



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

KAIO JONATHAS ALENCAR GURGEL

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA CLASSIFICAÇÃO DO
NÍVEL DE EFEITO CORONA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS
UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A SINAIS
DE ULTRASSOM**

FORTALEZA

2017

KAIO JONATHAS ALENCAR GURGEL

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA
CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFEITO CORONA EM
ISOLADORES POLIMÉRICOS UTILIZANDO
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A SINAIS DE
ULTRASSOM

Dissertação submetida à Coordenação
de Pós-Graduação em Engenharia de
Telecomunicações do Instituto Federal
do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Alves
de Aquino.

Fortaleza
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

GURGEL, KAIO JONATHAS ALENCAR.

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFEITO CORONA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A SINAIS DE ULTRASSOM / KAIO JONATHAS ALENCAR GURGEL. - 2017.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ ALVES DE AQUINO.

1. ISOLADORES POLIMÉRICOS. 2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS. 3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. 4. EFEITO CORONA. 5. SINAL DE ULTRASSOM. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

Kaio Jonathas Alencar Gurgel

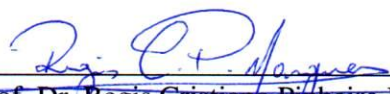
Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:


Orientador: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

Instituto Federal do Ceará – IFCE


Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia

Instituto Federal do Ceará – IFCE


Prof. Dr. Regis Cristiano Pinheiro Marques

Instituto Federal do Ceará – IFCE


Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”.

Theodore Roosevelt

Dedico este trabalho aos meus pais, que me mostraram o caminho certo a ser seguido e serviram de referencial para minhas atitudes. A minha esposa Wanessa por sempre ter me apoiado na minha trajetória em meu mestrado. A minha filha Kamilly por, apenas pelo fato de existir, já ser motivo suficiente para minha alegria e motivação para trabalhar duro neste texto.

Agradecimentos

Muitas foram as pessoas que contribuíram para a conclusão deste texto, de forma direta, com contribuições técnicas em relação ao conteúdo da dissertação, ou mesmo apenas com o apoio moral, desejos de boa sorte e boas vibrações.

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família, mais especificamente a meu pai Evandro e a minha mãe Vanderli. Eles que sempre me mostraram o caminho certo a seguir, que me apoiaram nos momentos difíceis de minha vida e que foram duros quando a situação pedia tal tratamento. Meus pais, sem eles não existiria e não teria me tornado o homem que hoje sou.

Agradeço a minha esposa Wanessa, pelo apoio e força dados desde que surgiu em minha vida, quando eu ainda estava em meu curso de graduação, por entender minhas ausências justificadas pelos trabalhos de faculdade e, mais recentemente, pelas minhas tarefas como docente. Agradeço por tudo.

Gostaria de agradecer aos meus companheiros de projeto, eles que sem os quais este trabalho não estaria completo. Foi com eles que passei horas e horas tentando resolver os percalços que surgiram no caminho, foi com eles que viajei a outras cidades para fazer testes e implantações de protótipos, dentre outras tarefas.

Sou muito grato aos professores Elias, Ajalmar, Danilo e, especialmente, ao meu orientador Francisco José, este que tem papel essencial em vida acadêmica desde a graduação, passando por orientador em bolsa de iniciação científica, orientador em trabalho de conclusão de curso e, chegando agora, a orientador em minha dissertação de mestrado, este que foi um dos professores que me fizeram decidir por seguir uma carreira acadêmica.

Por fim, o meu muito obrigado aos meus amigos que, mesmo sem uma contribuição técnica, me ajudaram a finalizar este texto e, acima de tudo, a manter a minha autoestima e motivação com dicas e conselhos extremamente valiosos que guardo, e guardarei, para toda minha vida. Evitarei citar nomes pois assim não serei injusto pelos amigos que por ventura venha a esquecer.

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia de captura de dados de ultrassom provenientes de isoladores poliméricos energizados e uma posterior classificação de tais dados utilizando inteligência artificial, mais especificamente uma rede neural MLP (*Multilayer Perceptron*) e um classificador estatístico SVM (*Support Vector Machine*). A fim de atingir o objetivo de classificação de um isolador polimérico em com/sem efeito corona foram realizados ensaios elétricos controlados em laboratórios de alta tensão. Foi desenvolvida uma metodologia de captura de sinais de ultrassom provenientes de isoladores poliméricos. Um sistema sensor capta os sinais ultrassônicos e efetua um tratamento inicial que é constituído por uma etapa de filtragem, uma etapa de amplificação e um processo de normalização dos dados. É feita uma conversão do sinal analógico em sinal digital, esta conversão é necessária pelo fato de o sistema, posteriormente, ser embarcado em um ARM Cortex *M4* para só então ser utilizado em campo. Com os sinais de ultrassom devidamente tratados e armazenados, se torna possível a classificação deste sinal como proveniente de um isolador em bom estado de conservação ou proveniente de um isolador perto de uma falha. Para efeito de análise comparativa, são mostrados os resultados de acurácia de ambos os classificadores MLP e SVM e foi verificado que a tarefa de classificação do isolador polimérico com/sem efeito corona foi concluída com sucesso e que os classificadores do tipo SVM tiveram vantagem.

Palavras-chave: Isoladores Poliméricos, Processamento Digital de Sinais, Inteligência Artificial, Efeito Corona, Sinal de Ultrassom.

Abstract

This work presents a methodology for capturing ultrasound data from energized polymeric insulators and a further classification of such data using artificial intelligence, to be more specific, a Neural Network MLP (Multilayer Perceptron) and a Support Vector Machine (SVM) that classifies data using statistics. In order to achieve the objective of classifying a polymeric insulator in with/without corona effect, we carried out controlled electrical tests in high voltage laboratories. We developed a methodology to capture the ultrasounds signals from the polymeric insulators where an ultrasound sensor picks up the signal and it goes through a treatment system in which it performs some sort of operations to make the signal easier to understand and to convert from the analog to digital domain. The conversion from analog to digital domain is necessary because the system will later be embedded in an ARM Cortex M4 to only then be used in real transmission lines. With the ultrassound signals properly processed and stored, it becomes possible to classify this signal as coming from an insulator in good condition or coming from an insulator that is close to failure. For the purpose of comparative analysis, we showed the results of accuracy of both MLP and SVM classifiers.

Keywords: Polymeric Insulators, Digital Signal Processing, Artificial Intelligency, Corona Effect, Ultrasound Signal.

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Abreviações	14
1 Introdução	16
1.1 Motivação e objetivos	17
1.2 Produção científica	18
1.3 Organização da Dissertação	19
2 Isoladores Elétricos	21
2.1 Isoladores de Porcelana e Poliméricos	22
2.2 Fenômenos Ligados à Isoladores Elétricos	24
2.2.1 Envelhecimento	24
2.2.2 Arborescência	25
2.2.3 Efeito Corona	26
2.3 Conclusão	28
3 Aprendizagem de Máquinas	29
3.1 Redes Neurais Artificiais	29
3.1.1 Neurônio Artificial vs. Neurônio Biológico	29
3.1.2 Utilizando Redes Neurais	31
3.1.3 Rede Perceptron de Múltiplas Camadas	33

3.2	Máquina de Vetores de Suporte (SVM)	34
3.3	Conclusão	36
4	Ensaio Elétrico Controlado em Laboratório	38
4.1	Metodologia para Captação de Dados nos Ensaio Elétrico	38
4.2	Procedimentos Experimentais	42
4.3	Conclusão	47
5	Resultados	48
5.1	Formas de Ondas Capturadas nos Procedimentos Experimentais	48
5.2	Pré-processamento dos Dados para Rede Neural	56
5.3	Resultados	60
5.4	Conclusão	60
6	Conclusões	62
6.1	Trabalhos Futuros	63
	Referências Bibliográficas	65
	Anexo A – DataSheet do Sensor de Ultrassom MA40S4R	68
	Anexo B – Instalação dos Protótipos nas Torres da EletroAcre	79

Lista de Figuras

1	(a) Isolador polimérico; (b) Isolador cerâmico.	22
2	(a) Isolador de pino rosqueável com saia interna; (b) Isolador no qual é possível a amarração do condutor (NIA, 1880).	23
3	Efeito Avalanche (INSTITUTE, 1982).	27
4	Distorção devido cargas espaciais no semiciclo positivo e no semiciclo negativo (KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2000).	27
5	Pulsos referentes ao efeito corona em tensão alternada (INSTITUTE, 1982). . .	28
6	Modelo de um neurônio artificial (SILVA, 2005).	30
7	Arquitetura de uma rede MLP (HAYKIN, 2001).	33
8	Diagrama de blocos do sistema de aquisição (Fonte: Próprio autor).	39
9	Resposta em frequência e diretividade do sensor de ultrassom (Anexo A). . . .	39
10	Esquemático do circuito amplificador (Fonte: Próprio autor).	41
11	Resposta em frequência do filtro FIR utilizado	43
12	Kit do equipamento SDT-200.	44
13	(a) Isoladores utilizados no ensaio; (b) Isolador preparado para realização do ensaio elétrico.	45
14	Diagrama dos componentes utilizados no experimento.	46
15	Caixa do protótipo	46
16	Dados capturados e espectro dos dados capturados em condição de <i>flashover</i> . .	49
17	Dados capturados e espectro dos dados capturados em condição de <i>flashover</i> após filtragem digital.	50
18	Dados capturados e espectro dos dados capturados de isolador polimérico novo.	50

19	Dados capturados e espectro dos dados capturados de isolador polimérico novo após filtragem digital.	51
20	Amostras capturadas na ocorrência de <i>flashover</i> antes e após filtragem digital. .	52
21	Amostras capturadas na ocorrência de <i>flashover</i> antes e após filtragem digital. .	52
22	Amostras provenientes de um isolador oxidado antes e após filtragem digital. .	53
23	Amostras provenientes de um isolador novo antes e após filtragem digital. . . .	54
24	Amostras provenientes de um isolador salgado seco antes e após filtragem digital.	55
25	Amostras provenientes de um isolador salgado úmido antes e após filtragem digital.	55
26	Resultado parcial do pré-processamento em um sinal sem efeito corona.	58
27	Resultado parcial do pré-processamento em um sinal com efeito corona.	59
28	Acurácia <i>versus</i> tamanho do conjunto de treinamento.	60
B.1	Sensores enfileirados para instalação de <i>firmware</i>	80
B.2	Sensores enfileirados para carregamento da bateria utilizando painéis solares. .	80
B.3	Sensor <i>gateway</i> em processo de carga com o auxílio de um painel solar com maior capacidade.	81
B.4	Sensor em processo de instalação na torre de transmissão.	82
B.5	Sensor instalado em uma das torres da linha de transmissão da eletroAcre. . . .	83
B.6	Equipe que trabalhou na instalação dos sensores.	83

Lista de Tabelas

1	Resultado para as redes MLP e SVM em função da variação do tamanho do conjunto de treinamento.	61
---	--	----

Lista de Abreviações

LT	Linha de Transmissão
RI	Rádio Interferência
EA	Emissões Acústicas
RU	Ruído Ultrassônico
RA	Ruído Audível
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
RNA	Rede Neural Artificial
PS	Perceptron Simples
MLP	Multilayer Perceptron
SVM	Support Vector Machine
SRM	Structural Risk Minimization
ERM	Empirical Risk Minimization
QP	Programação Quadrática
RBF	Radial Basis Function
DP	Descargas Parciais
ARM	Advanced RISC Machine
ADC	Analog-to-Digital Converter
RAM	Random Access Memory
DMA	Direct Memory Access
KSPS	Kilo Sample Per Second

CT	Conjunto de Treinamento
FIR	Finite Impulse Response
FFT	Fast Fourier Transform

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas no mundo. Ela é gerada, no Brasil, principalmente, nas usinas hidrelétricas, utilizando a capacidade potencial de se obter energia por intermédio das quedas d'água. Ela pode ser produzida também em usinas eólicas, termoeletricas, solares e nucleares. A energia elétrica é de fundamental importância para o desenvolvimento das sociedades atuais. Ela pode ser convertida para gerar luz, força para movimentar motores e fazer funcionar diversos produtos elétricos e eletrônicos que possuímos em casa (computador, geladeira, forno micro-ondas, chuveiro, etc).

Para suprir a crescente demanda mundial por energia elétrica, são necessários sistemas complexos de geração, transmissão e distribuição. Durante todo o processo de transmissão da energia elétrica se faz necessário o isolamento das torres de sustentação das linhas energizadas. Para tanto, são empregados materiais isolantes de diversas naturezas, dispostos em vários formatos de acordo com a necessidade. Esses materiais constituem parte essencial dos isoladores elétricos.

As linhas de transmissão são afetadas por diversos problemas, como por exemplo: descargas atmosféricas, queimadas em canaviais, queimadas em matagais, queda de vegetação, fatores ambientais como vendavais, vandalismo, acidentes de manutenção, acúmulo de poluição, etc (HAMZA; ABDELGAWAD; ARAFA, 2002) (CAVALCANTI, 2004).

Esses problemas podem provocar falhas nas linhas de transmissão. Algumas falhas são transitórias e, após algum tempo a linha é religada e volta a sua operação normal. Já outras falhas exigem o deslocamento de equipe com maquinário adequado para realizar a devida manutenção.

No decorrer do texto, será possível perceber que trabalhos acadêmicos sobre diagnóstico de falha em isoladores poliméricos são bem mais escassos que materiais sobre diagnóstico em isoladores cerâmicos, uma vez que este último é o mais difundido e vem sendo majoritariamente utilizado por razões históricas.

1.1 Motivação e objetivos

Com a crescente demanda no uso de isoladores em torres de transmissão de energia elétrica, cresce a preocupação em verificar se os isoladores estão cumprindo corretamente seu papel. Falhas em isoladores têm consequências indesejáveis, desde interferências em sinais de rádio/televisão, até curtos-circuitos que podem retirar uma linha de transmissão ou subestação de operação. Uma das principais causas de desligamento não programados em linhas de transmissão é o acúmulo de poluentes na superfície de cadeias de isoladores.

No sistema de transmissão da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) há registros de 171 falhas provocadas pelo acúmulo de poluição nos isoladores no período de 1981 a 2003 (CAVALCANTI, 2004), representando 5,55% do total de falhas transitórias. Porém nesse mesmo período há registros de 470 falhas de causa indeterminada que representam 15,25% do total de falhas transitórias. Já que a causa mais provável para as falhas de causa indeterminada é o acúmulo de poluentes na cadeia de isoladores, o acúmulo de poluição se tornaria o terceiro maior responsável pelas falhas transitórias do sistema de linhas de transmissão da CHESF.

O diagnóstico do estado do isolador, seja ele cerâmico ou polimérico, não é trivial. As formas mais usuais de se inspecionar uma cadeia de isoladores são por intermédio da termovisão, onde a linha é inspecionada durante o período da noite com o objetivo de encontrar pontos de alta temperatura na estrutura do isolador, e por análise das emissões acústicas ultrassônicas dos isoladores, uma vez que isoladores com má funcionamento emitem ondas de ultrassom em uma frequência específica. Ambas as formas de inspeção na cadeia de isoladores necessitam da movimentação de uma equipe de campo com maquinário específico para ser efetuada.

Por mais que atualmente o diagnóstico do estado do funcionamento de um isolador seja dado visualmente e por meios de equipamentos específicos, alguns sinais de desgaste não são fáceis de visualizar em isoladores cerâmicos, são eles: trincas sutis, perda da camada vitrificada e perfurações entre o pino e a campânula.

A poluição no isolador é outro fator de difícil visualização, especialmente à distância em que são realizadas as inspeções. Conforme a poluição se deposita sobre as abas dos isoladores, os poluentes reduzem a resistência superficial ocasionando, assim, um aumento na corrente de fuga do isolador em questão. Por tal motivo, lavagens periódicas devem ser realizadas a fim de prolongarem a vida útil dos isoladores e impedindo paradas não programadas da linha de distribuição e transmissão.

Quando a rotina de lavagem das cadeias de isoladores não é feita de forma ótima, deixando assim um espaço de tempo muito extenso entre duas lavagens, a cadeia de isoladores pode se deteriorar e conduzir uma alta corrente de fuga. Quando isto ocorre, um desligamento não programado da linha de transmissão ocorre, ocasionando assim um grande prejuízo financeiro para a concessionária de energia elétrica.

Tomando como ponto de partida a motivação citada acima, o objetivo da dissertação aqui apresentada é de propor um sistema de captação, análise e classificação dos dados de ultrassom provenientes dos isoladores da linha de transmissão de 69 kV na qual o mecanismo de captação está inserido. O sistema é capaz de informar se o isolador esta em funcionamento com/sem efeito corona sem a necessidade do envio de uma equipe especializada a campo, evitando assim um gasto financeiro desnecessário para a concessionária. Vale reiterar que não existe, atualmente, um equipamento capaz de captar dados de ultrassom e informar sobre a existência de efeito corona remotamente.

1.2 Produção científica

Durante o presente trabalho de mestrado, os seguintes artigos científicos foram aceitos e publicados, a saber:

- DA SILVA JUNIOR, E. T., ALVES DE AQUINO, F. J., ROCHA NETO, A. R., **ALENCAR GURGEL, K. J.**, DE OLIVEIRA, A. E. R. M., KLEIN, A. D., DA SILVA, F. M., DE ARAÚJO, A. L. C. **Procedimento para Aquisição de Dados de Ultrassom Provenientes de Isoladores Poliméricos Energizados**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016.
- DA SILVA JUNIOR, E. T., ALVES DE AQUINO, F. J., SILVA, D. A., ROCHA NETO, A. R., **ALENCAR GURGEL, K. J.**, DE OLIVEIRA, A. E. R. M., DE ARAÚJO, A. L. C. **Corona Effect Detection in Energized Polymeric Insulators Using Artificial Neural Networks and Ultrasonic Emissions**, Latin America IEEE transactions, 2016. (Submetido e ainda não avaliado.)
- ALVES DE AQUINO, F. J., ROCHA NETO, A. R., DA SILVA JUNIOR, E. T., **ALENCAR GURGEL, K. J.**, DE OLIVEIRA, A. E. R. M., KLEIN, A. D., DA SILVA, F. M., DE ARAÚJO, A. L. C. **Dispositivo para Captura de Dados de Ultrassom de Isoladores Poliméricos Energizados** XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2016.

Como produção da dissertação em questão, ainda temos o depósito de uma patente no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), a saber:

- **ALENCAR GURGEL, K. J., ROCHA NETO, A. R., ALVES DE AQUINO, F. J., SILVA, D. A., OLIVEIRA, A. E. R. M., SILVA, F. M., KLEIN, A. D., ARAUJO, A. L. C., Sistema Sinalizador de Falhas de Isoladores em Estruturas de Média e Alta Tensão Utilizando Ultrassom.,** Brasil BR 1020160161975, 2016

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos na seguinte sequência: Introdução, Isoladores Elétricos, Aprendizagem de Máquinas, Ensaios Elétricos Controlados em Laboratório, Resultados e Conclusões.

O Capítulo 1 mostra ao leitor o objetivo e o caminho que será seguido neste trabalho, situando-o em relação à relevância e a motivação para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 trata do embasamento teórico acerca de isoladores elétricos. É dado o histórico simplificado e as características dos dois tipos mais comuns de isoladores elétricos (isoladores cerâmicos e poliméricos) e o porquê de o presente trabalho apresentar um estudo apenas sobre isoladores poliméricos. Em adição, ainda são apresentados alguns fenômenos ligados ao funcionamento dos isoladores elétricos, como arborescência e efeito corona e como eles podem ser úteis para a previsão de falha de um isolador.

O Capítulo 3 aborda o embasamento teórico sobre a aprendizagem de máquinas, mais especificamente as redes neurais e um classificador estatístico. Como o tema rede neural é bem consolidado na literatura atual, no capítulo em questão são abordado apenas os tópicos relevantes para o entendimento do trabalho aqui proposto. Foi explicitado o conceito de neurônio artificial. Conceitos elementares sobre as redes Perceptron de múltiplas camadas e Máquina de vetores suporte também foram expostos nesta seção.

