 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 017 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	174
Figura 6.3 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 051 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	174
Figura 6.4 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 086 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	175
Figura 6.5 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 106 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	175
Figura 6.6 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 144 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	176
Figura 6.7 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 166 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	176
Figura 6.8 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 176 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].....	177

Figura 6.9 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado no km01 da LT do LAT-EFEI, em uma cadeia de 5 isoladores, com o dispositivo de simulação de DPs instalado no isolador mais próximo da fase (Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s]).....	182
Figura 6.10 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 001 da LT Rosário x São Gabriel, em uma cadeia de 6 isoladores, com o dispositivo de simulação de DPs instalado no isolador mais próximo da fase (Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s]). .....	182
Figura 6.11 - Composição espectral do sinal mostrado na Figura 6.9.....	183
Figura 6.12 - Composição espectral do sinal mostrado na Figura 6.10.....	183

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Conjunto de sinais utilizados no processo de reconhecimento (Capelini, 2011). .....	45
Tabela 3.2 - Sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011). .....	47
Tabela 4.1 - Dados de ensaio das bobinas de bloqueio: valores do indutor principal (Alstom, 2011). .....	64
Tabela 4.2 - Dados de ensaio das bobinas de bloqueio: valores dos capacitores paralelos (C1, C2 e C3), capacitor série (Cs), capacitância da proteção (CPr) e resistência série (R) (Alstom, 2011). .....	65
Tabela 4.3 - Especificações básicas da placa de aquisição (Pico Technology, 2007). .....	73
Tabela 4.4 - Comportamento do cabo RG213 em função da frequência do sinal. Adaptado de HUBER+SUHNER (2007). .....	91
Tabela 4.5 - Taxas de acertos (%) obtidas no reconhecimento de sinais dos 48 pontos de conexão (PC). .....	112
Tabela 5.1 - Resumo da avaliação de desempenho do sistema. ....	126
Tabela 5.2 - Resumo da avaliação de desempenho do sistema. ....	128
Tabela 5.3 - Comparação entre os desempenhos dos Ensaio 1 e 2. ....	129
Tabela 5.4 - Comparação entre esforço computacional e capacidade de armazenamento em disco dos Ensaio 1 e 2. ....	130
Tabela 5.5 - Valores médios das taxas de acerto, não-reconhecimento e falso-positivo em função da variação da quantidade de neurônios na camada oculta. ....	131
Tabela 5.6 - Melhores desempenhos individuais por estrutura. ....	137
Tabela 5.7 - Desempenho médio do sistema em função do tamanho do banco de dados de treinamento (BD). .....	138
Tabela 5.8 - Desempenho do sistema em função do patamar mínimo de similaridade (P). .....	144
Tabela 5.9 - Desempenho do sistema. ....	160
Tabela 5.10 - Desempenho do sistema - 1/2. ....	163
Tabela 5.11 - Desempenho do sistema - 2/2. ....	164
Tabela 5.12 - Correspondência entre a LT Rosário x São Gabriel e LT do LAT-EFEI. ....	169
Tabela 5.13 - Desempenho do sistema com os sinais de campo submetidos às RNAs treinadas com sinais de laboratório. ....	170
Tabela 6.1 - Comparação entre os ensaios. ....	179

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.
PLC	Power line carrier.
Un	Tensão a que estão submetidos n isoladores da cadeia a partir do seu lado aterrado.
Ug	Tensão a que estão submetidos todos os isoladores da cadeia.
k	Capacitância entre o isolador e o condutor.
HFCT	High frequency current transformer.
TC	Transformador de corrente.
DP	Descarga parcial.
I	Cadeia de isoladores para instalação em posição vertical.
V	Conjunto formado por duas cadeias de isoladores, unidas por uma das extremidades.
UV	Ultravioleta.
RF	Radiofrequência.
RNA	Redes neurais artificiais.
DAQ	Data acquisition system.
TPC	Transformador de potencial capacitivo.
LPC	Linear predictive coding.
BW	Banda de passagem.
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos.
FFT	Transformada rápida Fourier.
P	Patamar mínimo de similaridade.
TA	Taxa de acertos.
NR	Taxa de não-reconhecimento.
FP	Taxa de falso positivo.
NN	Número de neurônios na camada oculta da rede neural.

Capítulo 1

---

Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os objetivos desta tese de doutorado, assim como os motivos que levaram à realização deste trabalho. É apresentado também o conteúdo de cada capítulo que compõe esta tese.

## 1.2 Relevância do Tema

A inspeção de cadeias de isoladores em linhas de transmissão tem sido um assunto amplamente discutido nas últimas décadas. As perfeitas condições das cadeias é de vital importância para o funcionamento do sistema. O surgimento de falhas nos isoladores pode evoluir para situações extremas, onde podem ocorrer a perda da capacidade dielétrica e também da capacidade mecânica, levando ao colapso da linha de transmissão. A interrupção do fornecimento de energia elétrica acarreta em problemas graves tanto para a sociedade quanto para as concessionárias, que podem ser duramente penalizadas pelos órgãos governamentais, além de arcar com as perdas no faturamento devido à energia não entregue.

As inspeções tradicionais são realizadas de forma presencial, onde uma equipe especializada percorre a linha de transmissão verificando todas as cadeias de isoladores. Esta verificação é realizada, na maioria das vezes, de forma visual, contando com no máximo o auxílio de um binóculo. Uma pequena parcela destas inspeções, geralmente restrita às linhas de transmissão de tensão mais elevada e alto grau de importância para o sistema elétrico, é realizada com o auxílio de equipamentos mais sofisticados.

Entre estes equipamentos podem-se citar receptores de ultrassom e radiofrequência, câmeras infravermelhas e câmeras sensíveis a radiação ultravioleta, comumente conhecidas por câmeras de corona. Todos estes equipamentos são baseados nos efeitos físicos da ocorrência de descargas parciais externas (Kind; Feser, 2001) decorrentes de falhas nos isoladores. Apesar de consistirem em poderosas ferramentas, fazendo com que as inspeções atinjam um patamar de qualidade muito maior quando comparadas às inspeções visuais apenas, sua aplicação ainda requer inspeções presenciais e elevado grau de experiência da equipe executora.

Novas metodologias e ferramentas tem sido desenvolvidas, principalmente na última década, como a utilização de veículos aéreos não-tripulados, robôs que conseguem percorrer as linhas de transmissão pendurados nos cabos, detectores de sinais de descargas parciais instalados nas torres, entre outros. A utilização de veículos aéreos não tripulados e robôs tem se mostrado bastante promissora, porém ainda esbarra no alto custo, necessidade de equipe especializada e carecem de desenvolvimento tecnológico considerável. Já a inspeção de isoladores através da leitura de sinais de descargas parciais por torre não requer maior desenvolvimento tecnológico, mas apresenta custo elevado devido à grande quantidade de equipamentos instalados ao longo da linha de transmissão.

Assim, de forma a se obter uma metodologia que pudesse ser executada remotamente, sem a necessidade de se percorrer a linha de transmissão, e ao mesmo tempo apresentasse baixo custo de instalação e operação, foram realizados estudos sobre como os sinais de descargas parciais poderiam ser lidos a distância, a partir de uma subestação por exemplo, e de alguma forma utilizados para localizar isoladores com falhas ao longo da linha.

O desenvolvimento dessa metodologia teve início no projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado "Detecção, Identificação e Localização de Isoladores Defeituosos e Faltas em Linhas de Transmissão (PD-0396-0003/2009)", realizado pela AES Sul em conjunto com o Laboratório de Alta Tensão (LAT-EFEI) da Universidade Federal de Itajubá. Este projeto durou cerca de quatro anos, porém os estudos continuaram mesmo após o seu término, culminando com esta tese de doutorado.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo desta tese de doutorado é desenvolver uma metodologia de inspeção remota de cadeias de isoladores em linhas de transmissão. Para isso, as seguintes etapas devem ser realizadas:

- Desenvolver um sistema de aquisição (hardware e software) capaz de detectar sinais de descargas parciais provenientes de isoladores com falhas em uma linha de transmissão;
- Desenvolver um software de reconhecimento de padrões para associar os padrões de descargas parciais com seus respectivos locais de origem, permitindo que se localize isoladores com falhas ao longo da linha de transmissão;

- Investigar os fatores que influenciam o treinamento das Redes Neurais Artificiais, responsáveis pelo reconhecimento de padrões, buscando as configurações ideais para o treinamento do software desenvolvido;
- Investigar os fatores que influenciam na etapa de reconhecimento de padrões, como a distância do ponto de leitura, resoluções vertical e horizontal da placa de aquisição e os próprios ajustes do sistema desenvolvido.
- Estudar a possibilidade de se treinar o software com sinais provenientes de simulações físicas realizadas em uma linha de transmissão artificial;
- Avaliar a possibilidade de treinar o software a partir de sinais oriundos de apenas algumas estruturas, mas de forma que consiga cobrir toda a linha de transmissão;
- Validar a metodologia na linha de transmissão real de 69 kV e 60 km de extensão disponibilizada pela AES Sul.

## 1.4 Contribuições

A principal contribuição desta tese é a elaboração de uma metodologia de inspeção de cadeias de isoladores executada a partir das subestações, sem que haja a necessidade de se percorrer a linha de transmissão. Além disso, essa tese apresenta também as seguintes contribuições:

- Aplicação dos transformadores de corrente como acopladores capacitivos durante a aquisição de sinais provenientes de descargas parciais;
- Utilização de apenas uma fase para a aquisição de sinais originados em todas as fases;
- Constatação da impossibilidade de se utilizar sinais simulados fisicamente na linha de transmissão artificial para treinamento das redes neurais;
- Constatação, no caso do sistema aplicado em laboratório, da possibilidade de se treinar as redes neurais com um conjunto reduzido de padrões, permitindo o reconhecimento de padrões desconhecidos,

ainda que haja perda de precisão do diagnóstico de localização de cadeias de isoladores danificadas.

## 1.5 Preâmbulo

Além desse capítulo introdutório, essa tese contém o seguinte:

- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica detalhada sobre os modos de falha de isoladores cerâmicos. Além disso, avalia os métodos e ferramentas atualmente utilizados para a inspeção de isoladores em linhas de transmissão e também os métodos e ferramentas em desenvolvimento;
- Capítulo 3 - Metodologia: apresenta e discute a metodologia proposta, traçando os alicerces de todo o desenvolvimento mostrado nessa tese;
- Capítulo 4 - Desenvolvimento: trata do desenvolvimento das ferramentas e da infraestrutura necessária para a aplicação da metodologia. São discutidos tanto o desenvolvimento de hardware quanto de software;
- Capítulo 5 - Ensaios: neste capítulo são apresentados os principais ensaios realizados durante o desenvolvimento da metodologia, que procuram avaliar os diversos fatores que podem influenciar no desempenho do sistema desenvolvido, além de investigar os limites de aplicação da metodologia;
- Capítulo 6 - Conclusões: são apresentadas as conclusões obtidas ao final deste trabalho, assim como a produção técnica e científica e sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 7 - Referências Bibliográficas: são apresentados os principais trabalhos consultados para o desenvolvimento dessa tese.

Capítulo 2

---

# Revisão Bibliográfica

## 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas e comentadas as informações obtidas durante a fase de revisão bibliográfica. Os principais assuntos abordados nesta etapa são as falhas em isoladores cerâmicos, metodologias clássicas de inspeção de isoladores e metodologias e tecnologias em desenvolvimento.

## 2.2 Revisão Bibliográfica

### 2.2.1 Falhas em Isoladores

Esta tese foi desenvolvida em uma linha de transmissão de 69 kV com comprimento de aproximadamente 60 km, cedida pela AES Sul. No cenário nacional, as linhas de transmissão deste nível de tensão, assim como as de níveis superiores, empregam majoritariamente isoladores cerâmicos, montados em cadeias, para a sustentação e ancoragem dos cabos. Estes isoladores devem suportar esforços mecânicos e elétricos de forma a garantir a integridade estrutural da linha de transmissão, assim como a continuidade do serviço. Os esforços mecânicos são:

- Forças verticais: são aquelas compostas pelos pesos dos condutores e, para o caso de regiões frias, pelo peso da neve ou gelo acumulado;
- Forças horizontais axiais: atuam no sentido longitudinal das linhas, sendo necessárias para manter os cabos suspensos;
- Forças horizontais transversais: surgem devido à ação do vento, atuando ortogonalmente aos cabos.

Já os esforços elétricos são:

- Tensões nominais e sobretensões em frequência industrial;
- Sobretensões de manobra;
- Sobretensões de origem atmosférica.

Os materiais utilizados na fabricação destes isoladores são a porcelana vitrificada e o vidro temperado. As principais características destes materiais são:

- Porcelana vitrificada: Possui baixa porosidade, não podendo conter bolhas de ar nem impurezas. Apresenta alta resistência mecânica e

dielétrica (entre 6 e 6,5 kV/mm). Devido à porosidade, ainda que baixa, a superfície dos isoladores fabricados com este tipo de material deve ser vitrificada a fim de torná-los impermeáveis. Esta camada superficial deve ser suficientemente robusta frente à ocorrência de arcos elétricos;

- Vidro temperado: Com rigidez dielétrica bem superior à da porcelana vitrificada, da ordem de 14 kV/mm, apresenta também como vantagem seu custo inferior. Entretanto, apesar da resistência mecânica ser semelhante à da porcelana vitrificada, este tipo de material é consideravelmente mais frágil frente à impactos devido à têmpera, podendo quebrar-se mais facilmente (Fuchs, 1977).

Os isoladores de suspensão, mais especificamente definidos como isoladores de disco pela norma brasileira (ABNT NBR 5032:2004), são utilizados para a composição das cadeias utilizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e possuem o formato e a composição típicos mostrados na Figura 2.1.

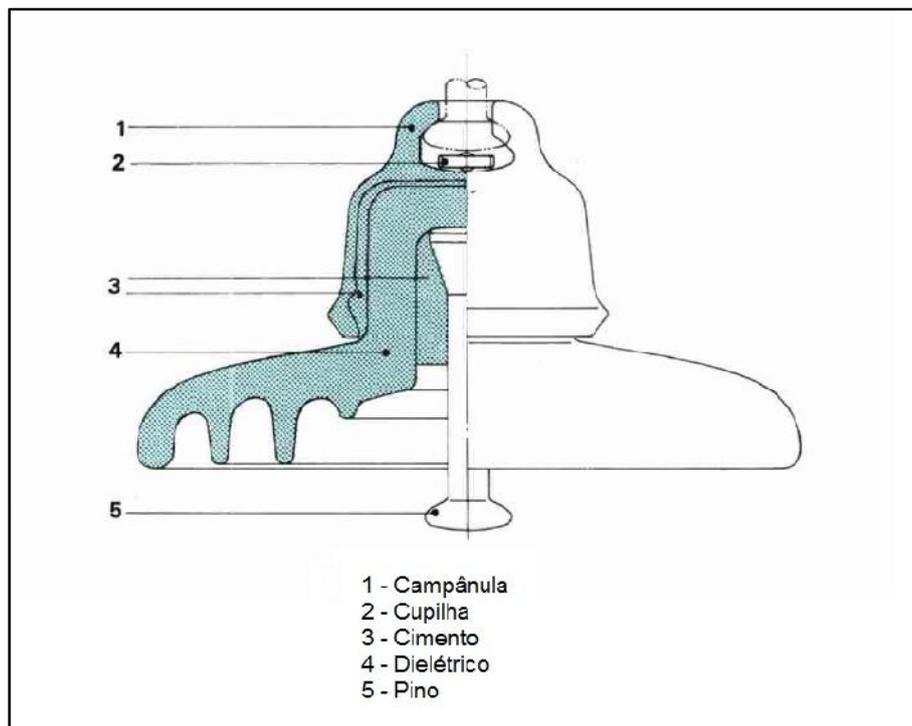


Figura 2.1 - Composição típica de um isolador de disco (Isoladores Santana S.A.).

Na Figura 2.1 pode-se observar que o elemento dielétrico, formado por uma peça única de porcelana ou vidro, é acoplada à campânula e ao pino através de camadas de cimento Portland, que devem suportar elevados esforços mecânicos de tração. A campânula e o pino possibilitam a conexão mecânica entre os isoladores

para a formação da cadeia. Estes dois elementos são fabricados em ferro fundido galvanizado, possuindo elevada resistência frente a corrosão. Um exemplo deste tipo de isolador, no caso fabricado em porcelana vitrificada, pode ser visto na Figura 2.2 e na Figura 2.3, que mostram as vistas superior e inferior do isolador modelo DI33C34 fabricado pela Santana Isoladores S.A.. Este tipo de isolador é classificado, segundo a norma brasileira (NBR ABNT 5032:2004), como Classe B, isto é, sua menor distância de perfuração é inferior à metade da distância de descarga a seco.

O formato dos isoladores de disco deve ser tal que permita a melhor distribuição de potencial possível ao longo de seu corpo, evitando valores de gradiente que possam causar esforços excessivos tanto no material dielétrico quanto nas ferragens. A Figura 2.4 (Fuchs, 1977) mostra a distribuição de potencial típica de um isolador de disco, de onde é possível notar que os maiores valores de gradiente surgem na região da campânula e do pino.



Figura 2.2 - Exemplo de isolador de disco de porcelana - vista superior.



Figura 2.3 - Exemplo de isolador de disco de porcelana - vista inferior.

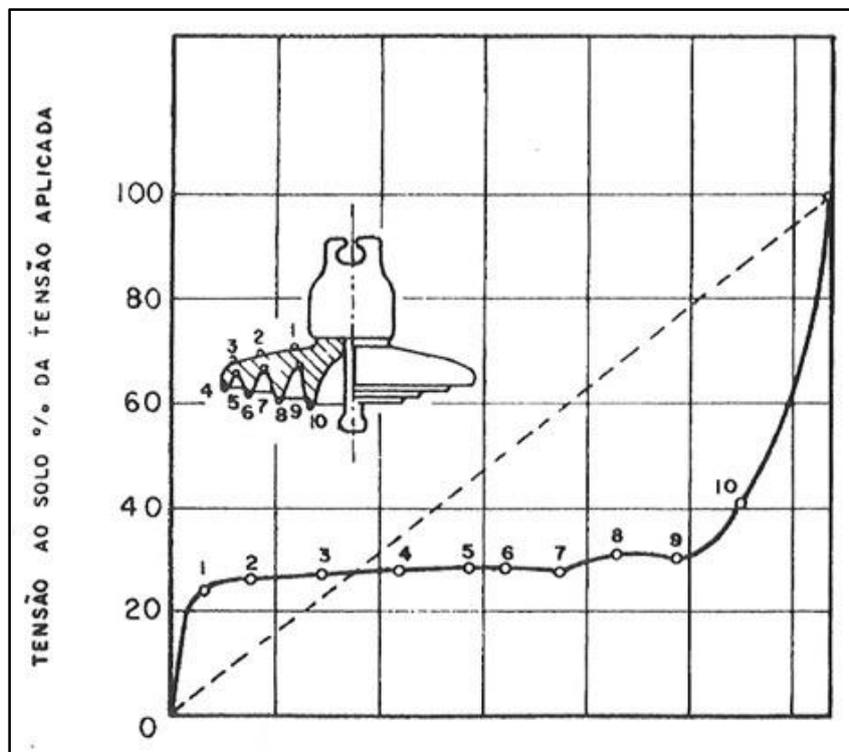


Figura 2.4 - Distribuição de potencial típica de um isolador de disco. Adaptado de Fuchs (1977).

Ao se associar isoladores de disco, formando cadeias de isoladores, a distribuição de potencial ao longo da cadeia assume uma característica não-uniforme. Essa característica pode ser visualizada a partir da modelagem básica de uma cadeia de isoladores utilizada por Fuchs (1977), cuja topologia é mostrada na Figura 2.5. Nesta figura estão identificadas as seguintes grandezas:

- C: capacitância entre campânula e pino de um isolador [F];
- c: capacitância de um isolador ao solo [F];
- k: capacitância de um isolador ao condutor [F];
- $U_n$ : tensão a que estão submetidos n isoladores da cadeia a partir do seu lado aterrado [kV];
- $U_g$ : tensão a que estão submetidos todos os z isoladores [kV].

A distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores é dada pela Equação (1.1):

$$U_n = \frac{U_g}{S^2 \operatorname{senh} S z} \left\{ \frac{c}{C} \operatorname{senh} S n + \frac{k}{C} \operatorname{senh} S (n - z) + \frac{k}{C} \operatorname{senh} S z \right\} \quad (1.1)$$

onde:

$$S = \sqrt{\frac{c+k}{C}} \quad (1.2)$$

Na prática, pode-se considerar  $k = 0$ , o que simplifica consideravelmente a Equação (1.1), que é reescrita da seguinte forma:

$$U_n = U_g \frac{\operatorname{senh} r n}{\operatorname{senh} r z} \quad (1.3)$$

onde:

$$r = \sqrt{\frac{c}{C}} \quad (1.4)$$

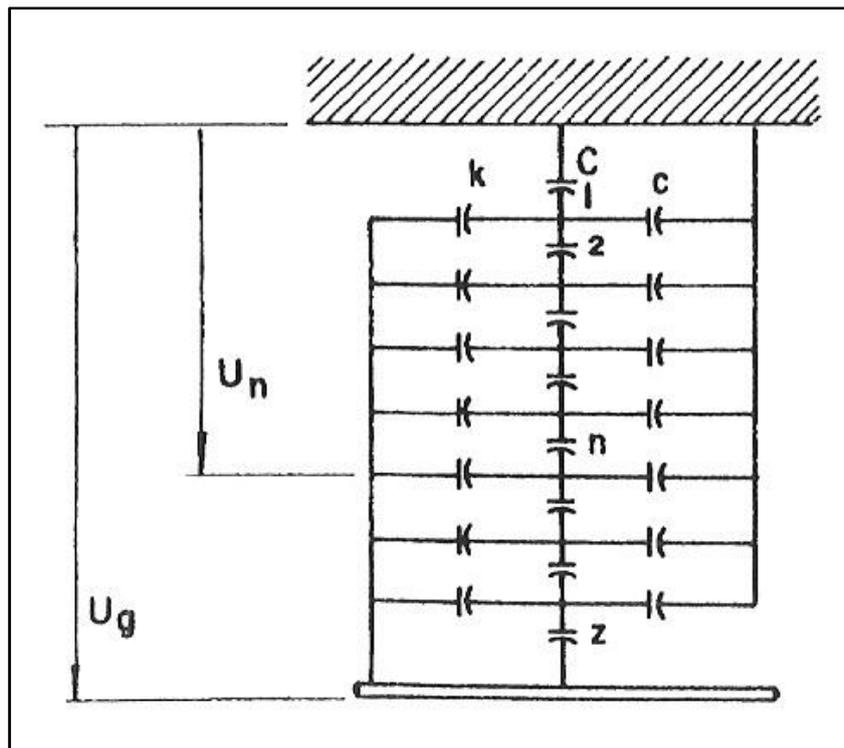


Figura 2.5 - Modelagem básica de uma cadeia de z isoladores (Fuchs, 1977).

Assumindo  $k = 0$  e  $c = 0,29$  tem-se, para uma cadeia formada por 8 isoladores, a distribuição de potencial mostrada na Figura 2.6.

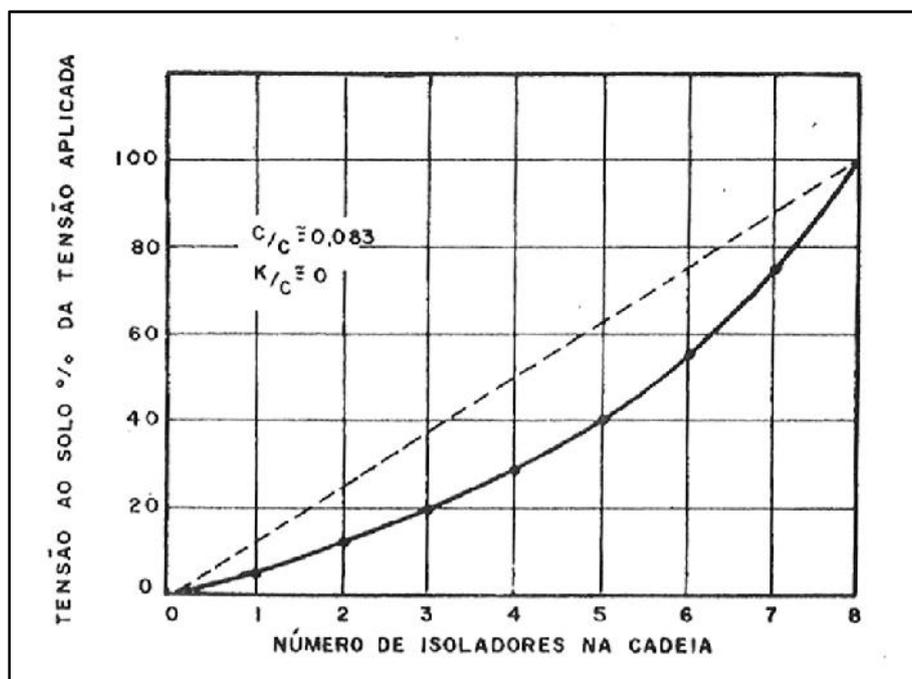


Figura 2.6 - Distribuição de potencial para uma cadeia formada por 8 isoladores (Fuchs, 1977).

O número de isoladores que compõem uma cadeia é determinado principalmente pelas sobretensões previstas, as quais podem ser originárias de

manobras, descargas atmosféricas e faltas. Os esforços mecânicos também são determinantes na quantidade de isoladores, sendo a aplicação (ancoragem ou suspensão) e a configuração da cadeia (simples ou composta) fatores de influência.

Além dos pontos comentados anteriormente, outros fatores influenciam na especificação e no desempenho de uma cadeia de isoladores. Fatores climáticos, ambientais e até mesmo sociais possuem grande impacto no desempenho das cadeias de isoladores. Os principais fatores climáticos são:

- Umidade relativa do ar;
- Precipitação de chuva;
- Precipitação de neve;
- Temperatura;
- Circulação de ar.

Como fatores ambientais, podem-se citar:

- Salinidade presente no ar (regiões costeiras);
- Poluição (industrial, poeira, etc);
- Acúmulo de excrementos de pássaros.

Por fim, há ainda como fator social a ocorrência de vandalismo, principalmente em áreas urbanas periféricas e rurais. Neste caso, os isoladores são danificados propositalmente das mais diversas formas, de pedras arremessadas até o uso de armas de fogo. Devido à sua menor suportabilidade à impactos, os isoladores de vidro são os mais visados. Ao negligenciar estes fatores, seja na etapa de projeto ou de operação da linha de transmissão, podem ocorrer situações que levem as cadeias de isoladores às condições de falha. Estas falhas, nos casos mais graves, podem culminar no rompimento da cadeia, causando a queda dos cabos sustentados e, por conseguinte, interrupção no fornecimento de energia.

A quebra de um ou mais isoladores de uma cadeia (Figura 2.7), resultado de atos de vandalismo, por exemplo, pode comprometer seriamente o seu desempenho. Em um estudo realizado no CEPEL (Mello *et al.*, 2009), os autores avaliaram a influência de isoladores quebrados ou perfurados em cadeias de suspensão e ancoragem para linhas de transmissão de 34,5 kV e 69 kV. No caso, a quantidade e a

posição de isoladores danificados foram variados e sua influência na suportabilidade das cadeias frente à tensão disruptiva foi estudada. Os resultados dos ensaios mostraram que a posição do isolador ou dos isoladores danificados na cadeia não influencia substancialmente no valor da tensão disruptiva, podendo sua variação ser desconsiderada. A quantidade de isoladores danificados na cadeia, entretanto, foi identificada como sendo determinante na redução da suportabilidade. No caso mais crítico analisado, onde todos os isoladores da cadeia foram danificados, os valores de tensão disruptiva obtidos aproximaram-se consideravelmente do valor da tensão nominal do sistema. Uma cadeia de isoladores nestas condições, portanto, provavelmente não possibilitaria nem mesmo sua energização em valores nominais de tensão e frequência para a qual foi projetada.

Um estudo similar (Nookuea; Chotigo; Pungsiri, 2011) mostra, além dos resultados da variação da suportabilidade de acordo com a quantidade e posição de isoladores quebrados na cadeia, a ocorrência de deformações na distribuição do campo elétrico frente a estas situações. Segundo os autores, estas deformações no campo elétrico possuem papel importante na variação dos valores de tensão disruptiva.

Em casos críticos, a deformação do campo elétrico pode ser suficientemente alta para ocasionar o efeito corona, cujos mecanismos físicos são descritos por Trinh (1995). Neste caso, a concentração de campo elétrico em determinadas regiões pode ocasionar gradientes de potencial maiores que o valor crítico disruptivo do ar, resultando no surgimento de descargas parciais. Este valor crítico, por sua vez, depende de fatores relacionados à composição do ar, condições climáticas e atmosféricas (pressão, umidade relativa, poluição, etc.). A ocorrência de descargas parciais acarreta em emissão de ondas eletromagnéticas e mecânicas, além do aquecimento do meio em sua volta. As ondas eletromagnéticas se apresentam nos espectros infravermelho, ultravioleta e também no espectro de luz visível. As ondas mecânicas geradas pelo efeito corona estão situadas tanto na faixa de som audível como na faixa de ultrassom.

Quando ocorre em cadeias de isoladores, o efeito corona pode trazer problemas tanto para a própria cadeia quanto para a linha de transmissão e demais sistemas que se encontram em sua proximidade. O principal problema para a cadeia de isoladores é a corrosão de suas ferragens (Mello; Cardoso; Gonçalves, 2010), que pode culminar na ruptura da cadeia em casos extremos. Um exemplo pode ser visto

na Figura 2.8, onde o pino de um dos isoladores da cadeia encontra-se em avançado estado de corrosão.



Figura 2.7 - Exemplo de cadeia de isoladores contendo um isolador quebrado sob ensaio em laboratório.



Figura 2.8 - Pino de isolador de disco altamente corroído.

O efeito corona também acarreta em perdas na linha de transmissão. Em conjunto com outras fontes, como cabos e ferragens em geral, as perdas por efeito corona podem chegar a centenas de kW/km (Fuchs, 1977). Além das perdas, a ocorrência de descargas parciais acarreta no surgimento de sinais de alta frequência na cadeia de isoladores, que se propagam pela linha de transmissão, podendo afetar sistemas de comunicação baseados em *power line carrier* (PLC), conforme citado na norma ANSI/IEEE Std 643 (ANSI/IEEE, 1980). Por último, a emissão de ondas eletromagnéticas pode gerar interferências em sistemas de comunicação e equipamentos eletrônicos em geral, como receptores de rádio e televisão (Looms, 1988).

Além da quebra de isoladores, o acúmulo de contaminantes em sua superfície é outro problema que pode trazer sérias consequências para a linha de transmissão. Os principais tipos de contaminantes nocivos são provenientes das correntes de ar marítimas, que carregam partículas de sal suspensas no ar, e poluição industrial em geral. Em ambos os casos, o acúmulo de contaminantes por si só não é um problema, que existirá somente se houver incidência de um elevado grau de umidade.

Os contaminantes são trazidos através da ação do vento que, em conjunto com a ação das forças gravitacionais e de atração eletrostática, são depositados em diversas regiões do isolador. A quantidade de contaminantes que aderem à superfície depende do tamanho e da densidade das partículas, da velocidade e direção do vento e da forma do isolador. As partículas maiores e mais pesadas são depositadas principalmente na parte de cima, enquanto as menores e mais leves tendem a aderir na parte de baixo. Estas últimas são trazidas em direção ao isolador pela ação do vento e, ao entrar na região entre as saias internas, ficam sujeitas à ação de vórtices. Assim, estas partículas ficam presas a esta região, circulando por um longo período, até que se prendam à superfície de cerâmica (Looms, 1988). A ação do fluxo de ar em um isolador de disco similar aos utilizados no desenvolvimento desta tese pode ser visualizada na Figura 2.9. Um exemplo de isolador de disco contaminado na região das saias internas é mostrado na Figura 2.10.

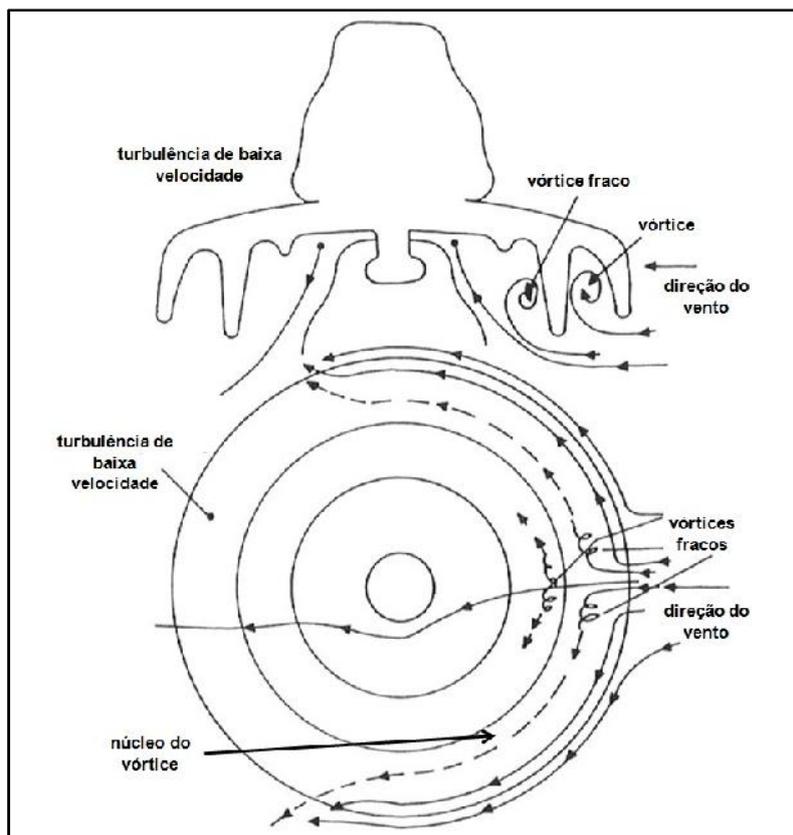


Figura 2.9 - Fluxo de ar em um isolador de disco. Adaptado de Looms (1988).



Figura 2.10 - Exemplo de isolador de disco contaminado na região das saias internas.

Quando uma camada de contaminantes nociva, isto é, que contém sais solúveis ou ácidos diluídos, é depositada sobre o isolador, a mesma não influencia em seu desempenho contanto que esteja livre de umidade. Na presença de umidade, entretanto, a camada de contaminantes se torna condutiva, ocasionando aumento expressivo da parcela resistiva da corrente de fuga, que flui pela superfície do isolador. Experimentos (Kawamura; Isaka, 1973) mostram que, para uma camada de contaminante formada por uma solução saturada de NaCl (concentração 26,4%), a 20°C a umidade relativa do ar deve ser no mínimo 75% para que haja absorção da umidade por essa camada, tornando-a condutiva. Os autores deste trabalho demonstram experimentalmente ainda as seguintes relações:

- Quanto maior a quantidade de sal na camada de contaminante, maior a quantidade de umidade absorvida por ela;
- Quanto maior a umidade relativa do ar, maior a quantidade de umidade absorvida pela camada de contaminante;
- Quanto maior a quantidade de sal na camada de contaminante umedecida, maior o valor da corrente de fuga;
- Quanto maior a umidade relativa do ar, maior o valor da corrente de fuga para isoladores contaminados;
- Quanto maior a umidade relativa do ar, menor a tensão de flashover para isoladores contaminados;
- Quanto maior a quantidade de sal na camada de contaminante umedecida, menor a tensão de flashover.

O fluxo da parcela resistiva da corrente de fuga faz com que a superfície seque de forma não-uniforme, isto é, a superfície do isolador apresenta regiões úmidas (condutivas) intercaladas com regiões secas (não-condutivas) durante o processo de secagem. Estas regiões não-condutivas são comumente chamadas de bandas secas, nas quais podem ocorrer descargas, que por sua vez estão em série com a corrente que flui pelas regiões úmidas da superfície do isolador. Estas descargas podem ser de curta duração, quando o arco elétrico se extingue rapidamente, ou de longa duração, que ocorre quando a resistência da banda seca é baixa demais para contribuir para extinção do arco. Neste caso, os arcos presentes

nas bandas secas tendem a se estender ao longo da superfície do isolador, culminando na ocorrência de flashover (Mello *et al.*, 2001).

As descargas parciais ocasionadas pela formação de bandas secas em isoladores contaminados foram objeto de estudo de Cavallini *et al.* (2006). Neste, os autores investigaram em laboratório a relação entre as características das descargas parciais e o grau de poluição de um isolador de disco analisado de forma isolada, isto é, o isolador não fazia parte de uma cadeia. O isolador foi artificialmente contaminado por solução salina em diversos graus de salinidade e energizado em seguida. Através de um transformador de corrente de alta frequência (HFCT) conectado ao cabo de aterramento do isolador, conforme mostra a Figura 2.11, os sinais gerados pelas descargas parciais foram detectados e enviados à um equipamento de análise de descargas parciais. Com este equipamento foram analisadas as seguintes características das descargas parciais: amplitude e ângulo de incidência em relação à tensão de alimentação (frequência industrial). A partir destas características, gráficos como o da Figura 2.12 foram traçados de forma a permitir a identificação de padrões de descargas parciais e relacioná-los com o grau de contaminação do isolador. O padrão mostrado nesta figura se refere ao caso em que o isolador teve sua superfície superior contaminada com solução salina de concentração 20 g/l, permanecendo sua superfície inferior seca e livre de contaminação. A tensão aplicada foi de 30 kV, duas vezes o valor da tensão de surgimento de descargas parciais. As temperaturas máxima e mínima registradas no isolador foram, respectivamente, 25,6 °C e 21,3 °C. Um exemplo de sinal típico de descarga parcial obtido neste trabalho pode ser observado na Figura 2.13, que foi obtida em um ensaio em que o isolador estava completamente contaminado (ambas as superfícies) com uma solução salina a 20 g/l.

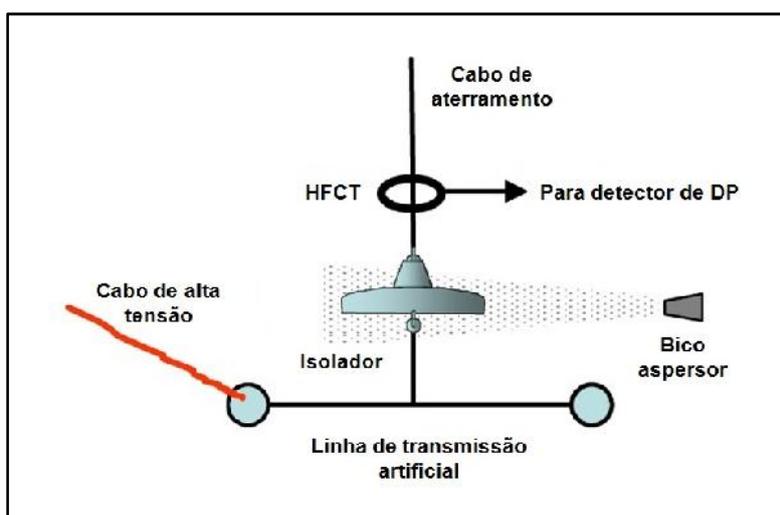


Figura 2.11 - Esquema de ensaio de isolador contaminado. Adaptado de Cavallini *et al.* (2006).

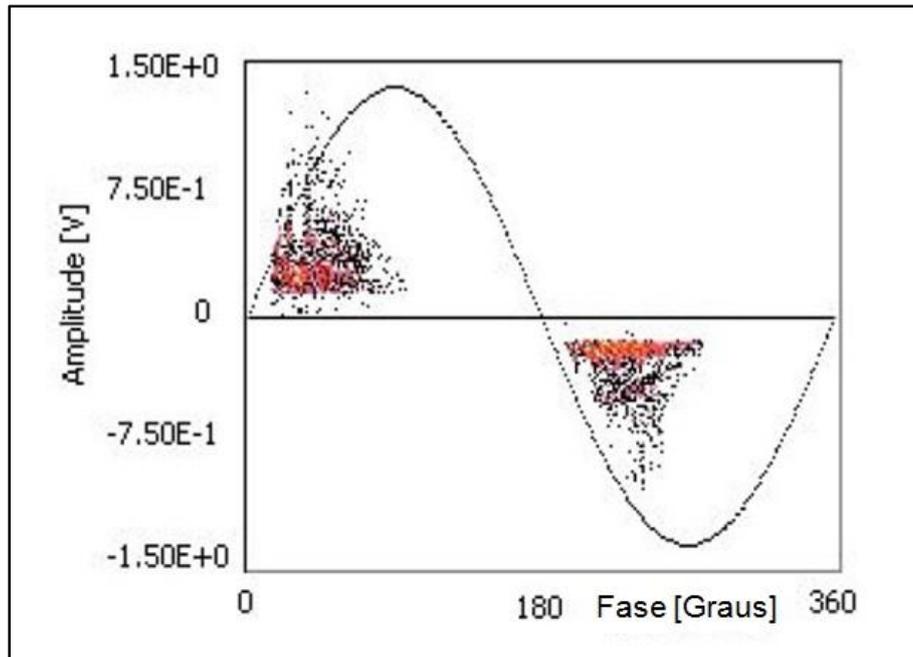


Figura 2.12 - Exemplo de padrão de descarga parcial. Adaptado de Cavallini *et al.* (2006).

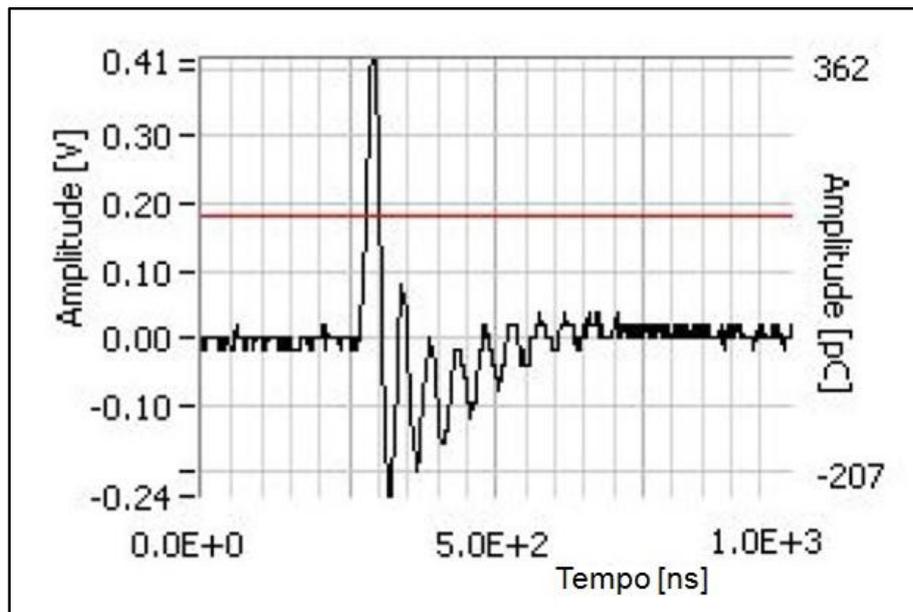


Figura 2.13 - Sinal típico de descarga parcial. Adaptado de Cavallini *et al.* (2006).

Em um trabalho subsequente (Cavallini *et al.*, 2007), os autores realizam basicamente o mesmo tipo de análise anteriormente apresentada, porém para uma cadeia contendo três isoladores de vidro. Diferentemente do caso onde apenas um isolador foi analisado e a ocorrência de descargas parciais concentrava-se na parte inferior do isolador, próximo ao pino, no caso da cadeia de isoladores a ocorrência de descargas parciais concentrou-se entre a região das bordas dos isoladores e as partes

metálicas do isolador imediatamente abaixo. Novamente foi possível estabelecer uma relação entre o grau de contaminação dos isoladores quando da presença de água, a tensão aplicada e a ocorrência de descargas parciais. O seguinte comportamento das descargas parciais pode ser observado com o aumento da contaminação e da tensão aplicada:

- Substancial aumento da amplitude;
- Aumento da dispersão de amplitude;
- Diminuição da dispersão de fase;
- Pequena redução da fase de ocorrência para valores muito altos de tensão aplicada.

Além da cadeia de isoladores contaminada com solução salina, em concentrações de 20 g/l e 40g/l, uma cadeia contendo isoladores limpos também foi analisada. Esta última também apresentou incidência de descargas parciais quando molhada, entretanto o padrão dessas se mostrou consideravelmente diferente dos padrões obtidos em cadeias com isoladores contaminados, sendo caracterizado pela baixa dispersão das amplitudes. Estas descargas parciais foram atribuídas pelos autores ao efeito corona ocasionado pela presença da água borrifada na cadeia de isoladores.

O efeito corona decorrente da presença de gotas de água em uma região de campo elétrico foi estudada por Guan *et al.* (2005), onde um conjunto de simulações computacionais foi desenvolvido de forma a analisar as deformações do campo elétrico na presença de gotas de água na superfície de um material isolante. Foi observado que esta deformação do campo elétrico depende tanto da intensidade do campo elétrico em questão como das propriedades das gotas de água (volume, ângulo de contato, quantidade, disposição e espaçamento entre as gotas).

Além da contaminação causada pelos motivos discutidos até aqui, deve-se considerar também a causada por excrementos de pássaros como um dos grandes motivos de falhas em isoladores. Neste caso, a contaminação é depositada de forma diferente dos casos anteriores, concentrando-se de forma não-homogênea principalmente no isolador de cima das cadeias do tipo I (Tklaia; Niitsoo; Palu, 2012). Neste trabalho, os autores investigam os efeitos deste tipo de contaminação, utilizando para isso cadeias de isoladores naturalmente contaminadas, retiradas de campo após décadas de operação. Essas cadeias foram molhadas e energizadas em laboratório,

sendo avaliadas visualmente e também por medição de corrente de fuga. Foi, então, notada a ocorrência de descargas parciais nas superfícies dos isoladores, tanto nos contaminados como nos não-contaminados. No caso dos isoladores contaminados, as descargas parciais foram observadas durante a formação das bandas secas, cessando com o término do processo de secagem do isolador. Já no caso dos isoladores não-contaminados, foi observada a ocorrência de descargas parciais com subsequente evolução para uma disrupção completa (flashover).

Esse comportamento é devido ao desequilíbrio da distribuição de tensão nos isoladores, que por sua vez tem origem nos seus diferentes valores de resistência. Os isoladores contaminados possuem resistência consideravelmente mais baixa que os não-contaminados, conforme mostram as medições realizadas pelos autores, colocando estes últimos sob elevado estresse elétrico, diferentemente do que ocorre com os isoladores contaminados. Aliado ao fato da secagem dos isoladores não-contaminados ser mais rápida que no caso dos isoladores contaminados, o estresse elétrico excessivo sobre os isoladores não-contaminados pode levar à uma disrupção completa sobre o seu corpo. Outro efeito da contaminação por excrementos está relacionado à corrosão das partes metálicas do isolador, como mostra a Figura 2.14.



Figura 2.14 - Campânula de isolador de vidro em processo de corrosão devido ao acúmulo de excrementos de pássaros (Taklja; Niitsoo; Palu, 2012).

Em um estudo similar (Zhou *et al.*, 2009) são analisados em laboratório os efeitos de jatos de excrementos de pássaros (*bird streamer*) em cadeias de isoladores. Para isso, os autores utilizaram excremento artificial, constituído de um líquido de mesma viscosidade e condutividade típicos de excrementos de pombos. O jato foi

aplicado à cadeias de isoladores nas configurações I e V, sendo realizadas então observações visuais durante a ocorrência de flashover. Destes ensaios foi verificado que a ocorrência de flashover depende dos seguintes parâmetros:

- Quantidade de líquido liberado no jato: quanto maior a quantidade de líquido liberado pelo sistema de ensaio, maior a probabilidade de ocorrência de flashover;
- Condutividade e viscosidade: quanto maiores os valores destes parâmetros, maior a probabilidade de ocorrência de flashover;
- Posição do jato em relação à cadeia de isoladores: quanto mais próximo da cadeia, maior a probabilidade de ocorrência de flashover;
- Configuração da cadeia de isoladores: quanto maior a distância entre o condutor e os isoladores, menor a probabilidade de ocorrência de flashover. Por este motivo os autores observaram flashover em cadeias destinadas a linhas de 220 kV e não em cadeias destinadas à linhas de 500 kV, para o caso da configuração I. Quando configuradas em V, entretanto, as cadeias de 500 kV apresentaram ocorrência de flashover quando o jato atingiu as regiões mais próximas dos condutores;
- A probabilidade de ocorrência de flashover aumenta quando os isoladores estão previamente contaminados por excrementos.

### **2.2.2 Métodos Tradicionais de Inspeção de Isoladores**

De forma a identificar situações perigosas envolvendo falhas em isoladores, como as discutidas no item anterior, é costume a realização de inspeções presenciais ao longo das linhas de transmissão. O tipo de inspeção mais simples e usual, para o caso das linhas de 69 kV, foco deste trabalho, é a inspeção visual. Sua execução envolve poucas ou nenhuma ferramenta de auxílio, quando os isoladores são inspecionados a olho nu. As ferramentas envolvidas são binóculos e câmeras fotográficas dotadas de objetivas do tipo zoom. Por sua simplicidade e despojamento de tecnologias de medição, a qualidade da execução das inspeções visuais depende consideravelmente da habilidade e experiência de quem as realiza. Entretanto, mesmo com uma equipe devidamente treinada e experiente, a realização de inspeções visuais é altamente subjetiva, não produzindo resultados precisos. Além disso, para a sua execução é necessário escalar as torres, tornando o trabalho pouco produtivo e perigoso. Ainda devido à subjetividade de seus resultados, muitas vezes isoladores

em boas condições são retirados da linha de transmissão sem necessidade, enquanto outros em condições perigosas, mas não aparentes, são deixados em operação.

Assim, de forma a se obter resultados mais confiáveis e precisos sobre as condições dos isoladores, foram desenvolvidas tecnologias e metodologias de inspeção baseadas em alguns sintomas das falhas discutidas no item 2.2.1, os quais são citados a seguir:

- Emissão de ondas de RF;
- Emissão de ultrassom;
- Aquecimento (emissão luz infravermelha);
- Emissão de luz ultravioleta.

Aplicada a sistemas elétricos e mecânicos dos mais variados tipos, a inspeção termográfica (ou termografia) é normalmente utilizada em linhas de transmissão e subestações principalmente para a detecção de pontos quentes em conexões. A partir de uma câmera sensível à radiação infravermelha, são geradas imagens dos corpos sob inspeção constituídas de uma escala de cores proporcional à temperatura, como exemplificado na Figura 2.15.

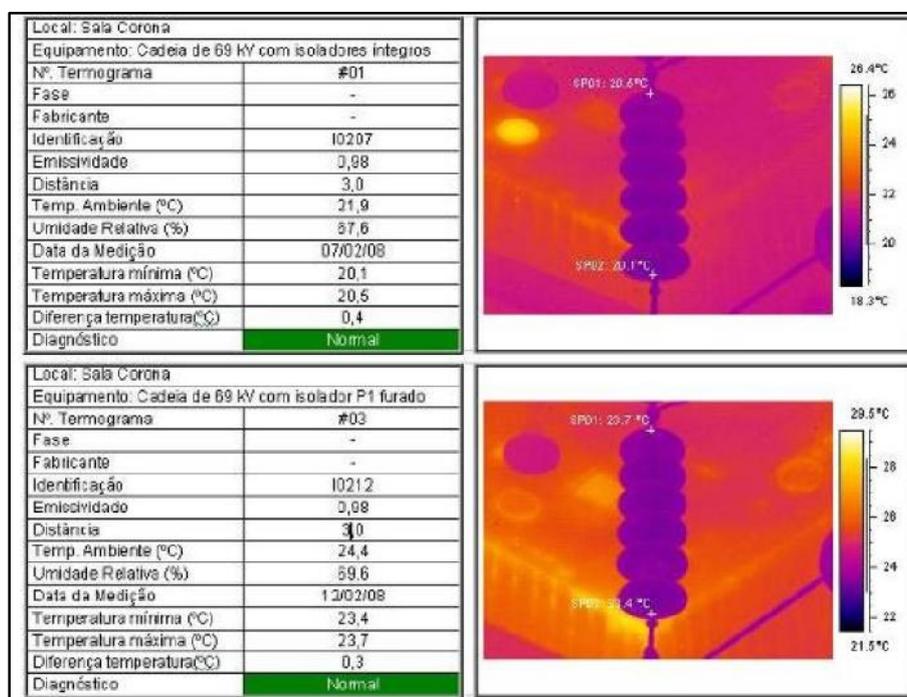


Figura 2.15 - Exemplo de resultado de inspeção termográfica em duas cadeias de isoladores (uma danificada e uma sã) para 69 kV (Mello *et al.*, 2009).

A inspeção termográfica, porém, possui consideráveis limitações quando aplicadas a isoladores cerâmicos, ainda que seja adotada por algumas concessionárias de energia. Os resultados mostrados na Figura 2.15 exemplificam uma dessas limitações. No caso, duas cadeias de isoladores de 69 kV, cada uma contendo seis isoladores de porcelana, foram inspecionadas em laboratório. A primeira cadeia possuía todos os isoladores em bom estado, enquanto que a segunda apresentava um dos isoladores perfurado. Conforme pode-se observar, nenhuma diferença de temperatura entre as duas cadeias foi detectada pelo termovisor (Mello *et al.*, 2009).

Em um outro trabalho (Lang; Allan; Zhou, 1994), foi analisada a eficiência da inspeção termográfica para isoladores de disco mediante desenvolvimento teórico e realização de ensaios. Foi notado que a diferença de temperatura entre um disco são e um disco curto-circuitado é de apenas 0,4 °C, valor tão pequeno que poderia impossibilitar sua detecção por este tipo de inspeção. Também foi analisada a influência de fatores ambientais e climáticos, chegando-se a conclusão que, para que se obtenha resultados mais precisos, as seguintes condições devem ser atendidas:

- Ausência ou pouca incidência de radiação solar, a qual pode contribuir para aquecer os isoladores, ocultando as diferenças de temperatura causadas por não-conformidades;
- Ausência de vento, uma vez que este contribui para a troca de calor entre os isoladores e o meio, resfriando os isoladores e podendo ocultar os resultados;
- Alta umidade relativa do ar, a qual contribui para o maior aquecimento dos isoladores, evidenciando a diferença de temperatura entre os isoladores da cadeia.

Entretanto, mesmo atendendo as condições anteriores, os resultados das inspeções termográficas para o caso de cadeias de isoladores cerâmicos não apresenta resultado satisfatório. Sua aplicação deve ficar restrita à isoladores poliméricos, já que o desempenho de termovisores obtido com este tipo de isolador é razoavelmente superior. O principal motivo do sucesso da inspeção termográfica para o caso de isoladores poliméricos é que, neste tipo de isolador, as falhas podem evoluir para a ocorrência de trilhamento, fenômeno não observado em isoladores cerâmicos. A corrente que flui pelas trilhas produz aquecimento suficiente para sensibilizar o termovisor, ainda que seu valor não possa ser considerado alto. Em laboratório, foi

observada uma diferença de 3,5 °C entre a região de ocorrência de trilhamento e a região saudável do isolador (Bologna; Mahatho; Hoch, 2002).

Utilizando equipamentos mais baratos, muito mais simples e apresentando resultados bem superiores, a inspeção acústica de isoladores é uma das técnicas que tem sido empregadas com sucesso em linhas de transmissão. Os fundamentos teóricos deste tipo de inspeção foram discutidos por Lundgaard (1992). Um trabalho publicado pelo mesmo autor (Lundgaard, 1992), logo em seguida, aborda também os aspectos práticos da inspeção acústica para diversos casos e equipamentos. Há um considerável número de trabalhos que tratam deste tipo de inspeção. Oliveira *et al.* (2007) discute a aplicação da inspeção acústica para isoladores de pino de porcelana, classe 15 kV, instalados em linhas de distribuição. Neste trabalho, um detector de ultrassom parabólico foi utilizado para inspecionar milhares de isoladores instalados em campo, sendo também avaliados em laboratório mediante a realização de ensaios normalizados pela norma ABNT NBR 5049 (ABNT, 1985), que foi substituída pela norma ABNT NBR 5032 (ABNT, 2004). Os resultados dos ensaios realizados em laboratório permitiram que se pudesse criar uma metodologia de inspeção e também um conjunto de ajustes ótimos do detector de ultrassom específicos para o caso destes isoladores. Durante o desenvolvimento do trabalho, foram avaliados os impactos dos fatores climáticos e ambientais na execução e qualidade da inspeção, podendo-se destacar os seguintes:

- Existe influência da temperatura ambiente na capacidade de detecção dos ruídos ultrassônicos, porém esta é praticamente desprezível;
- A inspeção pode ser realizada nos casos em que a umidade relativa do ar seja menor ou igual a 65%. Caso contrário, os ruídos provenientes de falhas em isoladores podem ser ocultados por ruídos oriundos de outras fontes;
- A máxima velocidade do vento permitida é de 5 m/s, pois valores mais altos podem acarretar em considerável interferência no microfone do detector ultrassônico.

Apesar destas restrições, os resultados obtidos mostram que a inspeção acústica é muito mais adequada a este fim que a inspeção termográfica. No caso do trabalho desenvolvido por Oliveira *et al.* (2007), o índice de acertos no diagnóstico acústico chegou a 83% dos casos. Trabalho similar foi realizado por Salustiano *et al.* (2014) também para isoladores de pino de porcelana de classe 15 kV, porém com

maior abrangência. Neste trabalho, os autores verificaram que 98,43% dos isoladores diagnosticados como apresentando falhas durante a inspeção ultrassônica, em campo, realmente falharam nos testes normalizados realizados em laboratório. Entretanto, a inspeção termográfica realizada nos mesmos isoladores não acusou nenhum problema (0% de taxa de detecção de falhas), mostrando-se totalmente ineficiente para este caso. Em ambos os trabalhos citados o detector de ultrassom foi capaz de indicar exatamente quais os isoladores que apresentavam falhas, ainda que estes estivessem instalados próximos à outras fontes de ruído ultrassônico. Isso significa que, por exemplo, no caso de um conjunto de três isoladores instalados em uma cruzeta, o detector ultrassônico consegue apontar exatamente quais são os isoladores saudáveis e quais os isoladores que apresentam falha.

A inspeção por RF é comumente realizada em conjunto com a inspeção por ultrassom, utilizando para isso receptores de RF equipados geralmente com antenas do tipo "espinha de peixe". Os modelos mais sofisticados permitem a sintonia em faixas que vão de poucos MHz até a faixa de GHz, além de dispor de funcionalidades de análise de sinais, armazenamento de dados, etc. Já os modelos mais simples possuem faixa de sintonia estreita, normalmente de poucas dezenas de MHz, possibilitando operação simples, análoga a receptores analógicos de AM e FM (rádio comercial). A aplicação deste tipo de inspeção também foi investigada por Oliveira *et al.* (2007) e Salustiano *et al.* (2014), de onde podem ser destacados os seguintes resultados:

- Os receptores de RF não conseguem identificar a fonte exata de falha, indicando apenas a região que a contém. Tomando o mesmo exemplo dos isoladores instalados em uma cruzeta citado anteriormente, não é possível identificar qual ou quais isoladores apresentariam falhas. Entretanto, é possível identificar a cruzeta ao longo da linha;
- Considerando a limitação exposta anteriormente, e então estabelecendo como meta identificar se uma cruzeta contém ou não isoladores com falhas, o índice de acerto de diagnóstico da inspeção por RF é similar ao obtido pela inspeção por ultrassom;
- A inspeção por RF pode ser realizada a uma distância maior dos isoladores quando comparada com a inspeção por ultrassom.

