

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA BASEADA EM MODELO TEÓRICO PARA
AVALIAÇÃO DO ESTADO OPERATIVO DE LINHA DE
TRANSMISSÃO**

MARTIN MAX LUÍS DE CASTRO NEGRÃO

TD: 05/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARTIN MAX LUÍS DE CASTRO NEGRÃO

**METODOLOGIA BASEADA EM MODELO TEÓRICO PARA
AVALIAÇÃO DO ESTADO OPERATIVO DE LINHA DE
TRANSMISSÃO**

TD: 05/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARTIN MAX LUÍS DE CASTRO NEGRÃO

**METODOLOGIA BASEADA EM MODELO TEÓRICO PARA
AVALIAÇÃO DO ESTADO OPERATIVO DE LINHA DE
TRANSMISSÃO**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Sistema de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Negrão, Martin Max Luís de Castro, 1975-
Metodologia baseada em modelo teórico para avaliação do estado
operativo de linha de transmissão / Martin Max Luís de Castro Negrão. - 2015.

Orientador: Petrônio Vieira Junior.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2015.

1. Energia elétrica - transmissão. 2. Linhas elétricas - manutenção. 3.
Linhas elétricas - modelos matemáticos. 4. localização de falhas
(engenharia). I. Título.

CDD 22. ed. 621.319

**“METODOLOGIA BASEADA EM MODELO TEÓRICO PARA AVALIAÇÃO DO
ESTADO OPERATIVO DE LINHA DE TRANSMISSÃO”**

AUTOR: MARTIN MAX LUIS DE CASTRO NEGRÃO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 15/05/2015

BANCA EXAMINADORA:

PE - Ca J.

Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior

(Orientador – PPGEE/UFPA)

J.A. Barreiros

Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros

(Co-Orientador – PPGEE/UFPA)

Carlos Tavares da Costa Jr.

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Walter Barra Junior

Prof. Dr. Walter Barra Junior

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Edson Guedes da Costa

Prof. Dr. Edson Guedes da Costa

(Avaliador Externo – UFCG)

Wallace do Couto Boaventura

Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura

(Avaliador Externo – UFMG)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

DEDICATÓRIA

À Deus;
À minha mãe Arcângela;
À minha esposa Michele;

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus, por ter segurado e guiado minhas mãos para esta produção.

A minha mãe Arcângela Iná, que desde minha infância me ensinou, me apoiou e me valorizou. Que esteve ao meu lado em todo o decorrer deste trabalho, que sempre acreditou em mim.

À minha amada esposa Michele, pelo constante incentivo e indispensável ajuda na finalização dessa dissertação.

Ao Alexandre Reis e Esposa pela valiosa contribuição na formatação do texto.

Em especial ao Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior, pela sua amizade, sábia orientação e apoio, por acreditar em mim.

Ao Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros, pela sua amizade, apoio e paciência durante a realização deste trabalho.

À colega de pós-graduação Paula Renatha pelo companheirismo e a valiosa ajuda prestada no trabalho em campo.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de usufruir dos espaços, livros, equipamentos e por toda a estrutura a mim proporcionada.

A Universidade Federal do Pará, pelo suporte desde minha graduação.

Aos funcionários e servidores da UFPA pelo empenho em tornar esta universidade um local agradável de trabalhar e a eficiência nos assuntos burocráticos relacionados a um ambiente de pesquisa. Em especial ao pessoal que faz parte da secretaria da pós-graduação pela eficiência e atenção.

A ELETRONORTE pelo apoio técnico e financeiro.

A Secretaria Executiva de Educação – SEDUC pela licença concedida, para dedicação a esta pesquisa.

Enfim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a construção desta tese.

EPÍGRAFE

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original"

Albert Einstein

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Inspeção aérea detalhada (RAP, 2009) ...	25
Figura 1.2 – Inspeção de patrulhamento (CTEEP, 2008).....	26
Figura 1.3 – Visão tridimensional da LT. (BAUNGARTEN, 2003).	30
Figura 2.1 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de processos [PAU].	37
Figura 2.2 – Diagrama de monitoração de processo em malha de controle considerando ação da manutenção e distúrbios (ISERMANN, 2006).).....	38
Figura 2.3 – Exemplos de aplicação de modelos matemáticos (ISERMANN, 2006).....	39
Figura 2.4. – Diagrama de bloco com a classificação dos modelos matemáticos segundo o tipo de dados conhecidos (ISERMANN, 2006).	41
Figura 2.5 – Diagrama com a disponibilidade de conhecimento da estrutura física e de dados do processo para construção de modelos. (ISERMANN, 2006).	41
Figura 2.6 – Fotografias dos sistemas de monitoração de LTs. (a) CAT1 e (b) Sonar (NASCIMENTO, 2007)	44
Figura 2.7 - Sistema genérico de monitoração de linhas (NASCIMENTO, 2007).....	45
Figura 2.8 - Esquema físico do sistema MOLLTS.....	48
Figura 2.9 – Aplicação do teorema da divergência para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão	48
Figura 2.10 – Representação da linha de transmissão monitorada, Trecho Guamá-Utinga - Miramar pertencente à Eletronorte	49
Figura 2.11 – Equipamentos para coleta de dados elétricos. Analisadores de Energia instalados nas SEs.	50
Figura 2.12 – Vista do local selecionado para composição do banco de dados (dados ambientais e elétricos), para tratamento	50
Figura 2.13 – Modelo matemático de um trecho da linha de transmissão	52
Figura 2.14 – Representação das capacitâncias intrínsecas da linha, em seus isoladores, entre fases e entre fase e terra.....	53
Figura 2.15 - Diagrama de blocos para cálculo da I_F da LT.	54
Figura 3.1 – Modelo Matemático de linhas de transmissão considerando o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais	60
Figura 4.1 – Circuito PI de uma linha de transmissão	74
Figura 4.2 – Superposição das formas de onda da I_F medida (Preto) e calculada pelo modelo matemático (Cinza).....	76
Figura 4.3 - DCH da I_F medida pelos instrumentos instalados nas Subestações.....	76

Figura 4.4 - DCH da I_F calculada pelo modelo π	77
Figura 4.5 – Circuito Tee de uma linha de transmissão	78
Figura 4.6 - Superposição das formas de onda da I_F medida (preto) e calculada pelo modelo matemático Tee (cinza)	79
Figura 4.7 - DCH da I_F calculada pelo modelo Tee	80
Figura 4.8 – Diagrama esquemático de um isolador	81
Figura 4.9 - Modelo π com a Isolação representada pela associação em paralelo de uma resistência R_1 e R_2 uma capacitância ($C_{1,2}$).....	82
Figura 4.10 – Forma de Onda da I_F calculada pelo modelo π , com resistência elétrica paralela justo à capacitância.....	83
Figura 4.11 DCH da I_F calculada pelo modelo π , com resistência elétrica paralela junto à capacitância	84
Figura 4.12 – Modelo com superposição das fontes em frequências harmônicas	86
Figura 4.13 – Superposição das formas de onda da I_F medida (Cinza) e calculada pelo modelo matemático (Preto)	87
Figura 4.14 - DCH da I_F utilizando superposição das fontes em frequências harmônicas.	87
Figura 4.15 - Circuito elétrico de uma LT com suas correspondentes entradas e saídas	89
Figura 4.16 -Diagrama em blocos das configurações dos modelos matemáticos, quanto ao número de entradas e número de saída. (a) Modelo matemático com três entradas e uma saída; (b) Modelo matemático com duas entradas e duas saídas.....	89
Figura 4.17 – Diagrama em blocos do modelo matemático selecionado, com três entradas e uma saída	90
Figura 4.18 – Formas de onda das corrente na SE Guamá calculada (Vermelho) e medida (preto).	90
Figura 4.19 – Modelo π equivalente	91
Figura 4.20 - Diagrama em blocos do modelo matemático selecionado, com três entradas e uma saída	92
Figura 4.21- Formas de onda das corrente na SE Guamá medida (Vermelho) e calculada (Azul).....	92
Figura 4.22 - Formas de onda das corrente na SE Guamá calculada (Azul) e medida (Vermelho).....	93
Figura 4.23 – Formas de onda das I_F calculadas pelos modelos matemáticos. Modelo 3 entradas e 1 saída (Vermelho) e modelo 2 entradas e 2 saídas (Azul)	93
Figura 4.24 – Formas de onda das I_F calculadas pelos modelos matemáticos. Modelo 3 entradas e 1 saída (preto) e modelo 2 entradas e 2 saídas (Azul) e a Medida(Vermelho)	94

Figura 5.1 - Circuitos equivalentes com inclusão de capacitâncias parasitas. (a) Transformador de potencial indutivo (TP) e (b) Transformador de corrente do tipo barra (TC).	100
Figura 5.2 – Circuito equivalente de um transformador de corrente básico.....	101
Figura 5.3 - Características da resposta em frequência de um transformador de corrente: (a) circuito equivalente do transformador de corrente incluindo capacitância; (b) resposta em frequência.	102
Figura 5.4 – Efeito da saturação da corrente secundária do núcleo do transformador de corrente para uma carga resistiva: (a) característica magnetizante idealizada; (b) corrente magnetizante; (c) corrente do secundário	103
Figura 5.5 – Circuitos equivalentes de TPs magnético: (a) circuito equivalente básico; (b) com capacitância adicionada	104
Figura 5.6 – Resposta em frequência dos TPs magnético. Tensão do primário de 400kV (linha cheia); tensão do primário de 200kV (traço e ponto); tensão no primário de 20kV (linha tracejada). Fonte: Contribuição para Normalização da Qualidade de Energia Elétrica	105
Figura 5.7 – Circuito equivalente do TP para o domínio da frequência	105
Figura 5.8 – Resultados computacionais associados ao modelo com capacitâncias parasitas e dependentes da frequência. (a) Relação de transformação e (b) Ângulo de Fase.	106
Figura 5.9 - Resultados práticos para o TP. (a) Relação transformação e (b) ângulo de fase.	107
Figura 5.10. - Transformador de potencial capacitivo.	108
Figura 5.11 –Resposta em frequência de um TPC mostrando o efeito de uma pequena variação na tensão fundamental (linha cheia); (linha tracejada); $V_{2>99V_1}/100$. Fonte: Contribuição para Normalização da Qualidade de Energia Elétrica	109
Figura 5.12 – Diagrama esquemático para medição de resposta em frequência em laboratório.	110
Figura 5.13 –(a) Curva de resposta em frequência do módulo do TPC de 230 kV. (b) Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada	112
Figura 5.14 – Curva de saída do secundário do TP de 69 kV, entrada 104,9V - SP 13724/TPMC 69.	114
Figura 5.15 - Curva de saída do secundário do TP de 69 kV, entrada 104,9V - VTOF245 ..	114
Figura 5.16 – Curva do secundário da DCP 230kV, na SE Guamá.	115
Figura 5.17 – Esquemático da ligação do 1133A nas subestações do Guamá e Utinga.	122
Figura 5.18 – Diagrama da diferença de sincronia entre os GPS dos analisadores de energia nas SE.	123
Figura 6.1 - Superposição de modelos para ajuste individual das componentes da I_F	127
Figura 6.2 - Comparação das Amplitudes entre a I_F Medida (em Vermelho) e a Calculada em (azul).....	127

Figura 6.3 - Comportamento da forma de onda e DCH para os diversos estágios de contaminação salina em isoladores, segundo Suda (2001) Comportamento dos estágios de forma de onda e DCH da I_F .	129
Figura 6.4 – Arranjo experimental utilizado no artigo de Suda (2001) para estudo de I_F em isoladores poluídos	130
Figura 6.5 – Forma de Onda do estágio 5 da I_F em isoladores, reproduzida a partir do trabalho de Suda (2001)	131
Figura 6.6 – DCH do estágio 5 da I_F em isoladores, reproduzida a partir do trabalho de Suda (2001)	132
Figura 6.7 – Diagrama de blocos para obtenção de modelo matemático com falha	132
Figura 6.8 – Superposição das formas de ondas das I_F sem falha (Azul) e com falha (Vermelho).	133
Figura 6.9 – Superposição das DCH's das I_F sem falha (Azul) e com falha (Vermelho)	133
Figura 6.10 - Dispersão dos valores de capacitância ajustados pelo modelo matemático.	135
Figura 6.11 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para apenas o primeiro harmônico	136
Figura 6.12 – (a) Forma de onda da I_F Medida no dia 13 de novembro de 2005; (b) Forma de onda da I_F Medida no dia 18 de novembro de 2008. Ambos no horário de 09:20H. A diferença nos valores de amplitude sinalizam para manutenções realizadas na LT	137
Figura 6.13 – Dispersão no ajuste da capacitância para a 11ª harmônica Aumento gradativo na dispersão dos dados de ajuste de capacitância para harmônicas acima da 10ª. 11ª Harmônica.	138
Figura 6.14 – Dispersão no ajuste da capacitância para a 16ª harmônica. Aumento gradativo na dispersão dos dados de ajuste de capacitância para harmônicas acima da 10ª	138
Figura 6.15 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para a 35ª harmônica, com baixo grau de dispersão	139
Figura 6.16 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para a 37ª harmônica, com baixo grau de dispersão	139
Figura 6.17 – Ajuste do valor de capacitância para o período de ponto de orvalho da LT	140
Figura 6.18 – Ajuste do valor de capacitância para o período de ponto de orvalho da LT, para a 5ª harmônica	141
Figura 6.19 – Ajuste do valor de capacitância para o período de alto consumo da LT	142
Figura 6.20 - Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico nos períodos de maior consumo e Ponto de orvalho na LT.	142
Figura 6.21 – Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico no período de chuva na LT	143

Figura 6.22 – Ajuste do valor de capacitância para o período de chuva forte na LT, juntamente com o período de maior consumo e ponto de orvalho	144
Figura 6.23 - Ajuste do valor de capacitância para o 1º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, com CV= 2,35%	145
Figura 6.24 – Ajuste do valor de capacitância para o 3º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, com CV= 12,04%	146
Figura 6.25 – Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 9,49%.	146
Figura 6.26 – Ajuste do valor de capacitância para o 7º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008. CV= 13,04%	147
Figura 6.27 – Ajuste do valor de capacitância para o 2º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 62,06%	147
Figura 6.28 – Ajuste do valor de capacitância para o 4º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 54,24%	148
Figura 6.29 – Ajuste do valor de capacitância para o 6º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 68,01%	148
Figura 6.30 - Ajuste do valor de capacitância para o 8º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 65,20%.	149
Figura 6.31 – Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 3º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha ...	150
Figura 6.32 – Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 3º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha ...	151
Figura 6.33 – Comportamento de alguns ajuste de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 7º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha....	151
Figura 6.34 – Comportamento de alguns ajuste de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 9º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha ...	152
Figura 6.35 – Representação funcional de um neurônio Artificial	153
Figura 6.36 – Redes neurais tipo <i>feedforward</i> com uma única camada de unidades processadoras. (a) Arquitetura. (b) Sentido de propagação do sinal funcional	154
Figura 6.37 – Redes neurais tipo <i>feedforward</i> com múltiplas camadas. (a) Arquitetura. (b) Sentido de propagação do sinal funcional e do sinal de erro	156
Figura 6.38 – Topologia da RNA com suas entradas como valores de capacitância e grupo pertencente por horário e a saída da rede que pode ser normal ou anormal	158
Figura 6.39 – Criação da rede neural (10 neurônios na camada escondida) e topologia (a); Função de treinamento por gradiente conjugado escalonado e resultado do treinamento, validação e teste	159

Figura 6.40 - Performance da RNA desenvolvida, com melhor ponto entre treinamento validação sendo na decima primeira época com um MSE de 0,089391	160
Figura 6.41 – Matriz de classificação (confusão) de treinamento (a); Matriz de classificação de validação (b); Matriz de classificação de teste (c) e Matriz de classificação total (d).	161
Figura 6.42 – Curva de ROC para o treinamento da RNA (a); Curva de ROC para a validação da RNA (b); Curva de ROC para o Teste da RNA (c); Curva de ROC da média do comportamento das Curvas apresentadas em (a), (b) e (c).....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Caracterização e aplicabilidade dos modelos	43
Tabela 3.1 Relações constitutivas.....	59
Tabela 4.1 – DCH da I_F medida, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,29), junto com o THD = 4,20%..	77
Tabela 4.2 –DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 11,64), junto com o THD = 4,70%, além da diferença Δ	78
Tabela 4.3 – DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 9,791), junto com o THD = 8,24%, além da diferença absoluta Δ	80
Tabela 4.4 - DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,27), junto com o THD = 6,58%, além da diferença absoluta Δ	85
Tabela 4.5 - DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,54), junto com o THD = 4,24%, além da diferença absoluta Δ	88
Tabela 5.1 – Valores medidos e calculados para a relação de transformação e ângulo de fase do TP	107
Tabela 5.2 – Relação V-I para medição de características não lineares.	111
Tabela 5.3 – Parâmetros estimados do TPC de 230 kV	111
Tabela 5.4 – Dados técnicos do TP ensaiado	113
Tabela 5.5 - Resposta em frequência linear na faixa de 60 a 3000 Hz, para o TP VTOF245	114
Tabela 5.6 – Descrição do TP CVE 245, onde estão instalados os analisadores de energia na SE Guamá	115

Tabela 6.1 – Resultados numéricos da comparação entre as amplitudes da I_F medida e calculada, com suas respectivas diferenças absolutas e em percentual.	128
Tabela 6.2 – Valores numéricos das DCHs dos sinais de I_F gerados pelo modelo matemático, sem falha e com falha	134
Tabela 6.3 – Alguns valores de capacitância para os harmônicos ímpares, após ajuste da forma de onda, para estado de funcionamento normal, em nF , com seus respectivos dias e horários da medição, empregados como dados de entrada da RNA para treinamento e validação.....	157
Tabela 6.4 - Organização dos dados coletado, organizados (em vetores capacitância) e selecionados nos dias 10 e 11 de novembro de 2008 para teste da metodologia de detecção de falha em LT	164
Tabela 6.5 – Classificação por meio da metodologia sugerida, para as novas condições de funcionamento do isolamento da LT.	165

RESUMO

Convencionalmente a monitoração das condições de funcionamento de uma linha de transmissão de energia é realizada através de inspeções periódicas ao longo desta linha. Esta monitoração permite a manutenção corretiva pela constatação de falhas durante a inspeção. Uma manutenção mais eficiente deve empregar técnicas preditivas que se caracterizam pela monitoração em tempo real. As técnicas preditivas verificam o estado de funcionamento empregando modelos de funcionamento normal para a detecção de falhas e modelos de falha para a determinação e o diagnóstico a ser empregado no FDI (Fault Detection and Isolation). Por isso foi desenvolvido um modelo matemático adequado para ser aplicado em manutenção preditiva de trechos de linhas de transmissão a baixo custo, sem necessidade de sensores distribuídos ao longo da linha. Este modelo permite o emprego da metodologia de detecção de falhas (FDI) através do acompanhamento da corrente de fuga de linhas de transmissão. O emprego do modelo permite também a obtenção de um novo indicador da condição normal e anormal de funcionamento de uma linha de transmissão que é a capacitância das frequências harmônicas. O metodologia foi validada através de medidas obtidas em um trecho de linha de transmissão, e a utilização de uma rede neural artificial desenvolvida para a classificação do estado de funcionamento da Linha de Transmissão.

PALAVRAS-CHAVES: Capacitância. Corrente de fuga. Modelos de linha de transmissão. Monitoração. RNA.

ABSTRACT

Conventionally monitoring operating conditions of a power transmission line is accomplished by periodic inspections along this line. This monitoring allows corrective maintenance by finding faults during the inspection. But in more efficient maintenance, predictive techniques that are characterized by real-time monitoring should be employed. The predictive techniques verify the operating status using normal function models for fault detection and fault models for the diagnosis to be employed in FDI (Fault Detection and Isolation). So, we developed a mathematical model appropriate for application to predictive maintenance of transmission line segments at low cost, without the need for sensors distributed along the line. This model allows the use of the methodology for detecting faults (FDI) by monitoring the leakage current of transmission lines. The use of the model also allows obtaining a new indicator of the condition of normal and abnormal functioning of a transmission line, which is the capacitance of harmonic frequencies. The model was validated through measurements obtained on a section of transmission line, by means of an artificial neural network.

KEYWORDS: Capacitance. Current Leakage. Transmission Lines Models. Monitoring, ANN.