Em seguida, no Capítulo 4, tratamos sobre a metodologia utilizada para a realização dos ensaios elétricos controlados em laboratórios de alta tensão. Neste capítulo mostramos um diagrama de blocos onde é possível ver todos os subsistemas utilizados para tornar possível a captura e posterior análise dos dados de ultrassom provenientes dos isoladores poliméricos energizados. Nesta seção ainda fornecemos mais detalhes a cerca da conversão do sinal do domínio analógico para digital e a respeito da quantidade de períodos do sinal que é armazenada para posterior análise.

No Capítulo 5 são mostrados os resultados que foram obtidos com a análise dos dados capturados e posterior classificação com a utilização de dois tipos de redes neurais. Os dois tipos de redes neurais utilizadas no trabalho foram a MLP (*multilayer perceptron*) e SVM (*support vector machine*). Mostramos ainda o pré-processamento utilizado nos dados para formarem um banco de dados passível de utilização na entrada das redes neurais.

O Capítulo 6 descreve as considerações finais e uma conclusão geral, ressaltando as principais contribuições deixadas durante este trabalho de mestrado. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

ISOLADORES ELÉTRICOS

Os isoladores elétricos são equipamentos que asseguram o isolamento dos condutores entre si e a terra, e são responsáveis pelos esforços mecânicos de sustentação e fixação dos cabos e fios. Os isoladores mais utilizados nos sistemas elétricos são os fabricados com porcelana vitrificada, vidro temperado e materiais poliméricos devido às propriedades mecânicas e elétricas, preços reduzidos dessas matérias-primas, a fabricação simples e a elevada rigidez dielétrica que é definida como sendo alta resistência à passagem da corrente elétrica da parte energizada para terra (KAKANI, 2005).

Sabemos também, que os isoladores são os elementos mais vulneráveis das linhas e redes elétricas de distribuição e transmissão. Por isso, as concessionárias investem na conscientização da população, no intuito de coibir as ações de vandalismo que danificam os isoladores e que provocam interrupções da energia elétrica e custos de manutenções corretivas.

Outros fatores relevantes são as inspeções e as lavagens periódicas realizadas em isoladores utilizados na distribuição de energia elétricas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina. Tais lavagens são realizadas com o objetivo de minimizar as interrupções provocadas pelas correntes de fuga.

Podemos encontrar diversos tipos de isoladores elétricos nas estruturas de transmissão de energia. De maneira geral, os isoladores podem ser divididos em dois grupos: poliméricos e cerâmicos, como podemos ver na Figura 1(a) e 1(b). Os isoladores do tipo polimérico possuem carbono em sua composição, e apesar de atualmente serem os mais utilizados em linhas de alta tensão são os isoladores cerâmicos que populam a maior fatia das linhas de transmissão mais antigas. Existem ainda os isoladores que possuem características de poliméricos e cerâmicos, estes são chamados de híbridos e utilizam das vantagens de cada um dos tipos de isoladores para compor um isoladore de qualidade superior.



Figura 1: (a) Isolador polimérico; (b) Isolador cerâmico.

2.1 Isoladores de Porcelana e Poliméricos

Isoladores de porcelana, também chamados de isoladores de cerâmica, são utilizados há aproximadamente um século. A rigidez dielétrica da porcelana depende de sua composição química e espessura. A sinterização também é levada em consideração, sendo um processo físico termicamente ativado, que faz com que as partículas do material adquiram certa resistência mecânica, pois a rigidez dielétrica depende do baixo número de poros no material. Os processos empregados pelas indústrias para produzir a porcelana adotavam a mistura de matérias primas prensadas e queimadas, resultando em peças porosas, úteis apenas em baixa tensão e a seco (JANSSEN, 2005).

Ainda no ano de 1840, empresas europeias, mais especificamente da Inglaterra, como a Denby, fabricaram os primeiros isoladores cerâmicos. Mais tarde no ano de 1865, Cauvet patenteou o isolador de pino com furo rosqueado (CALVET, 1865), substituindo o apoio de fixação antes feito com buchas. Com o passar dos anos, alguns avanços aconteceram, sendo patenteados isoladores de pino com rosca e saia interna por Oakman, evoluindo ainda para um modelo que permite a amarração de cabos. Esses modelos podem ser vistos na Figura 2 (NIA, 1880).

Em 1896, Fred Locke colocou em uso, juntamente com a Imperial Porcelain Works, as primeiras unidades de isoladores de porcelana produzidas a vácuo. Tais peças foram implantadas na linha de transmissão que ligava hidrelétrica de Niagara Falls à 6 cidades de Buffalo, nos Estados Unidos da América, e operava na tensão de 40 kV. O processo utilizado por

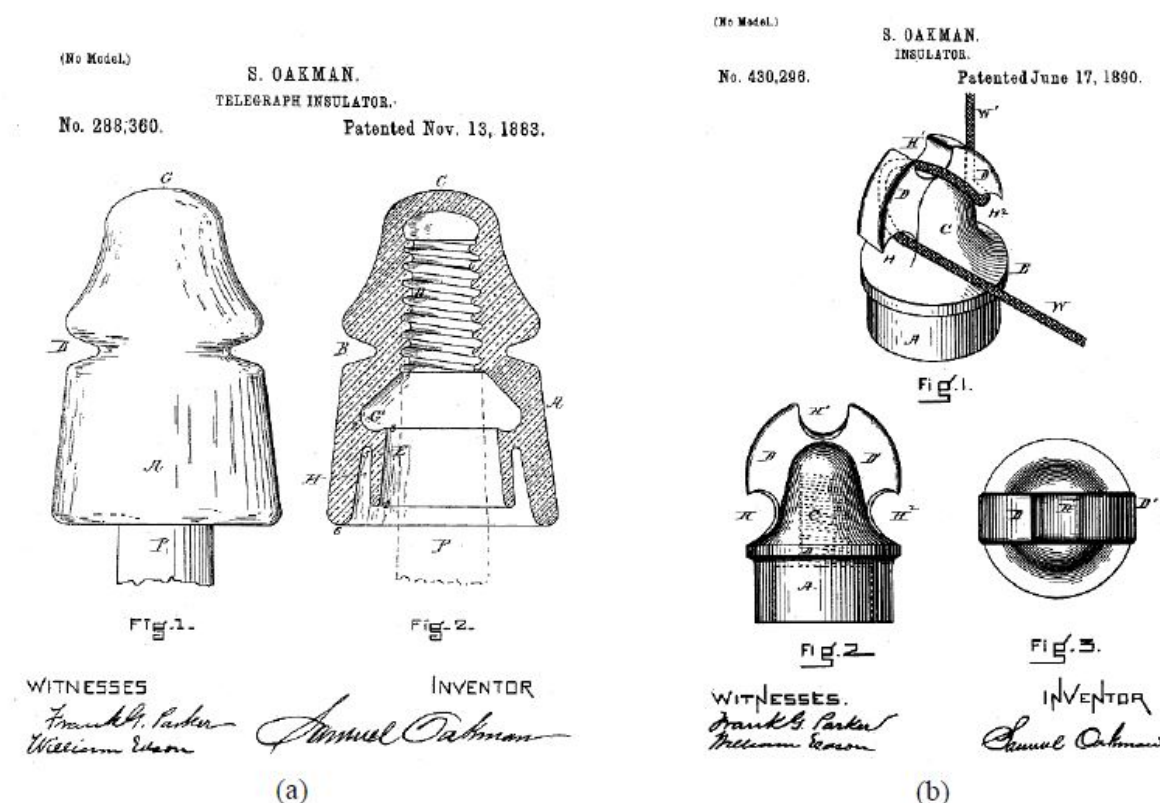


Figura 2: (a) Isolador de pino rosqueável com saia interna; (b) Isolador no qual é possível a amarração do condutor (NIA, 1880).

Locke para produzir uma porcelana praticamente isenta de bolhas de ar ou trincas utilizava-se de moldes a vácuo, tornos, secagem e queima, nesta ordem. Além disso, Locke inova com um modelo de isolador mais largo que alto (GISH, 1994) (FERREIRA, 2011).

Os isoladores cerâmicos foram sendo aperfeiçoados mas, pelo custo de produção da peça, que ainda hoje é caro, viu-se necessário o desenvolvimento de isoladores com outros tipos de materiais. No final dos anos 50, a empresa General Electric tornou conhecido os primeiros isoladores poliméricos. Os materiais poliméricos trazem como benefício uma considerável redução em seu peso e tamanho, além de serem hidrofóbicos. No entanto, em locais onde os isoladores estão em aplicações severas, os isoladores cerâmicos são preferidos pela durabilidade a longo prazo. Um outro defeito, ou desvantagem em isoladores poliméricos é a questão da baixa resistência a esforços axiais, como os que acontecem em locais onde existe chaveamento (FERREIRA, 2011).

Na década de 1980, surgiram as primeiras versões comerciais de isoladores poliméricos para linhas de transmissão (HALL, 1993). O uso de isoladores poliméricos traz consideráveis vantagens em relação a outros fabricados com cerâmica ou vidro. O isolador polimérico, tem a capacidade de manutenção da sua hidrofobia mesmo em condições de poluição, quando a

hidrofobia é transmitida à camada de poluentes que estão na superfície do isolador. O conceito de hidrofobia é a capacidade de a superfície eliminar o acúmulo de água sobre esta, evitando que se forme uma camada de água, tendo efeito sobre a diminuição da corrente de fuga (GIANELLI, 2008).

Além da manutenção de sua capacidade hidrofóbica, os isoladores poliméricos tem outras vantagens, dentre elas podemos citar sua leveza, resultando em uma redução no tempo gasto em sua instalação e uma redução no seu custo. O equipamento não precisa ser lavado constantemente, o que reduz o custo em manutenção (HACKMAN, 1999). Segundo (FONTGALLAND *et al.*, 2004) existe uma menor emissão de interferência eletromagnética por parte dos isoladores poliméricos quando comparados à isoladores cerâmicos.

A presente dissertação abordará ensaios realizados apenas em isoladores poliméricos, uma vez que este tipo de isolador é o mais utilizado nas redes de transmissão das companhias elétricas. Em sua maior parte, o trabalho aqui apresentado leva em consideração isoladores que são alocados em redes com até 69kV de tensão nominal.

2.2 Fenômenos Ligados à Isoladores Elétricos

Os isoladores, como qualquer outro equipamento utilizado em linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, sofre o efeito de alguns fenômenos. À medida que o equipamento vai envelhecendo, mais susceptível a falhas o mesmo passa a ser. Na ocorrência de uma falha não prevista, o custo da manutenção e os prejuízos decorrentes de um interrompimento de fornecimento de energia abrupto, para a empresa que administra a rede, é muito alto. Deve-se a isso a importância de conhecermos e entendermos as consequências de tais fenômenos.

Nas próximas subseções desse capítulo descreveremos de forma sucinta os principais fenômenos a serem observados nos isoladores elétricos afim de prevenir uma ocorrência de falha abrupta no sistema de distribuição/transmissão de uma companhia elétrica.

2.2.1 Envelhecimento

O envelhecimento do material isolante provoca a redução das propriedades de resistência mecânica do isolador, que são agravados com aumento de temperatura, afetando a velocidade de degradação, que dobra quando a temperatura sobe na faixa dos 10 a 16 graus Celsius. Com aumento da temperatura alguns materiais se desidratam, no caso de metais existe a

intensificação da oxidação e mudança de ligações entre os elementos químicos. Os efeitos são vistos e sentidos ao decorrer do tempo devido a perda das propriedades físico-químicas de isolamento elétrico. Dentre as consequências podemos citar como as principais o aumento da fragilidade do material, aparecimento de trincas e até a fratura total (ABREU, 2015).

2.2.2 Arborescência

A arborescência é um fenômeno de origem elétrica que reduz consideravelmente a rigidez do material conduzindo à ruptura dielétrica. O termo é aplicado ao problema causado em um dielétrico submetido a uma tensão. O aspecto resultante assemelha-se a forma de uma árvore, este é o motivo da associação do nome arborescência. O fenômeno ocorre em todos os polímeros sendo sua visualização muitas vezes mascarada pela presença de cargas nos compostos isolantes que impedem a sua visualização, como no caso das borrachas. A arborescência se difere em três tipos, podendo ser elétrica, aquática e eletroquímica (BERANGER, 2016).

No caso da arborescência elétrica, temos sua ocorrência em isoladores poliméricos e em pontos de alta intensidade elétrica, como em condutores contaminados, ásperos e em falhas estruturais. As falhas estruturais provocam a formação de bolhas de ar no interior do isolador, o que irá gerar descargas parciais (DP) que atuarão como arborescência elétrica. As descargas parciais contribuem para a deterioração, bem como para acarreto de perdas (TEIXEIRA *et al.*, 2003).

A arborescência de água é dada pela exposição de isoladores submetidos a condições de alta umidade. Em condições de tempo seco, não é possível notar, tendo em vista que sua dimensão tem grandeza aproximada de micrometros, portanto, não sendo visível a olho nu. Normalmente os tipos de arborescência estão interligados, pois vazios ocasionados pelas reações químicas, ou corpos estranhos inseridos no material do isolador, fazem com que a água seja absorvida, o que, em alguns casos, leva a ocorrência de curto para terra (CARVALHO, 2005b).

No caso da arborescência eletroquímica, temos sua ocorrência nos locais onde é feita produção de materiais com origens químicas altamente contaminantes como, gasolina e solventes. Quando os produtos em dispersão e suspensão no ar entram em contato com os cabos, eles corroem a camada isolante, gerando pequenas fendas. Com o tempo as fendas vão aumentando e geram cargas parciais, prejudicando ainda mais a vida útil do isolante (GOMES, 2015).

2.2.3 Efeito Corona

O efeito corona é uma descarga que se forma no condutor quando a intensidade do campo elétrico nesta região excede a rigidez dielétrica do ar. O campo ioniza os átomos nas proximidades do condutor da LT, gerando o aparecimento de descargas parciais (DALLBELLO *et al.*, 2007).

Estas descargas provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração, que se propagam ao longo das linhas, gerando campos eletromagnéticos de alta frequência. Estes campos dão origem à RI (rádio interferência), sendo o diâmetro do condutor um dos parâmetros de maior influência.

A análise do desempenho de uma linha de transmissão em relação ao efeito corona, é dada pela relação do gradiente crítico, pelo campo formado no condutor. Sabendo disso, pode-se dizer que, quando o campo elétrico na superfície do condutor for maior que o gradiente crítico, temos ondas de rádio sendo emitidas em frequências específicas, inferindo-se que ali existe efeito corona (LEÃO, 2008).

Quando o condutor da linha está sob condições de tensão alternada, cria-se em torno de si um campo eletromagnético. Quando o valor do gradiente de potencial, referente à componente do campo elétrico, na superfície deste condutor, excede o valor do gradiente crítico, os átomos do ar sofrem o processo de ionização.

A molécula neutra que sofre a colisão libera um elétron, tornando um íon positivo. Este elétron, é acelerado gerando a energia necessária até que venha a colidir com átomos neutros diferentes gerando o desprendimento de novos elétrons. O número de elétrons se multiplica, iniciando o processo de avalanche, como pode ser visto na Figura 3. A intensidade do campo elétrico terá seu valor máximo na superfície do condutor, reduzindo-se à medida que se aumenta a distância em relação à superfície condutora.

No período chuvoso, o efeito corona aumenta. Isso se dá pelo acúmulo de gotas d'água na borda inferior do condutor, além do acúmulo de umidade e mudanças pontuais de temperatura. As perdas médias anuais por corona em LT's de alta tensão podem variar de quilowatts a algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva, sendo 12 kW/km para tempo bom, 313 kW/km sob chuva e para garoa, são 374 kW/km , sendo esses valores estimados para linhas de 500 kV . As perdas sob chuva dependem não só do índice das precipitações, mas também do número de gotas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores. Esse número é menor nos condutores novos do que nos usados, nos quais as gotas d'água aderem mais facilmente à geratriz inferior dos condutores (LEÃO, 2008).

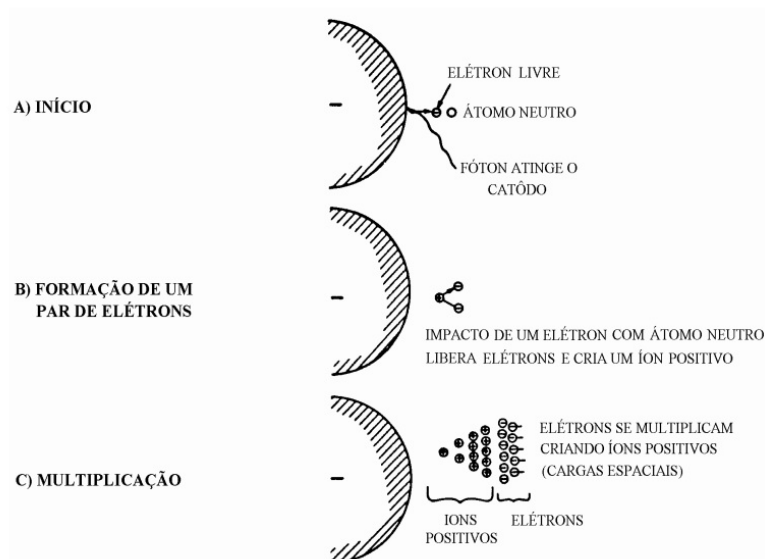


Figura 3: Efeito Avalanche (INSTITUTE, 1982).

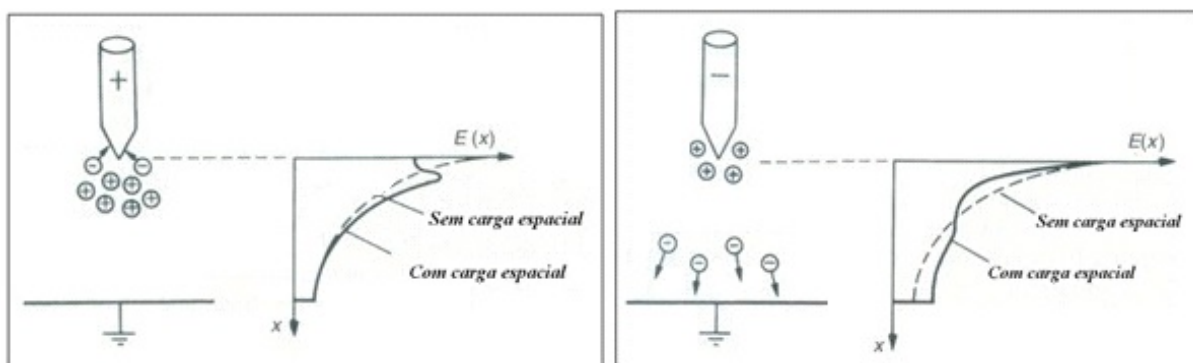


Figura 4: Distorção devido cargas espaciais no semiciclo positivo e no semiciclo negativo (KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2000).

Sob corrente alternada, o condutor muda de polaridade para cada semiciclo e para cada polaridade, o campo elétrico irá criar cargas espaciais diferentes que tendem a gerar mudanças no campo sob a vizinhança do condutor. Na Figura 4 (lado esquerdo), a ponta com tensão positiva representa o ânodo e uma placa aterrada representa o catodo. Para esta situação, as linhas do campo farão o caminho do ânodo para o catodo. Os elétrons nas proximidades do condutor irão ser acelerados em direção oposta ao campo. Devido a sua mobilidade, estes serão acelerados em direção ao condutor, isso gera uma nuvem de partículas positivas. As cargas geradas irão produzir justamente um campo contrário ao campo original, aumentando a intensidade deste após as cargas espaciais. Na Figura 4 (lado direito), o eletrodo tem tensão negativa e os elétrons são repelidos para a região de baixa intensidade, o que deixa as cargas positivas, próximas ao eletrodo negativo. Com isso, pode ser observado que essas cargas geram aumento de intensidade de campo próximo a ponta.