Assim, os trabalhos citados sugerem que as inspeções por RF e ultrassom sejam realizadas em conjunto, sendo a primeira utilizada para identificar as estruturas

que contém isoladores com falhas e a segunda para identificar exatamente quais os isoladores nestas condições. Pelo desempenho apresentado, tanto a inspeção por RF quanto a inspeção por ultrassom são indicadas para manutenção em linhas de transmissão e distribuição. Porém, sua execução pode se tornar muito complicada quando realizada em área urbana, pois são bastante susceptíveis a ruídos causados principalmente por motores elétricos e sistemas de ignição de motores a combustão. Em regiões urbanas de alta densidade a execução destas inspeções pode se tornar inviável.

Por fim, tem-se a inspeção por UV como o método tradicional de inspeção mais sofisticado e caro. Este tipo de inspeção é realizado com o auxílio de câmeras sensíveis à radiação ultravioleta, que apresentam como resultado uma sobreposição de duas imagens: uma convencional, como a obtida por máquinas fotográficas comuns, e outra formada apenas por pontos brancos correspondentes às fontes de UV. Um exemplo de diagnóstico pode ser visto na Figura 2.16. Este tipo de câmera é popularmente conhecida como câmera de corona.

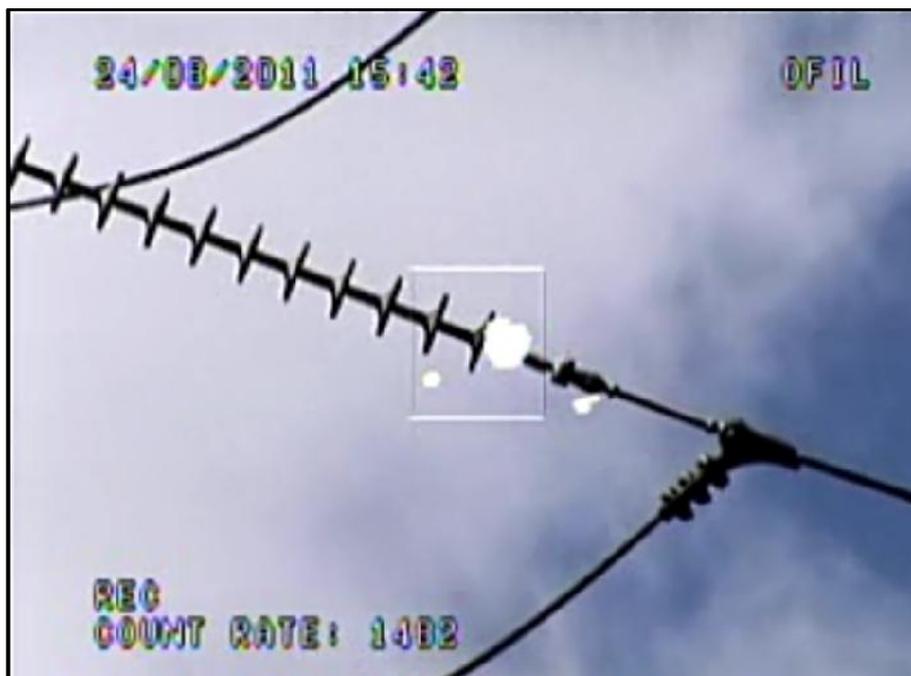


Figura 2.16 - Exemplo de imagem gerada por uma câmera de corona. A mancha branca dentro do quadrado corresponde à região da fonte de radiação ultravioleta.

O trabalho desenvolvido por Pattanadech e Yutthagowit (2005) mostra como ocorre o efeito corona em cadeias de isoladores com unidades perfuradas e sãs com o auxílio de simulações computacionais, correlacionando os resultados das simulações com ensaios em laboratório, os quais contaram com a aplicação de uma câmera de corona.

A inspeção por UV possui como fator limitante a tensão nominal do sistema em que são aplicados os isoladores. Enquanto que para o caso de linhas de transmissão este tipo de inspeção pode ser aplicada com sucesso, no caso de linhas de distribuição a situação se torna bastante desfavorável, como pode ser observado no estudo desenvolvido por Salustiano *et al.* (2014). Neste caso, nenhum dos isoladores de pino de porcelana, classe 15 kV, que apresentavam falha foi diagnosticado como tal pela câmera de corona empregada quando energizados com as tensões nominais dos sistemas analisados (11,4 kV e 13,8 kV fase-fase). Durante o desenvolvimento desta tese de doutorado, entretanto, a identificação de efeito corona em cadeias de isoladores de porcelana e vidro para linhas de 69 kV foi realizada com sucesso em campo.

As câmeras de corona possuem alto custo de aquisição, o que faz com que as inspeções por UV fiquem restritas à casos onde os demais tipos de inspeção sejam realmente difíceis de ser realizados e apresentem importância vital para o sistema elétrico, como no caso de linhas de transmissão de extra alta tensão. Nestes casos, é comum a utilização de câmeras de corona acopladas à helicópteros, sendo realizada varredura aérea em toda a extensão da linha.

### **2.2.3 Métodos de Inspeção de Isoladores em Desenvolvimento**

Além das inspeções tradicionais comentadas no item anterior, outros métodos tem sido estudados e desenvolvidos no meio acadêmico. Apesar de ainda não apresentarem desenvolvimento pleno, estes métodos tem sido empregados em campo em caráter experimental ou mesmo comercial.

Alguns métodos são baseados nas inspeções tradicionais, como no caso do sistema de localização de isoladores danificados em linhas de transmissão, que foi criado com base na triangulação de sinais de RF emitidos pelo efeito corona (Pinto; Luqueze; Justo, 2008). Técnica similar pode ser aplicada no caso de inspeções acústicas, como mostra Lundgaard (1992). Ainda com relação às inspeções por RF e por ultrassom, existem os métodos destinados a avaliar a condição de isoladores a partir das propriedades dos respectivos sinais, como composição harmônica e padrão de forma de onda.

Ferreira *et al.* (2009) discute o desenvolvimento de um sistema de avaliação do grau de poluição de isoladores de disco baseado na detecção e análise de ruídos ultrassônicos emitidos por eles. Através da aplicação de redes neurais artificiais (RNA)

como ferramenta de reconhecimento de padrões, o sistema desenvolvido foi capaz de correlacionar o grau de poluição dos isoladores com o ruído ultrassônico recebido.

Na mesma linha de abordagem, porém utilizando sinais de RF, pode-se citar o sistema desenvolvido por Rocha (2014), o qual utiliza RNA e outras técnicas de processamento de sinais para associar o estado de isoladores de disco de uma linha de transmissão de 69 kV com os ruídos de RF emitidos por eles.

Além dos sinais acústicos e de RF, os sinais elétricos oriundos das descargas parciais também são utilizados como forma de inspeção de isoladores. Conforme comentado no item 2.2.1, a investigação realizada por Cavallini *et al.* (2006) permite associar o grau de poluição de um isolador de disco com o padrão de ocorrência das descargas parciais, cujos sinais são lidos a partir do aterramento do isolador através de um HFCT. Tal padrão, que pode ser exemplificado pelo gráfico da Figura 2.12, possui como variáveis o ângulo de ocorrência das descargas em relação à tensão de alimentação (frequência industrial), a amplitude das descargas parciais e a dispersão dessas amplitudes.

Uma sequência desse trabalho (Cavallini *et al.*, 2007) estende a análise para isoladores associados em uma cadeia e faz uma breve comparação dos padrões com as formas de onda típicas das correntes de fuga associadas. A análise da corrente de fuga é realizada de forma mais profunda por Chandrasekar *et al.* (2009), onde as suas características são relacionadas ao grau de poluição de isoladores. Estas características são o ângulo de fase em relação à tensão aplicada e a composição harmônica. Este tipo de análise de corrente de fuga também foi investigada por outros autores, como Swarno (2001), que a utiliza para avaliar a condição de isoladores de pedestal cerâmicos de 20 kV, porém tem sido mais difundida para o caso de isoladores poliméricos.

Os métodos baseados nas inspeções clássicas possuem como desvantagem a necessidade de se ensaiar os isoladores em laboratório ou, para os casos em que os isoladores são ensaiados em campo, a necessidade de se instalar os equipamentos de inspeção junto ao isolador. Assim, tais métodos, apesar de apresentarem vantagens em relação às inspeções clássicas no que tange a precisão do diagnóstico, ainda não conseguem contornar a obrigatoriedade de se realizar as inspeções *in loco*.

De forma a eliminar ou pelo menos reduzir a necessidade do deslocamento de operadores ao longo das linhas durante as inspeções, sistemas robóticos tem sido desenvolvidos utilizando diversas tecnologias e princípios de operação. Os veículos

aéreos não-tripulados são mais frequentemente encontrados, como os modelos desenvolvidos por Luque-Vega *et al.* (2014) e Li *et al.* (2013). Robôs capazes de caminhar pelas linhas de transmissão, como o desenvolvido por Zhou *et al.* (2005), também tem sido objeto de grande interesse, ainda que sua concepção seja mais complexa. Estes dois tipos de robôs tem em comum, geralmente, o uso de câmeras convencionais e infravermelhas como ferramentas de inspeção não só de isoladores mas também de outros componentes da linhas de transmissão. Há ainda robôs desenvolvidos exclusivamente para inspeção de isoladores, como no caso do modelo desenvolvido por Park *et al.* (2012), o qual se diferencia dos citados anteriormente principalmente pelas ferramentas de inspeção. Este robô realiza a medição da resistência de isolamento e da distribuição de tensão em isoladores de suspensão como forma de avaliar sua integridade. A operação desses robôs depende do grau de sofisticação dos modelos, podendo ser manual ou semi-autônoma.

As inspeções auxiliadas por robôs e veículos aéreos não-tripulados constituem em um grande avanço rumo à realização de inspeções de forma remota. Entretanto, os equipamentos desenvolvidos até o momento trabalham de forma semi-autônoma, isto é, ainda necessitam da intervenção humana em determinados momentos. Esta intervenção deve ser realizada por operadores altamente especializados, o que por si só constitui em um agravante operacional para as concessionárias de energia. Além disso, o custo dos equipamentos envolvidos é demasiadamente alto, ultrapassando o custo dos equipamentos utilizados nas inspeções clássicas. Por fim, ainda há desafios tecnológicos consideráveis que devem ser superados até que este tipo de inspeção se torne viável, isto é, apresente custos reduzidos e opere com equipamentos totalmente autônomos.

Assim, de forma a solucionar pelo menos em parte os problemas discutidos, esta tese de doutorado procura desenvolver uma nova metodologia de localização de isoladores com falhas em linhas de transmissão. Para isso, tem como ponto forte o fato de ser realizada de forma remota, sem a necessidade de se executar inspeções presenciais na linha de transmissão. Além disso, seus resultados são precisos quando comparados principalmente aos apresentados pelas inspeções clássicas. Esta metodologia é apresentada em detalhes no capítulo a seguir.

Capítulo 3

---

# Metodología

### 3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para localização de defeitos em cadeias de isoladores em linhas de transmissão. Para que a metodologia seja melhor compreendida, é mostrado um resumo do desenvolvimento anterior, o qual foi realizado totalmente em laboratório (Capelini, 2011).

As metodologias e tecnologias de inspeção de isoladores apresentadas no Capítulo 2 são altamente dependentes de mão-de-obra para serem operadas e executadas. Conforme mostrado, todos os tipos de inspeção, exceto aquelas baseadas em veículos aéreos não-tripulados de longo alcance e robôs aptos a se deslocar pela linha agarrados aos cabos, transpondo obstáculos, necessitam ser realizadas de forma presencial. Assim, a aplicação das metodologias apresentadas resulta nos seguintes inconvenientes:

- Necessidade de mão-de-obra numerosa e especializada, principalmente no caso das inspeções não auxiliadas por robôs. Neste caso, equipes de manutenção formadas por técnicos e engenheiros costumam se deslocar ao longo de toda a linha, inspecionando as cadeias de isoladores com o auxílio das ferramentas baseadas em imagem (convencional, térmica e UV), ultrassom e RF;
- Emprego de equipamentos e veículos caros e sofisticados;
- Alto custo de execução, devido aos motivos expostos nos dois itens anteriores;
- Elevado tempo de execução;
- Baixa precisão e confiabilidade dos resultados, principalmente no caso das inspeções visuais convencionais;
- Risco intrínseco ao trabalho com eletricidade, principalmente nos casos em que os inspetores necessitam escalar nas torres e realizar o trabalho em linha viva.

Assim, de forma a eliminar ou pelo menos atenuar estes inconvenientes, foi desenvolvida uma metodologia de inspeção remota de cadeias de isoladores cerâmicos baseada nos sinais de descargas parciais externas resultantes das não-conformidades discutidas no Capítulo 2. Esta metodologia foi inicialmente

desenvolvida em laboratório, através de simulações físicas em uma linha de transmissão artificial. Essa etapa resultou na dissertação de mestrado deste mesmo autor (Capelini, 2011), que é brevemente recapitulada no item 3.2 de forma a possibilitar uma melhor compreensão dessa tese. Em uma etapa seguinte, a metodologia desenvolvida em laboratório foi aperfeiçoada e aplicada em uma linha de transmissão real de 69 kV, etapa esta objeto de discussão dessa tese de doutorado.

## 3.2 Metodologia Desenvolvida em (Capelini, 2011)

### 3.2.1 Princípios da Metodologia

A metodologia desenvolvida em laboratório é baseada na aquisição e análise de sinais gerados pelas descargas parciais externas que podem ocorrer em isoladores com falhas. Estes sinais de alta frequência podem trafegar pelas fases da linha de transmissão. Sendo assim, foram levantadas as seguintes hipóteses:

- Os sinais poderiam trafegar pela linha de transmissão, de ponta a ponta, sem atenuação tal que os extinguisse por completo;
- Estando suficientemente íntegros, os sinais poderiam ser drenados para um sistema de aquisição instalado em um ponto fixo da linha de transmissão através de acoplamento capacitivo, nos moldes do que é realizado em sistemas de PLC (IEEE, 1980);
- Estando o ponto de aquisição fixo na linha, o padrão de um sinal estaria diretamente relacionado com o caminho elétrico entre o ponto de geração do sinal e o ponto de aquisição.

Assim, assumindo como verdadeiras estas três hipóteses, a metodologia propôs associar o padrão dos sinais com a localização das cadeias de isoladores ao longo da linha de transmissão. Isso permitiria que as cadeias de isoladores fossem inspecionadas remotamente, a partir de uma subestação localizada em uma das extremidades da linha, eliminando ou reduzindo drasticamente a necessidade de inspeções presenciais.

Para facilitar a compreensão da ideia, um exemplo é mostrado na Figura 3.1, na qual se observa uma linha de transmissão hipotética, formada por três seções , dotadas de quatro pontos de conexão. A cada um destes pontos podem ser conectadas cadeias de isoladores. Em uma das extremidades da linha está instalado um sistema de aquisição, identificado na figura pela sigla DAQ (*data acquisition*

system), que utiliza um acoplador capacitivo para ler sinais de alta frequência. Considerando que o isolador mais próximo da fase apresenta uma falha que resulta na ocorrência de descargas parciais, sinais de alta frequência são gerados na cadeia de isoladores, passando então para linha de transmissão, onde podem trafegar em ambas as direções. Se esta cadeia de isoladores for conectada ao ponto 1, os sinais decorrentes da falha em seu isolador irão trafegar do ponto 1 ao ponto 4, onde está conectado o sistema de aquisição. Estes sinais tem um padrão típico, exemplificado pelo Padrão 1 mostrado na Figura 3.1. No caso da mesma cadeia de isoladores ser conectada ao ponto 3, os sinais irão trafegar tanto em direção ao ponto 1 quanto em direção ao ponto 4. Os sinais que chegam ao ponto 4 também são lidos pelo sistema de aquisição e possuem um padrão (Padrão 3) distinto do padrão anterior.

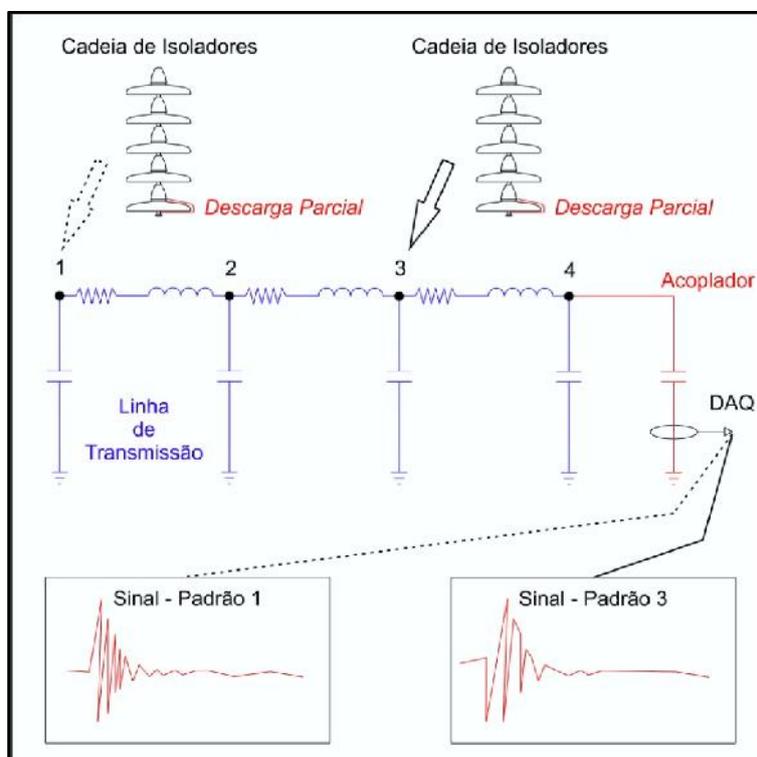


Figura 3.1 - Metodologia proposta: associação do padrão de sinais com os respectivos locais de geração ao longo da linha de transmissão. Adaptado de (Capelini, 2011).

Desta forma, apoiada no desenvolvimento de um sistema de reconhecimento de padrões, a metodologia pode ser utilizada para associar os padrões de sinais lidos pelo sistema de aquisição com os pontos de conexão de onde estes sinais são provenientes.

### 3.2.2 Desenvolvimento da Simulação Física - Laboratório

A partir das hipóteses levantadas no item anterior, foi dado início ao desenvolvimento do sistema de simulação física a ser utilizado. Este sistema engloba os seguintes componentes básicos:

- Cadeia de isoladores: montada com isoladores de disco cerâmicos (porcelana ou vidro) e dotada de dispositivo simulador de descargas parciais;
- Linha de transmissão artificial: representando uma linha real de 69 kV, sendo montada a partir de seções (monofásica);
- Sistema de alimentação da linha de transmissão;
- Sistema de aquisição de dados: formado por um acoplador capacitivo e um sistema eletrônico para digitalização dos sinais de alta frequência.

A linha de transmissão artificial utilizada, que já se encontrava disponível no Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI, foi projetada para representar linhas de transmissão de 69 kV. Com comprimento elétrico de 48 km, é formada por 11 seções, que por sua vez são constituídas de indutores e capacitores. Os indutores utilizados possuem quatro taps cada um, isto é, quatro pontos de conexão igualmente divididos ao longo do indutor. Assim, a linha de transmissão artificial como um todo possui 48 pontos de conexão, espaçados eletricamente de 1 km.

Para a realização dos ensaios, a linha de transmissão deveria ser devidamente energizada com a tensão nominal do tipo de linha que representa. Entretanto, devido às limitações construtivas dos capacitores, as quais foram objeto de discussão com o próprio fabricante, decidiu-se aplicar uma tensão máxima de 17 kV (fase-neutro). Para isso, foi necessário montar um sistema de alimentação composto por um autotransformador variável (variac) e um transformador elevador. Uma vez que a linha de transmissão opera em vazio, o sistema de alimentação foi equipado com um reator destinado a compensar o fator de potência de forma a não sobrecarregar a rede elétrica do laboratório.

Durante o desenvolvimento da etapa de laboratório foram utilizadas várias cadeias de isoladores, montadas com isoladores de disco de vidro e porcelana. Entretanto, a tensão reduzida aplicada à cadeia não provocou descargas parciais a partir de isoladores com falhas. Assim, foi necessário provocar as descargas parciais

nos isoladores através de um dispositivo de simulação física, o qual pode ser visto na Figura 3.2. Técnica similar foi utilizada por Adami (2008), onde um garfo metálico foi aplicado manualmente entre o pino e a campânula de um dos isoladores da cadeia. A fotografia ampliada da Figura 3.3 mostra o momento da ocorrência de uma descarga parcial obtida dessa forma, ao passo que Figura 3.4 contém um exemplo de sinal obtido a partir desse tipo de simulação.



Figura 3.2 - Dispositivo de simulação de descargas parciais acoplado à um dos isoladores da cadeia. (Capelini, 2011).

Observando o sinal mostrado na Figura 3.4, pode-se notar similaridade quando comparado ao sinal obtido por Cavallini *et al.* (2006), resultado de uma descarga parcial ocorrida naturalmente devido à contaminação de um isolador de disco. Do ponto de vista de desenvolvimento da metodologia a diferença entre o sinal obtido através da simulação e o sinal obtido naturalmente não é relevante.

Para que fosse possível ler os sinais de descargas parciais que trafegam na linha, foi planejada a utilização de um sistema de aquisição de sinais desenvolvido para PLC. O motivo dessa escolha é que parte das linhas de transmissão já possui a infraestrutura necessária instalada, ainda que não esteja sendo mais utilizada. Assim, transformadores de potencial capacitivos (TPC) seriam utilizados como acopladores.

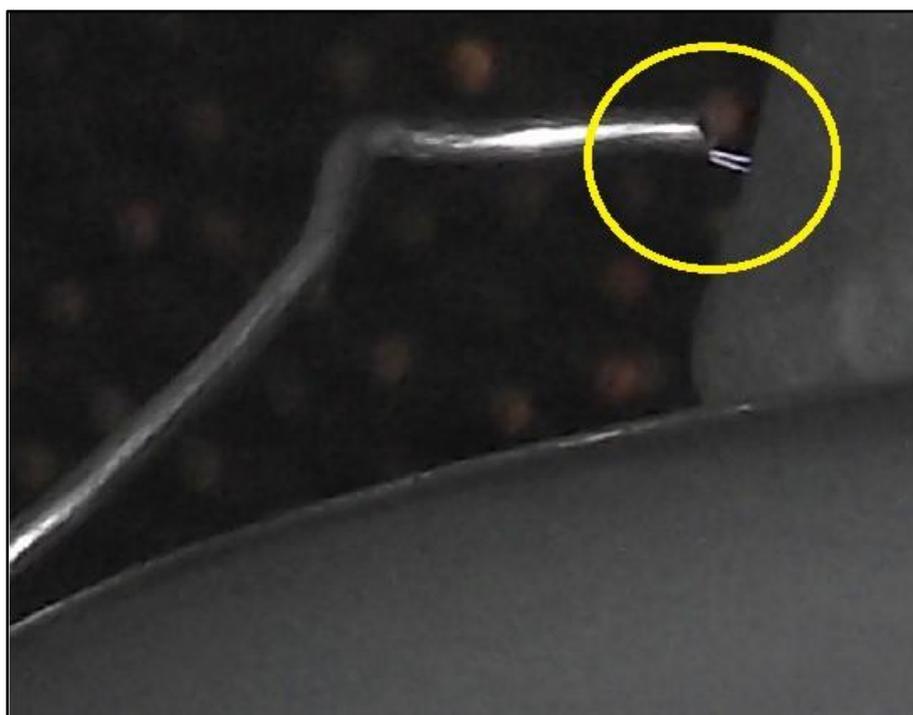


Figura 3.3 - Descarga parcial provocada pelo dispositivo mostrado na Figura 3.2.

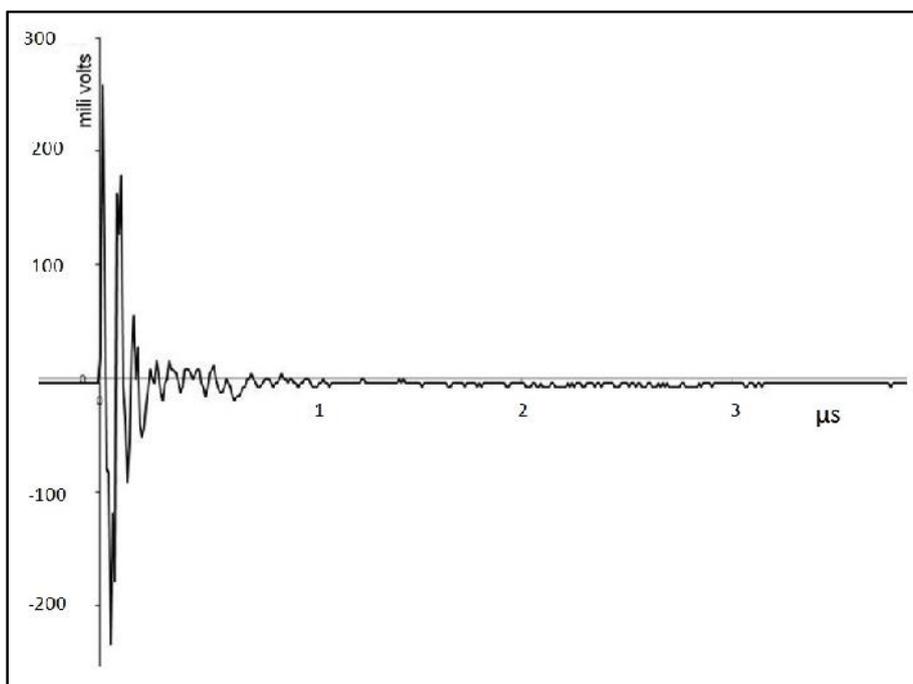


Figura 3.4 - Exemplo de sinal de descarga parcial obtido através da simulação física. Adaptado de Martinez (2011).

A decisão sobre a escolha do sistema PLC gerou a necessidade da instalação de uma bobina de bloqueio na linha de transmissão artificial, a qual foi especificada levando-se em conta sinais típicos de PLC.

Porém, mesmo antes da especificação do TPC a ser utilizado, foi levantada a hipótese de se utilizar um outro meio como acoplador: a região capacitiva entre a fase e a carcaça aterrada dos TCs. Essa hipótese surgiu da necessidade de reduzir os custos de implantação da metodologia. Os TPCs são equipamentos caros e não estão presentes em todas as linhas de transmissão, ao passo que os TCs são mais baratos e equipam todas as linhas. Dessa forma, este método de acoplamento capacitivo foi investigado através de ensaios de resposta em frequência com diversos modelos de TCs destinados à classe de tensão em questão. Aprovado, este método de acoplamento foi escolhido em detrimento da utilização de TPCs.

Assim, ficou definida como topologia definitiva do sistema de ensaios em laboratório a mostrada na Figura 3.5. Nesta figura, podem-se observar a existência de dois TCs como acopladores capacitivos, um em cada ponta da linha de transmissão. O motivo da escolha de duas unidades em vez de uma é que não se sabia ao certo se apenas uma unidade seria capaz de receber os sinais gerados próximos à extremidade oposta, devido à atenuação. Foi previsto, então, a utilização de dois sistemas de aquisição.

Os sinais de alta frequência drenados pelo acoplador capacitivo são lidos através de um sensor de corrente, que consiste em um TC do tipo janela de núcleo dividido instalado no cabo de aterramento do TC (Figura 3.6). Este sensor, desenvolvido em laboratório, possui como base o núcleo de ferrite NU-40/27/11-IP6 e pode ser visto na Figura 3.7.

Uma vez lidos, os sinais são enviados para uma placa de aquisição, através de um cabo coaxial RG58, para a fase de digitalização e armazenamento em um computador. Esta função é realizada pela placa PicoScope 3205, que possui resoluções vertical e horizontal de 8 bits e 100 MS/s, respectivamente.

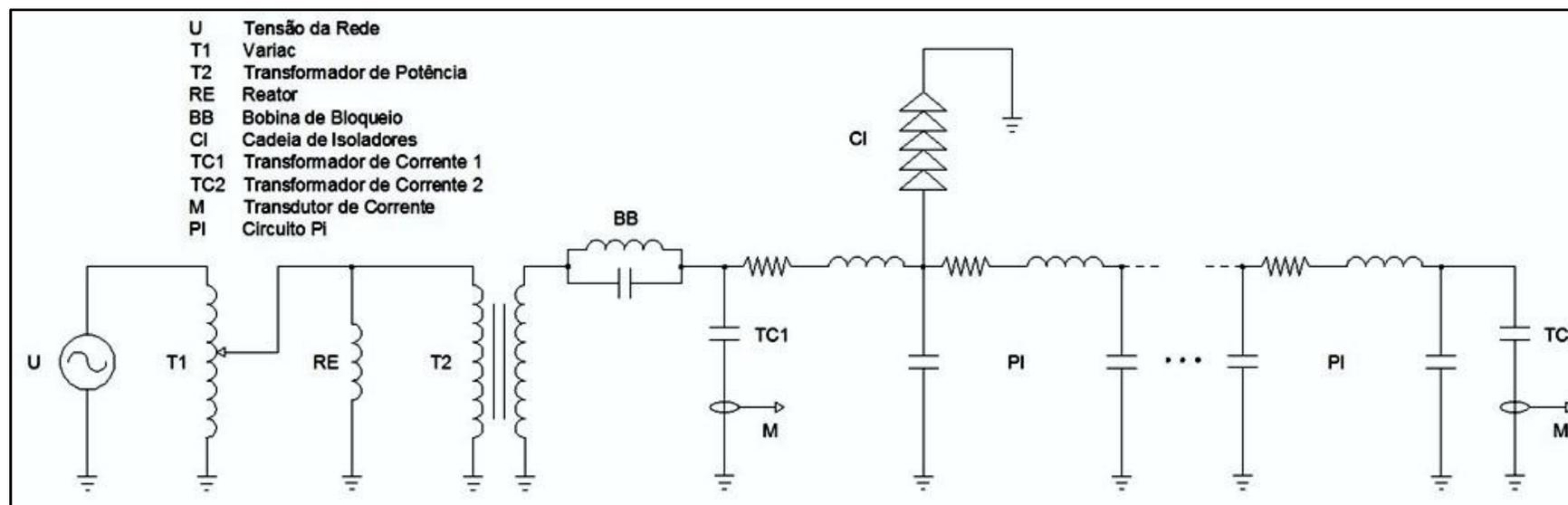


Figura 3.5 - Topologia definitiva do sistema de ensaios montado em laboratório (Capelini, 2011).



Figura 3.6 - TC conectado à extremidade inicial da linha de transmissão, com o respectivo cabo de aterramento indicado pela seta (Capelini, 2011).



Figura 3.7 - Sensor de corrente instalado no cabo de aterramento do TC (Capelini, 2011).

### 3.2.3 Desenvolvimento de Software - Aquisição de Sinais e Reconhecimento de Padrões

Para a aquisição dos sinais de descargas parciais foi utilizado um software fornecido com a placa de aquisição, o qual emula o funcionamento de um osciloscópio, com a vantagem de oferecer funções específicas para armazenamento de sinais em grande quantidade.

Para o reconhecimento de padrões, entretanto, foi necessário desenvolver um software próprio. Para isso, foi realizada primeiramente uma pesquisa sobre as técnicas disponíveis para esta finalidade. A escolha recaiu, então, sobre as redes neurais artificiais (RNA), que consistem em uma técnica de inteligência artificial largamente aplicada em reconhecimento de padrões (Haykin, 2001). Ferreira *et al.* (2009), por exemplo, utiliza RNAs para reconhecer os padrões de ruídos ultrassônicos emitidos por isoladores de disco poluídos e associá-los à diversos graus de poluição conhecidos. Em outro trabalho (Jorge; Coury; Carvalho, 1999), o padrão de faltas foi associado, a partir da aplicação de RNAs, às suas respectivas localizações em uma linhas de transmissão.

Desenvolvido em Matlab<sup>®</sup>, com o auxílio do Neural Network Toolbox<sup>®</sup>, o software de reconhecimento de padrões foi concebido para funcionar da seguinte maneira:

- Para que possa operar, deve passar primeiramente pela fase de treinamento das redes neurais. Nesta etapa exemplos de sinais são apresentados ao software juntamente com a identificação das respectivas origens (pontos de conexão ao longo da linha de transmissão). Os sinais são processados durante o treinamento das RNAs, que consiste em armazenar as características que os sinais tem em comum entre si (padrão) nos neurônios das RNAs;
- Uma vez realizado o treinamento, o software está apto a reconhecer sinais provenientes dos pontos de conexão em questão;
- Para que haja o reconhecimento dos sinais apresentados ao software não é necessário que estes sejam idênticos aos sinais utilizados durante o treinamento, porém deve haver um elevado grau de similaridade;

- Para que seja possível reconhecer sinais provenientes de qualquer isolador de uma cadeia, é necessário que o conjunto de sinais a ser associado ao ponto de conexão contenha exemplos de sinais gerados em todos os isoladores. Na verdade, o conjunto de sinais provenientes de um só isolador por si só já é um padrão. Isso quer dizer que as RNAs poderiam ser treinadas com a finalidade de indicar qual o isolador defeituoso na cadeia, além de, logicamente, identificar o ponto de conexão onde está esta cadeia. No entanto, para efeitos práticos isso não faz sentido, sendo que em campo as cadeias de isoladores diagnosticadas com falhas são substituídas por inteiro.

As configurações básicas das RNAs utilizadas foram:

- Número de nós da camada de entrada dependente da quantidade de amostras dos sinais utilizados: *um nó por amostra*;
- Número de neurônios da camada de saída dependente da quantidade de padrões analisados: *um neurônio por padrão*;
- Uma camada oculta contendo 20 neurônios;
- Função de ativação do tipo *Tangente Sigmóide* para todos os neurônios;
- Algoritmo de treinamento utilizado: *Gradiente Conjugado Escalonado*;
- Medição de desempenho: *Erro Médio Quadrático*.

Além da configuração das redes neurais, o processamento prévio dos sinais também foi um ponto importante para o ajuste de desempenho do software. Foram realizados ensaios com sinais puros, isto é, sem modificações após a digitalização, e ensaios com sinais modificados. Estas modificações, no caso, tiveram o objetivo de comprimir o sinal, de modo a reduzir o esforço computacional realizado principalmente na fase de treinamento das RNAs. Os algoritmos utilizados para compressão dos sinais foram:

- Linear predictive coding (LPC): onde o vetor correspondente ao sinal é transformado em um vetor menor formado por coeficientes da combinação linear das amostras do vetor original. Isso permitiu, em alguns casos, a redução dos vetores dos sinais de 500 para 20 elementos;

- Corte de sinal: onde as amostras que contém informações irrelevantes são eliminadas, isto é, apenas o intervalo de tempo que contém informação mais importante é considerado. Com isso, foi possível reduzir o comprimento dos vetores pela metade em alguns casos;
- Filtro de porcentagem: desenvolvido especialmente para este trabalho, consiste em transformar o vetor original em outro cujos elementos representam a energia de intervalos definidos no domínio da frequência. Isso possibilitou a redução dos vetores de 500 para 50 elementos.

O desenvolvimento do software contou com diversas etapas de ensaios em laboratório. Este assunto é tratado brevemente no item a seguir.

### 3.2.4 Ensaios em Laboratório

Com a finalidade de facilitar a compreensão sobre a operação do software desenvolvido, são mostrados a seguir dois ensaios retirados do trabalho de mestrado deste autor (Capelini, 2011). O primeiro, chamado de Ensaio 1, tem como objetivo mostrar o modo de funcionamento do software somente, não tendo aplicação prática propriamente dita. O segundo ensaio, chamado de Ensaio 8, representa a operação do software para o qual foi desenvolvido, isto é, demonstra efetivamente o processo de localização de cadeias de isoladores com falhas ao longo da linha de transmissão.

#### Ensaio 1

O objetivo deste ensaio foi verificar a capacidade de reconhecimento de padrões do software em seus primórdios. Utilizando apenas um ponto de conexão da linha de transmissão artificial, dois padrões de sinais foram criados: um corresponde à descargas parciais geradas em uma cadeia com todos os isoladores intactos (padrão A) e outro correspondente à descargas parciais geradas em uma cadeia com um dos isoladores seriamente danificado (padrão B), conforme mostra a Figura 3.8. Nesta figura também pode ser observado o dispositivo de reprodução de descargas parciais, instalado no isolador 5.

O treinamento das RNAs foi realizado a partir de 800 sinais provenientes da cadeia de isoladores A e 800 sinais provenientes da cadeia de isoladores B. Estes sinais foram previamente tratados, passando pelo seguinte processo:

- Aplicação de filtro passa-faixa do tipo elíptico, com frequências de corte inferior e superior iguais a, respectivamente, 1 MHz e 10 MHz;

- Compressão por LPC com utilização 20 coeficientes. Os vetores contendo estes coeficientes foram os dados efetivamente apresentados às redes neurais.

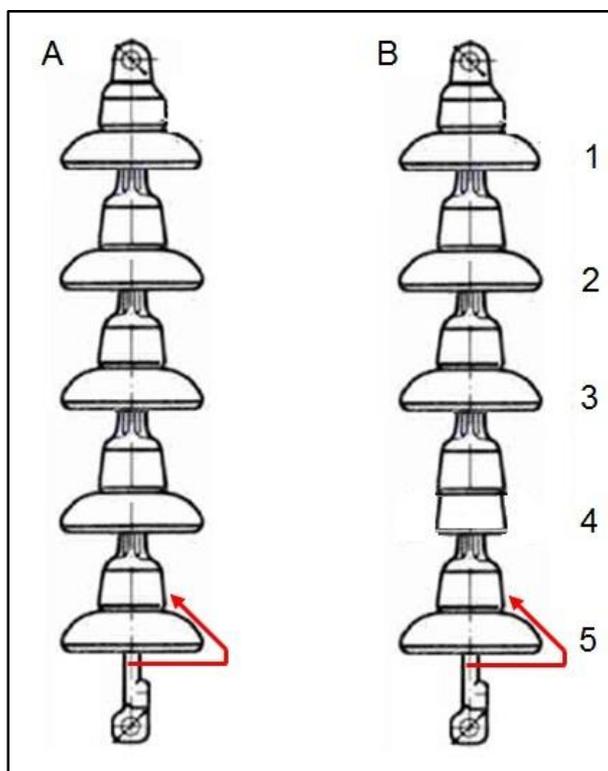


Figura 3.8 - Padrões considerados no Ensaio 1 (Capelini, 2011).

Um conjunto de 20 RNAs idênticas foi treinado com estes sinais. As respostas de cada uma destas RNAs foi combinada, na forma de média aritmética, dando origem à uma resposta final. Esse procedimento foi adotado em todos os ensaios de forma a minimizar os possíveis erros das RNAs. Após o treinamento, um conjunto de 20 sinais foi coletado em outro ensaio. Estes sinais, identificados na Tabela 3.1 foram submetidos às RNAs para o processo de reconhecimento.

Tabela 3.1 - Conjunto de sinais utilizados no processo de reconhecimento (Capelini, 2011).

Sinais para Verificação de Desempenho – Ensaio nº 1	
Sinais Provenientes da Cadeia de Isoladores A (intacta)	Sinais Provenientes da Cadeia de Isoladores B (danificada)
1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 20	4, 7, 11 e 19

Após este processo, o software emitiu o diagnóstico mostrado na Figura 3.9.

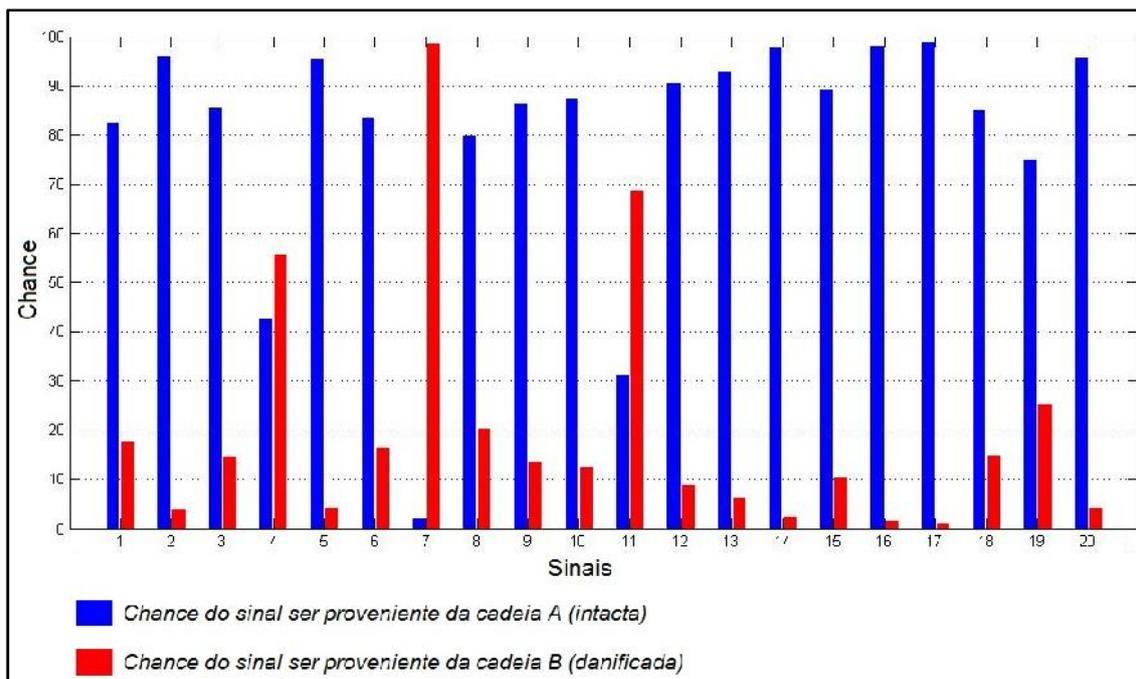


Figura 3.9 - Diagnóstico de reconhecimento dos sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011).

Para cada sinal analisado existem barras que correspondem ao grau de similaridade ("chance") entre o sinal e os padrões conhecidos pela rede. Quanto maior a barra, maior o grau de similaridade entre o sinal e o padrão. Assim, para um determinado sinal, pode-se considerar a barra mais alta como a indicação do padrão ao qual pertence esse sinal. Por exemplo, no caso do sinal número 6, a barra azul (padrão A) é mais alta que a barra vermelha (padrão B). Sendo assim, considera-se que esse sinal pertence ao padrão A. Porém, há casos em que as barras possuem alturas muito próximas, denotando um diagnóstico confuso por parte das RNAs. Esse tipo de resposta, como é o caso da obtida para o sinal número 4, não é confiável e é recomendável desconsiderá-la, o que não é feito de forma automática pelo software desenvolvido nesta fase. No caso do sinal número 19 tem-se um exemplo de falha de diagnóstico. Seguindo esta lógica, pode-se afirmar que o software diagnosticou corretamente 90% dos sinais.

### Ensaio 8

Neste ensaio o objetivo foi o de realmente localizar cadeias de isoladores com falhas, sendo para isso utilizados seis pontos de conexão da linha de transmissão artificial. Uma única cadeia de isoladores, a mesma relacionada ao padrão A do Ensaio 1, foi acoplada aos seis pontos de conexão para a coleta de sinais para o treinamento das RNAs e também para a coleta de sinais para o processo de reconhecimento.

Para o treinamento das RNAs foram coletados 1000 sinais de cada ponto de conexão, sendo que estes sinais não passaram pelo processo de compressão. Após o treinamento das RNAs, 60 sinais foram coletados dos pontos de conexão para a verificação do funcionamento do software, que foram submetidos ao processo de reconhecimento, também sem compressão prévia. Estes sinais são identificados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011).

Sinais para Verificação de Desempenho – Ensaio n° 8						
Localização da Cadeia de Isoladores na Linha de Transmissão	km 01	km 08	km 15	km 22	km 29	km 36
Sinais	1 a 10	11 a 20	21 a 30	31 a 40	41 a 50	51 a 60

Após a análise dos sinais, o software forneceu o diagnóstico mostrado na Figura 3.10, de onde é possível observar que os 60 sinais foram reconhecidos corretamente, pois as barras mais altas correspondem aos padrões aos quais os sinais realmente pertencem.

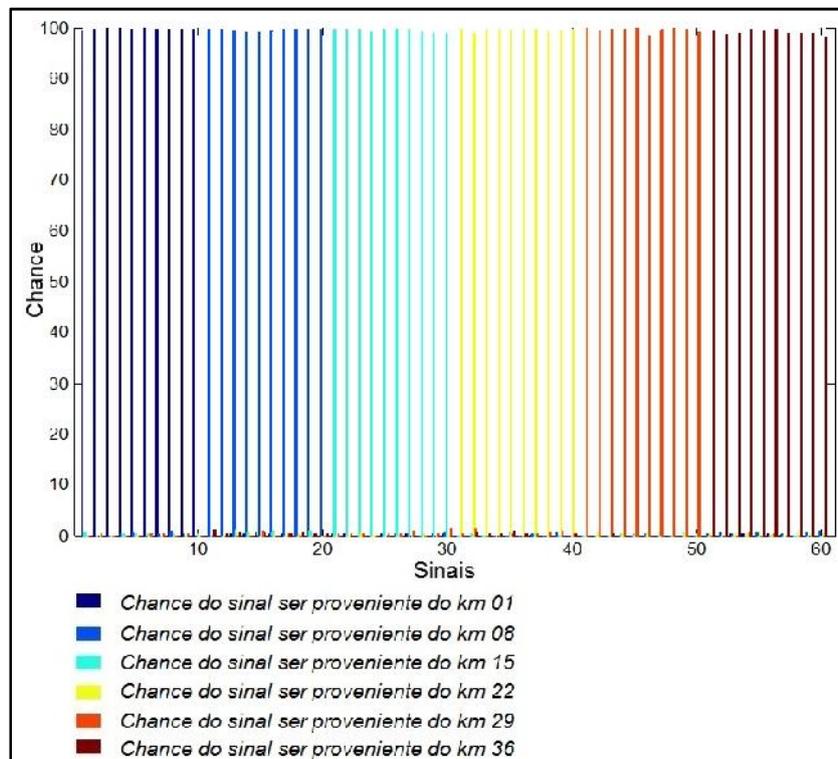


Figura 3.10 - Diagnóstico fornecido pelo software para os 60 sinais submetidos ao processo de reconhecimento (Capelini, 2011).

Dos ensaios realizados nesta fase, pode-se dizer:

- A escolha da técnica de RNAs foi acertada, apresentando resultados além do esperado. Um exemplo disso é a capacidade de apontar de qual isolador o sinal é proveniente, sendo este um grau de precisão desnecessário na prática;
- Do ponto de vista das RNAs, não há diferença entre os sinais gerados em isoladores de porcelana e isoladores de vidro. Foram realizados diversos ensaios com cadeias formadas exclusivamente por isoladores de porcelana, exclusivamente por isoladores de vidro e também formadas por ambos os tipos. O padrão de sinais gerados nestas cadeias é o mesmo;
- A utilização de algoritmos de compressão contribui muito para a redução do esforço computacional, sendo o filtro de porcentagem o algoritmo de melhor desempenho. Sua utilização produz resultados similares aos obtidos sem a aplicação da compressão;
- As RNAs devem ser treinadas a partir de conjuntos de sinais igualmente distribuídos entre os padrões, isto é, cada padrão de treinamento deve conter a mesma quantidade de sinais. Isso é necessário para que as RNAs tenham igual capacidade de reconhecimento dos padrões;
- A utilização de TCs como acopladores capacitivos se mostrou eficaz. Para as unidades avaliadas, a capacitância entre fase e carcaça apresenta comportamento compatível com esta finalidade.

### **3.3 Metodologia Proposta para Linhas de Transmissão Reais**

A metodologia proposta para a localização de cadeias de isoladores com falhas em linhas de transmissão reais, foco deste trabalho, é baseada na metodologia desenvolvida anteriormente, descrita no item 3.2. Sua essência, a de relacionar padrões de sinais com a localização de suas respectivas origens ao longo da linha de transmissão, é a mesma. Entretanto, por agora se tratar de linhas de transmissão reais, deve-se realizar um amplo estudo das novas variáveis de influência, efetuando as alterações necessárias na metodologia e no sistema desenvolvido para o mesmo possa operar corretamente em linhas de transmissão reais de 69 kV.

As hipóteses comuns às duas fases de desenvolvimento, anterior e atual, são:

1. Os sinais provenientes das cadeias de isoladores podem trafegar pela linha de transmissão, de ponta a ponta, sem atenuação tal que os extinga por completo, conforme observado nas simulações realizadas por Adami (2008);
2. Estando suficientemente íntegros, os sinais podem ser drenados para um sistema de aquisição instalado em um ponto fixo da linha de transmissão através da capacitância entre fase e carcaça dos TCs já presentes na linha de transmissão, conforme realizado em laboratório por Capelini (2011);
3. Estando o ponto de aquisição fixo na linha, o padrão de um sinal, está diretamente relacionado com o caminho elétrico entre o ponto de geração do sinal e o ponto de aquisição. Assim, o local de surgimento de um sinal pode ser associado ao seu padrão através de um algoritmo de reconhecimento de padrões, como no caso do trabalho realizado por Geethanjali e Priya (2009).

Além destas, um novo conjunto de hipóteses foi considerado:

4. Os ruídos presentes na linha de transmissão não inviabilizam a aquisição e análise dos sinais de descargas parciais gerados nas cadeias de isoladores com falhas, como no caso mostrado por Dallbello *et al.* (2007);
5. O conjunto dos equipamentos elétricos instalados ao longo da linha de transmissão e nas subestações localizadas em suas extremidades não atenua consideravelmente os sinais a ponto de inviabilizar a metodologia (Dallbello *et al.*, 2007);
6. No caso de sinais serem gerados em diversos locais das cadeias ou da linha de transmissão simultaneamente, pode haver interferência entre os mesmos. Entretanto, sendo a ocorrência das descargas parciais um fenômeno intermitente, há momentos em que não ocorre interferência entre os sinais, permitindo sua correta leitura pelo sistema de aquisição, conforme observado durante a fase de desenvolvimento de laboratório (Capelini, 2011);

7. Não há a necessidade de se realizar a aquisição de sinais em todas as fases, uma vez que sinais gerados em uma das fases podem ser detectados nas outras fases devido ao acoplamento eletromagnético, como observado nos sistemas de PLC (IEEE, 1980);
8. Existe a possibilidade de se reconhecer padrões não utilizados no treinamento das RNAs, contanto que estas conheçam padrões com características próximas às dos padrões desconhecidos. Assim, não é necessário treinar as RNAs com exemplos de sinais provenientes de todos os isoladores da linha de transmissão, como no caso do algoritmo de localização de faltas desenvolvido por Raybolt (2011).

Assim, a metodologia proposta para linhas de transmissão reais pode ser representada didaticamente na Figura 3.11.

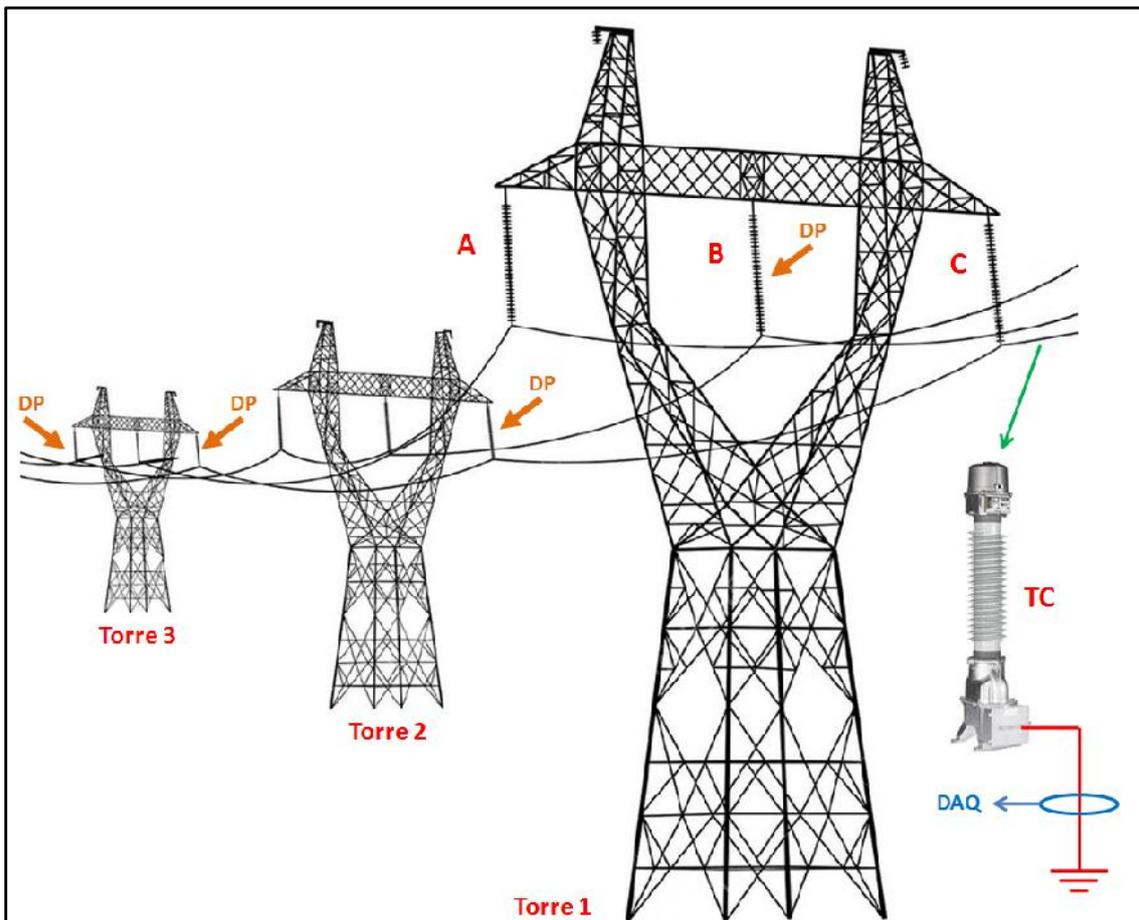


Figura 3.11 - Esquema de funcionamento da metodologia para linhas de transmissão reais.

No exemplo didático da Figura 3.11, pode-se observar que a leitura dos sinais é realizada através de apenas uma fase, que neste caso é a fase C, mediante a aplicação da técnica de acoplamento capacitivo a partir dos TCs já existentes no

sistema de transmissão. O TC mostrado na figura está instalado na subestação, sendo considerado como o ponto "zero" da linha de transmissão.

A partir deste ponto, tem-se as torres 1, 2 e 3, que apresentam cadeias de isoladores com falhas, que resultam em descargas parciais externas, identificadas na figura como DPs. Na torre 1, as descargas parciais são geradas na cadeia de isoladores conectada à fase B. Lidas no ponto "zero" da linha, estas DPs apresentam um determinado padrão que depende do caminho elétrico entre o seu ponto de ocorrência e o ponto de leitura. Este padrão é então associado à localização da cadeia de isoladores em questão. Da mesma forma, as DPs geradas na cadeia de isoladores conectada à fase C da torre 2 apresentam um padrão, distinto do padrão do caso anterior, que permite que esta cadeia seja localizada em caso de falhas.

A torre 3 apresenta duas cadeias de isoladores onde são geradas DPs, conectadas à fase A e C, respectivamente. Para cada caso, existe um padrão distinto, permitindo que se identifique exatamente quais as cadeias de isoladores com falhas, ainda que estejam conectadas na mesma torre. Entretanto, para fins práticos de manutenção, basta que seja localizada apenas a torre que contém a cadeia com falhas. Dessa forma, os padrões das DPs originadas em uma mesma torre poderiam ser combinados de forma a constituir um único padrão.

A partir das hipóteses apresentadas, foi realizado o desenvolvimento do sistema de aquisição de sinais e do software de reconhecimento de padrões, que foram previamente ensaiados e validados em laboratório. Em seguida, foram instalados em uma linha de transmissão real e ensaiados de forma a validar a metodologia. Estas etapas são tratadas nos capítulos a seguir.

Capítulo 4

---

# Desenvolvimento

## 4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo trata do desenvolvimento das ferramentas computacionais e da infraestrutura necessária para a aplicação da metodologia em campo. Apesar de serem apresentados em capítulos separados, os assuntos deste e do próximo capítulo estão fortemente ligados, tendo as respectivas atividades sido desenvolvidas simultaneamente a partir de um certo ponto.

## 4.2 Desenvolvimento de Hardware

O sistema de aquisição e digitalização de sinais aplicado em laboratório, foi desenvolvido principalmente a partir das características básicas dos sinais de descargas parciais simulados fisicamente na linha de transmissão artificial. Estas características são:

- Amplitude;
- Composição espectral;
- Duração;
- Taxa de repetição.

Além das características dos sinais, outros fatores foram levados em conta no projeto do sistema, como:

- Nível de proteção contra surtos;
- Nível de interferência eletromagnética presente no laboratório;
- Grau de proteção mecânica (grau IP) das partes componentes;
- Layout da área de ensaios.

Dessa forma, tendo sido desenvolvido sob medida para aplicação em laboratório, o sistema de aquisição e digitalização de sinais não poderia ser simplesmente transplantado para campo. Sendo assim, foi necessário realizar um amplo estudo da nova aplicação, considerando as características citadas anteriormente. Este estudo consistiu das seguintes etapas:

- Definição da linha de transmissão que receberia o sistema;

- Levantamento das características básicas da linha de transmissão e das subestações presentes em suas extremidades;
- Levantamento de campo, contemplando a linha de transmissão e as subestações;
- Simulação computacional de descargas parciais em cadeias de isoladores na linha de transmissão adotada;
- Análise dos sinais simulados para definição das características principais do sistema de aquisição e digitalização de sinais;
- Simulação computacional de surtos na linha de transmissão de forma a permitir o dimensionamento dos dispositivos de proteção.

Os itens a seguir discutem as etapas deste estudo e a utilização dos respectivos resultados no projeto do sistema.

#### **4.2.1 Características da Linha de Transmissão**

Para o desenvolvimento da metodologia em campo, é desejável a utilização de uma linha de transmissão cujas características estejam o mais próximo possível da linha de transmissão artificial utilizada em laboratório. Além disso, como deve passar por intervenções ao longo desta etapa, é conveniente que a linha de transmissão em questão não desempenhe papel fundamental no sistema de transmissão, uma vez que o risco de indisponibilidade durante as atividades de pesquisa não é desprezível. Assim, foi decidida a utilização para as atividades de campo uma linha de 69 kV e aproximadamente 60 km de extensão, denominada LT Rosário x São Gabriel. As subestações presentes em suas extremidades são a SE Rosário e a SE São Gabriel, cujos nomes tem origem nas cidades em que se localizam, Rosário do Sul e São Gabriel respectivamente, que podem ser identificadas no mapa mostrado na Figura 4.1.

Uma vez definida a linha de transmissão, iniciou-se o processo de levantamento das características da linha e das subestações, que foi dividido em duas etapas: levantamento das características de projeto da linha (parâmetros elétricos, geometria das torres, especificação dos cabos, etc.) e levantamento de campo (layout das subestações, disponibilidade de painéis e canaletas, etc.).