Sumário

CAPÍTULO 1.0 INTRODUÇÃO	22
1. NATUREZA DO PROBLEMA A SER ESTUDADO.....	22
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA (ESTADO DA ARTE DA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DA LT- MANUTENÇÃO CORRETIVA.)	23
1.2 TIPOS DE MONITORAÇÃO.....	25
1.2.1 Inspeção Aérea.....	25
1.2.2 Inspeção Terrestre.....	26
1.2.3 Inspeção Corona	29
1.2.4 Termovisão	29
1.2.5 Mapeamento a Laser.....	30
1.3 OBJETIVOS	31
1.4 CONTRIBUIÇÕES	32
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	33
CAPÍTULO 2.0 MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	35
2.1 DEFINIÇÕES	35
2.2. SISTEMAS DE MONITORAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS	36
2.3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA MONITORAÇÃO DE SISTEMAS	38
2.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS	40
2.5. SOLUÇÃO PARA PERMITIR A MANUTENÇÃO PREDITIVA NAS LTS.....	43
2.6. PARÂMETROS DE MONITORAÇÃO E MODOS DE FALHAS	45
2.7. MONITORAÇÃO DE LTs A PARTIR DA CORRENTE DE FUGA	47
2.8. PROPOSTA DA METODOLOGIA DE DETECÇÃO DE FALHAS DE LT	51
2.9. OBTENÇÃO DA CORRENTE DE FUGA ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO	52
2.10.CONCLUSÃO	54
CAPÍTULO 3.0 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	56
3.1. MODELOS QUANTO A DISTRIBUIÇÃO DE SEUS PARÂMETROS.....	57
3.2. MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	57

3.3. MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO MODAL.....	57
3.4. MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO DA FASE.....	58
3.5. MODELO ELETROMAGNÉTICO	59
3.6. MODELO CONSIDERANDO O EFITO DA FREQUÊNCIA SOBRE OS PARÂMETROS LONGITUDINAIS	60
3.7. ESTADO DA ARTE PARA MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	61
3.8. MODELAGEM DOS MODELOS MAIS UTILIZADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	62
3.8.1 Modelo π concentrado	63
3.8.2 Modelagem Modal	63
3.8.3 Modelagem em Coordenadas de Fase.....	64
3.8.4 Modelo Universal.....	67
3.8.5 Modelo Considerando Efeito da Frequência sobre os Parâmetros Longitudinais	70
3.9. CONCLUSÃO.....	72

CAPÍTULO 4.0 MODELO MATEMÁTICO PARA DETECÇÃO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO EM LT 73

4.1 MODELO PI PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO - PRECURSOR	74
4.2 MODELO “Tee” PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	78
4.3 MODELO MATEMÁTICO – MELHORIAS NA REPRESENTAÇÃO DA ISOLAÇÃO	81
4.4 MODELO COM SUPERPOSIÇÃO DAS FONTES EM FREQUENCIAS HARMÔNICAS.....	85
4.4.1 Técnica de Ajuste de Capacitância por Harmônico.....	86
4.5 CONFIGURAÇÕES DOS BLOCOS DE FUNÇÕES E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	88
4.6 CONCLUSÃO.....	94

CAPÍTULO 5.0 VALIDAÇÃO DOS DADOS 96

5.1 MEDIDAS DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	96
5.2 O DESENVOLVIMENTO DE MEDIÇÕES DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	97
5.2.1 Analisadores de Espectro	98
5.2.2 Analisadores de Harmônico	98

5.3	ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E MODELAGEM DE TPs e TCs	99
5.4	CIRCUITOS EQUIVALENTES CLÁSSICOS	99
5.5	MEDIÇÃO DE CORRENTE	101
5.6	MEDIÇÃO DE TENSÃO	103
5.6.1	Transformador de Tensão Magnético	103
5.6.2	Transformador de Tensão Capacitivo	108
5.7	TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVO EM 230 kV	109
5.7.1	Medições em Laboratório	110
5.7.2	Medições da Características Não Linear do TPC	110
5.7.3	Parâmetros do Modelo do TPC de 230 kV	111
5.7.4	Escolha do TP para Medição da Grandeza	113
5.8	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO POWER SENTINEL 1133 A	115
5.8.1	Características Gerais	117
5.8.2	Especificações Técnicas e Parâmetros Operacionais	118
5.8.2.1	Entradas de Tensão e Corrente AC	118
5.8.2.2	Interface de Instrumentos	119
5.8.2.3	Capacidade de Medição de Qualidade de Energia	121
5.8.2.4	Informações do GPS	122
5.9	VALIDAÇÃO DAS MEDIDAS	123
5.9.1	Erros do GPS	123
5.9.2	Erros do TP/TC	123
5.10	CONCLUSÃO	124

CAPÍTULO 6.0 ÍNDICE PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DE LT 126

6.1	COMPORTAMENTO HARMÔNICO DA CORRENTE DE FUGA COM A CAPACITÂNCIA	126
6.2	MODELO MATEMÁTICO COM FALHA	129
6.3	COMPORTAMENTO DA CAPACITÂNCIA POR HARMÔNICO	134
6.4	COMPORTAMENTO DA CAPACITÂNCIA POR HORÁRIO	140
6.4.1	Comportamento da Capacitância nos Períodos de Ponto De Orvalho	140
6.4.2	Comportamento da Capacitância nos Períodos de Alto Consumo	141
6.4.3	Comportamento da Capacitância nos Períodos de Chuva	143

6.5 ASSOCIANDO CAPACITÂNCIA AO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DA LT	144
6.6 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	152
6.6.1 Redes <i>Feedforward</i> de uma Única Camada	154
6.6.2 Redes <i>Feedforward</i> de Múltiplas Camadas	155
6.6.3. Redes Recorrentes	156
6.6.4 Aplicação da Rede <i>Feedforward</i> aos Dados.....	156
6.6.5 Detecção do Funcionamento do isolamento da LT.	163
6.7 CONCLUSÃO	165
CAPÍTULO 7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÃO E	
TRABALHOS FUTUROS	168
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	168
7.2 CONCLUSÕES	171
7.3 TRABALHOS FUTUROS	172
Referências.....	173
ANEXO.....	179

CAPÍTULO 1.0 INTRODUÇÃO

1 NATUREZA DO PROBLEMA A SER ESTUDADO

A energia elétrica é um recurso de fundamental importância para o desenvolvimento econômico e social de um país. Portanto, existe uma necessidade de garantir um alto grau de confiabilidade e continuidade no seu fornecimento.

As linhas de transmissão (LTs) são os elementos do sistema elétrico de maior responsabilidade uma vez que todo seu sistema opera com as tensões elevadas, transmitindo grandes blocos de energia, em estruturas de grande porte, por muitas vezes instaladas em localidades de difícil acesso. A manutenção dos elementos da linha e a continuidade no fornecimento dos sistemas elétricos são importantes para muitos tipos de consumidores como, por exemplo, os hospitais, as indústrias, os frigoríficos, entre outros. A restituição do fornecimento de energia deve ser rápida ao ocorrer uma falta e, portanto, é importante a sua detecção e localização (isolação) para que o tempo despendido nos serviços de manutenção e reparo seja mínimo (GOMES, 2006).

As LTs são projetadas para operarem sem interrupções por grandes períodos de tempo. Porém, muitos são os fatores que podem causar falhas ou faltas em LTs, as quais podem ser provocadas pela ocorrência de diversos fenômenos eletromagnéticos (descargas atmosféricas, por exemplo), poluição, vandalismo, condições ambientais adversas (queimadas, ponto de orvalho, chuvas, etc.) ou pelo desgaste de seus componentes, entre outros. Assim, tais fatores têm grande relevância para que as LTs sejam elementos suscetíveis a faltas no sistema. Por “falta” entende-se como a falha total no fornecimento da energia elétrica. A causa de uma falta pode ser devido a um fenômeno interno (exemplo: sobrecarga dos equipamentos) ou externo ao sistema (exemplo: sobretensões devido a descargas atmosféricas). Na ocorrência da falta podem surgir os mais diversos problemas, tais como danos aos equipamentos, desligamento de áreas que não estão sob falta, explosões, dentre outras. Já a falha é a descontinuação de funcionamento normal, o sistema com falha continua a funcionar, porém de maneira anormal, quando esta falta está em seus níveis iniciais ela é chamada de falha incipiente. Uma falha pode evoluir para uma falta dentro de um sistema.

A detecção de faltas e falhas no sistema elétrico é de interesse geral da sociedade bem como o estudo de metodologias para solução deste problema.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Detecção de faltas em Sistemas Elétricos é uma área de importância estratégica para diversos setores da sociedade. Concessionárias de energia elétrica necessitam detectar faltas no sistema elétrico de modo a isolar o(s) elemento(s) faltoso(s) em um tempo mínimo e criar medidas preventivas. A caracterização prematura da falta capacita equipes de manutenção à resolução/manutenção do(s) equipamento(s) faltoso(s) possibilitando assim a retomada da operação normal do sistema em um curto espaço de tempo.

Segundo Kardec (1998), pode-se distinguir seis tipos de manutenção como: manutenção corretiva não planejada; manutenção corretiva planejada; manutenção preventiva; manutenção preditiva, manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

- *A Manutenção corretiva* é a atuação no equipamento ou sistema para a correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado. Observa-se que a manutenção corretiva não é, necessariamente, uma manutenção de emergência. Pode ser dividida em duas classes.
- *A Manutenção corretiva não planejada* é a correção da falha de maneira aleatória e caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido. Normalmente, a manutenção corretiva não planejada implica em altos custos, pois a indisponibilidade inesperada do equipamento ou sistema pode acarretar interrupções, perda de qualidade no fornecimento de energia elétrica e elevados custos indiretos de manutenção.
- *A Manutenção corretiva planejada* é a correção do item que apresenta desempenho menor do que o esperado ou falha. A manutenção corretiva planejada é definida por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função do acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a falha completa. Um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que o não planejado.
- *A Manutenção preventiva* é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a queda ou falha no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. Por este motivo é também chamada de manutenção baseada no tempo.
- *A Manutenção preditiva* é a atuação ou intervenção com base em modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Por este motivo é chamada manutenção baseada no estado. A manutenção preditiva foi a primeira grande quebra de paradigma na manutenção. O seu emprego e o seu aprimoramento intensificam-se quanto mais os conhecimentos tecnológicos são aplicados aos equipamentos, e o uso de técnicas e metodologias que permitam avaliação confiável das instalações e sistemas

operacionais. Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros elétricos, físicos, químicos, mecânicos, etc., permitindo a operação contínua do equipamento ou sistema pelo maior tempo possível. A manutenção preditiva privilegia a disponibilidade, pois as medições e verificações são efetuadas com o sistema em funcionamento. A decisão de intervenção é tomada quando a degradação se aproxima de um limite previamente estabelecido.

- *A Manutenção detectiva* começou a ser mencionada na literatura a partir da década de 90. Sua denominação está ligada à palavra detectar – em inglês *Detective Maintenance*. Este tipo de manutenção é efetuado em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. A identificação de falhas ocultas é primordial para garantir a confiabilidade.
- *A Engenharia de manutenção* é a segunda quebra de paradigma na manutenção. Praticar Engenharia de Manutenção é deixar de ficar consertando continuamente e procurar as causas básicas, modificar situações permanentes de mau desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, dar resposta (feedback) ao projeto, interferir tecnicamente nas compras. Engenharia de manutenção significa perseguir as melhores práticas (benchmarks), aplicar técnicas modernas e nivelar as melhores práticas de manutenção.

Várias ferramentas disponíveis e adotadas atualmente têm no nome a palavra Manutenção. É importante observar que essas não se constituem novos tipos de manutenção, mas ferramentas que permitem a aplicação dos seis tipos de manutenção citados. No entanto, em linhas de transmissão utilizam-se em sua grande maioria a manutenção corretiva e principalmente a preventiva (baseadas no tempo). Atrelada à manutenção, várias técnicas de monitoração são usadas, dentre estas podem-se citar: inspeção aérea, inspeção terrestre, inspeção corona, termovisão, mapeamento a laser e medições de parâmetros elétricos.

No caso das linhas de transmissão, as técnicas de monitoração são empregadas de forma diferente de acordo com a sua localização, e de acordo com a disponibilidade de equipamentos para esta monitoração. A monitoração pode ser periódica ou ocasional. A monitoração ocasional é realizada quando um equipamento começa a apresentar suspeita de falha e a monitoração periódica é feita mesmo sem suspeita de falha. É importante salientar que qualquer monitoração pode fornecer uma curva de comportamento do equipamento monitorado. A análise deste comportamento prevê tendências antecipando, assim, possíveis falhas.

1.2 TIPOS DE MONITORAÇÃO

A inspeção aérea, assim como, a inspeção terrestre, inspeção corona e a termovisão são técnicas periódicas. As Inspeções Aéreas podem ser de patrulhamento, específicas e de emergência. Estas inspeções serão descritas a seguir.

1.2.1 Inspeção Aérea

É uma técnica aplicada na manutenção preventiva (baseada no tempo). É um dos principais instrumentos de monitoração das linhas de transmissão, servindo para a programação das manutenções corretivas. Podem ser classificadas em quatro tipos. O primeiro é a inspeção aérea detalhada, a qual é realizada periodicamente com helicóptero em velocidade reduzida (média de 60 km/h), sendo o voo feito ao longo da linha observando toda sua extensão, conforme ilustrado na Figura. 1.1.



Figura 1.1 – Inspeção aérea detalhada (RAP, 2009).

O segundo tipo é a inspeção aérea de patrulhamento realizada com uma velocidade maior (média de 90 km/h) (RAP, 2009), ou ainda realizando escaladas nas estruturas (GOMES, 2006), por meio da Figura 1.2 é visualizada uma escalada a torre para verificação de cadeia de isoladores, observando os pontos que possam colocar em risco a linha de transmissão em curto prazo. Assim como na inspeção detalhada, a inspeção aérea de patrulhamento é realizada em apenas um sentido ao longo da linha.



Figura 1.2 – Inspeção de patrulhamento (CTEEP, 2008).

O terceiro tipo é a inspeção aérea específica, restrita a alguns componentes ou subcomponentes das instalações. O último tipo é a inspeção aérea de emergência realizada na localização de uma falha transitória ou permanente, detectada pelas proteções da linha (CTEEP, 2008). Este tipo de manutenção é empregada na manutenção corretiva.

1.2.2 Inspeção Terrestre

As inspeções terrestres são executadas seguindo um roteiro preestabelecido, que leva em consideração o diagnóstico da linha de transmissão, sua idade, desempenho, características próprias, etc. Podem ser do tipo detalhada com ou sem escalada, de roçada e de emergência.

- Inspeção Terrestre Detalhada: é executada normalmente a cada dois anos para linhas que passam por inspeção aérea e anualmente para linhas que não passam por inspeção aérea. Nesta inspeção são apontadas avarias nos seguintes itens:
 - a) na base
 - formigueiro;
 - erosão;
 - base danificada;
 - com água;
 - contrapeso partido;
 - contrapeso fora do solo;
 - falta contrapeso;
 - contrapeso desligado/desconectado;
 - vegetação alta.

- b) na estrutura
 - fora de prumo;
 - peça deformada;
 - número ilegível;
 - falta de peças;
 - falta de parafusos;
 - falta de arruelas;
 - parafusos soltos;
 - sinais de ferrugem;
 - falta de porca.
- c) na cadeia de isoladores
 - isoladores queimados;
 - isoladores defeituosos;
 - isoladores quebrados;
 - isoladores trincados;
 - cadeia fora de posição;
 - falta de contrapino;
 - sinais de ferrugem;
 - peças defeituosas;
 - falta de parafusos;
 - falta de porcas.
- d) nos condutores
 - caído no solo;
 - muito tensionado;
 - muito baixo;
 - com tensão desigual;
 - tento rompido;
 - falta de festão;
 - festão sem colo;
 - falta de amortecedor;
 - amortecedor solto;
 - jumper solto;
 - parafuso solto;
 - falta de parafuso;

- falta de porca.
- e) nos cabos para-raios (cabo guarda)
 - muito tensionado;
 - pouco tensionado;
 - danificado;
 - falta de parafuso;
 - falta de porca;
 - parafusos soltos;
 - sinais de ferrugem.
- f) na faixa
 - árvore fora da faixa, mas que pode atingir a linha;
 - faixa suja;
 - faixa intransitável;
 - construções dentro da faixa;
 - cercas não interrompidas;
 - cercas não aterradas;
 - cruzamentos com outras linhas;
 - condutores baixos;
 - amortecedores soltos;
 - emendas dos condutores;
 - contrapeso fora do solo.
- Inspeção Terrestre de Roçada: este tipo de inspeção ocorre quando existe a necessidade de se quantificar as áreas localizadas nas faixas de segurança que deverão passar por roçada ou limpeza de faixa, além de árvores existentes nas proximidades das linhas de transmissão que possam representar risco para o desempenho das linhas.
- Inspeção Terrestre de Emergência: ocorrem quando houver perturbações ou desligamento de uma linha de transmissão e a mesma não aceita sua reenergização. Este tipo de inspeção também é executada quando ocorrem flutuações de tensão (piques) na linha.

1.2.3 Inspeção Corona

Corona é um fenômeno que resulta da ionização do ar, e conseqüente produção de descargas, devido a um elevado campo elétrico. A detecção do efeito corona é uma técnica realizada à distância do objeto analisado. A técnica permite visualizar à distância um objeto estando ele em repouso ou em movimento, e simultaneamente visualizar as descargas. A câmera de detecção de corona produz uma imagem a partir da onda de luz gerada pelo objeto inspecionado. A visibilidade permite localizar o defeito e selecionar a ferramenta apropriada para solucionar o problema.

O uso do helicóptero, juntamente com a câmera permite detectar o efeito corona em LT. Voos próximos e em baixa velocidade pela LT, favorecem a detecção do efeito corona pela câmera, visto a maior proximidade ao ponto inspecionado, conseguido pelo helicóptero. A sua utilização torna desnecessária a utilização de plataformas giro estabilizadas. Os voos são estacionários em cada torre, o qual permite obter imagens de excelente qualidade (HANGAR, 2008).

1.2.4 Termovisão

Inspeção termográfica aérea consiste em efetuar a inspeção utilizando equipamentos capazes de detectar, por intermédio da radiação infravermelha, as elevações de temperatura provocadas por algum tipo de anomalia no sistema energizado. Essas anomalias, na grande maioria das vezes, são imperceptíveis aos olhos humanos. Conseqüentemente, uma inspeção termográfica aérea se torna muitas vezes superior em qualidade e confiabilidade em relação a uma inspeção convencional.

Ao final dos serviços de inspeção, um relatório é, contendo laudos técnicos das anomalias encontradas com os devidos detalhamentos de sua localização, bem como uma fita contendo imagens e sons em tempo real de toda a inspeção. O relatório possibilita diagnosticar o sistema elétrico inspecionado, a fim de mobilizaras equipes de manutenção e estas sejam direcionada para os locais dos reais problemas, garantindo uma significativa redução nos custos com a mobilização de equipes de manutenção (ENERGISA, 2008).

1.2.5 Mapeamento a Laser

O sistema de mapeamento a laser, também conhecido internacionalmente como LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é um sistema baseado em tecnologia laser aerotransportada, que possui características que permitem a aquisição de milhares de pontos por segundo. Todos esses pontos são georeferenciados. Este sistema pode gerar modelos digitais densos e precisos, da topografia e das estruturas verticais da superfície, como prédios, torres de transmissão, tornando-se uma ferramenta atraente para usuários finais de dados topográficos em várias áreas de aplicação (BAUNGARTEN, 2003).

Devido a condição de múltiplo retorno que o sistema LASER proporciona, é possível a identificação de pontos de aproximação ou contato de elementos danosos à estrutura da linha (nas torres, na própria LT ou nas instalações elétricas, como subestações). De maneira semelhante, a verificação de invasão da faixa de passagem ou servidão por construções clandestinas é outra aplicação pertinente ao processo. Essa aplicação vem sendo utilizadas, há alguns anos, com sucesso em todo o mundo, fundamentalmente na obtenção de dados espaciais e tridimensionais dessas estruturas, como visualizado na Figura 1.3.

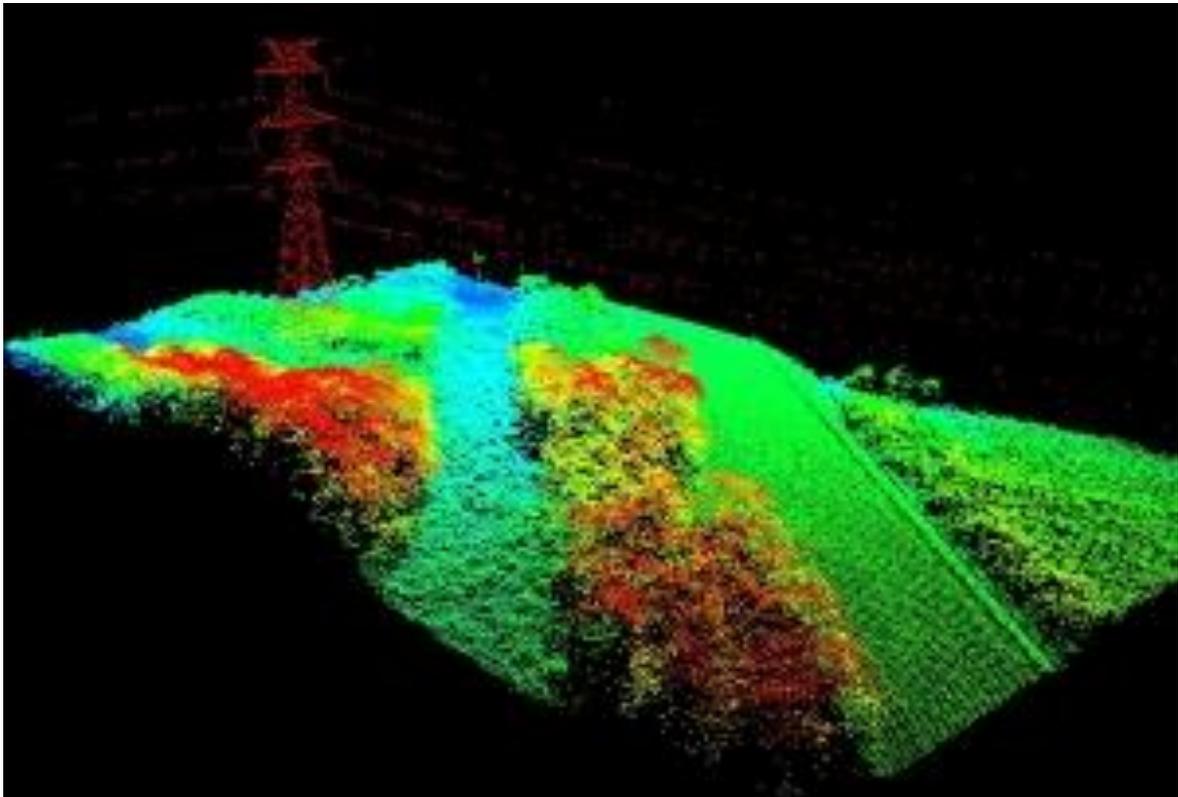


Figura 1.3 – Visão tridimensional da LT

As técnicas até então apresentadas são realizadas após a falha do equipamento ou componente, ou ainda uma tentativa de preservar o funcionamento do sistema com a troca a

partir de um suposto período de vida útil do equipamento. Portanto, para que não ocorra a falha na transmissão de energia, sem precisar da monitoração em contínuo, é necessária uma manutenção preventiva, juntamente com o conhecimento da lei de degradação do equipamento à medida que ele é utilizado. Contudo, a lei de degradação é muita das vezes desconhecida, colocando a manutenção como preditiva por acompanhamento periódico ou monitoração em contínuo (NASCIMENTO, 2007).

Para Nepomuceno (1989), manutenção preditiva ou monitoramento sob condição é a manutenção executada no momento adequado e antes que se ocorra o rompimento ou falha total do componente. Já a manutenção preventiva por acompanhamento é definida quando se utilizam inspeções ou rondas periódicas. No caso do Setor Elétrico Brasileiro a manutenção preditiva é aplicada em situações de supervisão contínua, além do acompanhamento do desempenho do equipamento em operação (medições de vibração, temperatura e outros), e acompanhamento dos parâmetros de controle obtidos a intervalos regulares (análise físico-química de óleo isolante e lubrificante, por exemplo). Este tipo de supervisão é bastante comum ao se monitorar o funcionamento de máquinas rotativas, detectando modificações incipientes, mudanças do estado de funcionamento nas máquinas rotativas tendo como referência o padrão de normalidade de funcionamento estabelecido para a máquina. Evidentemente que a alteração incipiente não caracteriza ainda um defeito, porém se não tratada poderá desencadear uma falha de funcionamento, (MARÇAL, 2000).