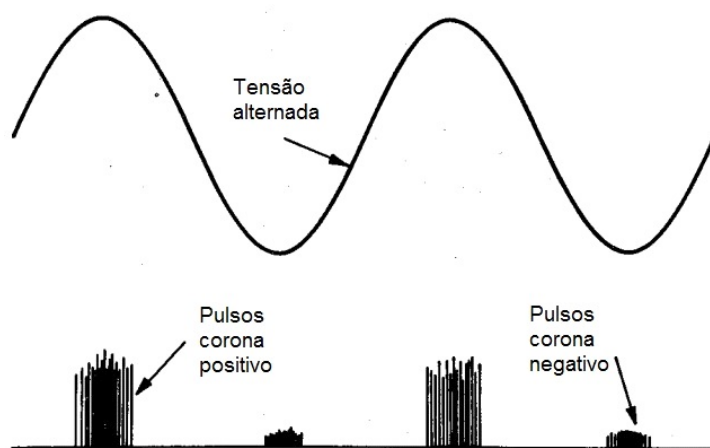


Figura 5: Pulsos referentes ao efeito corona em tensão alternada (INSTITUTE, 1982).

Sob condições de tensão alternada, as cargas espaciais podem modificar o tipo e a intensidade do corona que irá ocorrer em cada semiciclo. Na Figura 5, são mostrados os pulsos de corrente de corona correspondente para cada polaridade, mostrando que o fenômeno tem início a partir de determinado nível de tensão. O corona no semiciclo positivo da tensão de 60 Hz tem maior amplitude, coloração mais intensa (mais esbranquiçado), ruído audível mais intenso, sendo também responsável pela maior fonte de ruído de rádio interferência. Já o corona no semiciclo negativo, é menos intenso e tem menores amplitude (GILDICE, 2005).

Levado em conta uma mesma configuração geométrica, o corona referente ao semiciclo positivo, por questões da existência das cargas espaciais, se inicia com um valor de tensão maior que o que ocorre no semiciclo negativo.

2.3 Conclusão

Isoladores elétricos em geral possuem um papel de extrema importância nas cadeias de distribuição e transmissão de energia. O capítulo trata brevemente do histórico dos isoladores elétricos dando uma ênfase maior em dois tipos específicos de isoladores: porcelana e poliméricos. Os isoladores de porcelana são citados apenas para ser possível uma análise comparativa entre eles e os isoladores poliméricos, uma vez que, no presente trabalho, apenas isoladores poliméricos foram utilizados nos ensaios elétricos.

Em adição, demos uma abordagem geral nos fenômenos ligados a isoladores tais como: envelhecimento, arborescência e efeito corona. Os sinais de ultrassom provenientes do efeito corona são de suma importância neste trabalho, pois eles serão utilizados para realizar a classificação do isolador como com/sem efeito corona.

APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS

A ciência busca ferramentas eficientes para solucionar problemas complexos. Para isso, sistemas inteligentes são criados e aperfeiçoados constantemente. Uma das ferramentas mais utilizadas na aprendizagem de máquinas, mais especificamente em problemas de classificação, são as Redes Neurais Artificiais. Elas são baseadas no sistema nervoso e desempenham função semelhante ao mesmo como aprender a solucionar diversos problemas, e implementar resoluções para outras situações semelhantes que possam ocorrer.

Outro método bastante difundido na literatura que também é utilizado para resolução de problemas de classificação são as Máquinas de Vetores-Suporte (SVM). A utilização de SVM no presente trabalho se dá pelo fato de esta ferramenta ter um alto poder de generalização e um forte embasamento estatístico facilitando a resolução do problema exposto.

3.1 Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais (RNA) possibilitaram avanços significativos em diversas áreas, tais como desenvolvimento de arquitetura de computadores, circuitos eletrônicos, entre outras. Essas redes consistem em mecanismos processadores de informações semelhantes a neurônios orgânicos, que através de sucessivos somatórios, gera funções de otimização, reconhecimento de padrões ou previsão, que serão implementadas nas situações desejadas. Essas redes possuem modelos de ligações e aprendizagem genéricos. Esses modelos atendem a um fim específico e cabe ao responsável pela implementação, a escolha correta de acordo com a necessidade, adaptações e ajustes necessários.

3.1.1 Neurônio Artificial vs. Neurônio Biológico

O sistema nervoso é responsável por diversas funções do corpo, tais como movimento, comunicação, controle de glândulas, órgãos, entre outros. Também é responsável por o processamento de dados externos e aprendizagem. Durante a infância o sistema nervoso é

bem flexível, isso possibilita fácil aprendizagem de tarefas, diferente da fase adulta onde esse é mais rígido (LOESH; SARI, 1996).

Ele é composto principalmente de neurônios que se comunicam por impulsos elétricos (axônio) em varias direções, com outros neurônios (KOVÁCS, 2006). São conectados por ramos (dendrites), formando redes. Os neurônios apresentam comportamentos semelhantes a sistemas digitais binários, ou seja, sistemas representados por dois sinais: excitação e inibição. Baseando-se nisso McCulloch criou modelos, chamados de neurônios artificiais, que representavam os neurônios de forma booleana, ou seja, zeros e uns (KOVÁCS, 2006). Foi percebido que neurônios se comportam como somadores de sinais de entrada, para só então fornecer um sinal de saída. O neurônio é a unidade de processamento fundamental da RNA. O modelo de um neurônio artificial é apresentado na Figura 6.

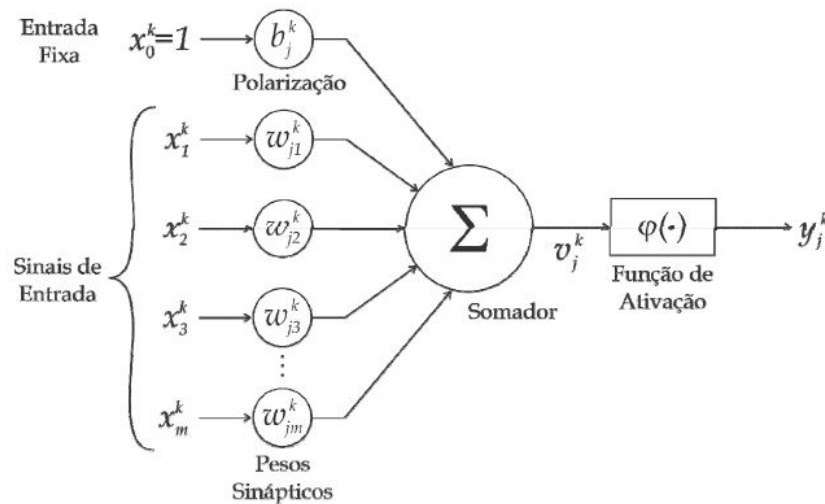


Figura 6: Modelo de um neurônio artificial (SILVA, 2005).

Podem-se identificar 3 elementos básicos (SILVA, 2005):

1. Um conjunto de sinapses ou conexões, caracterizadas individualmente por um peso sináptico w_{ji}^k , que indica a importância do sinal de entrada i na determinação da saída do neurônio j da camada k .
2. Um somador, que tem a função de realizar uma combinação linear dos sinais de entrada, ponderados pelos respectivos pesos sinápticos de suas ligações.
3. Uma função de ativação ϕ_k^j , que limita a amplitude da saída num intervalo normalizado, geralmente $[0,1]$ ou $[-1,1]$.

O modelo do neurônio artificial também inclui um termo denominado de polarização, representado por b_j^k , cujo efeito é modificar a entrada da função de ativação através da aplicação

de um sinal de entrada com valor fixo em $+1$. Em termos matemáticos, um neurônio j localizado na camada k é descrito através do seguinte par de equações (MCCULLOCH; PITTS, 1943):

$$v_j^k = b_j^k + \sum_{i=1}^{I^k} w_{ij}^k x_i^k \quad (3.1)$$

$$y_j^k = \phi_j^k(v_j^k), \quad (3.2)$$

nas quais I^k representa o número de entradas da camada; $x_0^k, x_1^k, \dots, x_{I^k}^k$, os sinais de entrada; $w_{j1}^k, w_{j2}^k, \dots, w_{jm}^k$, os pesos sinápticos; b_j^k , a polarização; v_j^k , o potencial de ativação; $\phi_j^k(\cdot)$, a função de ativação e y_j^k o sinal de saída.

A função de ativação $\phi_j^k(\cdot)$ define a saída de um neurônio j em termos de um potencial de ativação v_j^k , limitando o resultado a um intervalo conhecido. Isto evita que informações propaguem pelas camadas da RNA sem limite numérico de crescimento, o que pode ocasionar a saturação dos neurônios e a perda de eficiência da rede. Dentre as funções de ativação, destacam-se as funções sigmoidais, como a função:

$$\phi_j^k(v_j^k) = \frac{1}{1 + e^{-av_j^k}} \quad (3.3)$$

Outra função de ativação sigmoidal amplamente empregada é a tangente hiperbólica:

$$\phi_j^k(v_j^k) = \frac{1 - e^{-av_j^k}}{1 + e^{-av_j^k}} \quad (3.4)$$

Tanto na Equação 3.3 como na Equação 3.4 o parâmetro a , cujo valor é sempre maior que zero representa a suavidade da função.

3.1.2 Utilizando Redes Neurais

As redes neurais são geralmente utilizadas para controle, análise, identificação e classificação de dados em determinadas classes. Cada classe contém n elementos (padrões) que a representam, e a união das classe compõe o banco de dado completo. É importante salientar que cada classe deve ter o mesmo número de padrões, se isto não for garantido, podemos ter uma classificação tendenciosa, já que temos mais padrões de uma classe do que de outra.

Como acontece no cérebro humano, para que uma rede neural apresente resultados satisfatórios, é necessário que esta apresente uma boa capacidade de aprendizado. O processo de aprendizado de uma RNA é chamado de treinamento, sendo caracterizado pelo ajuste de todos os seus pesos através de um processo iterativo (HAYKIN, 2001). Uma regra bastante utilizada de aprendizado é:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta e(t)x_i(t) \quad (3.5)$$

em que $\eta \in [0,1]$ é a taxa de aprendizagem, $w_i(t+1)$ e $w_i(t)$ são os valores da i -ésima componente do vetor de pesos nas iterações t e $(t+1)$, respectivamente, $x_i(t)$ é o valor da i -ésima componente do vetor de entrada, $e(t)$ é o erro obtido na i -ésima iteração tal que $e(t) = d(t) - v(t)$, em que $d(t)$ é a saída desejada e $v(t)$ é a saída do neurônio. Vale ressaltar que a combinação do modelo de (MCCULLOCH; PITTS, 1943) com a regra de aprendizagem descrita acima caracteriza um dos tipos mais simplificados de RNA, o Perceptron Simples (PS).

Existem dois tipos de treinamento, o treinamento supervisionado e o não-supervisionado. Similar ao processo de aprendizagem real, onde o ser humano necessita de informações prévias de um determinado assunto para analisar situações e tomar decisões, o treinamento supervisionado baseia-se no ajuste dos pesos da rede neural através de padrões de entradas pré-estabelecidos. Este processo ocorre até a rede apresentar uma saída desejada (*target*). Já o treinamento não-supervisionado, realiza o ajuste dos pesos da rede neural considerando apenas os padrões de entrada.

O treinamento da rede da presente dissertação foi o supervisionado, neste tipo de treinamento, quando um padrão de entrada é apresentado à rede neural, esta, de acordo com os seus pesos iniciais, gera um valor na saída. Este valor é comparado com um valor desejado, resultando em um determinado erro. Baseado no valor deste erro, juntamente com o padrão de entrada utilizado, um algoritmo de ajuste de pesos é executado, resultando em novos valores de pesos na rede neural, encerrando a primeira iteração. Em seguida, os padrões de entrada são novamente aplicados à rede neural, obtendo uma nova saída e um novo erro, realizando um novo ajuste nos pesos. Este processo se repete até que um erro nulo ou dentro de um limite tolerável seja obtido.

O algoritmo de aprendizagem depende do modelo de rede empregado e deve estabelecer um equilíbrio entre a capacidade de generalização e a complexidade do modelo. Um mau dimensionamento pode resultar em um sobreajuste da rede aos dados utilizados para treinamento (*overfitting*) ou, ainda, fazer com que a rede não seja treinada suficientemente para

produzir resultados (*underfitting*). A seguir são apresentadas técnicas de inteligência artificial bastante difundidas na literatura, a saber: a Rede Neural Perceptron Multicamadas (*Multilayer Perceptron*, MLP) e as máquinas de vetores-suporte (*Support Vector Machines*, SVM).

3.1.3 Rede Perceptron de Múltiplas Camadas

Dentre as diversas arquiteturas de redes neurais artificiais, destacam-se como as mais difundidas as redes Perceptron de Múltiplas Camadas, ou redes MLP (*Multilayer Perceptron*), como são comumente conhecidas. Elas representam uma generalização do perceptron de camada única (HAYKIN, 2001).

Em outras palavras, podemos também dizer que uma rede neural perceptron com várias camadas é constituída de uma camada de entrada que recebe os vetores de atributos, uma ou mais camadas intermediárias, compostas por neurônios somadores com função de ativação não-linear e uma camada de saída, também composta por neurônios somadores (que podem ser lineares ou não) como podemos ver na Figura 7 (HAYKIN, 2001).

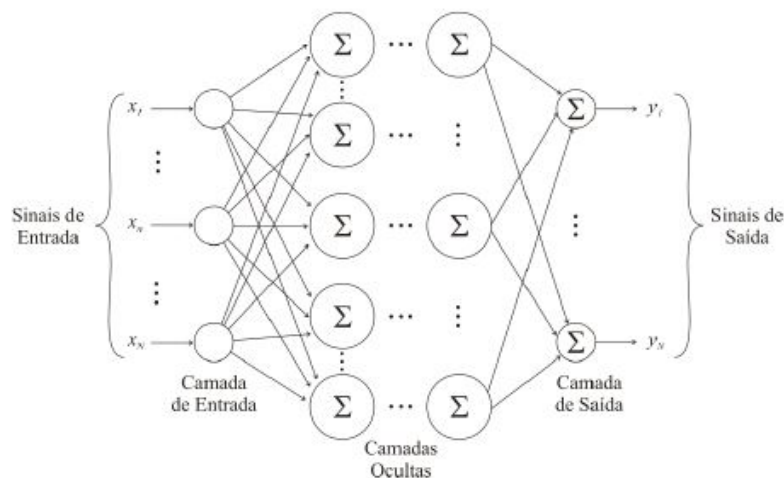


Figura 7: Arquitetura de uma rede MLP (HAYKIN, 2001).

Com exceção da camada de entrada, que tem a única função de distribuir os sinais de entrada sem alterá-los, as demais são constituídas de neurônios. O sinal de entrada se propaga através da rede, camada a camada, a partir das Equações 3.3 e 3.4, até que um sinal de saída seja computado.

As redes MLP são classificadas como redes supervisionadas, pois possuem um processo de aprendizagem supervisionado, baseado no subconjunto de treinamento de onde a rede irá extrair o conhecimento da aplicação. Para o correto treinamento da rede, cada resultado apresentado na

camada de saída de RNA é confrontado com o resultado esperado, também chamado de rótulo, para saber se a rede acertou ou não. Esta operação é realizada através da Função Energia de Erro (HAYKIN, 2001), definida como o erro médio quadrático entre a saída produzida pela rede e a desejada:

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in B} [d_j(n) - y_j(n)]^2 \quad (3.6)$$

em que B representa o conjunto de neurônios da camada de saída; $d_j(n)$ é a saída desejada do neurônio de saída j , para o padrão n do conjunto de treinamento; $y_j(n)$ é a saída calculada do neurônio de saída j , para o padrão n do conjunto de treinamento.

Inúmeros algoritmos são utilizados para treinar redes perceptron de múltiplas camadas, mas, como esse não é o foco desse trabalho, não entraremos nesse mérito.

3.2 Máquina de Vetores de Suporte (SVM)

As Máquinas de Vetores Suporte (Support Vector Machines - SVMs) constituem uma técnica embasada na Teoria de Aprendizagem Estatística (VAPNIK, 1995) que vem recebendo grande atenção desde os anos 2000 (HEARST *et al.*, 1998) (Cristianini and Shawe-Taylor, 2000). Conceitualmente falando, o funcionamento das SVMs se resume no mapeamento de vetores de entrada para um espaço de altíssima dimensão ($\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n_h}$). Neste espaço, as características para uma superfície de decisão linear, antes não-lineares, são encontradas (VAPNIK, 1995).

É considerado um método geral de aprendizagem supervisionado, aplicado tanto a problemas de classificação quanto de regressão. As SVMs baseiam-se no princípio de minimização do risco estrutural (Structural Risk Minimization, SRM) que busca a maximização da capacidade de generalização, o que resulta em modelos com desempenho superior ao das redes neurais convencionais, que empregam apenas a minimização do risco empírico (Empirical Risk Minimization, ERM) (GUNN, 1998).

De um modo geral, o resultado do mapeamento realizado no processo de treinamento da SVM consiste em encontrar os padrões mais próximos ao hiperplano de separação entre as classes. Estes padrões são denominados de vetores-suporte (VS) e representam os vetores mais informativos do conjunto de treinamento. Desta forma, os vetores-suporte são os únicos vetores a serem armazenados para posterior apresentação e avaliação de padrões não vistos na etapa de teste.

Um fator limitante ao uso do classificador SVM é a complexidade de resolução (CARVALHO, 2005a), uma vez que treinar uma Máquina de Vetores-Suporte exige a resolução de um problema de programação quadrática (QP) com restrições de desigualdade (OSUNA; FREUND; GIROSI, 1997). Outro fator importante para sua devida utilização, consiste na escolha adequada da função de kernel e, conseqüentemente, da escolha dos parâmetros associados a mesma. Esta função é responsável por elevar a dimensão dos dados utilizados para que seja possível separá-los através de um hiperplano. Diversas funções de kernel são citadas na literatura, na presente dissertação abordaremos a mais comumente utilizada, a RBF (Radial Basis Function), que é dada por $K(x, x_i) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / \sigma^2)$.

A formulação do problema primal de uma SVM é dada pela minimização da seguinte função custo (HAYKIN, 2001):

$$\begin{aligned} \min \quad & J_P(w, b, \xi) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \text{sujeito a} \quad & \begin{cases} y_i \{ [w^T \phi(x_i)] \} + b \geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, \dots, N, \\ \xi_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N. \end{cases} \end{aligned} \quad (3.7)$$

em que a constante C representa uma regularização entre os dois termos da função $J_P(w, b, \xi_i)$, sendo o primeiro termo ($\frac{1}{2} w^T w$) responsável pela maximização da margem e o segundo termo ($C \sum_{i=1}^N \xi_i$) responsável por minimizar os erros permitidos, b é o viés, ξ_i a variável de folga associada ao padrão x_i e w é o vetor de pesos normal ao hiperplano de separação entre as classes.

Problemas dessa natureza que apresentam uma função custo convexa e com restrições lineares (HAYKIN, 2001), podem ser solucionados através da aplicação do método dos multiplicadores de Lagrange. Este método agrega as restrições à função custo, que associadas a variáveis auxiliares, transformam o problema primal em um novo. Dessa forma, a seguinte função Lagrangeana $L(w, b, \xi, \alpha, \beta)$ é obtida (HAYKIN, 2001):

$$L(w, b, \xi, \alpha, \beta) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \xi_i - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{ y_i [w^T \phi(x_i) + b] - 1 + \xi_i \} - \sum_{i=1}^N \beta_i \xi_i, \quad (3.8)$$

em que os conjuntos de multiplicadores de Lagrange $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ e $\{\beta_i\}_{i=1}^N$ possuem valores positivos.

A partir da solução do problema apresentado na Equação 3.8, o problema dual a ser

otimizado para o classificador SVM é expresso por (HAYKIN, 2001):

$$\max L(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j, \quad (3.9)$$

$$\text{sujeito a } \begin{cases} \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, \dots, N. \end{cases}$$

O processo de tomada de decisão é realizado com base na seguinte função (HAYKIN, 2001):

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i^o y_i x^T x_i + b_o \right), \quad (3.10)$$

em que valores positivos são associados a padrões pertencentes à classe $y_i = +1$ (representado, por exemplo, a existência de defeito em um isolador), enquanto valores negativos são associados a padrões pertencentes à classe $y_i = -1$ (representado, por exemplo, um isolador normal).