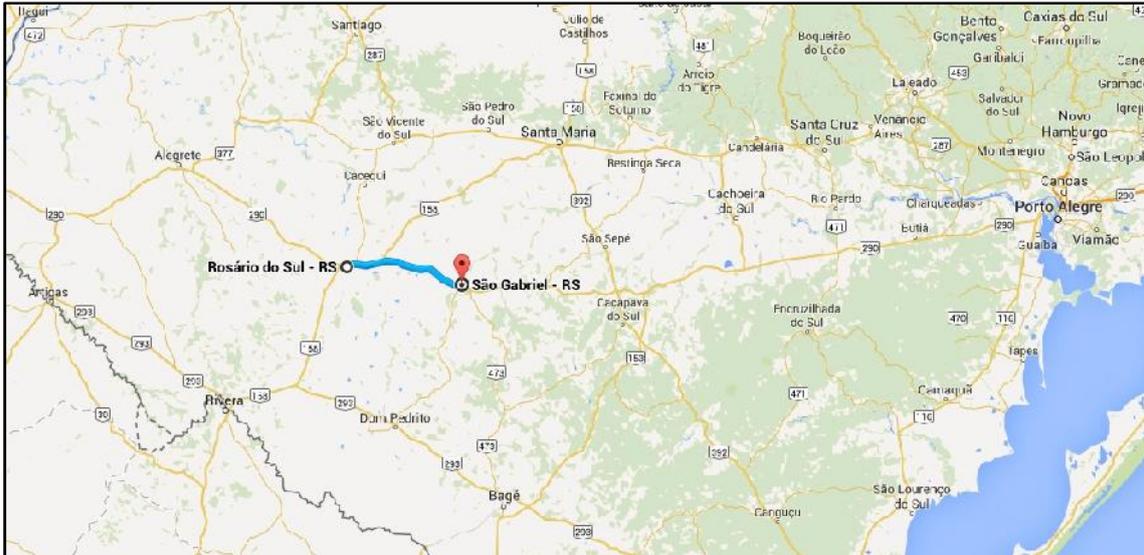


Figura 4.1 - Localização geográfica da região onde se encontra a LT Rosário x São Gabriel (Google Maps, 2015).

O levantamento de campo consistiu basicamente na realização das seguintes atividades:

- Levantamento do layout das subestações (sala de controle e pátio);
- Verificação das canaletas disponíveis para passagem dos cabos coaxiais;
- Verificação dos painéis disponíveis para instalação do sistema de aquisição de sinais (placa de aquisição, computador e acessórios);
- Disponibilidade de sistemas de comunicação e acesso à internet nas subestações;
- Conferência dos diagramas elétricos das subestações, comparando-os com o circuito existente;
- Levantamento dos possíveis locais de instalação das bobinas de bloqueio;
- Análise detalhada dos TCs (características elétricas, possíveis pontos de instalação dos sensores de corrente, etc.);
- Avaliação visual das características da linha de transmissão (tipo de estrutura, tipos de cadeias de isoladores, características do terreno e de acesso, etc.);

- Análise da qualidade do sinal de telefonia celular (voz e dados) ao longo da linha de transmissão.

O levantamento realizado na sala de comando das subestações revelou a existência de painéis disponíveis, utilizados anteriormente para abrigar equipamentos de telemedição, que poderiam ser utilizados para a instalação do sistema de aquisição de sinais. Os painéis, idênticos nas duas subestações, estão representados na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Painel de telemedição (à direita) disponível para instalação do sistema de aquisição de sinais (SE São Gabriel).

Além da disponibilidade imediata, foi observado que os painéis de telemedição possuíam características elétricas e de layout que atenderiam perfeitamente os requisitos do projeto, não havendo necessidade de se realizar adaptações ou mesmo movimentação para outro local da sala de comando. As canaletas que ligam os painéis aos TCs, no pátio das subestações, também apresentavam disponibilidade para passagem dos cabos coaxiais.

Os TCs disponíveis para instalação dos sensores de corrente foram avaliados tanto em seus aspectos elétricos (disponibilidade de bornes nas caixas de conexão)

quanto em seus aspectos mecânicos, de forma a prover informações para o projeto de instalação dos sensores e dispositivos de proteção. Ambos os modelos são projetados para uso em tensão nominal de 69 kV (classe de isolamento 72,5 kV), possuindo classe de exatidão 0,6. A Figura 4.3 e a Figura 4.4 mostram os TCs na SE Rosário e na SE São Gabriel, respectivamente.



Figura 4.3 - TCs disponíveis na SE Rosário.

Um ponto considerado crítico nestes equipamentos, para fins de aplicação da metodologia prevista, é a disponibilidade de um terminal de aterramento. Sem este terminal, não seria possível utilizar os TCs como acopladores capacitivos. Os TCs avaliados possuíam os terminais de aterramento acessíveis, conforme mostram a Figura 4.5 e a Figura 4.6.



Figura 4.4 - TCs disponíveis na SE São Gabriel.



Figura 4.5 - Terminal de aterramento acessível em um dos TCs da SE Rosário.

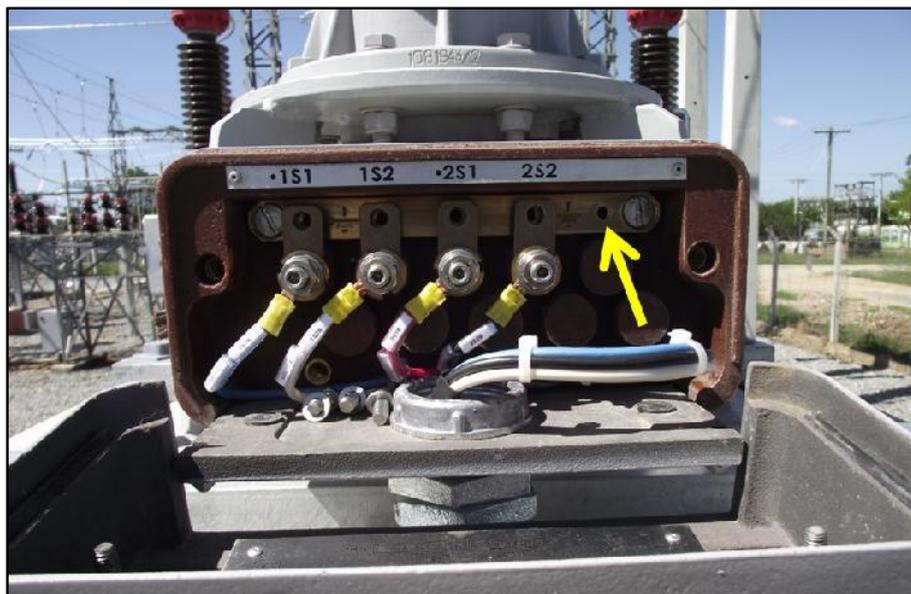


Figura 4.6 - Terminal de aterramento acessível em um dos TCs da SE São Gabriel.

Para a instalação das bobinas de bloqueio foram avaliados visualmente os locais disponíveis em ambas as subestações. Levando-se em conta as características das bobinas de bloqueio, foram pré-selecionados os locais mostrados na Figura 4.7 e na Figura 4.8.



Figura 4.7 - Local pré-selecionado para instalação das bobinas de bloqueio na SE Rosário.



Figura 4.8 - Local pré-selecionado para instalação das bobinas de bloqueio na SE São Gabriel.

Por fim, no que se refere às subestações, o último item avaliado foi a disponibilidade de sistema de comunicação para a operação do sistema previsto. O software responsável por localizar cadeias de isoladores com falhas ao longo da linha de transmissão foi idealizado para ser operado de forma remota, isto é, sem que haja a necessidade do operador estar na subestação onde o sistema está instalado. É pertinente frisar que as subestações previstas para receber o sistema (SE Rosário e SE São Gabriel) não possuem equipe de operação permanente, ficando a maior parte do tempo trancadas. Assim, o software deve ser operado a partir de um local em que haja uma equipe permanente, como é o caso de outras subestações, oficinas e escritórios da concessionária. Para isso, o sistema de comunicação adotado para a operação do sistema foi a rede corporativa de telefonia móvel 3G disponibilizada pela concessionária.

Finalizado o levantamento de campo nas subestações, foi realizada uma inspeção visual da linha de transmissão. Nesta etapa a linha foi examinada em toda a sua extensão. Os pontos avaliados nesta inspeção, determinantes para o planejamento dos ensaios de campo, foram:

- Cadeias de isoladores: foram encontradas cadeias de isoladores constituídas de cinco e seis isoladores. Observou-se a existência de cadeias montadas somente com isoladores de porcelana, somente com isoladores de vidro e com ambos os tipos de isoladores;

- Acessibilidade às estruturas: Foram pré-selecionadas as estruturas que se encontravam em locais com terrenos não-acidentados e de vegetação rasteira, próximos à rodovia BR-290 e não isolados por propriedades particulares;
- Disponibilidade de sinal de telefonia celular: a comunicação entre as equipes durante a realização dos ensaios é indispensável. Dessa forma, como a linha de transmissão se encontra majoritariamente em zona rural, foi necessário verificar a extensão e a qualidade da cobertura da rede de telefonia celular. Este item foi levado em conta na pré-seleção das estruturas.

A partir das informações coletadas durante o levantamento de campo e também das informações de projeto da linha de transmissão, foram realizadas simulações computacionais em ATP<sup>®</sup> com a finalidade de se avaliar os seguintes itens:

- Amplitude máxima dos sinais no ponto de leitura (após o acoplamento capacitivo realizado pelos TCs);
- Características dos surtos de manobra no ponto de leitura.

A avaliação desses dois itens é essencial para a correta especificação do sensor de corrente e da proteção do sistema de aquisição. Para isso, foram modelados os seguintes componentes do sistema:

- Linha de transmissão: representada a partir de blocos LCC, intercalados com conexões do tipo *splitter*, as quais foram utilizadas para representar as estruturas de transposição. As configurações utilizadas nestes blocos podem ser visualizadas na Figura 4.9 e na Figura 4.10. No caso da Figura 4.9, o comprimento da linha indicado não é o mesmo para todos os blocos;
- Bobinas de bloqueio: modeladas a partir de indutores, capacitores e resistores, conforme os dados do manual e relatório de ensaios do fabricante. O esquema elétrico das bobinas de bloqueio é mostrado na Figura 4.11, onde  $CPr$  é a capacitância da proteção,  $L$  é o indutor principal,  $Cx$  é o capacitor paralelo,  $R$  é a resistência série e  $Cs$  é a capacitância série. Para a execução das simulações foram adotados os

valores médios destes parâmetros, que possuem variação entre as unidades ensaiadas em fábrica, como mostram a Tabela 4.1 e a

- Tabela 4.2. O capacitor paralelo adotado é o C2, que corresponde à faixa de frequência ajustada para as bobinas (100 - 300 kHz);
- Transformadores de corrente: a região capacitiva entre a fase e a carcaça aterrada dos TCs foi representada por um capacitor de 0,78 nF, que é o valor referente à capacitância (em 60 Hz) medida no caso do TC ASEA IMDB 72 A1 utilizado em laboratório. O valor da resistência de aterramento adotada é de 5  $\Omega$  ;
- Sensores de corrente: foram modelados a partir de transformadores monofásicos lineares, com uma espira no primário e várias no secundário. Durante a realização das simulações foram experimentadas diversas relações de transformação, chegando-se à um valor ótimo de 1:50;
- Placa de aquisição: foi representada por uma resistência de 50  $\Omega$  conectada ao secundário do sensor de corrente;
- Cadeia de isoladores: representada a partir do circuito elétrico proposto por Pavlik (1989). Esta modelagem, mostrada na Figura 4.12, considera a capacitância ( $C_i$ ) e a resistência entre campânula e pino do isolador ( $R_i$ ), além da capacitância entre o isolador e a torre. Os valores destas grandezas são:  $C_i = 61,5$  pF,  $R_i = 154$  M $\Omega$  e  $C_t = 5$  pF. Estes valores foram obtidos por Adami (2008) através de medições, no caso de  $C_i$  e  $R_i$ , e estimado no caso de  $C_t$ . Durante as simulações foram utilizadas cadeias com cinco e seis isoladores;
- Descargas parciais externas: foram representadas por uma chave controlada por tensão em paralelo com um dos isoladores da cadeia. Os parâmetros da chave foram configurados da seguinte forma: tempo de fechamento = 4 ms, tempo mínimo em que a chave deve permanecer fechada = 6  $\mu$ s e tensão de flashover = 10 kV. Este último parâmetro define a tensão mínima para que a chave possa ser fechada.

O diagrama da Figura 4.13 mostra a modelagem completa elaborada em ATPDraw<sup>®</sup>.

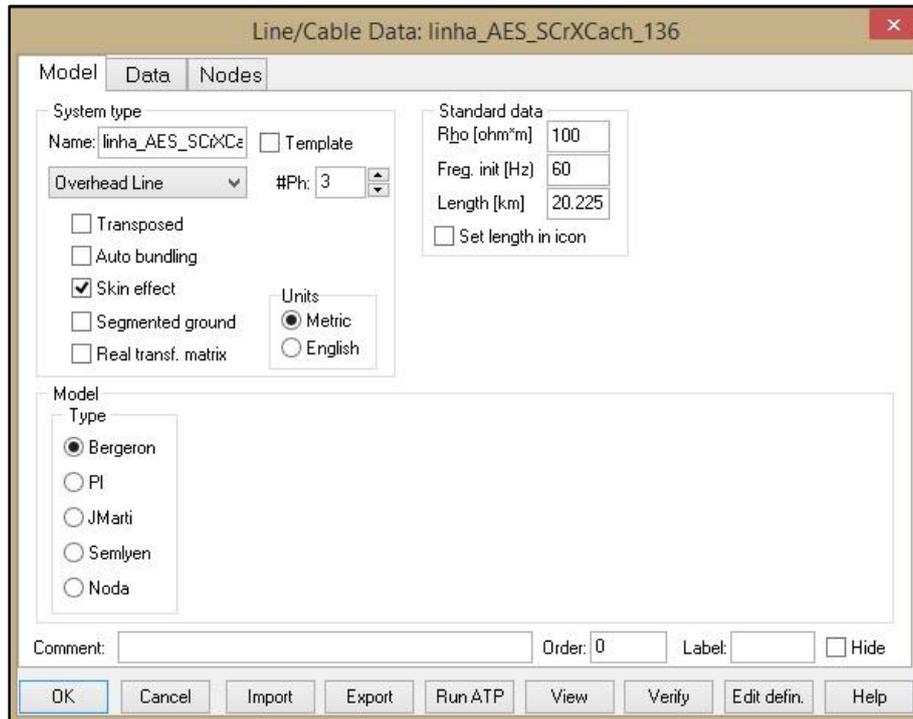


Figura 4.9 - Blocos LCC: configuração da modelagem.

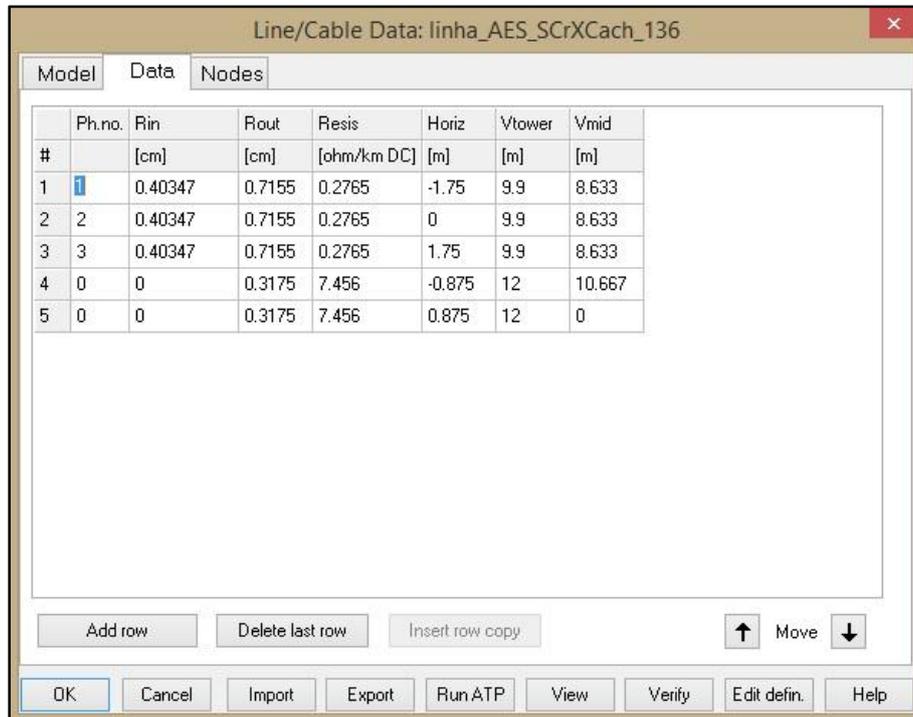


Figura 4.10 - Blocos LCC: dados dos cabos e torres.

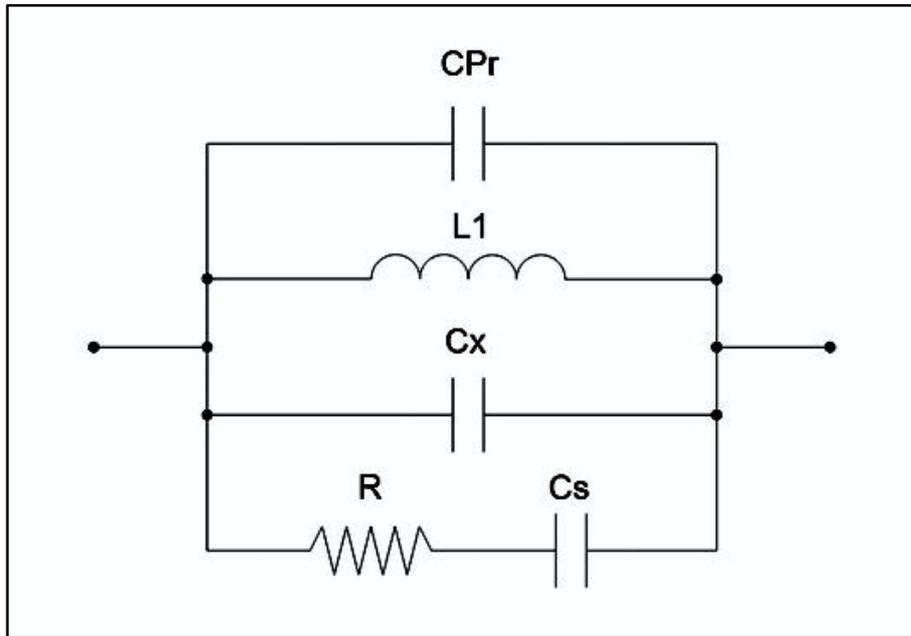


Figura 4.11 - Diagrama elétrico da bobina de bloqueio (Alstom, 2011).

Tabela 4.1 - Dados de ensaio das bobinas de bloqueio: valores do indutor principal (Alstom, 2011).

Nº de Fab.	L 100Hz [mH]	L 100kHz [mH]
11.8022-01	1.082	1.033
11.8022-02	1.076	1.026
11.8022-03	1.084	1.032
11.8022-04	1.084	1.030
11.8022-05	1.085	1.032
11.8022-06	1.082	1.030
11.8022-07	1.084	1.027
11.8022-08	1.083	1.029
11.8022-09	1.082	1.028
11.8022-10	1.082	1.023
11.8022-11	1.080	1.028
11.8022-12	1.080	1.033
11.8022-13	1.079	1.028
11.8022-14	1.079	1.038
11.8022-15	1.084	1.034

Tabela 4.2 - Dados de ensaio das bobinas de bloqueio: valores dos capacitores paralelos (C1, C2 e C3), capacitor série (Cs), capacitância da proteção (CPr) e resistência série (R) (Alstom, 2011).

Serial #	C1 [nF]	C2 [nF]	C3 [nF]	Cs [nF]	CPr[pF]	R [Ω]	Temp[°C]
11.8022-01	1.748	0.711	0.293	2.547	121.0	652.0	23.0
11.8022-02	1.755	0.727	0.300	2.539	107.0	644.0	23.0
11.8022-03	1.878	0.812	0.386	2.568	105.0	627.0	23.0
11.8022-04	1.953	0.861	0.389	2.608	112.0	636.0	23.0
11.8022-05	1.862	0.821	0.371	2.529	102.0	642.0	23.0
11.8022-06	1.871	0.827	0.377	2.537	120.0	646.0	23.0
11.8022-07	1.746	0.718	0.349	2.616	112.0	641.0	23.0
11.8022-08	1.785	0.725	0.349	2.596	111.0	633.0	23.0
11.8022-09	1.808	0.731	0.350	2.538	105.0	628.0	23.0
11.8022-10	1.819	0.736	0.354	2.587	117.0	639.0	23.0
11.8022-11	1.817	0.723	0.352	2.622	120.0	630.0	23.0
11.8022-12	1.816	0.730	0.351	2.557	108.0	632.0	23.0
11.8022-13	1.750	0.723	0.360	2.530	106.0	629.0	23.0
11.8022-14	1.708	0.671	0.336	2.558	106.0	629.0	23.0
11.8022-15	1.698	0.715	0.350	2.522	107.0	621.0	23.0

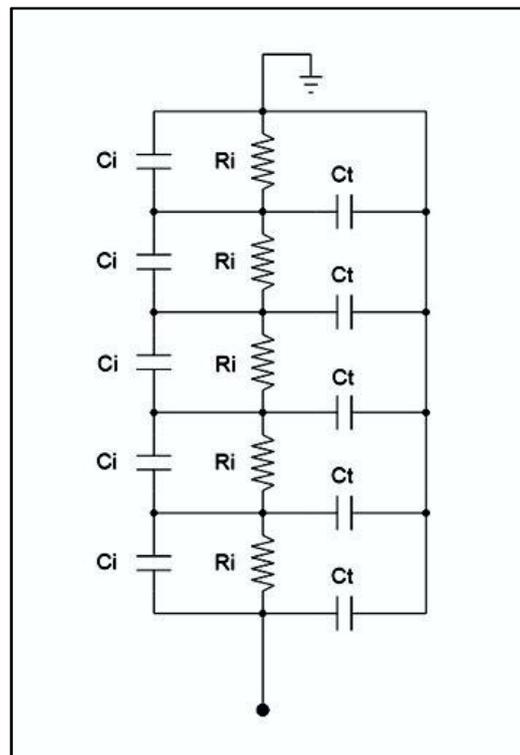


Figura 4.12 - Modelagem da cadeia de isoladores utilizada nas simulações (Pavlik, 1989).

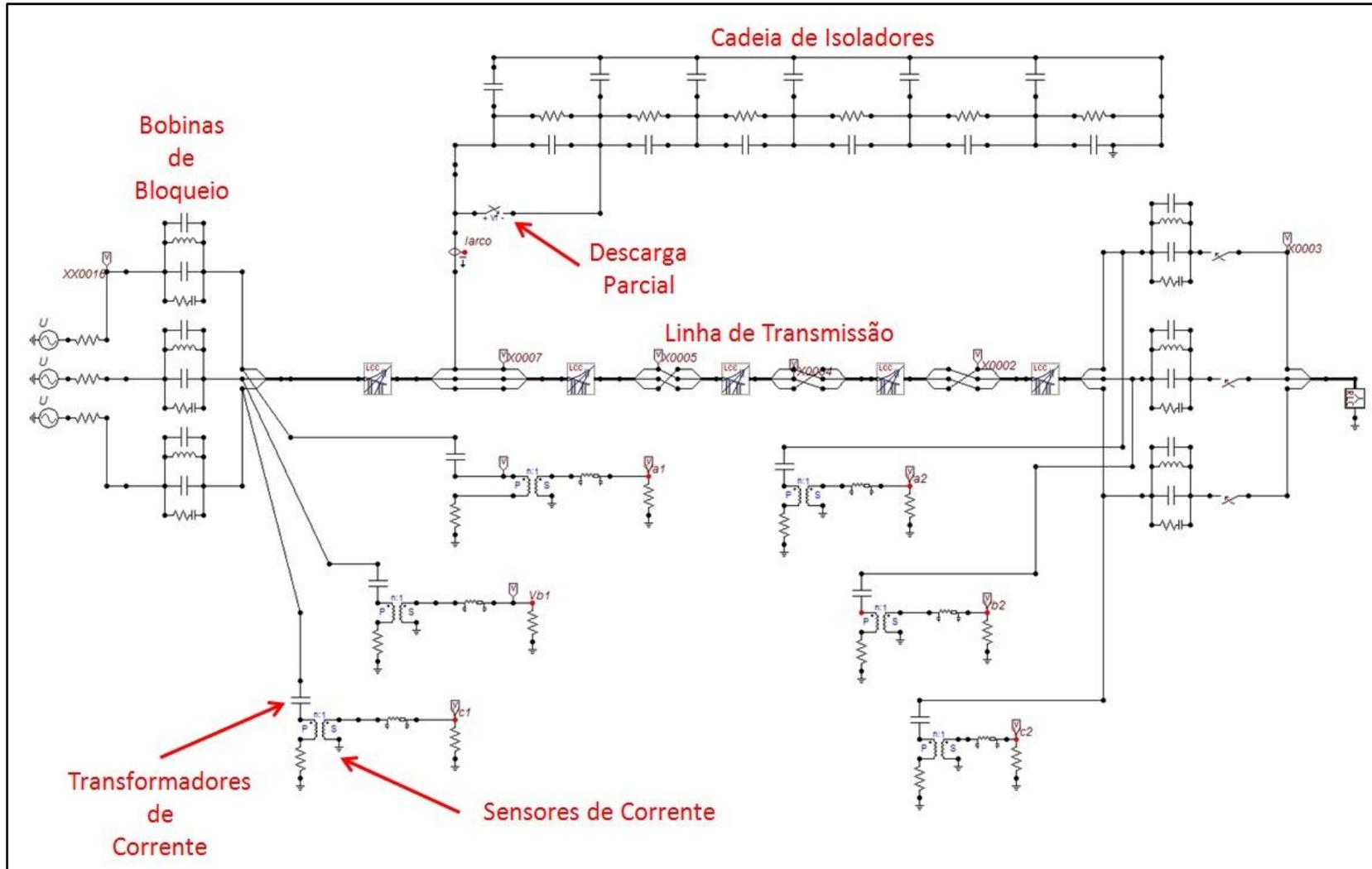


Figura 4.13 - Modelagem completa utilizada nas simulações.

Diversas situações foram avaliadas nas simulações, sendo as principais:

- Ocorrência de descargas parciais em cada um dos isoladores da cadeia;
- Utilização de cadeias com cinco e seis isoladores;
- Linha de transmissão em vazio e com carga;
- Relações de transformação dos sensores de corrente.

Para cada uma dessas situações foi observado o comportamento dos sinais tanto na fase onde está conectada a cadeia de isoladores em questão como nas demais fases.

Um exemplo de sinais obtidos no secundário do sensor de corrente conectado ao cabo de aterramento do TC da fase A da subestação à esquerda no diagrama pode ser observado na Figura 4.14 e na Figura 4.15. Neste caso, foi utilizada uma cadeia contendo seis isoladores, com a descarga parcial sendo gerada no isolador mais próximo da fase. Esta cadeia foi conectada a apenas 100 m da subestação, representando a primeira estrutura contada a partir desta. A linha de transmissão operava sem carga e a relação de transformação do sensor de corrente adotada foi de 1:50.

Os resultados das simulações mostraram que, para a relação de transformação 1:50 do sensor de corrente, a amplitude dos sinais não passava de 100 mV na entrada da placa de aquisição, mostrando ser esta uma configuração adequada para o sensor de corrente.

Apesar da amplitude dos sinais no secundário dos sensores de corrente estarem em nível adequado quando da ocorrência de descargas parciais, o mesmo não pode ser afirmado para a ocorrência de outros eventos, como surtos de manobra e de origem atmosférica. Assim, foi realizado um conjunto de simulações onde a linha foi manobrada em uma das subestações. O circuito utilizado nesta etapa pode ser visto na Figura 4.16.

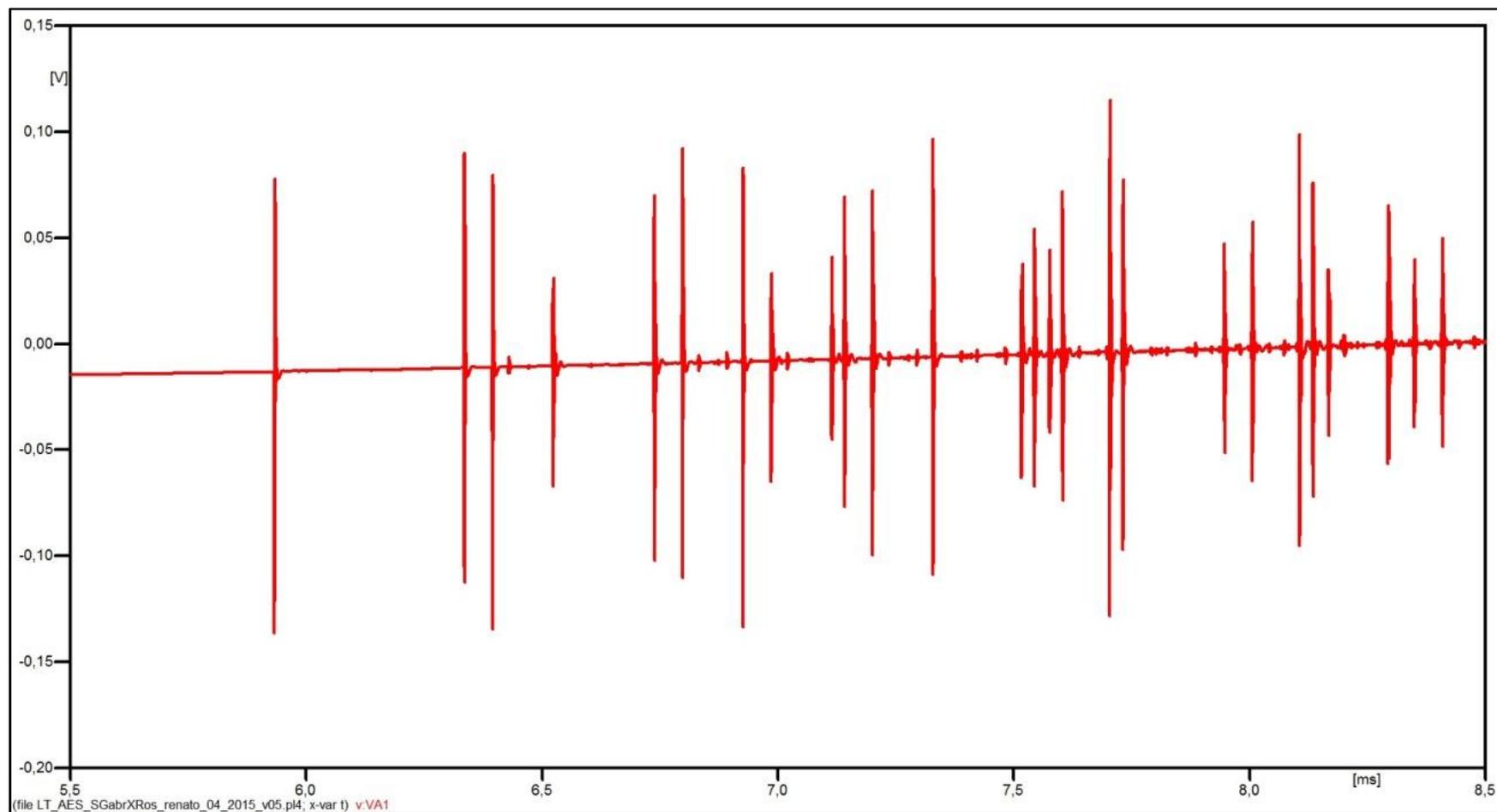


Figura 4.14 - Exemplo de sinais de descargas parciais obtidos nas simulações (Amplitude x Tempo).

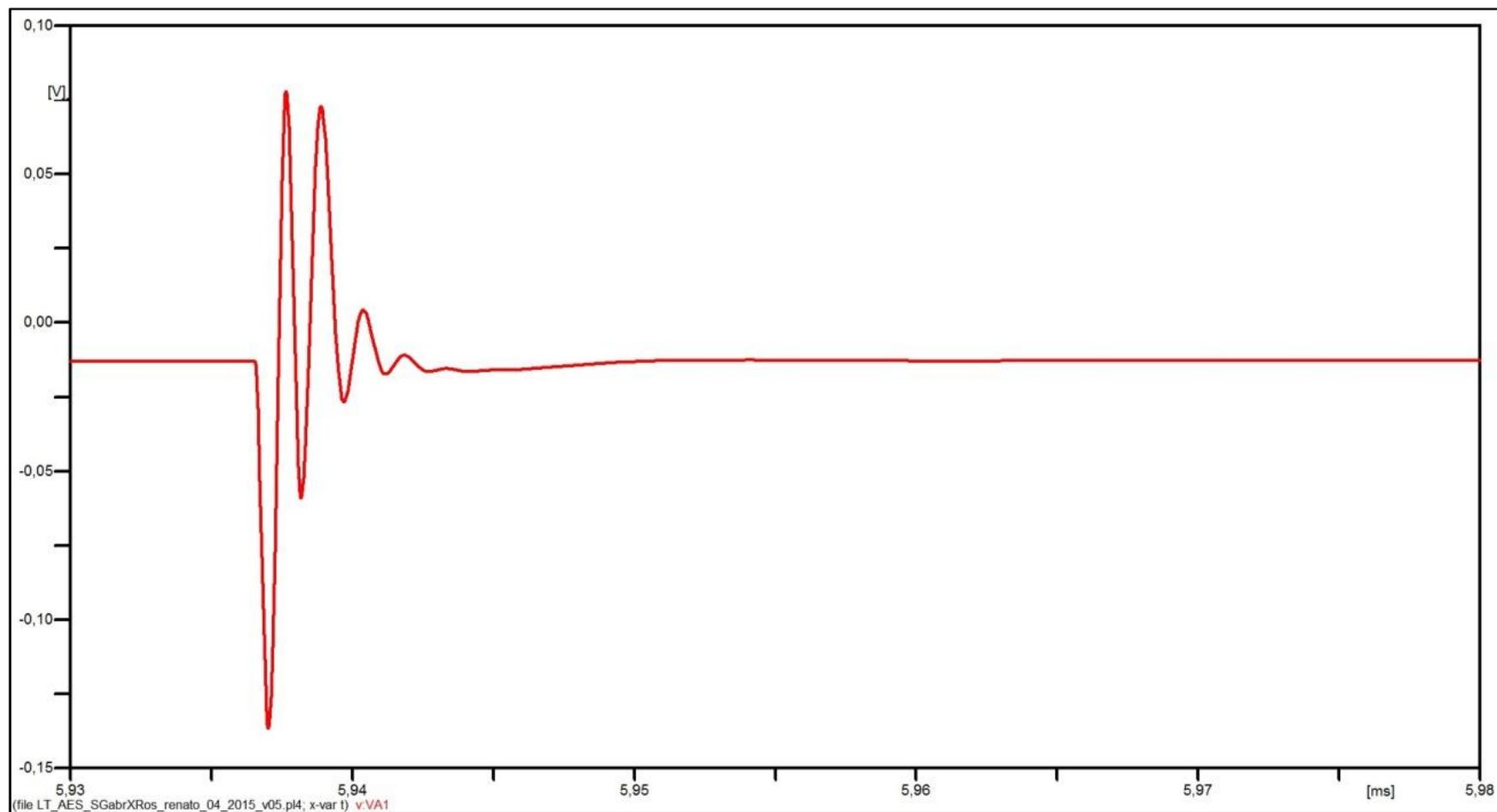


Figura 4.15 - Detalhes do primeiro sinal de descarga parcial mostrado na Figura 4.14 (Amplitude x Tempo).

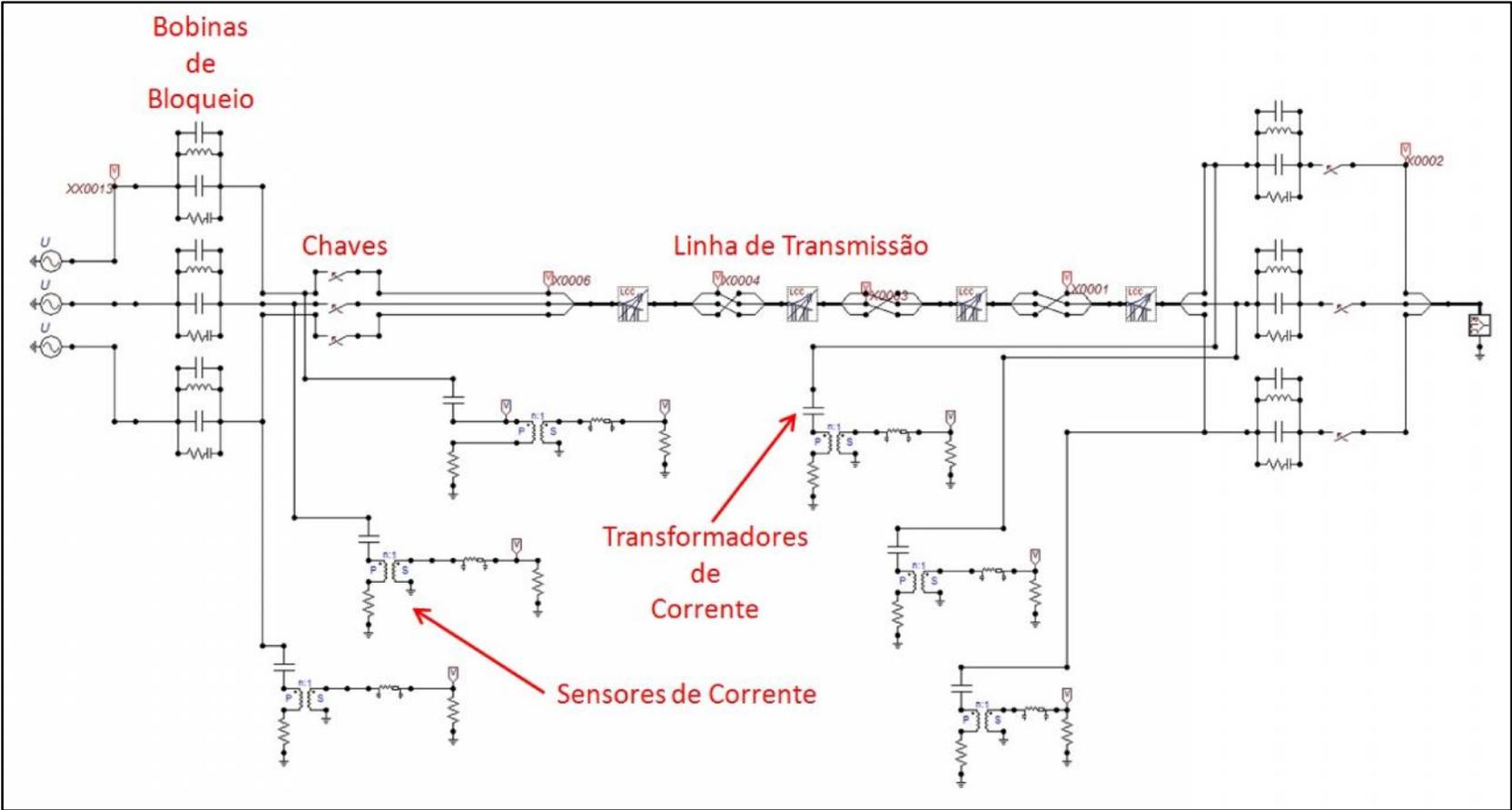


Figura 4.16 - Modelagem utilizada para avaliação dos efeitos de surtos de manobra.

As situações avaliadas foram:

- Fechamento e abertura das chaves localizadas na subestação à esquerda no diagrama da Figura 4.16;
- Leitura dos transitórios em todos os sensores de corrente, de ambas as subestações;
- Variação das condições de carga da linha.

Os resultados das simulações mostraram que transitórios com amplitudes de até 60 V podem aparecer no secundário dos sensores de corrente, como exemplifica a Figura 4.17. No caso desta figura, o transitório foi lido no secundário do sensor de corrente instalado no cabo de aterramento do TC da fase C da subestação oposta, durante o fechamento das chaves, com a linha sem carga. Assim, é necessária a utilização de dispositivos de proteção contra surtos para a proteção dos canais de entrada das placas de aquisição, assunto tratado no item 4.2.4.

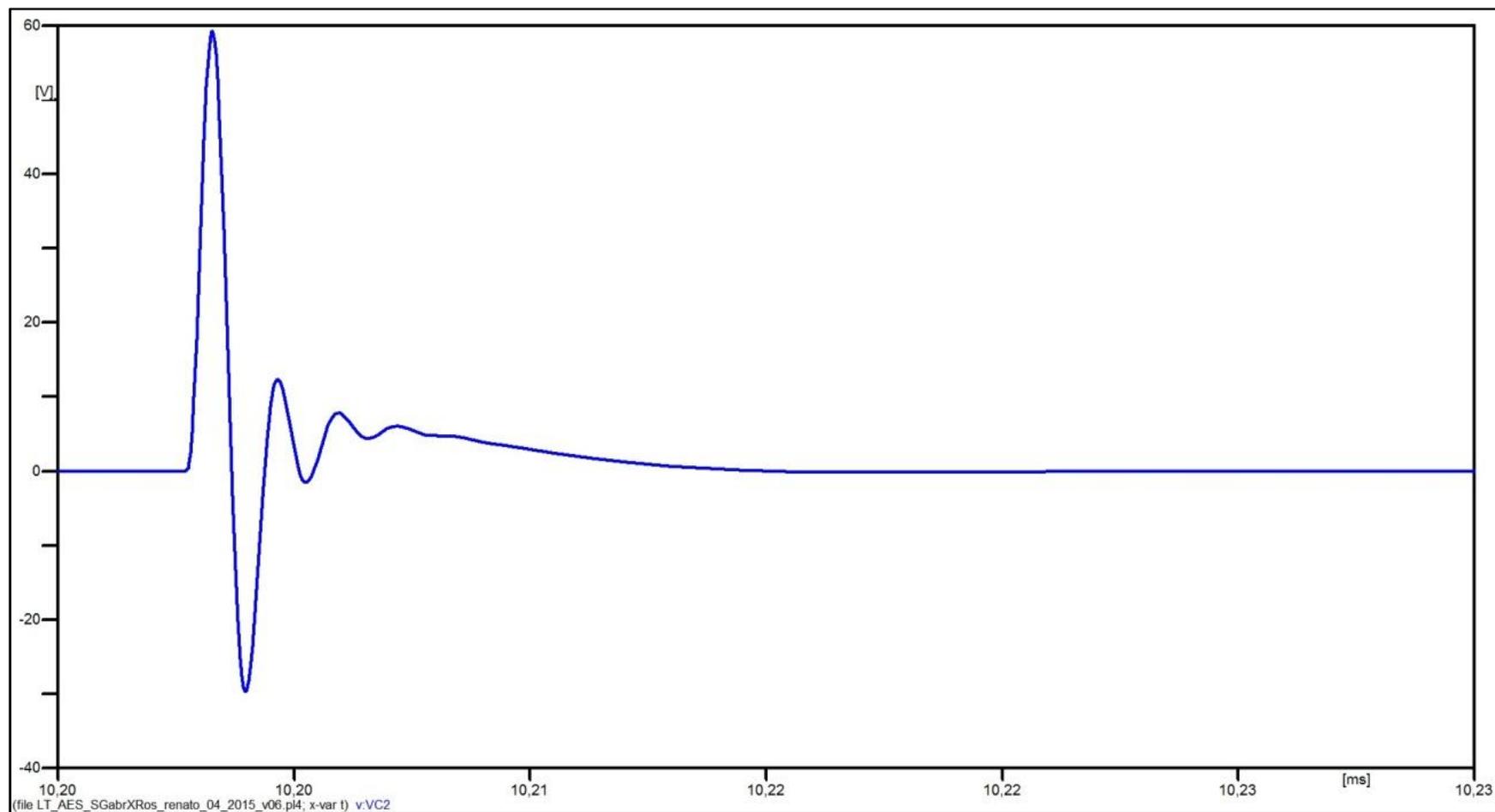


Figura 4.17 - Transiente lido no secundário do sensor de corrente instalado no cabo de aterramento do TC da fase C da subestação oposta (Amplitude x Tempo).

### 4.2.2 Especificação da Placa de Aquisição

A placa de aquisição utilizada nas subestações, modelo PicoScope 3206<sup>®</sup>, é uma versão avançada da placa utilizada em laboratório (PicoScope 3205<sup>®</sup>). Em comparação com esta última, possui principalmente banda de passagem e taxa de amostragem superiores (200 MHz x 100 MHz e 200 MS/s x 100 MS/s, respectivamente). A resolução vertical, no entanto, é a mesma (8 bits). O software de operação da placa, o qual emula um osciloscópio, também é o mesmo (PicoScope<sup>®</sup>). Mais detalhes são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Especificações básicas da placa de aquisição (Pico Technology, 2007).

PicoScope 3206	
Fabricante	PicoTechnology Limited
Largura de Banda [MHz]	200
Taxa de Amostragem [MS/s]	200
Resolução Vertical [bits]	8
Base de Tempo	1 ns/div a 50 s/div
Range	10 mV/div a 2 V/div
Canais	2 canais de entrada; 1 canal de trigger externo/gerador de função

Para a especificação dessa placa foram levados em conta principalmente a amplitude, a duração e a composição harmônica dos sinais de descargas parciais. Como os sinais conhecidos, observados durante a fase de desenvolvimento em laboratório, apresentavam considerável influência do circuito entre seus respectivos pontos de geração na cadeia e o ponto de leitura (canal de entrada da placa PicoScope 3205<sup>®</sup>), foi realizado um ensaio em laboratório para se determinar as características dos sinais de descargas parciais "puros", isto é, sem a influência do circuito. O diagrama do circuito utilizado neste ensaio é mostrado na Figura 4.18.

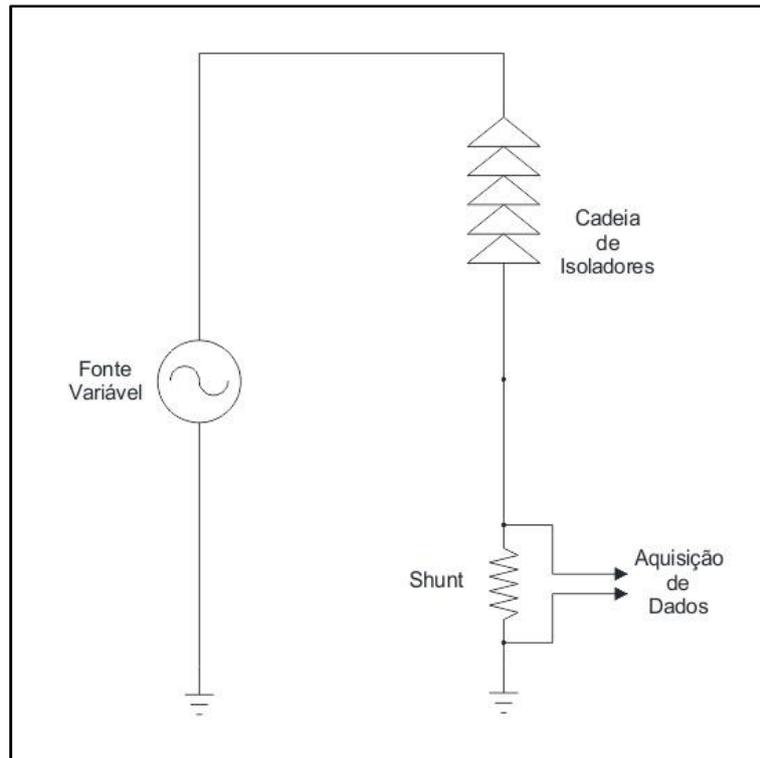


Figura 4.18 - Circuito utilizado para o ensaio de verificação das características dos sinais "puros" de descargas parciais.

Três cadeias de isoladores foram avaliadas, todas compostas por cinco isoladores:

- Cadeia 1: formada exclusivamente por isoladores de porcelana;
- Cadeia 2: formada exclusivamente por isoladores de vidro;
- Cadeia 3: formada por ambos os tipos de isoladores.

Para a obtenção de descargas parciais, foi utilizado um dispositivo de simulação similar ao aplicado na fase de desenvolvimento de laboratório (Capelini, 2011), conforme pode ser observado na Figura 4.19. Os sinais foram lidos a partir de um resistor shunt de 0,01  $\Omega$  instalado no aterramento da cadeia, e então digitalizados por um osciloscópio Agilent InfiniiVision DSO-X 2014A (Figura 4.20). Este osciloscópio possui a mesma banda passante da PicoScope 3205<sup>®</sup> (100 MHz) e a mesma resolução vertical (8 bits), porém sua taxa de amostragem é bem superior (2 GS/s), permitindo que se observem os sinais com mais detalhes (Agilent, 2013).



Figura 4.19 - Cadeia de isoladores de vidro utilizada no ensaio, dotada de dispositivo de simulação de descargas parciais no segundo isolador (contando a partir da fase).

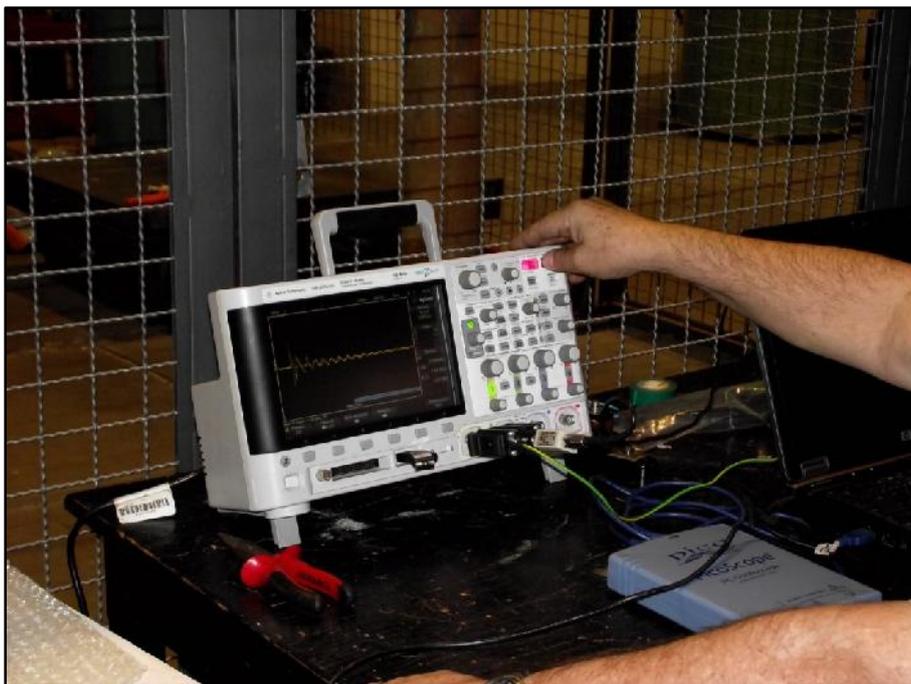


Figura 4.20 - Osciloscópio Agilent InfiniiVision DSO-2014A utilizado no ensaio, com um sinal de descarga parcial sendo mostrado em sua tela.

Descargas parciais foram provocadas em todos os isoladores de todas as cadeias, sendo seus respectivos sinais avaliados posteriormente. Os resultados dessa avaliação mostraram o seguinte:

- Do ponto de vista das redes neurais, não há diferença entre os sinais obtidos nas três cadeias;
- As componentes harmônicas mais relevantes estão situadas em torno de 4 MHz, 8 MHz, 16 MHz e 23 MHz. A Figura 4.21 e a Figura 4.22 mostram, como exemplo, a composição espectral média dos sinais obtidos nos isoladores 1 (mais próximo da fase) e 5 (mais afastado da fase), respectivamente.

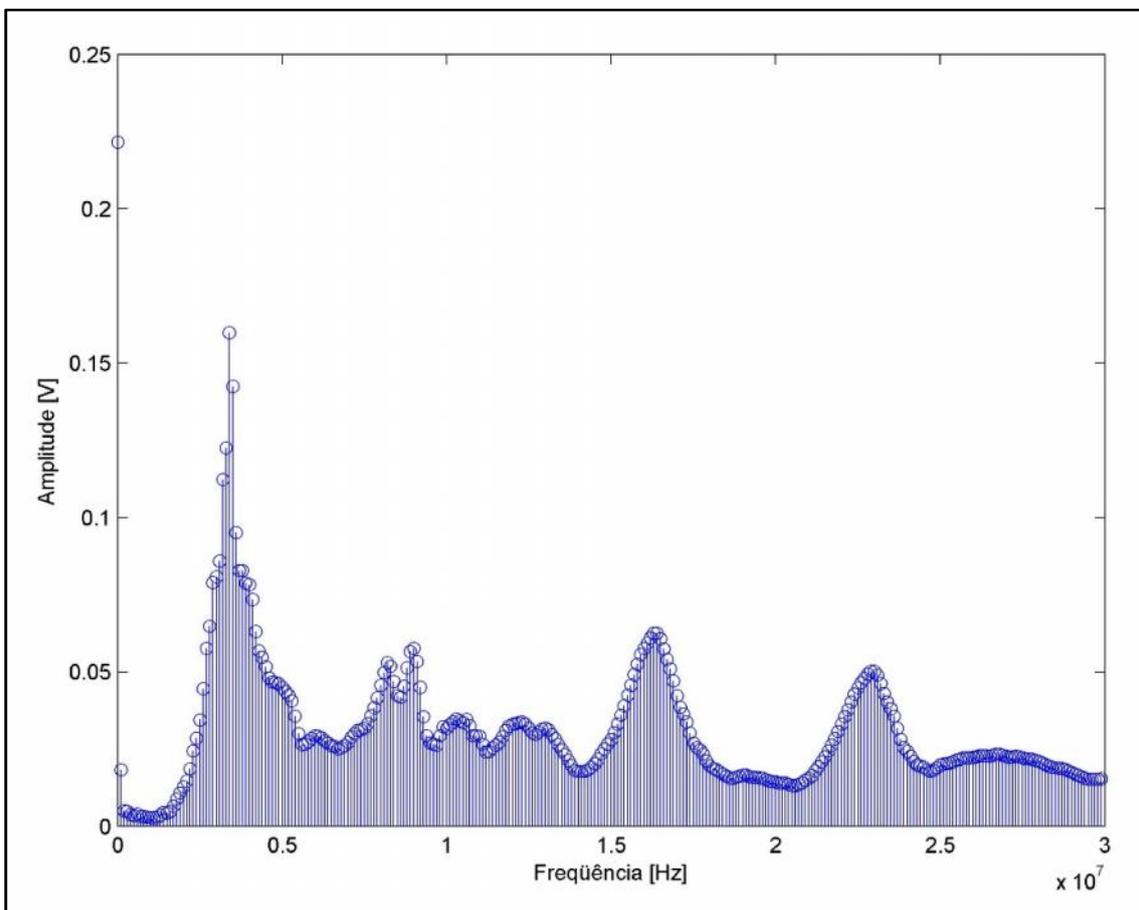


Figura 4.21 - Composição espectral média dos sinais obtidos a partir de descargas parciais ocorridas no primeiro isolador, mais próximo da fase, em uma cadeia de porcelana.

Ainda que tenha sido notada variação das amplitudes das componentes harmônicas dos sinais de acordo com a posição das descargas parciais ao longo das cadeias de isoladores, o aspecto geral dos sinais no domínio da frequência foi mantido.

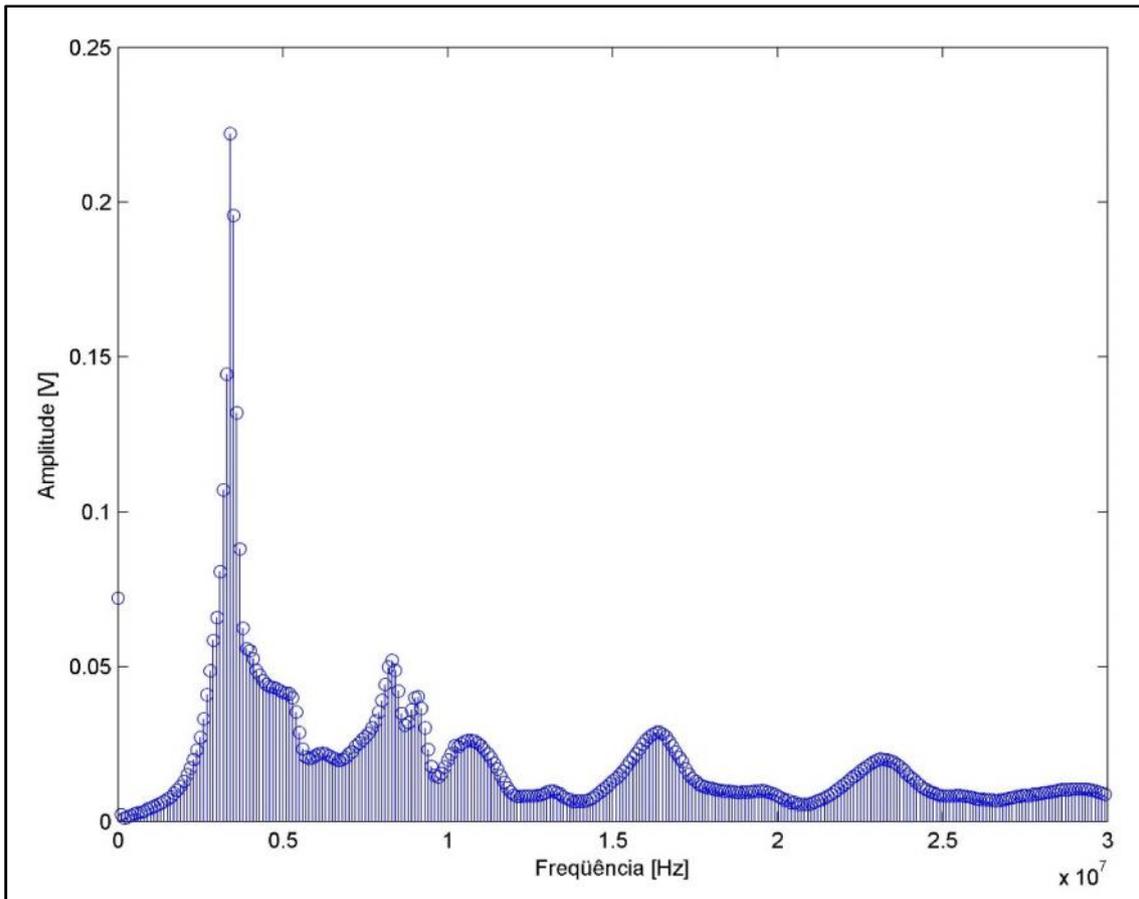


Figura 4.22 - Composição espectral média dos sinais obtidos a partir de descargas parciais ocorridas no quinto isolador, mais afastado da fase, em uma cadeia de porcelana.

Como pode ser observado, as componentes harmônicas mais importantes dos sinais estão situadas em uma faixa abaixo dos 25 MHz. Sendo assim, a placa de aquisição utilizada em laboratório, PicoScope 3205<sup>®</sup>, também poderia ser utilizada em campo, já que possui banda de passagem e taxa de amostragem suficientes. Entretanto, devido à pouca diferença de preço, optou-se pelo modelo PicoScope 3206<sup>®</sup>.