A detecção de falhas em uma LT, utilizando monitoração em contínuo é o grande motivador desta Tese. Para isso é necessário inicialmente verificar-se o estado de funcionamento normal da linha de transmissão. Em seguida o desenvolvimento de uma metodologia, que passa pela seleção dos parâmetros monitorados, sua análise e inferências através de técnicas específicas que façam o estudo do comportamento destes parâmetros, a fim de se detectar, isolar e diagnosticar, falhas.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo desta tese é propor uma metodologia para detecção em tempo real das condições de isolamento de uma LT, por meio do estudo da corrente de fuga, com a intenção de observar a evolução de uma falha no isolamento desta LT. Para tanto Utilizou-se o estudo da capacitância teórica obtida por meio de modelo matemático. Por intermédio de medidores de qualidade de energia, foi construído um banco de dados com informações sobre o espectro harmônico das variáveis elétricas selecionadas em um trecho de LT. A monitoração

das variáveis elétricas é realizada, em tempo real, e após análise é disponibilizada uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão da equipe responsável pela manutenção da LT.

Para alcançar o objetivo final desta pesquisa, é necessário atender os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar um modelo matemático adequado que represente a LT.
- Montar um sistema de coleta de dados em contínuo da LT.
- Atrelar técnicas de detecção de falhas ao modelo matemático proposto.
- Relacionar parâmetros selecionados que determine a condição do isolamento da LT.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição da tese para o estado da arte é o desenvolvimento de uma metodologia para detecção do estado de funcionamento do isolamento de uma LT, por meio de monitoração contínua da corrente de fuga, afim de acompanhar a evolução de uma falha na LT, visto que grande parte dos trabalhos relacionados são de detecção de faltas em LTs. Essas faltas são geralmente descritas como desligamentos não programados de seus componentes e podem ser ocasionadas por motivos diversos, como por queda de condutores devido a intempéries, por problemas de natureza elétrica (sobretensão devido a descarga atmosférica), mecânica ou térmica, entre outros (COSTA, 2006).

Foi apresentado uma proposta de monitoração contínua da corrente de fuga de baixo custo, em que são utilizados dois analisadores de energia, instalados nas subestações (SE) que limitam o trecho de LT monitorado.

Com relação ao modelo, foi proposta uma da modelagem matemática para a corrente de fuga da LT, empregando a técnica de superposição de fontes harmônicas. Esta técnica permite ajustes no valor de capacitância, individualmente por harmônico.

Os ajustes nos valores de capacitância, por harmônico utilizam um algoritmo para comparação, por harmônico, entre os valores de pico das correntes amostradas em campo e os fornecidos por meio da modelagem matemática. A partir dos ajustes de capacitância foi desenvolvido o vetor capacitância, este é um vetor de estados. É associado ao vetor capacitância uma condição da LT.

Após o ajuste nos valores de capacitância, foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de extrair atributos estatísticos, os quais permitiu a criação de um padrão característico para o estado normal da LT. Por fim, foi introduzida uma falha na entrada da LT,

e verificado que a metodologia diferencia um estado normal de um estado anormal (com falha) da LT.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Além deste capítulo introdutório, esta tese está organizada com mais seis capítulos:

- Capítulo 2 – **Monitoração e Diagnóstico de Linhas de Transmissão**– onde é descrito o funcionamento do processo de detecção e isolamento de falhas (FDI - *Fault Detection Isolation*), a importância da utilização de modelos matemáticos, e a seleção de um dos parâmetros de monitoração da LT. Tem-se ainda a descrição da LT monitorada
- Capítulo 3 – **Modelos de Linhas de Transmissão** – onde é realizado o estado da arte sobre os modelos mais utilizados para estudo e planeamento de LTs. Em seguida é identificado o modelo de LT mais apropriado para a metodologia sugerida, para detecção de falhas em Linhas de transmissão pelo estudo da corrente de fuga e capacitância.
- Capítulo 4 – **Modelo Matemático para Detecção do Estado de Funcionamento em LT** – Foi descrito os percalços, até a seleção do modelo matemático para detecção de falhas de LTs. Foi ainda utilizada uma metodologia de utilização do modelo matemático selecionado. Além de uma discussão sobre configurações de números de entradas e saídas, no processo de modelagem matemática.
- Capítulo 5 – **Validação de Dados** – Descreveu-se o funcionamento de transformadores, em particular os transformadores de potencial e o transformador de corrente. Relatou-se ainda a resposta em frequência destes componentes. Apresentam-se os resultados de ensaios em transformadores de potencial diversos e no transformador de potencial utilizado na monitoração. Foram detalhadas as principais características dos analisadores utilizados na monitoração.
- Capítulo 6 - **Validação de Novo Índice para Verificação do Estado de Funcionamento de Linhas de Transmissão** - foram realizados estudos preliminares, do comportamento da decomposição harmônica da corrente de fuga, além do comportamento da forma de onda da corrente de fuga. Essas análises orientaram, para a investigação de um ajuste minucioso do parâmetro capacitância. Realizou-se a análise do comportamento do ajuste da capacitância da LT por meio de um modelo matemático. Após o ajuste da capacitância, utilizou-se de ferramenta de inteligência computacional redes neurais artificiais, para determinação de

padrões de normalidade e de anormalidade na LT. O maior resultado desta classificação foi a criação um índice do estado de funcionamento da LT

- Capítulo 7 – **Considerações Finais, Conclusões e Trabalhos Futuros** - apresentam-se as conclusões e contribuições da Tese, além das perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2.0 MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os sistemas, de uma maneira geral, vêm se integrando e tornando-se mais complexos. Esta integração ocorre entre sistemas de diferentes áreas, como por exemplo, entre sistemas de informação com a produção, onde é possível coletar dados e comandar à distância equipamentos (sistemas de produção) a partir de aparelhos de comunicação (sistemas de informação). Podem também ocorrer entre sistemas de mesma área, como, por exemplo, sistemas de energia que se interligam formando uma rede integrada de energia. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), opera de forma interconectada em que um sistema pode ser suprido pelo excedente de outro. Todo o sistema, ao se tornar mais complexos para verificação de seu funcionamento, necessita de uma monitoração mais específica em suas redes de LT.

2.1 DEFINIÇÕES

A descrição da efetividade um sistema de diagnóstico, utiliza uma terminologia técnica que deve ser formalmente transcrita para sua correta compreensão. Estes conceitos podem ser agrupados conforme são encontrados, como sugere Pau (1975) para eventos básicos.

- **Anomalia:** anomalia, falta ou falha é definida como uma condição anormal (ou defeito de um componente, equipamento ou subsistema) de realizar um serviço de sua tarefa ou missão. Uma anomalia pode causar um colapso (ISO/CD 10303-226). De acordo com a Federal Standard 1073C dos Estados Unidos, em sistemas de energia elétrica, uma falta é um curto-circuito. Por outro lado, um curto circuito pode ser considerado um defeito catastrófico, pois resulta em retirada de serviço. Nesta tese será empregado somente o termo anomalia (abnormal) para evitar se confundir com falta ou falha.
- **Colapso:** é o insucesso de um serviço, tarefa ou missão. É a condição ou estado caracterizado pela incapacidade do material, da estrutura ou do sistema em atender plenamente seus propósitos (tarefas ou missão), resultando na retirada de serviços (PAU, 1975). A falha que leva ao colapso todos os serviços é denominada uma falha catastrófica.
- **Falha Incipiente:** é quando uma falha não é catastrófica, ou seja, quando um sistema, subsistema ou equipamento se mantém em serviço apesar da ocorrência de uma falha de um de

seus componentes. Uma falha é incipiente quando esta se manifesta antes que o colapso ocorra e produza um processo irreversível de degradação do funcionamento do sistema (FERNÁNDEZ, 2004).

- Degradação: é um evento que prejudica ou deteriora a capacidade de desempenho de uma determinada tarefa ou missão, inclusive comandos inadequados ao meio ambiente (PAU, 1975).
- Mau Funcionamento: é a incapacidade de operar de maneira normal ou de alcançar um determinado nível de desempenho (PAU, 1975).
- Modo de falha: é uma maneira particular no qual um evento esperado não acontece (ou desempenho de uma tarefa). É dito incipiente quando a não ocorrência do evento esperado não provoca por si só, ou em curto prazo, um colapso no sistema.
- Detecção de Falha: é a determinação da presença de anomalias nos componentes que integram o sistema (FERNÁNDEZ, 2004), (PAU, 1975).
- Localização ou Identificação de falha: se o resultado da detecção é positivo, então a localização da falha designa o material, estrutura, componente ou subsistema onde tem ocorrido a falha (PAU, 1975). O termo identificação da falha também é usado no sentido da localização da falha.
- Isolamento de falhas: é a determinação do conjunto de componentes do sistema que está afetado pelas anomalias detectadas (FERNÁNDEZ, 2004).
- Correção de falhas incipientes: é a ação de corrigir as falhas incipientes diagnosticadas. Quando esta tarefa é realizada através de ação do sistema de controle do sistema/processo, é dito que a correção é automática (FERNÁNDEZ, 2004).
- Resíduo: é a comparação ou diferença entre dados obtidos de leituras de um sistema com aqueles obtidos por um modelo matemático.

2.2 SISTEMAS DE MONITORAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS

A monitoração de sistemas, que inicialmente foi empregada quase exclusivamente para automatizar processos, está cada vez mais sendo empregada para verificação de seu estado de funcionamento e evitar ou minimizar defeitos. Isso é feito inserindo outros sensores e outras redes de monitoração apropriada à aplicação de técnicas e métodos específicos de detecção e diagnóstico.

Um sistema para diagnóstico de estado de funcionamento é efetivo quando ele detecta, diagnostica, isola (*Fault Detection Isolation – FDI*) e corrige a falha. Esta efetividade

pode ser descrita como aparece na Figura 2.1. O sistema apresenta uma degradação ou uma falha que implica em um mau funcionamento afetando o desempenho do sistema. Este mau funcionamento pode ser detectado pela não ocorrência de determinados eventos esperados na dinâmica do sistema. Assim, pode-se constatar que as condições de funcionamento de um sistema podem ser verificadas pela identificação de modos de falha ou pela maneira em que o seu mau funcionamento ocorreu. O sistema de diagnóstico e monitoração para diagnóstico só torna-se efetivo se existe algum mecanismo de correção da falta ou anomalia. Um sistema de diagnóstico efetivo é necessariamente robusto e adaptável.

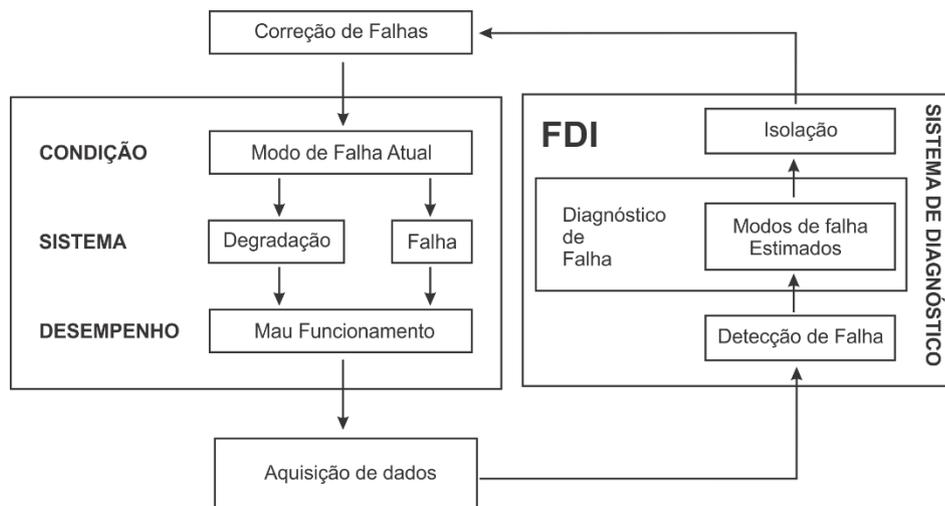


Figura 2.1 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de processos (PAU, 1975).

Entretanto um sistema de diagnóstico robusto, com estrutura rígida, possui mais restrições para se adaptar que aquele possuidor de uma estrutura flexível. Além de robusto e adaptativo os sistemas de diagnósticos devem ser reconfiguráveis. Um sistema de diagnóstico reconfigurável detecta, identifica e isola (FDI) a falha, e sendo desnecessária a uma intervenção para manutenção, é conveniente que se faça uma reconfiguração no funcionamento do sistema para manter o desempenho aceitável. No caso que seja necessária a intervenção para uma manutenção, que seja gerado um alerta para a realização da manutenção (STENGEL, 1991).

Os métodos para detecção, diagnóstico e predição baseiam-se nos dados de funcionamento do sistema, sejam estes determinísticos ou probabilísticos, em comparação com o modelo matemático, como mostrado na Figura 2.2. Se os resíduos forem desprezíveis (para sistemas reais, o resíduo nunca é nulo) o funcionamento é normal. Se os resíduos forem significativos pode-se afirmar que o sistema tem um mau funcionamento, que pode ser diagnosticado como uma falha ou não (em alguns casos pode ocorrer pela ação de um comando

indevido). Estes resíduos, portanto, poderão ser utilizados para identificar um modo de falha, e principalmente, detectar no estado de funcionamento do sistema sua normalidade.

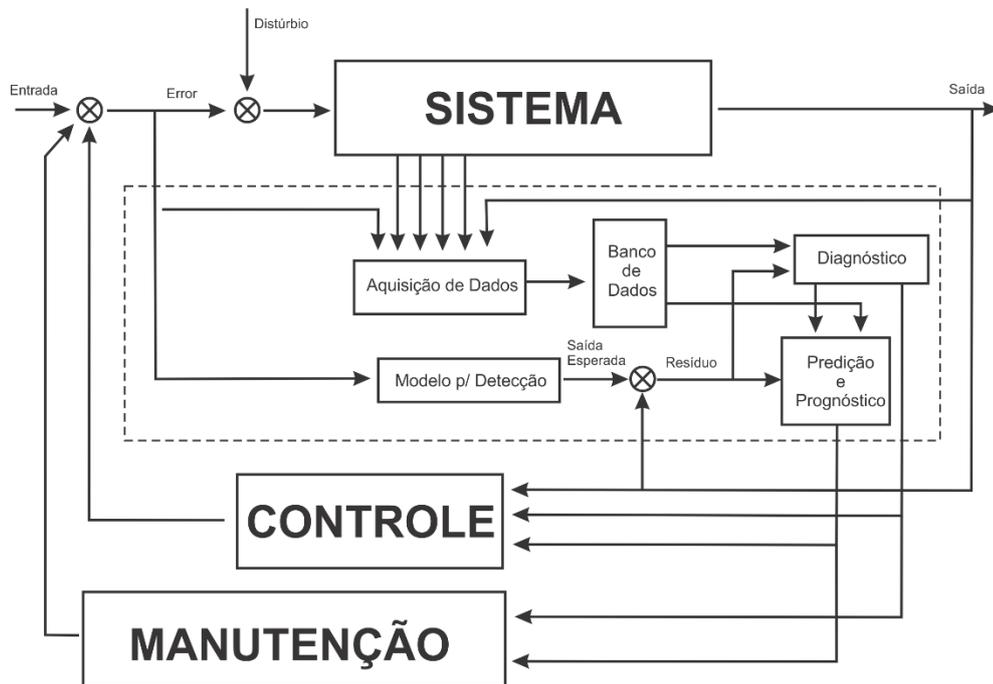


Figura 2.2 – Diagrama de monitoração de processo em malha de controle considerando ação da manutenção e distúrbios (ISERMANN, 2006).

Quando a uma detecção é associada ao tempo pode-se verificar a evolução de um mau funcionamento. Em alguns casos é possível prever o instante em que ocorrerá o mau funcionamento, ou seja, pode-se realizar, assim, uma predição. Portanto, pode-se verificar que uma monitoração eficaz do sistema depende da qualidade do modelo empregado nesta monitoração, que pode ou não incluir a ação de controle (modelo em malha fechada).

No próximo item serão descritos os tipos de modelos e a escolha do mais adequado, em seguida serão apresentados alguns métodos que podem ser empregados na técnica de detecção, diagnóstico e predição de falhas em sistemas e aquele que melhor se adapta à monitoração de linhas de transmissão.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA MONITORAÇÃO DE SISTEMAS

Os modelos matemáticos são empregados para inúmeros fins. Eles são necessários para projetar e desenvolver um sistema e seu controle. Muitas vezes também são necessários para analisar processos e suas operações. Com a utilização massiva de sensores pelo emprego de sistemas automatizados, os modelos passaram a ser utilizados em tempo real para a detecção,

diagnóstico e prognóstico de falhas. Quando, após o diagnóstico, realiza-se uma ação de controle para isolar o problema o modelo empregado é chamado de Modelo baseado em FDI (*Fault, Detection and Isolation*) (MENG, 2004).

Antes de iniciar o desenvolvimento de um modelo é importante determinar inequivocamente sua aplicação. Pela Figura 2.3 constata-se que de acordo com a aplicação, é determinada a complexidade e precisão de um modelo. Isto reflete no número de variáveis de entrada, de saída e intermediárias.

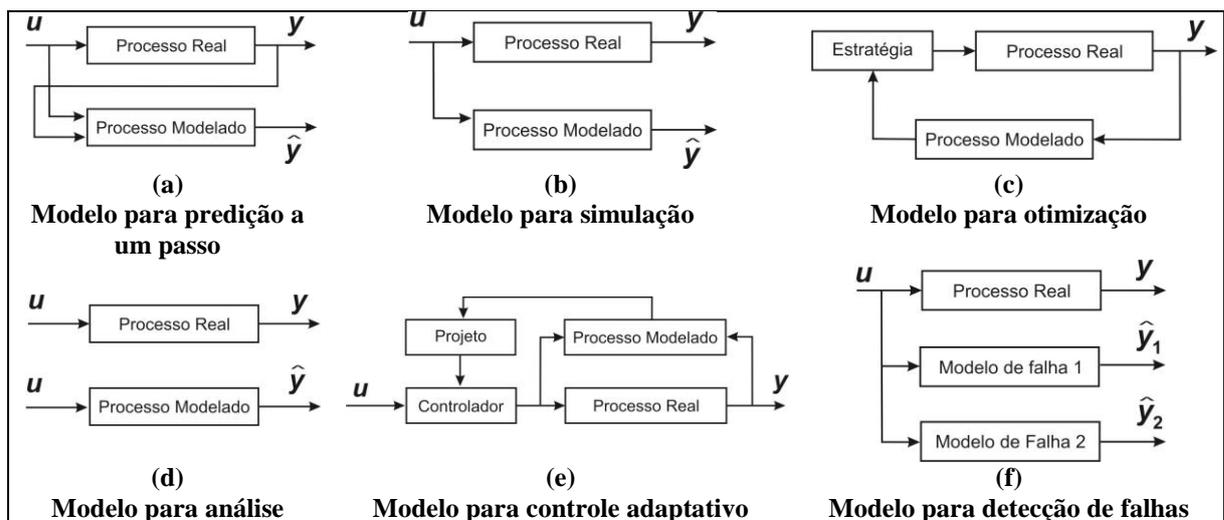


Figura 2.3 – Exemplos de aplicação de modelos matemáticos (ISERMANN, 2006).

Na aplicação de monitoração para verificação do estado de funcionamento de um sistema o modelo matemático será usado para detecção, diagnóstico, localização e previsão de falhas em um sistema. Pode-se utilizar um único modelo ou vários modelos de maior ou menor grau de complexidade. A escolha dependerá da estrutura do sistema de diagnóstico, como será mostrado no próximo tópico.

O modelo matemático é tão próximo da realidade quanto menor for o sinal do resíduo. A escolha do modelo matemático e seu desenvolvimento é o problema inicial mais importante na concepção de um sistema de monitoração para detecção de falhas. Um modelo matemático empregado para detecção, diagnóstico e prognóstico de falhas em sistemas deve apresentar como saída os mesmos parâmetros que possam ser obtidos através de parâmetros obtidos de medições diretas do sistema real. A comparação do comportamento dos parâmetros obtidos pelo modelo e pelo sistema real é que permitirá a detecção, diagnóstico e prognóstico do estado de funcionamento do sistema.

O modelo matemático deve ser o mais próximo do real para que possa ser validado dentro de uma faixa de precisão aceitável para uma monitoração adequada do sistema. Portanto, o desenvolvimento do modelo matemático passa necessariamente pela escolha adequada dos parâmetros do sistema. Nem sempre os parâmetros podem ser representados por equações matemáticas, além dos dados obtidos do sistema real podem ser probabilísticos ou determinísticos. Estas características, dentre outras, dependem do tipo de sistema que se pretende monitorar. De acordo com o tipo de sistema é selecionado um modelo mais adequado a ser empregado na monitoração. A determinação do tipo de sistema a ser representado pelo modelo é a primeira etapa para sua construção. Uma maneira sistêmica de se conhecer os tipos de sistemas existentes é conhecer sua classificação.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS

De uma maneira simplista e generalizada pode-se classificar os modelos em paramétricos ou não paramétricos, ou seja, aqueles modelos que podem ser representados através de parâmetros obtidos do sistema ou não, respectivamente. Os parâmetros formam um conjunto de variáveis que representam completamente o comportamento do sistema. Os modelos paramétricos estão associados a fenômenos onde os dados podem ser coletados empregando aparelhos de medição. Já nos não paramétricos, o comportamento do sistema é descrito literalmente, por exemplo, modelos de comportamento social é um exemplo, seu uso pode ser empregado para detecção de falhas quando os modos de falha são, por exemplo, descrições da experiência de operadores.

Outra maneira de classificar os sistemas a serem empregados na monitoração do estado de seu funcionamento é pelo tipo de dado de onde se conhece seu comportamento (NELLES, 2001) (GUPTA, 1999). Nesta classificação, inicialmente os sistemas podem ser do tipo dinâmico ou estático, conforme os dados sejam variantes no tempo ou não, respectivamente. A partir desta separação, pode-se discriminar se o modelo será baseado em leis matemáticas ou em dados obtidos de parâmetros do sistema. Os modelos baseados em leis matemáticas podem ser lineares ou não lineares. Uma primeira aproximação de um modelo adequado é a sua elaboração a partir de dados reais e linearizado, podendo ser representado por equações diferenciais. Os modelos não lineares baseados em dados são considerados heurísticos, pois além de, serem baseados em dados obtidos da observação direta (modelo empírico), ele contém explicações pertinentes à causa e aos efeitos dos fenômenos envolvidos,

o que não é uma condição necessária para se obter um modelo empírico. Na Figura 2.4 é visualizada a classificação dos modelos matemáticos.