Como foi dito anteriormente, uma SVM também tem a capacidade de resolver problemas não-lineares pelo mapeamento do espaço de entrada para um espaço de altíssima dimensão, isto é feito no problema dual pela substituição do produto interno $x_i^T x_j$ por uma função de kernel $K(x_i, x_j)$ tanto na Equação 3.9 como na Equação 3.10.

3.3 Conclusão

Este capítulo expõe as ferramentas que serão utilizadas nesta dissertação para realizar a classificação dos isoladores poliméricos como emitindo/não emitindo radiação ultrassônica característica do efeito corona . É dado um embasamento sobre Redes Neurais Artificiais e uma pequena introdução à classificação utilizando *Support Vector Machine* (SVM).

As duas ferramentas expostas neste capítulo funcionam bem quando utilizadas na resolução de problemas de classificação de padrões. Como exposto no texto, as Redes Neurais Artificiais, mais especificamente as redes MLP (*Multilayer Perceptron*), são supervisionadas, necessita de um subconjunto de treinamento de onde a rede irá extrair os melhores pesos para a classificação dos padrões desconhecidos que, posteriormente, serão dados como entrada.

As Máquinas de Vetores-Suporte são utilizadas igualmente para classificar os isoladores

poliméricos, mas, por sua vez, se baseia na Teoria de Aprendizagem Estatística. Resumidamente, utilizando esta ferramenta, podemos tratar um problema de classificação não-linear como um problema linear apenas mapeando os vetores de entrada para um espaço com uma maior dimensão.

ENSAIOS ELÉTRICOS CONTROLADOS EM LABORATÓRIO

Para simular o funcionamento de um isolador elétrico, foram realizados ensaios controlados em laboratórios de alta/média tensão para só assim sermos capazes de captar sinais provenientes de isoladores em situações análogas às reais. Os ensaios foram realizados no laboratório da empresa de distribuição de energia elétrica do Ceará (ENEL), no laboratório B&Q localizado na cidade de Euzébio e no laboratório de ensaios elétricos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A seção seguinte mostra a descrição do sistema de hardware e os procedimentos experimentais utilizados para realizar a captura dos dados de ultrassom provenientes do isolador quando o mesmo está energizado.

4.1 Metodologia para Captação de Dados nos Ensaios Elétricos

O sistema montado para a captação de sinal de ultrassom proveniente dos isoladores consiste de um transdutor de ultrassom, um sistema de tratamento do sinal analógico e uma metodologia de amostragem e armazenamento da informação digital. Na Figura 8 é possível visualizar um diagrama de blocos do sistema com os componentes acima citados.

Para a conversão de sinais ultrassom em corrente elétrica foi utilizado o sensor de ultrassom *MA40S4R*, fabricado pela *muRata*. O transdutor tem as seguintes características: faixa de frequência nominal variando de 39 *kHz* a 41 *kHz*, a sensibilidade varia de -60 *dB* a -66 *dB*, o sensor tem uma diretividade de aproximadamente 80 graus, ressaltando que nos ensaios elétricos realizados foi verificado que uma mudança na direção do sensor ocasionava uma diferença considerável no sinal recepcionado, a temperatura de operação do sensor vai de -30 a $+85$ graus Celsius. Na Figura 9 temos resposta em frequência e a diretividade do sensor. No Anexo A constam todas as demais características do sensor.

O sistema de tratamento analógico do sinal consiste em amplificar o sinal de ultrassom

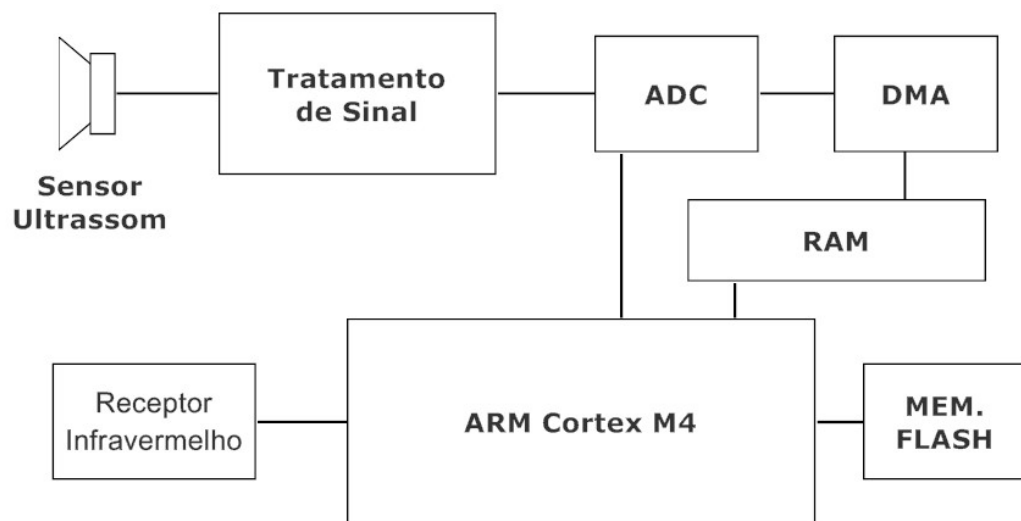


Figura 8: Diagrama de blocos do sistema de aquisição (Fonte: Próprio autor).

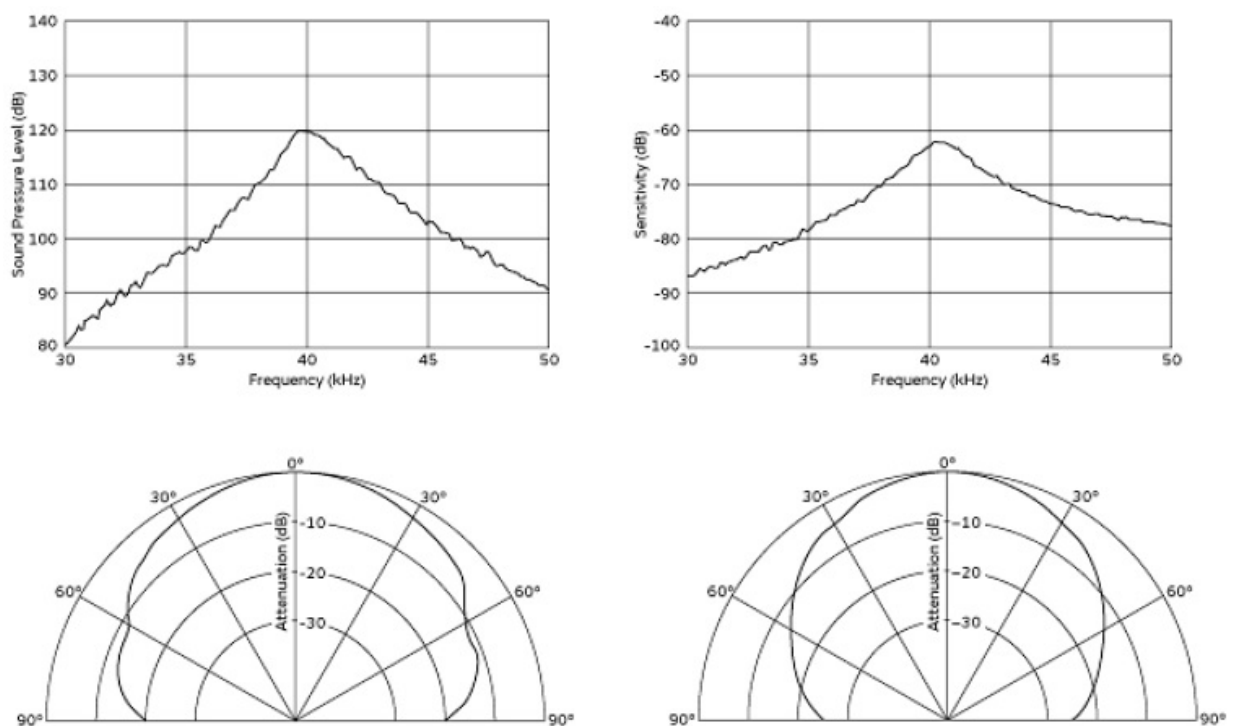


Figura 9: Resposta em frequência e diretividade do sensor de ultrassom (Anexo A).

captado pelo microfone sonar para níveis de tensão compatíveis com os valores máximos permitidos pelo conversor analógico-digital do sistema microcontrolador (0 V a 3,3 V). Isto permite um melhor uso da resolução do conversor. A amplificação é feita com o uso de amplificadores operacionais (LMC6032) em montagem não inversora, como pode ser visto na Figura 10, consistindo de quatro estágios de amplificação em cascata, de forma que o ganho total é de aproximadamente 2000 (66 dB) vezes, com resposta linear até 40 kHz.

Ruídos podem ser inseridos por diversas fontes, externas ou internas (até a própria fonte de alimentação do sistema). Para amenizar este efeito, foram inseridos circuitos de filtragem em dois dos quatro estágios de amplificação e na entrada de sinal. Os filtros foram dimensionados de tal maneira que as frequências que estão fora da região alvo (em torno de 40 kHz) sejam bastante atenuadas, vale ressaltar que as emissões ultrassônicas dos sinais característicos do efeito corona ocupam uma faixa mais larga que a região em torno de 40 kHz, mas, para os objetivos deste trabalho, esta faixa foi a escolhida. Os estágios de filtragem são necessários para termos sinais mais facilmente entendíveis e tratados por microcontroladores do que os sinais não filtrados repletos de ruídos externos e interferências eletromagnéticas.

Já na parte de aquisição de dados, o subsistema de amostragem e aquisição do sinal consiste de uma placa de desenvolvimento *STM32F407 Discovery*, baseada em um microcontrolador ARM Cortex-M4F de 32 bits com 1 MB de memória de programa, 192 KB de memória RAM e frequência de 168 MHz. Este ARM foi escolhido por apresentar baixo consumo de energia, ter a capacidade de captura de dados necessária a nossa aplicação (suficiente para capturar ao menos um período de rede com boa resolução para 40 kHz - 225 kps). A placa de desenvolvimento apresenta ainda 3 canais de conversão analógico-digital com resolução de 12 bits a uma taxa de até 2,4 milhões de amostras por segundo. Para esta aplicação, foi usada uma taxa de amostragem de 225 mil amostras por segundo, que é suficiente para a captura do sinal de ultrassom desejado.

A cada captura, o conjunto de dados é armazenado na memória RAM da placa *STM32F407*, em seguida é feita uma gravação em memória *flash* na forma de um arquivo de texto. Cada captura recebe uma identificação única para que, posteriormente, seja analisado um conjunto de várias capturas. Todo este processo de transferência de dados do ADC para a memória *flash* é controlado por um software executado no microcontrolador, usualmente denominado de *firmware*. Em resumo, este software aguarda um comando de ativação oriundo do controle remoto (sensor infra-vermelho). Ao receber o comando ele ativa o conjunto DMA e ADC para a captura de 5000 pontos e armazenamento dos dados em memória RAM. Ao final deste processo, um novo arquivo é aberto na memória *flash* e os dados capturados são gravados nele. O passo seguinte é retornar para o estado de espera por um novo comando do controle

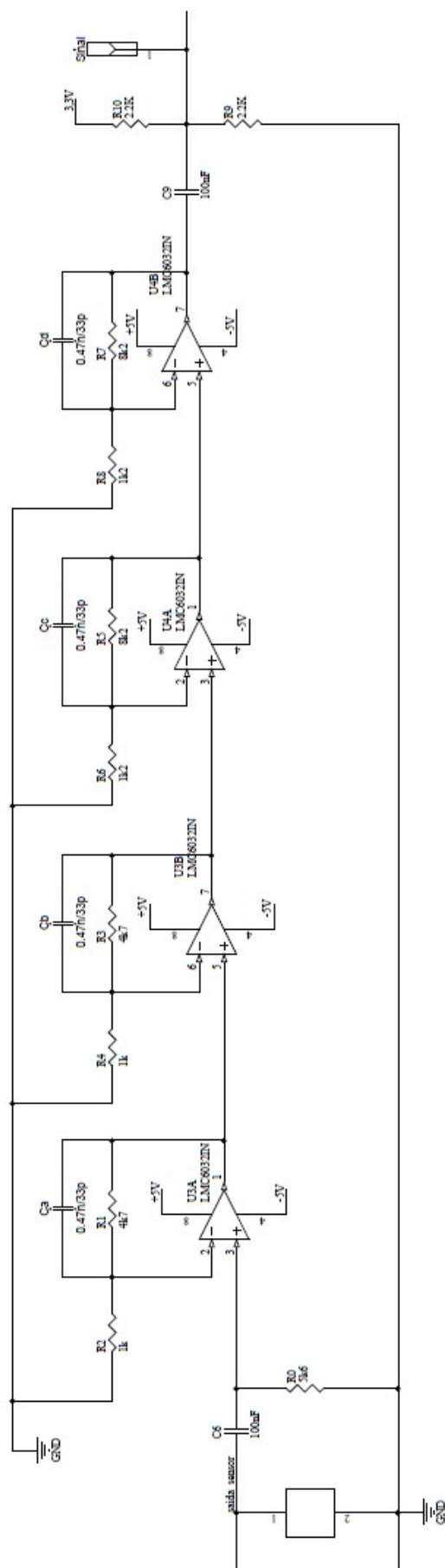


Figura 10: Esquemático do circuito amplificador (Fonte: Próprio autor).

remoto que dá início a uma nova captura.

Como foi dito anteriormente, cada arquivo de dados contém 5000 amostras, o que implica numa duração de 22 *ms* com a taxa de amostragem adotada. Como a frequência da rede elétrica é de 60 *Hz*, estas 5000 amostras abrangem um pouco mais do que um ciclo completo de 16,67 *ms*. Este fato é importante pois foi observado nos ensaios elétricos que os sinais de ultrassom gerados pelos isoladores ocorrem, na sua grande maioria, pelo menos uma vez a cada ciclo. Logo, se a captura fosse menor que um ciclo da rede, poderia ocorrer a não captura de um sinal de ultrassom emitido. A análise dos dados capturados e armazenados é realizada em uma etapa posterior, usando-se um pré-processamento e filtros digitais para a retirada de interferências, ruídos e da componente de 60 *Hz* da rede.

O microcontrolador ARM é responsável por programar o ADC para a taxa de amostragem desejada. Um canal de DMA é utilizado para garantir que o intervalo de amostragem entre cada um dos 5000 pontos seja constante. Ele copia diretamente 5000 leituras do ADC na memória RAM. O ARM faz a cópia destes pontos para um arquivo na memória *flash*. O receptor infra-vermelho é utilizado para que se possa remotamente iniciar um processo de aquisição de dados. Assim, o sistema pode ser instalado em uma torre e acionado remotamente.

É necessário um tratamento adicional aos sinais captados, pois os mesmos ainda estão repletos de interferências e ruídos. A faixa alvo trabalhada neste texto como sendo característica dos sinais de ultrassom provenientes dos isoladores vai de 38 *kHz* a 42 *kHz*, então todas as componente de frequências que estão fora dessa faixa devem ser filtradas (atenuadas). Projetamos um filtro digital FIR (*Finite Impulse Response*) do tipo passa-faixa contendo nulos em 0 *Hz*, 10 *kHz*, 64 *kHz*, 83,8 *kHz* e 112,5 *kHz* (metade da frequência de amostragem). A resposta em frequência do referido filtro pode ser vista na Figura 11. Escolhemos um filtro com estrutura FIR devido à sua facilidade de implementação em um sistema embarcado. Esse filtro é usado no pré-processamento do sinal capturado, permitindo que a rede neural tenha dados, dentro da faixa de frequência de interesse, para o processamento e identificação do efeito corona nos isoladores.

4.2 Procedimentos Experimentais

Durante os testes do sistema foi utilizado um osciloscópio digital Tektronix *MDO4034*. O protótipo e o osciloscópio faziam capturas simultâneas. Desta forma foi possível analisar os dois sinais a posteriori e confirmar que eles possuem as mesmas componentes. O osciloscópio fez ainda a gravação da corrente através do isolador, o que permite avaliar alguma condição de

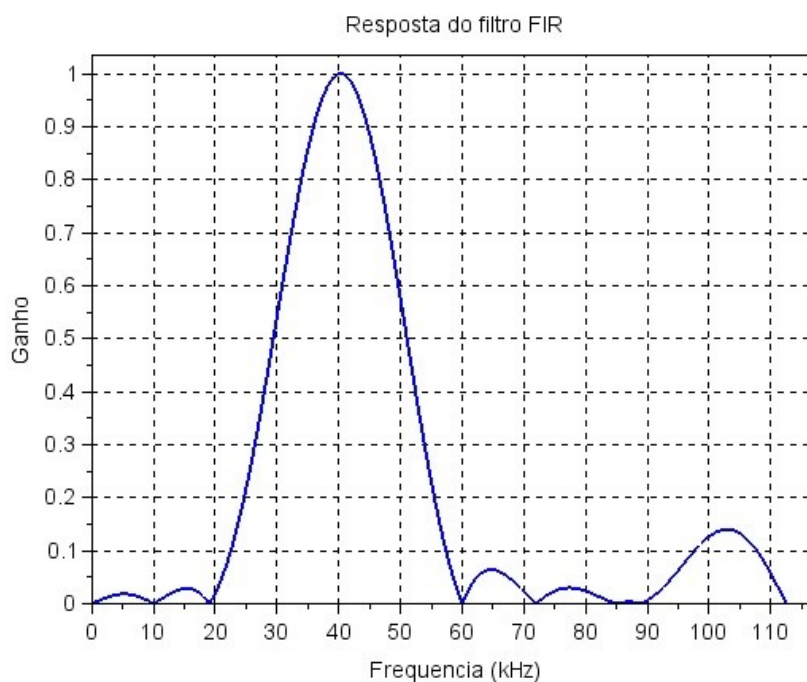


Figura 11: Resposta em frequência do filtro FIR utilizado

falha no isolador e associar com os níveis de ultrassom emitidos. Para confirmar a emissão de ultrassom pelo isolador foi utilizado um detector ultrassônico, modelo *SDT – 200*.

O detector ultrassônico *SDT – 200* é um equipamento capaz de fazer a captação e detecção de sinais sonoros fora da faixa audível e converte-los para uma faixa na qual o ser humano seja capaz de ouvir. Possui uma largura de banda que varia de 2 kHz para mais ou para menos em um nível de potência de -6 dB , frequência central de $40\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$, possui uma sensibilidade de -65 na faixa de frequência central e ângulo de visada de 55 graus. Na Figura 12 é possível visualizar o equipamento propriamente dito, vale ressaltar que na figura não consta a antena aproximadamente parabólica que é utilizada para melhorar a captação das ondas de ultrassom. (CST-EQUIPMENT, 2017)

O sistema proposto foi utilizado para captura de sinais de ultrassom emitidos por seis isoladores para linhas de transmissão de 69 kV em diversas condições de deterioração. Os isoladores foram ensaiados nas condições de seco e contaminado com poluição salina (seca e úmida). Na Figura 13(a) é possível ver os isoladores utilizados no ensaio elétrico em questão.

A Figura 14 mostra o diagrama do experimento e as conexões entre os diversos componentes utilizados. Os isoladores foram submetidos a tensões entre 40 kV e 45 kV .

Para os ensaios, os isoladores foram elevados por um cabo, conectados ao terra pela parte superior e energizados pela fase, parte inferior do isolador, como pode ser visto na Figura 13(b). Para minimizar interferências, um cano metálico foi usado para envolver o cabo que liga o



Figura 12: Kit do equipamento SDT-200.

transformador ao isolador. A sequência para a realização do ensaio foi:

- Submeter o isolador à tensão desejada;
- Por meio do aparelho SDT-200, verificar se há a emissão característica para as condições físicas e elétricas;
- Na ocasião a qual, por meio do aparelho SDT-200, seja detectada emissão de algum sinal sonoro peculiar, fazer a aquisição dos dados por meio do protótipo;
- Passar para a próxima condição de teste e realizar todos os passos descritos anteriormente.