### 4.2.3 Desenvolvimento do Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado na fase de desenvolvimento de laboratório (Capelini, 2011), mostrou-se adequado para o objetivo proposto naquele momento, apresentando resposta em frequência adequada e aplicação prática em ambiente de laboratório. Entretanto, para campo foi necessário desenvolver um novo sensor, dadas as novas características da aplicação (elétricas e mecânicas).

As premissas para o desenvolvimento deste novo sensor foram:

- Desejável a utilização de núcleo dividido, de forma a facilitar a instalação do sensor, sem que haja a necessidade da desconexão do cabo de aterramento dos TCs;
- Apresentar robustez (mecânica, térmica e química) suficiente para instalação em campo, ainda que dentro de um invólucro;
- Possuir baixo custo de aquisição ou fabricação, no caso de ser montado no próprio LAT-EFEI;
- Apresentar confiabilidade, precisão e resposta em frequência compatíveis com as necessidades de sistema.

Assim, foram considerados dois tipos de sensores: bobina de Rogowski e TC tradicional do tipo janela, como o utilizado anteriormente em laboratório.

Pela praticidade de instalação e manuseio, a bobina de Rogowski foi escolhida como primeira alternativa. Sendo assim foi realizado um ensaio com um produto comercial disponível na própria Universidade Federal de Itajubá (Fluke modelo i430 Flex<sup>®</sup>) utilizado em medidores de qualidade de energia, mostrado na Figura 4.23 (Fluke Corporation, 2006).

Os ensaios com esta bobina de Rogowski foram realizados com sucesso, sendo que os sinais lidos apresentavam amplitude adequada e sem interferências significantes. Um exemplo de sinal lido com este sensor, obtido na linha de transmissão artificial, pode ser observado na Figura 4.24.



Figura 4.23 - Bobina de Rogowski sob ensaio em laboratório.

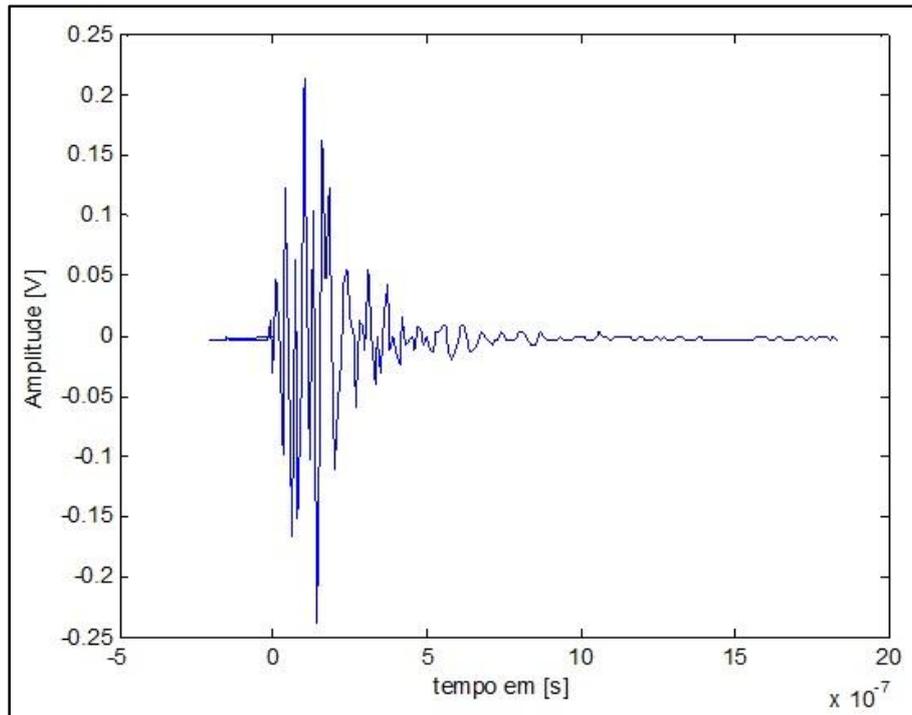


Figura 4.24 - Exemplo de sinal lido com a bobina de Rogowski Fluke i430 Flex®.

Os sinais obtidos com o uso do Fluke i430 Flex® apresentaram forma de onda e composição harmônica diferente dos sinais obtidos através do resistor shunt, que podem ser considerados praticamente livres de deformações. Esse fato denota a grande influência que o sensor de corrente pode imprimir sobre as características do sinal. Entretanto, para o sistema de reconhecimento de sinais, desenvolvido com redes neurais, a influência do sensor de corrente não é problema. Isso porque o sensor de corrente afeta igualmente todos os sinais destinados ao treinamento das redes neurais, não gerando impactos no sistema desde que o mesmo sensor seja utilizado na fase de reconhecimento de defeitos.

Com o sucesso da aplicação do Fluke i430 Flex® em laboratório, foi iniciado o desenvolvimento de um modelo próprio de bobina de Rogowski em laboratório com a intenção de criar um modelo mais adequado às necessidades da aplicação em campo, apresentando propriedades elétricas e mecânicas um pouco diferentes e custo bastante reduzido em relação ao modelo ensaiado.

O primeiro protótipo foi montado com materiais adequados para uso abrigado somente. No caso de sucesso deste protótipo, um outro deveria ser construído de forma a permitir que a bobina fosse instalada ao tempo.



Figura 4.25 - Bobina de Rogowski desenvolvida em laboratório.

Porém, os ensaios realizados com o protótipo indicaram uma relação sinal-ruído baixa demais, comprometendo a integridade dos sinais de descargas parciais. Uma pesquisa detalhada sobre o mau funcionamento do protótipo revelou que o principal motivo para este comportamento é a forma construtiva artesanal, que não apresentava recursos suficientes para a elaboração de uma bobina Rogowski nos padrões necessários. Uma das possíveis soluções para este problema seria a contratação de uma empresa especializada para confeccionar as bobinas, porém o custo se mostrou proibitivo. Dessa forma, a utilização da bobina de Rogowski como sensor de corrente foi descartada.

A aplicação de um TC tradicional do tipo janela começou a ser estudada também com produtos disponíveis no mercado. Diversos modelos, emprestados por empresas parceiras do LAT-EFEI, foram ensaiados em laboratório. Os que apresentaram melhores resultados foram os TCs específicos para leitura de descargas parciais.

O custo desses sensores, entretanto, é ainda mais elevado que o custo das bobinas de Rogowski disponíveis no mercado. Por essa razão, optou-se pelo projeto e construção de um modelo próprio. Após uma pesquisa sobre os núcleos disponíveis no mercado, alguns modelos foram adquiridos e utilizados para a montagem de protótipos, posteriormente ensaiados em laboratório. Esta etapa foi realizada obedecendo a sequência:

- Pesquisa dos núcleos disponíveis no mercado;

- Seleção dos núcleos mais adequados, levando em conta suas características construtivas (material, formato, dimensões);
- Análise da disponibilidade e facilidade de aquisição dos núcleos no mercado nacional principalmente;
- Execução do processo de cotação, com posterior análise de viabilidade e aquisição dos modelos escolhidos;
- Utilização dos núcleos para montagem de sensores de corrente com diversas relações de transformação;
- Execução de ensaios de resposta em frequência dos sensores montados, utilizando para isso um equipamento específico, Omicron FRAnalyzer<sup>®</sup> (Omicron, 2008);
- Análise dos resultados dos ensaios e definição do tipo de núcleo a ser utilizado.

Os resultados dos ensaios mostraram que o material mais adequado é o Carbonyl E (“pó de ferro”), cujas características básicas são mostradas a seguir:

- Permeabilidade magnética relativa:  $\mu = 10$ ;
- Estabilidade de temperatura: 95 ppm/°C;
- BW: 2 – 30 [MHz].

Entretanto, os núcleos fabricados com este material ensaiados nesta etapa não apresentavam dimensões compatíveis com o a aplicação em campo, possuindo diâmetro interno muito pequeno. Assim, um novo núcleo foi selecionado (Magmattec MMT002T4416). As especificações e o comportamento desse núcleo podem ser observados da Figura 4.26 à Figura 4.30 (Magmattec, 2011).

CÓDIGO PEÇA	PRODUTO	AL [nH/esp²]	Diam. Ext.	Diam. Int.	ALTURA (H) [mm]	L [cm]	A [cm²]	V [cm³]	As [cm²]	Massa [g]
			(ØExt) [mm]	(ØInt) [mm]						
500.002027.110	MMT002T2711	13,5	26,9	14,5	11,1	6,49	0,659	4,28	31	21,4
500.002040.150	MMT002T4015	14	39,9	24,1	14,5	10,1	1,06	10,7	63,2	53,5
500.002044.160	<b>MMT002T4416</b>	15	44,5	27,2	16,5	11,2	1,34	15	79,1	75
500.002047.180	MMT002T4718	24	46,7	24,1	18	11,2	1,88	21	89,2	105

\* Outras dimensões estão disponíveis sob consulta.

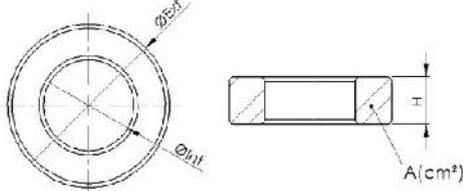


Figura 4.26 - Dimensões físicas do núcleo escolhido (Magmattec, 2011).

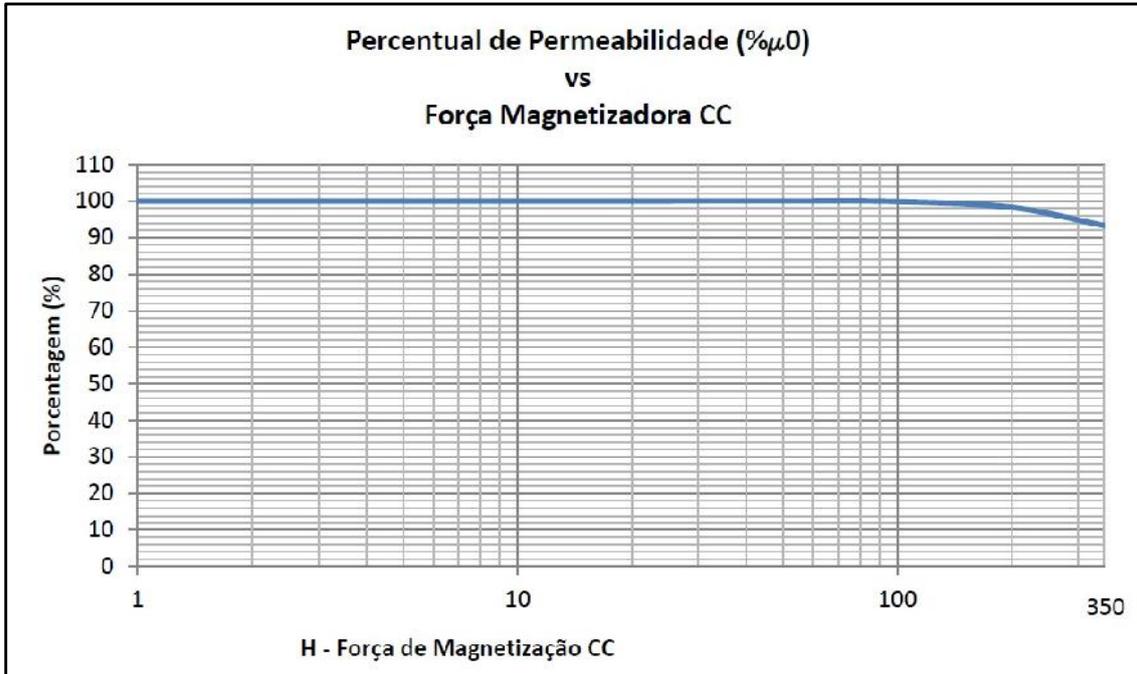


Figura 4.27 - Comportamento da permeabilidade magnética com relação à força de magnetização (Magmattec, 2011).

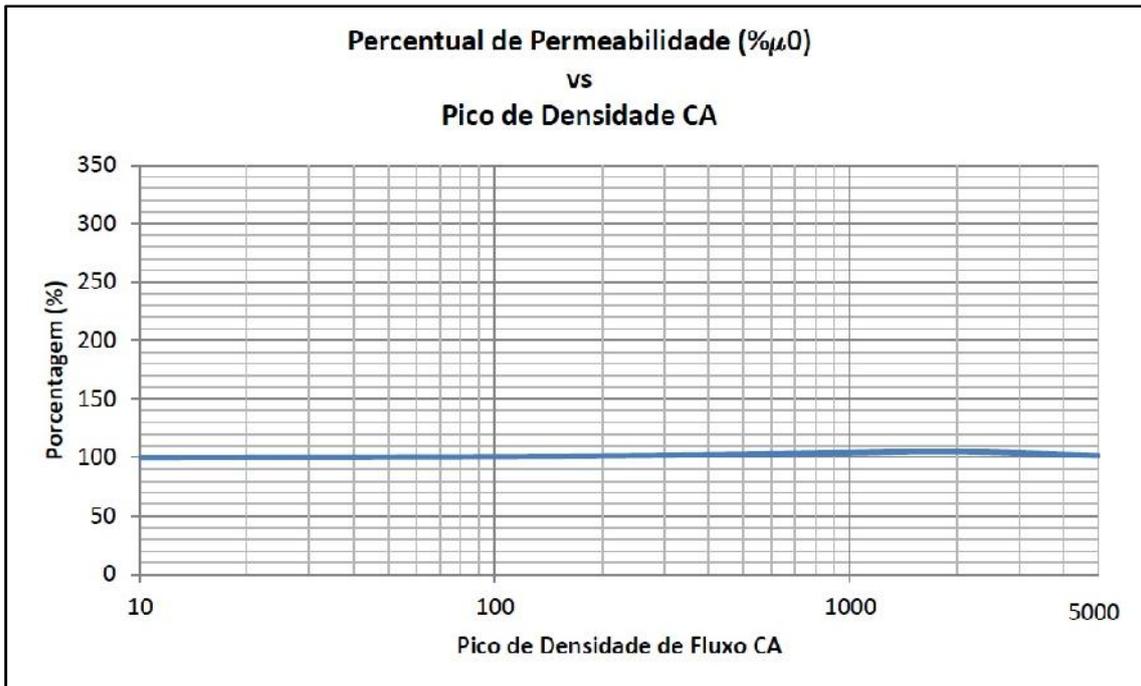


Figura 4.28 - Comportamento da permeabilidade magnética com relação à densidade de fluxo (Magmattec, 2011).

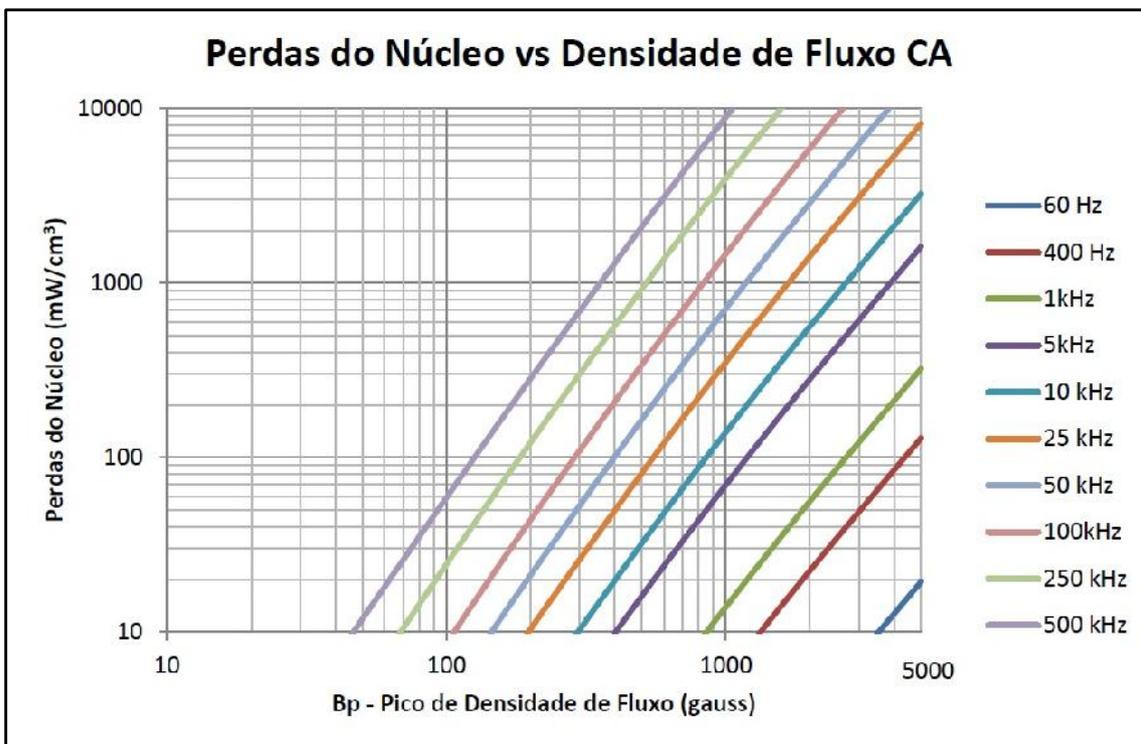


Figura 4.29 - Comportamento das perdas no núcleo de acordo com a frequência e densidade de fluxo (Magmattec, 2011).

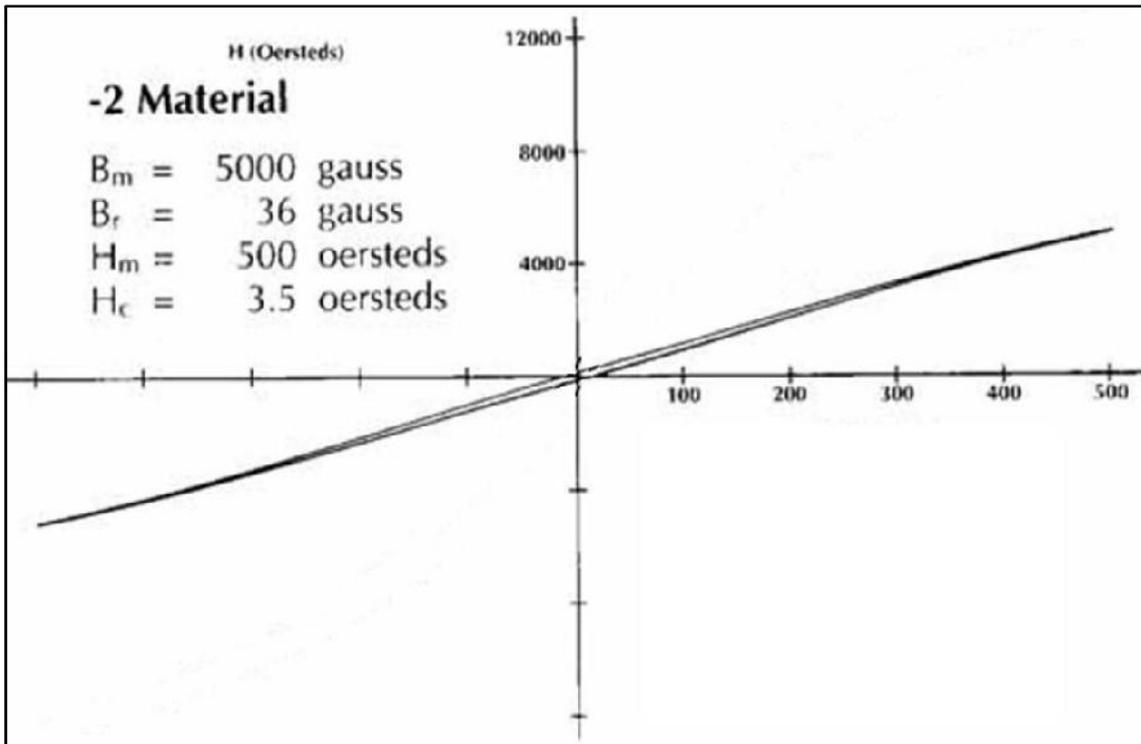


Figura 4.30 - Histerese do material (Magmattec, 2011).

Foram adquiridas 30 unidades deste núcleo, tanto para utilização em laboratório quanto para utilização em campo.

Após o recebimento dos núcleos, novos ensaios foram realizados para avaliar a resposta em frequência de diversas configurações de sensores de corrente montados com esses núcleos. Estes ensaios tiveram como objetivos:

- Avaliar a resposta em frequência do núcleo;
- Determinar a relação de espiras mais adequada;
- Verificar a influência dos conectores, soldas e conexões na resposta dos sensores de corrente.

Na Figura 4.31 é possível observar um dos ensaios de resposta em frequência realizados, que permite que os três objetivos citados anteriormente sejam cumpridos.



Figura 4.31 - Sensor de corrente sob ensaio de resposta em frequência com o uso do FRAnalyzer<sup>®</sup>.

Dessa forma, para uso em laboratório, foi escolhido o sensor com relação 5:30. Esta configuração foi ensaiada em seguida na própria linha de transmissão artificial, como mostra a Figura 4.32, comprovando a resposta adequada do sensor de corrente para a aquisição de sinais de descargas parciais.



Figura 4.32 - Sensor de corrente montado com o núcleo MM002T4416 sob ensaio na linha de transmissão artificial.

#### 4.2.4 Projeto da Caixa de Aquisição e Especificação dos Demais Componentes

A instalação do sensor de corrente em campo, diferentemente da aplicação em laboratório, não pode ser realizada de forma a deixar o sensor exposto às intempéries, sendo necessária a utilização de um invólucro. Como não foram encontrados invólucros adequados para os sensores no mercado, foi analisada a possibilidade de abrigar os sensores em caixas metálicas, que iriam conter também os dispositivos de proteção contra surtos. Assim, para o projeto das caixas de aquisição, como são referidas deste ponto em diante, foram considerados os seguintes pontos:

- Possíveis locais de instalação dos sensores nos TCs das subestações SE Rosário e SE São Gabriel;
- Características dos cabos de aterramento dos TCs;
- Especificação dos dispositivos de proteção contra surtos;
- Tipo de cabo coaxial a ser utilizado;
- Tipo de conector a ser instalado nos cabos coaxiais.

Dessa forma, antes de se realizar o projeto mecânico das caixas de aquisição em si, foi necessário especificar os dispositivos de proteção, os cabos coaxiais e seus respectivos conectores.

Para a especificação dos dispositivos de proteção, levou-se em conta o resultado das simulações discutidas no item 4.2.1, sendo avaliadas as seguintes possibilidades:

- Utilização de unidades DPS (dispositivo de proteção contra surtos) disponíveis no mercado;
- Projetar e montar dispositivos próprios;
- Aplicação de acoplamento magnético: proteção contra surtos através de saturação;
- Utilização de acoplamento óptico.

Após análise detalhada de cada alternativa, optou-se pela utilização de unidades DPS disponíveis no mercado, sendo dois modelos escolhidos inicialmente e identificados aqui como DPS1 e DPS2.

O DPS1 foi especificado para instalação junto ao sensor de corrente, dentro da caixa de aquisição de sinais, enquanto que o DPS2 foi escolhido para ser instalado na entrada da placa de aquisição. As principais características do DPS1 são:

- Máxima tensão de operação contínua: 50 V;
- Máxima corrente de operação: 10 A;
- Máxima corrente de surto (fase-terra): 4,5 kA;
- Máxima corrente de surto (fase-fase): 9 kA;
- Tensão de clamping a 100 V/s: 82 V;
- Tensão de clamping a 8/20  $\mu$ s (100 A): 135 V;
- Tempo de resposta: 1 ps;
- Tecnologia de proteção: varistor de óxido metálico e diodo supressor de surto.

As principais características do DPS2 são:

- Máxima tensão de operação contínua: 20 V;
- Máxima corrente de surto: 10 kA @ 8/20  $\mu$ s;
- Tensão de clamping a 100 V/s (1mA): 21,6 V a 26,4 V;
- Tensão de clamping a 10/1000  $\mu$ s: 34,7 V @ 43 A;
- Tempo de resposta: 1 ps;
- Tecnologia de proteção: centelhador a gás e diodo supressor de surto.

Após a aquisição destes dispositivos de proteção, os mesmos foram instalados em laboratório para a realização de ensaios de validação. Para isso foi montado um protótipo de caixa de aquisição de sinais para uso em laboratório exclusivamente.

Após a montagem da caixa de aquisição, esta foi submetida ao ensaio de resposta em frequência com o FRAnalyzer<sup>®</sup>, mostrado na Figura 4.33. Este ensaio foi realizado com a finalidade de se avaliar se o dispositivo de proteção, os conectores e as conexões influenciam no comportamento da aquisição de sinais.



Figura 4.33 - Protótipo da caixa de aquisição sob ensaio de resposta em frequência.

O ensaio de resposta em frequência mostrou que não houve alterações significativas no comportamento do sensor de corrente, de forma que a caixa de aquisição foi então instalada na linha de transmissão artificial do LAT para uso em ensaios diversos, conforme pode ser visto na Figura 4.34. Os dispositivos de proteção também foram instalados na linha de transmissão para ensaios, sendo colocados diretamente nas entradas da placa de aquisição.



Figura 4.34 - Protótipo da caixa de aquisição instalada no aterramento de um dos TCs do LAT-EFEI.

Uma vez que o conjunto formado pelo sensor de corrente e o dispositivo de proteção foi validado em laboratório, foi dado início ao projeto de instalação em campo. Para isso, foi adotada uma caixa metálica, que foi modificada para instalação dos componentes. Possuindo grau de proteção IP 65 (IEC 60529, 2001), a caixa de aquisição para aplicação em campo pode ser instalada ao tempo, sem que haja prejuízo para os componentes eletrônicos.

O protótipo da caixa de aquisição passou pelos mesmos ensaios realizados para o caso da caixa de aquisição desenvolvida para laboratório, tendo sido aprovado para instalação em campo. A Figura 4.35 mostra o protótipo sob ensaio em laboratório, onde pode ser observado que a caixa é conectada ao cabo de aterramento do TC (cabo azul), devidamente seccionado. O procedimento de secção do cabo de aterramento dos TCs em campo foi previamente analisado e aprovado pela concessionária.



Figura 4.35 - Protótipo da caixa de aquisição sob ensaio em laboratório.

Com o protótipo aprovado, foi dado início ao processo de confecção das caixas de aquisição a serem instaladas em campo. Parte deste processo foi realizado por uma empresa contratada, que ficou responsável pelos serviços de usinagem (furação das caixas e confecção das peças de fixação em nylon), enquanto que a montagem final e ensaios foram realizados no próprio LAT-EFEI. Os furos de passagem das barras de cobre foram devidamente selados com a utilização de *o-rings* de forma a conferir o grau IP desejado. A etapa final da montagem, que consiste na realização de ensaios elétricos, é mostrada na Figura 4.36.



Figura 4.36 - Caixas de aquisição sob ensaio no LAT-EFEI.

Outro ponto importante a ser considerado na instalação do sistema de aquisição de sinais em campo é o tipo de cabo coaxial a ser empregado. No caso da etapa de desenvolvimento em laboratório, onde as distâncias eram muito curtas e o nível de ruído muito baixo (ambiente controlado), foram utilizados cabos coaxiais do tipo RG 58. Este tipo de cabo não é adequado para a instalação em campo, pois possui alta atenuação, baixa capacidade de blindagem eletromagnética e é mecanicamente frágil.

Assim, um novo modelo de cabo coaxial teve que ser especificado. Após a realização de uma pesquisa dos modelos disponíveis no mercado e avaliação de suas características, de forma a verificar principalmente a atenuação do sinal, o modelo RG213 foi escolhido. As principais características deste cabo são:

- Construção: condutor de cobre e dielétrico de polietileno (PE);
- Impedância: 50  $\Omega$  ;
- Máxima frequência de operação: 1GHz;
- Velocidade de propagação do sinal: 66 %.

O comportamento do cabo em função da frequência é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Comportamento do cabo RG213 em função da frequência do sinal. Adaptado de HUBER+SUHNER (2007).

Atenuação [ fórmula: $(a \cdot f^{0.5} + b \cdot f)$ ]		Potência CW [ fórmula: $(p \cdot f^{0.5})$ ]					
Coeficientes:							
a=	0.1679	b=	0.0585	f <sub>max</sub> =	1	P <sub>at</sub> 1GHz =	416
Frequência (GHz)		Aten. Nominal (dB / m)		Aten. Nominal (dB / ft)		Pot. CW. Máx. (watt)	
		Nível do Mar 25 °C		Nível do Mar 25 °C		Nível do Mar 25 °C	
0.05	0.04	0.012	1860				
0.10	0.06	0.018	1316				
0.15	0.07	0.021	1074				
0.20	0.09	0.027	930				
0.25	0.10	0.030	832				
0.30	0.11	0.034	760				
0.35	0.12	0.037	703				
0.40	0.13	0.040	658				
0.45	0.14	0.043	620				
0.50	0.15	0.046	588				
0.55	0.16	0.049	561				
0.60	0.17	0.052	537				
0.65	0.17	0.052	516				
0.70	0.18	0.055	497				
0.75	0.19	0.058	480				
0.80	0.20	0.061	465				
0.85	0.20	0.061	451				
0.90	0.21	0.064	439				
0.95	0.22	0.067	427				
1.00	0.23	0.070	416				

Após a aquisição dos cabos, alguns lances foram selecionados para ensaios no LAT-EFEI. Estes ensaios foram realizados na própria linha de transmissão artificial, sendo avaliados os seguintes pontos:

- Capacidade de blindagem eletromagnética;
- Influência da disposição do cabo no comportamento do sinal;
- Avaliação mecânica: máxima curvatura possível, robustez dos conectores, etc.

Os cabos foram aprovados para instalação em campo, porém, foi notado que a disposição do cabo, isto é, a forma com que é instalado, pode influenciar consideravelmente nas características dos sinais. A Figura 4.37 mostra um lance de cabo sob ensaio no LAT-EFEI, sendo disposto praticamente da forma que estava em sua embalagem, formando um rolo solto no chão. Esta disposição resulta em um valor de reatância própria dessa disposição, que por sua vez influencia o sinal lido pelo sistema de aquisição. Ao dispor o cabo de outra forma, instalado em canaletas, por exemplo, este valor de reatância é alterado, fazendo com que a influência sobre o

sinal lido seja diferente daquela observada anteriormente. Assim, conclui-se que para que o sistema de localização de cadeias de isoladores com falhas funcione corretamente não podem haver alterações na disposição dos cabos, sob pena de se ter que refazer o treinamento das redes neurais.



Figura 4.37 - Lance de cabo RG213 sob ensaio no LAT-EFEI.

#### 4.2.5 Instalação e Ensaio Inicial do Sistema de Aquisição de Sinais em Campo

O sistema de aquisição de sinais foi instalado nas subestações SE Rosário e SE São Gabriel em fevereiro de 2012. Esta etapa foi dividida nas seguintes atividades:

- Planejamento e validação das atividades com a concessionária;
- Envio dos materiais para as subestações;
- Instalação dos computadores, placas de aquisição e dispositivos de proteção nos painéis;
- Instalação das caixas de aquisição de sinais nos TCs;
- Instalação dos cabos nas canaletas;
- Partida do sistema, com a utilização do software de aquisição de sinais fornecido junto com a placa de aquisição;
- Ensaio de aquisição de sinais mediante a aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais em cadeias de isoladores localizadas nas estruturas próximas das subestações;

- Ensaio para verificação de surtos de manobra e atuação dos dispositivos de proteção.

As atividades de instalação foram iniciadas pelas salas de comando das subestações. Primeiramente foram instalados os equipamentos nos painéis de telemedição (computador, placa de aquisição e dispositivos de proteção). O conjunto foi disposto da forma mostrada na Figura 4.38 (SE São Gabriel). Após a instalação do sistema operacional e demais programas no computador, foi realizada uma sequência de testes no conjunto, de forma a certificar o pleno funcionamento de hardware e software.



Figura 4.38 - Equipamentos instalados no painel de telemedição da SE São Gabriel.

Em seguida, foram instalados os cabos nas canaletas, dispendo-os de forma a não permitir movimentações acidentais, já que alterações em sua disposição podem ocasionar modificações nas propriedades dos sinais, conforme comentado anteriormente. Também foi evitado que ficassem em contato ou muito próximos à outros cabos de dados e alimentação.

Devido à diferença considerável entre os modelos de TCs com relação às respectivas carcaças, as caixas de aquisição foram fixadas de formas distintas. Nos TCs da SE Rosário a fixação das caixas de aquisição foi realizada mediante o uso de abraçadeiras plásticas, conforme pode ser visto na Figura 4.39. Esta mesma figura mostra, no detalhe à esquerda, como estava conectado o pino de aterramento do equipamento. Esta conexão foi seccionada para a ligação da caixa de medição. Já no caso da SE São Gabriel, as caixas de aquisição foram fixadas mediante o uso de parafusos, solução mais adequada e que não pode ser adotada na SE Rosário. A Figura 4.40 mostra as caixas de aquisição instaladas nos TCs da SE São Gabriel.



Figura 4.39 - Caixa de aquisição instalada em TC da SE Rosário (a direita). A imagem à esquerda mostra a conexão, em chapa metálica, que teve que ser seccionada para a instalação da caixa.



Figura 4.40 - Caixas de aquisição instaladas nos TCs da SE São Gabriel.

Após a instalação das caixas, o sistema de aquisição de sinais foi iniciado, sendo testados ambos os canais (A e B) das placas de aquisição. Apesar de serem instaladas caixas de aquisição de sinais nas três fases de cada subestação, o limite de dois canais de entrada das placas de aquisição permite que somente duas fases sejam monitoradas ao mesmo tempo. Este monitoramento simultâneo foi previsto para ser realizado em caráter experimental nos primeiros ensaios de campo, entretanto o método proposto prevê o monitoramento de apenas uma fase ao final do desenvolvimento.

Também foram instalados nesta etapa os modems 3G nos computadores dos painéis de telemedicação. O software de gerenciamento do modem foi configurado para conectar automaticamente à internet com o início do sistema operacional (Windows 7<sup>®</sup> 32 bits). Para permitir a operação remota de ambos os computadores, foi utilizado, em caráter experimental, o software TeamViewer<sup>®</sup> 6 em sua versão de avaliação. Em um ensaio posterior, realizado nesta mesma semana, os computadores das subestações foram operados remotamente a partir de um computador da concessionária situado em outra localidade, sendo a solução adotada validada pela empresa.

Com a instalação do sistema de aquisição concluído, foram realizados ensaios de aquisição de sinais de descargas parciais simuladas fisicamente nas torres próximas das subestações. Para a simulação das descargas parciais foi utilizado um garfo metálico, aplicado pelos técnicos da AES Sul entre a campânula e o pino dos isoladores das cadeias, conforme pode ser observado na Figura 4.41. No caso dessa figura, o ensaio foi realizado na fase A da torre n° 228, a aproximadamente 3 km da SE São Gabriel. Os sinais lidos pelo sistema de aquisição instalado na SE São Gabriel, nas fases A e B (canais A e B da placa de aquisição), podem ser observados na Figura 4.42. Estes sinais também foram lidos a partir da SE Rosário, porém com notável atenuação. Ensaios também foram realizados na torre n° 001, próxima à SE Rosário, sendo que neste caso sinais de amplitude similar aos da Figura 4.42 foram observados, enquanto que os sinais lidos na SE São Gabriel apresentaram atenuação considerável.



Figura 4.41 - Aplicação do garfo metálico em cadeia de porcelana da fase A da torre n° 228, próximo à SE São Gabriel.

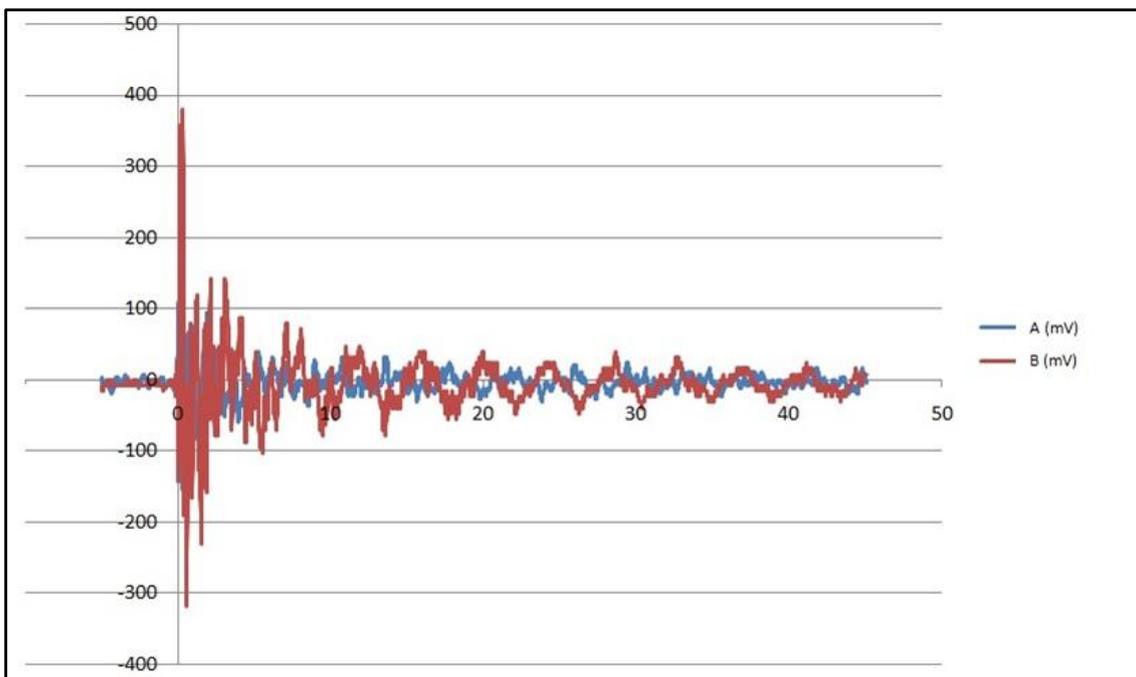


Figura 4.42 - Sinais de descargas parciais lidos pelo sistema de aquisição (fases A e B) instalado na SE São Gabriel. As unidades dos eixos vertical e horizontal são, respectivamente, mV e  $\mu$ s.

A aquisição dos sinais em ambas as subestações indicou que o sistema de aquisição funciona corretamente, porém algumas diferenças foram notadas em relação às situações previstas com base tanto nos resultados das simulações como

nos resultados dos próprios ensaios de laboratório. A primeira grande diferença refere-se à amplitude dos sinais observados em campo, muito maiores que as amplitudes dos sinais observados em laboratório. Este ponto não é crítico, uma vez que a máxima amplitude dos sinais observados em campo estava situada em torno de 500 mV e os canais de entrada das placas de aquisição suportam amplitudes de até 20 V. A segunda grande diferença é relacionada à duração dos sinais. Em laboratório, com o uso do mesmo sensor de corrente e dispositivos de proteção, foram observados sinais cuja duração não excedia 10  $\mu$ s, enquanto que em campo foram observados sinais com duração de dezenas de micro segundos.

Por fim, foi realizado um ensaio de manobra da linha de transmissão com a finalidade de se observar os surtos lidos pelo sistema de aquisição e o funcionamento dos dispositivos de proteção. Com a linha em vazio, os disjuntores da SE Rosário foram abertos, o que veio a ocasionar a queima dos canais de entrada da placa de aquisição instalada na mesma subestação. Assim, os ensaios foram paralisados e o sistema de aquisição desativado até que as causas deste evento fossem investigadas.

Em uma etapa seguinte, realizada em maio de 2012, os surtos de manobra foram medidos com o auxílio de um osciloscópio, sendo registrados valores de pico de até 300 V. A Figura 4.43 mostra um exemplo de surto de manobra registrado na SE São Gabriel durante manobra dos disjuntores desta subestação. Estas medições foram realizadas com a utilização de um osciloscópio Tektronix TDS 210 (Tektronix, 2012), com atenuação de 10 vezes na ponta de prova.

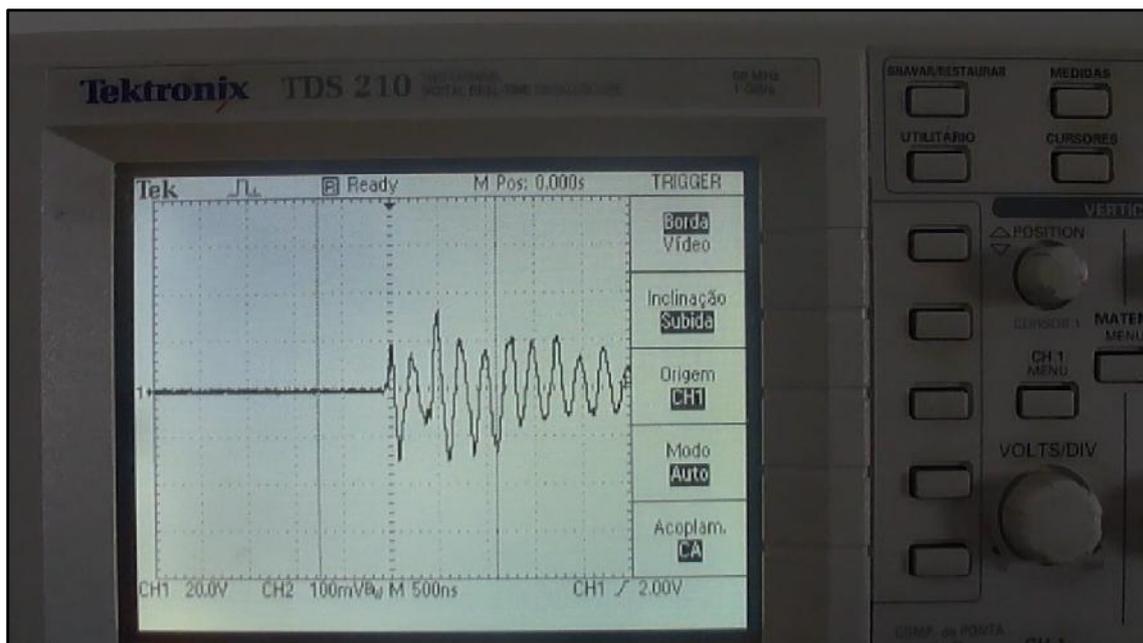


Figura 4.43 - Exemplo de surto de manobra registrado na SE São Gabriel.

A partir das medições dos surtos de manobra registrados, o esquema de proteção do sistema de aquisição de sinais foi reestudado, sendo abolida a solução baseada em dois dispositivos de proteção em um mesmo canal. Um novo dispositivo, único, a ser instalado na entrada do canal da placa de aquisição, foi especificado. As principais características desse DPS são:

- Máxima tensão de operação contínua: 6 V;
- Máxima corrente de surto: 5 kA @ 8/20  $\mu$ s;
- Nível de proteção @ 1kV/ $\mu$ s: 25 V;
- Tempo de resposta: 1 ns;
- Tecnologia de proteção: centelhador a gás e diodo supressor de surto.

Após o recebimento de uma amostra gratuita do fabricante, o novo dispositivo de proteção passou por ensaio em laboratório para verificar seu funcionamento. Este ensaio consistiu na aplicação de impulsos de tensão repetitivos de amplitudes máximas de 500 [V]. Para isso foi utilizado o gerador de impulsos repetitivos Haefely Type 48 mostrado na Figura 4.44. Um exemplo do resultado obtido deste ensaio é mostrado na Figura 4.45, onde é possível observar o correto bloqueio do impulso de tensão.

Após os ensaios em laboratório, o DPS foi aprovado e outras unidades foram adquiridas para equipar as placas de aquisição em campo e em laboratório. Estes dispositivos foram instalados em campo em junho de 2013, quando novos ensaios de manobra da linha de transmissão foram realizados. Durante a manobra dos disjuntores, os dispositivos de proteção atuaram corretamente, evitando a ocorrência de danos na placa de aquisição de sinais. Assim, o sistema de aquisição de dados foi finalmente validado em campo.



Figura 4.44 - Gerador de impulsos repetitivo Haefely Type 48.

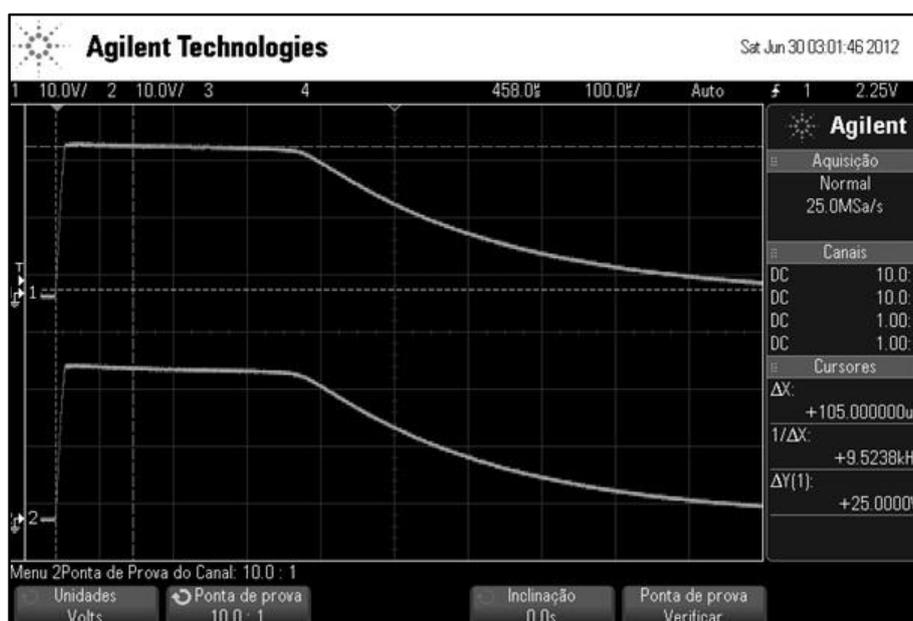


Figura 4.45 - Resultado do ensaio com impulsos repetitivos.

### 4.3 Desenvolvimento de Software

Além do hardware e da infraestrutura discutidos no item 4.2, para a implantação da metodologia proposta foi necessário desenvolver ferramentas de software tanto para aquisição de sinais quanto para o reconhecimento de padrões.

Apesar da placa de aquisição já trazer um software de aquisição de sinais, este não é adequado para a proposta desta tese. Enquanto que para a implantação da metodologia em campo é necessário a aquisição de grandes quantidades de sinais, de forma contínua, o software PicoScope<sup>®</sup> possui um limite de 1.000 sinais por atividade de aquisição imposto pela memória interna da placa. Além disso, sua operação é toda manual e não permite automação das etapas de aquisição e gravação dos sinais em disco rígido. Dessa forma, surgiu a necessidade de se desenvolver um software próprio para aquisição de sinais, que possua as funcionalidades e grau de automação necessários para a implantação da metodologia em campo.

Para o reconhecimento de padrões um outro software, independente do software de aquisição de sinais, foi criado. Desenvolvido inicialmente em Matlab<sup>®</sup>, tem como base RNAs, dispondo também de filtros e de outros algoritmos utilizados para a elaboração do diagnóstico de isoladores. Uma vez validado em laboratório e avaliado em campo, uma segunda versão do software, mais adequada ao uso comercial, foi desenvolvida em linguagem C.

#### 4.3.1 Pré-Projeto do Software

Nesta etapa foram realizadas as seguintes atividades:

- Levantamento das necessidades do projeto com relação à aquisição de sinais;
- Levantamento das necessidades do projeto com relação ao reconhecimento de padrões;
- Avaliação dos pontos fortes e fracos do software de aquisição de sinais fornecido com a placa de aquisição;
- Revisão do software de reconhecimento de padrões desenvolvido na etapa de laboratório (Capelini, 2011);
- Elaboração da lista de funcionalidades básicas;

- Pesquisa e seleção das ferramentas e tecnologias necessárias para o desenvolvimento;
- Planejamento das atividades de desenvolvimento: programação e ensaios em laboratório e campo.

Com base nos estudos realizados nesta etapa, foram decididos os seguintes pontos:

- Divisão do software em dois módulos, independentes, consistindo de um módulo destinado a aquisição de sinais e outro destinado ao reconhecimento de padrões;
- Desenvolvimento do módulo de aquisição de sinais em linguagem C, contendo as todas funcionalidades de ajuste disponíveis na tela principal do PicoScope<sup>®</sup>, que simula um osciloscópio, porém permitindo a gravação automática e irrestrita dos sinais em local previamente configurado no disco rígido;
- Desenvolvimento do protótipo do software de reconhecimento de padrões em Matlab<sup>®</sup>;
- Desenvolvimento da versão final do software de reconhecimento de padrões em linguagem C.

Os itens 4.3.2 e 4.3.3 discutem o desenvolvimento dos dois módulos, desde sua concepção aos ensaios de validação.

#### **4.3.2 Desenvolvimento do Módulo de Aquisição de Sinais**

O levantamento realizado na fase de pré-projeto apontou a necessidade das seguintes funcionalidades e características para este módulo:

- Interface gráfica similar à oferecida pelo PicoScope<sup>®</sup>;
- Capacidade de se trabalhar com dois canais simultaneamente;
- Capacidade de gravar sinais em disco rígido ininterruptamente, sendo o fator limitante apenas o tamanho do disco rígido ou um limite definido pelo usuário;
- Formato de arquivo utilizado: CSV;

- Para cada canal, separadamente, deve permitir: ajuste de escala vertical (*voltage range*) e seleção de tipo de acoplamento (AC ou DC);
- Como ajustes comuns a ambos os canais, deve-se ter: tamanho da janela (escala horizontal), limite (ou não) de aquisição de sinais, canal de trigger (A ou B) e ajuste de trigger (tensão de disparo, subida ou descida e pré-trigger);
- Operação em Windows XP® ou superior.

Assim, o software foi desenvolvido em linguagem C a partir das bibliotecas contidas no kit de desenvolvimento fornecido junto com a placa de aquisição (Pico Technology, 2007). O layout da tela do software pode ser observado na Figura 4.46.

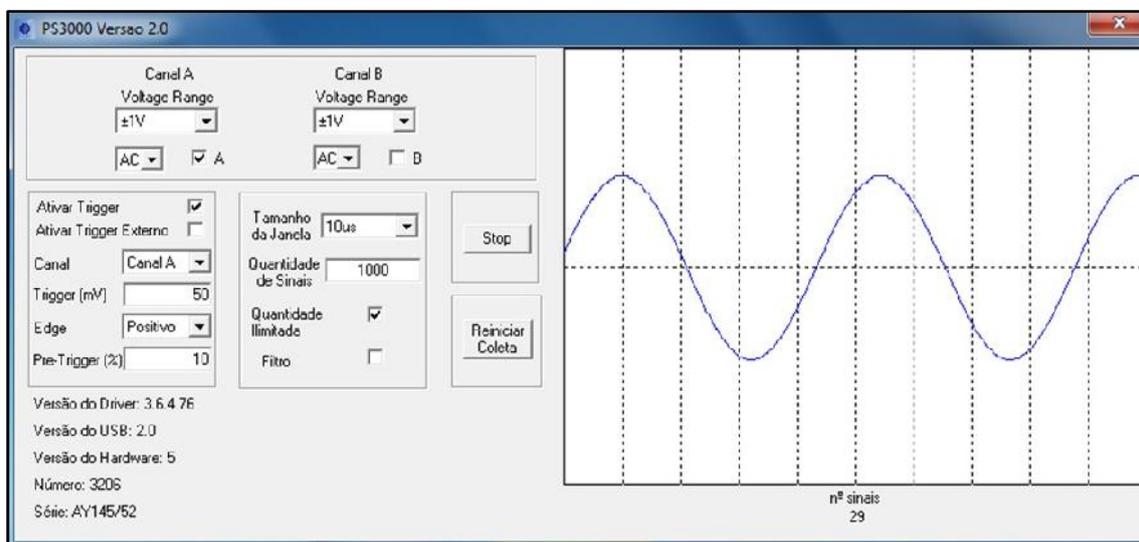


Figura 4.46 - Tela do software de aquisição de sinais.

Durante o desenvolvimento deste módulo foram realizados vários ensaios em laboratório com a finalidade de validar o protótipo. Estes ensaios consistiram em:

- Aquisição de sinais conhecidos, fornecidos por um gerador de funções;
- Comparação dos sinais conhecidos digitalizados com seus equivalentes digitalizados pelo software original da placa de aquisição;
- Aquisição de sinais de descargas parciais gerados na linha de transmissão artificial;
- Comparação dos sinais de DPs com sinais digitalizados pelo software original;

- Verificação do funcionamento das variáveis de ajuste;
- Verificação da estabilidade do programa, deixando-o em operação por dias seguidos;
- Avaliação da operacionalidade: localização dos botões, tamanho e resolução da tela de gráficos, forma de ajuste, etc.

Após a realização de alguns ajustes, principalmente relacionados ao layout da tela de gráficos, o protótipo do módulo de aquisição de sinais foi validado em laboratório, sendo liberado para o início dos ensaios em campo.

Os primeiros ensaios em campo foram realizados em maio de 2012, quando o software foi colocado em operação nas subestações SE Rosário e SE São Gabriel. Apesar de operar corretamente no que diz respeito à aquisição de sinais, como exemplifica a Figura 4.47, o módulo de aquisição de sinais apresentou instabilidade nos computadores da concessionária, travando após algumas horas de funcionamento.

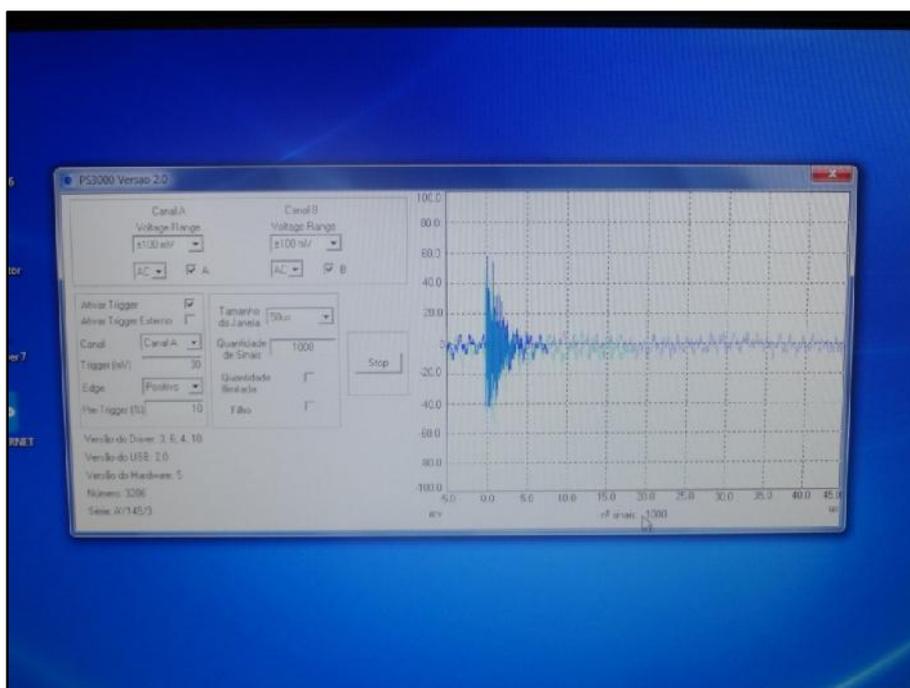


Figura 4.47 - Módulo de aquisição de sinais em operação na SE São Gabriel em maio de 2012.

Este problema foi posteriormente corrigido em laboratório e o software novamente ensaiado em campo em junho de 2013, sendo aprovado definitivamente. Entre os ensaios de 2012 e os ensaios finais realizados em 2013, entretanto, foi decidido que, apesar dos módulos serem independentes, estes devem ser operados a

partir de uma única interface gráfica. Dessa forma, a interface gráfica existente foi adaptada para uma mais complexa. As funcionalidades, entretanto, não foram alteradas.

### 4.3.3 Desenvolvimento do Módulo de Reconhecimento de Padrões

#### 4.3.3.1 Protótipo em Matlab®

Este módulo, onde está concentrada a essência da metodologia proposta, pode ser dividido em três partes principais, de acordo com sua função:

- Parte 1: tratamento de sinais;
- Parte 2: treinamento de redes neurais;
- Parte 3: reconhecimento de sinais.

A Parte 1 contém o algoritmo de compressão de sinais chamado *filtro de porcentagem*, desenvolvido na fase de laboratório (Capelini, 2011). Sua função é transformar os vetores que representam os sinais no domínio do tempo em vetores menores, cujos elementos representam a energia dos sinais em faixas de 1 MHz. A Figura 4.48 exemplifica a aplicação deste algoritmo em um sinal de descarga parcial obtido em laboratório, fazendo uma comparação também com o resultado da aplicação do algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este algoritmo consegue um compromisso ótimo entre a representação do sinal do ponto de vista das RNAs e do tamanho do vetor, o que impacta diretamente no esforço computacional requerido principalmente na fase de treinamento das RNAs. No exemplo da Figura 4.48, o sinal originalmente representado por um vetor de 500 elementos passou a ser representado por um vetor de 50 elementos. O algoritmo desenvolvido em Matlab® está representado no fluxograma da Figura 4.49.

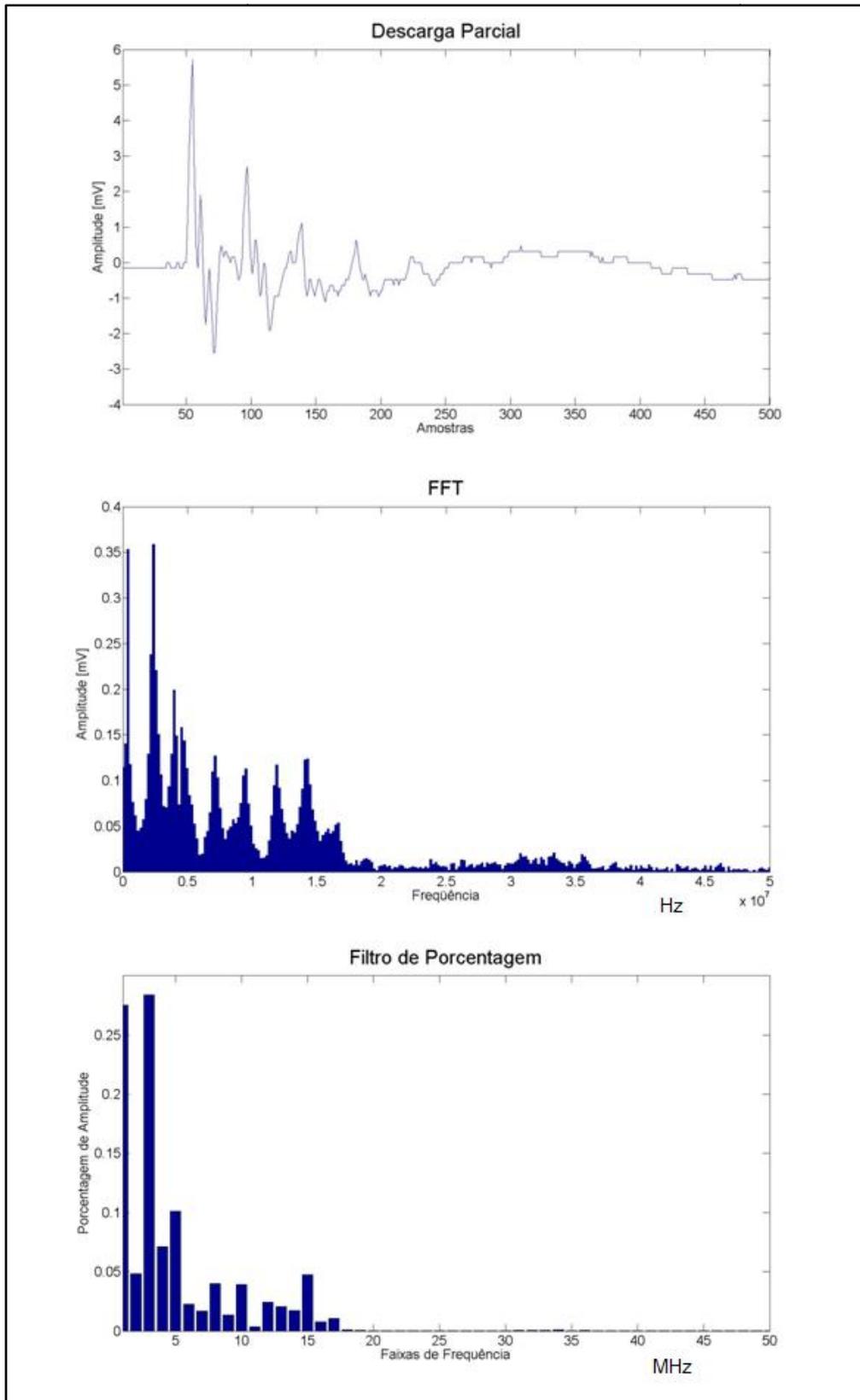


Figura 4.48 - Exemplo de aplicação dos algoritmos FFT e filtro de porcentagem sobre um sinal de descarga parcial. Adaptado de Capelini (2011).