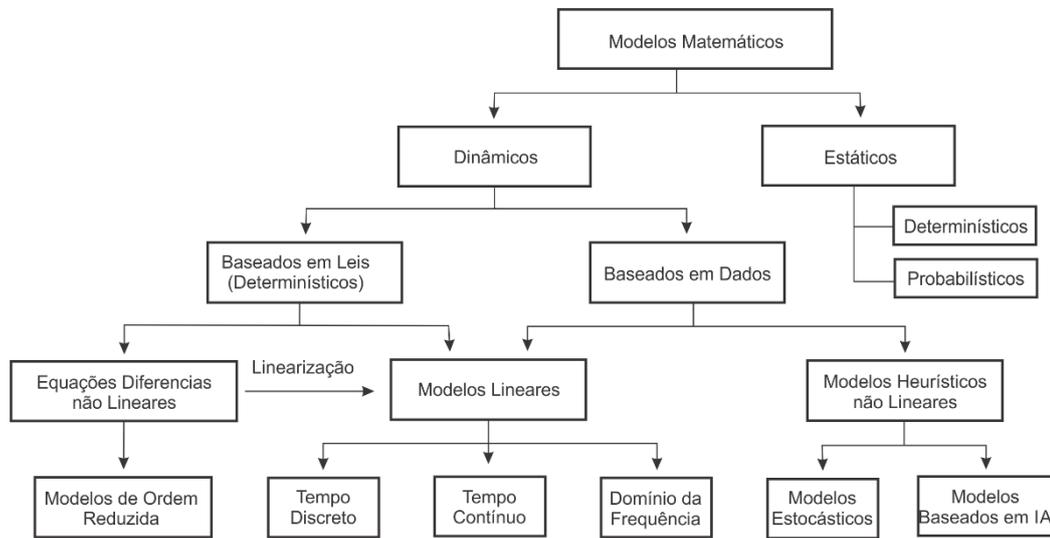


Figura 2.4. – Diagrama de bloco com a classificação dos modelos matemáticos segundo o tipo de dados conhecidos (ISERMANN, 2006).

Uma forma mais sucinta de classificar os modelos a partir do seu comportamento é a classificação pelo grau de conhecimento, conforme ilustrado na Figura 2.5. Os “primeiros princípios” são equações diferenciais que caracterizam o comportamento de cada parâmetro de monitoração.

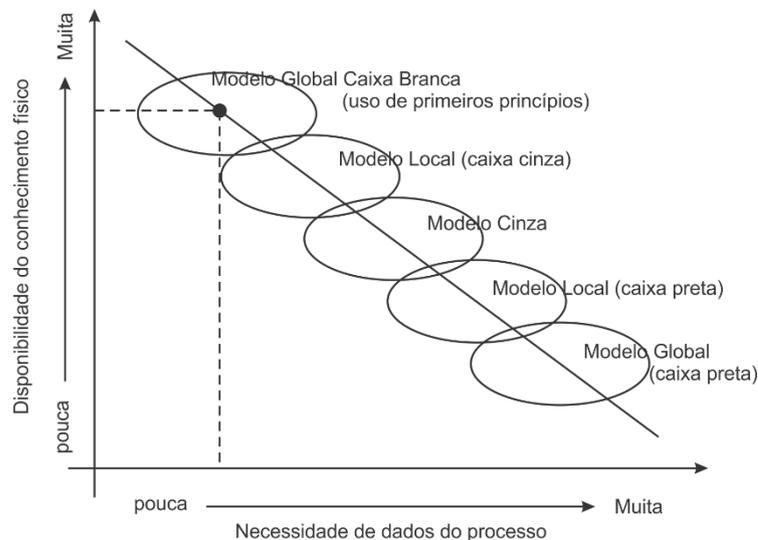


Figura 2.5 – Diagrama com a disponibilidade de conhecimento da estrutura física e de dados do processo para construção de modelos. (ISERMANN, 2006).

Ao modelo descrito pelos primeiros princípios é chamado de modelo de caixa branca. A este modelo é exigido o perfeito conhecimento do comportamento dos parâmetros, o que faz com que estes sejam uma aproximação pelo fato de que os sistemas reais não são

lineares. Assim, quanto mais complexo o sistema, mais difícil será a sua representação por uma caixa branca. Existem duas maneiras de como os modelos de caixa branca podem ser construídos (FERNÁNDEZ, 2004). Uma maneira é chamada de Modelo Físico, que é quando a estrutura do modelo pode ser determinada a partir do conhecimento físico com alguns parâmetros estimados por meio de dados obtidos do sistema real. Outra maneira, chamada Modelo semi-físico, é quando o conhecimento físico permite sugerir relações entre as variáveis envolvidas.

Em contraste com o modelo de caixa branca, no modelo de caixa preta, os únicos parâmetros cujos comportamentos podem ser descritos são aqueles cujos dados são obtidos através de medição, ou seja, os dados de entrada ou de saída do sistema. Estes estão baseados unicamente em critérios estatísticos capazes de estabelecer relações entre as variáveis de entrada e de saída - modelos probabilísticos e experimentais (MENG, 2004).

Um modelo que mistura a complexidade do sistema com sua efetividade é o de caixa cinza. Para construir modelos de caixa cinza se empregam os valores dos parâmetros obtidos do sistema (que caracteriza sua efetividade), obtendo-se equações diferenciais de forma a aproximar o comportamento dos parâmetros por leis físicas (Linearização) (ARAHAL, 2006). A Linearização pode ser realizada, por exemplo, pelos Métodos de Estimação de Parâmetros que restringi a capacidade de aproximação e interpolação de funções. Isto sugere uma relação mais ampla entre a disponibilidade de conhecimento da estrutura física e o conhecimento de dados do sistema (MENG, 2004).

Uma classificação dos modelos em caixa branca, cinza e preta pode indicar uma relação mais explícita com a base de conhecimento dos dados obtidos do sistema, como pode ser verificado resumidamente através das características e aplicações de cada modelo na Tabela 2.1 (NELLES, 2001).

Tabela 2.1 – Caracterização e aplicabilidade dos modelos

	CAIXA BRANCA	CAIXA CINZA	CAIXA PRETA
FONTE DE INFORMAÇÃO	Primeiros princípios	Conhecimento qualitativo (regras)	Experiências
	Completo conhecimento	Percepção associada a dados	Dados
CARACTERÍSTICAS	Boa extrapolação		Curto tempo de desenvolvimento
	Bom entendimento		Pequena necessidade de especialista
	Alta confiabilidade		Pode ser associado a outras técnicas
	Capaz de ser expandido		Desnecessário conhecer o processo
DESVANTAGENS	Tempo consumido		Não é possível extrapolação
	Requer habilidade		Incapaz de expandir
	Alto grau de conhecimento		Requer dados precisos
	Bom conhecimento para testes		Pouco entendimento interno
ÁREA DE APLICAÇÃO	Projetos de processos		Processos existentes
	Áreas experimentais		Processos complexos

Fonte: (ISERMANN, 2006).

No desenvolvimento da monitoração em contínuo do estado de funcionamento de um sistema, o modelo a ser desenvolvido deve ser baseado no conhecimento e ser elaborado preferencialmente em malha aberta, pois a inclusão de uma malha de controle pode encobrir a saída ocultando a resposta diante de uma perturbação. Isto não é trivial já que a maioria dos processos prevê uma malha de realimentação. Assim muitas vezes os parâmetros a serem monitorados não são preferencialmente da saída do processo, mas parâmetros obtidos por medições de variáveis intermediárias obtidas direta ou indiretamente de sensores instalados nas diversas etapas do processo. Os valores cruzados entre a ação de controle e o diagnóstico é um problema que não pode ser ignorado nos modelos que foram desenvolvidos para projetos de controle e diagnóstico (modelos de FDI), onde a ação do controlador considera a reconfiguração do modelo (JACOBSON, 1991), (VEILLETTE, 1992), (BIRDWELL, 1986).

2.5 SOLUÇÃO PARA PERMITIR A MANUTENÇÃO PREDITIVA NAS LTS

Inicialmente, para permitir a manutenção preditiva é necessária montagem de um sistema de monitoração da LT, a fim de obter-se amostras, sinais, medidas para análise. Um sistema de monitoramento em linha de transmissão de energia surgiu nos EUA durante os anos

80, e foram denominados por Power Donut. Este é um sistema desenvolvido para monitorar a temperatura superficial no condutor e medir a altura do condutor ao solo. Nos anos 90 surgem três sistemas de monitoração, CAT1 (*Cable Ampacidad Traction*), Sonar e Laser. O CAT1 (ver Figura 2.6(a)) onde o sensor auxilia na obtenção do parâmetro que representa a força mecânica de esticamento (tensão mecânica) do condutor na linha, a fim de se obter a altura do condutor ao solo. O sistema Sonar, (ver Figura 2.6(b)) em que um sensor ultrassom mede diretamente a altura do condutor ao solo. E o Laser (Figura.2.6(c)) que utiliza tecnologia tipo trena eletrônica para medir a altura do condutor ao solo e ainda agrega a medição dos outros eixos de variação do condutor em relação ao solo, como o balanço longitudinal e lateral em relação às estruturas das linhas (NASCIMENTO, 2007). Evidentemente que a prevenção de valores de limites operativos em uma LT é diferente de falhas que esteja ocorrendo na LT.

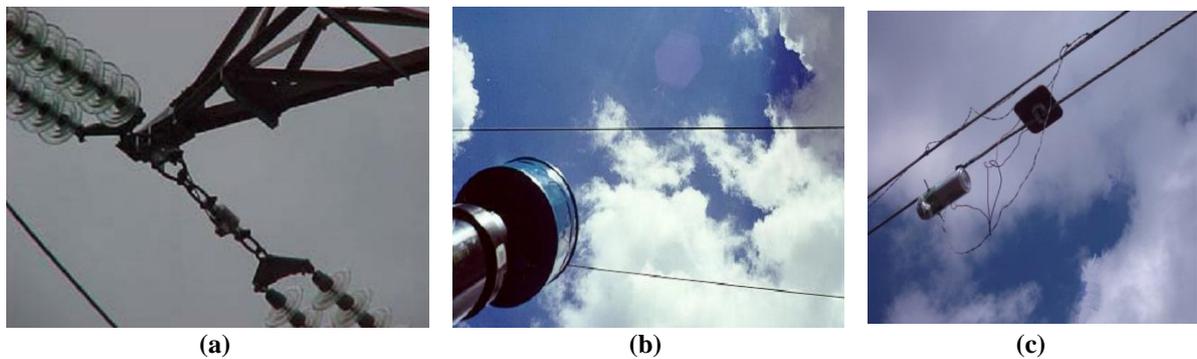


Figura 2.6 – Fotografias dos sistemas de monitoração de LTs. (a) CAT1 e (b) Sonar (NASCIMENTO, 2007) e (c) Laser.

Um sistema de monitoração de linhas possui três grupos interligados que são primordiais para o seu funcionamento, são eles: sensores, meio de comunicação e o sistema computacional de análise e predição. Os sensores são os elementos que medem a grandeza física no campo através de um transdutor para medição direta ou indireta. O meio de comunicação está acoplado à saída do sensor (transdutor) para transmitir as informações até o ponto de processamento. O sistema computacional é responsável pelo processamento das informações para controle, análises, cálculos, previsões e alarme. Na Figura 2.7 está ilustrado um diagrama de bloco simplificado com os três grupos fundamentais (sensores, meio de comunicação e sistema computacional – algoritmos e console do operador) em monitoramento de linhas.

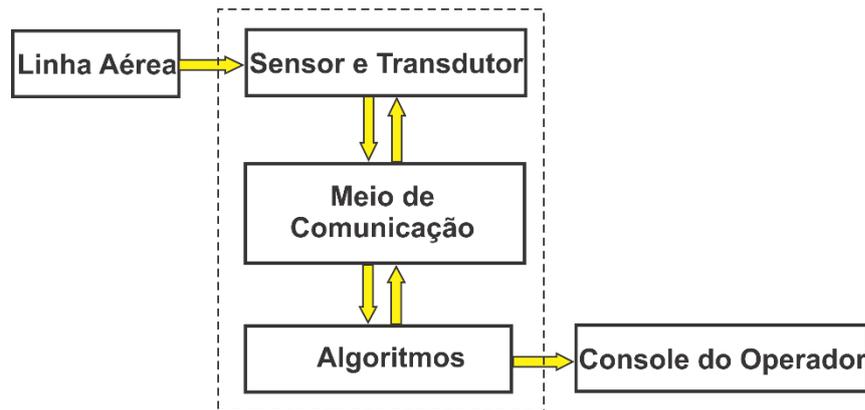


Figura 2.7 - Sistema genérico de monitoração de linhas
 Fonte: (NASCIMENTO, 2007)

Por meio da monitoração de uma LT é possível construir um banco de dados. A entrada do sistema real é introduzida no modelo matemático. A saída do modelo real é comparada com a saída do modelo matemático, a diferença entre essas duas saídas resulta em um resíduo. De acordo com o estudo desse resíduo, seleciona-se uma técnica apropriada para a detecção ou diagnóstico do defeito.

2.6 PARÂMETROS DE MONITORAÇÃO E MODOS DE FALHAS

A monitoração de parâmetros de linhas de transmissão é uma ação fundamental na avaliação do seu estado operacional. Esta é essencial para o desencadeamento de ações preditivas rotineiras, e também com o intuito de estimar a vida útil remanescente dos componentes da LT. A caracterização dos diversos parâmetros requer uma avaliação permanente. Isso se dá por meio de instrumentações adequadas.

Segundo Bezerra (1999) os parâmetros de monitoração de LTs mais comuns são:

- 1) *Impedância de pé de torre*: a impedância de aterramento de estruturas (resistência de pé de torre) representa um parâmetro que responde diretamente pelo desempenho das linhas de transmissão, quando submetidas a descargas atmosféricas. Tradicionalmente os ensaios de resistência de pé de torre são realizados com o auxílio de medidores de resistência de terra.
- 2) *Temperatura de conexões*: o aquecimento das conexões elétricas é um problema grave em um sistema de potência. Devido à sua característica evolutiva que pode conduzir a dilatações que desgastam ou eliminam por completo os contatos elétricos necessários ao transporte de energia elétrica. Geralmente é devido a utilização inadequada de materiais nessas conexões, ou do projeto de fixação do conector ou ainda dos torques utilizados em sua fixação.

- 3) *Distâncias verticais condutor-solo*: as distâncias verticais (clearances) condutor-solo representam um parâmetro fundamental na identificação da capacidade de carregamento elétrico de linhas de transmissão. A identificação dessas distâncias visa assegurar que os condutores, mesmo aquecidos pelo efeito Joule e radiação solar, não violem as condições de segurança estabelecidas em normas técnicas. A estipulação das distâncias verticais requer uma avaliação do comportamento eletromecânico da linha de transmissão, a partir do qual se possam identificar vãos críticos a serem corrigidos, em condições de carregamento normal ou contingências.
- 4) *Oxidação de ferragem*: no processo degenerativo dos materiais componentes de uma linha de transmissão, tem a oxidação das partes metálicas como uma das mais preocupantes, tendo em vista a redução gradativa de sua seção e suportabilidade mecânica, levando conseqüentemente a risco de ruptura/queda de componentes que podem redundar no colapso do fornecimento de energia elétrica. A preocupação maior reside nas partes metálicas estruturais enterradas. Para evitar escavações dispendiosas afim de verificar as condições das estruturas enterradas, opta-se pelo estudo de medições eletroquímicas do solo com possíveis estados degenerativos da estrutura.
- 5) *Poluição de isoladores*: ocorre através da deposição de material contaminante quer seja de origem industrial, marítima ou ambiental. Esses depósitos, juntamente com a presença de umidade, e tensão elétrica propiciam o surgimento de descargas superficiais que podem evoluir para o surgimento de um arco elétrico sobre a cadeia de isoladores e conseqüente a possível interrupção no fornecimento de energia. Os processos de monitoração da contaminação dos isoladores mais utilizados são: inspeções noturnas; medição de Densidade Equivalente de Sal Depositado (ESDD) e medição de corrente de fuga. A utilização de sensores não invasivos e técnicas de reconhecimento de padrões vêm sendo introduzidas para monitoração desse parâmetro.
- 6) *Oxidação de condutores*: ocorre na alma de aço, após longos períodos de operação e pode ser acelerada em decorrência da agressividade do meio ambiente (umidade, acidez, etc.). A preocupação reside no enfraquecimento mecânico do condutor e conseqüente ruptura do mesmo.
- 7) *Corrente de fuga (I_F)*: Ocorre pela fuga de corrente elétrica, principalmente pela isolação da LT. A I_F tem duas componentes principais, uma corrente de deslocamento, que surge em virtude da ação capacitiva da LT, e outra componente de condução que surge pela ação resistiva na corrente que passa pela superfície dos isoladores. Os principais elementos do sistema de isolação da LT são os isoladores elétricos, sua monitoração pode ser realizada, por meio de

sensores instalados diretamente no componente ou em partes específicas da LT. A função de uma LT é o transporte de energia com a menor perda. As perdas podem ocorrer através de queda de tensão ou fuga de corrente. A queda de tensão, por exemplo, pode ser devido à mau contato e pode gerar aquecimento. A I_F é devido a falha de isolamento. O aquecimento que pode levar a falta pode ser detectado pela resistência ôhmica da LT e a perda de isolamento é detectada pela corrente de fuga, isto devido à isoladores trincados ou poluído, queimadas, vãos baixo etc.

2.7 MONITORAÇÃO DE LTs A PARTIR DA CORRENTE DE FUGA

A monitoração por I_F percebe diversos fenômenos da linha. A metodologia empregada de monitorar o trecho, contempla a verificação de resistência da LT, portanto as perdas ôhmicas, devido a mau contato em emendas, conexões, o efeito corona, as distâncias verticais, queimadas, poluição, quebras de isoladores, etc.

O Sistema de Monitoração On-line de Linhas de Transmissão (MOLLTS) é uma proposta de monitoração, que usa a I_F e pode permitir uma manutenção preditiva a baixos custos e isenta de sensores dedicados. Esta monitoração consiste em verificar em tempo real o estado da LT a partir da medição indireta da I_F . Como a medição é contínua, é possível utilizar os dados para o despacho de carga da linha e, portanto, compartilhar em tempo real os dados entre operação e manutenção, seguindo uma tendência tecnológica empregada em sistemas automatizados.

Fisicamente, este sistema é composto pela instalação de dois analisadores de energia. Cada analisador instalado em subestações localizadas nas extremidades do trecho monitorado estão sincronizados via Sistema de Posicionamento Global (GPS). Estes analisadores fornecem informações sobre as grandezas elétricas da LT, tensão, corrente, potências ativas e reativas e o comportamento harmônico da tensão e da corrente. Algumas variáveis ambientais (temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, etc.) são monitoradas por Estações Meteorológicas Remotas (EMR). É ilustrado na Figura 2.8 a instrumentação do sistema MOLLTS. Os dados obtidos por esta monitoração serviram como parâmetros de entrada em um modelo matemático. O modelo deve descrever com um bom grau de precisão o comportamento no domínio do tempo e no domínio da frequência do sinal que corresponde a I_F da linha em estudo.

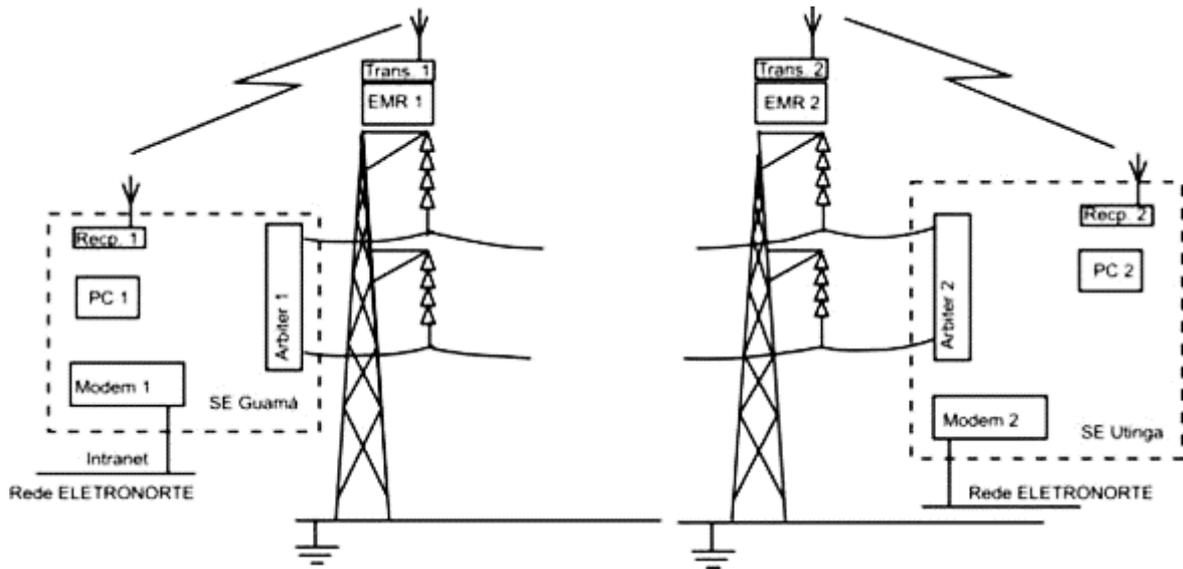


Figura 2.8 - Esquema físico do sistema MOLLTS.

Na aplicação do sistema MOLLTS utilizando a medição indireta da I_F , é possível avaliar as condições de isolamento da LT. A medição direta da I_F é obtida usando a teoria das superfícies fechadas (gaussianas) como se pode visualizar na Figura 2.9. Esta teoria assegura que a soma algébrica das corrente que entram e saem de uma superfície fechada é igual à zero (BUTKOV, 1983). Isto significa que ao monitorar um trecho de LT, pode-se obter sua I_F a partir da soma vetorial das correntes de saída e entrada deste trecho (equação 2.1).