Para os ensaios, a caixa do protótipo, com o transdutor ultrassônico, foi posicionada a 190 cm do isolador e direcionada para a conexão de fase, onde se observa maior intensidade de emissão de ultrassom (conclusão tirada experimentalmente). Esta distância garante segurança para a tensão envolvida e permite que uma intensidade de sinal adequada chegue ao transdutor ultrassônico. A Figura 15 mostra o protótipo colocado sobre uma estrutura de andaime. O sistema é alimentado por bateria e tem uma autonomia de aproximadamente 60 horas se forem realizadas 10 (dez) aquisições por minuto.

Os arquivos gravados pelo protótipo são do tipo texto, com extensão .CSV. Este tipo de arquivo pode ser facilmente aberto por ferramentas de tratamento de sinais, como o Scilab. Essencialmente o arquivo contém uma coluna com a numeração da captura e outra coluna com o valor amostrado, separados por ponto-e-vírgula. Cada arquivo contém 5000 pontos (amostras). Estas amostras são processadas digitalmente, conforme os seguintes passos:



(a)



(b)

Figura 13: (a) Isoladores utilizados no ensaio; (b) Isolador preparado para realização do ensaio elétrico.

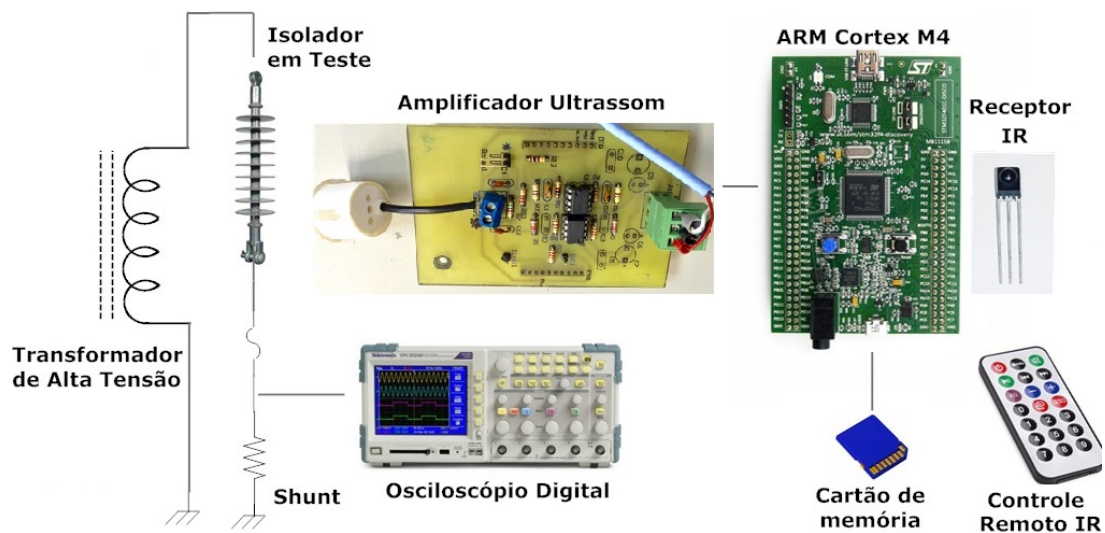


Figura 14: Diagrama dos componentes utilizados no experimento.



Figura 15: Caixa do protótipo

- Normalização da amplitude do sinal capturado: $v_n(t) = v(t)/\max|v(t)|$;
- Retirada do valor médio: $v_n(t) = v_n(t) - \text{mean}(v_n(t))$;
- Filtragem digital por um filtro FIR do tipo passa-faixa. A resposta em frequência do referido filtro pode ser vista na Figura 11.

4.3 Conclusão

O projeto fruto dessa dissertação previa a confecção de unidades sensores para utilização em torres energizadas com 69 kV. Como realizar testes em tais torres era completamente inviável, viu-se a necessidade da realização de ensaios elétricos controlados em laboratório. O presente capítulo aborda como tais ensaios elétricos foram realizados e qual foi a metodologia utilizada para tornar possível a captação dos sinais de ultrassom emitidos pelos isoladores poliméricos energizados.

Foi mostrado o diagrama de blocos da metodologia de captação do sinal que conta de um sensor de ultrassom, um bloco de tratamento do sinal, uma fase de conversão do sinal de analógico para digital, um bloco de armazenamento dos sinais captados para posterior análise e um bloco de análise, mais especificamente, o ARM Cortex M4. O controle de início da captura do sinal foi feito por um dispositivo que emite um sinal infravermelho e um receptor deste mesmo tipo de sinal.

No capítulo foram dados detalhes do processamento digital que é feito no sinal, a saber: normalização da amplitude do sinal capturado, retirada do valor médio e filtragem do sinal por um filtro FIR (*Finite Impulse Response*) do tipo passa-faixa.

RESULTADOS

Neste capítulo temos a apresentação dos resultados. São mostradas formas de ondas capturadas nos procedimentos experimentais e as devidas conclusões acerca destas além da classificação pela rede neural escolhida nesse texto. Serão dados detalhes adicionais de como o banco de dados para utilização da rede neural foi criado, do pré-processamento do sinal após a captura, ou seja, como o sinal foi tratado para ser melhor utilizado pela rede e, por fim, como foi realizada a classificação dos padrões que são dados de entrada na rede. Vale ressaltar que as formas de ondas aqui apresentadas são ligeiramente diferentes das formas de ondas apresentadas no capítulo anterior pelo fato de serem utilizados isoladores diferentes e as capturas serem feitas em momentos diferentes. Lembremos que o nível de ruído proveniente de rádios AM nos arredores do local do ensaio e o ruído proveniente da rede elétrica são variáveis.

5.1 Formas de Ondas Capturadas nos Procedimentos Experimentais

As Figuras 16 a 19 mostram alguns dos dados capturados durante os ensaios. Nas figuras em questão, o gráfico da parte superior mostra um sinal no domínio do tempo, enquanto o gráfico inferior mostra o mesmo sinal no domínio da frequência. A Figura 16 apresenta o sinal emitido por um isolador velho, impregnado com poluição salina e molhado. Nesta situação, mesmo sob tensão nominal, ocorre o fenômeno de *flashover*, com emissão intensa de ultrassom. O fenômeno de *flashover* é caracterizado por descargas parciais visíveis na superfície do isolador.

No espectro do sinal capturado observa-se um conjunto de componentes em torno de 40 *kHz*, que é a faixa alvo do trabalho aqui apresentado, frequências fora desta faixa são atenuadas pelo elemento sensor e pelos filtros adicionados no projeto. Nota-se também uma componente um pouco acima de 80 *kHz*, que é uma interferência introduzida pela fonte de alimentação do sistema, a fonte usada para alimentar a placa é uma fonte do tipo chaveada que acaba por gerar uma interferência na alimentação na faixa de 80 *kHz*. Esse sinal ruidoso não tinha uma frequência fixa, a cada vez que o circuito era ligado a frequência mudava um pouco, mas não

ficava fora dos arredores de 80 kHz . Analisando o sinal da Figura 16 no domínio do tempo percebe-se que a ocorrência de ultrassom não é contínua, mas intermitente. Ela é uma onda de choque provocada pelas pequenas descargas parciais que ocorrem no isolador.

A Figura 17 foi produzida a partir do mesmo sinal capturado para a Figura 16. Entretanto, em adição, o sinal passou por uma etapa de filtragem digital, utilizando o filtro FIR descrito anteriormente, para atenuar as interferências e evidenciar o espectro de interesse, situado em torno de 40 kHz . Nota-se, pelo gráfico no domínio da frequência, que as interferências são satisfatoriamente atenuadas e a faixa de frequência de interesse têm sua intensidade preservada por meio de um ganho unitário.

A Figura 18 apresenta o resultado da captura dos dados de ultrassom para um isolador novo, sob tensão nominal e seco. Nesta condição, a emissão de ultrassom não é significativa. O sinal observado é basicamente ruído e o sinal de interferência gerado internamente pela fonte de alimentação do protótipo. Neste sinal não são observados picos que se destaquem do ruído de fundo. Vale destacar que para o isolador em bom estado a intensidade do sinal de 40 kHz esta abaixo de 20 dB , ao passo que para o isolador sob descarga a intensidade de ultrassom se aproxima de 30 dB . A Figura 19 foi gerada de forma semelhante à Figura 17, e tomando por base o sinal da Figura 18.

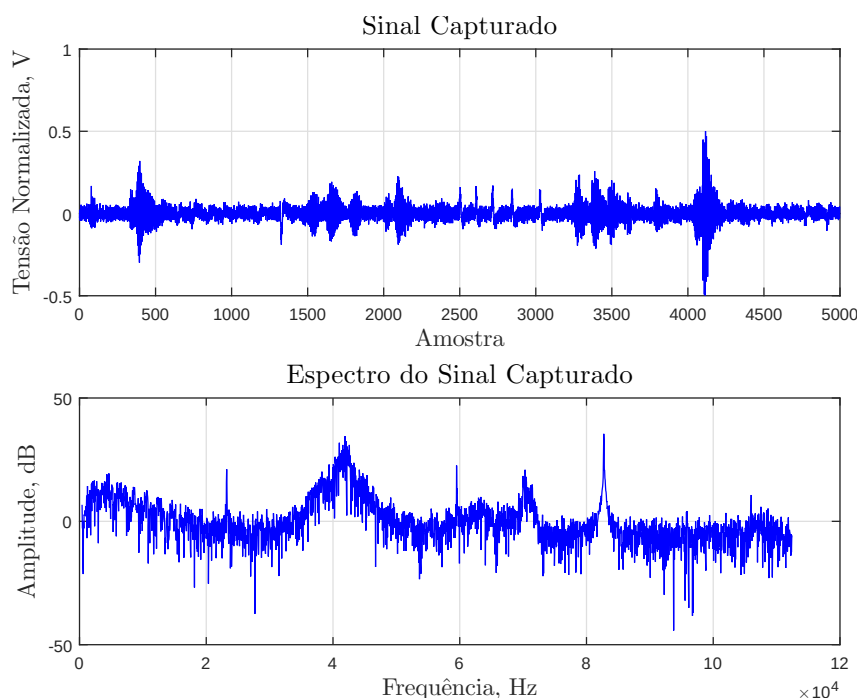


Figura 16: Dados capturados e espectro dos dados capturados em condição de *flashover*.

Comparando as Figuras 16 e 18, é possível notar, mesmo antes da filtragem, que o ruído de fundo não chega a mascarar o sinal de ultrassom gerado. A filtragem digital destaca os pulsos de

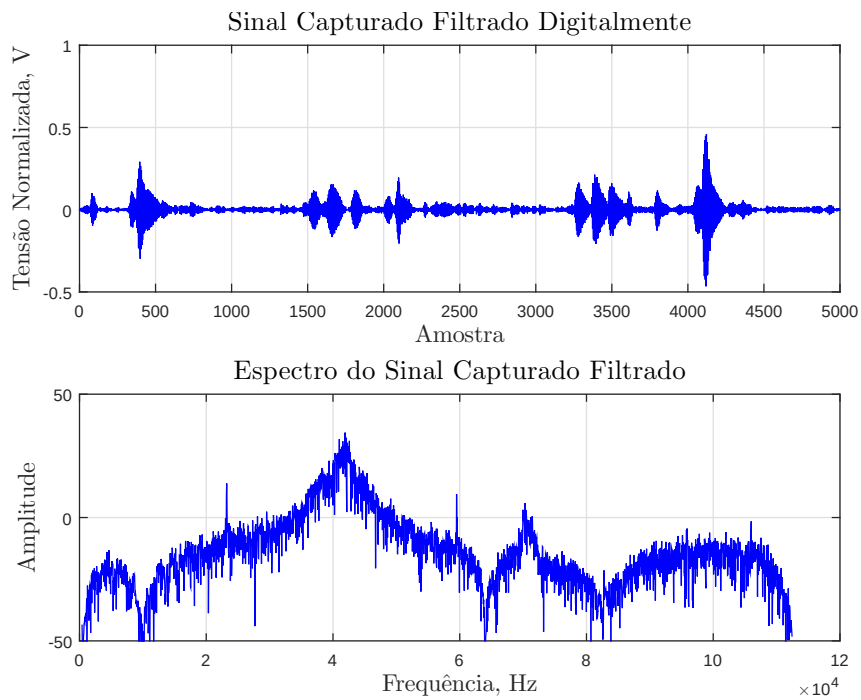


Figura 17: Dados capturados e espectro dos dados capturados em condição de *flashover* após filtragem digital.

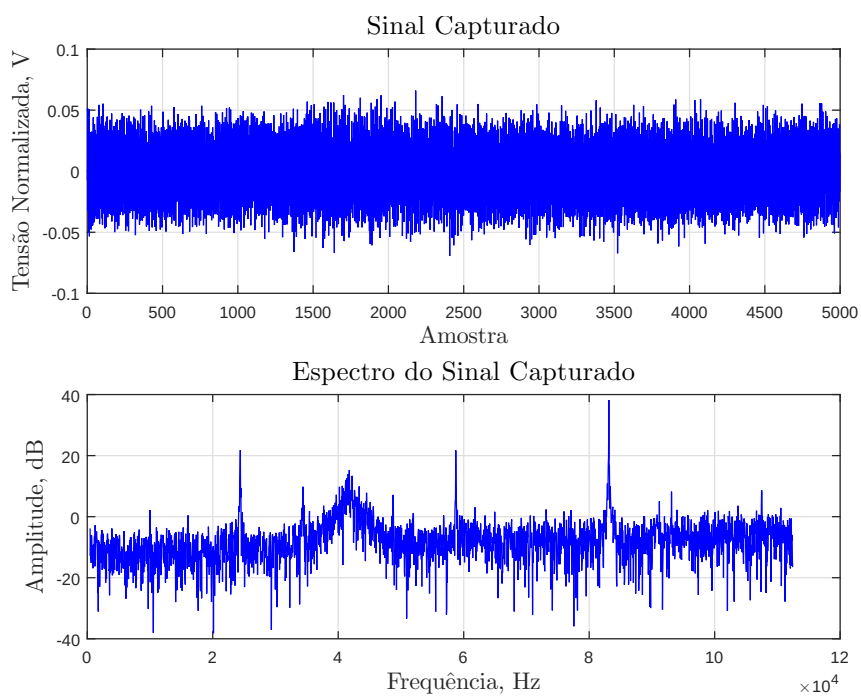


Figura 18: Dados capturados e espectro dos dados capturados de isolador polimérico novo.

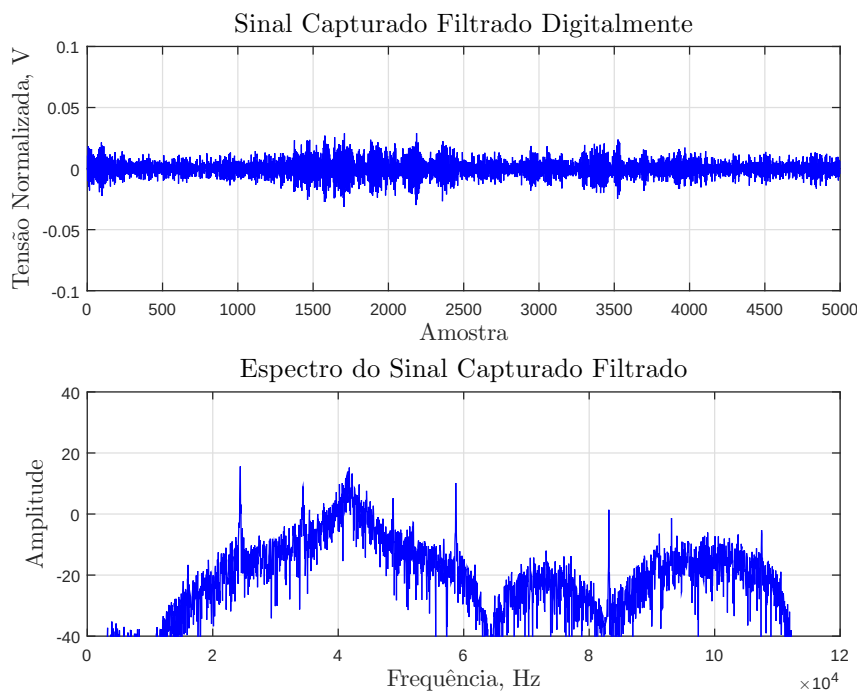


Figura 19: Dados capturados e espectro dos dados capturados de isolador polimérico novo após filtragem digital.

ultrassom e melhora a confiabilidade de um sistema de reconhecimento automático da emissão de ultrassom em um isolador energizado. Esta indicação pode ser usada para a sinalização da presença de poluição na superfície do isolador, por exemplo, alertando a equipe de manutenção preventiva antes que ocorra uma falha na rede elétrica.

Nas Figuras 17 e 19 pode-se ver os sinais capturados filtrados digitalmente e os respectivos espectros de frequência. É interessante notar que após a etapa de filtragem, os picos vistos no domínio do tempo se tornam mais destacados, e o ruído não interfere tanto nos dados relevantes para análise no domínio da frequência. É possível entender a contribuição de uma etapa de filtragem, especialmente para os casos em que o ruído de fundo tem uma amplitude semelhante ao sinal de ultrassom.

As Figuras 20 a 25 mostram outras capturas de sinais provenientes dos isoladores em outra oportunidade de ensaio elétrico. Cada figura contém a mesma forma de onda no domínio do tempo e da frequência com dados filtrados, dupla de formas de onda inferior, e não filtrados, dupla de formas de ondas superior. Vale ressaltar que os títulos das formas de onda no domínio do tempo são referentes a captura realizada em campo, logo, se o título diz "2.CSV", isto significa que a forma de onda em questão foi a segunda captura no ensaio elétrico do isolador em questão. As formas de ondas no domínio da frequência, de forma diferente das Figuras 16 a 19, não estão numa escala logarítmica, as magnitudes estão dispostas em uma escala linear.

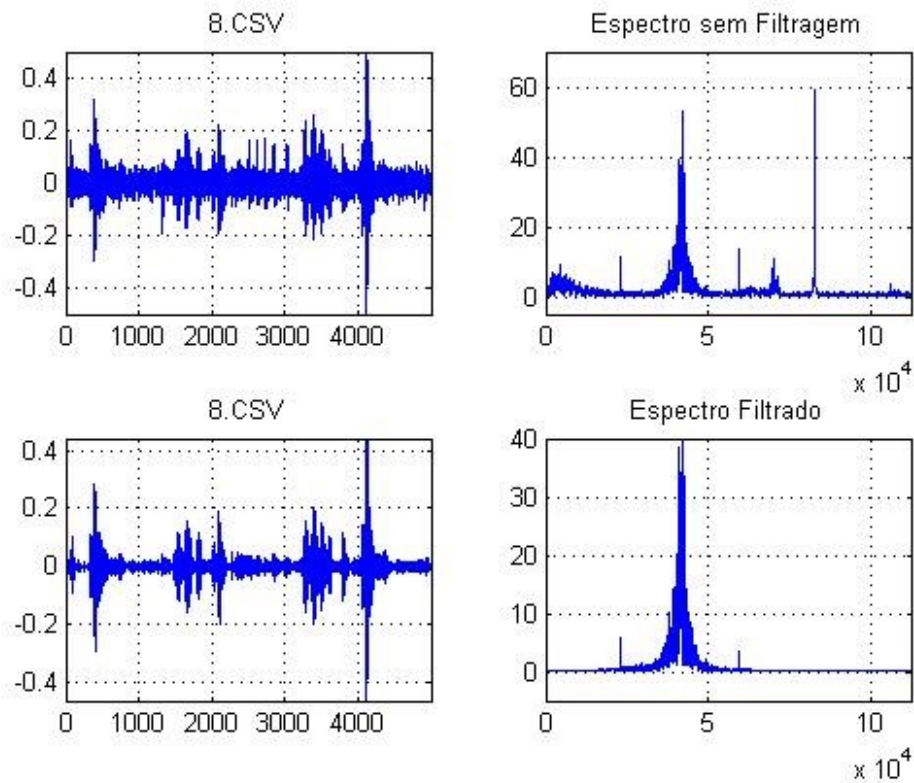


Figura 20: Amostras capturadas na ocorrência de *flashover* antes e após filtragem digital.