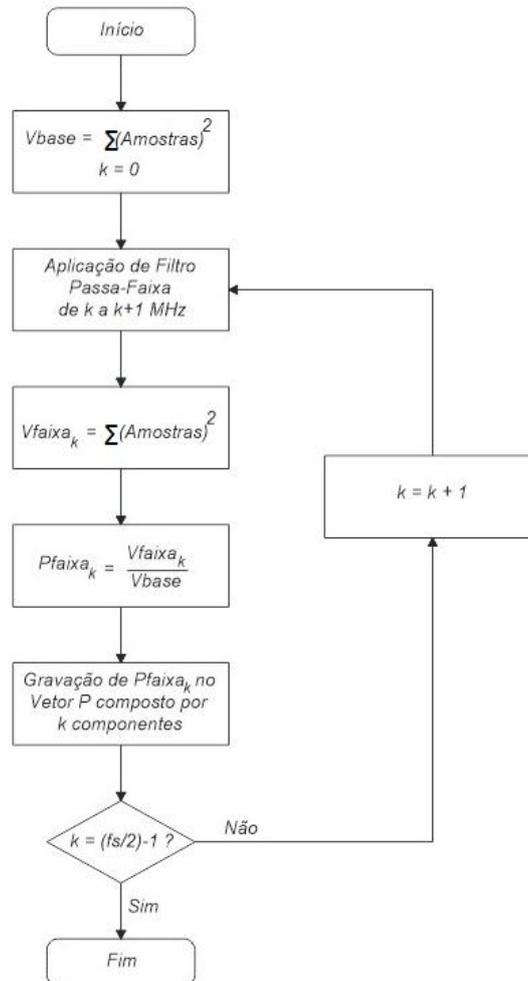


Figura 4.49 - Fluxograma do algoritmo de compressão de sinais *Filtro de Porcentagem*. Adaptado de Capelini (2011).

A Parte 2 consiste no conjunto de algoritmos utilizados para treinar as RNAs com os sinais de descargas parciais. Para isso foi utilizado o Neural Network Toolbox<sup>®</sup> do Matlab<sup>®</sup>, que disponibiliza RNAs específicas para o reconhecimento de padrões (MathWorks, 2009), que possuem as seguintes configurações básicas:

- Tipo de RNA: *feed-forward backpropagation*;
- Número de nós da camada de entrada dependente da quantidade de amostras dos sinais utilizados: *um nó por amostra*;
- Número de neurônios da camada de saída dependente da quantidade de padrões analisados: *um neurônio por padrão*;
- Uma camada oculta;

- Função de ativação do tipo *Tangente Sigmóide* para todos os neurônios;
- Algoritmo de treinamento utilizado: *Gradiente Conjugado Escalonado*;
- Medição de desempenho: *Erro Médio Quadrático*.

São variáveis de acordo com a aplicação:

- Quantidade de neurônios na camada oculta;
- Número de RNAs, uma vez que em alguns casos diversas RNAs são utilizadas em paralelo de forma a minimizar erros de diagnóstico.

Estas configurações de RNAs já haviam sido utilizadas por Capelini (2011), tendo sido obtidos resultados adequados. Configurações similares também foram utilizadas por outros autores, como Mendes (2008). A Figura 4.50 mostra o fluxograma do algoritmo aplicado.

A Parte 3 é formada pelos algoritmos de reconhecimento de padrões e cujo fluxograma é mostrado na Figura 4.51. Nesta etapa os sinais, previamente comprimidos pelo algoritmo filtro de porcentagem, são submetidos às RNAs para reconhecimento, sendo gerado ao final deste processo uma matriz de resposta, conforme o exemplo mostrado na Figura 4.52. Neste exemplo é possível observar nove sinais, identificados pelos números de 1 a 9 no eixo horizontal da tabela (linha "zero"). O eixo vertical da tabela (coluna "zero"), contém os padrões conhecidos pelas redes, identificados pelos números de 1 a 7. Considerando um dado sinal, para cada padrão existe uma resposta numérica da rede neural acerca da similaridade do sinal analisado com o padrão conhecido pela rede neural. Esta resposta numérica é aqui denominada de *grau de similaridade*, podendo variar entre zero e um. Quanto maior este número, maior a similaridade do sinal analisado com o padrão conhecido.



Figura 4.50 - Fluxograma do algoritmo de treinamento.

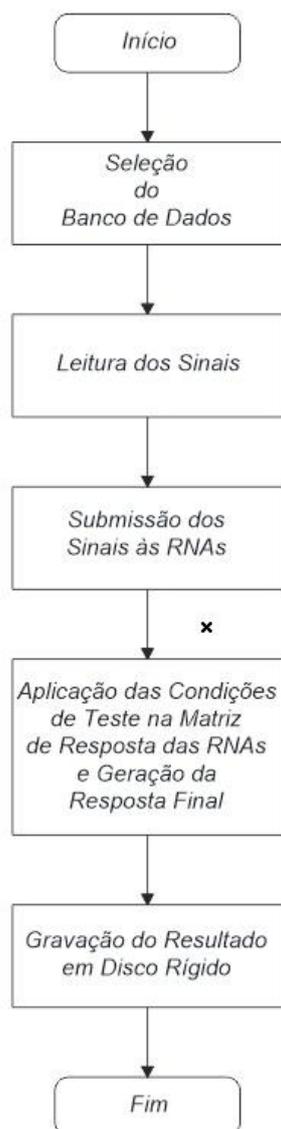


Figura 4.51 - Fluxograma do algoritmo de reconhecimento.

reconhecimento <7x800 double>

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.9861	0.9861	0.9818	0.9148	0.9831	0.9481	0.9666	0.4376	0.9865
2	0.0027	0.0037	0.0022	0.0839	0.0038	7.8069e-04	0.0013	0.2039	0.0036
3	4.1896e-04	5.9413e-04	6.7602e-04	1.1926e-04	6.0672e-04	0.0017	9.7033e-04	6.1229e-05	5.9061e-04
4	2.7142e-09	2.3728e-09	3.0002e-09	3.8506e-06	2.1801e-09	5.7919e-09	9.2858e-09	3.6151e-05	2.0746e-09
5	0.0032	0.0023	0.0021	8.9832e-07	0.0020	8.8439e-04	0.0012	5.7466e-06	0.0026
6	3.2493e-09	9.5348e-10	1.4949e-09	2.2506e-08	5.1153e-10	1.9233e-09	4.1192e-09	4.4375e-07	1.0220e-09
7	0.0062	0.0051	0.0082	5.9584e-05	0.0041	0.0184	0.0110	3.3672e-04	0.0057

Figura 4.52 - Exemplo de matriz de resposta das RNAs.

No caso do sinal 1, por exemplo, o grau de similaridade com o padrão 1 é 0,9861. Para o mesmo sinal, o grau de similaridade com o padrão 2 é 0,0027 e para os demais padrões os graus de similaridade possuem valores muito próximos de zero. Para este caso, o diagnóstico é facilmente obtido, uma vez que o maior grau de similaridade é muito superior aos demais, denotando claramente que o sinal 1 pertence ao padrão 1. No entanto, há casos em que a obtenção do diagnóstico se torna mais complicada, como no caso do sinal 8, onde o maior grau de similaridade (0,4376) apresenta valor baixo. Além disso, este sinal apresenta similaridade não desprezível com o padrão 2 (0,2039), tornando a resposta da rede neural pouco confiável.

Assim, foi necessário a criação de uma variável de ajuste denominada *patamar mínimo de similaridade*, que contribui para a formação de um diagnóstico confiável a partir da eliminação de respostas como a exemplificada pelo caso do sinal 8. O fluxograma mostrado na Figura 4.53 define como a aplicação dessa variável resulta no diagnóstico fornecido pelo software.

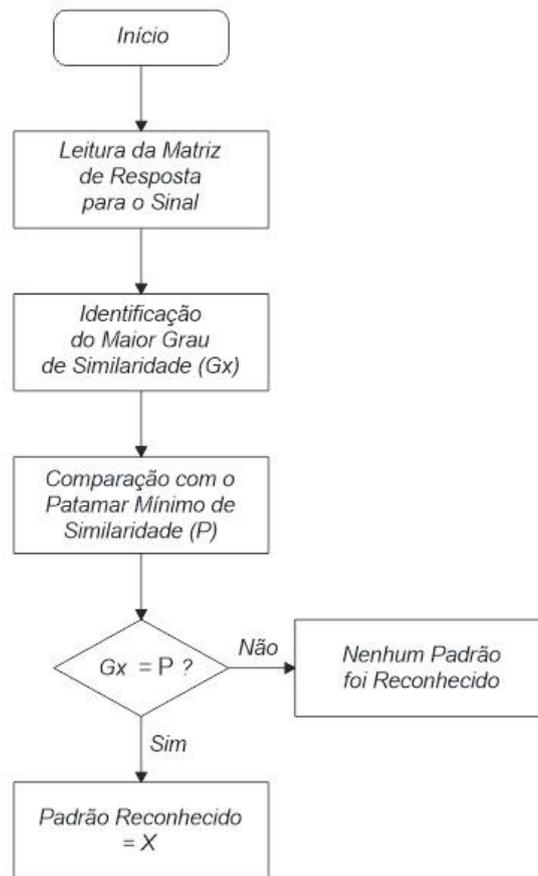


Figura 4.53 - Fluxograma da lógica de análise dos graus de similaridade.

Para a validação deste software protótipo foram realizados ensaios em laboratório, os quais contaram com o mesmo hardware previsto para ser instalado em campo, isto é, placa de aquisição PicoScope® 3206, caixa de aquisição de sinais em sua versão final, DPS e cabos coaxiais RG 213. Como exemplo deste processo de validação, é apresentado a seguir o ensaio mais completo realizado, o qual contemplou todos os pontos de conexão da linha de transmissão artificial.

Para este ensaio, uma cadeia contendo cinco isoladores de porcelana foi utilizada e o dispositivo de simulação de descargas parciais foi instalado e mantido inalterado no isolador mais próximo da fase. A cadeia foi então conectada a cada um dos 48 pontos de conexão da linha de transmissão artificial, sendo coletados dois conjuntos de sinais por ponto: um conjunto para treinamento das RNAs, contendo 800 sinais, e outro conjunto para verificação do funcionamento do software, contendo 100 sinais. Após a coleta, os sinais foram agrupados em um banco de dados e submetidos em seguida à compressão pelo algoritmo filtro de porcentagem, fazendo com que os vetores originais de 405 elementos fossem convertidos em novos vetores contendo 50

elementos. Então, foi realizado o treinamento de quatro RNAs idênticas, contendo 6 neurônios na camada oculta, a partir do banco de dados de treinamento. Em seguida, foram apresentadas às RNAs os sinais para verificação do funcionamento do software, sendo a resposta de cada RNA combinada em uma média aritmética, formando a resposta final. Esta combinação é uma das formas de se amenizar possíveis erros das RNAs, os quais foram observados durante o desenvolvimento em laboratório e em campo. O resultado do ensaio é mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Taxas de acertos (%) obtidas no reconhecimento de sinais dos 48 pontos de conexão (PC).

Ensaio de Validação do Protótipo em Matlab <sup>®</sup>											
PC	%	PC	%	PC	%	PC	%	PC	%	PC	%
1	100	9	96	17	100	25	95	33	100	41	100
2	100	10	96	18	96	26	97	34	100	42	99
3	100	11	93	19	96	27	97	35	100	43	100
4	100	12	95	20	100	28	100	36	100	44	100
5	98	13	100	21	100	29	100	37	97	45	100
6	100	14	100	22	98	30	98	38	97	46	99
7	100	15	99	23	99	31	95	39	97	47	100
8	98	16	100	24	100	32	99	40	98	48	97

Nesta tabela são mostrados os pontos de conexão, que correspondem à distância, em quilômetros, do início da linha de transmissão artificial e também do ponto de leitura, e as taxas de acerto obtidas na fase de reconhecimento de sinais. A taxa de acerto geral foi de 99,84 %. A quantidade de sinais não reconhecidos foi de 0,79 % e a quantidade de sinais reconhecidos de forma errada (*falsos positivos*), isto é, indicados como sendo pertencentes a outro padrão, foi de 0,63 %.

A taxa de acerto pode ser entendida, no contexto geral da metodologia, como a probabilidade da cadeia de isoladores com falhas ser localizada quando esta emite uma descarga parcial externa. Da mesma forma, a porcentagem de falsos positivos pode ser interpretada como a probabilidade do software localizar de forma errada a cadeia de isoladores com falhas.

#### 4.3.3.2 Software Final em Linguagem C

O software desenvolvido em Matlab<sup>®</sup>, discutido no item anterior, atende as aspirações acadêmicas desta tese, porém não é indicado para a instalação no sistema final em campo devido principalmente à:

- Necessidade aquisição de duas licenças de Matlab<sup>®</sup> contemplando diversos *toolboxes*, principalmente o Neural Network Toolbox<sup>®</sup>, tornando o sistema caro demais;
- Grande esforço computacional requerido, principalmente na fase de treinamento das RNAs;
- Grau de automação e qualidade da interface gráfica insuficientes, sendo as partes 1, 2 e 3 executadas separadamente e ainda exigindo ajustes manuais nos parâmetros e montagem dos bancos de dados.

Assim, optou-se pelo desenvolvimento de um software próprio, escrito em linguagem C e baseado em um conjunto livre de bibliotecas de RNAs denominado Fast Artificial Neural Network FANN<sup>®</sup> (Nissen, 2012). A interface gráfica foi criada a partir da biblioteca Qt<sup>®</sup> 5.0 em sua versão livre (Qt, 2012).

O uso da biblioteca FANN<sup>®</sup> permitiu maior flexibilidade na construção das RNAs em relação ao Neural Network Toolbox<sup>®</sup> do Matlab<sup>®</sup>, onde a configuração básica das RNAs era em parte travada pelo *toolbox*. A Figura 4.54 mostra a Tela 1 de configuração da RNA, onde podem ser ajustados diversos parâmetros. Os parâmetros mostrados nesta figura, exceto o número de padrões, foram mantidos fixos durante os ensaios, sendo esta a configuração recomendada.



Figura 4.54 - Tela 1 de configuração das RNAs.

No caso deste software foi utilizada apenas uma RNA, ao contrário do protótipo desenvolvido em Matlab®, pois não foi detectada ocorrência de erros de treinamento ou reconhecimento na frequência antes apresentada.

Uma vez configurada a RNA, uma segunda tela, mostrada na Figura 4.55, permite que se escolha o banco de dados de treinamento. Em seguida, o treinamento é iniciado e pode ser acompanhado por uma janela ("prompt de comando"), como exemplificado pela Figura 4.56.

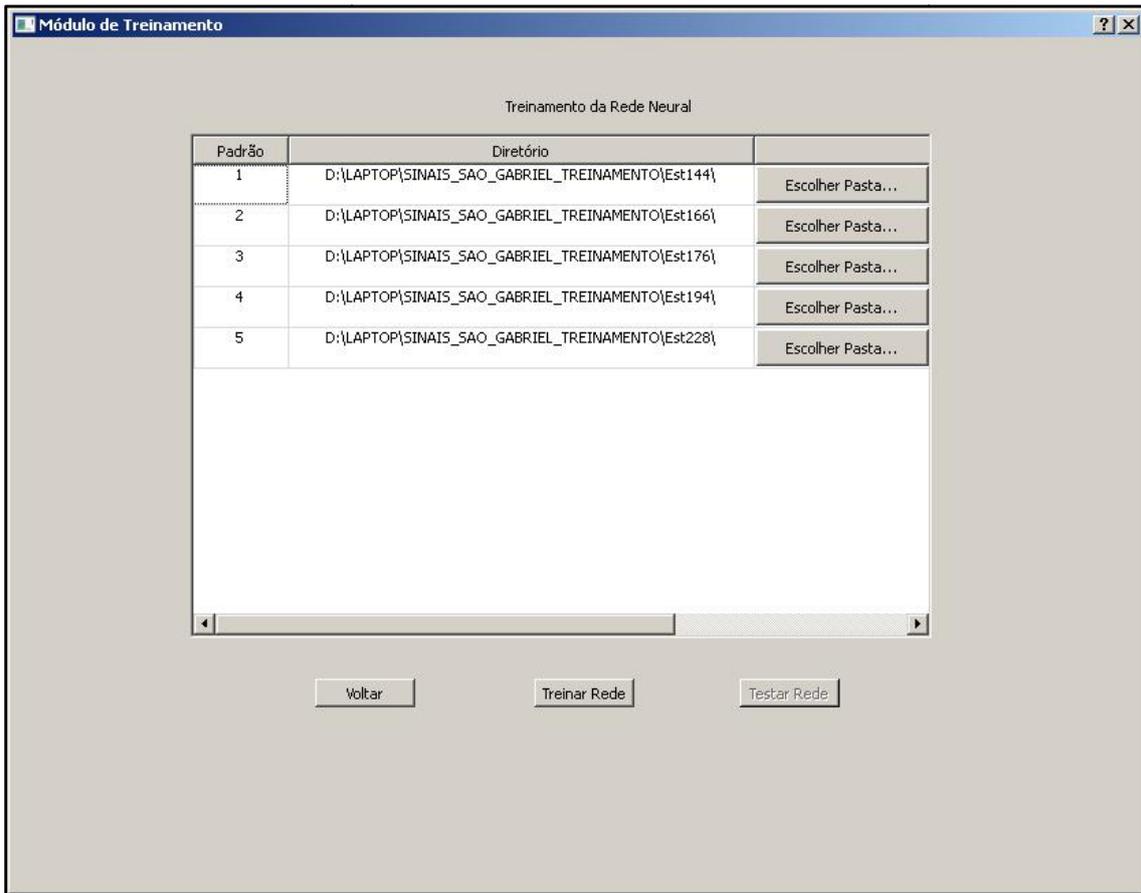


Figura 4.55 - Tela 2 de configuração das RNAs.

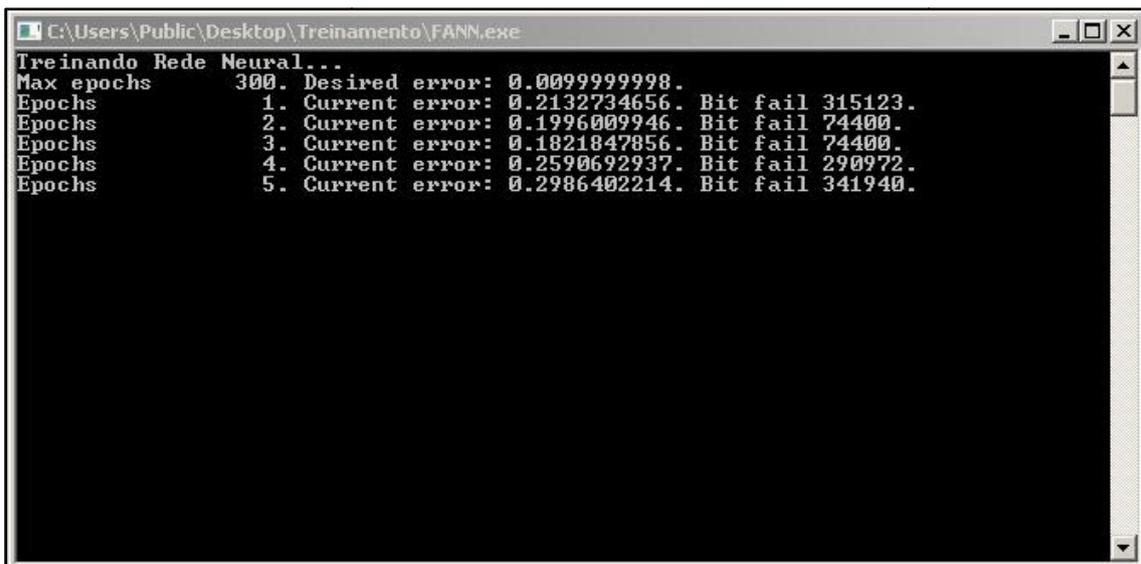


Figura 4.56 - Tela de acompanhamento do treinamento.

Após o treinamento da RNA, o módulo de reconhecimento está apto a ser colocado em operação. Para isso, deve-se acessar a tela principal de operação do software, mostrada na Figura 4.57.

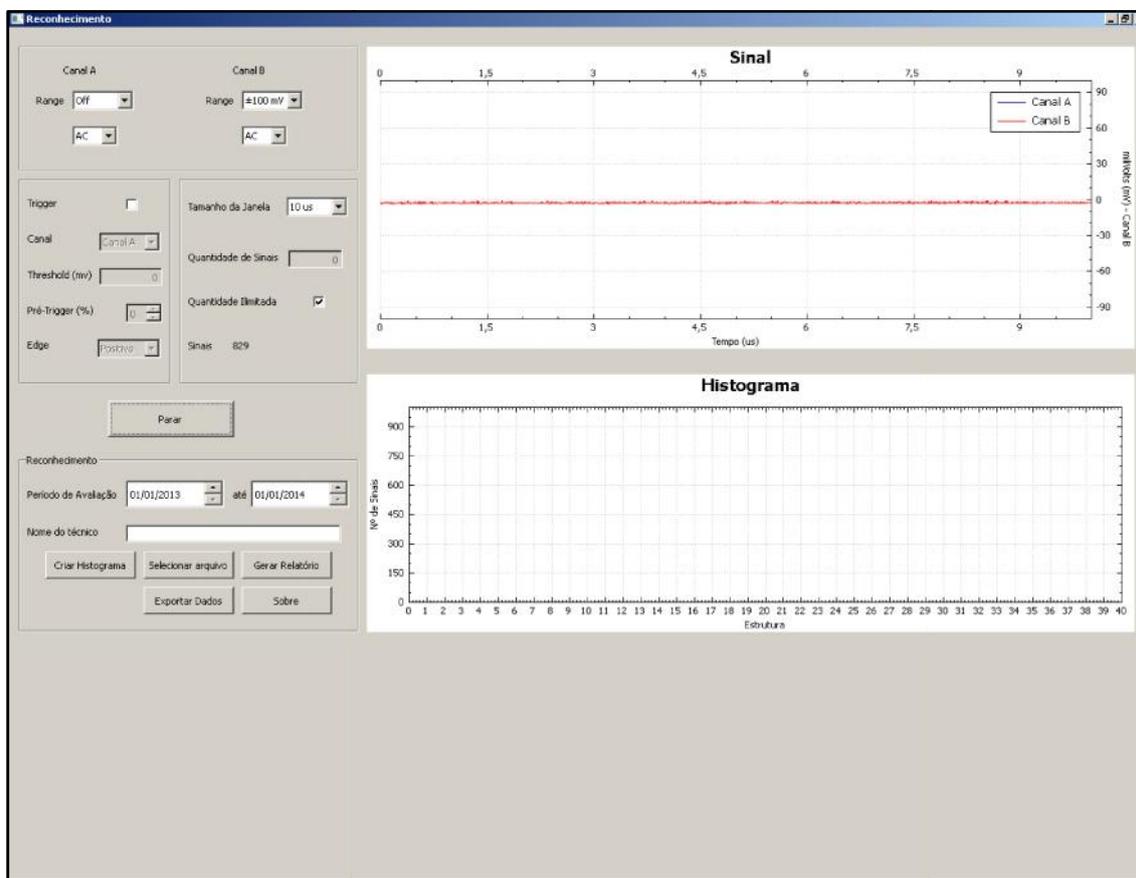


Figura 4.57 - Tela principal de operação do software - módulo de aquisição em funcionamento.

A tela principal é composta pelos módulos de aquisição de sinais e de reconhecimento de padrões, denominado módulo de localização no caso deste software. Diferentemente do protótipo desenvolvido em Matlab®, o módulo de localização fornece um diagnóstico em forma de histograma, tanto na tela de operações como em um relatório gerado em formato PDF, o qual organiza e enumera os casos considerados mais críticos. O histograma contém em seu eixo horizontal as estruturas (torres) cadastradas da linha de transmissão. Para cada estrutura, as barras verticais representam a quantidade de sinais de descargas parciais reconhecidos pelo sistema. No relatório em PDF, além do próprio histograma, é gerada uma lista das estruturas com maior quantidade de sinais reconhecidos, as quais podem ser consideradas as mais críticas.

Os módulos de aquisição e localização não funcionam simultaneamente. O módulo de aquisição foi concebido para operar de modo contínuo, mas para que o

módulo de localização seja operado, este deve ser interrompido. O módulo de localização permite que se escolha partes específicas do banco de dados, em intervalos de datas, para serem analisadas. A Figura 4.57 exemplifica o funcionamento do módulo de aquisição, enquanto que a Figura 4.58 exemplifica o funcionamento do módulo de localização.

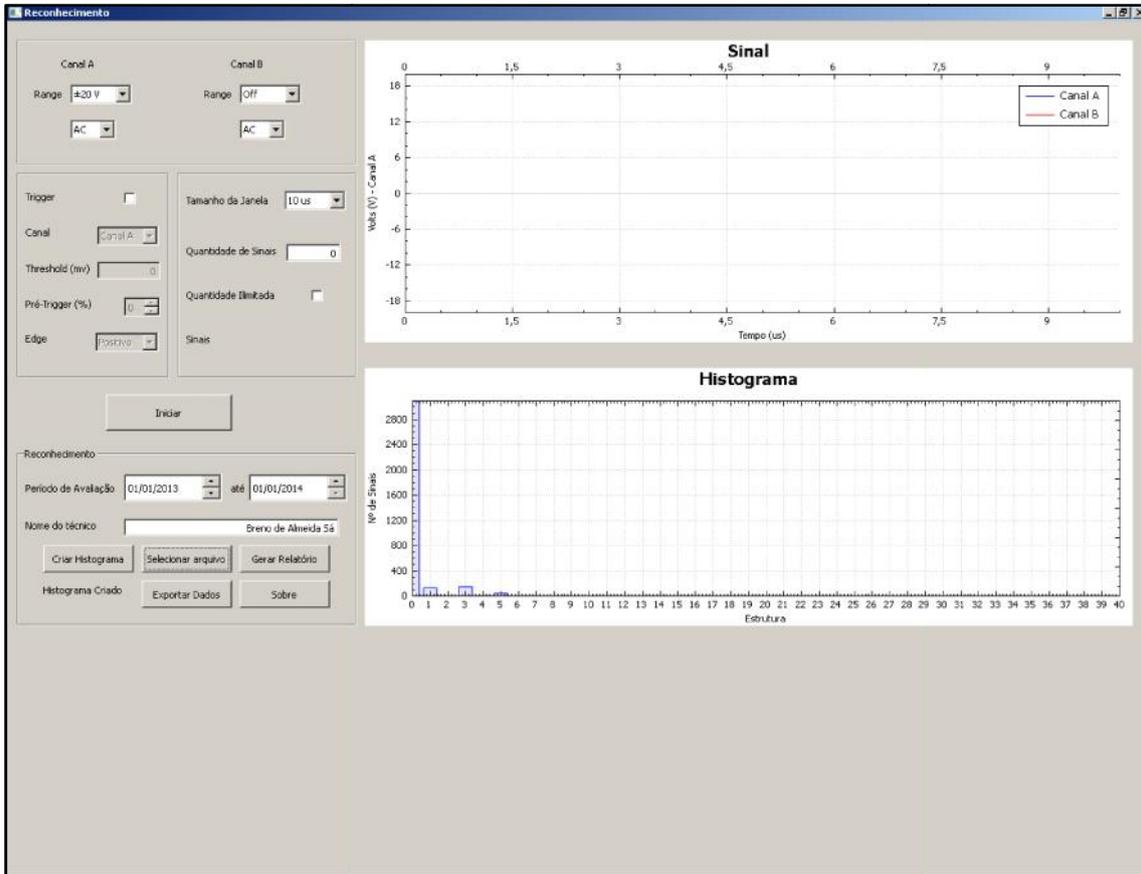


Figura 4.58 - Tela principal de operação do software - módulo de localização em funcionamento.

Capítulo 5

---

Ensaio

## 5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais ensaios realizados em laboratório e em campo durante o desenvolvimento da metodologia, sendo suas configurações e resultados analisados. Para a realização desses ensaios foram utilizados os equipamentos, programas e a infraestrutura discutidos anteriormente, em seus diversos estágios de desenvolvimento.

## 5.2 Realização dos Ensaio para Coleta dos Sinais - Laboratório e Campo

Para a realização dos ensaios com os programas desenvolvidos, discutidos no item 5.3, foram coletados sinais de descargas parciais em campo e em laboratório. Assim, este item descreve brevemente os procedimentos adotados para a coleta dos sinais.

### 5.2.1 Coleta de Sinais em Laboratório

Os ensaios realizados em laboratório para a coleta de sinais utilizaram a infraestrutura mostrada no Capítulo 4, cujo sistema de aquisição de sinais é idêntico ao de campo, exceto pelas proteções mecânicas aplicadas.

O procedimento adotado a para coleta dos sinais foi o seguinte:

- a. Especificação da cadeia de isoladores a ser utilizada: quantidade e tipo dos isoladores;
- b. Definição de quais isoladores receberiam, por vez, o dispositivo de simulação de descargas parciais;
- c. Definição dos pontos de conexão da linha de transmissão artificial para conexão da cadeia de isoladores;
- d. Conferência visual do sistema de ensaios - integridade dos componentes, estado das conexões, etc;
- e. Verificação dos ruídos presentes no sistema, a partir da energização da linha de transmissão artificial sem a cadeia de isoladores;
- f. Configuração e verificação do funcionamento do software de aquisição de sinais;

- g. Conexão da cadeia de isoladores no ponto de conexão de interesse;
- h. Energização do sistema de ensaios e coleta dos sinais em quantidade pré-definida;
- i. Conferência dos sinais gravados em disco rígido;
- j. Desenergização do sistema;
- k. Repetição dos itens (g) ao (j) para cada isolador e ponto de conexão de interesse.

### 5.2.2 Coleta de Sinais em Campo

A realização dos ensaios em campo para a coleta de sinais foi consideravelmente mais complexa e trabalhosa quando comparada à realização dos ensaios em laboratório, tendo envolvido as equipes do LAT-EFEI e da AES Sul e mobilizado uma grande quantidade de recursos humanos, equipamentos e ferramentas.

A equipe do LAT-EFEI foi composta por três pessoas, estando alocadas nas seguintes funções durante a coleta dos sinais:

- Operador 1: responsável por operar e supervisionar o sistema de aquisição instalado na SE Rosário;
- Operador 2: responsável por operar e supervisionar o sistema de aquisição instalado na SE São Gabriel;
- Instrutor: responsável por acompanhar a equipe da AES Sul ao longo da linha de transmissão, passando as instruções de realização dos ensaios para ambas as equipes.

Já a equipe da AES Sul foi composta por uma quantidade maior de pessoas, as quais assumiram as seguintes funções:

- Supervisor: responsável por gerenciar todo o processo de realização dos ensaios, acompanhando ambas as equipes ao longo da linha de transmissão;
- Equipe de operação e manutenção de subestações: responsável por prover apoio geral na realização dos ensaios. É a mesma equipe que

deu suporte na instalação de toda a infraestrutura discutida no Capítulo 4, composta por quatro pessoas;

- Equipe de manutenção de linha viva: responsável por aplicar o simulador de descargas parciais nas cadeias de isoladores ao longo da linha de transmissão, composta por quatro pessoas.

A comunicação entre as equipes alocadas nas subestações e a equipe destacada para a realização dos ensaios ao longo da linha de transmissão foi realizada com o auxílio de telefones celulares.

O procedimento adotado para a coleta dos sinais foi o seguinte:

*Procedimento Preparatório:*

- a. Definição das estruturas cujas cadeias de isoladores receberiam o dispositivo de simulação de descargas parciais (garfo metálico);
- b. Preparação da estrutura do banco de dados nos computadores instalados em ambas as subestações;
- c. Checagem do funcionamento do sistema de aquisição de sinais;
- d. Verificação dos ruídos contidos na linha de transmissão - para que o ensaio seja realizado, não podem estar presentes durante a aquisição de sinais ruídos de características semelhantes às aquelas apresentadas pelas descargas parciais em questão;
- e. Verificação do sistema de comunicação entre as equipes;
- f. Deslocamento da equipe de manutenção de linha viva, juntamente com o supervisor (AES Sul) e o instrutor (LAT-EFEI) para a linha de transmissão.

*Procedimento de Ensaio (por estrutura):*

- a. Verificação visual da estrutura e das cadeias de isoladores;
- b. Registro fotográfico e descritivo de cada cadeia de isolador;
- c. Aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais em cada um dos isoladores selecionados, informando os operadores do sistema de aquisição de sinais sobre cada ação realizada. Estes, então,

realizam a gravação dos sinais no local pré-definido no banco de dados. Em seguida, é realizada uma conferência rápida da quantidade e integridade dos sinais gravados.

A Figura 5.1 mostra o dispositivo de simulação de descargas parciais sendo aplicado em uma cadeia de isoladores da Estrutura 001, localizada ao lado da SE Rosário.



Figura 5.1 - Aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais na Estrutura 001 (área urbana).

Na Figura 5.2 pode ser observado em detalhes o dispositivo de simulação de descargas parciais, que é visualizado através de uma câmera de coroa.

A Estrutura 001, assim como as demais estruturas próximas das subestações, são diferentes da maioria das estruturas encontradas ao longo da linha de transmissão. Mais altas, estas estruturas metálicas, localizadas em área urbana, requerem um tempo maior para a realização dos ensaios. A maioria das estruturas, entretanto, é de madeira e possui dimensões menores, facilitando o procedimento de aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais. A Figura 5.3 mostra a realização de ensaios em uma das estruturas de madeira. No caso específico desta estrutura, houve a necessidade de se utilizar um traje de proteção contra abelhas, comuns na zona rural.

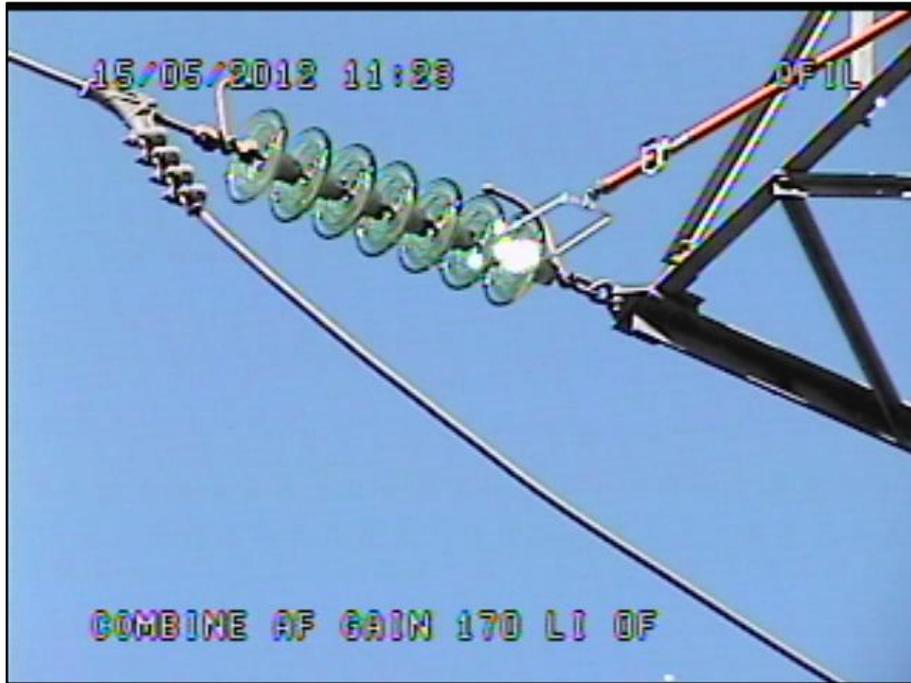


Figura 5.2 - Dispositivo de simulação de descargas parciais visualizado por uma câmera de corona durante sua aplicação na Estrutura 001.

Durante a execução do projeto, foram realizadas duas etapas de ensaios: uma em maio de 2012 e outra em junho de 2013. Cada etapa durou aproximadamente uma semana e contemplou a coleta de sinais de dez estruturas previamente selecionadas. Durante o período de ensaios, além da coleta de sinais, foram realizadas outras atividades, sendo as principais:

- Instalação, atualização e validação do sistema de aquisição de sinais;
- Instalação, atualização e validação do software de localização de cadeias de isoladores com falhas;
- Ensaio de operação remota do sistema a partir do LAT-EFEI (Itajubá).



Figura 5.3 - Aplicação do dispositivo de simulação de descargas parciais em uma estrutura localizada na zona rural.

### 5.3 Ensaio com Sinais Obtidos dos Ensaio de Campo e de Laboratório

A partir dos sinais coletados nos ensaios de campo e de laboratório, foram realizados diversos ensaios com os programas para reconhecimento de padrões desenvolvidos em Matlab<sup>®</sup>. O objetivo destes ensaios, discutidos a seguir, foi avaliar o potencial dos programas desenvolvidos e do próprio método proposto, assim como permitir a análise de alguns parâmetros de influência sobre o desempenho dos programas. Este parâmetros são:

- Qualidade dos sinais digitalizados;
- Quantidade de sinais utilizados para treinamento das RNAs;
- Quantidade de neurônios na camada oculta das RNAs;
- Aplicação de algoritmos de compressão de sinais;
- Quantidade de padrões utilizados no treinamento das RNAs;
- Constituição dos padrões;
- Patamar mínimo de similaridade;

- Capacidade computacional requerida.

Cada um desses parâmetros é devidamente explicado e discutido a medida que os ensaios são apresentados.

### 5.3.2 Ensaio 1

Este foi o primeiro ensaio realizado com os sinais coletados em campo. Seu objetivo foi verificar o comportamento do sistema, até então avaliado apenas em laboratório, quando treinado com sinais de campo.

Foram utilizados sinais coletados das seguintes estruturas da LT Rosário x São Gabriel:

- Estrutura 001;
- Estrutura 017;
- Estrutura 051;
- Estrutura 086;
- Estrutura 106;
- Estrutura 144;
- Estrutura 166;
- Estrutura 176.

Os sinais foram obtidos de cadeias de isoladores instaladas na Fase A destas estruturas, sendo o dispositivo de simulação de descargas parciais aplicado sempre no isolador 1 (mais próximo da fase). A coleta dos sinais foi também realizada pela Fase A, na SE Rosário, próxima da Estrutura 001. Nos demais ensaios aqui discutidos, os sinais também são lidos a partir dessa subestação.

As configurações definidas no software de aquisição de sinais resultaram na representação de cada sinal por um vetor de 2000 elementos, o que corresponde a uma janela de aquisição 20  $\mu$ s a uma taxa de amostragem de 100 MS/s. Esta taxa foi adotada para facilitar a comparação com os sinais obtidos anteriormente nos ensaios de laboratório com a antiga placa de aquisição. Após a coleta dos sinais, não foram aplicados algoritmos de filtragem ou compressão, sendo estes utilizados em seu formato original durante todo o ensaio.

Cada estrutura foi definida como um padrão a ser conhecido pela RNA, e o banco de dados montado para seu treinamento e avaliação de desempenho foi elaborado da seguinte forma:

- Banco de dados para treinamento: constituído de 1000 sinais por padrão;
- Banco de dados para avaliação de desempenho: constituído de 200 sinais não utilizados no treinamento da RNA.

O software de reconhecimento de padrões foi configurado da seguinte forma:

- Emprego de uma única RNA;
- Quantidade de neurônios na camada oculta: 25;
- Patamar mínimo de similaridade: 0,5.

Não foi realizada análise estatística do banco de dados para este e para os demais ensaios. Após o treinamento da RNA, o desempenho do sistema foi avaliado mediante a submissão dos 200 sinais conhecidos de cada estrutura ao módulo de reconhecimento de padrões. Os resultados desta avaliação são mostrados na Tabela 5.1 e na Figura 5.4.

Tabela 5.1 - Resumo da avaliação de desempenho do sistema.

	TA [%]	NR [%]	FP [%]
Est 001	98,5	1,5	0
Est 017	100	0	0
Est 051	98	1,5	0,5
Est 086	98,5	0,5	1
Est 106	71	15	14
Est 144	84	11	5
Est 166	51,5	11,5	37
Est 176	72,5	9,5	18

Na Tabela 5.1 a primeira coluna identifica os padrões submetidos ao reconhecimento, nomeados pelas suas respectivas estruturas. A primeira linha, por sua vez, identifica os seguintes parâmetros:

- Taxa de acerto (TA): é a porcentagem de sinais que foram corretamente reconhecidos pelo sistema, isto é, o sistema apontou sua origem na linha de transmissão corretamente;

- Taxa de não-reconhecimento (NR): é a porcentagem de sinais que não foram reconhecidos pelo sistema como sendo provenientes de algum dos padrões conhecidos;
- Taxa de falso-positivo (FP): é a porcentagem de sinais que foram reconhecidos como pertencentes à outros padrões que não o esperado.

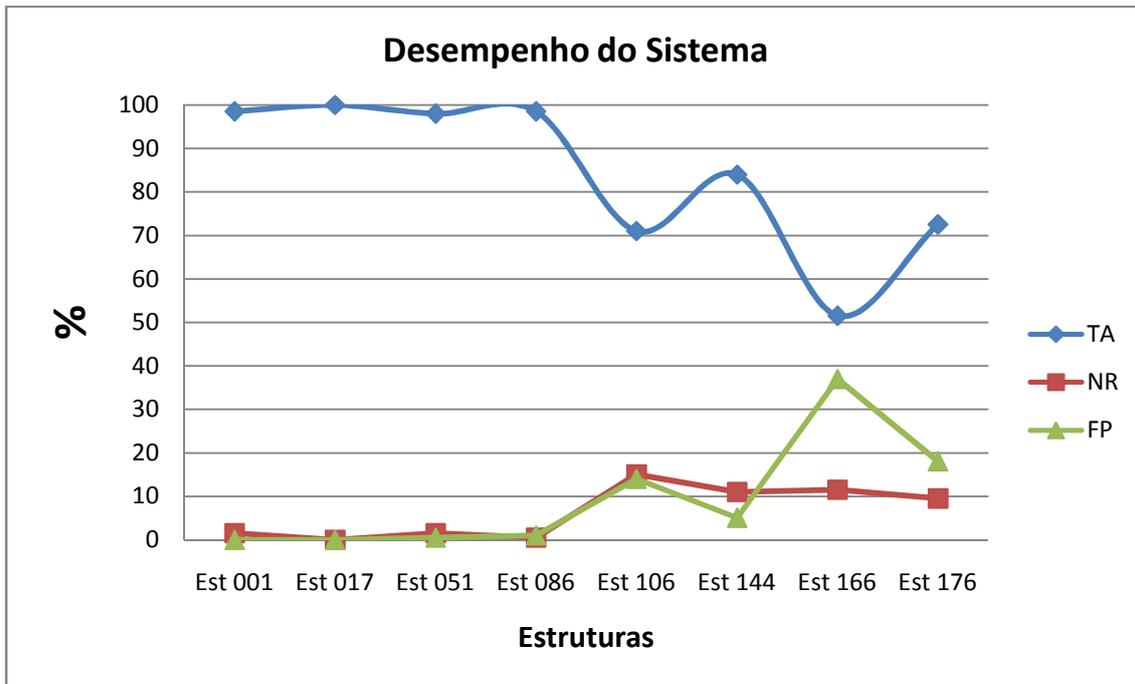


Figura 5.4 - Desempenho do sistema por estrutura (padrão conhecido).

Os valores médios (globais) de desempenho são:

- Taxa de acerto: 84,25 %;
- Taxa de não-reconhecimento: 6,31 %;
- Taxa de falso-positivo: 9,44 %.

A capacidade e o esforço computacional requeridos pelo sistema podem ser representados pelos seguintes parâmetros:

- Tamanho de cada sinal em disco rígido: 44,6 kB;
- Tamanho do arquivo da RNA treinada em disco rígido: 15,28 MB;
- Tempo requerido para o treinamento da RNA: 550,36 s;
- Tempo requerido para a etapa de reconhecimento: 46,63 s.

Com estes resultados, este ensaio mostrou que se o sistema for treinado com os vetores originais que representam os sinais, o esforço computacional requerido pode inviabilizar casos em que se utiliza uma quantidade maior de padrões. Assim, conclui-se que é necessário utilizar, como vetores de entrada das RNAs, outras formas de representação de sinal com a finalidade de reduzir o esforço computacional.

### 5.3.3 Ensaio 2

De forma a avaliar a influência da aplicação de algoritmos de compressão no desempenho do sistema, foi aplicado ao banco de dados utilizado no Ensaio 1 o algoritmo de compressão filtro de porcentagem. Dessa forma, cada sinal foi representado por um vetor de 50 elementos, conforme já discutido anteriormente.

O ensaio foi realizado mantendo-se as configurações utilizadas no Ensaio 1, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.2 e na Figura 5.5.

Tabela 5.2 - Resumo da avaliação de desempenho do sistema.

	TA [%]	NR [%]	FP [%]
Est 001	98	0	2
Est 017	100	0	0
Est 051	99	0	1
Est 086	98	0,5	1,5
Est 106	81,5	10,5	8
Est 144	73	20,5	6,5
Est 166	52	30,5	17,5
Est 176	73	12,5	14,5

Os valores médios de desempenho são:

- Taxa de acerto: 84,31 %;
- Taxa de não-reconhecimento: 9,31 %;
- Taxa de falso-positivo: 6,38 %.

A capacidade e o esforço computacional requeridos pelo sistema podem ser representados pelos seguintes parâmetros:

- Tamanho de cada sinal em disco rígido: 1 kB;
- Tamanho do arquivo da RNA treinada em disco rígido: 2,98 MB;
- Tempo requerido para o treinamento da RNA: 103,06 s;

- Tempo requerido para a etapa de reconhecimento: 12,62 s.

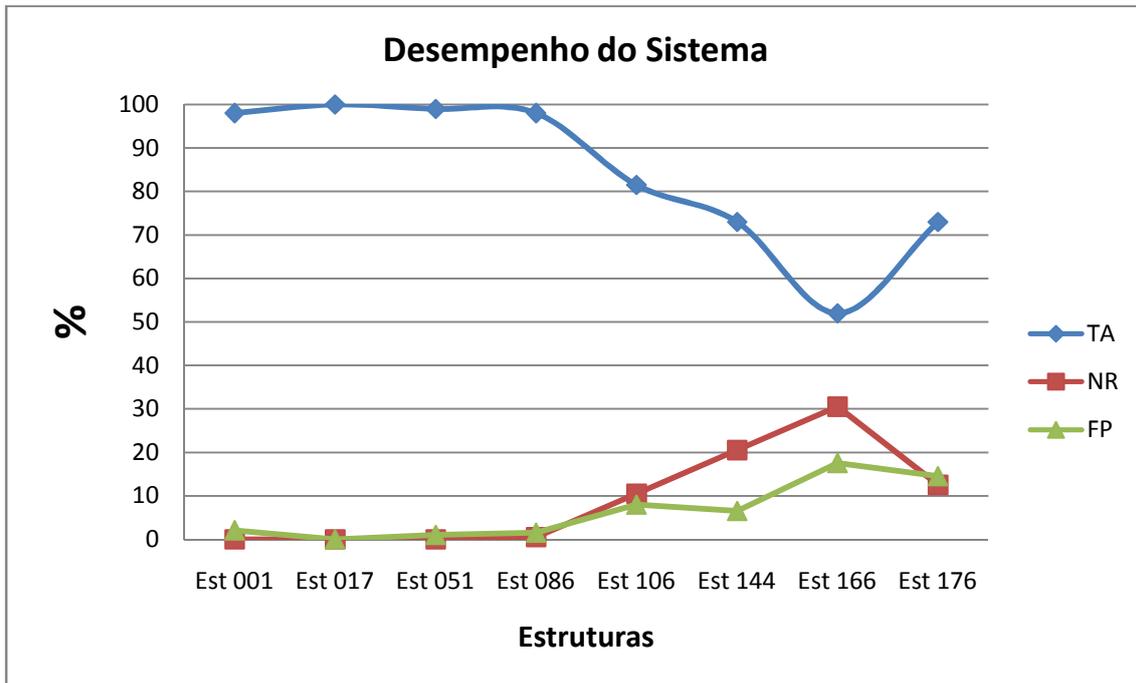


Figura 5.5 - Desempenho do sistema por estrutura (padrão conhecido).

As diferenças obtidas com a aplicação do algoritmo de compressão de sinais podem ser visualizadas na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 - Comparação entre os desempenhos dos Ensaio 1 e 2.

	Ensaio 1			Ensaio 2		
	TA [%]	NR [%]	FP [%]	TA [%]	NR [%]	FP [%]
Est 001	98,5	1,5	0	98	0	2
Est 017	100	0	0	100	0	0
Est 051	98	1,5	0,5	99	0	1
Est 086	98,5	0,5	1	98	0,5	1,5
Est 106	71	15	14	81,5	10,5	8
Est 144	84	11	5	73	20,5	6,5
Est 166	51,5	11,5	37	52	30,5	17,5
Est 176	72,5	9,5	18	73	12,5	14,5
Média	<b>84,25</b>	<b>6,31</b>	<b>9,44</b>	<b>84,31</b>	<b>9,31</b>	<b>6,38</b>

Tabela 5.4 - Comparação entre esforço computacional e capacidade de armazenamento em disco dos Ensaios 1 e 2.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1 / Ensaio 2 [%]
Tempo de Treinamento [s]	550,36	103,06	534,02
Tempo de Reconhecimento [s]	46,63	12,62	369,49
Tamanho do sinal [kB]	44,6	1	4460,00
Tamanho da RNA [MB]	15,28	2,98	512,75

Da Tabela 5.3 pode-se concluir que praticamente não houve variação de desempenho do sistema quando se trata da taxa de acerto, sendo desprezível a diferença verificada. Entretanto, com a aplicação do algoritmo filtro de porcentagem houve um aumento da taxa de não-reconhecimento de 6,31 % para 9,31 %, isto é, a taxa de não-reconhecimento obtida com sinais não-comprimidos foi 32,21 % menor que a obtida com sinais comprimidos. Também foi notada alteração significativa na taxa de falso-positivo, de 9,44 % para 6,38 %, ou seja, a taxa apresentada no Ensaio 1 é 48,04 % maior. Assim, em resumo, quando comparados estes dois ensaios, a aplicação do algoritmo filtro de porcentagem resultou em uma piora da taxa de não-reconhecimento e uma melhora na taxa de falso-positivo.

Do ponto de vista do esforço computacional e capacidade de armazenamento em disco requeridos, os resultados mostrados na Tabela 5.4 denotam consideráveis ganhos de desempenho quando se aplica o algoritmo de compressão de sinais. Estes ganhos adquirem importância maior ainda quando se leva em conta que o número de padrões utilizados para o treinamento da RNA pode aumentar muito ao se considerar a linha de transmissão por completo.

Dessa forma, todos os ensaios a partir deste ponto foram realizados com sinais comprimidos com o uso do algoritmo filtro de porcentagem.

### 5.3.4 Ensaio 3

Os dois ensaios mostrados anteriormente foram realizados com RNAs formadas por uma camada oculta contendo 25 neurônios. Este número de neurônios foi utilizado devido à experiência de ajuste das RNAs adquirida ao longo do desenvolvimento desta tese, de forma empírica. Os ensaios realizados mostraram que a quantidade de neurônios da camada oculta pode influenciar consideravelmente o desempenho do sistema, sendo um importante parâmetro de ajuste.

Assim, de forma a se verificar como a quantidade de neurônios influencia o desempenho do sistema, foi realizado um conjunto de ensaios, chamado de Ensaio 3,

onde a quantidade de neurônios da camada oculta foi variada de 5 a 95, com passos de 5. Fora a quantidade de neurônios, as configurações do sistema são exatamente as mesmas utilizadas no Ensaio 2.

A Tabela 5.5 mostra os valores médios das taxas de acerto, não-reconhecimento e falso-positivo em função da quantidade de neurônios existentes na camada oculta da RNA, enquanto que o gráfico da Figura 5.6 mostra os tempos de processamento das fases de treinamento da RNA e de reconhecimento de sinais também em função da quantidade de neurônios.

Tabela 5.5 - Valores médios das taxas de acerto, não-reconhecimento e falso-positivo em função da variação da quantidade de neurônios na camada oculta.

Neurônios	Valores Médios [%]		
	TA	NR	FP
5	56,13	39,69	4,19
10	68,38	25,13	6,50
15	<b>82,31</b>	<b>9,69</b>	<b>8,00</b>
20	<b>85,38</b>	<b>9,63</b>	<b>5,00</b>
25	<b>84,31</b>	<b>9,31</b>	<b>6,38</b>
30	<b>85,25</b>	<b>8,81</b>	<b>5,94</b>
35	56,63	36,06	7,31
40	66,38	27,38	6,25
45	60,63	34,75	4,63
50	<b>81,44</b>	<b>12,56</b>	<b>6,00</b>
55	<b>83,06</b>	<b>10,94</b>	<b>6,00</b>
60	<b>81,50</b>	<b>10,94</b>	<b>7,56</b>
65	60,50	34,88	4,63
70	66,50	30,00	3,50
75	63,13	33,56	3,31
80	52,56	42,69	4,75
85	73,56	21,88	4,56
90	49,00	46,50	4,50
95	61,88	34,31	3,81

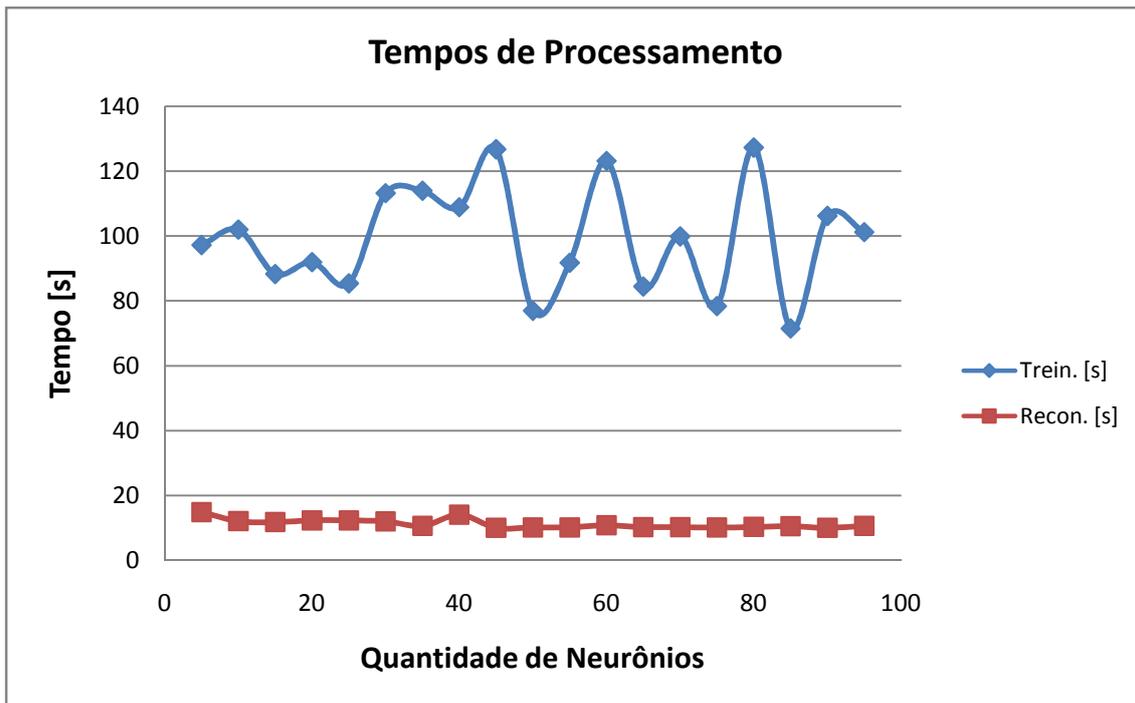


Figura 5.6 - Tempos de processamento das etapas de treinamento e de reconhecimento em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

Na Tabela 5.5 é possível observar que o melhor resultado médio foi obtido com 20 neurônios na camada oculta, levando em consideração a taxa de acerto como fator principal. Para esta configuração, o sistema obteve taxa de acerto de 85,38 %, taxa de não-reconhecimento de 9,63 % e taxa de falso-positivo de 5,00 %. Outras configurações também apresentaram bons resultados, utilizando as seguintes quantidades de neurônios na camada oculta: 15, 25, 30, 50, 55 e 60. Para as demais, entretanto, a queda na taxa de acertos foi acentuada. As configurações que apresentaram melhores resultados também foram as que apresentaram menores tempo de treinamento da RNA de modo geral, como mostra o gráfico da Figura 5.6, indicando maior rapidez na convergência dos resultados. Já os tempos gastos nas etapas de reconhecimento de sinais não apresentaram diferenças significativas.

O desempenho do sistema por estrutura pode ser observado da Figura 5.7 à Figura 5.14.