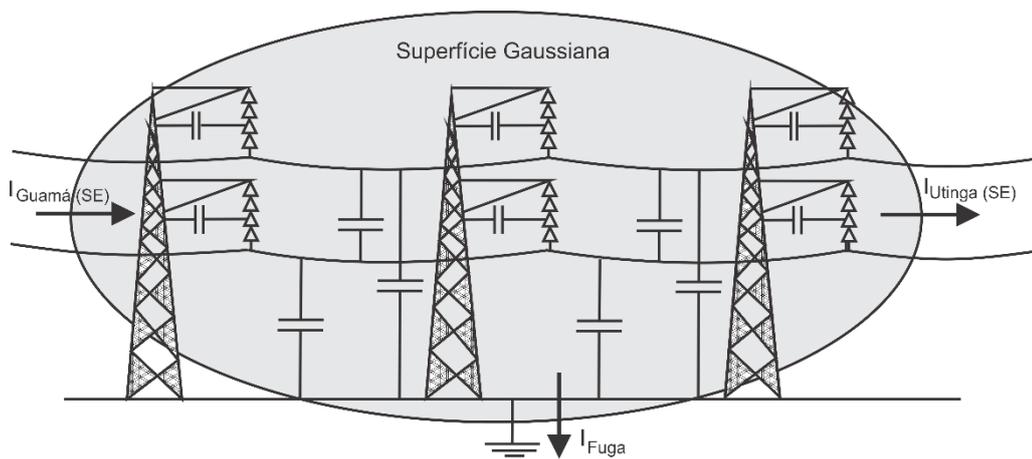


Figura 2.9 – Aplicação do teorema da divergência para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão.

$$\vec{I}_F = \vec{I}_{SE_Guamá} - \vec{I}_{SE_Utinga} \quad (2.1)$$

A linha de transmissão selecionada para monitoração foi a Guamá-Utinga – Miramar, pertencente ao Sistema de Transmissão Tucuruí 230 kV (TUC 86 – 3003R – 5), das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - ELETRONORTE e está representado na Figura 2.10.

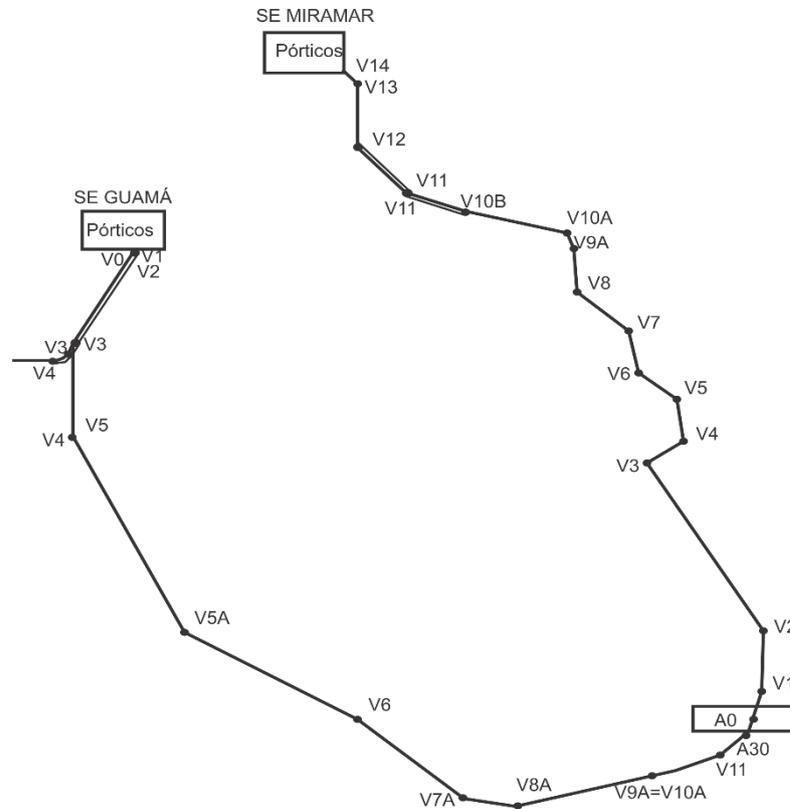


Figura 2.10 – Representação da linha de transmissão monitorada, Trecho Guamá-Utinga - Miramar pertencente à Eletronorte.

No trecho Guamá-Utinga estão instalados um total de 50 torres, com distância média entre elas de 375 m, em um percurso total de aproximadamente 20.000 m .

Para a medição da I_F foram instalados dois medidores de energia modelo 1133A da Arbiter, um na subestação (SE) Guamá e outro na SE Utinga, nas respectivas casas de relé (Figura 2.11). Todos os dados são inseridos na rede da intranet da empresa e podem ser acessados de qualquer terminal remoto dentro da ELETRONORTE. O local escolhido para o recebimento e tratamento dos dados foi a sala Manutenção de Linha, da empresa. Em um computador, nesta sala, está instalado um banco de dados para inserção no modelo matemático, como mostrado na Figura 2.12.

O modelo matemático utilizado, é do tipo caixa-cinza, pois para o cálculo da corrente de fuga utiliza métodos que permitam incorporar algumas equações para representação de fenômenos físicos do sistema. O modelo matemático também utiliza dados reais inseridos

em sua entrada, além da comparação entre os dados de saída do modelo matemático e a resposta medida no sistema.



Figura 2.11 – Equipamento para coleta de dados elétricos. Analisador de Energia instalados nas SE.



Figura 2.12 – Vista do local selecionado para composição do banco de dados (dados ambientais e elétricos), para tratamento.

2.8 PROPOSTA DA METODOLOGIA DE DETECÇÃO DE FALHAS DE LT

Existem métodos de detecção em tempo real de faltas em LTs, que analisam a tensão e a corrente de linha, observando a fase entre elas para a localização de faltas (HEGGIE; GRAEME, 2001). Outras metodologias analisam as características dos fasores tensão e corrente para fazer a estimativa do estado das linhas de transmissão (ZIMA REAHTANZ, 2005). Existem ainda alguns métodos que analisam amostras temporais da tensão e da corrente para medir a impedância da linha de transmissão e possibilitar o uso de sistemas de estimação do local das falhas (BACHMANN, 2002). Esses métodos, contudo, não têm o poder de estimar o estado de isolamento da linha de transmissão e nem prever uma falha.

Por outro lado, trabalhos como o de Suda (2001) observam a mudança no comportamento da I_F na ocorrência de flashover em isoladores. Neste trabalho do Suda (2001) foi estabelecido um método para monitoramento de contaminação de isoladores, tendo como base o estudo a corrente de fuga no isolador. O isolador foi poluído artificialmente e aplicado em suas extremidades tensões elétricas para simular a ação destes isoladores em uma linha de transmissão. Os principais resultados desse experimento foram o aparecimento de baixa simetria na formas de onda de I_F ao ocorrer arcos locais. Aumento na magnitude das harmônicas ímpares. Além disso, foi verificado o surgimento de estágios bastantes distintos até a inutilização do isolador poluído. Além da existência de um limiar pelo qual a ocorrência de descarga destrutiva (flashover) pode ser previsto.

Outros trabalhos como o de Zhicheng (1994) e Douar (2010), verificaram que através da decomposição harmônica da I_F em isoladores contaminados, há um nível máximo de magnitude para determinadas frequências, e que estas sinalizam o mau funcionamento da isolação.

Kanashiro (1996) incluiu em seu artigo os efeitos climáticos somados a poluição marinha e industrial. Apresenta os resultados de um projeto de pesquisa considerando as linhas de distribuição de 13,8 kV e LT de 88 kV. As medições da I_F foram realizadas no campo. Os testes foram realizados e registrados em laboratório. Várias correlações foram realizadas com as medições de: I_F , as condições climáticas e da quantidade do poluentes na superfície de isoladores. Níveis admissíveis da I_F foram analisados por LTs.

Nestes últimos estudos é constatado que a monitoração das condições de isolamento ou de funcionamento de uma LT pode ser realizada através da observação da I_F .

O presente trabalho utiliza um método baseado em modelo, para o cálculo e análise do comportamento da I_F . Para isso, utilizou-se um modelo para ser empregados na FDI e desta maneira possibilitar o desenvolvimento de uma metodologia de manutenção preditiva e automática em LTs. Esta pesquisa apresenta uma sistematização com o modelo adequado que permita a detecção e diagnóstico de falhas em LT. Por meio da análise da I_F , é proposto um novo indicador do estado de funcionamento da LT capaz de caracterizar o funcionamento normal e os modos de falha de uma LT.

Outro aspecto que é influenciado pelo desgaste natural de uma LT é a diminuição capacidade de carregamento e, portanto, a diminuição do retorno financeiro da LT. Atualmente este desgaste da linha é estimado. Com a caracterização das condições de funcionamento da linha poder-se-á considerar, no cálculo financeiro da remuneração de uma LT, o seu desgaste real.

2.9 OBTENÇÃO DA CORRENTE DE FUGA ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO

As linhas de transmissão podem ser modeladas de muitas formas, dependendo de suas peculiaridades (geometria, isolamento, cabeamento, etc.) e da eficiência requerida. Os modelos a parâmetros concentrados são os mais utilizados na modelagem de linha de transmissão, este é representado por elementos concentrados, usualmente em uma conexão cascata de seções π (PI), cujos valores dos parâmetros são calculados para uma determinada frequência.

Na Figura 2.13 é representado um trecho de uma LT com seus parâmetros resistência, indutância e capacitância, em uma seção π . (GOMES Jr, 2007)

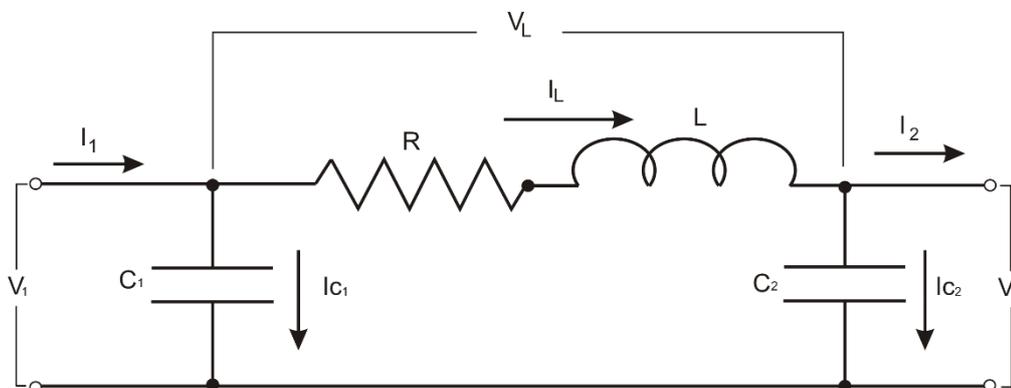


Figura 2.13 – Modelo matemático de um trecho da linha de transmissão.

A I_F está vinculada à teoria das superfícies gaussianas - superfícies fechadas, porém a determinação teórica (calculada pelo modelo) da I_F é motivada pela corrente nas capacitâncias surgidas através dos isoladores e pelo efeito da terra, isto devido à existência de capacitâncias intrínsecas na linha, entre a linha e a torre (através dos isoladores), entre as fases da LT (simplesmente pela LT estar carregada) e entre as fases e a terra (como se fosse um imenso capacitor, com uma das placas na Terra e a outra na própria LT), como mostrado na Figura 2.14, seguinte.

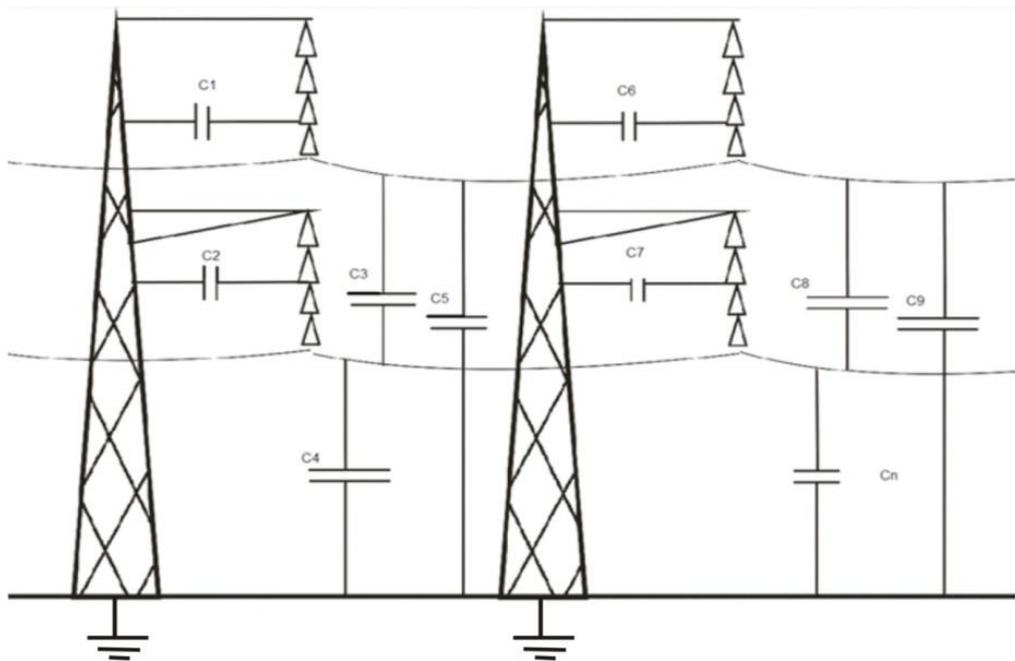


Figura 2.14 – Representação das capacitâncias intrínsecas da linha, em seus isoladores, entre fases e entre fase e terra.

Neste caso, a I_F teórica determinada pelo modelo é a soma de todas as capacitâncias provenientes do sistema de isolamento e da própria linha com a terra. Pode-se então afirmar que a I_F teórica fasorial, como está mostrada na Figura 2.14, corresponde à Equação 2.2.

$$I_F = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + \dots + I_{Cn} \quad (2.2)$$

Para um melhor entendimento, na Figura 2.15 é mostrado o modelo por meio um diagrama de blocos, em que uma LT é dividida em n trechos, em que cada trecho possui sua contribuição para o cálculo da I_F .

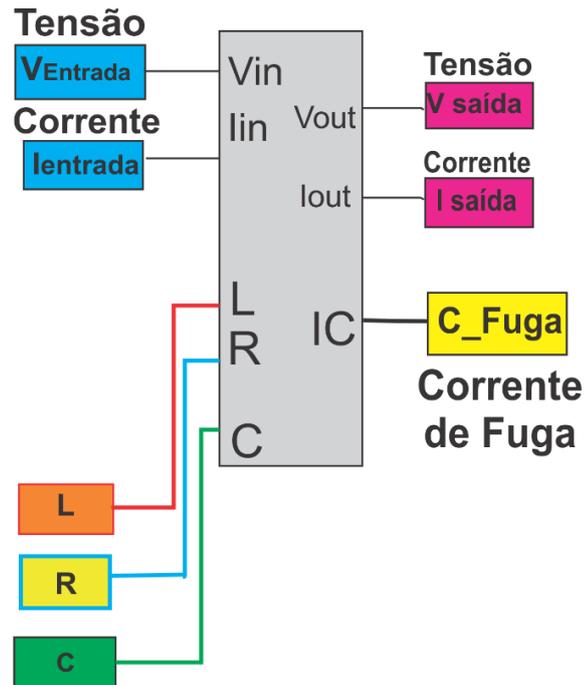


Figura 2.15 - Diagrama de blocos para cálculo da I_F da LT.

É importante destacar que as metodologias para determinação das I_F medida e calculada (modelo), são diferentes, porém para validação do modelo matemático, o resultado final deve implicar necessariamente um nível de erro baixíssimo na comparação entre as duas I_F .

2.10 CONCLUSÃO

O modelo matemático empregado pode ser classificado como baseado em leis físicas e dados (caixa cinza) linearizado no domínio da frequência. O sistema de monitoração proposto apresenta vantagens, pois utiliza analisadores nos extremos do trecho monitorado, dispensando a instalação de sensores ao longo da LT. A instalação de sensores ao longo da linha implica na mobilização de equipe do pessoal de manutenção de linhas, além da necessidade da fiscalização para o funcionamento contínuo destes sensores. Os analisadores são instalados nas subestações, portanto livre de vandalismo.

Uma manutenção mais eficiente deve empregar técnicas preditivas que se caracterizam pela monitoração em tempo real. As técnicas preditivas verificam o estado de funcionamento empregando modelos de funcionamento normal para a detecção de falhas e modelos de falha para o diagnóstico a ser empregado no FDI (*Fault Detection and Isolation*). A técnica selecionada para detecção do estado de funcionamento da linha de transmissão foi o

baseado em modelos matemáticos. Daí a necessidade de ser um modelo matemático preciso e confiável.

CAPÍTULO 3.0 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica estão se tornando cada vez mais interconectados, dessa forma aumentando a complexidade da malha de transmissão. Isto possibilita o surgimento de diversos fenômenos atípicos em termos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos (sobretensões e sobrecorrentes). Alguns fenômenos de caráter meteorológicos, como ponto de orvalho e aumento no intensidades de chuva, também podem influenciar no surgimento de fenômenos atípicos para a linha. É necessário, então, uma otimização elétrica e de baixo custo do sistema de transmissão, e um aumento do nível de detalhamento dos componentes envolvidos (LIMA et al., 2002). Daí a necessidade de ter sistemas de monitoração que possam detectar, localizar e diagnosticar eficientemente. Mas para isso é necessário modelos matemáticos mais fidedignos, que representem com mais veracidade os fenômenos selecionados (elétricos e meteorológicos) e contemple essa nova gama de informação.

O estudo dos transitórios de origem eletromagnética nos sistemas elétricos de potência, geralmente, utiliza modelos matemáticos com parâmetros distribuídos das LTs. Estes transitórios são funções do tempo e da posição na LT. Por isso tomam a forma de ondas viajantes. Os transitórios eletromagnéticos são caracterizados pelo tempo de trânsito e impedância de surto. Estes parâmetros, quando se considera na análise o "caminho para terra", são variáveis com a frequência (CARSON, 1926). Daí decorreria, naturalmente, o interesse em se usar a frequência como variável independente na modelagem das LTs. No entanto, quase todos os outros aspectos no estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência são mais facilmente formulados quando o tempo é a variável independente. São casos típicos de modelos no domínio do tempo, as não linearidades envolvendo ramos de magnetização de transformadores, para-raios, etc. Isto sugere então, o uso integrado de recursos das formulações no domínio da frequência e no domínio do tempo (NETO, 1990).

Devido às suas peculiaridades, as LTs podem ser modeladas de diferentes formas, de acordo com a precisão e a eficiência necessária (MARTINEZ; GUSTAVSEN, 2001), ou seja, podem ser modeladas quanto à natureza distribuída de seus parâmetros ou quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência.

3.1 MODELOS QUANTO À DISTRIBUIÇÃO DE SEUS PARÂMETROS

Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as LTs podem ser representadas por:

- **Modelos a parâmetros concentrados:** a LT é representada por elementos concentrados, usualmente em uma conexão cascata de seções π (PI), cujos valores são calculados para uma determinada frequência;
- **Modelos a parâmetros distribuídos:** a natureza distribuída dos parâmetros é levada em consideração através do princípio da propagação de ondas. Assim, um distúrbio se propaga, e está sujeito a atenuações até ser refletido nos terminais da linha, existindo um atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos.

3.2 MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência, distinguem-se duas classes de modelos de LTs:

- **Modelos a parâmetros constantes na frequência:** a dependência da frequência dos parâmetros da linha é desprezada;
- **Modelos a parâmetros dependentes da frequência:** representam com maior precisão o fenômeno físico da propagação de ondas, pois consideram os efeitos da frequência sobre seus parâmetros.

Podem-se modelar as LTs polifásicas, tanto no domínio modal ou no domínio de fases.

3.3 MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO MODAL

Modelos no domínio modal fazem uso da técnica da transformação modal (WEDEPOHL, 1963). Através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha, as n fases de uma linha polifásica podem ser desacopladas em n linhas monofásicas independentes. São modelos de grande utilização, embora no atual estágio de desenvolvimento não possam ser utilizados com a mesma precisão para todos os tipos e configurações de linhas. São bastante precisos, no caso de LTs aéreas simétricas (TAVARES

et.al, 1999), mas perdem em precisão, quando aplicados a linhas aéreas com alto grau de assimetria, linhas em configurações de circuitos múltiplos e cabos subterrâneos (MARCANO, 1997; MORCHED, 1999; GUSTAVSEN, 1998a).

Estes modelos utilizam uma transformação linear, denominada transformação modal, consegue-se uma representação equivalente do sistema através de três variáveis independentes (NAIDU, 1985). Esta transformação mapeia o sistema trifásico, em três sistemas monofásicos equivalentes denominados: modo Zero (0), modo um (1) e modo dois (2). É calculada então uma matriz de transformação modal que pode ser obtida a partir de cálculo dos parâmetros de linha. A transformação efetuada tem ainda a propriedade de lançar os efeitos de variação de parâmetros com a frequência devido aos efeitos de terra na representação do modo 0, gerando os modos 1 e 2 semelhantes a condutores isolados.

Desta forma, o cálculo de transitórios nas LTs trifásicas é feito a partir de vetores de corrente e tensão em componentes de fase. Faz-se então uma transformação modal sobre estas variáveis de entrada obtendo-se três modos de propagação desacoplada. A análise agora é feita pela aplicação desta entrada, em componentes modais na linha de transmissão também modelada em componentes modais. À resposta obtida, aplica-se uma transformação inversa obtendo-se os resultados em componentes de fase. A interação da linha com os elementos concentrados do sistema se dará em componentes de fase.

Assim, a análise das linhas trifásicas é feita exatamente como a análise de três linhas monofásicas desacopladas, duas das quais praticamente não têm variação de parâmetros com a frequência (NETO, 1990).

3.4 MODELOS COM PARÂMETROS NO DOMÍNIO DA FASE

Visa obter um modelo sem restrições quanto à geometria ou natureza das linhas de transmissão, trabalhos propõem modelar linha de transmissão diretamente no domínio de fases (MORCHED, 1999; NODA, ET AL.1997; NGUYEN, ET AL.1997).

A ideia principal é determinar o comportamento dinâmico da linha diretamente no domínio de fases, evitando a transição para o domínio modal durante a simulação no tempo. Estes modelos têm despertado muito interesse e têm se mostrado precisos quando os modelos modais (convencionais) se mostram limitados. A extensão da técnica de modelagem para linha trifásica (que é geralmente o caso dos sistemas de energia elétrica), não é direta, pois existe

um acoplamento entre as fases e, conseqüentemente, uma interdependência entre as três ondas viajantes.

3.5 MODELO ELETROMAGNÉTICO

O modelo eletromagnético é um dos mais completos da literatura sobre linhas de transmissão. Contudo, na teoria eletromagnética ou teoria de campos se lida com os campos vetoriais (\vec{E} , \vec{B} , \vec{D} , \vec{H} e \vec{J}) ¹ e seus valores em função da posição e do meio em que atuam (WATAGUIN, 1973, p.125). A teoria eletromagnética está toda baseada nas conhecidas equações de Maxwell e nas chamadas relações constitutivas, a seguir (ver Tabela 3.1):

Tabela 3.1 Relações constitutivas (SHADIKU, 1978)

$\vec{J} = \sigma \vec{E}$
$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
$\vec{B} = \mu \vec{H}$

As constantes elétricas σ , ϵ , e μ são denominadas, respectivamente, de resistividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética do meio. A unidade dimensional de σ é Ω/m (ohm por metro), de ϵ é F/m , (farad por metro) e de μ é H/m (henry por metro). O termo “constante” embora corriqueiro, não é apropriado, pois ϵ e μ não são constantes propriamente ditas e sim campos escalares definidos em regiões de R^3 . Apenas no vácuo elas são constantes e coincidem numérica e dimensionalmente com σ_0 , ϵ_0 e μ_0 , respectivamente.