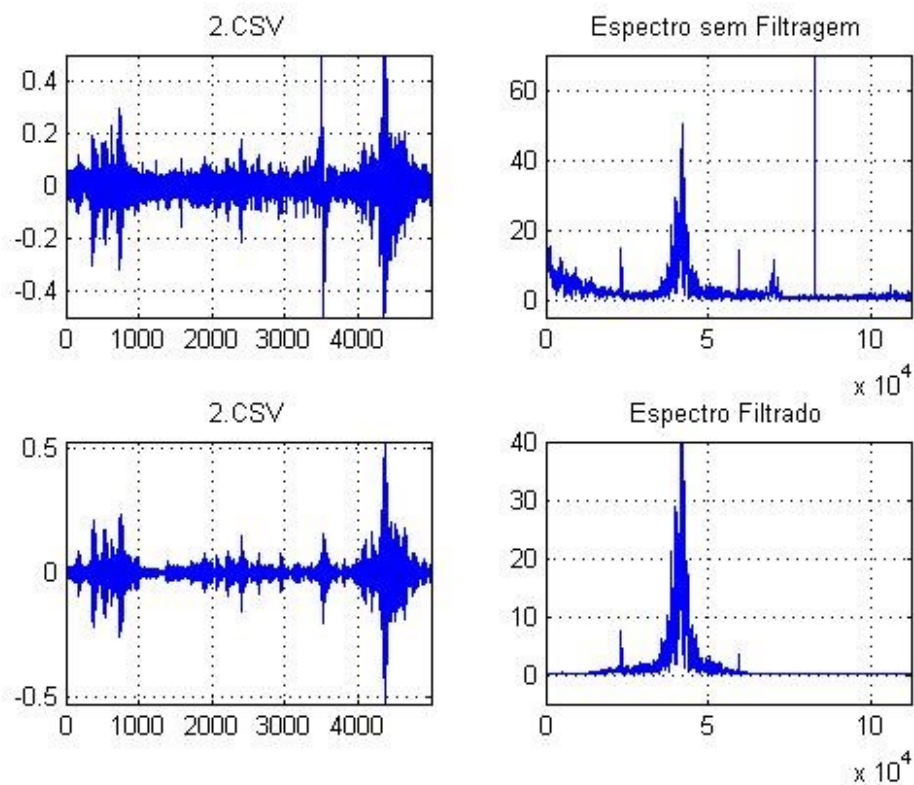


Figura 21: Amostras capturadas na ocorrência de *flashover* antes e após filtragem digital.

Como pode-se perceber, os dados de ultrassom das Figuras 20 e 21, que são provenientes de um isolador com a presença de *flashover*, são bem relevantes na faixa de 40 kHz. O isolador em questão estava úmido e poluído com uma solução salina.

Um dos objetivos que foram vislumbrados no decorrer deste trabalho foi a possibilidade de diferenciar um isolador com a ferrugem da extremidade da fase oxidada e um isolador normal apenas tomando como base o espectro do sinal de ultrassom. A Figura 22 mostra uma amostra de um isolador com a base de ferro oxidada e a Figura 23 mostra uma forma de onda proveniente de um isolador novo.

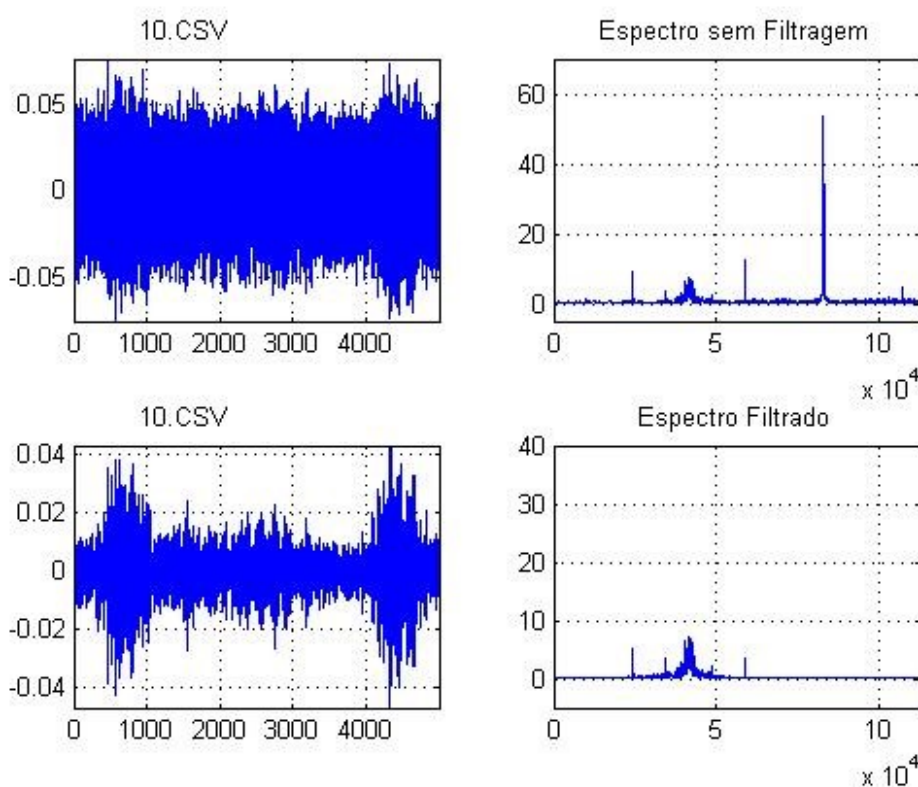


Figura 22: Amostras provenientes de um isolador oxidado antes e após filtragem digital.

Pode-se notar uma pequena mudança nos sinais captados no isolador novo e no isolador com a parte metálica oxidada. A faixa de frequência alvo (em torno de 40 kHz) está com uma amplitude/magnitude mais elevada quando se trata da amostra retirada da energização do isolador com base metálica oxidada.

É possível, ainda, a classificação dos espectros de frequência provenientes de isoladores poliméricos contaminados com solução salina em forma seca e em forma úmida. A contaminação dos isoladores com sal "seco" foi feita imergindo o isolador numa solução salina por uma certa quantidade de horas e após ser retirado foi posto para secar. A contaminação do isolador com sal de forma "úmida" foi feita borrifando solução salina no isolador momentos

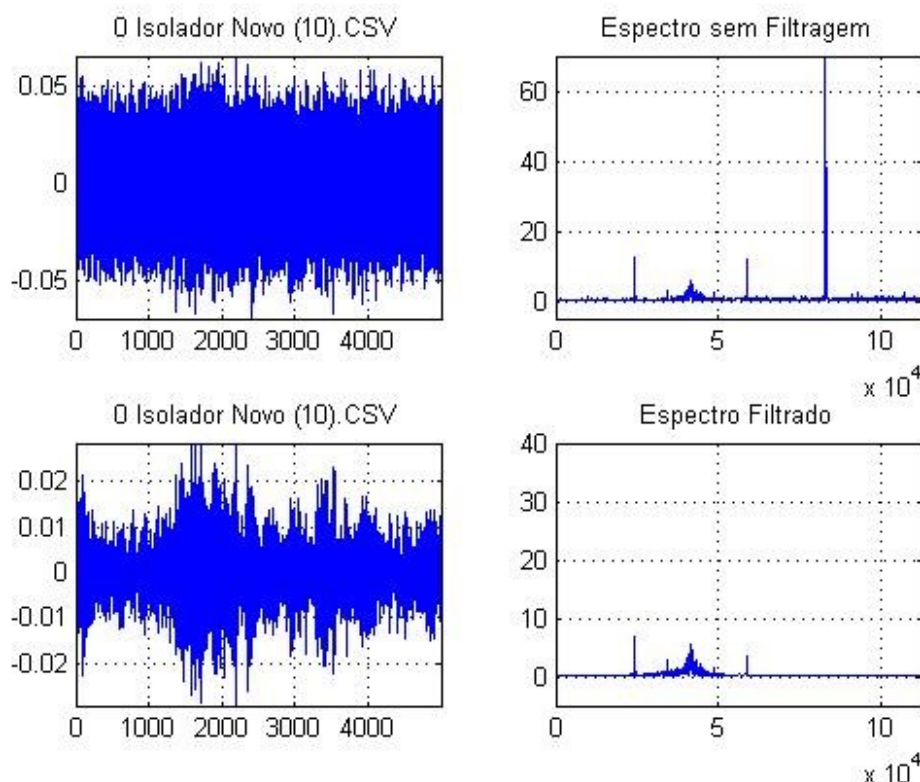


Figura 23: Amostras provenientes de um isolador novo antes e após filtragem digital.

antes a energização. Para efeito de comparação, a Figura 24 mostra os espectros do isolador seco e salgado, e a Figura 25 mostra os espectros do isolador úmido e salgado, dessa forma pode-se notar, se existir, a diferença nos espectros dos isoladores.

Comparando-se o espectro de um isolador novo e seco com os demais espectros, consegue-se chegar à conclusão que o isolador que foi contaminado por solução salina dias antes da energização e foi posto para secar por uma certa quantidade de horas tem amplitude/magnitude maior ao redor da faixa de frequência alvo desse estudo (40 kHz), pode-se perceber que a magnitude das componentes de frequência do sinal se aproxima de 10 neste caso. As magnitudes dos espectros dos isoladores seco e salgado úmido são bem semelhantes, mas se tem uma magnitude maior na faixa alvo no caso do isolador salgado úmido, como era de se esperar. A conclusão que foi tecida na teoria e na prática é que os isoladores que são contaminados por solução salina e postos para secar (na prática esses seriam isoladores que estão localizados em regiões próxima ao mar) são mais prováveis de sofrerem efeito corona e emitirem ultrassom na faixa de 40 kHz .

Em campo, quando isoladores poliméricos são detectados com uma grande concentração de sal em suas estruturas, estes são lavados com uma certa urgência para evitar possíveis danos à rede e o consequente gasto de uma quantia considerável em dinheiro.

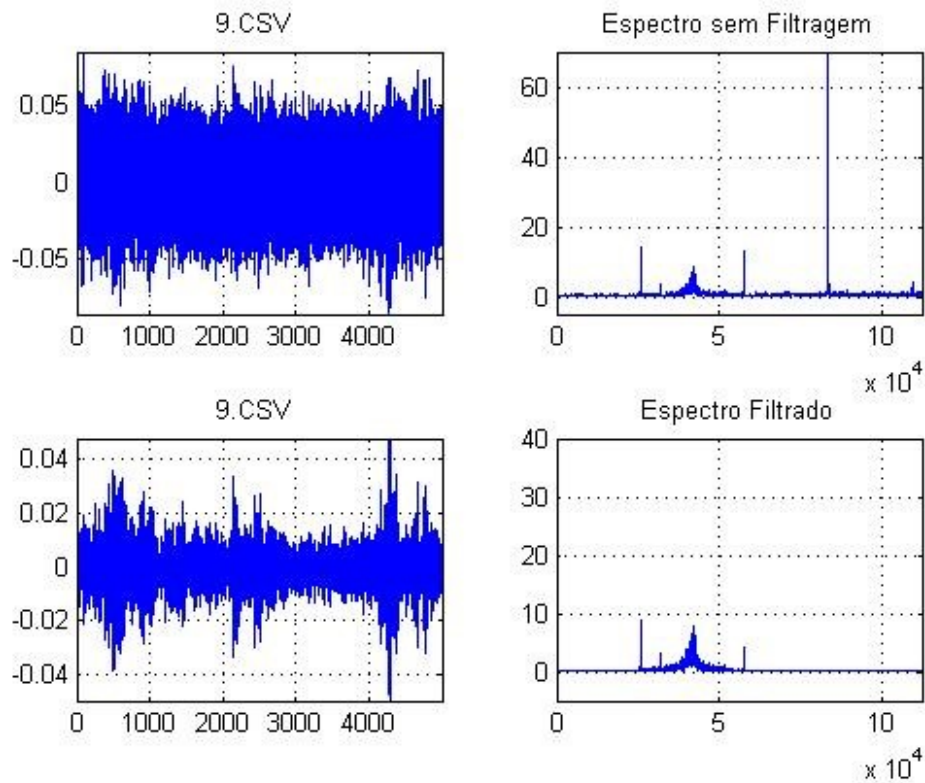


Figura 24: Amostras provenientes de um isolador salgado seco antes e após filtragem digital.

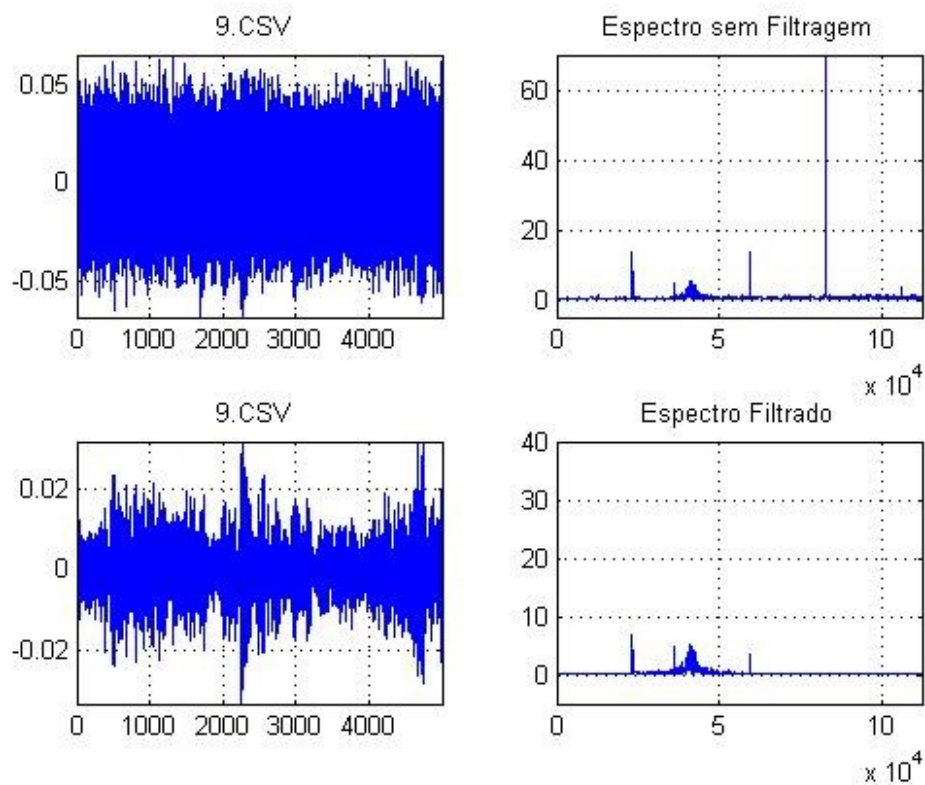


Figura 25: Amostras provenientes de um isolador salgado úmido antes e após filtragem digital.

No capítulo seguinte temos a apresentação dos resultados, ou seja, da análise dos gráficos aqui capturados e devidamente classificados pela rede neural escolhida nesse trabalho. Serão dados detalhes adicionais de como o banco de dados para utilização da rede neural foi criado, do pré-processamento do sinal após a captura, ou seja, como o sinal foi tratada para ser melhor utilizado pela rede e, por fim, como foi realizada a classificação dos padrões que são dados de entrada na rede.

5.2 Pré-processamento dos Dados para Rede Neural

Como foi visto anteriormente, para a captação e composição da base de dados de treinamento das redes neurais, foram utilizados seis isoladores poliméricos de linha de 69kV nas seguintes condições de deterioração: isoladores secos e isoladores contaminados com água salgada. Todos os isoladores foram submetidos à tensão nominal. Os isoladores foram elevados por um cabo conectado à terra pela parte superior e energizados pela fase, parte inferior do isolador, como se pode ver, novamente, na Figura 13(b). Para minimizar interferências, um cano metálico foi usado para envolver o cabo que liga o transformador ao isolador.

Por meio do equipamento SDT-200, é possível identificar se há a presença de efeito corona nos isoladores enquanto submetidos à tensão elétrica. Assim, foram captados sinais com e sem a presença de efeito corona. O processo de categorização (rotulação) do sinal coletado foi necessário por que, como já mencionado anteriormente, o método de aprendizagem das redes neurais utilizadas no projeto é supervisionado.

Para captação do sinal foi usado o protótipo de aquisição de dados baseado no kit de desenvolvimento STM32F407 DISCOVERY. A taxa de amostragem utilizada foi de 225 mil amostras por segundo, onde cada captura teve duração de 22ms e 5000 valores em cada amostragem. Cada sinal lido (contendo os 5000 valores) foi armazenado em uma memória *Flash* para posterior análise.

Desta forma, obteve-se uma base de dados composta por 179 padrões com 12 atributos (veja mais detalhes na subseção abaixo), dentre os quais 90 padrões são rotulados representando a presença de efeito corona e 89 são rotulados representando a ausência de efeito corona.

Vale ressaltar que dentre as redes utilizadas, MLP e SVM, apenas a rede MLP foi embarcada e utilizada no protótipo, portanto, os resultados que mostraremos serão de simulações realizadas em softwares de simulação utilizados em computadores e não no protótipo final do projeto.

Durante os testes do sistema foi utilizado um osciloscópio digital Tektronix MDO4034. O

protótipo e o osciloscópio faziam capturas simultâneas. Desta forma foi possível analisar os dois sinais posteriormente e confirmar se eles possuem as mesmas informações. O osciloscópio foi também utilizado para fazer a gravação da corrente através do isolador, a fim de se avaliar alguma condição de falha no isolador e associar com os níveis de ultrassom emitidos. Para confirmar a emissão de ultrassom pelo isolador foi utilizado um detector ultrassônico, modelo SDT-200.

Para os ensaios, a caixa do protótipo, com o transdutor ultrassônico, foi posicionada a 190cm do isolador e direcionada para a conexão de fase, onde se observa maior intensidade de emissão de ultrassom, verificado por termo-visão. Esta distância garante segurança para a tensão envolvida e permite que uma intensidade de sinal adequada chegue ao transdutor ultrassônico.

Cada sinal $s(t)$ capturado deve ser utilizado para descrever um padrão para a rede neural e cada amostra deste sinal descreve o valor para um atributo (característica) do padrão. É nesta etapa de pré-processamento que ocorre a extração de atributos mais significativos do sinal original e consiste nas seguintes etapas:

- Normalização da amplitude do sinal $s(t)$, através da divisão de cada atributo por 4096 (uma vez que a resolução do conversor analógico-digital é de 12 bits);
- Retirada do valor médio do sinal, como segue: $s(t) = s(t) - \text{mean}(s(t))$;
- Filtragem digital por um filtro FIR do tipo passa-faixa de apenas 9 coeficientes, cuja resposta em frequência é apresentada na Figura 11;
- Identificação de picos, em que se considera pico qualquer atributo cujo valor absoluto for 3 vezes maior que a variância do sinal $s(t)$;
- Definição de um vetor $\mathbf{p}$ contendo os dez maiores picos de $s(t)$;
- Cálculo da média $\bar{P}$ e do desvio padrão σ_p do vetor $\mathbf{p}$;
- Montagem do padrão que representa o sinal capturado no seguinte formato:

$$\langle p_1 \rangle \langle p_2 \rangle \dots \langle p_{10} \rangle \langle \bar{P} \rangle \langle \sigma_p \rangle \langle classe \rangle$$

em que $\langle classe \rangle$ é o rótulo do sinal verificado pelo instrumento SDT-200 (com corona ou sem corona), p são as intensidades dos picos identificados (se houver), $\bar{P}$ é a média e σ_p é o desvio padrão.

Note que os atributos extraídos são no domínio do tempo, não sendo necessárias operações complexas, como transformada de Fourier para obtenção de frequências (FERREIRA; GERMANO; G., 2012). Isso reduz significativamente o esforço computacional facilitando a etapa de processamento em um microcontrolador para implementar o pré-processamento e o classificador.

A Figura 26 apresenta o resultado parcial da etapa de pré-processamento realizada no sinal sem a presença de efeito corona. De maneira similar, um sinal com efeito corona pode ser visto na Figura 27. As linhas horizontais verdes indicam a faixa de detecção de picos. Os picos detectados são destacados por pequenas circunferências vermelhas.