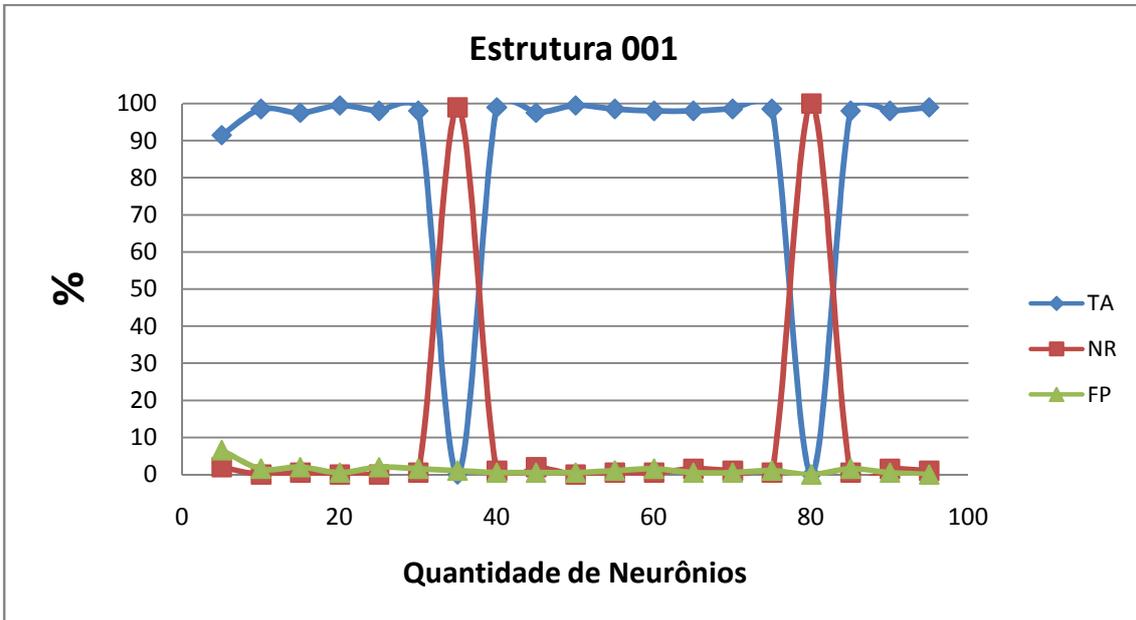


Figura 5.7 - Desempenho do sistema para a Estrutura 001 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

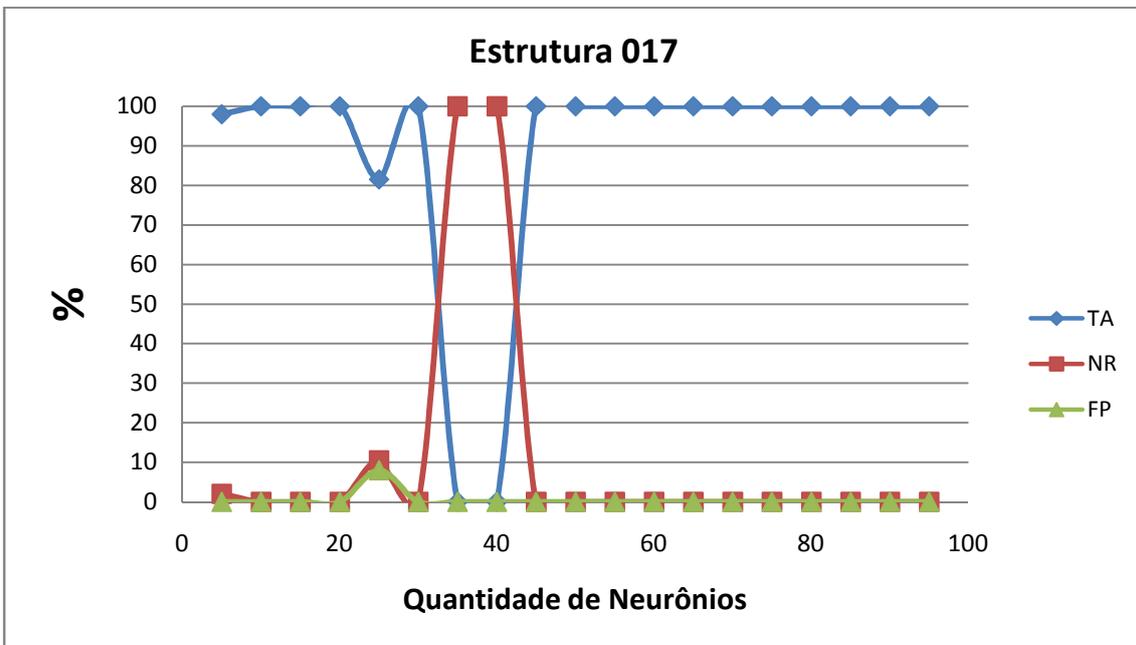


Figura 5.8 - Desempenho do sistema para a Estrutura 017 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

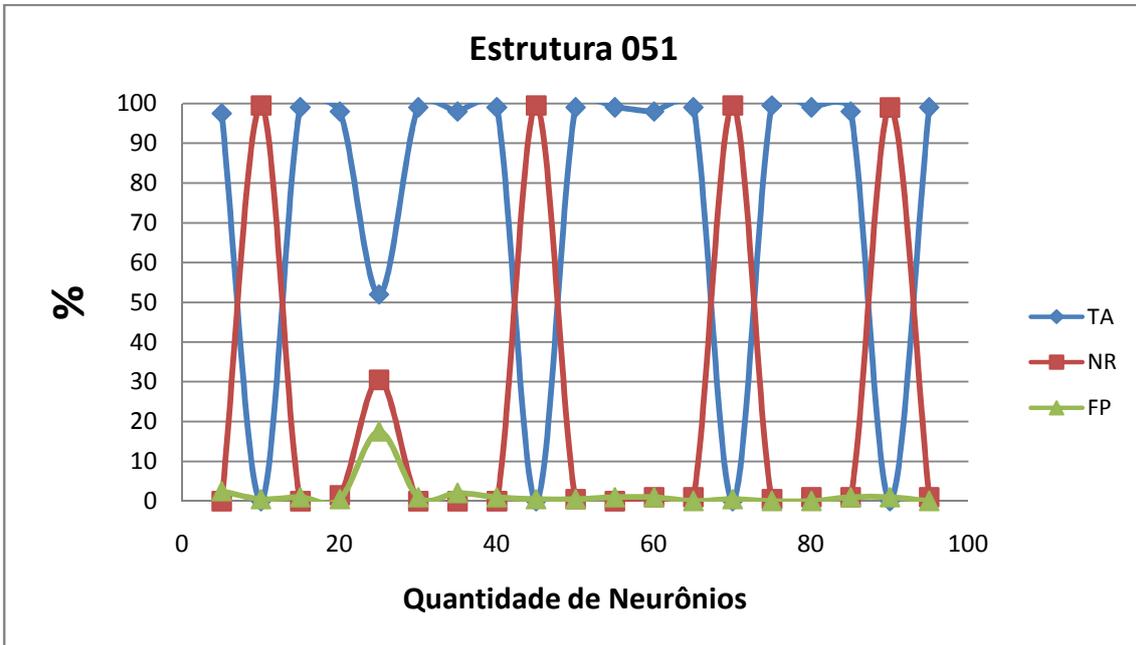


Figura 5.9 - Desempenho do sistema para a Estrutura 051 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

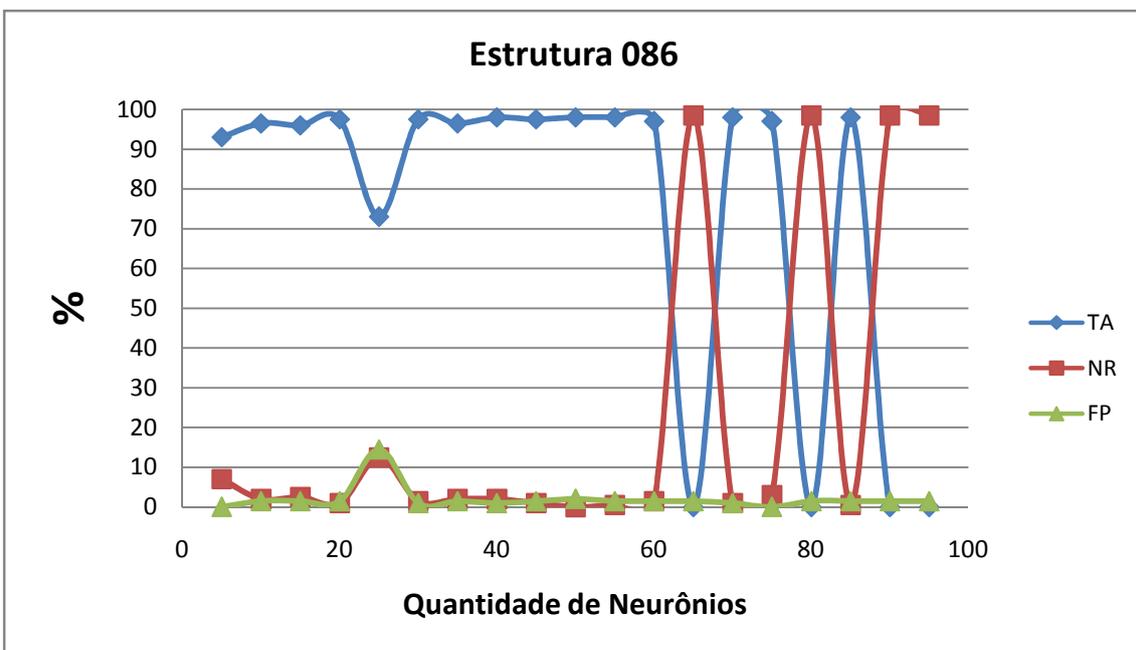


Figura 5.10 - Desempenho do sistema para a Estrutura 086 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

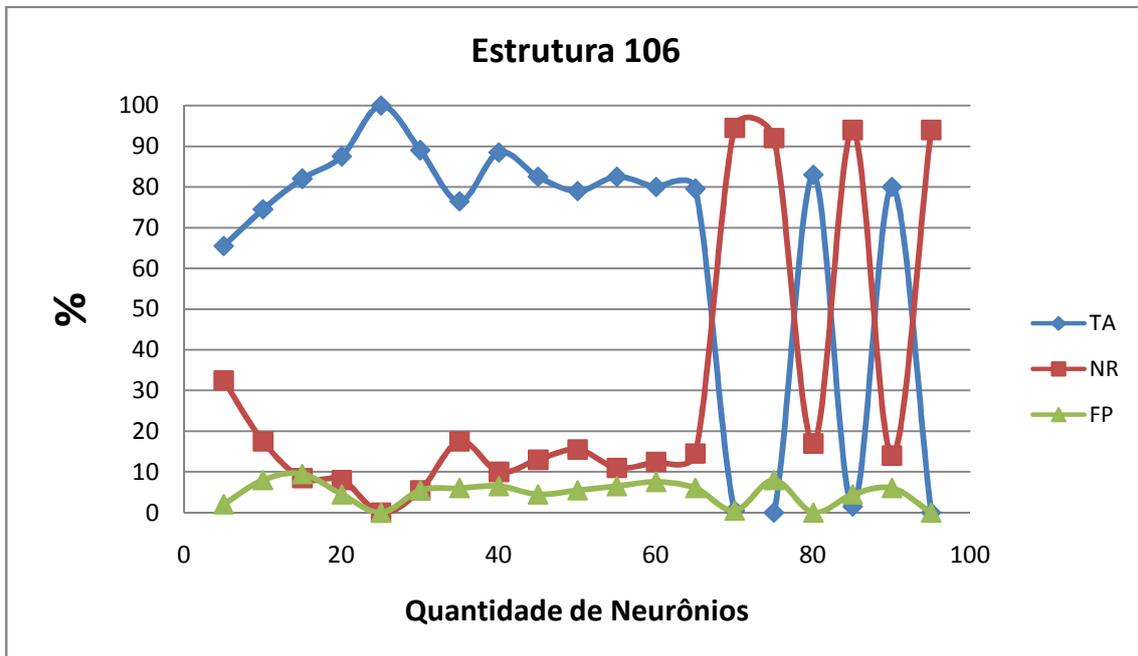


Figura 5.11 - Desempenho do sistema para a Estrutura 106 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

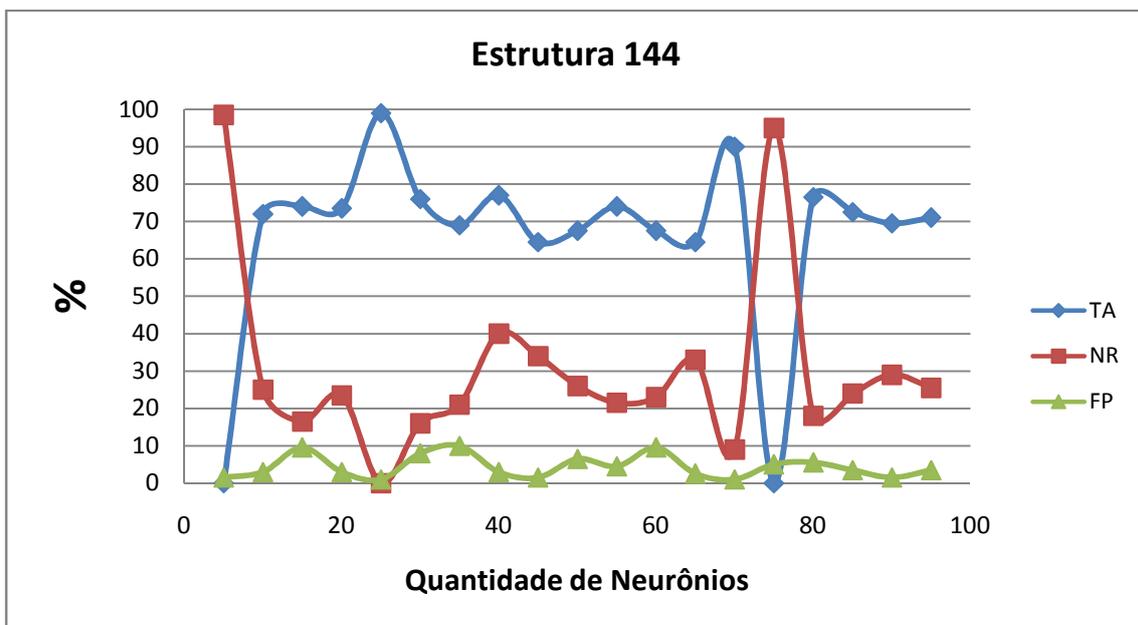


Figura 5.12 - Desempenho do sistema para a Estrutura 144 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

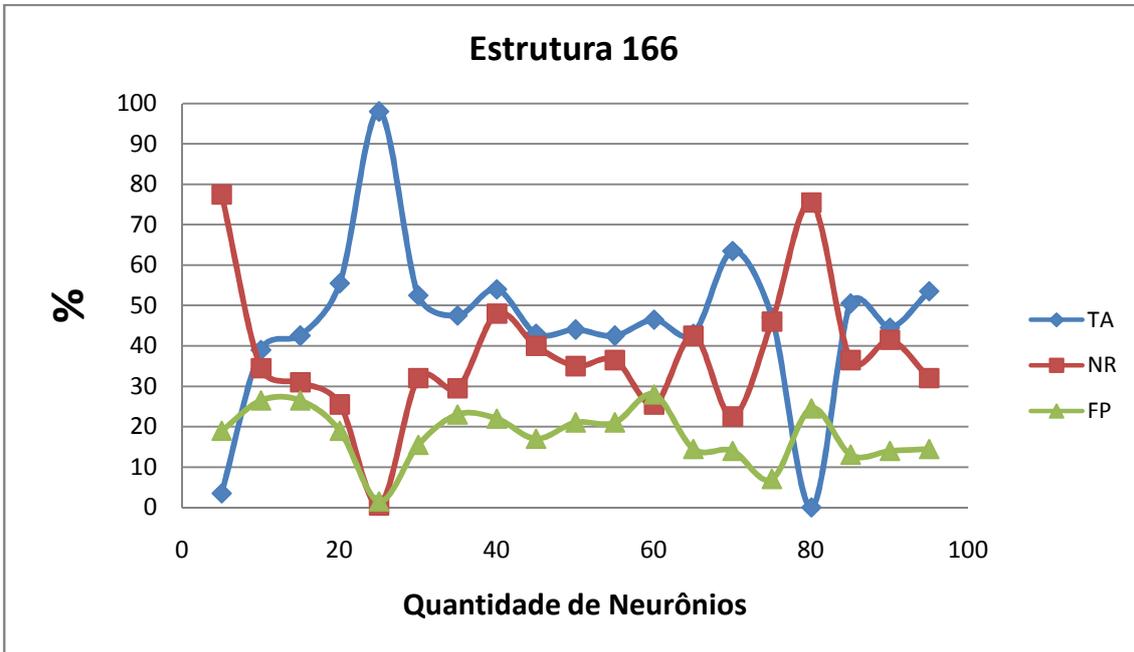


Figura 5.13 - Desempenho do sistema para a Estrutura 166 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

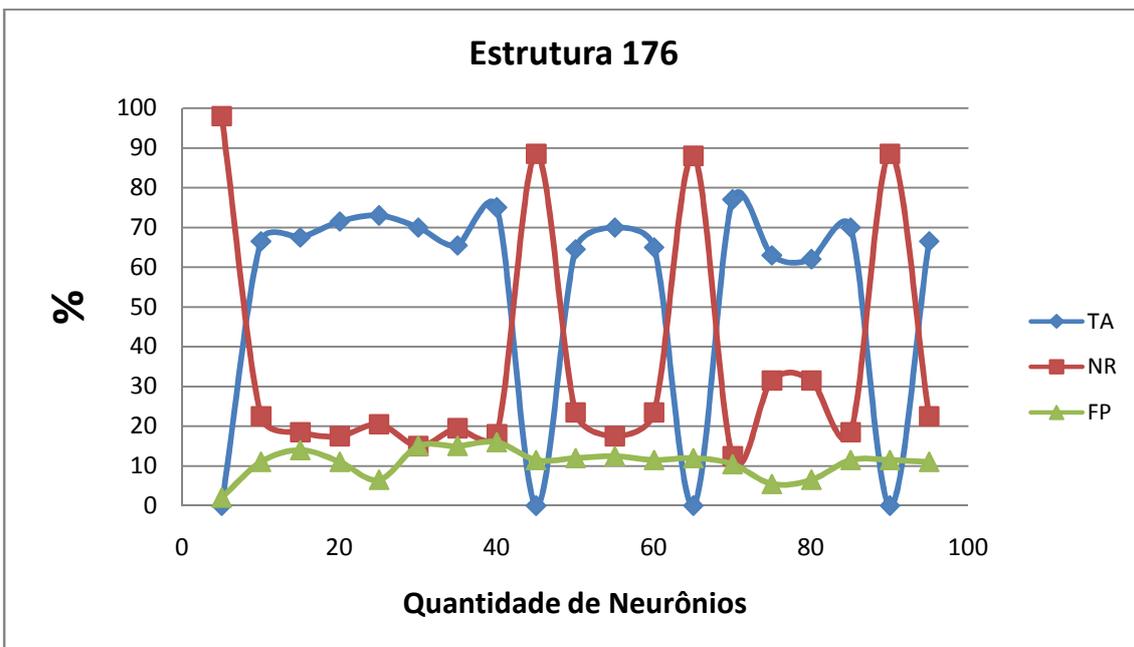


Figura 5.14 - Desempenho do sistema para a Estrutura 176 em função da quantidade de neurônios da camada oculta.

Os gráficos de desempenho apresentados mostram que, para cada estrutura, existe uma configuração de camada oculta que apresenta resultados ótimos. A Tabela 5.6 agrupa estes resultados, sendo o número de neurônios na camada oculta indicado pela coluna intitulada NN. Esses resultados, em alguns casos, se repetiram para outras quantidade de neurônios, porém foram considerados para este agrupamento aqueles obtidos com o menor número de neurônios, uma vez que estas configurações produzem RNAs menores em disco.

Tabela 5.6 - Melhores desempenhos individuais por estrutura.

	NN	TA [%]	NR [%]	FP [%]
Est 001	20	99,5	0	0,5
Est 017	15	100	0	0
Est 051	15	99	0	1
Est 086	20	97,5	1	1,5
Est 106	25	100	0	0
Est 144	25	99	0	1
Est 166	20	55,5	25,5	19
Est 176	25	73	20,5	6,5

Outro ponto importante que pode ser observado desta análise individual é que a escolha da melhor configuração geral no que diz respeito à quantidade de neurônios da camada oculta não deve ser feita apenas com base nos resultados médios das taxas de acerto. Devem ser levados em conta também os desempenhos individuais de cada padrão, pois podem ocorrer casos em que um ou mais padrões apresentem desempenhos individuais insatisfatórios. A análise deve considerar também, tanto no caso dos resultados médios como individuais, as taxas de não-reconhecimento e falso-positivo. Entende-se que a incidência de falsos positivos é mais grave que o não reconhecimento dos sinais, uma vez que pode resultar, em casos extremos, em intervenções desnecessárias na linha de transmissão. Assim, levando em conta todos estes critérios, a configuração mais adequada para o caso deste ensaio é aquela cuja RNA possui 20 neurônios em sua camada oculta.

### 5.3.5 Ensaio 4

Este ensaio foi realizado com o objetivo de se verificar a influência do tamanho do banco de dados de treinamento da RNA no desempenho do sistema. Até este momento, todos os ensaios foram realizados com o banco de dados de treinamento contendo 800 sinais por padrão. Neste ensaio, entretanto, foi realizado um conjunto de ensaios onde somente o tamanho do banco de dados foi alterado, mantendo fixas as

demais configurações. Estas configurações são as mesmas adotadas no Ensaio 2, exceto pela quantidade de neurônios na camada oculta, a qual foi alterada para 20.

No total, oito configurações de bancos de dados foram avaliadas, cujas quantidades de sinais para treinamento por padrão são informados na coluna BD da Tabela 5.7. Para cada configuração, o sistema foi treinado com estes sinais e em seguida seu desempenho foi avaliado mediante a submissão de sinais não utilizados no treinamento. Os resultados globais podem ser vistos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Desempenho médio do sistema em função do tamanho do banco de dados de treinamento (BD).

BD	TA [%]	NR [%]	FP [%]
1400	<b>88,19</b>	<b>7,31</b>	<b>4,50</b>
1200	86,69	8,56	4,75
1000	87,63	6,06	6,31
800	81,56	10,19	8,25
600	83,13	8,75	8,13
400	78,88	12,44	8,69
200	65,50	25,50	9,00
100	50,13	43,13	6,75

Observa-se que, de forma geral, existe uma tendência de queda de desempenho do sistema em função da redução da quantidade de sinais utilizados para o treinamento da RNA. Entretanto, três grupos de resultados são facilmente identificados: entre 1400 e 1000 sinais, onde estão os maiores valores de TA e os menores valores de NR e FP, entre 800 e 400, onde são observados valores de TA um pouco inferiores, porém valores de NR e FP consideravelmente maiores, e entre 200 e 100, com os menores valores de TA e maiores valores de NR e FP. Este comportamento é observado também no desempenho individual de cada padrão, como pode ser visto nos gráficos mostrados da Figura 5.15 à Figura 5.22.

Na média, a variação dos resultados, entre o melhor (BD=1400) e o pior caso (BD=100), é a seguinte:

- Taxa de acertos: variação de 75,94%;
- Taxa de não-reconhecimento: variação de 711,34%;
- Taxa de falso-positivo: variação de 200%.

Para o caso deste ensaio, a melhor configuração do banco de dados de treinamento da RNA, desconsiderando o esforço computacional, é aquela que conta com 1400 sinais. Esta configuração apresenta a maior taxa de acerto, a menor taxa de falso-positivo e a segunda menor taxa de não-reconhecimento.

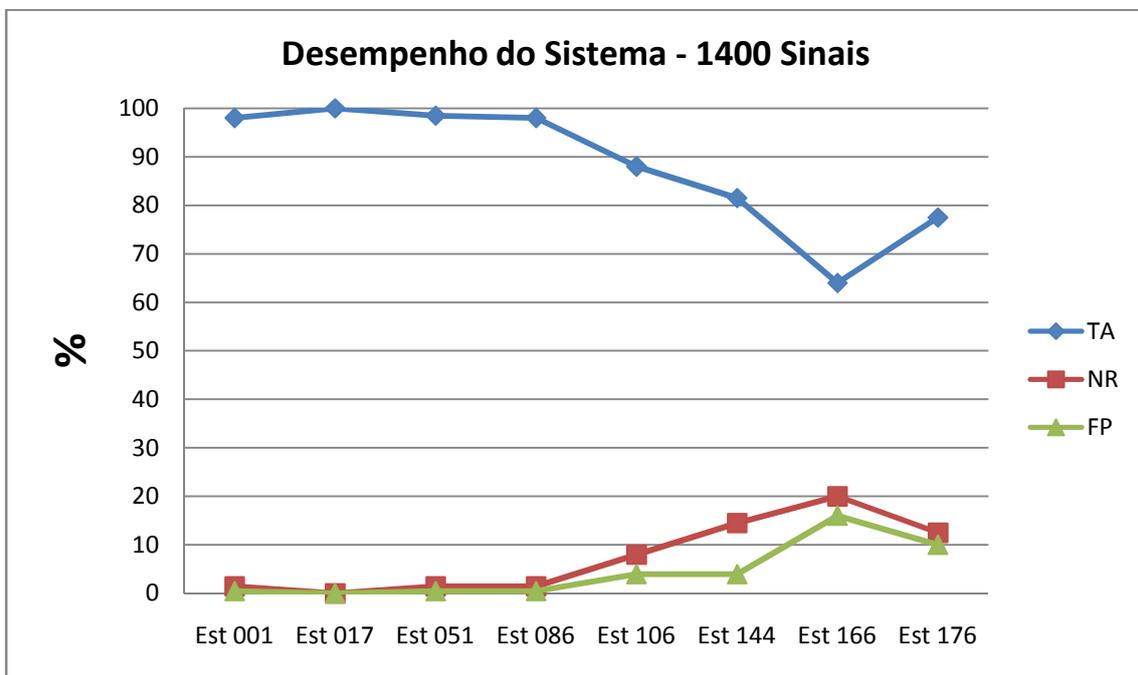


Figura 5.15 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1400 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

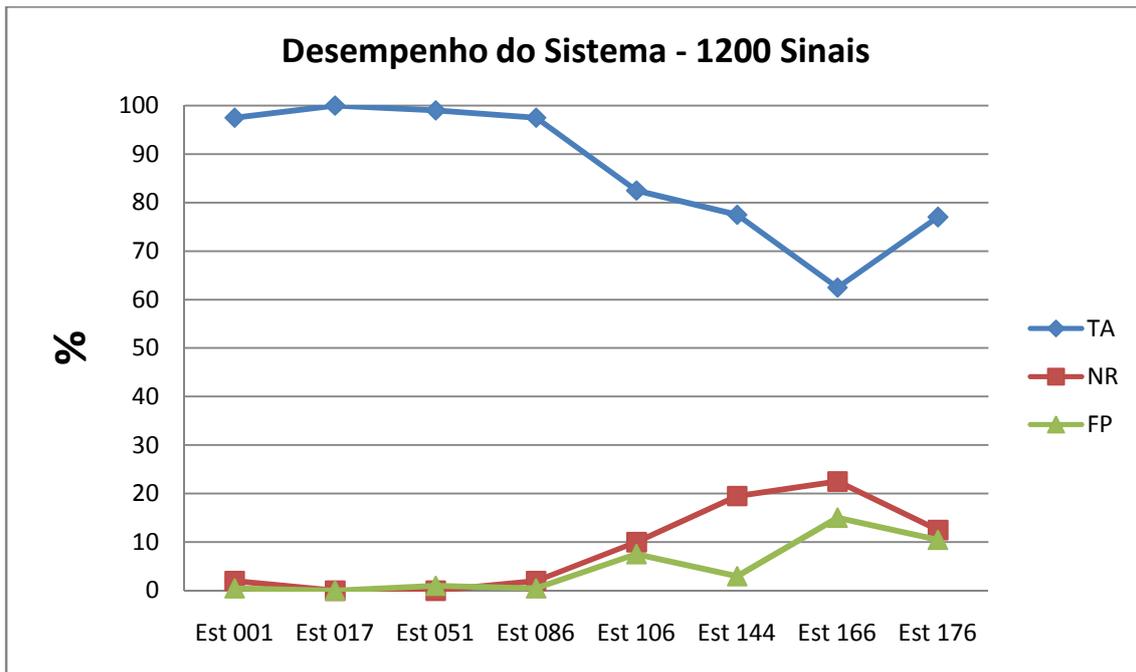


Figura 5.16 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1200 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

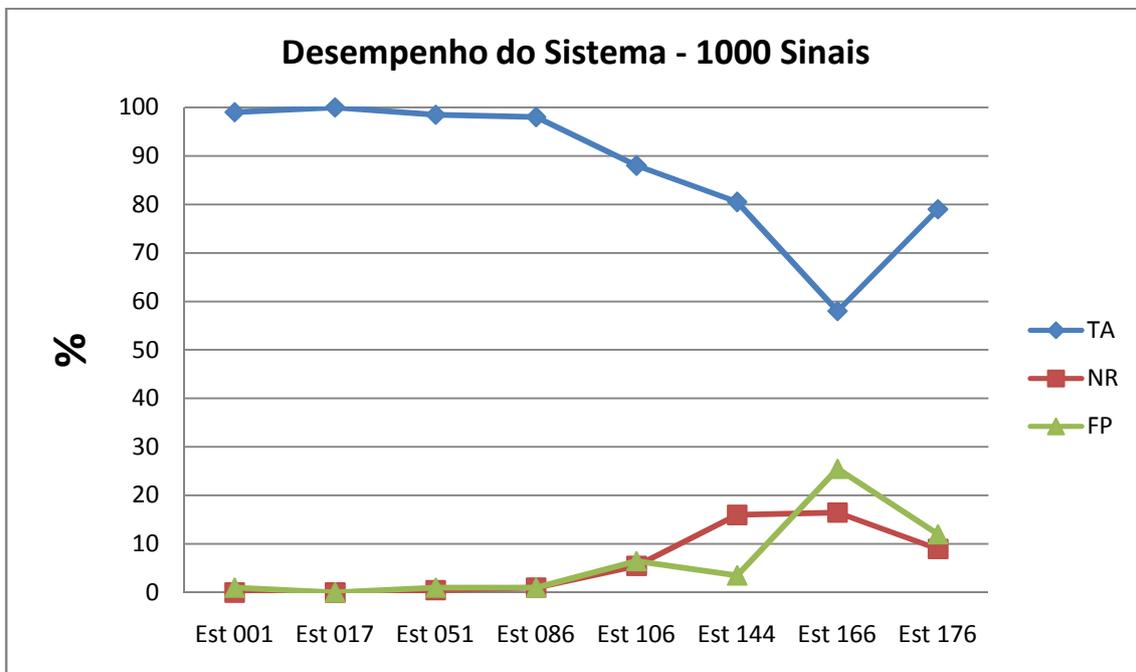


Figura 5.17 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 1000 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

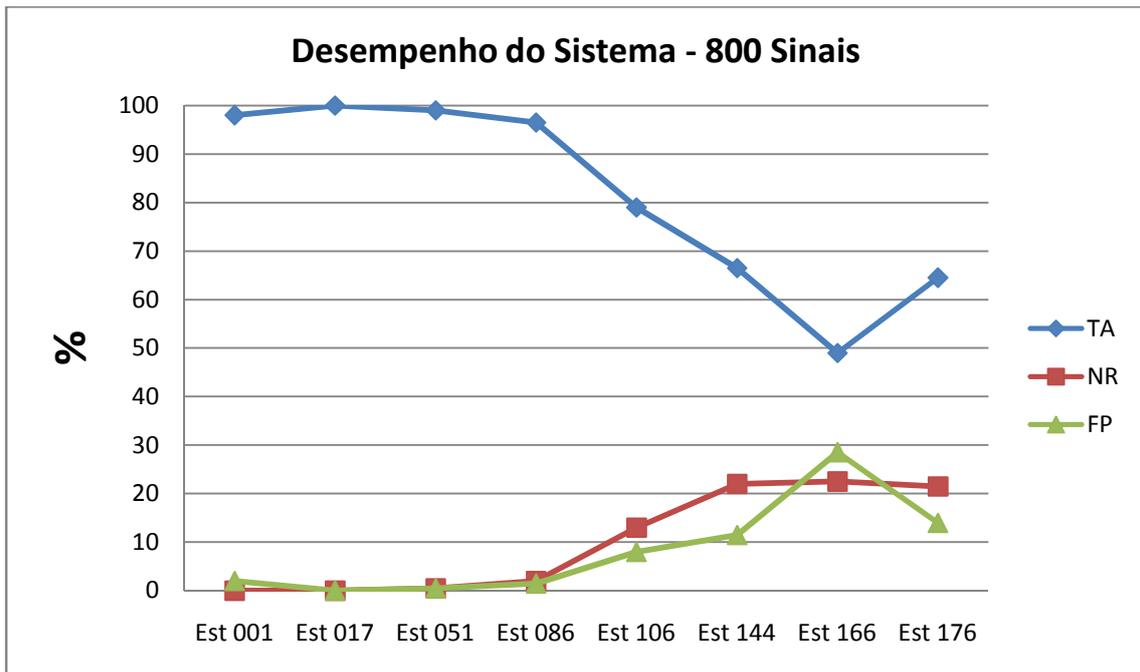


Figura 5.18 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 800 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

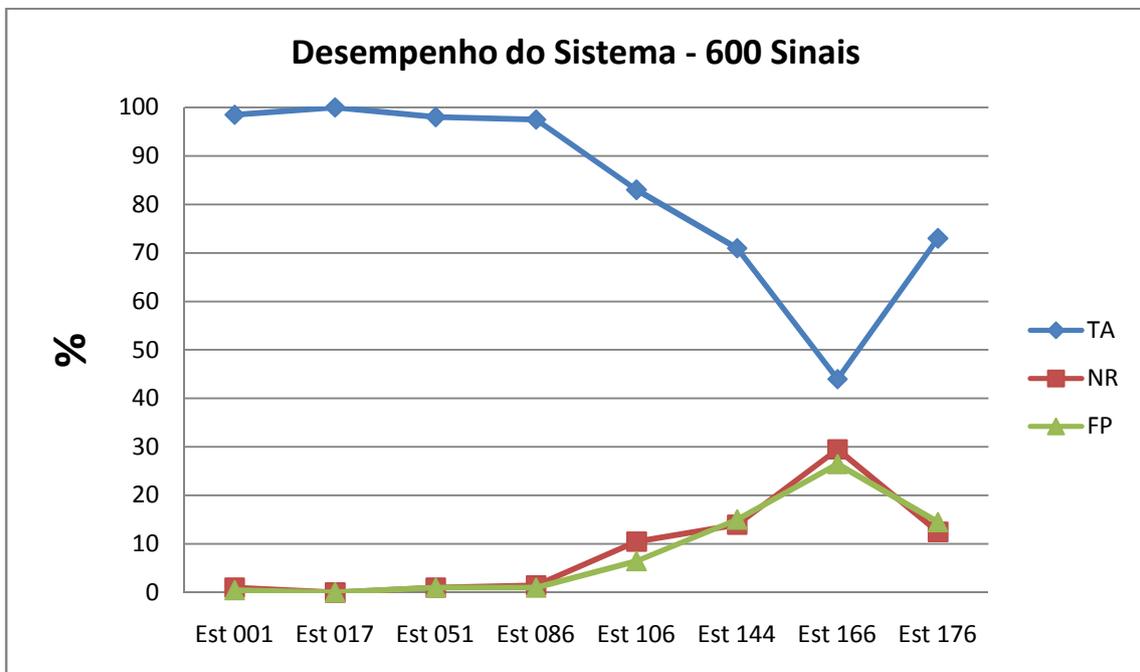


Figura 5.19 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 600 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

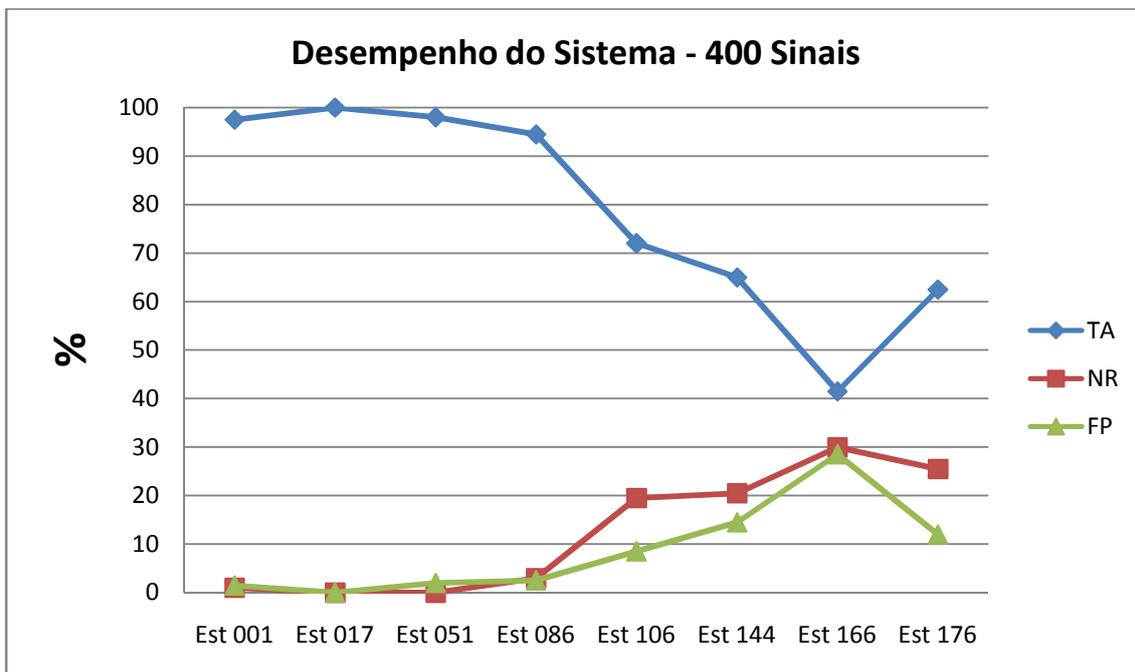


Figura 5.20 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 400 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

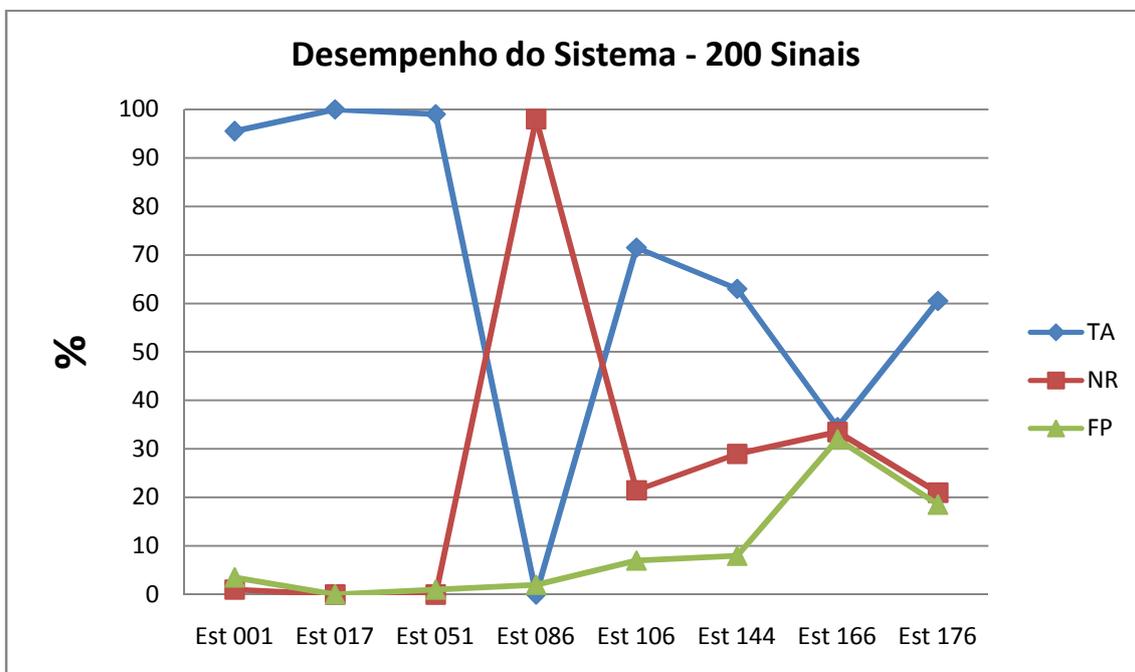


Figura 5.21 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 200 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

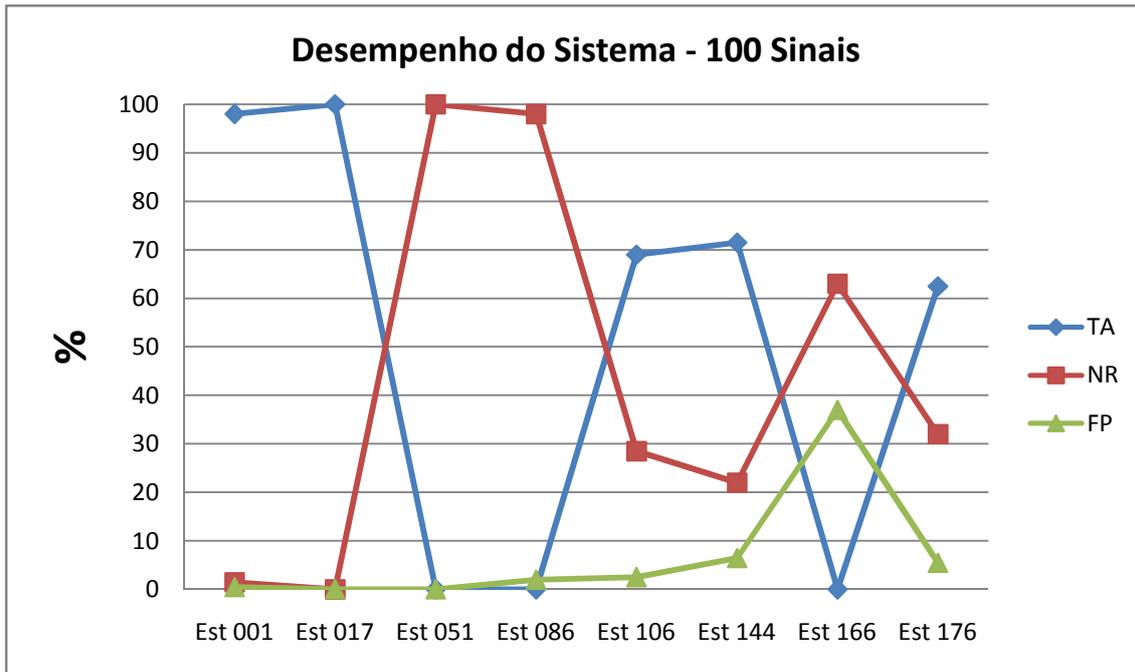


Figura 5.22 - Desempenho do sistema por estrutura para o caso em que 100 sinais foram utilizados no treinamento da RNA.

Assim, é recomendável a utilização da maior quantidade possível de sinais para treinamento do sistema, sem que seja atingido o *overfitting* das RNAs.

### 5.3.6 Ensaio 5

O patamar mínimo de similaridade, mantido fixo até o momento em 0,5, é um parâmetro de ajuste do sistema exclusivo da fase de reconhecimento de padrões, não alterando o desempenho do treinamento da RNA. Entretanto, sua variação pode acarretar em grande influência no resultado final do processo.

Assim, foi realizado um conjunto de 12 ensaios onde o patamar mínimo foi variado em incrementos de 0,1, no intervalo de 0,1 a 0,9, e incrementos de 0,01, no intervalo de 0,98 a 1. As características do sistema ensaiado são:

- 8 padrões considerados: Est 001, Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- Cada padrão é formado por sinais provenientes do isolador mais próximo da fase da cadeia de isoladores instalada na Fase A, devidamente coletados pela própria Fase A;
- Quantidade de sinais utilizados no treinamento: 1000 sinais por padrão;

- Quantidade de sinais utilizados no reconhecimento: 200 sinais por padrão;
- Aplicação do algoritmo filtro de porcentagem;
- Utilização de uma RNA somente, contendo 20 neurônios na camada oculta.

A fase de treinamento da RNA durou 90,10 s, enquanto que o tempo médio de reconhecimento dos sinais durou 10,88 s. O resultado geral do reconhecimento dos sinais em função do patamar mínimo de similaridade pode ser visto na Tabela 5.8 e nos gráficos da Figura 5.23, da Figura 5.24 e da Figura 5.25.

Tabela 5.8 - Desempenho do sistema em função do patamar mínimo de similaridade (P).

P	Valores Médios [%]		
	TA	NR	FP
0.1	89,50	0,88	9,63
0.2	89,44	1,75	8,81
0.3	88,75	3,44	7,81
0.4	87,88	5,31	6,81
0.5	85,44	9,50	5,06
0.6	82,50	14,06	3,44
0.7	78,06	19,75	2,19
0.8	73,81	25,13	1,06
0.9	66,88	32,44	0,69
0.98	49,31	50,56	0,13
0.99	37,38	62,50	0,13
1	0,00	100,00	0,00

Considerando o patamar mínimo de similaridade no intervalo de 0,1 a 0,9, o comportamento do sistema é bem definido e pode ser descrito pelas seguintes equações:

$$TA(P) = -45,28 \cdot P^2 + 17,92 \cdot P + 87,85 \quad (5.1)$$

$$NR(P) = 45,02 \cdot P^2 - 5,40 \cdot P + 0,91 \quad (5.2)$$

$$FP(P) = -12,927 \cdot P + 11,19 \quad (5.3)$$

Entretanto, a partir de 0,9 o comportamento do sistema muda, apresentando uma queda acentuada da taxa de acertos, tendendo a zero, assim como uma elevação

abrupta da taxa de não-reconhecimento, tendendo a 100%, ao passo que a taxa de falso-positivo tende a zero.

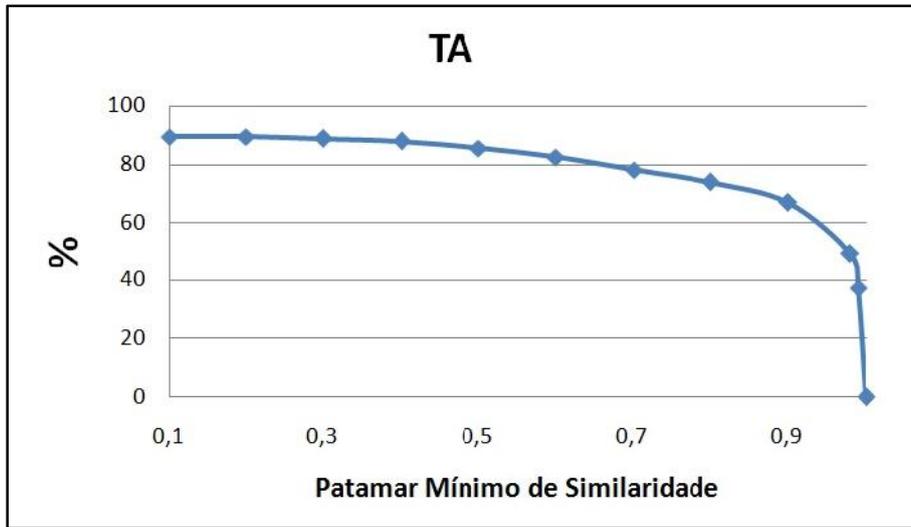


Figura 5.23 - Comportamento da taxa de acerto em função do patamar mínimo de similaridade.

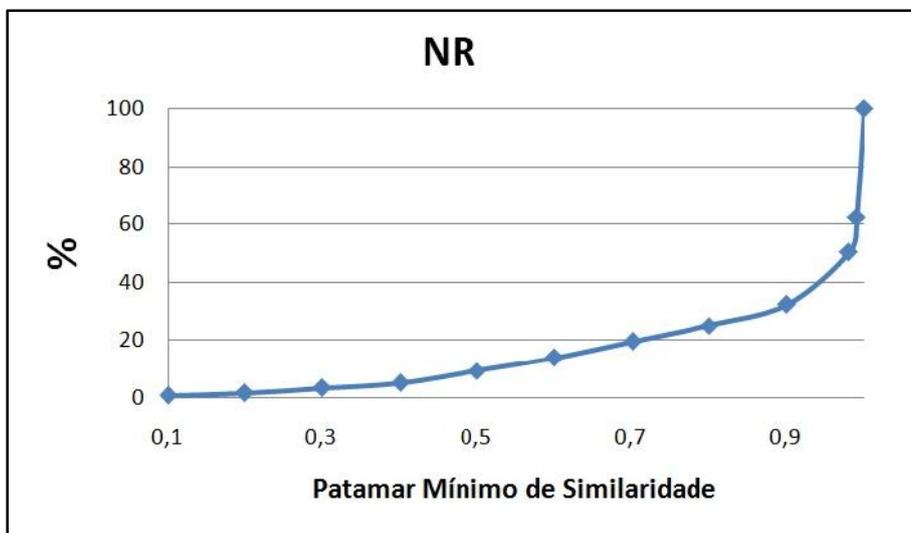


Figura 5.24 - Comportamento da taxa de não-reconhecimento em função do patamar mínimo de similaridade.

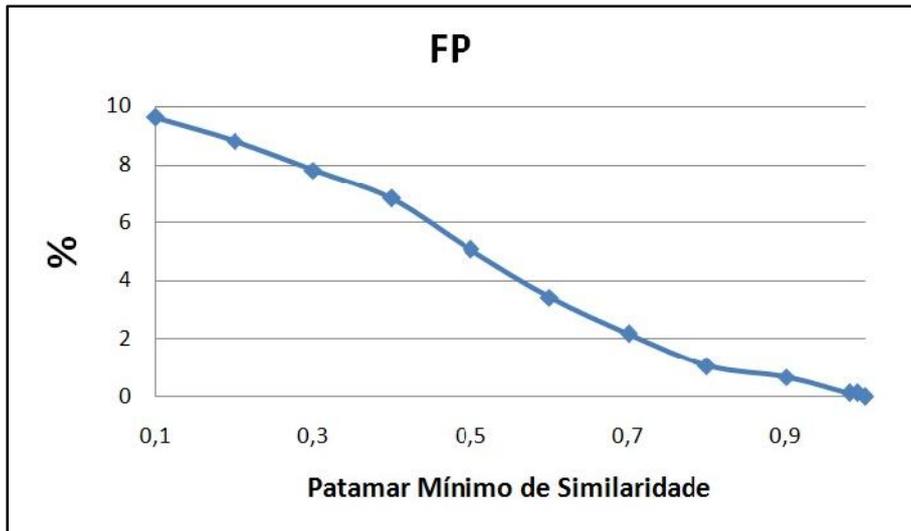


Figura 5.25 - Comportamento da taxa de falso-positivo em função do patamar mínimo de similaridade.

O comportamento individual de cada padrão em função do patamar mínimo de similaridade pode ser observado nos gráficos da Figura 5.26 à Figura 5.37.

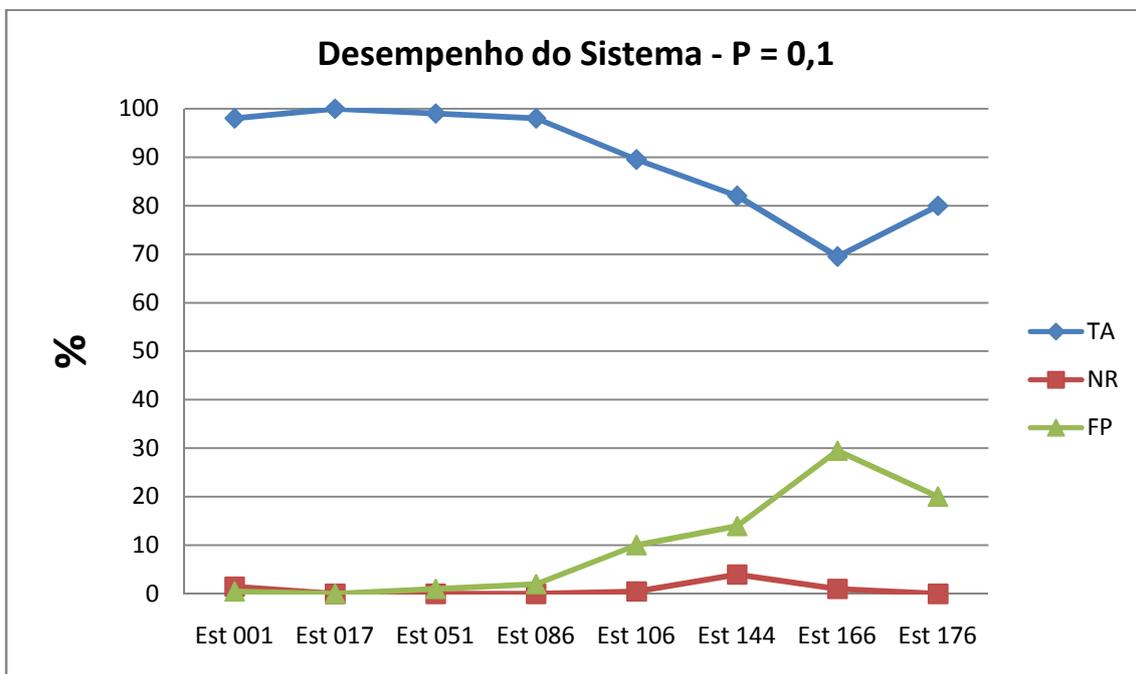


Figura 5.26 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,1.

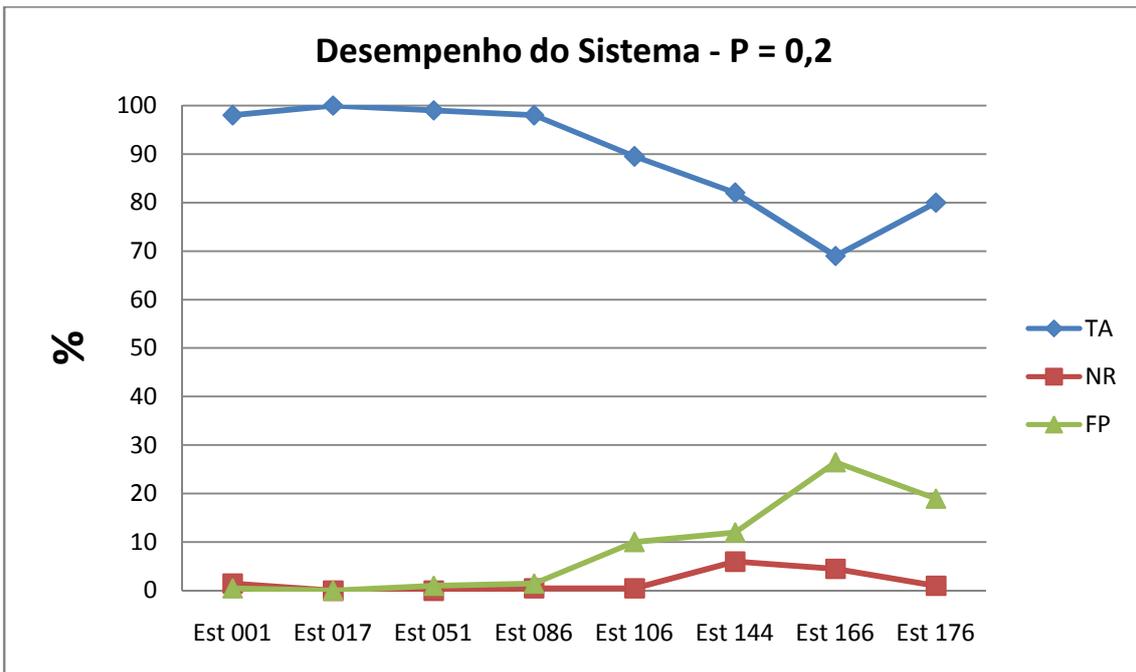


Figura 5.27 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,2.

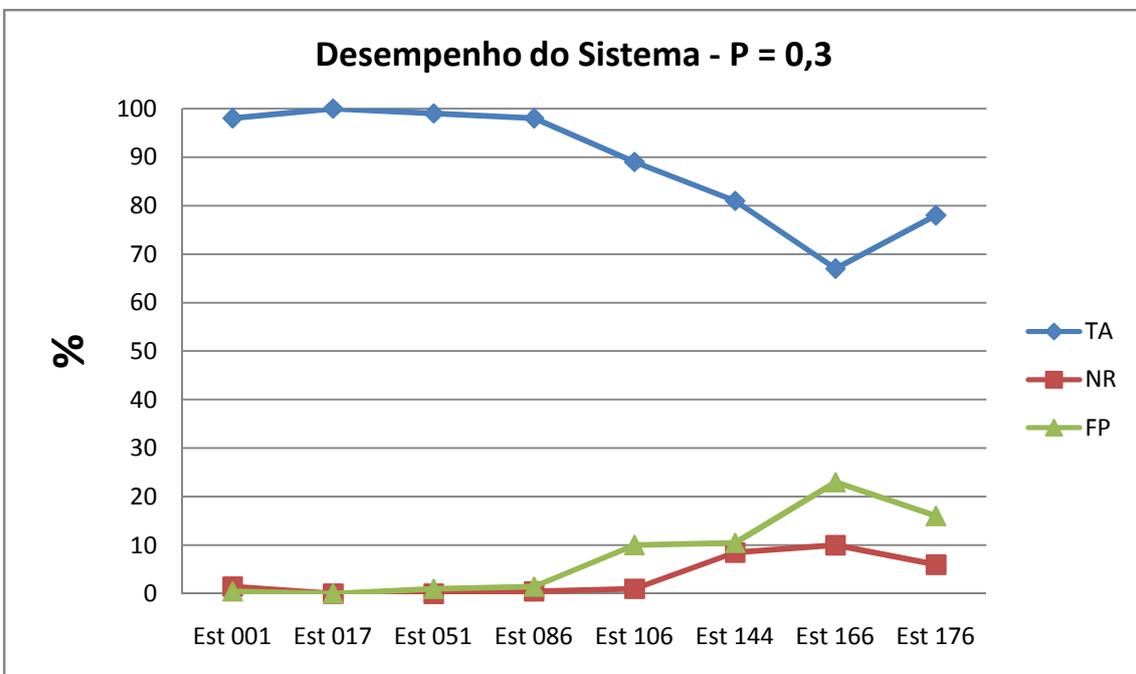


Figura 5.28 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,3.

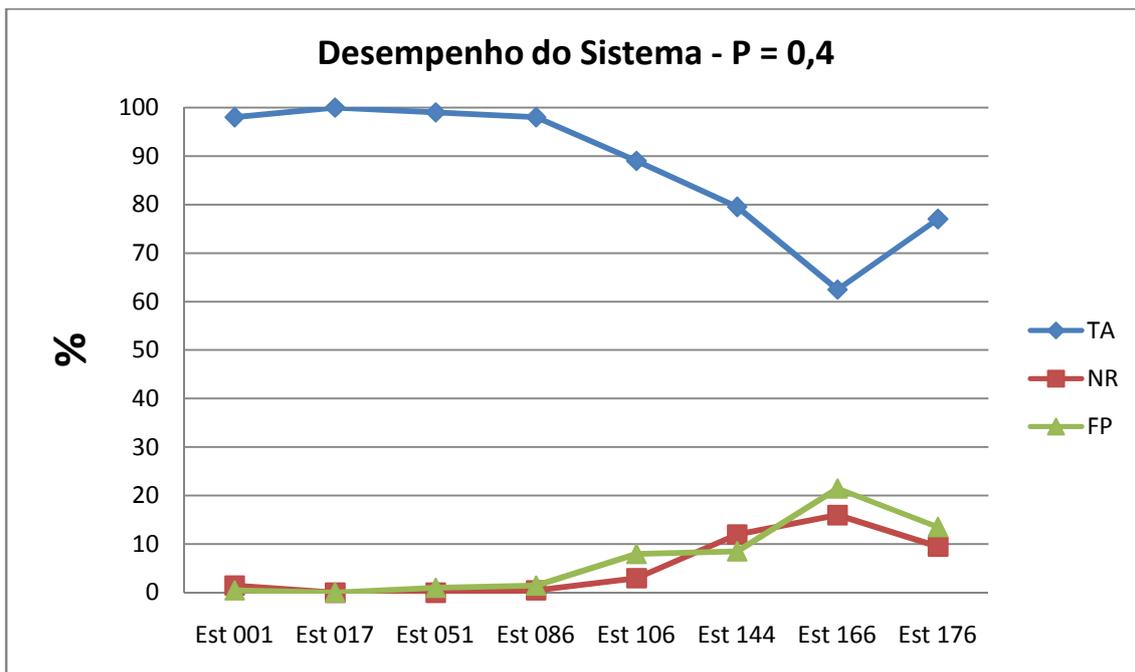


Figura 5.29 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,4.