As equações de Maxwell de 3.1 a 3.4 são muito gerais para as aplicações tecnológicas do eletromagnetismo. A razão disto é que as propriedades elétricas e magnéticas dos meios ainda não se fazem transparecer nestas equações. São exatamente as propriedades intrínsecas do meio o elo entre os campos microscópicos \vec{E} e \vec{B} , e ainda, os campos macroscópicos \vec{D} e \vec{H} . O inter-relacionamento entre estes campos se faz por intermédio de relações chamadas constitutivas e obviamente elas dependem das características elétricas e magnéticas de cada meio. Em muitos casos de interesse prático, os meios se comportam como meios simples. É o caso, por exemplo, dos meios geológicos (ENDERS; TREITEL, 1977).

¹ \vec{E} - Campo Elétrico; \vec{B} - Densidade de Fluxo Magnético; \vec{D} - Densidade de Fluxo Elétrico; \vec{H} - Campo Magnético; \vec{J} - Corrente de Condução.

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad \text{Lei de Indução de Faraday} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{Forma diferencial da lei de Coulomb} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{Lei de Ampère} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Dipolo Magnético} \quad (3.4)$$

Esses dois conjuntos de equações são responsáveis pela união dos estudos dos fenômenos elétricos e magnéticos.

3.6 MODELO CONSIDERANDO O EFEITO DA FREQUÊNCIA SOBRE OS PARÂMETROS LONGITUDINAIS

O efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais pode ser sintetizado por meio de uma associação série e paralela de resistores e indutores que substituirão a associação RL série em cada um dos circuitos π (SARTO, 2001). Na Figura 3.1 é mostrado um circuito π de uma cascata que representa uma linha cuja influência da frequência é levada em consideração (TAVARES, 1999).

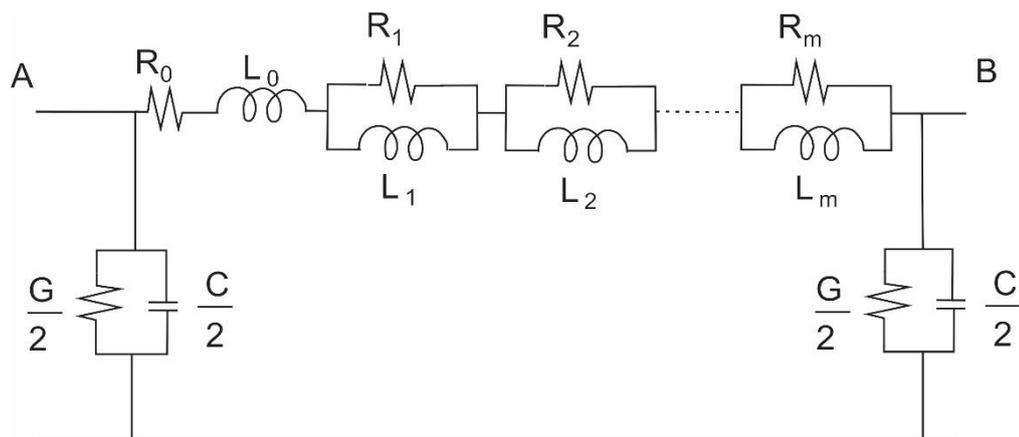


Figura 3.1 – Modelo matemático de linhas de transmissão considerando o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais

Na Figura 3.1, as associações RL paralelas são tantas quantas forem necessárias para representar a variação dos parâmetros em cada década de frequência que será considerada. A cascata de circuitos π , em que a influência da frequência sobre os parâmetros longitudinais é

considerada, pode então ser implementada em programas do tipo “*Electromagnetic Transients Program*” - Programa de Transitórios Eletromagnéticos - (EMTP) que calculam as correntes e tensões ao longo da cascata. Esse modelo de linha pode também ser utilizado para simular transitórios oriundos de operações de manobras e chaveamento (TAVARES, 1999).

No trabalho, Kurokawa (2007) inseriu a influência da frequência nas matrizes de estado que descrevem uma linha de transmissão monofásica. Desse modo, se uma cascata de n circuitos π do tipo mostrado na Figura 3.1 é utilizada para representar uma linha monofásica de comprimento d e se são utilizadas m associações paralela de resistores e indutores para sintetizar a influência da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha, mostra que esta linha pode ser descrita na forma de variáveis de estado.

3.7 ESTADO DA ARTE PARA MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O comportamento de uma linha de transmissão pode ser descrito pelo conjunto de equações diferenciais, mostradas abaixo no domínio da frequência:

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = (R + j\omega L)I \quad (3.5)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = (G + j\omega C)V \quad (3.6)$$

Sendo que V e I são os vetores de tensão e corrente, R e L são as matrizes de impedância série, e G e C são as matrizes da condutância e capacitância em derivação respectivamente; os parâmetros variantes com a frequência são R e L . Desprezando-se o efeito coroa, ou corona, que afeta a admitância em derivação, as Equações (3.5) e (3.6) se tornam essencialmente lineares e podem ser resolvidas tanto em programas cuja solução é operada no domínio do tempo ou no domínio da frequência (LIMA; PEREIRA, 2001).

A solução das equações (3.5) e (3.6) lida com funções transcendentais, sendo a solução geral no domínio da frequência dado por:

$$V(\omega, x) = e^{-\Gamma x}V_f(\omega) + e^{\Gamma x}V_b(\omega) \quad (3.7.a)$$

$$I(\omega, x) = Y_C(\omega)[e^{-\Gamma x}V_f(\omega) - e^{\Gamma x}V_b(\omega)] \quad (3.7.b)$$

Sendo $V_f(\omega)$ e $V_b(\omega)$ vetores com as ondas propagantes no sentido progressivo (“*forward*”) e regressivo (“*backward*”); $e^{-\Gamma(\omega)x}$ é a matriz de propagação, e $Y_C(\omega)$ é a matriz da admitância característica.

A mesma metodologia é a base dos modelos no domínio de fases, só que nas simulações no tempo as grandezas são determinadas diretamente em coordenadas de fases, sem a transição entre os domínios modal e de fases (FERNANDES; 2001a, 2001b).

Dentre os programas EMTP, o programa “*ElectroMagnetic Transients including DC*” - Transitórios Eletromagnéticos incluindo DC - (EMTDC) de Manitoba (2002) disponibiliza um modelo de LTs no domínio de fases, denominado modelo universal (*Universal Model*), conforme proposto por Morched (1999). Do programa “*Alternative Transient Program*” (ATP) (NODA et al, 1997) também disponibiliza um modelo de LT no domínio de fases, denominado modelo “*Interpolated Auto Regressive Moving Average*” (IARMA), conforme proposto por Noda et al. (1996).

Dentre os diversos modelos de LTs desenvolvidos ao longo dos anos, o modelo modal proposto por Martí (1982) se destaca por ter fundamentado uma metodologia, na qual a linha de transmissão é completamente caracterizada no domínio da frequência pela admitância característica $Y_C(j\omega)$, e pelo fator de propagação $A(j\omega)$, estando implementado nos principais programas tipo EMTP.

A seguir são detalhados os principais aspectos dos modelos de LTs, amplamente estudados.

3.8 MODELAGENS MAIS UTILIZADAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

No ATP/EMTP existem atualmente quatro modelos com parâmetros distribuídos e um com parâmetros concentrados. Destes quatro, três possuem representação da variação dos parâmetros com a frequência. Dos modelos variantes com a frequência, apenas um é modelado em coordenadas de fase usando a transformada discreta z , sendo que os outros usam a representação modal com a matriz de propagação, e a impedância (ou admitância) característica, implementadas através de funções racionais no domínio de Laplace, limitando o uso destes as configurações simétricas. A seguir são apresentadas suas implementações numéricas.

3.8.1 Modelo π concentrado

O modelo de linha mais simples que pode haver no ATP/EMTP é o modelo ' π ', onde todos os parâmetros são representados de forma concentrada. Para se obter aproximadamente o comportamento de uma linha de transmissão real é necessário o uso de várias seções em série. Tal procedimento é pertinente quando se necessita estudar linhas não transpostas, uma vez que não se faz necessário o uso de aproximações para a matriz de transformação, como usado no caso da linha de parâmetros constantes e distribuídos. Para LTs em sistemas de sub-transmissão ou até distribuição a representação por π é a mais usada.

Uma opção para a representação da dependência da frequência é o uso de circuito tipo escada (RL em paralelo) para modelar a variação da impedância série da linha (aumento da resistência e diminuição da indutância). Este tipo de modelagem foi apresentado em Tavares (1999), usando transformadores ideais para montar a matriz de transformação entre as coordenadas de fase e o domínio modal. Vale notar que o uso de transformadores ideais implica no uso de uma matriz de transformação constante e real, hipótese que se torna irreal para algumas faixas de frequências (LIMA; PEREIRA, 2001).

3.8.2 Modelagem Modal

Modelos modais de LTs foram implementados em diversos programas tipo EMTP. Estes modelos, da forma que se apresentam hoje, fazem uso de matrizes de transformação reais e constantes na frequência, visando evitar convoluções numéricas, nas transições entre os domínios; modal e de fases, reduzindo assim o tempo de execução em cálculos de transitórios eletromagnéticos, em sistemas polifásicos.

Os modelos modais são bastante precisos para linhas simétricas (MORCHED et. al. 1999), mas se mostram limitados para linhas assimétricas, com circuitos múltiplos e cabos subterrâneos, pois nestes casos a matriz transformação modal pode se mostrar bastante dependente da frequência Gustavsen (1998a). Os elementos da matriz transformação podem ser aproximados por funções racionais no plano s , dando origem a convoluções adicionais durante a simulação no tempo (GUSTAVSEN, 1998b) e (MARTÍ, 1982). Para tanto, estes elementos devem ser contínuos em toda a faixa de frequência sem qualquer descontinuidade.

No EMTP tradicionalmente a dependência com a frequência é elaborada no domínio modal. A transformação modal transforma um sistema acoplado com uma matriz $n \times n$ em sistemas desacoplados com n matrizes diagonais. Com isto cada modo tem a sua velocidade de propagação e comporta-se como se fosse uma linha monofásica, o que torna esta modelagem especialmente atrativa quanto à dependência da frequência da matriz de propagação e da impedância (ou admitância) característica, representados via síntese por funções racionais.

Os modos são os autovalores dos sistemas de equações que descrevem o comportamento da linha de transmissão, e a matriz de transformação é um conjunto linearmente independente dos autovalores desse mesmo sistema. Ou seja, a matriz de transformação deveria ser uma para a tensão e outra para corrente. Contudo, como os autovalores são os mesmos, tanto para tensão quanto para a corrente, a matriz de transformação da tensão é a transposta da matriz de transformação da corrente (LIMA, 2001).

3.8.3 Modelagem em Coordenadas de Fase

As LTs também podem ser modeladas diretamente no domínio de fases (MORCHED et al. 1999) e (NODA et al.1997). As simulações são realizadas diretamente em coordenadas de fases e a teoria de autovalores e autovetores é utilizada apenas como uma ferramenta matemática para calcular $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$.

A implementação da dependência da frequência da matriz de transformação, necessária para obtenção de um modelo mais preciso, é computacionalmente complicada e pesada, pois pode haver o cruzamento de modos em algumas frequências, o que dificulta um ajuste muito preciso.

Uma implementação de matrizes de transformação variáveis na frequência, supondo que todas as variáveis envolvidas são representáveis por funções de mínima fase foi apresentada por Martí (1982). Contudo, para configurações muito assimétricas, como cabos subterrâneos, por exemplo, há situações onde surgem funções de fase não mínima no domínio modal. Além do mais, a vantagem numérica da representação modal, se comparada com a representação em fase, se perde com a inclusão de uma matriz de transformação variante com a frequência. Para um sistema com n condutores ambos os métodos necessitam de $2n^2$ operações de convolução. Portanto, a solução em coordenadas de fase passa a ser interessante (LIMA, 2001).

Contudo, os parâmetros de uma linha aérea polifásica são calculados a partir da geometria da linha e dos dados dos condutores e da resistividade do solo. A resistência R (em Ω/km) e a indutância L (em H/km) são dependentes da frequência, e podem ser calculados a partir dos dados intrínsecos dos condutores, de sua disposição e das características do retorno pelo solo. A capacitância C (em F/km) por sua vez, é constante na frequência e depende exclusivamente da geometria da linha. Em programas do tipo EMTP, a condutância em derivação G (em S/km) é representada por uma matriz diagonal cujos elementos são definidos por valores padrões, sendo permitido ao usuário alterá-los (FERNANDES, 2001a).

Para uma linha polifásica pode-se escrever:

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= Z_{i-int}(\omega) + Z_{ext}(\omega) + Z_{solo}(\omega) \\ Y(\omega) &= Y_{ext}(\omega) \end{aligned} \quad (3.8)$$

sendo:

$Z(\omega) = R(\omega) + j \cdot \omega \cdot L(\omega)$, a matriz impedância série (em Ω/km);

$Y(\omega) = G + j \cdot \omega \cdot C$, a matriz admitância em derivação (em S/km);

$Z_{i-int}(\omega)$ - a impedância intrínseca dos condutores;

$Z_{ext}(\omega)$ - a impedância devida à geometria;

$Z_{solo}(\omega)$ - a impedância do retorno pelo solo (todas em Ω/km);

$Y_{ext}(\omega)$ - a admitância devida à geometria (em S/km).

No domínio da frequência, para uma linha de transmissão com n condutores, os vetores de tensões $E(\omega)$ e correntes $I(\omega)$ terminais, devem obedecer às seguintes equações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E(\omega)}{\partial x^2} &= Z(\omega) \cdot Y(\omega) \cdot E(\omega) \\ \frac{\partial^2 I(\omega)}{\partial x^2} &= Z(\omega) \cdot Y(\omega) \cdot I(\omega) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Em que $Z(\omega)$ e $Y(\omega)$, são matrizes cheias.

Nos modelos no domínio modal, as n equações acopladas em (3.9) são transformadas em n equações desacopladas e resolvidas como se fossem n linhas monofásicas

(WEDEPOHL, 1963). Isto pode ser feito através da matriz transformação $T(\omega)$, que diagonaliza a matriz produto $Y(\omega) \times Z(\omega)$ em cada frequência:

$$T^{-1}(\omega).Y(\omega).Z(\omega).T(\omega) = \lambda(\omega) \quad (3.10)$$

Sendo $\lambda(\omega)$ a matriz diagonal de autovalores e $T(\omega)$ a matriz cujas colunas são os auto-vetores de $Y(\omega) \times Z(\omega)$ (GOLUB, 1996). Assim, usando $T(\omega)$, as matrizes diagonais da admitância característica modal $Y_{C_{mod}}(\omega)$ e do fator de propagação modal $A_{mod}(\omega)$ podem ser calculadas.

Nos modelos no domínio de fases, a solução de (3.10) é calculada diretamente no domínio de fases, pelas equações de 3.11:

$$Y_C(\omega).E_k(\omega) - I_{km}(\omega) = [Y_C(\omega).E_m(\omega) + I_{mk}(\omega)].A(\omega) \quad (3.11.a)$$

$$Y_C(\omega).E_m(\omega) - I_{mk}(\omega) = [Y_C(\omega).E_k(\omega) + I_{km}(\omega)].A(\omega) \quad (3.11.b)$$

sendo

$$Y_C(\omega) = \sqrt{Y(\omega).Z(\omega)}.Z(\omega)^{-1} e \quad (3.12)$$

$$A(\omega) = e^{-\sqrt{Y(\omega).Z(\omega)}.d} \quad (3.13)$$

Em que $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$ são as matrizes cheias da admitância característica e o fator de propagação, respectivamente, além de k e m os índices das matrizes em questão. Os termos a esquerda de (3.12) e (3.13), podem ser calculados a partir dos parâmetros modais (FERNANDES, 2001a):

$$\begin{aligned} Y_C(\omega) &= T(\omega).Y_{C_{mod}}(\omega).T^{-1}(\omega) \\ A(\omega) &= T(\omega).A_{mod}(\omega).T^{-1}(\omega) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Observa-se em (3.14) que uma forte dependência da frequência de $T(\omega)$ não pode ser aproximada por uma matriz constante sem afetar $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$. Uma rotina para cálculo dos parâmetros de linhas na qual as condutâncias em derivação são levadas em consideração foi implementada por Lima (2002). O programa também calcula $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$ nos domínios, modal e de fase. A matriz transformação $T(\omega)$ é calculada fazendo-se uso do 'método de

Newton-Raphson', de forma similar ao proposto em Wedepohl (1996), para eliminar possíveis descontinuidades nos autovetores. Uma rotina que faz uso do 'método de Levenberg-Marquardt', foi implementada para calcular os ângulos de fase de $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$ no domínio de fases (FERNANDES, 2001).

3.8.4 Modelo Universal

Outro modelo de linha de transmissão no domínio de fases é denominado de modelo universal (*Universal Model*) apresentado por Morched (1999). Esse modelo faz uso do método de ajuste vetorial Gustavsen (1999), para obter aproximações racionais para $Y_C(j\omega)$ e $A(j\omega)$ no domínio de fases. Inicialmente a matriz fator de propagação no domínio modal é aproximada por funções racionais, na forma expressa:

$$A_{mod-i}(j\omega) \cong P_i(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_i} \quad (3.15)$$

Sendo que, $A_{mod-i}(j\omega) = e^{-\alpha_i(j\omega) \cdot d} \cdot e^{-j\beta_i(j\omega) \cdot d}$, modo i do fator de propagação, com módulo ($e^{-\alpha_i(j\omega) \cdot d}$) e fase ($e^{-j\beta_i(j\omega) \cdot d}$) na frequência ω ; $P_i(j\omega)$ = função polinomial racional de fase mínima; τ_i - tempo de propagação (ou de trânsito) da mais veloz componente de frequência do modo i . Sendo o processo de ajuste vetorial um método linear, não é capaz de levar em consideração o tempo de trânsito em (3.15) como uma variável do processo de ajuste. Desse modo, é necessária a determinação do tempo de trânsito em uma etapa anterior ao processo de ajuste para cada um dos i modos do fator de propagação. Uma vez calculados os tempos de propagação de cada modo i , as rotações de fase devidas a estes são extraídas, a partir da expressão:

$$e_i^{+s\tau} \cdot A_{mod-i}(s) \cong \sum_{m=1}^N \frac{c_m}{s-p_m}, \text{ para } s = j \cdot \omega \quad (3.16)$$

sendo,

c_m - resíduos da função racional aproximada para o modo i

p_m - pólos da função racional aproximada para o modo i .

No intuito de tornar o modelo mais eficiente são agrupados os modos com os tempos de propagação (MORCHED, 1999). Este artifício reduz o número de convoluções no tempo, contribuindo com um ganho em eficiência computacional. Os modos para os quais o

critério em (3.17) é satisfeito são agrupados sob um tempo de trânsito comum τ^* (igual ao menor tempo de trânsito individual entre os modos agrupados), o que pode ser expresso por:

$$\Omega \cdot \Delta\tau_{ij} < 2 \cdot \pi \cdot (10/360) \quad (3.17)$$

sendo,

$\Delta\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j$, diferença entre os tempos de trânsito dos modos i e j .

De posse dos polos calculados no domínio modal, os elementos de $A(j\omega)$ no domínio de fases são calculados de modo a compartilharem de todos os pólos calculados no domínio modal, e assim:

$$A_{ij}(s) = \sum_{k=1}^n \left[\left(\sum_{m=1}^{N_k} \frac{c_{mk-ij}}{s - p_{mk}} \right) \cdot e^{-s \cdot \tau_k} \right] \quad (3.18)$$

Sendo, $A_{ij}(s)$ - elemento (i, j) da matriz $A(s)$ no domínio de fases; p_{mk} - polos da função racional aproximada para o modo k ; τ_k - tempo de trânsito do modo k ; N_k - ordem da aproximação racional para modo k , c_{mk-ij} - resíduo da função racional para o modo k ; n - número de modos (ou grupos, caso haja agrupamento de modos). Nota-se que a cada elemento da matriz fator de propagação está associado n tempos de propagação modal. O compartilhamento de polos contribui para um aumento na eficiência computacional em simulações no domínio do tempo.

Como as aproximações racionais para os n modos $A_{mod-i}(j\omega)$ são obtidas de forma independente, eventualmente, alguns pólos de diferentes modos podem estar muito próximos. Se isto ocorre em baixas frequências, os respectivos resíduos da função racional aproximada no domínio de fases podem ter valores elevados com sinais opostos. Isto pode levar a instabilidade em simulações no tempo. A probabilidade disto ocorrer é proporcional à ordem do ajuste (GUSTAVSEN, 1998a).

Os elementos da admitância característica $Y_C(j\omega)$, por sua vez, são aproximados diretamente no domínio de fases, também compartilhando os mesmos pólos,

$$Y_{c-ij}(s) \cong d_{ij} + \sum_{k=1}^n \frac{c_{k-ij}}{s-p_k}, \text{ para } s = j \cdot \omega \quad (3.19)$$

sendo: $Y_{c-ij}(s)$ - elemento (i,j) da matriz $Y_C(s)$ no domínio de fases. O modelo proposto é disponibilizado em versão recente do programa EMTDC (MANITOBA, 2002).

No modelo no domínio de fase proposto por Fernandes (2001a), as matrizes admitância característica $Y_C(j\omega)$ e fator de propagação $A(j\omega)$ no domínio de fases, são obtidas por:

$$\begin{aligned} Y_C(j\omega) &= T_i(j\omega) \cdot Y_{c-mod}(j\omega) T_i(j\omega)^T \\ A(j\omega) &= T_i(j\omega) \cdot A_{mod}(j\omega) T_i(j\omega)^{-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Ao contrário do usual, a matriz transformação modal é considerada como complexa e dependente da frequência, incluem-se as condutâncias em derivação (FERNANDES, 2001a).