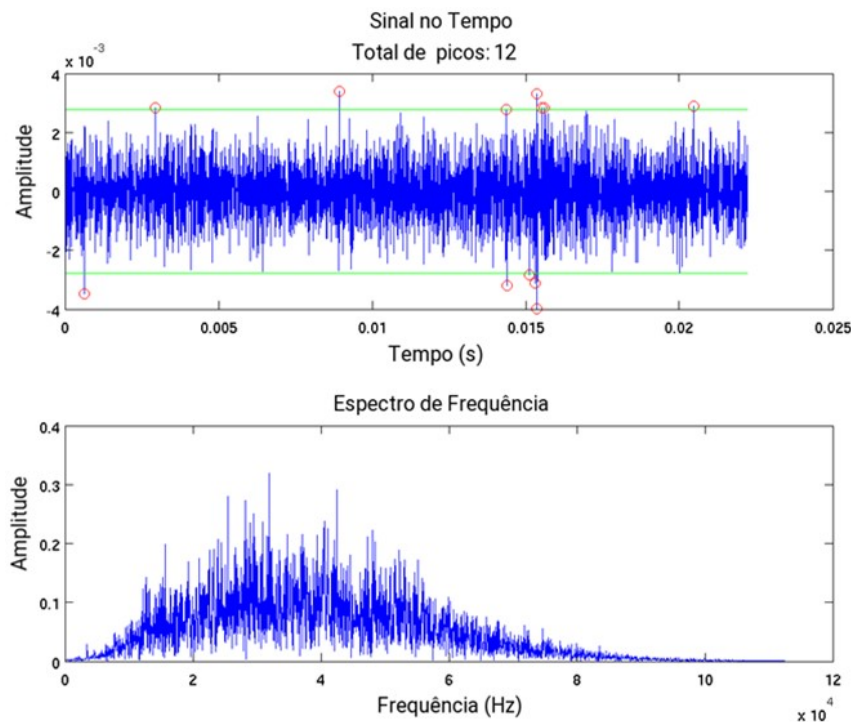


Figura 26: Resultado parcial do pré-processamento em um sinal sem efeito corona.

As redes utilizadas foram implementadas utilizando o ambiente Matlab e sua respectiva linguagem de programação nativa. Nas simulações computacionais realizadas para treinamento/teste das redes neurais artificiais, o primeiro procedimento a ser realizado foi a normalização do conjunto de dados em função da sua média e desvio padrão de cada um dos atributos. Assim, um padrão normalizado pode ser obtido por

$$x_{i-norm} = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (5.1)$$

em que x_i é o i -ésimo atributo de um padrão, bem como $\bar{x}_i$ e σ_i são, respectivamente, a média e o desvio padrão também para o i -ésimo atributo.

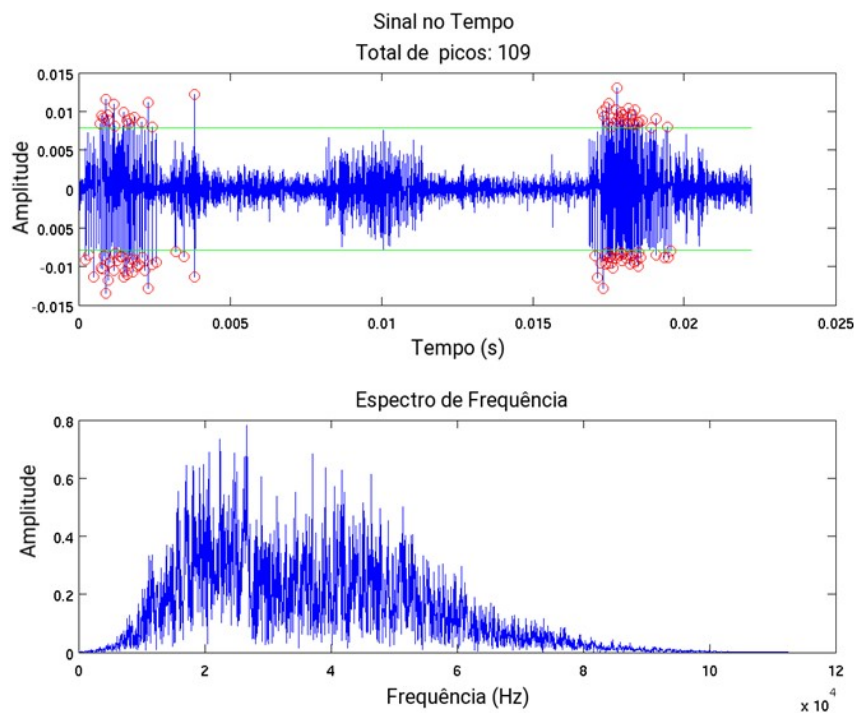


Figura 27: Resultado parcial do pré-processamento em um sinal com efeito corona.

Em cada realização, o conjunto total de dados foi dividido em dois, um para treinamento e outro para teste. Os padrões do conjunto de treinamento são utilizados inicialmente para obtenção do melhor conjunto de parâmetros das redes neurais através de um método de busca em grade (*gridsearch*) com validação cruzada (*crossvalidation*) (HSU; CHANG; LIN, 2003). Em seguida, o melhor conjunto de parâmetros obtido em cada realização foi usado para treinar a rede neural, mas agora utilizando todo o conjunto de treinamento.

Em termos de arquitetura, a rede MLP possui apenas uma camada oculta e uma de saída. A rede MLP foi treinada por 200 épocas. A taxa de aprendizagem η e o número de neurônios na camada oculta foram definidos a partir da busca em grade anteriormente mencionada.

O classificador SVM utiliza kernel RBF e os valores dos parâmetros C (termo de regularização) e σ (necessário pelo tipo de kernel utilizado) também foram definidos a partir da busca em grade com validação cruzada. Para que as redes sejam avaliadas, em cada realização, em termos de capacidade de generalização, é necessário que padrões ainda não apresentados sejam apresentados à rede já treinada. Assim, os padrões de testes reservados com essa finalidade são apresentados à rede. Veja que os mesmos não foram utilizados em nenhum momento para o treinamento da rede.

5.3 Resultados

A fim de comparar o desempenho dos classificadores MLP (*Multilayer Perceptron*) e SVM (*Support Vector Machine*) são apresentados na Tabela 1 a taxa média de acerto (acurácia) para o conjunto de teste e o desvio padrão obtidos para 30 realizações em função da variação do tamanho do conjunto de treinamento (CT).

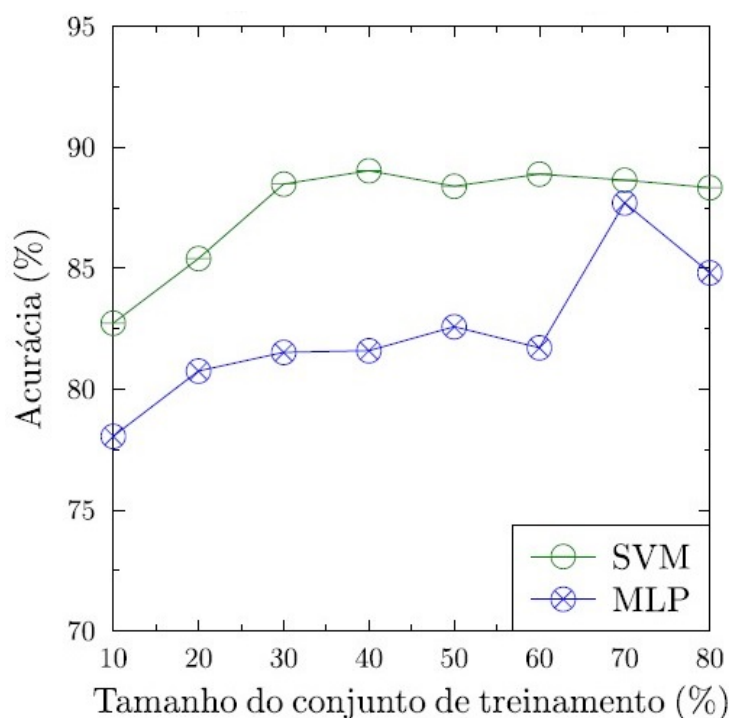


Figura 28: Acurácia *versus* tamanho do conjunto de treinamento.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 1, pode-se concluir que os desempenhos dos classificadores avaliados apresentam valores de acurácia superiores a 80% (para o classificador MLP), chegando a valores superiores a 88% (para o classificador SVM), independente do tamanho do conjunto de treinamento utilizado. Na Figura 28 são apresentados os valores da taxa média de acerto para 10%, 20%, 30%, ..., 80% do tamanho do conjunto de treinamento. Nota-se na Figura 28 que o desempenho obtido pelo classificador SVM apresenta-se melhor do que o desempenho obtido pela rede MLP, independentemente do percentual usado para treinamento.

5.4 Conclusão

No capítulo foram expostas algumas formas de ondas capturadas nos procedimentos experimentais, ou seja, nos ensaios elétricos controlados em laboratórios de alta-tensão. Foram

Tabela 1: Resultado para as redes MLP e SVM em função da variação do tamanho do conjunto de treinamento.

Modelo	CT	Taxa de Acerto	Desvio Padrão
MLP	20%	80,75	$\pm 10,7$
	50%	82,58	$\pm 10,6$
	80%	84,81	$\pm 8,6$
SVM	20%	85,40	$\pm 4,8$
	50%	88,39	$\pm 2,9$
	80%	88,33	$\pm 6,4$

feitas algumas considerações acerca das formas de ondas chegando a conclusão que era possível, mediante análise visual do espectro de frequência, classificar se o sinal proveniente do isolador polimérico está, ou não, com ocorrência de efeito corona.

Foi mostrado o pré-processamento dos dados e os resultados parciais das análises das capturas dos sinais proveniente dos isoladores. Para expor os resultados foi necessário fazer um pré-processamento devido ao dados "crus" não serem tão facilmente processados como os dados após o tratamento. Foi mostrado que nesta etapa os dados são normalizados e decrescidos do valor médio do sinal. Uma filtragem digital é necessária e foi mostrado que o tipo de filtro utilizado foi com resposta ao impulso finita. Como o sinal é repleto de picos, foi necessários a delimitação do que seria um pico relevante e do que seria um pico que poderia ser descartado. Para realizar tal classificação, foi delimitado um limiar de amplitude mínima para o pico ser considerado relevante, como visto no capítulo, este limiar de amplitude mínimo é igual a 3 vezes a variância do sinal. Como vimos o restante do pré-processamento consta de etapas para a montagem do padrão que representa o sinal capturado.

Com o tratamento do sinal realizado, foram mostrados alguns resultados parciais. Foi possível ver, analisando um gráfico comparativo entre taxa de acerto e tamanho do conjunto de treinamento, que a rede SVM teve um desempenho relativamente superior à rede MLP. Deve-se lembrar que, mesmo a rede SVM tendo um desempenho superior, ela utiliza uma matemática mais complexa e o tempo gasto com simulações e processamento de dados é maior. A rede MLP é mais leve pela utilização de apenas uma camada oculta e, portanto, mais facilmente embarcada.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um protótipo para aquisição de sinal de ultrassom proveniente de isoladores poliméricos energizados, bem como foi proposta a utilização de inteligência artificial, mais especificamente redes neurais artificiais e classificadores estatísticos, como ferramenta de detecção de efeito corona em tais isoladores poliméricos.

Nos ensaios em laboratórios de alta-tensão, o protótipo funcionou como esperado, permitindo a aquisição de um grande conjunto de dados, que foram armazenados em uma memória *Flash*. A partir da análise dos dados obtidos pode-se inferir se o isolador está emitindo sinais de ultrassom característicos do efeito corona, assim pode-se avaliar a necessidade de uma ação de manutenção preventiva para evitar a queda da rede. A quantidade de amostras capturadas, 5000 valores em cada amostragem, pode ser ampliada, se houver interesse em cobrir uma quantidade maior de ciclos.

O sistema implementado é alimentado por baterias, o que o torna portátil e de fácil instalação em uma torre. Outra característica interessante do protótipo é o acionamento por controle remoto para iniciar a captura dos dados, sendo estes dados armazenados em uma memória externa. Uma estratégia de filtragem digital foi incluída, o que permite atenuar ruídos e outros sinais menos relevantes com o objetivo de preservar o espectro de interesse, neste caso em torno de $40kHz$.

Vale ressaltar que não existe solução, atualmente, que execute o que foi proposto por este trabalho. As soluções comerciais são capazes de detectar sinais de ultrassom, ou pontos quentes, em isoladores, mas apenas se uma equipe for deslocada em campo com o maquinário específico, gerando um gasto financeiro para a concessionária. O sistema que foi proposto nessa dissertação é capaz de analisar se um isolador em específico, numa cadeia de isoladores, está emitindo sinais de ultrassom característico do efeito corona, tudo remotamente, por intermédio de um navegador de internet. Esta possibilidade elimina a ida de uma equipe a campo e, consequentemente, reduz os custos da concessionária.

Ainda, o sistema proposto é capaz de fazer uma análise em tempo real da emissão dos sinais de ultrassom, ou seja, em qualquer instante, se um isolador começar a apresentar sinais

característicos do efeito corona, mensagens de alerta são enviadas aos responsáveis pela linha de transmissão na qual este isolador faz parte, para que os mesmos tomem as medidas plausíveis. Os métodos convencionais são realizados em forma de manutenções programadas, logo, se um isolador estiver emitindo sinais de ultrassom característicos de uma falha em um período entre as manutenções programadas, provavelmente a rede cairá e causará um prejuízo financeiro à concessionária.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que ambos os modelos MLP e SVM utilizados apresentam alta capacidade de generalização e são capazes de inferir a presença ou ausência de efeito corona a partir de ruídos ultrassônicos provenientes dos isoladores. Como a ferramenta de classificação que exige um menor custo computacional é a rede MLP, apenas esta foi embarcada no microcontrolador e, então, instalada na torre de transmissão, mesmo a acurácia do classificador SVM sendo maior, ou seja, foi escolhido um menor custo computacional em detrimento a uma acurácia parcialmente maior. Nos protótipos instalados em campo, foi adicionada uma unidade de energia na qual utiliza células fotovoltaicas para o carregamento da bateria. No Anexo B pode-se ver fotos da instalação dos protótipos nas torres da linha de transmissão da EletroAcre.

6.1 Trabalhos Futuros

Uma problemática que foi encontrada no decorrer do desenvolvimento do projeto, é que, como o sinal de ultrassom tem uma alta diretividade, seria necessário mais de um sistema sensor em cada torre para poder analisar todos os isoladores da torre em questão, isto é, em uma torre que conta com 6 isoladores poliméricos em sua estrutura necessitaria de 6 sistemas sensores para ter uma completa varredura dos isoladores.

Levando em consideração o custo e a inviabilidade de se instalar 6 dispositivos sensores em todas as torres que fossem ser monitoradas e, sabendo do perfil omnidirecional de uma radiação eletromagnética, iremos estudar as implicações das descargas parciais no espectro de frequência nas ondas eletromagnéticas nos arredores da torre. Constada a viabilidade da utilização de radiofrequência, será necessário apenas um sistema sensor por torre para o completo monitoramento.

Um outro possível trabalho futuro para a presente dissertação, seria utilizando tecnologia óptica. O trabalho proposto utilizaria um interferômetro de Mach-Zehnder em uma fibra óptica para atuar como sensor. A diferença de intensidade do sinal óptico nos braços do interferômetro é que vai nos dar as características da onda de ultrassom detectada.

Pode-se ainda pensar em variar o número de picos colocados como entrada para a rede neural artificial. Mudar o número de picos pode impactar na acurácia do classificador. No texto aqui mostrado foi escolhido, arbitrariamente, o número de 10 picos, pode-se tentar aumentar, de forma gradativa (11,12,13...), esta quantidade de picos à medida que novas simulações são executadas e as taxas de acerto são computadas.

Referências Bibliográficas

- ABREU, F. C. M. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada Wavelet sob influência de ruído branco**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2015.
- BERANGER, G. J. **Estudo de caso de problemas em isoladores elétricos**. [S.l.], 2016.
- L. Calvet. **Improvement in Insulators for Telegraph Wires**. July 1865. Utility 48,906. Disponível em: <<http://reference.insulators.info/patents/detail/?patent=48906type=U>>.
- CARVALHO, B. P. R. **Novas estratégias para detecção automática de vetores de suporte em least squares support vector machines**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- CARVALHO, J. W. A arborescência em sólidos dielétricos analisada como um típico caso de difusão. **VIII Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2005.
- CAVALCANTI, F. J. M. M. **Controle e Análise de Desempenho de Isolamento de Linhas de Transmissão em Ambientes com Poluição, Visando Ações Preventivas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2004.
- CST-EQUIPMENT. **SDT-200**. Novembro 2017. Disponível em: <<http://www.cstonline.cl/productos.php?m=1>>.
- DALLBELLO, A. C.; SILVEIRA, P. M.; C., Parentoni M. F.; ADAMI, J. F. Análise de sinais provocados por defeitos em linhas de transmissão utilizando técnicas de telecomunicação e processamento de sinais. **Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, 2007.
- FERREIRA, T. V. **Estimação inteligente da poluição de isolamentos elétricos baseada nos vecse do ruído ultrassônico**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; G. da Costa E. Ultrasound and artificial intelligence applied to the pollution estimation in insulations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, 2012.
- FONTGALLAND, G.; SILVA, E.; BEZERRA, J. M. B.; NERI, M. G. G.; VALLE, R. R. M. Do; MELO, M. A. B. De. On the behavior of electromagnetic interference measured from glass insulator. **The 10th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics**, 2004.
- GIANELLI, B. F. **Caracterização do efeito corona em isoladores poliméricos do tipo bastão submetidos à poluição salínica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2008.

GILDICE, E. B. F. **Estudo da aplicação dos condutores compactos em linhas urbanas de 138 kV: aspectos elétricos de corona e rádio interferência.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

GISH, E. **Fred M. Locke: A Biography.** [S.l.]: Lumberton: Infinity Press, 1994.

GOMES, R. M. **Estudo do comportamento de cabos com cobertura isolante de redes de distribuição compactas frente a sobretensões impulsivas padronizadas.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

GUNN, S.R. **Support Vector Machines for Classification and Regression.** [S.l.], 1998.

HACKMAN, R. Outdoor hv composite polymeric insulator. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 6, n. 5, 1999.

HALL, J. F. History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. **IEEE Transactions Power Delivery**, v. 8, n. 1, 1993.

HAMZA, A.; ABDELGAWAD, N.; ARAFA, B. Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators. **Energy Conversion and Management**, n. 43, 2002.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e práticas.** 2nd. ed. [S.l.]: Bookman, 2001.

HEARST, M. A.; SCHOLKOPF, B.; S., Dumais; E., Osuna; J., Platt. Trends and controversies - support vector machines. **IEEE Intelligent Systems**, v. 13(4), 1998.

HSU, C. W.; CHANG, C. C.; LIN, C. J. **A practical guide to support vector classification.** [S.l.], 2003.

INSTITUTE, Electric Power Research. **Transmission Reference Book - 345kV and Above.** 2nd. ed. [S.l.: s.n.], 1982.

JANSSEN, F. **Influência dos parâmetros de envelhecimento nas propriedades elétricas de isoladores cerâmicos para sistemas de potência.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Sergipe, 2005.

KAKANI, S. L. **Eletronics Theory and Applications.** [S.l.]: New Age International, 2005. ISBN 978-81-224-1536-0.

KOVÁCS, Z. L. **Redes Neurais artificiais: fundamentos e aplicações, um texto básico.** 3rd. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: Fundamentals.** 2nd. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

LEÃO, R. M. **Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão.** 1st. ed. [S.l.]: Edipucrs, 2008.

LOESH, C.; SARI, S. T. **Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Modelos.** 1st. ed. [S.l.]: FURB, 1996.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biology**, n. 5, 1943.

- NIA, National Insulator Association. **Insulator Historical Timeline**. [S.l.], 1880.
- OSUNA, E.; FREUND, R.; GIROSI, F. An improved training algorithm for support vector machines. **Neural Networks for Signal Processing**, 1997.
- SILVA, K. M. **Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2005.
- TEIXEIRA, M. D.; OLIVEIRA, J. C.; PACHECO, C. R.; SOUTO, O. C. Avaliação do estado operacional de cabos isolados sob condições adversas: Estratégias e proposta de diagnóstico. **V SBQEE: Seminário Brasileiro sobre Energia Elétrica**, 2003.
- VAPNIK, V. N. **The Nature of statistical Learning Theory**. [S.l.]: Springer - Verlag, 1995.