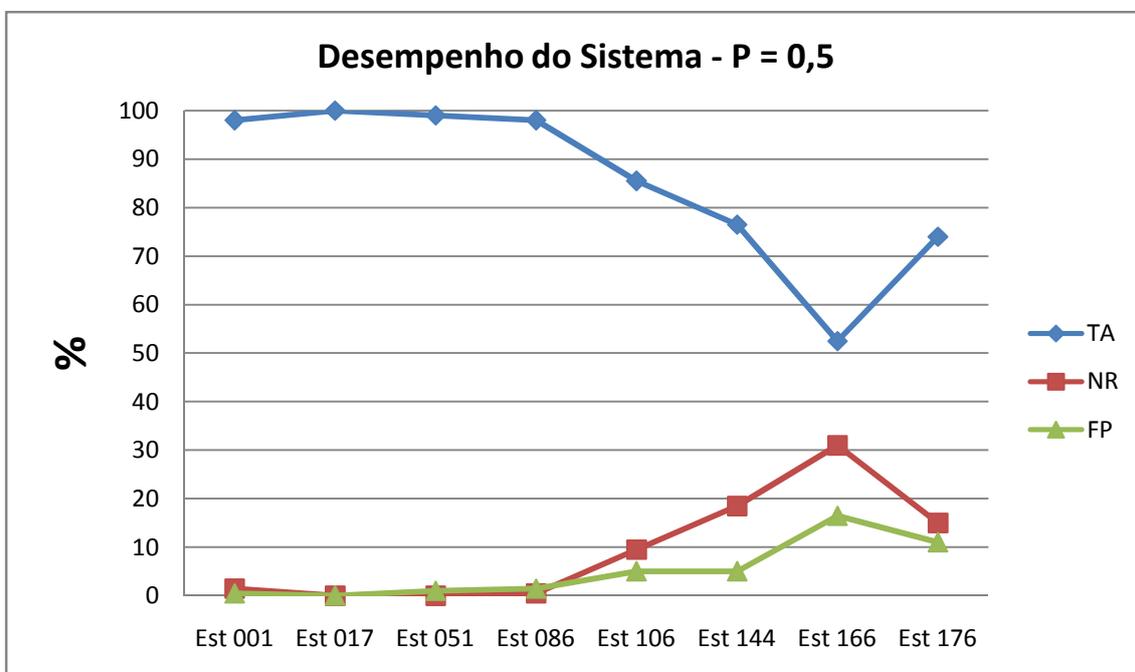


Figura 5.30 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,5.

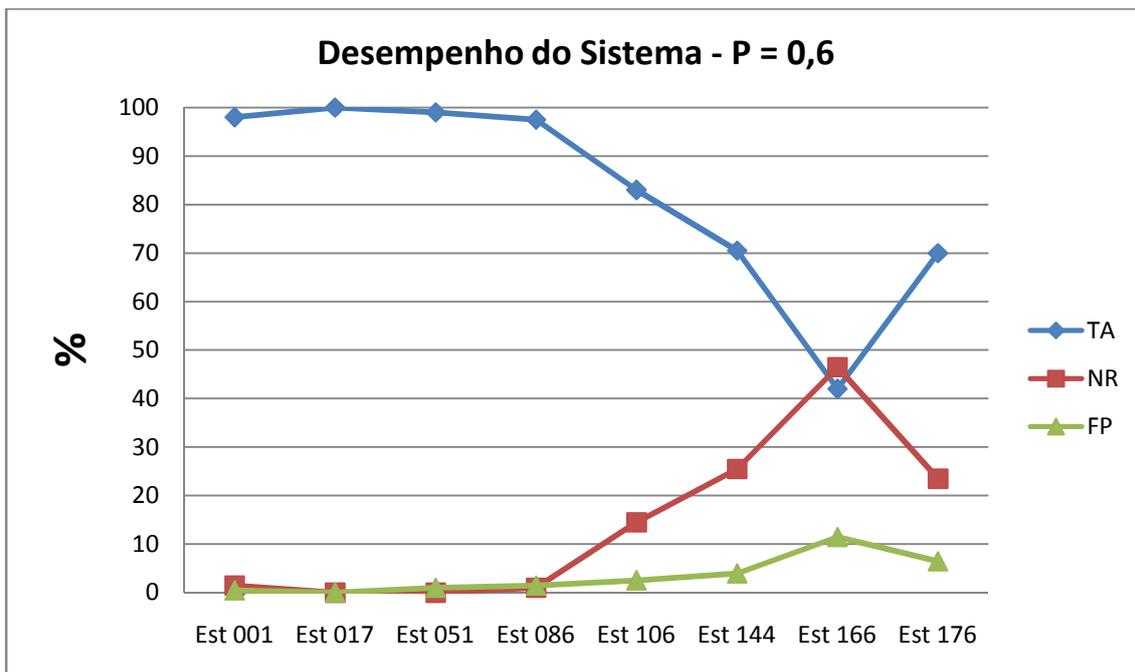


Figura 5.31 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,6.

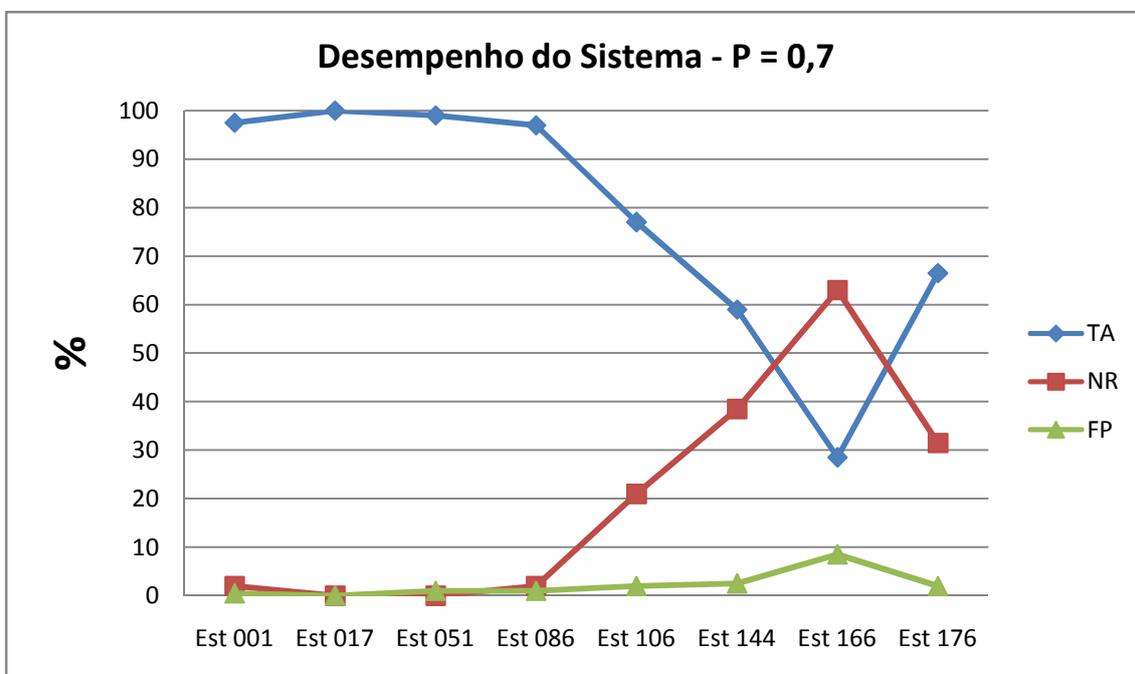


Figura 5.32 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,7.

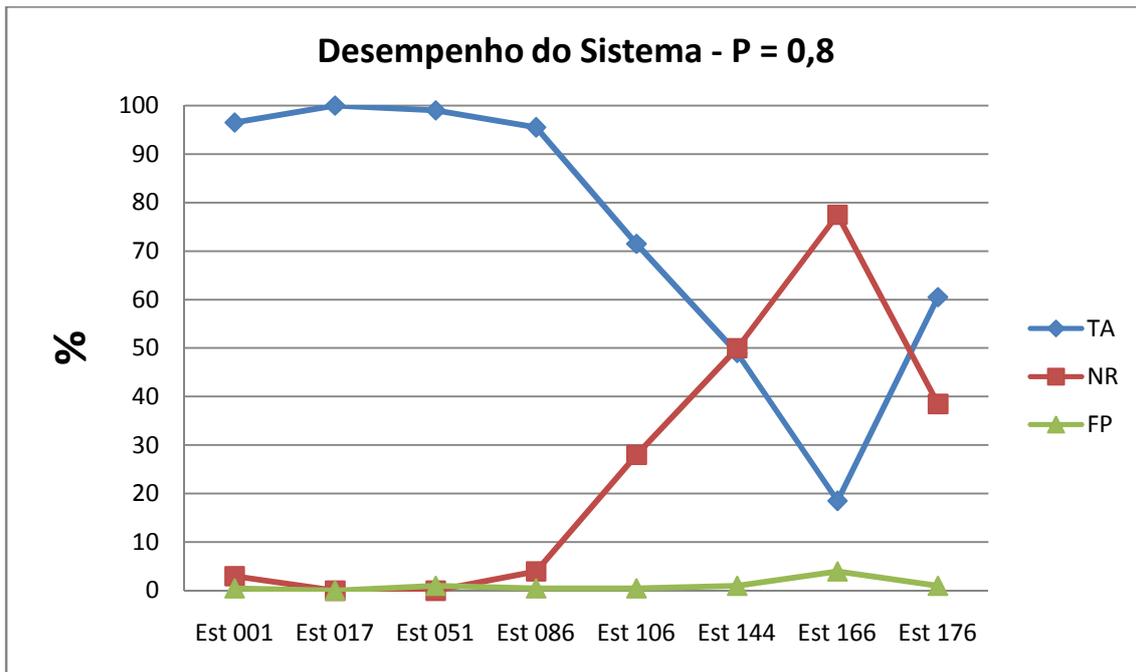


Figura 5.33 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,8.

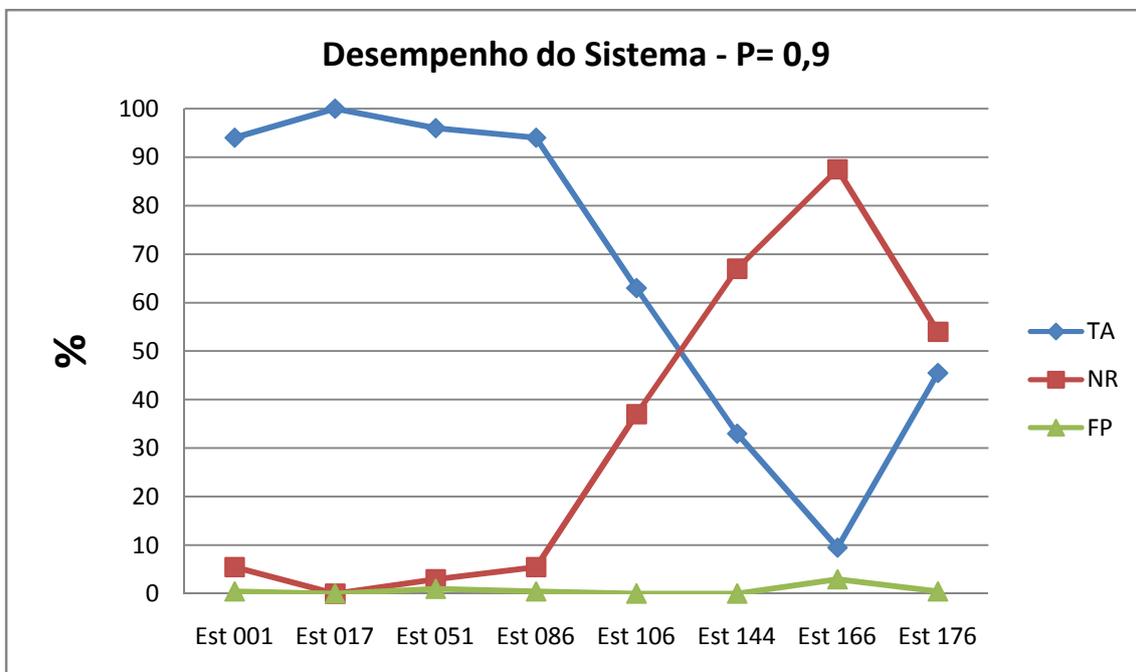


Figura 5.34 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,9.

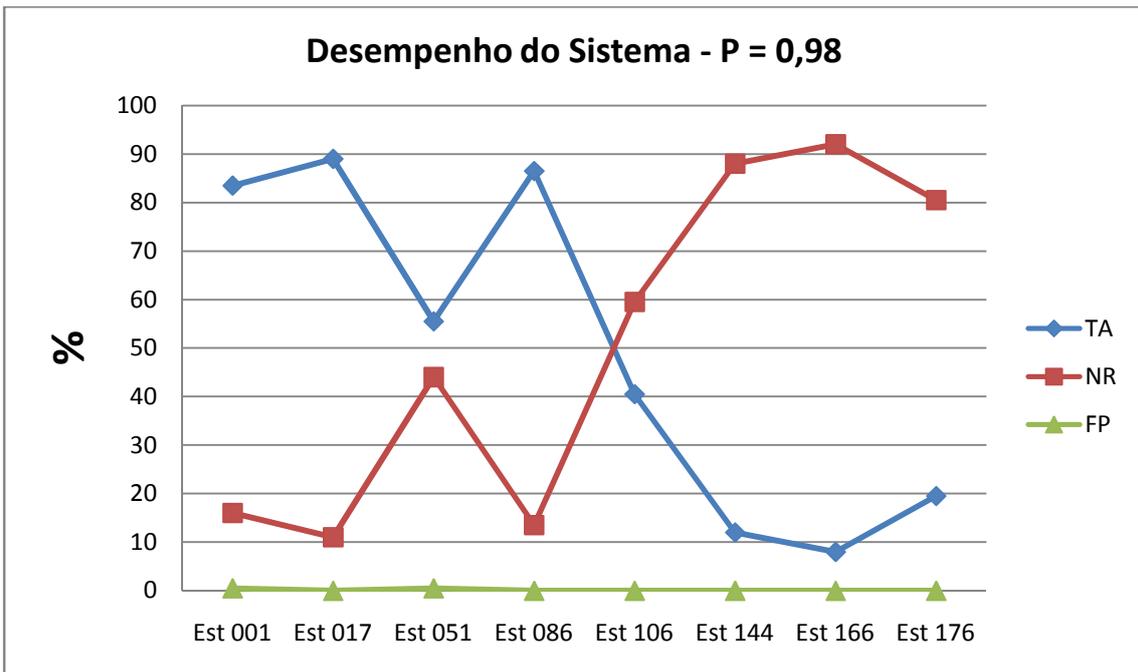


Figura 5.35 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,98.

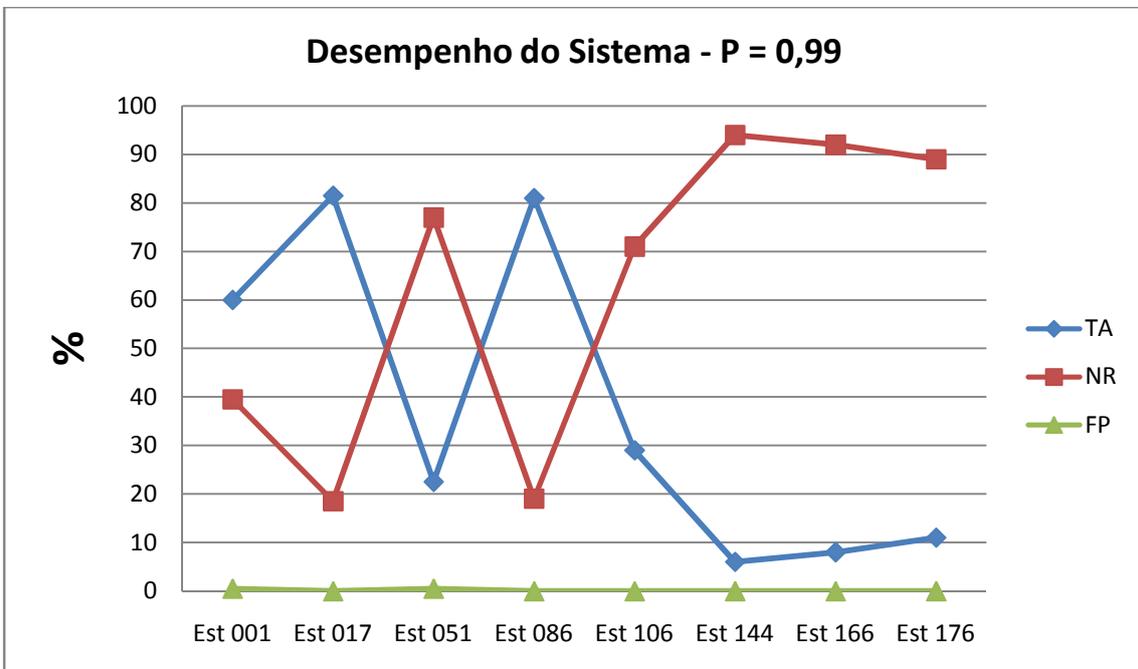


Figura 5.36 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 0,99.

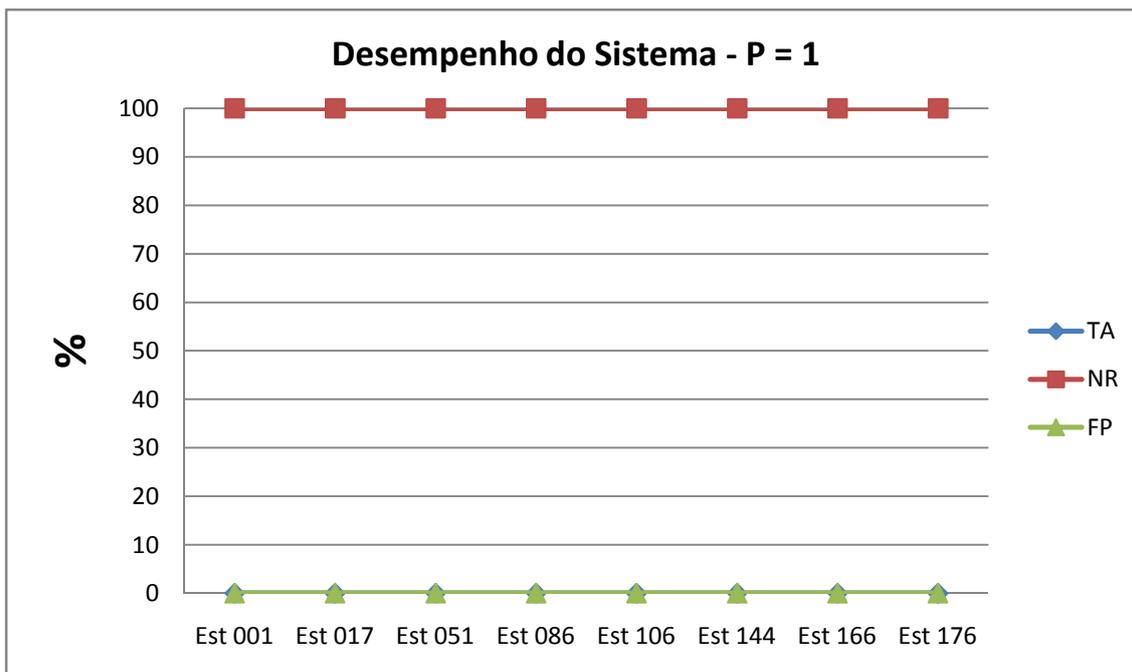


Figura 5.37 - Desempenho do sistema por padrão para o patamar mínimo de similaridade igual a 1.

Os resultados deste ensaio mostram que, passando do patamar mínimo de similaridade de 0,1 para 0,9, a taxa de acertos caiu 33,83 %, enquanto que a taxa de não-reconhecimento aumentou 3707,14 % e a taxa de falso-positivo caiu 1400 %.

Para que apresente desempenho ótimo, o sistema deve ser ajustado de forma a se obter a menor taxa de falso-positivo possível, evitando que diagnósticos errados sejam emitidos para a equipe de manutenção da concessionária. Este tipo de falha de diagnóstico poderia acarretar em transtornos para a concessionária, que deslocaria uma equipe de manutenção para retirada de uma cadeia de isoladores provavelmente são sem necessidade.

Para o caso específico deste ensaio, entretanto, o menor valor de taxa de falso-positivo foi obtido quando  $P = 1$ , o que também resultou em  $TA = 0$ , ou seja, o ajuste de  $P$  para este valor extremo eliminou a capacidade do sistema de reconhecer padrões. Pela experiência adquirida nos ensaios de campo, entende-se que  $TA$  deva atingir no mínimo o valor de 50 % para que o sistema possa ser considerado eficaz. Assim, sugere-se escolher o menor valor de  $P$  para uma  $TA$  maior ou igual a 50 % quando se analisa os resultados globais.

Seguindo esta diretriz, o valor de  $P$  escolhido seria de 0,9, o qual resulta em  $TA = 66,88$  % e  $FP = 0,69$  %, isto é, a taxa de falso-positivo é praticamente nula, muito próxima do ideal. Entretanto, quando se analisa o desempenho individual do sistema, observa-se que para este valor de  $P$  o padrão da estrutura 166 é demasiadamente

penalizado, obtendo uma TA abaixo de 10 %. Assim, de forma a equilibrar os resultados, deve-se aplicar a diretriz também para os resultados individuais, o que levaria a escolha de  $P = 0,5$ . Dessa forma, para todos os padrões e também para o resultado global a TA seria maior ou igual a 50 %.

### 5.3.7 Ensaio 6

Até o Ensaio 5, os padrões utilizados foram todos compostos por sinais provenientes de cadeias de isoladores instaladas na Fase A e coletados pela mesma fase. Entretanto, um dos pontos previstos pelo método é que o sistema seja capaz de receber e reconhecer sinais gerados nas três fases a partir de uma única fase.

Dessa forma, durante os ensaios em campo, sinais de descargas parciais foram provocados em cadeias de isoladores instaladas nas três fases, sendo recebidos pelo sistema através da Fase A. Gerados sempre no isolador mais próximo à fase para o caso deste ensaio, os sinais foram utilizados para a montagem do banco de dados de treinamento da seguinte forma:

- 8 padrões considerados: Est 001, Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- Cada padrão é formado por 300 sinais de cada fase, totalizando 900 sinais;
- Utilização do algoritmo filtro de porcentagem.

O banco de dados que contém os sinais utilizados na avaliação de desempenho do sistema foi formado da seguinte forma:

- 24 conjuntos de sinais considerados, correspondentes à estrutura e a fase onde foram gerados;
- 100 sinais por conjunto;
- Utilização do algoritmo filtro de porcentagem.

A RNA foi então configurada com 20 neurônios na camada oculta e devidamente treinada. Com o patamar mínimo de similaridade configurado para 0,5, o desempenho global do sistema obtido é:

- TA = 83,79 %;
- NR = 8,08 %;

- FP = 8,13 %.

O desempenho individual de cada conjunto de sinais submetido ao reconhecimento é mostrado na Figura 5.38.

Quando analisado de forma global, o sistema apresenta alto valor de taxa de acerto e baixos valores de taxas de não-reconhecimento e falso-positivo. Ao se analisar o desempenho dos conjuntos individualmente, entretanto, é possível observar quatro resultados de desempenho bastante inferior, referentes aos conjuntos Est 166-A, Est 166-B, Est 166-C e Est 176-B. O pior desempenho foi apresentado pelo conjunto Est 166-A, com taxa de acerto de 26 %, taxa de não-reconhecimento de 26 % e uma taxa de falso-positivo de 48 %. Apesar disso, este ensaio atesta a possibilidade de se utilizar padrões de treinamento formados por sinais das três fases e lidos através de apenas uma, tornando-o mais simples e econômico principalmente do ponto de vista de hardware e infraestrutura.

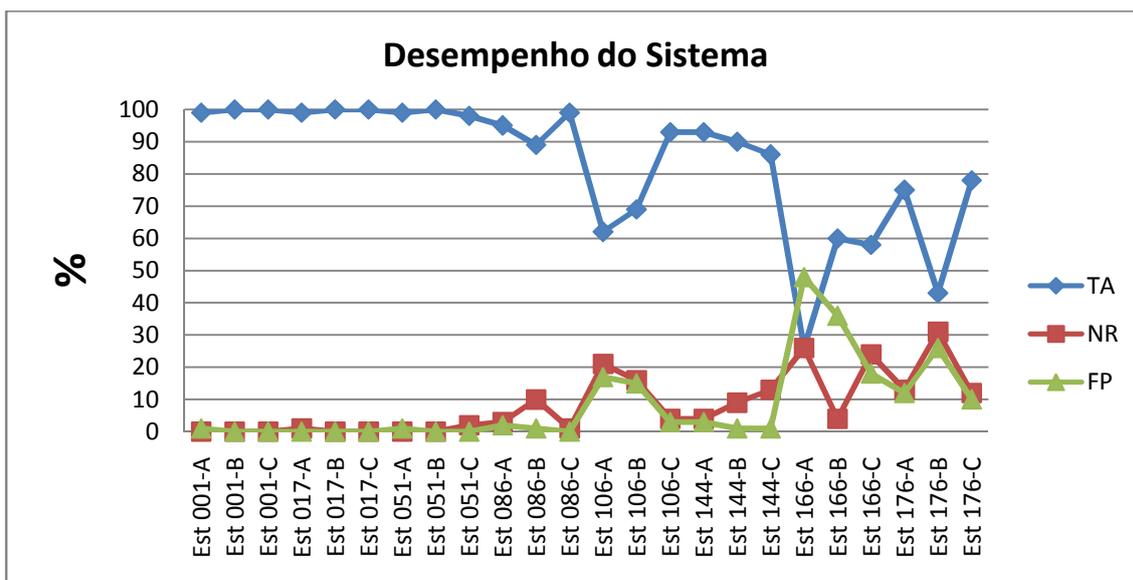


Figura 5.38 - Desempenho do sistema por conjuntos de sinais submetidos ao reconhecimento.

### 5.3.8 Ensaio 7

Todos os ensaios anteriores foram realizados com sinais gerados nos isoladores mais próximos da fase. Entretanto, o sistema deve ter a capacidade de identificar sinais provenientes de qualquer isolador da cadeia, identificando a estrutura onde a cadeia está instalada. Dessa forma, cada padrão deve ser treinado a partir de sinais de todos os isoladores da cadeia. Este ensaio procura avaliar o desempenho do sistema para o caso em que os padrões são formados dessa maneira.

Devido a limitações dos ensaios realizados em campo, não foram coletados sinais de todos os isoladores, sendo selecionados apenas três por fase. Assim, o banco de dados de treinamento deste ensaio foi montado da seguinte forma:

- 8 padrões considerados: Est 001, Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- Cada padrão é formado por 300 sinais de cada isolador, obtidos sempre da Fase A, totalizando 900 sinais.

O banco de dados que contém os sinais utilizados na avaliação de desempenho do sistema foi formado da seguinte forma:

- 24 conjuntos de sinais considerados, correspondentes à estrutura e a fase onde foram gerados;
- 100 sinais por conjunto;

Todos os sinais passaram pela aplicação do algoritmo filtro de porcentagem.

Após o treinamento da RNA, configurada com 20 neurônios na camada oculta, os sinais destinados à avaliação do sistema foram submetidos ao reconhecimento, sendo obtido o seguinte desempenho global:

- TA = 86,88 %;
- NR = 7,79 %;
- FP = 5,42 %.

O desempenho individual de cada conjunto submetido ao reconhecimento é mostrado na Figura 5.39, estando o patamar mínimo de similaridade configurado em 0,5.

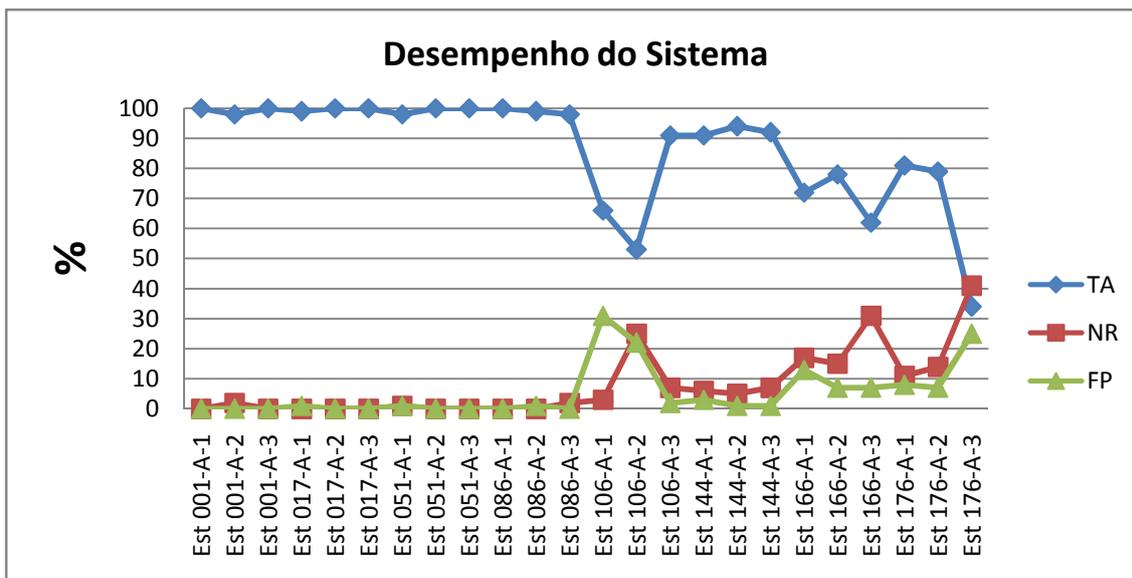


Figura 5.39 - Desempenho do sistema por conjuntos de sinais submetidos ao reconhecimento.

Os resultados individuais mostram bom desempenho para a maioria dos conjuntos, sendo que:

- 71 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto maior que 90 %;
- 13 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto entre 70 % e 90 %;
- 17 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto abaixo de 70 %.

O pior resultado foi obtido para o conjunto Est-176-A-3, cuja taxa de acerto ficou em 34 %, com taxa de não-reconhecimento de 41 % e taxa de falso positivo de 25 %. Considerados como pontos críticos, outros dois valores de taxa de falso positivo que se destacam negativamente são os obtidos pelos conjuntos Est 106-A-1 e Est 106-A-2, sendo iguais a 31 % e 22 %, respectivamente. Para estes conjuntos, porém, as respectivas taxas de acerto são de 66 % e 53 %. Estes pontos negativos não inviabilizam a aplicação do sistema, porém poderiam ser trabalhados visando o equilíbrio no que se refere aos resultados individuais. Uma possibilidade seria a utilização de mais sinais para o treinamento das RNAs.

### 5.3.9 Ensaio 8

Este ensaio tem como objetivo avaliar o desempenho do sistema quando são levados em conta, simultaneamente, as condições definidas nos Ensaio 6 e 7, isto é, padrões formados por sinais provenientes de vários isoladores de cadeias instaladas nas três fases, com leitura dos sinais através de apenas uma fase. Esta é a configuração ideal do sistema do ponto de vista da cobertura de eventos.

Para a realização deste ensaio, porém, não foi possível se obter sinais de todos os isoladores, sendo utilizados sinais de três isoladores por cadeia. Assim, o banco de dados de treinamento da RNA foi configurado da seguinte maneira:

- 7 padrões considerados: Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- Cada padrão é formado por 100 sinais de cada um dos três isoladores selecionados de cada cadeia, totalizando 900 sinais.

O banco de dados que contém os sinais utilizados na avaliação de desempenho do sistema foi formado da seguinte forma:

- 63 conjuntos de sinais considerados, correspondentes à estrutura, isolador e a fase onde foram gerados;
- 100 sinais por conjunto.

A RNA, composta por 20 neurônios na camada oculta, foi treinada e em seguida os sinais do banco de dados para avaliação foram submetidos ao reconhecimento. O desempenho global do sistema, estando o patamar mínimo de similaridade configurado em 0,5, foi:

- TA = 74,37 %;
- NR = 15,19 %;
- FP = 10,44 %.

O desempenho individual dos conjuntos pode ser observado na Figura 5.40 e na Figura 5.41.

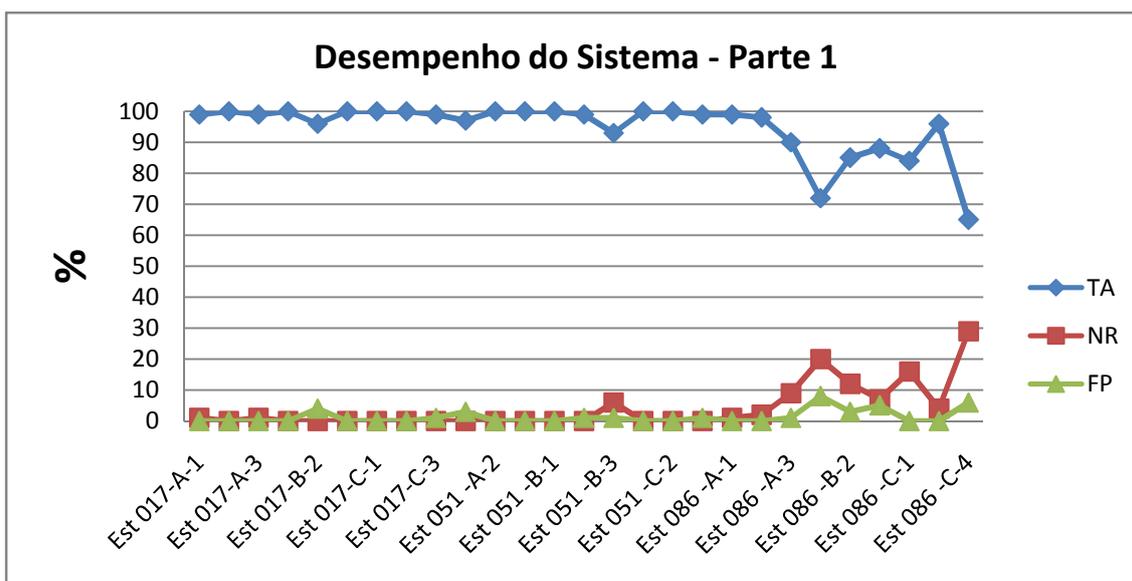


Figura 5.40 - Desempenho do sistema para os conjuntos formados por isoladores da Est 017 à Est 086.

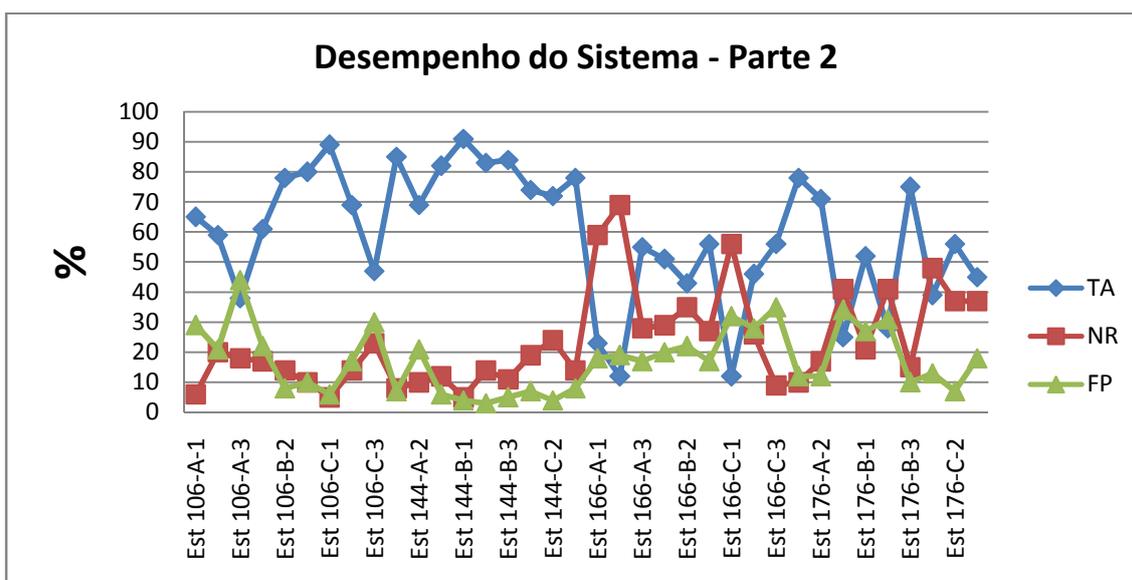


Figura 5.41 - Desempenho do sistema para os conjuntos formados por isoladores da Est 106 à Est 176.

O sistema apresentou desempenho em nível mais baixo que os observados nos Ensaio 6 e 7, o que já era esperado considerando-se que houve aumento da quantidade de subpadrões utilizados na formação dos padrões a serem reconhecidos pelas RNAs, sem que houvesse modificações na configuração do software. Ao se analisar os resultados individuais, observa-se:

- 52 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto maior que 80 %;
- 33 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto entre 50 % e 80 %;

- 15 % dos conjuntos apresentou taxa de acerto menor que 50 %.

As menores taxas de acerto foram obtidas pelos conjuntos Est 166-C-1 (12 %), Est 166-A-2 (12 %), Est 166-A-1 (23 %) e Est 176-A-3 (25 %). Estes resultados poderiam ser melhorados ao se utilizar uma maior quantidade de sinais para o treinamento das RNAs.

Ainda que ao custo de perda de desempenho, este ensaio mostra que é possível aplicar a metodologia considerando a leitura de sinais em apenas uma fase, e possibilitando a localização de sinais em todas elas considerando que os padrões das estruturas sejam formados por sinais de todas as fases e todos os isoladores.

### 5.3.10 Ensaio 9

Para que o sistema funcione corretamente, o ideal é que seja treinado de forma a conhecer todas as situações possíveis. Ou seja, o sistema deve ser treinado com sinais obtidos de todos os isoladores, de todas as fases e de todas as estruturas. Entretanto, como verificado durante a execução dos ensaios de campo, a coleta de sinais para o treinamento do sistema é uma tarefa demorada, custosa e trabalhosa. Assim, é pertinente avaliar a possibilidade de se treinar o sistema com apenas alguns padrões (estruturas), verificando sua capacidade (se existente) de identificar padrões desconhecidos.

Para isso, foi realizado um ensaio onde a RNA foi treinada com apenas 6 padrões, porém sinais de 8 padrões foram submetidos ao processo de reconhecimento.

O banco de dados utilizado para o treinamento da RNA foi formado da seguinte forma:

- 6 padrões considerados: Est 001, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144 e Est 176;
- Cada padrão é formado por 1000 sinais (lidos da Fase A) provenientes do isolador mais próximo da fase da cadeia de isoladores instalada na Fase A.

O banco de dados utilizado para a avaliação do desempenho do sistema foi formado da seguinte forma:

- 8 conjuntos considerados: Est 001, Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- Cada conjunto é constituído por 20 sinais provenientes do isolador mais próximo da fase, da cadeia de isoladores instalada na Fase A. Os sinais foram lidos através da Fase A.

Com 20 neurônios na camada oculta, a RNA foi treinada e em seguida os sinais do banco de dados para avaliação foram submetidos ao reconhecimento, onde o patamar mínimo utilizado foi de 0,5. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.9, onde as taxas de acerto estão localizadas nas interseções entre as linhas e colunas das mesmas estruturas. A primeira coluna representa os conjuntos submetidos ao processo de reconhecimento.

Tabela 5.9 - Desempenho do sistema.

	NR [%]	FP [%]	TA [%] ESTRUTURAS CONHECIDAS PELA RNA					
			Est 001	Est 051	Est 086	Est 106	Est 144	Est 176
Est 001	1,5	0,5	<b>98</b>	0	0,5	0	0	0
<b>Est 017</b>	1		0	0	0	0	<b>99</b>	0
Est 051	0	1	0	<b>99</b>	0	0	0	1
Est 086	0,5	1,5	0	0	<b>98</b>	0	1,5	0
Est 106	1	3	0	0	0	<b>96</b>	0	3
Est 144	13	8	0	0	0,5	0	<b>79</b>	7,5
<b>Est 166</b>	20		0	0	<b>1,5</b>	<b>28,5</b>	<b>12,5</b>	<b>37,5</b>
Est 176	6	8	0	0	0	3,5	4,5	<b>86</b>

Pode-se observar que para os padrões conhecidos pela RNA o desempenho do sistema é, de forma global, o seguinte:

- TA = 92,67 %;
- NR = 3,67 %;
- FP = 3,67 %.

Com relação aos dois conjuntos de sinais de padrão descohecido, Est 017 e Est 166, esperava-se que os mesmos fossem diagnosticados como pertencentes à algum padrão próximo, isto é, que os sinais provenientes da Estrutura 017 tivessem alguma similaridade com os sinais das Estruturas 001 e 051, que são suas estruturas mais próximas conhecidas pela RNA. Da mesma forma, era previsto que os sinais

provenientes da Estrutura 166 possuíssem alguma similaridade com os sinais das Estruturas 144 e 176.

Este comportamento foi verificado, em parte, no caso do conjunto de sinais provenientes da Estrutura 166, que foi diagnosticado da seguinte forma:

- 28,5 % dos sinais pertencentes ao padrão Est 106;
- 12,5 % dos sinais pertencentes ao padrão Est 144;
- 37,5 % dos sinais pertencentes ao padrão Est 176;
- 1,5 % dos sinais pertencentes ao padrão Est 086.

Pela hipótese levantada, sendo a Estrutura 176 a mais próxima da Estrutura 166 (aproximadamente 3 km), era de se esperar que a maioria dos sinais fossem atribuídos a este padrão, o que realmente ocorreu. Pela ordem, as estruturas que deveriam ter mais sinais atribuídos aos seus padrões, depois da Estrutura 176, seriam as Estruturas 144, 106, 086, 051 e 001 respectivamente. Este padrão de comportamento não foi fielmente seguido. O segundo padrão com mais atribuições foi o da Estrutura 106 e o terceiro o da Estrutura 144, invertendo a ordem esperada destes dois padrões.

Já no caso da Estrutura 017, todos os sinais reconhecidos foram atribuídos ao padrão da Estrutura 144, configurando uma resposta totalmente fora do padrão de comportamento previsto.

Dessa forma, pelo menos para as configurações adotadas neste ensaio, pode-se dizer que o sistema não é capaz de reconhecer sinais pertencentes a padrões desconhecidos, impossibilitando seu treinamento com somente algumas estruturas da linha de transmissão.

### **5.3.11 Ensaio 10**

Diante dos resultados apresentados no Ensaio 9, onde não houve a confirmação da hipótese em questão, foi decidido investigar a validade da hipótese a partir de um ensaio realizado em laboratório. Os principais fatores que levaram à esta decisão são:

- Foram coletados, em campo, sinais de poucas estruturas, espaçadas irregularmente entre si;

- Estes sinais apresentam qualidade muito inferior aos sinais coletados em laboratório, contendo grande quantidade de ruídos e, em muitos casos, amplitude muito baixa para a escala vertical adotada.

Estes dois fatores, aliados à influência de variáveis diversas não encontradas em laboratório, poderiam influenciar negativamente no teste da hipótese. Em contrapartida, os sinais coletados em laboratório, isto é, em ambiente controlado, apresentam excelente qualidade de digitalização e pouca influência de ruídos.

Assim, foram coletados sinais em laboratório de forma a montar os bancos de dados para treinamento da RNA e avaliação de desempenho do sistema. Todos os sinais passaram pelo processo de compressão, utilizando-se para isso o algoritmo filtro de porcentagem.

O banco de dados para treinamento da RNA foi montado da seguinte forma:

- 12 padrões considerados: km04, km08, km12, km6, km20, km24, km28, km32, km36, km40, km44 e km48;
- Cada padrão é formado por 800 sinais coletados dos pontos de conexão que dão nome aos padrões citados, estando o dispositivo de simulação de descargas parciais instalado no isolador mais próximo a fase.

Para a avaliação de desempenho do sistema, um outro banco de dados foi montado. Este banco contém 100 sinais provenientes de cada um dos 48 pontos de conexão disponíveis na linha de transmissão artificial.

Uma única RNA foi utilizada, contendo 20 neurônios na camada oculta. Após o treinamento, os sinais de avaliação foram submetidos ao processo de reconhecimento, estando o patamar mínimo de similaridade configurado em 0,5. O desempenho global do sistema, considerando somente os padrões conhecidos pela RNA, foi o seguinte:

- TA = 99,83 %;
- NR = 0 %;
- FP = 0,17 %.

Os resultados detalhados do ensaio são mostrados na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11. Assim como no caso do ensaio anterior, as taxas de acerto de cada conjunto

apresentado ao sistema para reconhecimento estão localizadas nas interseções entre as linhas e colunas de cada padrão.

Tabela 5.10 - Desempenho do sistema - 1/2.

		TA [%] PONTOS DE CONEXÃO CONHECIDOS PELA RNA												
	NR [%]	FP [%]	km04	km08	km12	km16	km20	km24	km28	km32	km36	km40	km44	km48
km01	0		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km02	0		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km03	0		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km04	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km05	52		0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km06	6		0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km07	0		0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km08	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km09	0		0	2	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km10	0		0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km11	0		0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km12	0	2	0	2	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0
km13	0		0	1	95	0	4	0	0	0	0	0	0	0
km14	12		0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0
km15	3		0	0	0	97	0	0	0	0	0	0	0	0
km16	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
km17	86		0	4	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
km18	7		0	0	0	0	91	2	0	0	0	0	0	0
km19	38		0	0	0	0	37	25	0	0	0	0	0	0
km20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
km21	19		0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0
km22	45		0	0	0	0	0	52	3	0	0	0	0	0
km23	4		0	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0
km24	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0



Observando as tabelas, é possível notar o seguinte padrão de comportamento de respostas:

- Para os padrões conhecidos da RNA, os sinais são corretamente identificados, tendo sido atingida uma taxa de acerto de 100 % para quase todos os padrões;
- Os padrões desconhecidos pela RNA, de forma geral, são reconhecidos como pertencentes ao padrão conhecido imediatamente posterior. Por exemplo, os sinais provenientes dos pontos de conexão desconhecidos km01, km02 e km03, foram todos indentificados como pertencentes ao padrão conhecido km04. Este tipo de resposta se repete para a maioria dos padrões desconhecidos, com algumas exceções. A maioria dos sinais provenientes do km33 (72 %), por exemplo, foi identificada como pertencente ao padrão km12, e não como pertencente ao km36.

Ainda que a resposta obtida neste ensaio não tenha sido exatamente a esperada de acordo com a hipótese levantada no Ensaio 9, é possível observar com clareza que a maioria dos sinais desconhecidos teve sua origem atribuída a padrões conhecidos próximos. Este fato permite, a princípio, que o sistema seja treinado com apenas algumas estruturas selecionadas, de preferência igualmente espaçadas. Assim, está apto a localizar macroregiões na linha de transmissão de onde podem ocorrer sinais de descargas parciais.

### **5.3.12 Ensaio 11**

Os ensaios realizados até o momento levaram em conta no máximo três isoladores por cadeia na constituição dos padrões. Entretanto, para que a metodologia funcione, é necessário que o sistema seja treinado com sinais obtidos de todos os isoladores das cadeias.

Dessa forma, é necessário verificar o comportamento do sistema quando se considera todos os isoladores. Por falta de dados, entretanto, não foi possível realizar um ensaio de localização de sinais ao longo da LT como os discutidos anteriormente. O único padrão que contém sinais de todos os isoladores é o da estrutura 017. Por este motivo, este ensaio leva em conta somente esta estrutura, e seu objetivo é verificar o comportamento do sistema frente ao reconhecimento dos padrões referentes a cada isolador.

Assim, para o treinamento da RNA foi utilizado um banco de dados com as seguintes características:

- 18 padrões considerados, correspondentes a cada isolador de cada uma das cadeias (6 isoladores por cadeia);
- Cada padrão é formado por 800 sinais;

O banco de dados para avaliação de desempenho foi montado da seguinte maneira:

- 18 conjuntos de sinais correspondentes aos padrões conhecidos;
- 100 sinais por conjunto, não utilizados para o treinamento da RNA.

Todos os sinais, lidos pela Fase A, passaram pelo processo de compressão pela aplicação do filtro de porcentagem.

Uma única RNA contendo 25 neurônios na camada oculta foi treinada, sendo os sinais de avaliação submetidos ao processo de reconhecimento em seguida. O patamar mínimo de similaridade adotado foi 0,5. O desempenho global obtido foi:

- TA = 67,33 %;
- NR = 20,89 %;
- FP = 11,78 %.

O desempenho individual dos conjuntos pode ser observado no gráfico da Figura 5.42, onde é possível observar que os conjuntos que obtiveram melhor resultado foram aqueles formados por sinais oriundos da Fase B, tendo o desempenho dos conjuntos formados pelos sinais provenientes das Fases A e C variado consideravelmente.

Ainda que os resultados denotem a aplicabilidade do sistema quando adotadas estas configurações, observa-se que seu desempenho é inferior quando comparado aos ensaios onde os padrões eram formados por sinais de menor similaridade, isto é, seus pontos de origem estavam espaçados entre si em distâncias de quilômetros, e não de poucos centímetros.

Dessa forma, o ideal é que para se avaliar a capacidade do sistema de reconhecer sinais de todos os isoladores de diversas estruturas, sejam coletados mais sinais em campo, completando os bancos de dados das demais estruturas. Em

seguida, um ensaio nos moldes do Ensaio 8 deve ser realizado. Entretanto, isso só será possível em um desenvolvimento futuro.

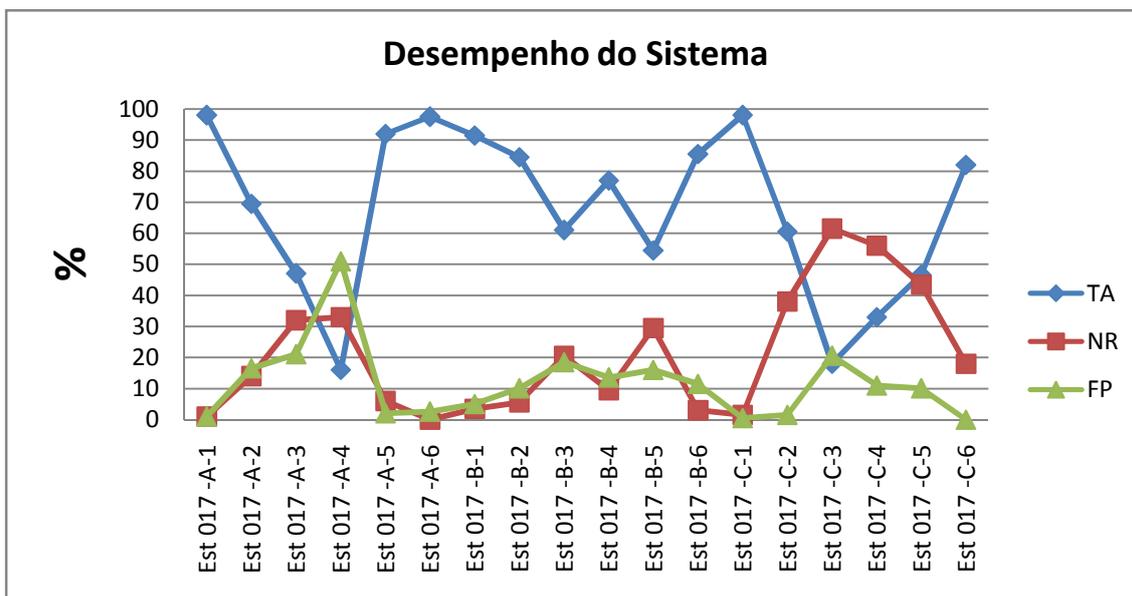


Figura 5.42 - Desempenho individual dos conjuntos de sinais para avaliação.

## 5.4 Ensaio Cruzado

Uma das grandes dificuldades detectadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho é o fato de que o sistema, até o momento, teve que ser treinado com os próprios sinais coletados da linha de transmissão. Realizado dessa forma, o procedimento de set-up do sistema torna-se muito trabalhoso. O ideal é que os sinais utilizados para treinamento possam ser gerados de alguma outra forma que não sua geração na própria linha de transmissão. Uma das possibilidades levantadas é a utilização da linha de transmissão artificial do LAT-EFEI para a geração desses sinais, isto é, a realização de uma simulação física dos sinais.

Para testar essa hipótese, foram coletados sinais dos 48 pontos de conexão disponíveis na linha de transmissão artificial, gerados por uma cadeia em cujo isolador mais próximo da fase foi instalado o dispositivo de simulação de descargas parciais. A estes sinais foi aplicado o algoritmo de compressão filtro de porcentagem. Em seguida, os sinais foram separados em dois bancos de dados: um para treinamento do sistema e outro para a avaliação de desempenho. O banco de dados de treinamento foi formado por 1600 sinais por padrão, enquanto que o banco de avaliação de desempenho (aferição do sistema) foi formado por 100 sinais por padrão.

Devido aos constantes erros observados durante a fase de treinamento, optou-se pela utilização de um conjunto de 9 RNAs, cujas respostas foram combinadas (média aritmética) para resultar em uma resposta final. Cada RNA contou com 15 neurônios na camada oculta e a configuração do patamar mínimo de similaridade foi de 0,5.

Após o treinamento, o sistema foi aferido com sinais coletados em laboratório, que foram submetidos à fase de reconhecimento, obtendo-se o seguinte resultado global:

- TA = 96,31 %;
- NR = 3,69 %;
- FP = 0 %.

Os resultados individuais são mostrados na Figura 5.43.

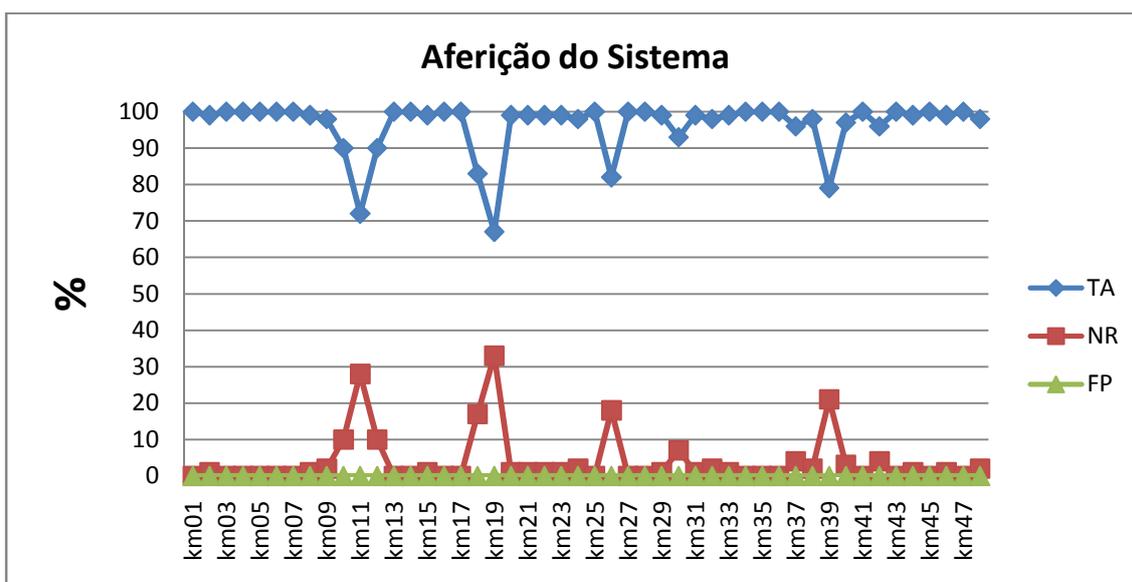


Figura 5.43 - Avaliação do desempenho do sistema para sinais de laboratório (aferição).

Tendo a etapa de aferição apresentado resultados satisfatórios, mostrando que o sistema obteve sucesso no treinamento das RNAs, foram apresentados ao sistema, para reconhecimento, sinais coletados em campo. Estes sinais, também devidamente comprimidos pelo filtro de porcentagem, foram organizados da seguinte forma:

- Oito conjuntos de sinais correspondentes aos padrões Est 001, Est 017, Est 051, Est 086, Est 106, Est 144, Est 166 e Est 176;
- 200 sinais por conjunto;

- Todos os sinais foram gerados no isolador mais próximo da fase, na cadeia instalada na Fase A;
- A aquisição dos sinais foi realizada pela Fase A.

Considerando o comprimento elétrico das duas linhas de transmissão envolvidas, a correspondência entre elas é a mostrada na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Correspondência entre a LT Rosário x São Gabriel e LT do LAT-EFEI.

	Estruturas da LT Rosário x São Gabriel							
	Est 001	Est 017	Est 051	Est 086	Est 106	Est 144	Est 166	Est 176
Distância Aproximada (km)	0,3	5,1	15,3	25,8	31,8	43,2	49,8	52,8
Correspondência com a LT Artificial (PC)	km01	km05	km15	km26	km32	km43	km48	km48

Assim, caso os sinais obtidos em laboratório fossem suficientemente similares aos obtidos em campo, os sinais de campo deveriam ser reconhecidos como provenientes dos padrões mostrados na Tabela 5.12 ou pelo menos de padrões próximos.

Após a submissão dos sinais de campo ao sistema para reconhecimento, entretanto, o resultado esperado não foi obtido, como pode ser visto na Tabela 5.13. De forma a facilitar o entendimento, a tabela foi reduzida, constando somente os padrões que foram identificados pelo sistema. Como pode ser observado, de uma forma geral, o sistema identificou os sinais provenientes de todas as estruturas da LT Rosário x São Gabriel como sendo provenientes do km33 da LT artificial. Este resultado mostra que os sinais de ambas as linhas não possuem similaridade suficiente entre si para que a LT artificial seja utilizada para este fim.

Tabela 5.13 - Desempenho do sistema com os sinais de campo submetidos às RNAs treinadas com sinais de laboratório.

	NR [%]	TA [%] PADRÕES CONHECIDOS PELAS RNAs	
		km09	km33
Est 001	10	7,5	82,5
Est 017	0	4	93
Est 051	0	0,5	99,5
Est 086	0	1	99
Est 106	0	1	99
Est 144	0	0,5	99
Est 166	0	1	99
Est 176	0	1	99

Capítulo 6

---

## Discussões e Conclusões

## 6.1 Sistema e Infraestrutura para Aquisição de Sinais

O sistema desenvolvido e a infraestrutura necessária para seu funcionamento mostraram-se, ao longo dos ensaios, adequados à proposta. Tanto hardware quanto software permitiram que o objetivo dessa tese fosse atingido, isto é, que a metodologia proposta fosse desenvolvida e validada em uma linha de transmissão real de 69 kV e 60 km de extensão.

Apesar de sofrerem atenuação, os sinais provenientes das descargas parciais externas puderam ser lidos em ambas as extremidades da linha de transmissão Rosário x São Gabriel, o que confirma as hipóteses 1 e 5, citadas no Capítulo 3. Além disso, o nível de ruído presente durante a leitura dos sinais não inviabilizou sua utilização para o fim previsto na metodologia, confirmando a hipótese 4.