Normalmente, em uma linha de transmissão polifásica com n fases, tem-se n tempos de propagação modais. No modelo computacional desenvolvido por Manitoba (2002), os elementos das matrizes admitância característica e fator de propagação no domínio de fases, são escritos na forma polar (módulo e fase), a partir de (3.20), como é expresso a seguir:

$$Y_{C_{ij}}(j\omega) = |Y_{ij}(j\omega)| \cdot e^{j-\theta_{ij}(j\omega)} \quad (3.21)$$

$$A_{ij}(j\omega) = |A_{ij}(j\omega)| \cdot e^{j-\psi_{ij}(j\omega)} e^{j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (3.22)$$

Sendo: τ - tempo de propagação comum a todos os elementos de $A(j\omega)$.

Uma vez calculados os n tempos de propagação modais, encontra-se o menor tempo de trânsito τ_{mim} , dentre os modos, tal que $\tau_{mim} < \tau_i, i = 1, 2, \dots, n$. Faz-se então $\tau = \tau_{mim}$, e extrai-se o tempo de trânsito mínimo de todos os modos do fator de propagação.

No equacionamento, observa-se que todos os elementos de $A(j\omega)$ têm um tempo de propagação comum e único. Portanto, a fase $\psi_{ij}(j\omega)$ em (3.22) possui uma parcela devido à contribuição da diferença entre os tempos de propagação ($\omega \cdot (\tau_i - \tau)$).

Com o agrupamento de diferentes tempos de propagação no cálculo de $A(j\omega)$ no domínio de fases, é possível associar um único tempo de propagação a todos os elementos dessa matriz. Mesmo para LTs extensas em que há maior diferença entre os tempos de

propagação, essa associação não resulta em funções com oscilações no módulo ou nos ângulos de fase.

Na obtenção desse modelo, todos os elementos das matrizes $Y_C(j\omega)$ e $A(j\omega)$ são sintetizados por funções racionais precisas de baixa ordem, diretamente no domínio de fases, em uma única etapa, fazendo-se uso do método de ajuste vetorial. Destaca-se a possibilidade de se obter funções polinomiais racionais aproximadas para todos os elementos de um vetor ou matriz de uma só vez, o que é um diferencial deste método de ajuste para a aplicação aqui estudada, em que se têm matrizes cheias (domínio de fases). O método de ajuste vetorial possibilita ainda o compartilhamento de polos pelas funções racionais aproximadas, o que contribuiu para uma maior eficiência do modelo na resolução de integrais de convoluções no tempo por métodos recursivos.

A validação do modelo desenvolvido por Fernandes (2001a) se deu na forma de um estudo de casos. Observou-se que o modelo computacional proposto é preciso, eficiente e numericamente estável em simulações no domínio do tempo.

3.8.5 Modelo Considerando Efeito da Frequência sobre os Parâmetros Longitudinais

Considere, conforme mostrado na Figura 3.1, uma linha de transmissão representada por meio de um único circuito π , onde o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais é representado por meio de m associações RL.

Na linha mostrada na Figura 3.1 as tensões nos terminais A e B são $u(t)$ e $v_1(t)$, respectivamente. Considere também que nos indutores $L_0, L_1, L_2, \dots, L_m$ circulam as correntes $i_{10}(t), i_{11}(t), \dots, i_{1m}(t)$, respectivamente.

A partir das correntes e tensões definidas nos elementos do circuito mostrado na Figura 3.1 é possível escrever:

$$\frac{di_{10}}{dt} = \frac{i_{10}}{L_0} \left(- \sum_{j=1}^m R_j \right) + \frac{1}{L_0} \left(\sum_{j=1}^m R_j i_{1j} \right) + \frac{1}{L_0} u(t) - \frac{1}{L_0} v_1(t) \quad (3.23)$$

$$\frac{di_{11}}{dt} = \frac{R_1}{L_1} i_{10} - \frac{R_1}{L_1} i_{11} \quad (3.24)$$

$$\frac{di_{12}}{dt} = \frac{R_2}{L_2} i_{10} - \frac{R_2}{L_2} i_{12} \quad (3.25)$$

$$\frac{di_{1m}}{dt} = \frac{R_m}{L_m} i_{10} - \frac{R_m}{L_m} i_{1m} \quad (3.26)$$

$$\frac{dv_1(t)}{dt} = \frac{2}{C} i_{10} - \frac{G}{C} v_1(t) \quad (3.27)$$

Nas equações de (3.23) até (3.27) os termos i_{10} , i_{11} , ..., i_{1m} , são notações simplificadas para as correntes $i_{10}(t)$, $i_{11}(t)$, ..., $i_{1m}(t)$, respectivamente.

As equações de (3.28) até (3.32) podem ser escritas na forma:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B]u(t) \quad (3.28)$$

Sendo

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{\sum_{j=0}^{j=m} R_j}{L_0} & \frac{R_1}{L_0} & \frac{R_2}{L_0} & \dots & \frac{R_m}{L_0} & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{R_1}{L_1} & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{R_2}{L_2} & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ \frac{R_m}{L_m} & 0 & 0 & \dots & -\frac{R_m}{L_m} & 0 \\ \frac{2}{C} & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{G}{C} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$[B]^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$[X]^T = [i_{10} \quad i_{11} \quad i_{12} \quad \dots \quad i_{1m} \quad v_1(t)] \quad (3.31)$$

$$[\dot{X}] = \frac{d[X]}{dt} = \left[\frac{di_{10}}{dt} \quad \frac{di_{11}}{dt} \quad \frac{di_{12}}{dt} \quad \dots \quad \frac{di_{1m}}{dt} \quad \frac{dv_1(t)}{dt} \right]^T \quad (3.32)$$

Nas equações (3.30) e (3.31) $[B]^T$ e $[X]^T$ correspondem a $[B]$ e $[X]$ transpostos, respectivamente.

Os resultados obtidos mostram que o vetor $[X]$ possui $(m + 2)$ elementos e que a matriz $[A]$ é uma matriz quadrada de ordem $(m + 2)$.

Diversos são os modelos existentes para descrever uma linha de transmissão. A maioria destes descreve com boa precisão uma LT, mas requerem um esforço computacional grande além de não incorporarem efeitos de transitórios nem possibilitarem a alteração de Parâmetros da LT segundo alterações em condições ambientais. A escolha do modelo matemático apropriado está intrinsecamente ligada à necessidade da resolução de um problema específico, além do constante ajuste dos Parâmetros.

3.9 CONCLUSÃO

Para utilização em uma metodologia de FDI, é necessário um modelo matemático com um bom grau de fidelidade no domínio do tempo e da frequência. O estudo dos modelos matemáticos de LTs existentes auxilia na seleção apropriada para o problema que se pretende solucionar. A existência de inúmeras formas de modelagem de uma LT, sinaliza que serão necessários testes com alguns desses modelos, para a seleção final.

CAPÍTULO 4.0 MODELO MATEMÁTICO PARA DETECÇÃO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DA LT

O modelo a ser obtido, através dos estudos apresentados nesta pesquisa, é para ser empregado na detecção do estado de funcionamento de LT através do método baseado em modelos. Por este motivo existe a necessidade de exatidão no cálculo da forma de onda da I_F e em sua Decomposição Harmônica (DCH), geradas pelo modelo matemático.

Este capítulo apresenta a utilização de modelos matemáticos de LT para o cálculo da I_F , tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. É realizada uma evolução dos modelos matemáticos, até chegar-se ao modelo matemático adotado para simular o comportamento da I_F , no domínio do tempo e no domínio da frequência. Os resultados apresentados são comparados com dados obtidos de campo, do trecho Guamá-Utinga (Eletrobrás/Eletronorte) para validação do modelo matemático. É ainda apresentado uma comparação entre configurações diferentes dos blocos de funções e parametrização do modelo matemático.

A validação é apresentada através dos cálculos do Erro Médio Quadrático (MSE - Mean Square Error) e da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE - Root Mean Square Error).

O MSE de um estimador é uma das muitas formas de quantificar a diferença entre os valores implícitos em um estimador e os verdadeiros valores da quantidade que está sendo estimado. O MSE mede a média dos quadrados dos erros. O erro é o montante pelo qual o valor implícito no estimador difere da quantidade a ser estimada. A diferença ocorre devido à aleatoriedade ou porque o estimador não leva em conta as informações que poderiam produzir uma estimativa mais precisa (LEHMANN & CASELLA, 1998).

Para o cálculo do MSE utiliza-se a equação 4.1

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (4.1)$$

Em que,

- n – Número de estimativas;
- i – Índice da estimativa
- \hat{Y}_i – Valor Estimado;
- Y_i – Valor Real

O MSE fornece valores de erro com o quadrado da unidade das medidas.

O RMSE, também quantifica a diferença entre os valores implícitos em um estimador e os verdadeiros valores da quantidade que está sendo estimado. Porém os valores determinados de erro mantêm a mesma unidade da medida. A equação 4.2 é utilizada para o cálculo do RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (4.2)$$

O MSE aceitável é abaixo de 0,05, enquanto que o RMSE deve ser abaixo de 0,3.

4.1 MODELO PI PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO - PRECURSOR

O modelo mais utilizado na representação da LT é o modelo PI, Gomes Jr. (2007) utiliza o modelo PI de parâmetros concentrados para representar um trecho de linha de transmissão, como mostrado na Figura 4.1.

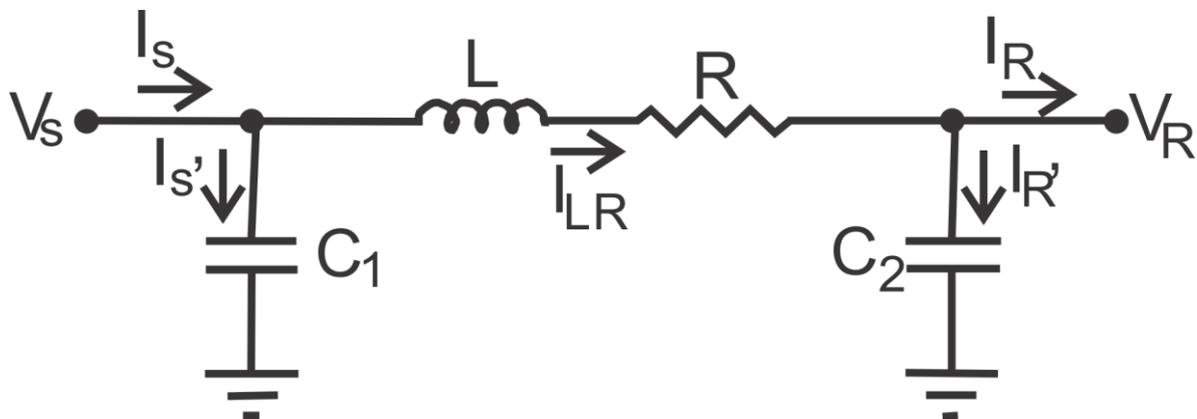


Figura 4.1 –Circuito PI de uma linha de transmissão

Utilizando as leis das malhas e a lei dos nós, é possível obter o seguinte conjunto de equações de 4.3 à 4.8:

- Equações de nó:

$$I_{LR} = I_{R'} + I_2 \quad (4.3)$$

$$I_{S'} = I_S - I_{LR} \quad (4.4)$$

- Equações de Elemento:

$$I_{R'} = C_2 \frac{dV_R}{dt} \quad (4.5)$$

$$V_L = R \cdot I_{LR} + L \frac{dI_{LR}}{dt} \quad (4.6)$$

- Equação da malha:

$$V_S = V_L + V_R \quad (4.7)$$

$$I_F = I_{S'} + I_{R'} \quad (4.8)$$

Os valores dos parâmetros da LT, resistência e indutância, utilizados na simulação numérica, foram obtidos pelo método matricial (FUCHS, 1979), enquanto que o valor de capacitância foi determinado pelo método de diferenças finitas (GOMES Jr, 2007), e correspondem aos seguintes valores:

$$R = 1,0955 \Omega \quad (4.9)$$

$$L = 31,88 \text{ mH} \quad (4.10)$$

$$C = 116,767 \text{ nF} \quad (4.11)$$

Alimentando o modelo com os parâmetros especificados das equações 4.9 à 4.11, obtém-se o comportamento da I_F por intermédio do modelo matemático. Na Figura 4.2 é mostrada uma grande diferença entre os picos da I_F calculada (em cinza) e a I_F medida (em preto).

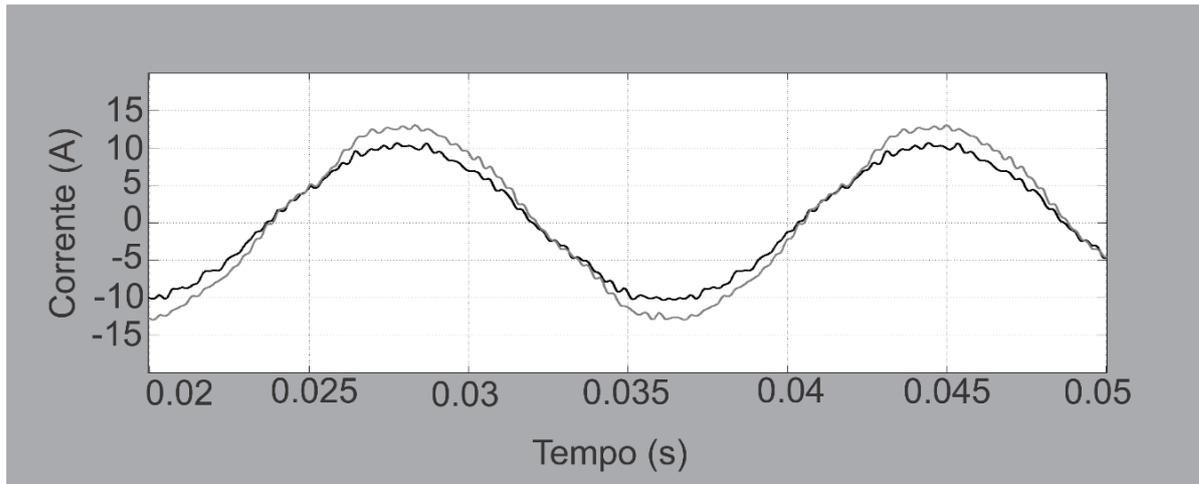


Figura 4.2 – Superposição das formas de onda da I_F medida (Preto) e calculada pelo modelo matemático (Cinza).

Observando inicialmente a amplitude da I_F no domínio do tempo, verificou-se uma grande diferença no valor de pico a pico (p-p) da I_F , de aproximadamente 6 A. Utilizando o MSE tem-se um erro de aproximadamente 4,32 enquanto que o RMSE foi de 2,078 na forma de onda estimada.

Já por meio das Figuras 4.3 e 4.4, é possível visualizar as magnitudes da DCH entre a I_F obtida pelo modelo e a I_F medida em campo.

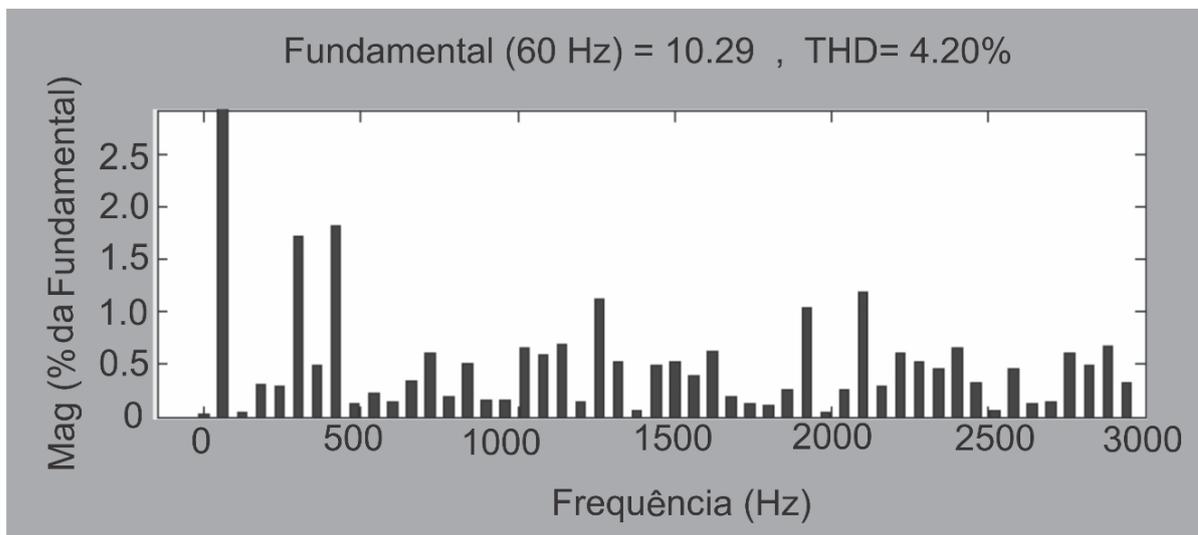


Figura 4.3 - DCH da I_F medida pelos instrumentos instalados nas subestações

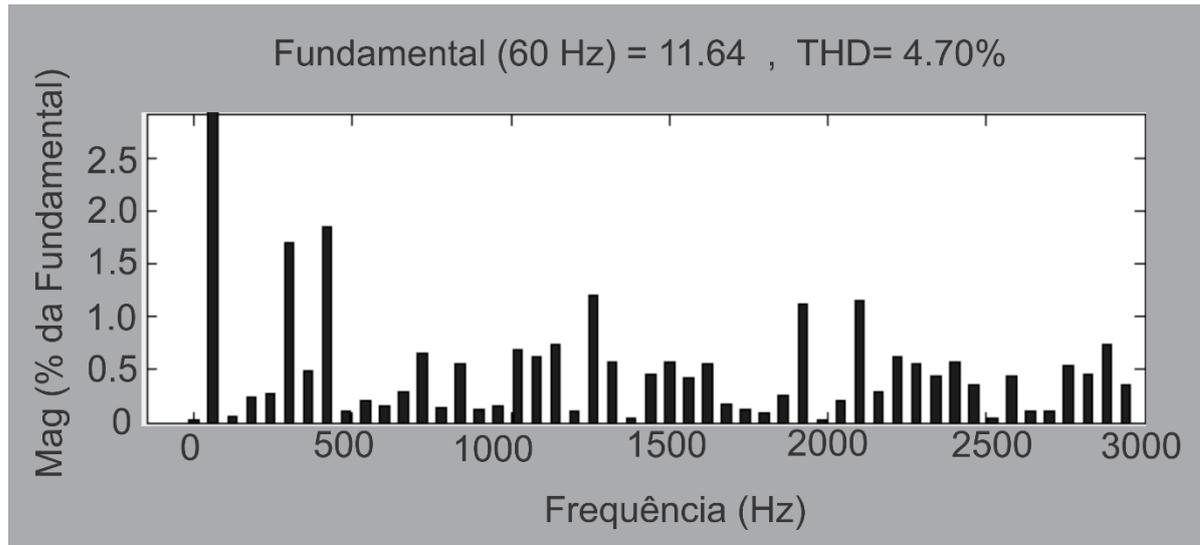


Figura 4.4 - DCH da I_F calculada pelo modelo π .

Na tabela 4.1 são dispostos os valores da DCH da I_F medida em campo. Os valores de DCH da I_F medida, servirão de referência para as próximas comparações, entre DCHs.

Tabela 4.1 – DCH da I_F medida, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,29), junto com o THD = 4,20%.

(DC):	0,02%	(h10):	0,15%	(h20):	0,11%	(h30):	0,1%	(h40):	0,57%
(Fnd):	100%	(h11):	0,3%	(h21):	0,76%	(h31):	0,26%	(h41):	0,36%
(h2):	0,06%	(h12):	0,31%	(h22):	0,19%	(h32):	1,12%	(h42):	0,05%
(h3):	0,24%	(h13):	0,15%	(h23):	0,05%	(h33):	0,03%	(h43):	0,44%
(h4):	0,27%	(h14):	0,21%	(h24):	0,46%	(h34):	0,21%	(h44):	0,11%
(h5):	1,69%	(h15):	0,13%	(h25):	0,15%	(h35):	1,15%	(h45):	0,11%
(h6):	0,49%	(h16):	0,16%	(h26):	0,15%	(h36):	0,29%	(h46):	0,53%
(h7):	1,85%	(h17):	0,39%	(h27):	0,55%	(h37):	0,63%	(h47):	0,46%
(h8):	0,12%	(h18):	0,35%	(h28):	0,17%	(h38):	0,23%	(h48):	0,73%
(h9):	0,2%	(h19):	0,09%	(h29):	0,12%	(h39):	0,44%	(h49):	0,36%

Utilizando o MSE, verificou-se que a diferença nas magnitudes de todas as frequências foi de aproximadamente 0,339, enquanto o RMSE foi de aproximadamente 0,5824, o que representa um erro grande. Tal erro fica mais evidente na tabela 4.2, onde são representados os valores em percentuais da DCH em relação a fundamental (60 Hz). É possível ainda, acompanhar o valor Total de Distorção Harmônica (THD), e ainda a diferença absoluta (Δ) entre o valor estimado (*Est.*) pelo modelo matemático e o valor real, ($\Delta = Estim. - Real$).

Tabela 4.2 –DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 11,64), junto com o THD = 4,70%, além da diferença Δ .

Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ
(DC):	0,02%	0,03%	0,01%	(h17):	0,39%	-0,15%	-0,24%	(h34):	0,21%	0,25%	0,04%
(Fnd):	100%	100,00%	0,00%	(h18):	0,35%	-0,00%	-0,35%	(h35):	1,15%	2,10%	0,95%
(h2):	0,06%	0,08%	0,02%	(h19):	0,09%	0,19%	0,10%	(h36):	0,29%	0,24%	-0,05%
(h3):	0,24%	1,67%	1,43%	(h20):	0,11%	0,09%	-0,02%	(h37):	0,63%	1,54%	0,91%
(h4):	0,27%	0,04%	-0,23%	(h21):	0,76%	0,35%	-0,41%	(h38):	0,23%	0,31%	0,08%
(h5):	1,69%	4,43%	2,74%	(h22):	0,19%	0,04%	-0,15%	(h39):	0,44%	0,38%	-0,06%
(h6):	0,49%	0,16%	-0,33%	(h23):	0,05%	0,16%	0,11%	(h40):	0,57%	0,76%	0,19%
(h7):	1,85%	3,72%	1,87%	(h24):	0,46%	0,33%	-0,13%	(h41):	0,36%	0,34%	-0,02%
(h8):	0,12%	0,24%	0,12%	(h25):	0,15%	0,07%	-0,08%	(h42):	0,05%	0,31%	0,26%
(h9):	0,20%	0,68%	0,48%	(h26):	0,15%	0,10%	-0,05%	(h43):	0,44%	0,67%	0,23%
(h10):	0,15%	0,07%	-0,08%	(h27):	0,55%	0,28%	-0,27%	(h44):	0,11%	0,42%	0,31%
(h11):	0,30%	0,17%	-0,13%	(h28):	0,17%	0,09%	-0,08%	(h45):	0,11%	0,36%	0,25%
(h12):	0,31%	0,08%	-0,23%	(h29):	0,12%	0,32%	0,20%	(h46):	0,53%	0,38%	-0,15%
(h13):	0,15%	0,26%	0,11%	(h30):	0,10%	0,12%	0,02%	(h47):	0,46%	0,65%	0,19%
(h14):	0,21%	0,09%	-0,12%	(h31):	0,26%	0,27%	0,01%	(h48):	0,73%	1,03%	0,30%
(h15):	0,13%	0,03%	-0,10%	(h32):	1,12%	0,50%	-0,62%	(h49):	0,36%	0,77%	0,41%
(h16):	0,16%	0,24%	0,08%	(h33):	0,03%	0,33%	0,30%				

O ajuste dos parâmetros, realizado de maneira empírica, manteve a resposta do modelo matemático. Neste caso, é importante testar outras variações de modelos matemáticos.