***ANEXO A – DataSheet do Sensor de Ultrassom
MA40S4R***

MA40S4S/MA40S4R

Ultrasonic Sensor Open Structure Type



Features

- High S.P.L. and high sensitivity
- Compact size(10.0mm dia.)
- Open type structure
(indoor applications)

Applications

- Object detection
- Measuring the distance
- Dynamic body detection

Overview

MA40S4S / MA40S4R are ultrasonic transducer for various detections. MA40S4S is used to transmit ultrasonic waves. MA40S4R is used to receive them.

MA40S4S / MA40S4R consist of piezoelectric ceramics, metal plate, resonator and resin case. Resonator has like a funnel shape to transmit ultrasonic waves which is generated by vibration of resonator to the air efficiently(or to concentrate ultrasonic waves from the air on the center of resonance).Sound pressure level(S.P.L.) is the most important characteristic for ultrasonic transducers. For example, in measuring distance application, high S.P.L. transducer enables to detect the further distance.

MA40S4S / MA40S4R cannot be used in outdoor applications because they are open type structure. And they cannot be used for automotive applications. We can support only for consumer applications.

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

TABLE OF CONTENT

1. Introduction	1
2. Specifications	3
2.1 Absolute Maximum Ratings	
2.2 Performance of Electrical Specifications	
2.3 Environmental Tests	
3. Measurement Direction	6
3.1 Technical Performance Characteristic	
3.2 Murata Standard Measuring	
4. Dimensions	8
5. ⚠CAUTION	9
5.1 Limitation of Applications	
5.2 Fail-Safe	
5.3 Notice in design and usage	
5.4 Notice in storage	
5.5 Notice in mounting	
5.6 Other	

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

1. Introduction

This document contains essential technical information about the MA40S4S / MA40S4R, including specifications. This document should be used as a reference when designing in MA40S4S / MA40S4R component

2. Specifications

2.1 Absolute Maximum Ratings

Table.1 Absolute Maximum Ratings of MA40S4S

Parameter	Spec.	Note
Operating Temperature Range	-40 ~ +85 degC	
Storage Temperature Range	-40 ~ +85 degC	
Max. Input Voltage	20Vp-p	at 40kHz, Square continuous wave

Table.2 Absolute Maximum Ratings of MA40S4R

Parameter	Spec.	Note
Operating Temperature Range	-40 ~ +85 degC	
Storage Temperature Range	-40 ~ +85 degC	

2.2 Performance of Electrical Specifications

Table.3 Performance of Electrical Specification of MA40S4S

Parameter	Spec.	Note
Operating Frequency	40.0kHz	For reference
S.P.L. (Sound Pressure Level)	120 +/- 3 dB	at 40kHz, 10Vrms, Sine wave, 0dB = 20uPa, 30cm(per Fig.5)
Capacitance	2,550pF +/- 20%	at 1kHz
Insulation Resistance	More than 100 Mohm	at 50 V D.C.
Temperature Characteristics	Within +/- 3dB against initial value at 25degC	-40 to +85 degC

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
 Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
 Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

Table.4 Performance of Electrical Specification of MA40S4R

Parameter	Spec.	Note
Operating Frequency	40.0kHz	For reference
Sensitivity	-63 +/- 3 dB	at 40kHz, Sine wave, 0dB = 10V / Pa, 30cm(per Fig.6)
Capacitance	2,550pF +/- 20%	at 1kHz
Insulation Resistance	More than 100 Mohm	at 50 V D.C.
Temperature Characteristics	Within +/- 3dB against initial value at 25degC	-40 to +85 degC

2.3 Environmental Test

2.3.1 Shock Test (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within +/-3 dB compared with initial stage at 25 degC after applied following test conditions.

Acceleration	:	sine, 100G, 6ms
Direction	:	3 directions
Shock time	:	3 times / direction

2.3.2 Vibration Test (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within +/-3 dB compared with initial stage at 25 degC after applied following test conditions

Vibration frequency	:	10 to 55Hz
Sweep Period	:	1 min
Amplitude	:	1.5 mm
Direction	:	3 directions
Time	:	2 hours / direction

2.3.3 Resistance to Soldering Heat (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within +/-3 dB compared with Initial stage at 25 degC in 1hour after touching soldering iron (Iron temperature : 350 degC), 3 seconds with the terminal.(Touching point must be 2mm or more away from the sensor body.)

High Temperature Test (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within +/-3 dB compared with initial stage at 25 degC in 24 hours after applied following test conditions.

Temperature	:	+85 +/- 2 degC
Time	:	100 hours

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
 Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
 Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

2.3.4 Low Temperature Test (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within ± 3 dB compared with initial stage at 25 degC in 24 hours after applied following test conditions.

Temperature	:	-40 $\pm$ 2 degC
Time	:	100 hours

2.3.5 Humidity Test (common)

The variation of the S.P.L. (sensitivity) at 40 kHz is within ± 3 dB compared with initial stage at 25 degC in 24 hours after applied following test conditions.

Temperature	:	+60 $\pm$ 2 degC
Humidity	:	90 to 95 %R.H.
Time	:	100 hours

2.3.6 Operating Test (only MA40S4S)

The variation of the S.P.L. at 40 kHz is within ± 3 dB compared with initial stage at 25 degC in 24 hours after applied following test conditions.

Input Voltage	:	24Vp-p Square wave, 40kHz Continuous signal
Time	:	1000 hour

2.3.7 Pull Strength (common)

There should be no substantial damage until 9.8N pulling force.

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

3. Measurement direction

3.1 Technical Performance Characteristics

3.1.1 Frequency response characteristic

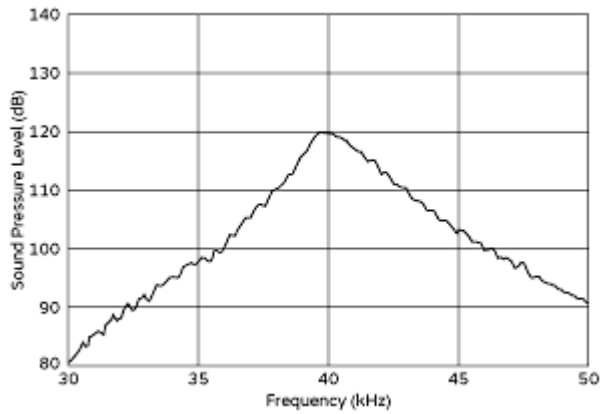


Fig.1 S.P.L.(MA40S4S)

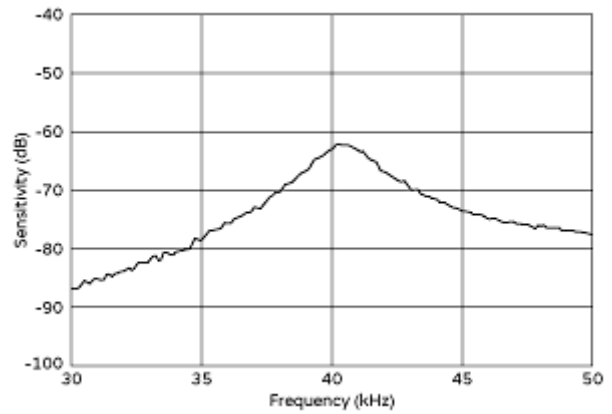


Fig.2 Sensitivity(MA40S4R)

3.1.2 Directivity

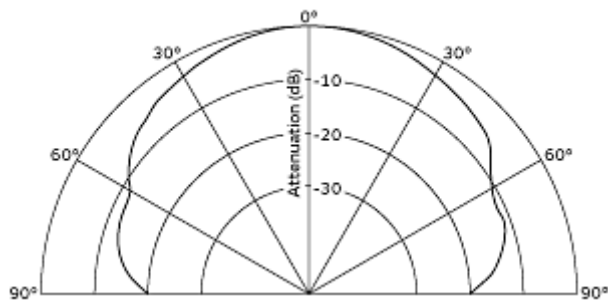


Fig.3 S.P.L.(MA40S4S)

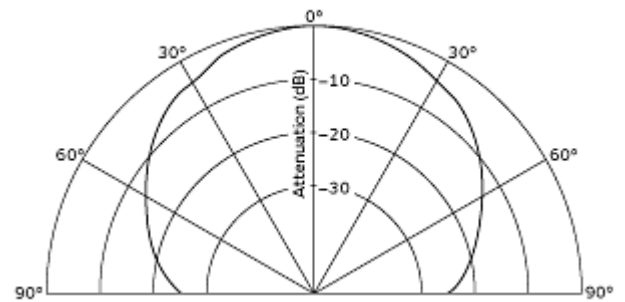
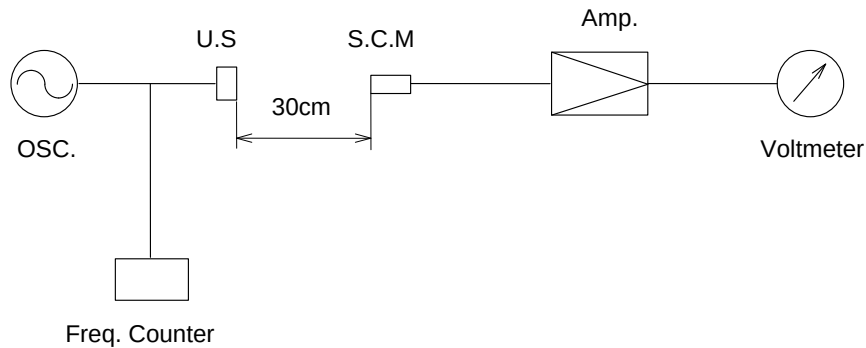


Fig.4 Sensitivity(MA40S4R)

Attention:

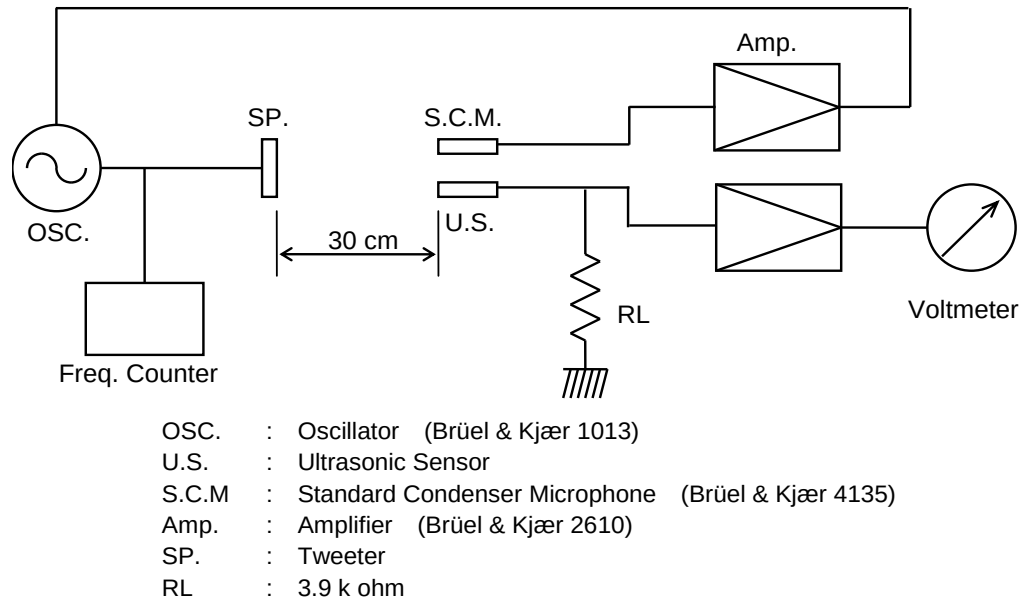
This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

3.2 Murata Standard Measuring



OSC. : Oscillator (Brüel & Kjær 1013)
 U.S. : Ultrasonic Sensor
 S.C.M. : Standard Condenser Microphone (Brüel & Kjær 4135)
 Amp. : Amplifier (Brüel & Kjær 2610)

Fig.5 S.P.L. measuring system



OSC. : Oscillator (Brüel & Kjær 1013)
 U.S. : Ultrasonic Sensor
 S.C.M. : Standard Condenser Microphone (Brüel & Kjær 4135)
 Amp. : Amplifier (Brüel & Kjær 2610)
 SP. : Tweeter
 RL : 3.9 k ohm

Fig.6 Sensitivity measuring system

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
 Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
 Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

4. Dimensions

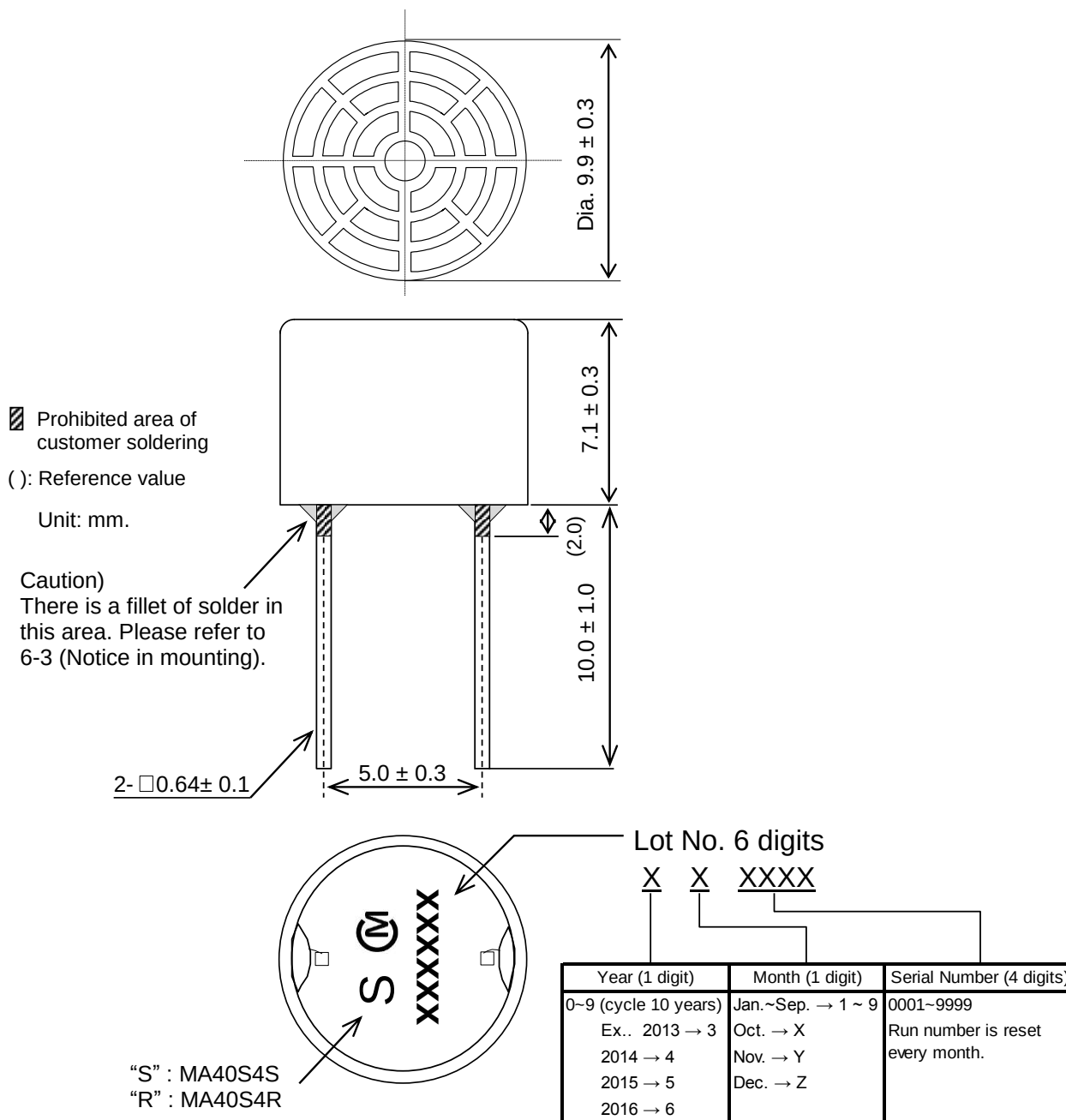


Fig.7 Product dimension

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
 Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
 Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

5. ⚠Caution

5.1 Limitation of Applications

Please do not use in the applications listed below which require a high reliability to prevent the defects which might cause a damage to the Peoples' life and/or property.

- 1) Aircraft equipment
- 2) Aerospace equipment
- 3) Undersea equipment
- 4) Power plant control equipment
- 5) Medical equipment
- 6) Transportation equipment (trains, ships, etc.)
- 7) Traffic signal equipment
- 8) Disaster prevention / crime prevention equipment
- 9) Data-processing equipment
- 10) Military equipment (regardless of directly/indirectly)
- 11) Security device/system
- 12) Outside-usage, in which the sensor is exposed to splashes or dusts

Application of similar complexity and/or reliability requirement to the applications listed in the above

5.2 Fail-Safe

Please make sure to provide an appropriate fail-safe function on your product to prevent a second damage that may be caused by the abnormal function or the failure of our product

5.3 Notice in design and usage

- 1) The transducer may generate surge voltage by mechanical or thermal shock.
- 2) Please do not apply D.C. voltage for ultrasonic transducer to avoid migration.
- 3) Please do not use this ultrasonic sensor in water.
- 4) Please do not apply an excessive mechanical shock or force on the top of this ultrasonic transducer and terminal pins. It may cause of disconnection and malfunction.
- 5) Please do not use nor storage this ultrasonic sensor in heavy dust condition. It may be a cause of clogging and low performance. Also, please do not use this sensor in high humidity or high concentrated exhaust gas. It may be a cause of corrosion and malfunction.
- 6) Care should be taken when select the material to hold, or cover backside of transducer. If it contains sulfur or sulfide, electrode on piezo-electric element may be corroded and became malfunction.
- 7) This transducer does not have a definition of terminal polarity. Please check a signal before using if you need a signal phase control for your application.

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

5.4 Notice in storage

- 1) The products should not be used or stored in a corrosive atmosphere, especially where chloride gas, sulfide gas, acid, alkali, salt or the like are present. Store the products in the room where is normal temperature and humidity, and avoid the sunlight, sudden changes in temperature and humidity. It may cause of failure or malfunction in such conditions.
- 2) Store the products where the temperature and relative humidity do not exceed -10 to 40 degC, and 30 to 80 %RH. Use the products within 6 months after receiving contents.

5.5 Notice in mounting

- 1) Please do not apply excessive force to terminals, when soldering.
- 2) Please use soldering temperature with not exceeds 350 degC, 3 seconds.
- 3) Flow soldering is not applicable.
- 4) Please do not clean by water and dissolving agent.

This product cannot be used mounted on PCB. Soldering fillet at the bottom of case may interfere with throughhole of PCB. Please contact products engineering section of Murata if you will use this product mounted on PCB

5.6 Other

- 1) Please make sure that your product has been evaluated in view of your specifications with our product being mounted to your product.
- 2) You are requested not to use our product deviating from the agreed specifications.
- 3) We consider inappropriate to include any terms or conditions with regard to the business transaction in the product specifications, drawings or other technical documents. Therefore, if your technical documents as above include such terms and conditions such as warranty clause, product liability clause, or intellectual property infringement liability clause, they will be deemed to be invalid

Attention:

This datasheet is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd.
Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice.
Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.

ANEXO B – Instalação dos Protótipos nas Torres da EletroAcre



Figura B.1: Sensores enfileirados para instalação de *firmware*.



Figura B.2: Sensores enfileirados para carregamento da bateria utilizando painéis solares.



Figura B.3: Sensor *gateway* em processo de carga com o auxílio de um painel solar com maior capacidade.



Figura B.4: Sensor em processo de instalação na torre de transmissão.



Figura B.5: Sensor instalado em uma das torres da linha de transmissão da eletroAcre.



Figura B.6: Equipe que trabalhou na instalação dos sensores.