A utilização dos TCs disponíveis na SE Rosário e na SE São Gabriel como acopladores capacitivos foi realizada com sucesso, assim como na fase de desenvolvimento em laboratório, confirmando a hipótese 2. Entretanto, não é possível generalizar este resultado para os demais modelos de TCs desta e de outras classes de tensão. Para isso, é necessário que se realize um amplo estudo sobre o comportamento destes equipamentos quando utilizados para esta função.

A utilização de apenas uma fase para a leitura de sinais gerados em todas as fases foi aplicada com sucesso, confirmando a hipótese 7. Assim, parte da infraestrutura montada para os ensaios pode ser descartada, devendo restar somente o necessário para a operação em uma única fase (sensores, cabos, etc.).

As placas de aquisição escolhidas, entretanto, mostraram desempenho insuficiente ao digitalizar sinais gerados em locais muito distantes do ponto de aquisição, o que pode ser observado nos ensaios discutidos no Capítulo 5. Estes ensaios apresentaram uma variação de desempenho por estrutura da LT Rosário x São Gabriel. Tal comportamento se mostrou mais ou menos acentuado de acordo com as configurações adotadas em cada ensaio. Entretanto, os seguintes pontos comuns podem ser destacados:

- As estruturas mais próximas do ponto de aquisição de sinais apresentaram melhores resultados, principalmente da Estrutura 001 à Estrutura 086, a qual está distante do ponto de aquisição de sinais de aproximadamente 26 km;

- Em média, o sistema apresenta redução de desempenho em função da distância do ponto de aquisição. Entretanto, os piores resultados observados se referem à penúltima estrutura (Est 166), e não à última (Est 176), que está situada a uma distância de aproximadamente 53 km do ponto de aquisição de sinais.

Para entender o motivo dessa variação, são mostrados a seguir exemplos de sinais provenientes de cada uma dessas estruturas, da Figura 6.1 à Figura 6.8.

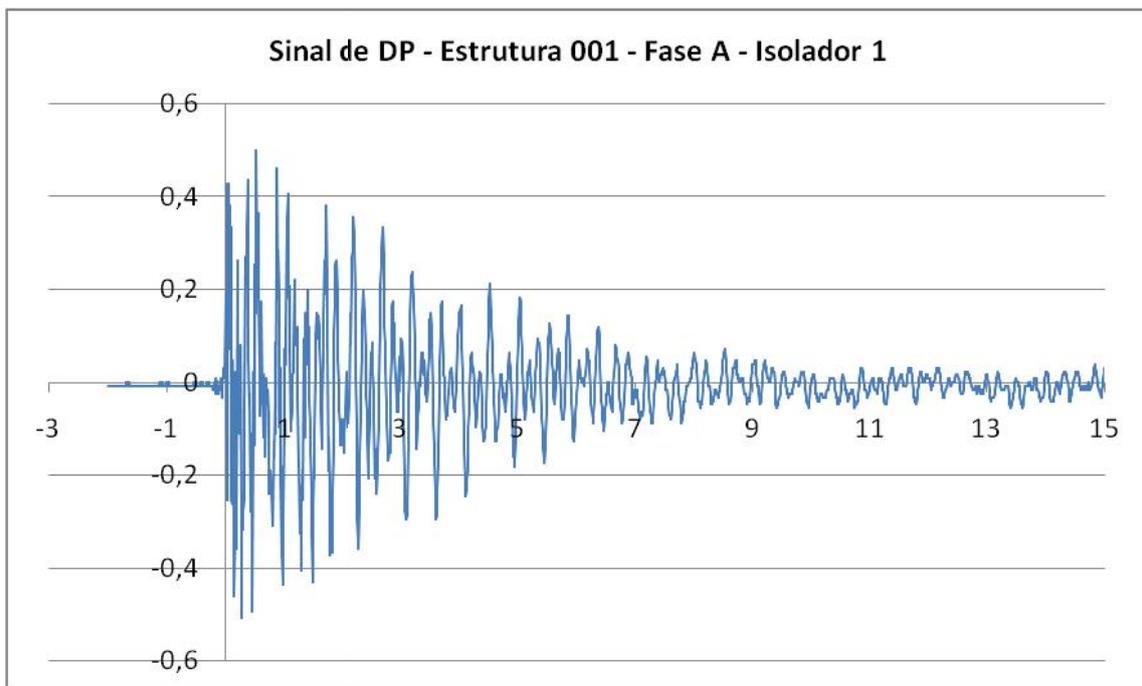


Figura 6.1 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 001 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

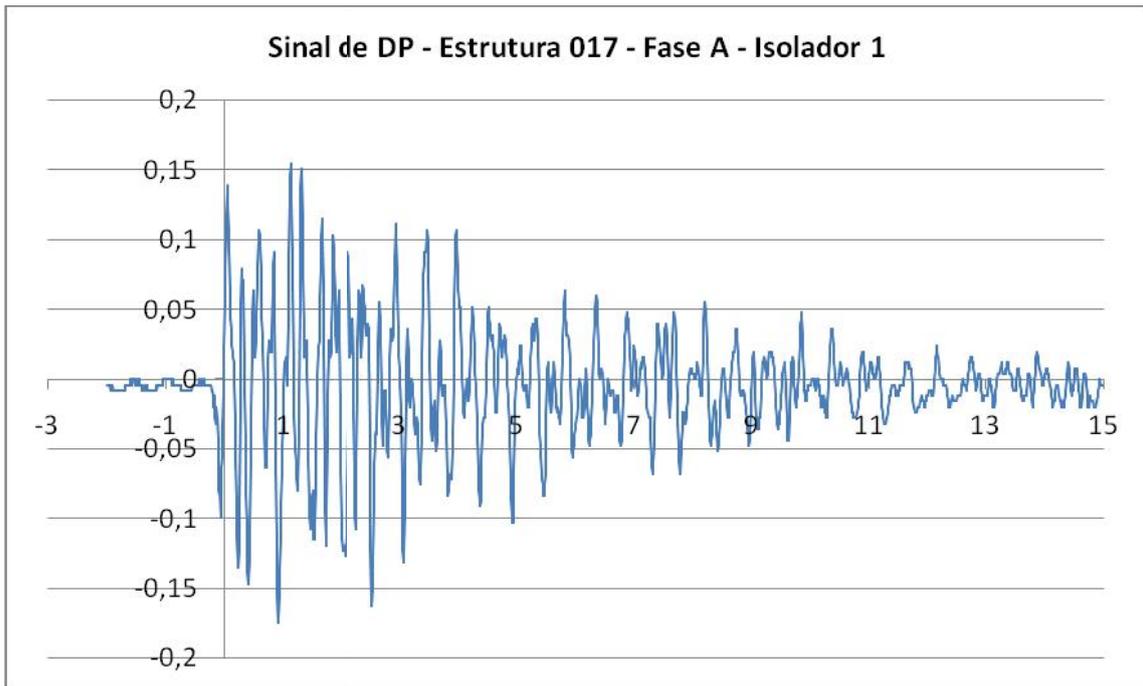


Figura 6.2 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 017 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

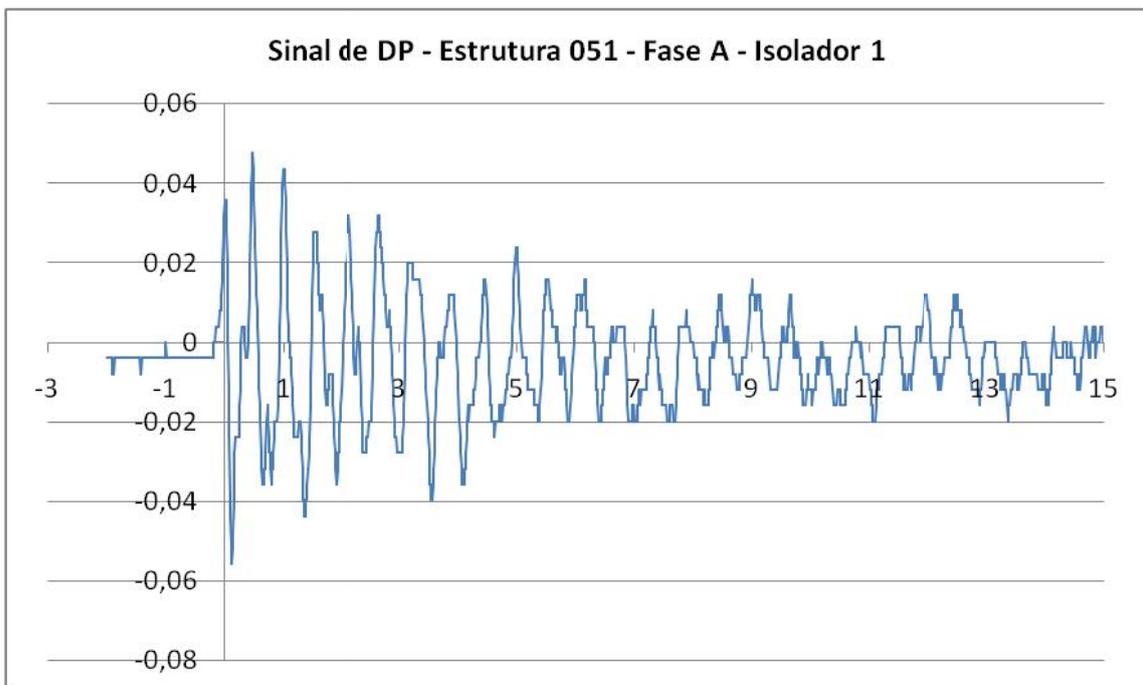


Figura 6.3 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 051 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

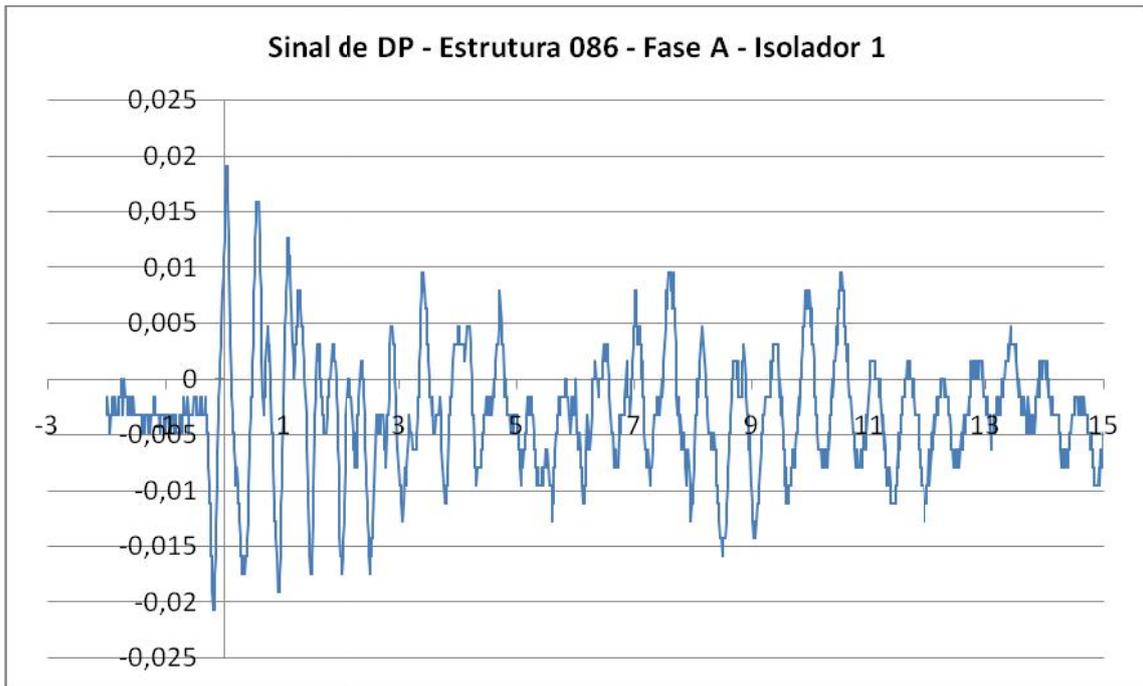


Figura 6.4 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 086 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

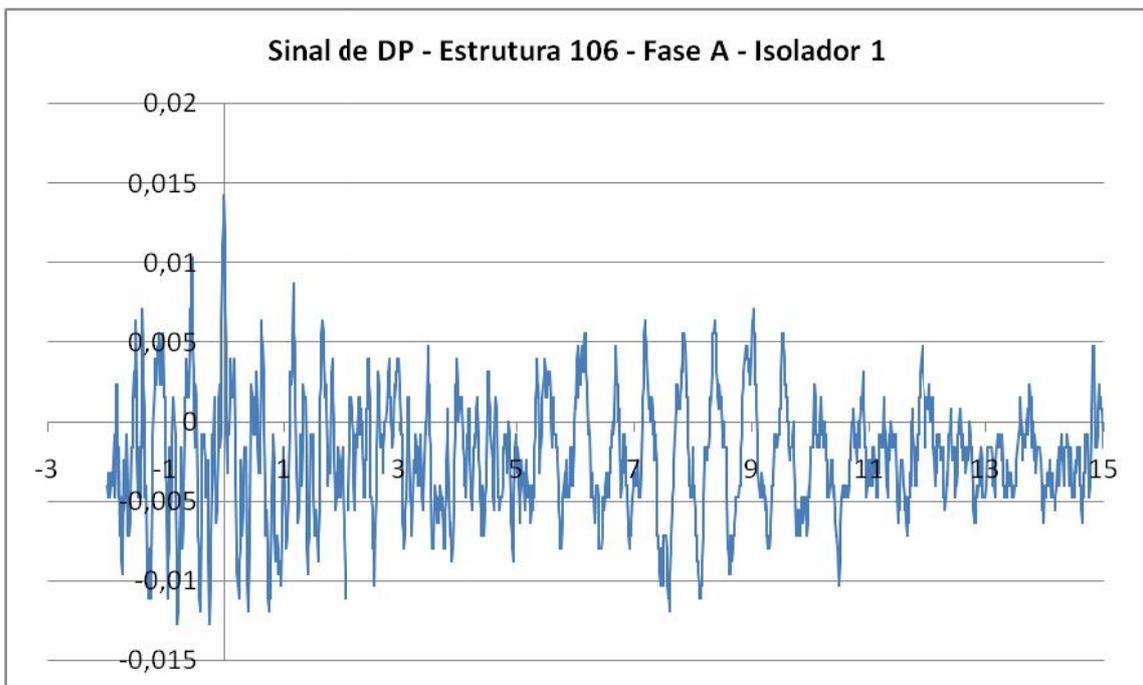


Figura 6.5 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 106 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

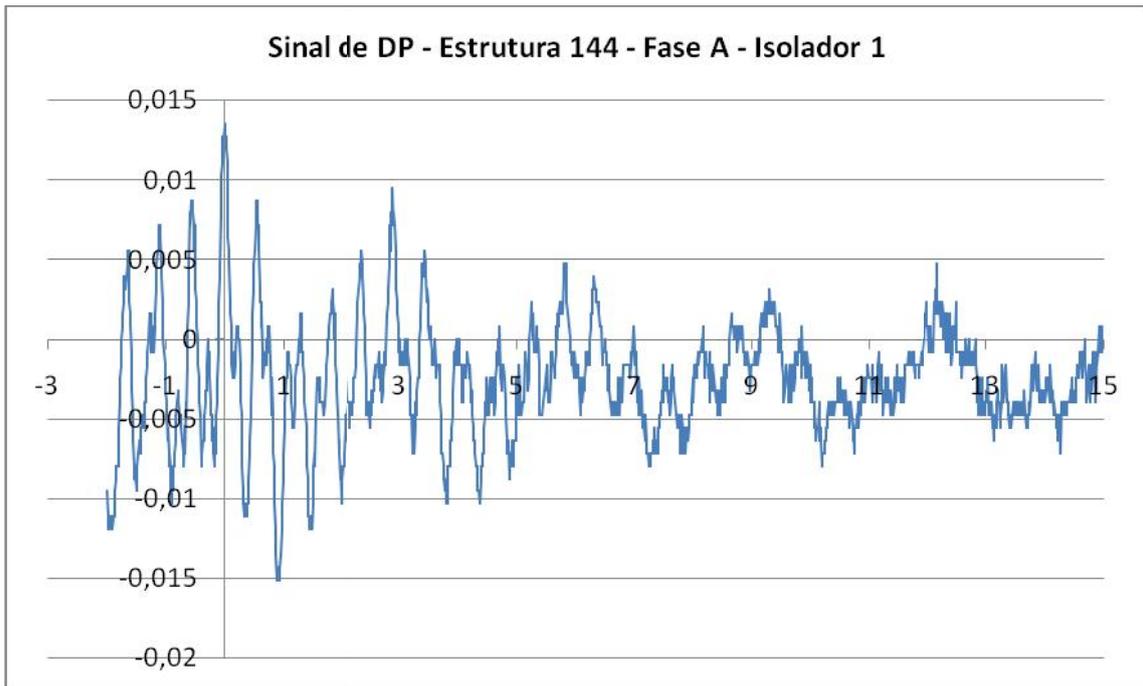


Figura 6.6 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 144 - Amplitude [V] x Tempo [μs].

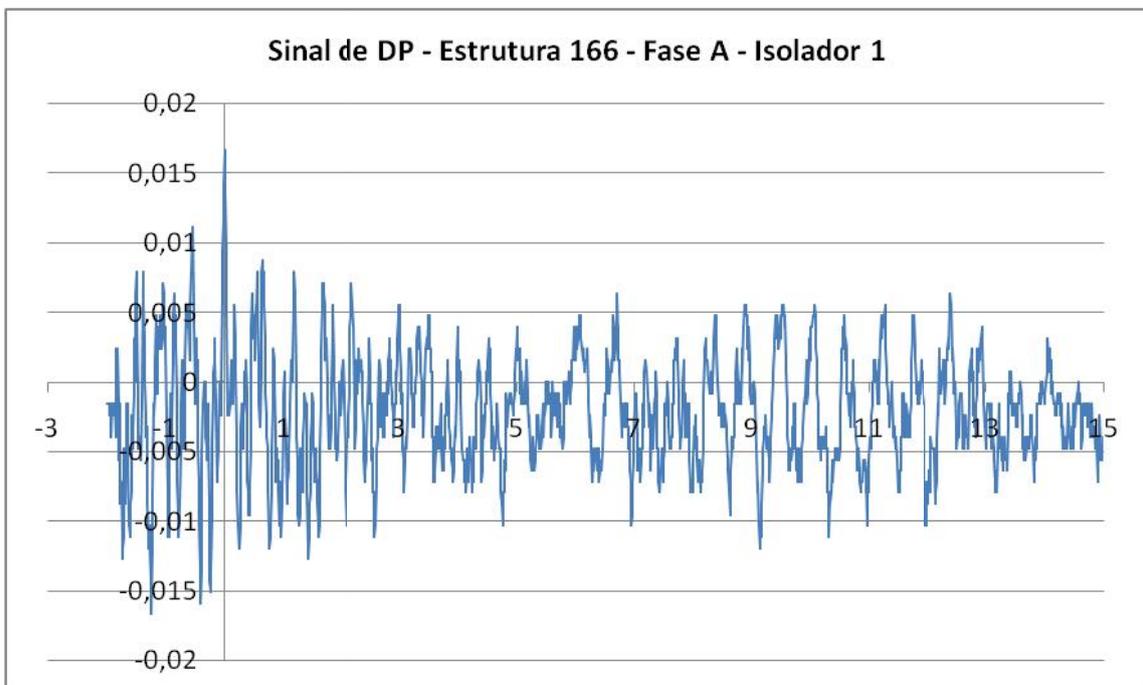


Figura 6.7 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 166 - Amplitude [V] x Tempo [μs].

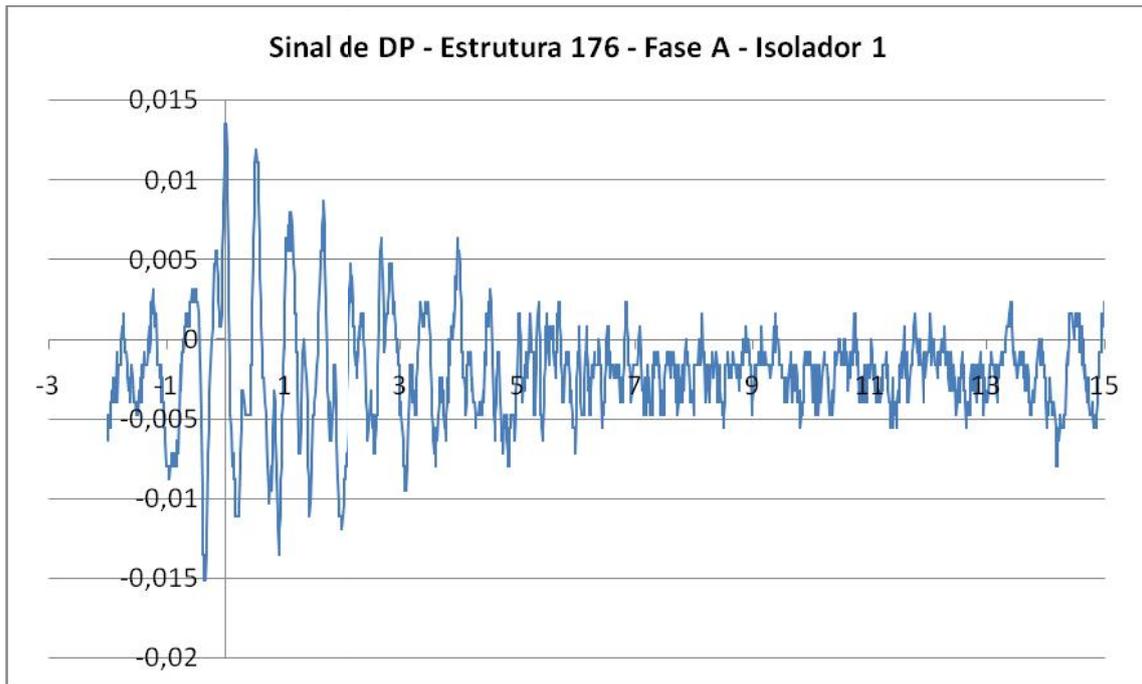


Figura 6.8 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 176 - Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s].

Conforme pode ser observado, existe uma tendência de queda da amplitude do sinal com o distanciamento da estrutura do ponto de aquisição, conforme esperado. Entretanto, como a janela de aquisição foi mantida inalterada (*range*), o processo de digitalização dos sinais resultou em representações pobres para os sinais das estruturas mais distantes. Estes resultados contribuíram para que as RNAs tivessem dificuldades em aprender os padrões dos sinais dessas estruturas, fazendo com que o sistema apresentasse pior desempenho para as estruturas mais distantes. Este comportamento não foi observado em laboratório, praticamente não havendo diferença entre os desempenhos individuais por ponto de conexão, conforme pode ser visto no Ensaio 10.

Este fato evidencia que as configurações adotadas no processo de digitalização, quando realizado a partir de uma só subestação, assim como a própria capacidade da placa de aquisição, não são adequadas para a aplicação em campo. Assim, duas formas possíveis de se mitigar este problema são:

- Utilização de mais de um ponto de aquisição;
- Utilização de uma placa de aquisição com maior resolução vertical.

A primeira opção, para o caso desta tese, é a mais viável, uma vez que já há um segundo ponto de aquisição instalado na SE São Gabriel. Concebido para operar de forma independente nas duas subestações, os sistemas apresentam respostas complementares. Entretanto, o ideal é que os diagnósticos obtidos em ambas as subestações sejam de alguma forma combinados, gerando um único diagnóstico.

Já a utilização de uma placa de aquisição com maior resolução vertical é a opção mais viável no caso do projeto de um novo sistema, considerando linhas de transmissão de características similares às da LT Rosário x São Gabriel. O custo de instalação do sistema com uma placa de 12 bits em apenas uma das extremidades da linha apresenta custo menor que a instalação de um sistema em ambas as extremidades, baseado em placas de 8 bits.

A leitura dos sinais não foi prejudicada pela ocorrência simultânea de descargas parciais externas em pontos diversos da linha de transmissão. Durante a realização dos ensaios, foram gerados sinais em mais de uma cadeia de isoladores ao mesmo tempo, sem que a aquisição fosse prejudicada, confirmando a hipótese 6. Ainda que em alguns momentos os sinais possam se sobrepor, a maioria dos sinais lidos não apresentou este tipo de interferência.

Por fim, uma das grandes vantagens do sistema implementado é a possibilidade de ser operado pela internet. Além de dispensar a presença de operadores nas subestações em que está instalado, esse fato permite que os computadores das subestações operem apenas na tarefa de aquisição de sinais, podendo o software de localização de cadeias de isoladores danificadas estar instalado em um computador remoto.

## **6.2 Ensaio**

### **6.2.1 Desempenho em Função da Constituição dos Padrões**

A forma como os padrões são constituídos pode influenciar consideravelmente no desempenho do sistema. De modo geral, quanto maior a quantidade de subpadrões utilizados para formar um padrão, menor o desempenho do sistema.

Considerando as configurações de RNAs e bancos de dados praticamente iguais (20 neurônios na camada oculta e 800 ou 900 sinais de treinamento por padrão), tome-se como exemplo o Ensaio 3. Neste ensaio cada um dos padrões foi formado apenas pelo subpadrão de sinal correspondente aos sinais provenientes dos

isoladores mais próximos das fases, sempre nas cadeias de isoladores instaladas na Fase A. Configurado dessa forma, o sistema obteve taxa de acerto global de 85,38 %. No Ensaio 6, ao se formar os padrões com sinais provenientes das três fases, mantendo sempre o dispositivo de simulação de descargas parciais no isolador mais próximo da fase, a taxa de acerto global do sistema caiu para 83,79 %. No caso do Ensaio 7, em que os padrões foram constituídos de sinais provenientes sempre da Fase A, porém obtidos em três isoladores, a taxa de acerto global foi de 86,88 %, constituindo em uma exceção por apresentar desempenho pouco superior. Por fim, no Ensaio 8 os padrões foram constituídos pelos subpadrões de sinais obtidos nas três fases e em três isoladores, obtendo-se uma taxa de acerto global de 74,37 %. A Tabela 6.1 detalha um pouco mais a comparação entre estes ensaios.

Tabela 6.1 - Comparação entre os ensaios.

	Desempenho Global [%]		
	TA	NR	FP
Ensaio 3	85,38	9,63	5,00
Ensaio 6	83,79	8,08	8,13
Ensaio 7	86,88	7,79	5,42
Ensaio 8	74,37	15,19	10,44

É possível notar que não há diferenças significativas entre o ensaio realizado com um único subpadrão por padrão (Ensaio 3) e os ensaios realizados com três subpadrões por padrão (Ensaio 6 e 7). Entretanto, quando a quantidade de subpadrões triplica (Ensaio 8), é notada uma queda de desempenho considerável do sistema.

Outro fator que influencia o desempenho do sistema no que se refere aos padrões é a quantidade de sinais utilizados no treinamento. Este comportamento pode ser observado nos resultados mostrados no Ensaio 4. Quanto maior a quantidade de sinais, melhores os resultados obtidos.

### 6.2.2 Ajuste do Sistema

O desempenho do sistema depende da sua configuração na fase de treinamento e no seu ajuste na fase de reconhecimento.

De modo a se conseguir bons resultados na fase de treinamento, deve-se buscar a combinação ótima entre as seguintes variáveis:

- Quantidade de sinais de cada subpadrão;

- Quantidade de neurônios da camada oculta da RNA.

Uma vez treinado, porém, o sistema ainda pode ser ajustado pelo patamar mínimo de similaridade. Este ajuste depende tanto do efeito desta variável no resultado global quanto no resultado individual, como fica evidente no Ensaio 5. Se o diagnóstico final do sistema for dado por meio de um histograma, como é o caso da versão desenvolvida em linguagem C, mostrada no Capítulo 4, este ajuste pode influenciar no tempo em que o sistema levará para montar um diagnóstico confiável. Sendo a ocorrência de descargas parciais um fenômeno intermitente e altamente dependente das condições climáticas, como discutido no Capítulo 2, se estas ocorrerem com baixa taxa de repetição e em poucos momentos, um valor alto de P fará com que o sistema demore muito para contabilizar estes eventos. Em contrapartida, um baixo valor de P pode fazer com que a taxa de falso-positivo aumente consideravelmente.

Das variáveis envolvidas no diagnóstico, as mais importantes são a taxa de acertos e a taxa de falso-positivo. Esta última deve possuir o valor mais baixo possível, pois o fornecimento de falsos diagnósticos é muito mais grave que a falta de um diagnóstico (NR), podendo acarretar em transtornos operacionais para as equipes de manutenção.

Assim, pode-se dizer que a escolha do valor de P depende de cada caso em que o sistema for aplicado, devendo haver uma relação de compromisso entre a qualidade dos resultados obtidos (TA, NR e FP) e a agilidade requerida no fornecimento do diagnóstico.

### **6.2.3 Escolha das Estruturas a Serem Conhecidas Pelo Sistema**

Conforme já comentado, para que o sistema desenvolvido opere plenamente é necessário que o mesmo seja treinado com sinais provenientes de todos os isoladores de todas as cadeias da linha de transmissão. Entretanto, levando-se em conta que os sinais utilizados no treinamento são coletados da própria linha de transmissão, esta pode ser uma tarefa muito complicada.

O Ensaio 10, realizado em laboratório, mostrou que os sinais provenientes de pontos de conexão próximos possuem similaridade entre si, e que ao submeter um sinal desconhecido ao sistema, este pode ser reconhecido como pertencente à um padrão próximo. Tal comportamento se mostrou bastante claro nesse ensaio. No Ensaio 9 o mesmo experimento foi realizado com sinais de campo, porém os resultados não foram conclusivos, principalmente pelo reduzido número de padrões

disponíveis. Para que se possa analisar com mais confiabilidade este comportamento em campo e seja possível confirmar a hipótese 8, é recomendado que se obtenha sinais de mais estruturas, o que não foi possível neste momento.

A utilização de menos estruturas no treinamento do sistema irá resultar em um diagnóstico um pouco diferente daquele fornecido pelo sistema treinado com todas as estruturas. No caso de todas as estruturas serem conhecidas, ao reconhecer um sinal o sistema indica exatamente a sua origem. Já no caso de se utilizar menos estruturas, o diagnóstico poderia ser dado da seguinte forma:  $EST \pm$  , onde EST é a estrutura conhecida pelo sistema e é a quantidade de estruturas desconhecidas entre as estruturas conhecidas. O funcionamento do sistema dessa forma é válido, uma vez que restringe a busca pela cadeia de isoladores com falhas à uma pequena região da linha de transmissão.

#### **6.2.4 Treinamento do Sistema com Sinais Não Originados na Própria Linha de Transmissão**

Sabendo da dificuldade de se treinar o sistema de campo com sinais coletados da própria linha de transmissão, foi levantada a hipótese de se utilizar sinais simulados fisicamente em laboratório, utilizando para isso a linha de transmissão artificial do LAT-EFEI, conforme explicado no Ensaio 11. Os resultados deste ensaio, porém, descartam esta possibilidade.

Apesar da LT artificial oferecer uma aproximação adequada de uma LT real para alguns estudos, inclusive para o desenvolvimento desta metodologia, ela não oferece condições para que seus sinais sejam suficientemente similares aos de campo do ponto de vista das RNAs. Esta diferença é facilmente notada até mesmo visualmente quando se compara os exemplos de sinais da Figura 6.9 e da Figura 6.10, provenientes do km01 da LT artificial e da Estrutura 001 (Fase A) da LT Rosário x São Gabriel. A diferença também é evidente quando se observa as respectivas composições espectrais, mostradas na Figura 6.11 e na Figura 6.12.

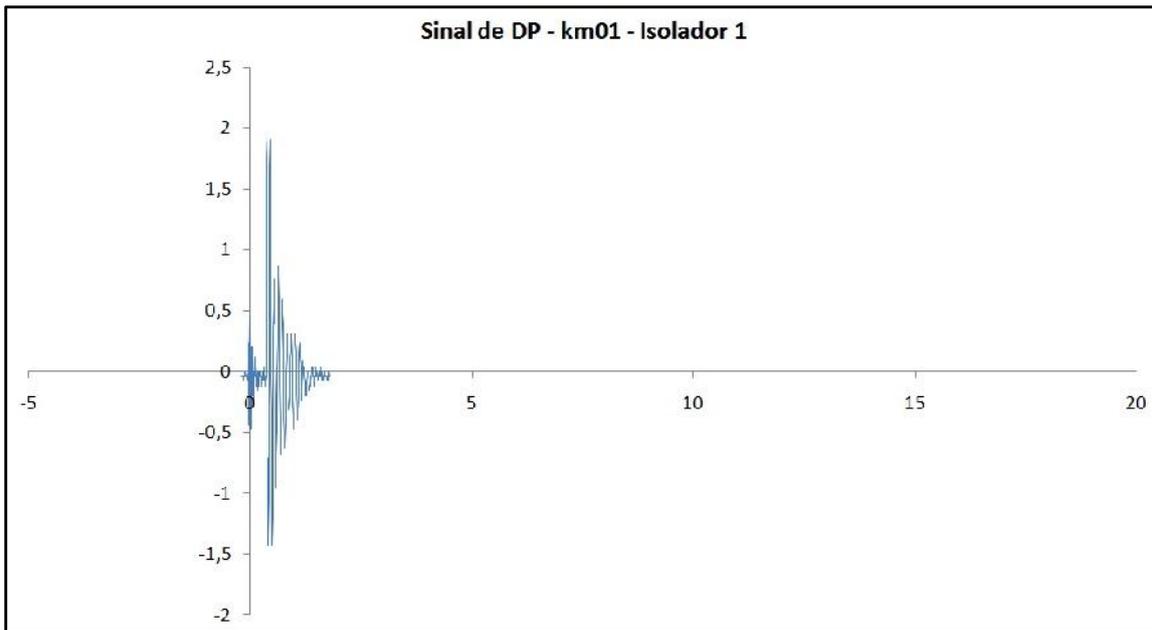


Figura 6.9 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado no km01 da LT do LAT-EFEI, em uma cadeia de 5 isoladores, com o dispositivo de simulação de DPs instalado no isolador mais próximo da fase (Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s]).

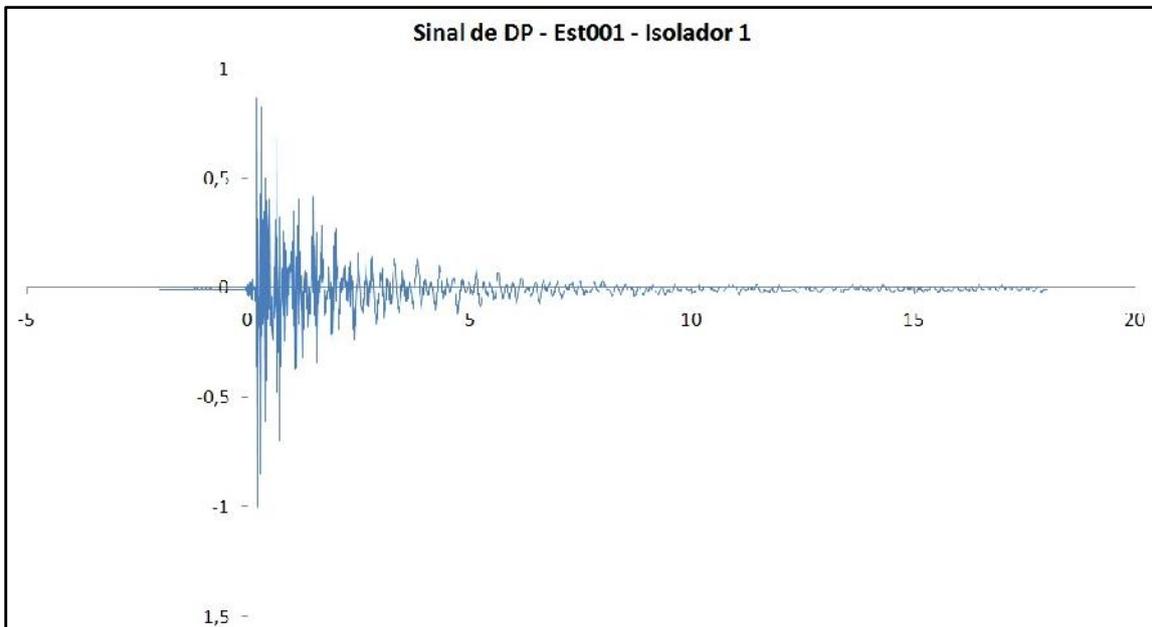


Figura 6.10 - Exemplo de sinal de descarga parcial gerado na Estrutura 001 da LT Rosário x São Gabriel, em uma cadeia de 6 isoladores, com o dispositivo de simulação de DPs instalado no isolador mais próximo da fase (Amplitude [V] x Tempo [ $\mu$ s]).

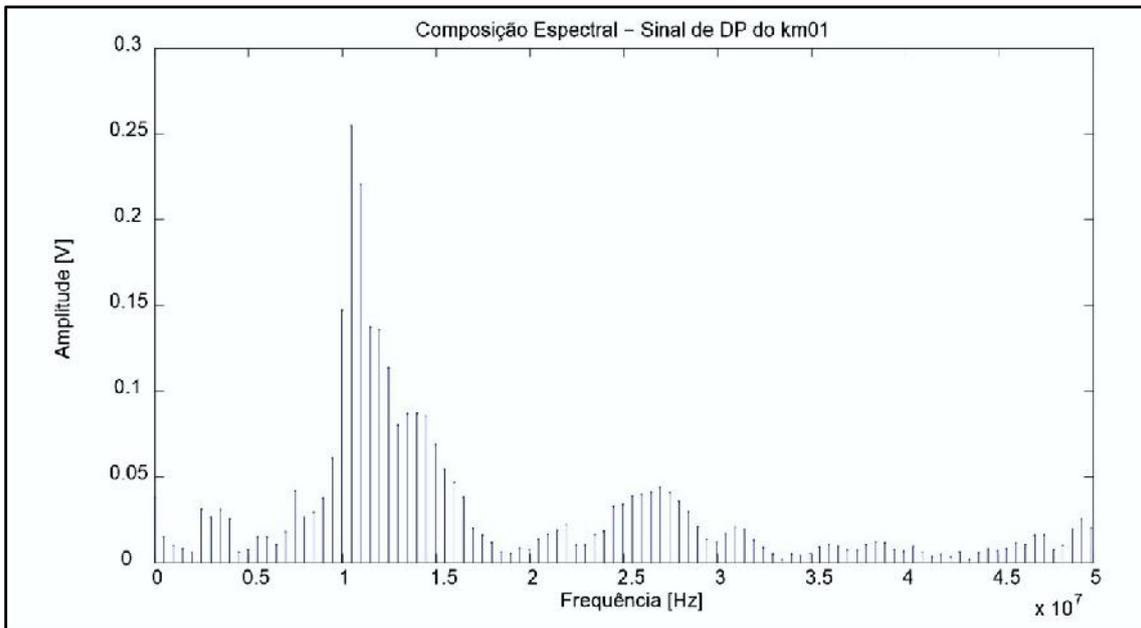


Figura 6.11 - Composição espectral do sinal mostrado na Figura 6.9.

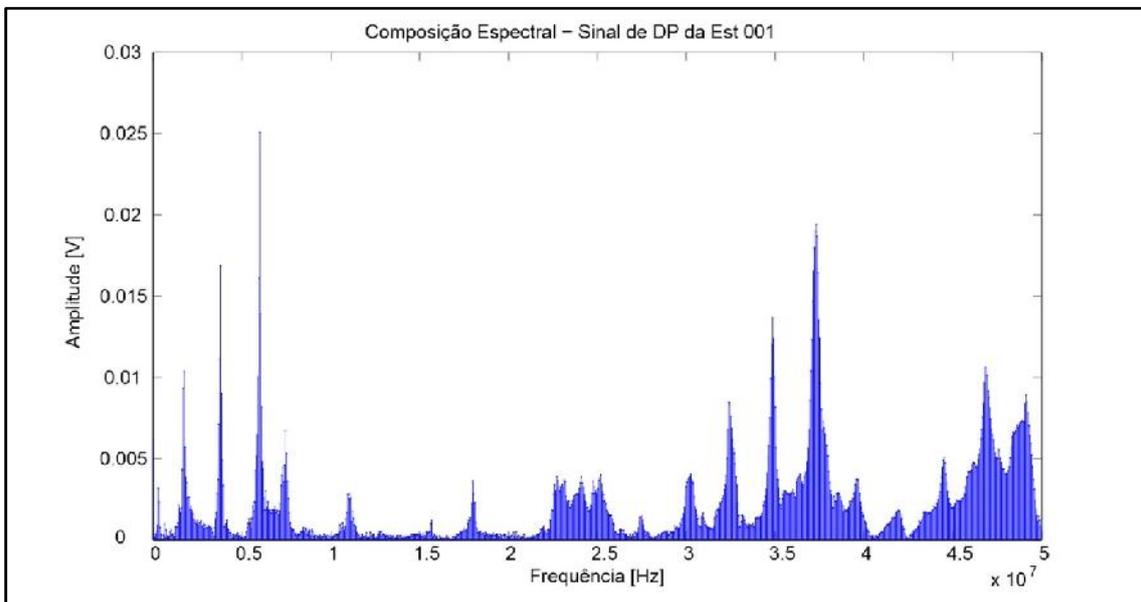


Figura 6.12 - Composição espectral do sinal mostrado na Figura 6.10.

As diferenças entre os sinais gerados nas LTs podem ser creditadas principalmente aos seguintes fatores:

- Distribuição de resistência, capacitância e indutância realizada de forma diferente nas duas linhas de transmissão;
- Diferentes valores de resistência, capacitância e indutância;
- A LT artificial é monofásica, não levando em conta a interação entre as fases existentes na LT Rosário x São Gabriel.

Além disso, outros fatores podem contribuir para as diferenças entre os sinais, sendo que a LT Rosário x São Gabriel sofre influência de fatores não encontrados em laboratório, como variações climáticas, variação não uniforme das capacitâncias devido às ao relevo e da flecha dos cabos, existência de outros equipamentos na linha, atenuação devido à grande quantidade de conexões, etc.

### **6.3 Algoritmos e Ferramentas Computacionais**

A escolha das RNAs como técnica de reconhecimento de padrões se mostrou adequada ao propósito dessa tese. As características das redes empregadas, baseadas principalmente nas RNAs utilizadas na etapa de desenvolvimento de laboratório, permitiram que se construísse um software de operação e entendimento simples. A utilização das variáveis de análise de desempenho TA, NR e FP, aliadas à variável de ajuste P, permitem que qualquer usuário sem conhecimento avançado sobre RNAs possa treinar e operar o sistema.

O desenvolvimento do software de reconhecimento de padrões em Matlab<sup>®</sup> conferiu flexibilidade e rapidez na montagem dos algoritmos, porém ao custo de um grande esforço computacional. Este inconveniente foi parcialmente contornado com a aplicação do algoritmo de compressão filtro de porcentagem. A utilização deste algoritmo não resultou em perda de desempenho das RNAs, mostrando-se uma escolha acertada para este trabalho.

### **6.4 Metodologia - Conclusões e Procedimento Sugerido**

A hipótese 3, que define a base da metodologia proposta nessa tese, foi confirmada através da realização dos ensaios com as RNAs, onde foi possível observar que os padrões dos sinais de descargas parciais externas dependem do

caminho elétrico entre seu ponto de origem e o ponto de leitura. Isso permitiu que os padrões de sinais fossem associados às localizações das cadeias de isoladores com falhas ao longo da linha de transmissão.

Entretanto, deve-se destacar os seguintes pontos sobre a aplicação da metodologia:

- Para que o software esteja apto a localizar cadeias de isoladores danificadas ao longo linha, o mesmo deve ser treinado com exemplos de sinais provenientes de todos os isoladores de todas as cadeias da linha. Este procedimento é aceitável do ponto de vista acadêmico, porém torna inviável sua aplicação comercial;
- Para o caso específico de laboratório, é possível treinar o software com menos padrões e ainda assim localizar a cadeia de isoladores danificada, porém ao custo de perda de precisão da resposta. Neste caso, a resposta é dada na forma de um conjunto de torres, e não a torre específica que contém a cadeia em questão;
- A quantidade de sinais utilizada no treinamento e o número de neurônios na camada oculta são as variáveis de maior impacto nesta etapa. O patamar mínimo de similaridade, por sua vez, é a variável que mais influencia na etapa de reconhecimento. Juntas, estas três variáveis ditam o comportamento do sistema;
- Das variáveis utilizadas para a medição de desempenho, TA, NR e FP, as mais importantes são TA e FP. A taxa de falso-positivo, inclusive, pode ser considerada como a variável mais crítica do sistema, pois indica a porcentagem de diagnósticos equivocados emitidos. Seu valor deve estar sempre próximo de zero;
- Para que a metodologia possa ser aplicada corretamente, o software deve ser treinado com sinais provenientes da linha de transmissão em questão. A simulação física a partir de uma linha artificial não é possível no atual estágio de desenvolvimento. Este fato torna a metodologia inviável para aplicação comercial neste momento.

O procedimento sugerido para a aplicação da metodologia é o seguinte:

- Coletar sinais de descargas parciais gerados em todos os isoladores da linha de transmissão. A quantidade mínima sugerida por subpadrão é de 1000 sinais;
- Montar os bancos de dados de treinamento e teste de desempenho da seguinte forma: 80% dos sinais destinados ao treinamento e 20% destinados ao teste de desempenho;
- Aplicar o algoritmo filtro de porcentagem em todos os sinais;
- Treinar o software para as seguintes quantidades de neurônios na cada oculta da RNA (utilizar uma única rede): 15, 20, 25 e 30. Para cada uma dessas configurações, executar o teste de desempenho com  $P = 0,5$ . Selecionar a configuração de RNA que apresente, no resultado global, a menor taxa de falso-positivo, desde que a taxa de acerto esteja acima de 50%;
- Executar o teste de desempenho, variando o patamar mínimo de similaridade entre 0,5 e 0,9 em passos de 0,1. Selecionar o valor para o qual o sistema apresentar a menor FP, desde que  $TA \geq 50\%$ , tanto no resultado global quanto nos resultados individuais;
- Uma vez treinado e colocado em funcionamento o sistema, deve-se analisar os sinais lidos em intervalos mínimos de uma semana.

## 6.5 Publicações

O desenvolvimento deste trabalho resultou na publicação dos seguintes artigos em revistas:

- Capelini, R. M., Adami, J. F., Martinez, M. L. B., Parentoni, M. F. C., *Development of a System for Detecting and Locating Damaged Insulator Strings With Signals Collected at Substations*, Ingeniería e Investigación, Vol. 35, No. 1, pp. 43-48, Bogotá, Colombia, 2015.
- Adami, J. F., Capelini, R. M., Martinez, M. L. B., Parentoni, M. F. C., Azevedo, F. L., *Localização Remota de Cadeias de Isoladores Danificadas em Linhas de Transmissão*, Revista SODEBRAS, Vol. 8, N° 87, pp. 60-66, Brasil, 2013.

- Capelini, R. M., Adami, J. F., Martinez, M. L. B., Parentoni, M. F. C., Sene, I., *Use of Artificial Neural Networks for Location of Defective Insulators in Power Lines*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 6, pp. 1308-1314, David Publishing, New York, NY, USA, 2012.

Além destes, foram publicados os seguintes artigos em congressos:

- Homrich, C., Capelini, R. M., Adami, J. F., Parentoni, M. F. C., Martinez, M. L. B., Azevedo, F. L., *Método de Localização Remota de Isoladores Defeituosos em Linhas de Transmissão*, Encontro Regional Ibero-americano do Cigré (ERIAC), Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2013.
- Capelini, R. M., Martinez, M. L. B., Parentoni, M. F. C., Azevedo, F. L., Adami, J. F., Homrich, C., *Identificação Remota de Cadeias de Isoladores Danificadas*, International Conference on Industry Applications (INDUSCON), IEEE, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2012.
- Capelini, R. M., Parentoni, M. F. C., Martinez, M. L. B., Azevedo, F. L., Adami, J. F., Homrich, C., *Localização de Cadeias de Isoladores Danificadas em Linhas de Transmissão Através da Análise de Descargas Parciais de Corona*, Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2012.

## 6.6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o intuito de se continuar o trabalho apresentado nesta tese, são sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Estudar detalhadamente as similaridades entre os sinais de descargas parciais naturalmente gerados em cadeias de isoladores e os sinais obtidos com a aplicação do dispositivo de simulação. Isso permitirá que a metodologia possa ser aplicada para reconhecer descargas parciais externas geradas naturalmente, mesmo quando o sistema for treinado com sinais obtidos de simulações físicas;
- Continuar o estudo do comportamento do sistema ao diagnosticar sinais provenientes de padrões desconhecidos, com o objetivo de se testar corretamente a hipótese 8. Para isso, devem ser coletados sinais de mais estruturas da linha de transmissão real;

- Avaliar detalhadamente se existem características comuns entre os sinais obtidos da LT artificial e da LT Rosário x São Gabriel, que permitam que o sistema possa ser treinado com os sinais gerados em laboratório e operar corretamente em campo;
- Desenvolver, por meio de simulações computacionais, sinais para o treinamento do sistema, de modo eliminar a necessidade de se realizar o treinamento a partir de sinais coletados da própria linha de transmissão. Este é passo mais importante a ser dado para que a metodologia seja aplicada comercialmente;
- Avaliar outros tipos de RNAs e também outras técnicas que possam realizar o reconhecimento de padrões, apresentando desempenho superior ao obtido até o momento;
- Adaptar o sistema para operar em linhas de transmissão mais longas e de tensões mais elevadas. Neste caso, deve ser realizado um estudo sobre o comportamento dos sinais ao longo da linha de transmissão, levando-se em conta a atenuação e o nível de ruído presente;
- Modificar o sistema para que opere simultaneamente nas duas extremidades da linha, porém gerando um diagnóstico apenas;
- Adaptar o método para operar em linhas que possuam isoladores poliméricos, uma vez que os modos de falha deste tipo de isolador são diferentes dos modos de falha dos isoladores cerâmicos. Deve-se realizar um estudo detalhado sobre as características dos sinais de descargas parciais externas decorrentes de falhas nestes isoladores.

Capítulo 7

---

## Referências Bibliográficas

ABNT NBR 5049:1985 - Isoladores de Porcelana ou Vidro para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão - Ensaios, 1985.

ABNT NBR 5032:2004 - Isoladores para Linhas Aéreas com Tensões Acima de 1000V - Isoladores de Porcelana ou Vidro para Sistemas de Corrente Alternada, 2004.

ADAMI, J. F. *Detecção de identificação de arcos de contorno em cadeias de isoladores de linhas de transmissão utilizando técnicas de processamento de sinais*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2008.

AGILENT. *User's Guide for InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes*. 2013.

ALSTOM Grid Energia Ltda., Relatório de Testes # 179/11, 2011.

ANSI/IEEE. *Std 643 Guide for Power-Line Carrier Applications*. 1980.

BOLOGNA, F., MAHATHO, N., HOCH, D. A. *Infra-Red and Ultra-Violet Imaging Techniques Applied to the Inspection of Outdoor Transmission Voltage Insulators*. IEEE Africon, 2002.

CAPELINI, R. M. *Localização de Cadeias de Isoladores Defeituosas em Linhas de Transmissão Através de Redes Neurais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2011.

CAVALLINI, A., MONTANARI, G. C., CHANDRASEKAR, S., PULETTI, F. *A Novel Approach for the Inference of Insulator Pollution Severity*. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006.

CAVALLINI, A., CHANDRASEKAR, S., MONTANARI, G. C., PULETTI, F. *Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1, 2007.

CHANDRASEKAR, S., KALAIVANAN, C, CAVALLINI, A., MONTANARI, G. C., *Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, Issue 2, 2009.

DALLBELLO, A. C., SILVEIRA, P. M. S., PARENTONI, M. F. C., ADAMI, J. F. *Análise de Sinais Provocados por Defeitos em Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Telecomunicação e Processamento de Sinais*. CITENEL, 2007.

FERREIRA, T. V., GERMANO, A. D., VILAR, P. B., COSTA, E. G., BEZERRA, J. M. B. *Diagnóstico de isoladores baseado na emissão de ruídos ultra-sônicos*. XIII Encontro Ibero-Americano do CIGRÉ - ERIAC, 2009.

FLUKE CORPORATION. *Flexible AC Current Probe i430flex Documentation*. 2006.

GOOGLE, *Aplicativo Google Maps*, disponível em [www.maps.google.com](http://www.maps.google.com), 2015.

FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; Teoria das Linhas em Regime Permanente*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1977.

GEETHANJALI, M., PRIYA, K., S. *Combinet Wavelet Transforms and Neural Network (WNN) Based Fault Detection and Classification in Transmission Lines*. IEEE International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009.

GUAN, Z., WANG, L., YANG., B., LIANG, X., LI, Z. *Electric Field Analysis of Water Drop Corona*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005.

HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2 ed. Ontario: Bookman, 2001.

HUBER+SUHNER AG, *Coaxial Cable RG123 and Coaxial Cable Connector BNC 50-7-7/133 Data Sheet Rev. B*, DOC-0000179409 O, 2007.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION, IEC 65529 - Degrees of Protection Provided by Enclosures, Edition 2.1, 2011.

ISOLADORES SANTANA S.A., Catálogo intitulado "Isoladores de Suspensão e Descarregadores de Chifres - Suspension Insulators and Horn Spark Gaps".

JORGE, D. C., COURRY, D. V., CARVALHO, A. C. P. L. F. *Localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica utilizando reconhecimento de padrões*. IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 1999.

KAWAMURA, T., ISAKA, K. *Humidity Dependence of Moisture Absorption, Leakage Current and Flashover Voltage on Contaminated Insulator Surfaces*. Electrical Engineering in Japan, Vol. 93, No. 5, 1973.

KIND, D., FESER, K. *High Voltage Test Techniques*. Second Edition, Ed. Newnes, 2001.

LANG, P. G., ALLAN, D. M., ZHOU, Y. *The Investigation of Insulation Defects in Transmission Line Disc Insulators Using Remote Detection Techniques*. IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. 1994.

LI, H., WANG, B., LIU, L., TIAN, G., ZHENG, T., ZHANG, J. *The Design and Application of a SmartCopter: An Unmanned Helicopter Based Robot for Transmission Line Inspection*. IEEE Chinese Automation Congress, 2013.

LOOMS, J. S. T. *Insulators for High Voltages*. Londres: Peter Peregrinus Ltd, 1988.

LUNDGAARD, L. E., *Partial Discharge - Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection - Fundamental Considerations*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, 1992.

LUNDGAARD, L. E., *Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, 1992.

LUQUE-VEGA, L. F., CASTILHO-TOLEDO, B., LOUKIANOV, A., GONZALEZ-JIMENEZ, L. E.. *Power Line Inspection Via an Unmanned Aerial System Based on the Quadrotor Helicopter*. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2014.

MARTINEZ, M. L. B., ADAMI, J. F., CAPELINI, R. M., PARENTONI, M. F. C., SENE, I. *The Use of Artificial Neural Networks for Identification and Location of Defective Insulators in Power Lines Through Current Transformers*. 21<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution - CIRED, 2011.

MATHWORKS, *Matlab<sup>®</sup> Neural Networks Toolbox<sup>®</sup> Documentation*, 2008.

MELLO, D. R., CARDOSO, J. A. D., RODRIGUES, J. A. P., SILVA, F. D., GARCIA, R. W. *Estudos sobre o desempenho de cadeias de isoladores para redes de distribuição com isoladores quebrados ou perfurados*. XIII Encontro Ibero-Americano do CIGRÉ - ERIAC, 2009.

MENDES, K. B., *O Uso de Redes Neurais Artificiais no Diagnóstico Preditivo dos Tipos Mais Frequentes de Cefaléia*. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MELLO, D. R., CARDOSO, J. A. D., GOLÇALVES, P. P. *Avaliação do Desempenho de Cadeias de Isoladores para Linhas de Transmissão Quanto à Radiointerferência*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2010.

MELLO, D. R., COSTA Jr., R. T. D., BASTISTA, J. T., MELO, M. E. *Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações e Distribuição*. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, CITENEL, 2001.

NISSEN, S., *Fast Artificial Neural Network Library*, Release 2.2.0 (disponível em <http://leenissen.dk/fann/wp>), 2012.

NOOKUEA, S., CHOTIGO, S., PUNGSIRI, B. *A Study of Defective Characteristics on HVAC Insulators for 33 kV Distribution System*. IEEE International Conference on Electrical Insulating Materials, 2011.

OLIVEIRA, H. R. P. M., MARTINEZ, M. L. B., CAMPOS, I. G., OLIVEIRA, R. G., SALLES, C., LEFORT, C. *New Techniques for Field Inspection of Pin Insulators for Medium Voltage Networks*. IEEE PowerTech, 2007.

OMICRON. *FRAnalyzer - Sweep Frequency Response Analyzer for Power Transformer Winding Diagnosis - User Manual*. 2008.

PARK, J., LEE, J., CHO, B., OH, K. *An Inspection Robot for Live-Line Suspension Insulator Strings in 345 kV Power Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, 2012.

PATTANADECH, N., YUTTHAGOWIT, P. *Punctured Insulator Examination of a String Insulator*. IEEE Power Tech, 2005.

PAVLIK, B.L. *Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT*. São Paulo: Editorial Gente, 1989.

PICO TECHNOLOGY, *PicoScope 3000 Series PC Oscilloscopes User's Guide*, 2007.

PINTO, J. K C., LUQUEZE, M. A., JUSTO, L. F. *Detecção e Localização de Efeito Corona Através de Técnicas de Rádio Localização*. Revista Iberoamericana de Sensores, Vol. 6, No. 3, 2008.

QT COMPANY, T., *Qt Documentation* (disponível em <http://doc.qt.io>), 2012.

RAYBOLD, A. C. S. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em Circuito Duplo Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal de do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

ROCHA, P. H. V. *Classificação de Isoladores de Vidro de Alta Tensão a Partir do Espectro Eletromagnético Irrradiado*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Elétrica) – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2014.

SALTEK, *VL-B75F/F Datasheet*, 2012.

SALUSTIANO, R., CAPELINI, R. M., ABREU, S. R., MARTINEZ, M. L. B., TAVARES, I. C., FERRAZ, G. M. F., ROMANO, M. A. A. *Development of New Methodology for Insulators Inspections on Aerial Distribution Lines Based on Partial Discharge Detection Tools*. International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2014.

SWARNO. *Study on the Wave Form of Leakage Current on the 20 kV Post-Pin Ceramic Insulators Under Various Conditions*. IEEE Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2001.

TAKLAJA, P., NIITSOO, J., PALU, I. *Wet Tests on Naturally Polluted Glass and Composite Insulators*. IEEE Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 2012.

TEKTRONIX. *TDS 210 & TDS 220 Digital Real-Time Oscilloscopes - User Manual*. 2012.

TRINH, N. G. *Partial Discharge XIX: Discharge in Air Part I: Physical Mechanisms*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, Issue 2, pp. 23-29, 1995.

ZHOU, Y. X., XU, X., NIE, Q., LIANG, X. D., GUAN, Z. C. *Bird Streamer Caused Flashover in EHV Transmission Line*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 1, 2009.

ZHOU, F. Y., WANG, J. D., LI, Y. B., WANG, J., XIAO, H. R. *Control of an Inspection Robot for 110 kV Power Transmission Lines Based on Expert System Design Methods*. IEEE Conference on Control Applications, 2005.