4.2 MODELO “Tee” PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Outro modelo bastante utilizado na representação da LT é o modelo “Tee” (FUCHS, 1979). Na Figura 4.5 é apresentado o circuito elétrico equivalente da LT usando este modelo, para parâmetros concentrados.

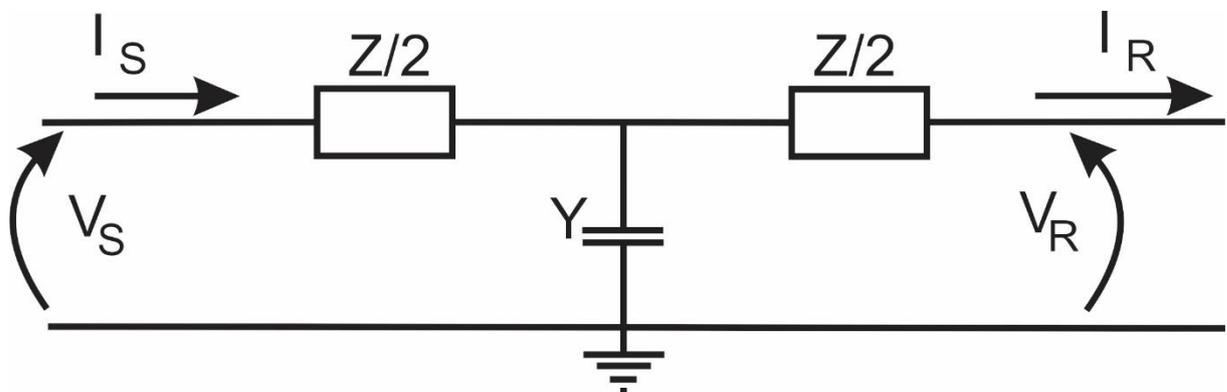


Figura 4.5 –Circuito Tee de uma linha de transmissão

Utilizando as leis das malhas e a lei dos nós, deduz as seguintes equações

- Equações de nó:

$$I_S = I_R + Y \left(V_R + \frac{Z}{2} I_R \right) \quad (4.12)$$

- Equação da malha:

$$V_S - V_R = \frac{Z}{2} I_S + \frac{Z}{2} I_R \quad (4.13)$$

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + \frac{Z}{2} \left(2 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (4.14)$$

Novamente inserindo no modelo os parâmetros especificados das equações de 4.9 à 4.11, obtém-se o comportamento da I_F por intermédio do modelo matemático. Na Figura 4.6 é mostrada a I_F calculada (em cinza) e a I_F medida (em preto).

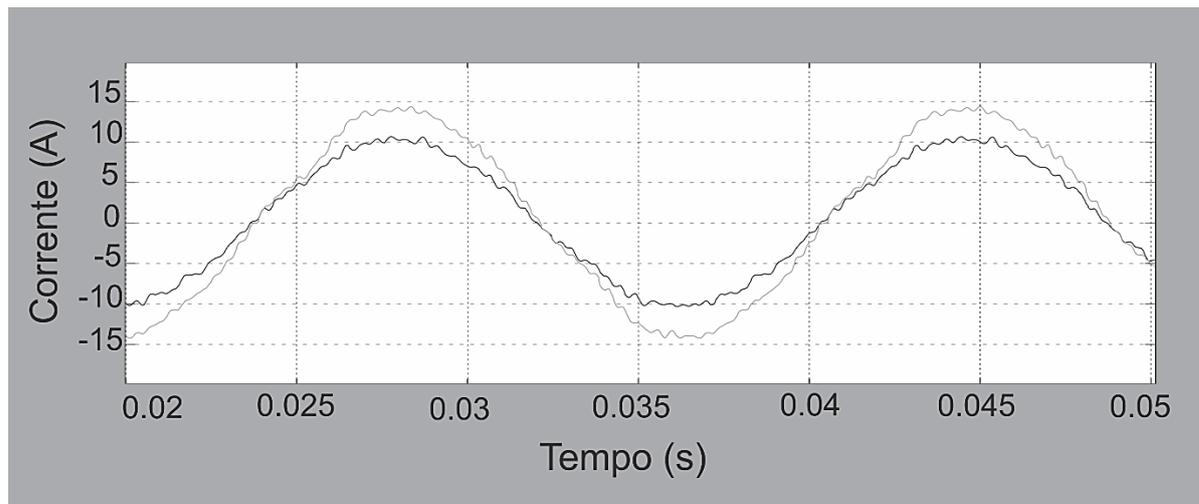


Figura 4.6 – Superposição das formas de onda da I_F medida (preto) e calculada pelo modelo matemático Tee (cinza).

Verificando-se inicialmente a amplitude da I_F no domínio do tempo, observa-se uma grande diferença p-p no valor da I_F , de aproximadamente 7,1 A. Calculando a diferença utilizando novamente o MSE tem-se um erro de aproximadamente 5,88 e o RMSE foi de 2,42 para a forma de onda.

Já por meio da Figura 4.7, é apresentada a DCH para a forma de onda, é possível verificar as magnitudes da DCH da I_F calculada pelo modelo.

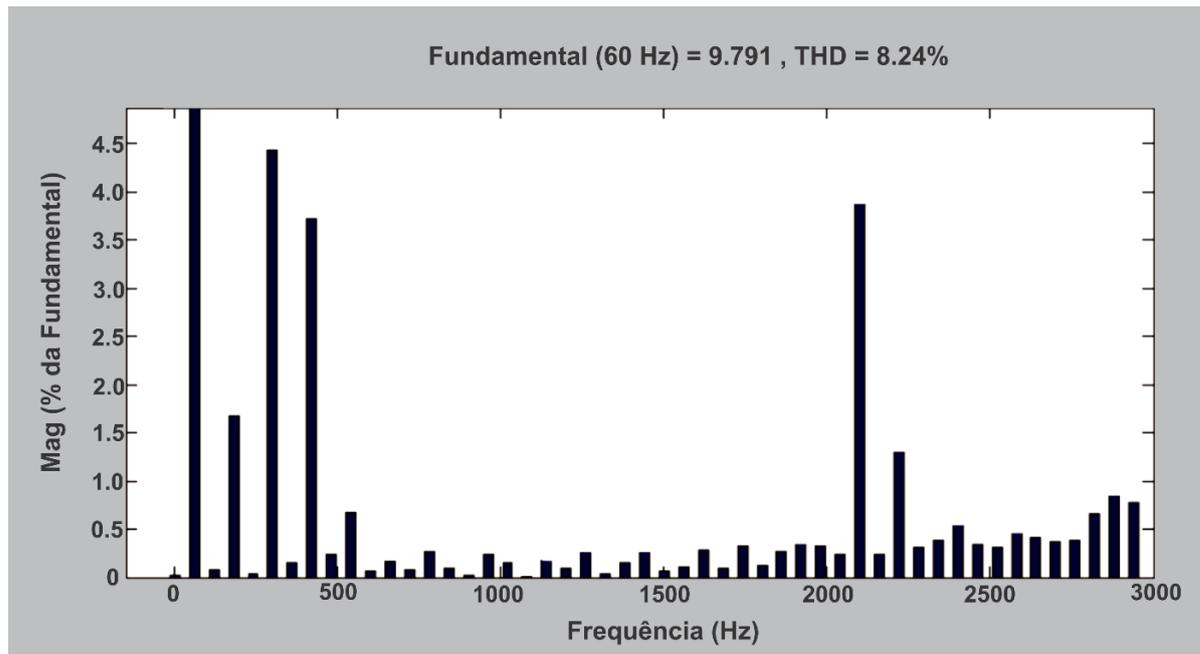


Figura 4.7 - DCH da I_F calculada pelo modelo Tee.

Utilizando-se o MSE, foi calculada a diferença nas magnitudes de todas as frequências, e é de aproximadamente 0,756 enquanto que o RMSE foi de 0,870, o que representa um erro grande. Tal erro fica mais evidente na tabela 4.3 que estão representados os valores em percentuais das harmônicas em relação a fundamental (60 Hz), além do valor Total de Distorção Harmônica (THD) e a diferença absoluta entre o valor medido em campo e o valor calculado pelo modelo.

Tabela 4.3 –DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 9,791), junto com o THD = 8,24%, além da diferença absoluta Δ .

Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ
(DC):	0,02%	0,02%	0,00%	(h17):	0,39%	0,14%	-0,25%	(h34):	0,21%	0,25%	0,04%
(Fnd):	100%	100%	0,00%	(h18):	0,35%	0,01%	-0,34%	(h35):	1,15%	3,10%	1,95%
(h2):	0,06%	0,08%	0,02%	(h19):	0,09%	0,19%	0,10%	(h36):	0,29%	0,24%	-0,05%
(h3):	0,24%	1,85%	1,61%	(h20):	0,11%	0,10%	-0,01%	(h37):	0,63%	1,98%	1,35%
(h4):	0,27%	0,04%	-0,23%	(h21):	0,76%	0,39%	-0,37%	(h38):	0,23%	0,31%	0,08%
(h5):	1,69%	6,78%	5,09%	(h22):	0,19%	0,06%	-0,13%	(h39):	0,44%	0,35%	-0,09%
(h6):	0,49%	0,16%	-0,33%	(h23):	0,05%	0,19%	0,14%	(h40):	0,57%	0,79%	0,22%
(h7):	1,85%	3,13%	1,28%	(h24):	0,46%	0,32%	-0,14%	(h41):	0,36%	0,37%	0,01%
(h8):	0,12%	0,34%	0,22%	(h25):	0,15%	0,08%	-0,07%	(h42):	0,05%	0,30%	0,25%
(h9):	0,20%	0,02%	-0,18%	(h26):	0,15%	0,13%	-0,02%	(h43):	0,44%	0,69%	0,25%
(h10):	0,15%	0,07%	-0,08%	(h27):	0,55%	0,32%	-0,23%	(h44):	0,11%	0,40%	0,29%
(h11):	0,30%	0,15%	-0,15%	(h28):	0,17%	0,11%	-0,06%	(h45):	0,11%	0,35%	0,24%
(h12):	0,31%	0,09%	-0,22%	(h29):	0,12%	0,39%	0,27%	(h46):	0,53%	0,39%	-0,14%
(h13):	0,15%	0,37%	0,22%	(h30):	0,10%	0,12%	0,02%	(h47):	0,46%	0,66%	0,20%
(h14):	0,21%	0,11%	-0,10%	(h31):	0,26%	0,27%	0,01%	(h48):	0,73%	1,06%	0,33%
(h15):	0,13%	0,05%	-0,08%	(h32):	1,12%	0,50%	-0,62%	(h49):	0,36%	0,79%	0,43%
(h16):	0,16%	0,28%	0,12%	(h33):	0,03%	0,33%	0,30%				

Da mesma maneira, que ocorreu com a simulação do modelo matemático PI, na simulação com o modelo Tee obtiveram-se erros bastante elevados. Quando comparado aos valores de forma de onda de I_F medida em campo com a calculada pelos modelos. E nas magnitudes das harmônicas existe também um erro considerável. Nestes modelos toda a isolação da LT está sendo representada pela capacitância. Isso sugere a necessidade de uma melhor representação para isolação, afim de se ter melhores resultados.

4.3 MODELO MATEMÁTICO – MELHORIAS NA REPRESENTAÇÃO DA ISOLAÇÃO

A determinação da capacitância, pelo método matricial (FUCHS, 1979) é a mais utilizada e bastante consolidada. Ela é calculada levando-se em conta somente as dimensões e geometria da LT para determinação da capacitância.

A importância da determinação do valor da capacitância, é devido a I_F estar diretamente relacionada com este parâmetro. Daí a necessidade, de ter-se no modelo matemático um valor de capacitância que mais se aproxime, do real.

A I_F pela isolação é uma corrente de deslocamento, já que atravessa a isolação. Existe um componente da I_F , representado por uma fuga pela superfície do isolador, representado por um resistência. O novo elemento introduzido no modelo matemático é a associação em paralelo de uma resistência à capacitância, como está representado na Figura 4.8.

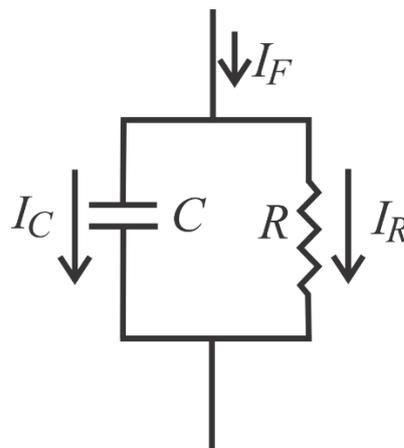


Figura 4.8 - Diagrama esquemático de um isolador

A I_F será a contribuição da corrente que atravessa o isolador (I_C) e a corrente que passa pela superfície do isolador (I_R), ou seja:

$$I_F = I_C + I_R \quad (4.15)$$

Como,

$$I_C = \frac{V}{X_C} \quad (4.16)$$

Sendo V a tensão aplicada nos terminais do isolador e X_C reatância capacitiva.

Portanto,

$$I_C = V \cdot \omega \cdot C \quad (4.17)$$

Como V e ω são valores constantes então a corrente I_C depende apenas da variação da capacitância.

O próximo modelo matemático analisado foi modelo matemático PI, porém com a inserção de uma resistência em paralelo com a capacitância no modelo matemático. Esse novo elemento (R_n) utilizado no modelo matemático π é visualizada na Figura 4.9.

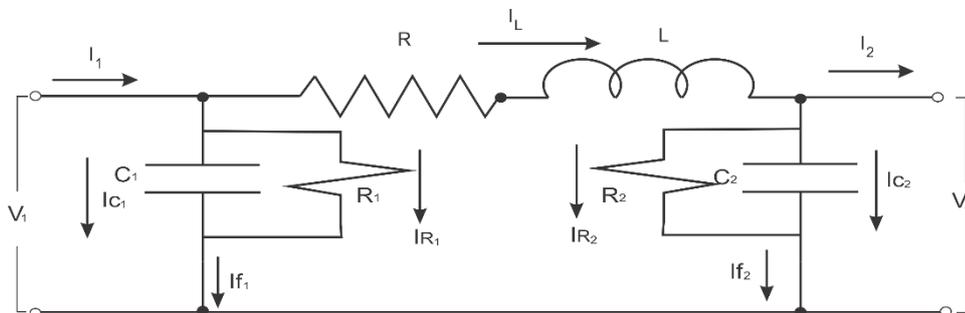


Figura 4.9 – Modelo π com a Isolação representada pela associação em paralelo de uma resistência R_1 e R_2 uma capacitância ($C_{1,2}$).

Para o novo modelo, suas equações são:

- Equações de nó:

$$I_{RL} = I_{f2} + I_2 \quad (4.18)$$

$$I_{f2} = I_{C2} + I_{R2} \quad (4.19)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (4.20)$$

$$I_{R2} = \frac{V_2}{R_2} \quad (4.21)$$

$$I_{f1} = I_1 - I_{RL} \quad (4.22)$$

$$I_{f1} = I_{C1} + I_{R2} \quad (4.23)$$

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_1}{dt} \quad (4.24)$$

$$I_{R1} = \frac{V_1}{R_1} \quad (4.25)$$

- Equações de malha:

$$V_L = R \cdot I_{RL} + L \frac{dI_{RL}}{dt} \quad (4.26)$$

$$V_1 = V_L + V_2 \quad (4.27)$$

Houve uma sensível melhora com a adoção da resistência elétrica em paralelo com a capacitância. Isso pode ser verificado observando-se, por meio da Figura 4.10, as formas de onda,

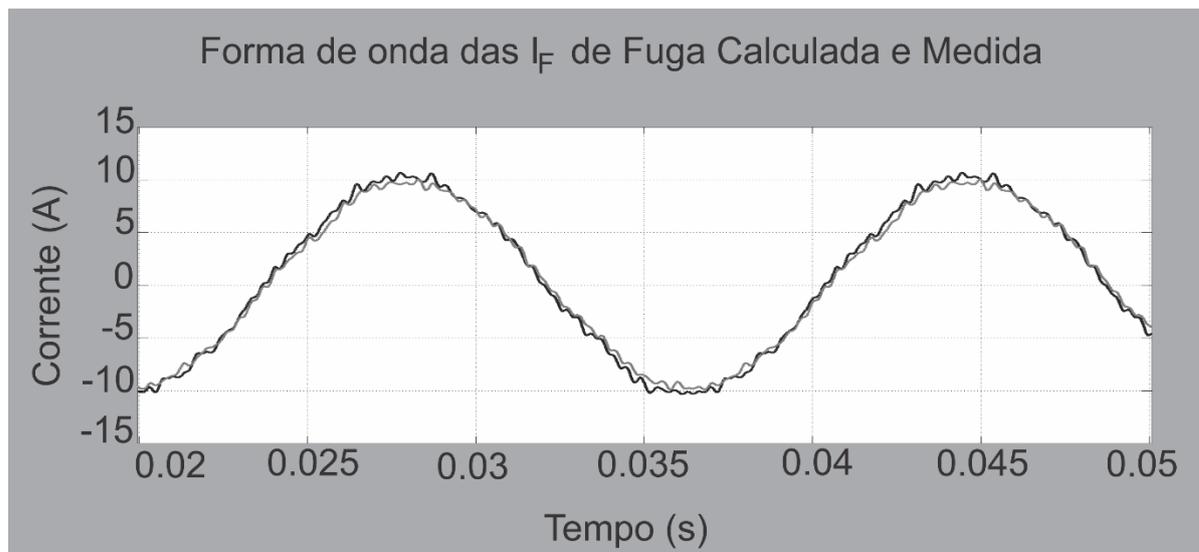


Figura 4.10 – Forma de Onda da I_F calculada pelo modelo π , com resistência elétrica paralela junto à capacitância.

Verifica-se uma melhora expressiva no comportamento da forma de onda. A diferença entre esta nova forma de onda e a forma de onda da I_F medida é de aproximadamente

1 A pp o MSE ficou em 0,09, enquanto que o RMSE ficou em 0,5. Bastante significativo este resultado, se comparado aos outros dois anteriores, em que essa diferença ultrapassou os 5 A

Apesar da forma de onda ter apresentados erros menores, a DCH, teve resultados pouco satisfatórios. Ainda existe bastante diferença entre a DCH da I_F medida e a calculada por este outro modelo matemático. O MSE foi de aproximadamente 0,8 para a DCH. O nível de erro determinado na DCH, foi praticamente o mesmo obtido no modelo matemático anterior (Modelo “Tee”). O que retrata uma significativa diferença entre os sinais. Toda essa diferença também foi devido à distorção harmônica. O nível de TDH aumentou ficando em aproximadamente 6,58%, valor superior ao modelo matemático anterior que foi de 4,70%. Na Figura 4.11 é visualizada a DCH do modelo.

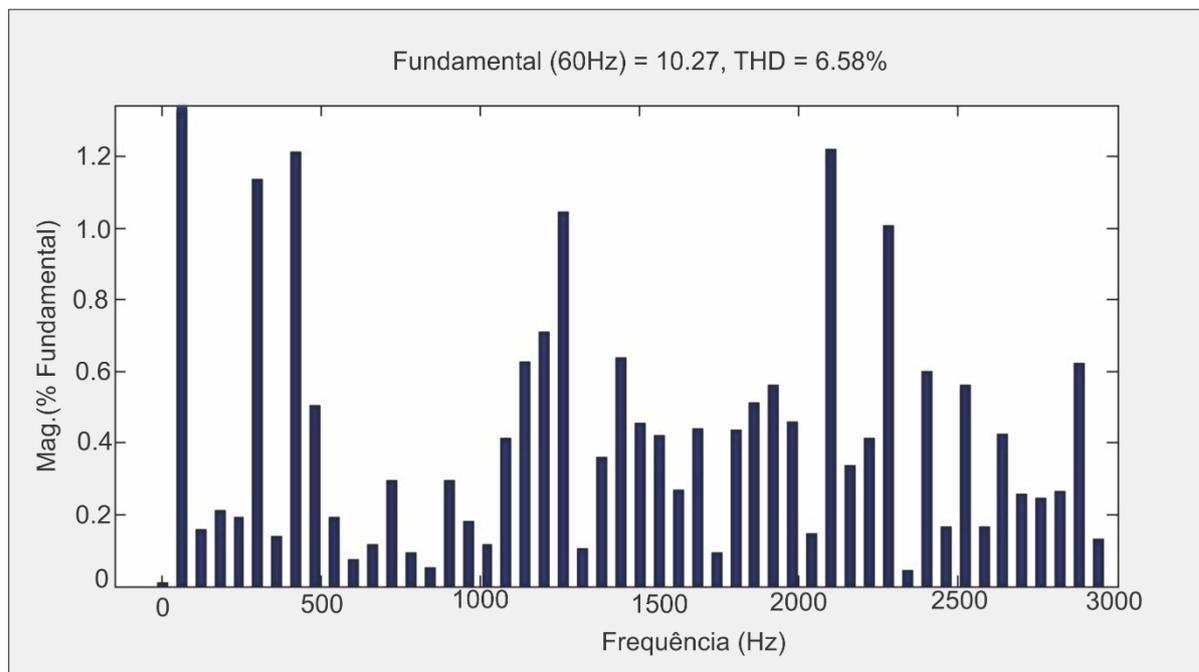


Figura 4.11 – DCH da I_F calculada pelo modelo π , com resistência elétrica paralela junto à capacitância.

Por meio da tabela 4.4 observa-se o comportamento da DCH da I_F calculada pelo modelo matemático em comparação a DCH da I_F medida na LT.

Tabela 4.4 –DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,27), junto com o THD = 6,58%, além da diferença absoluta Δ .

Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ
(DC):	0,02%	0,03%	0,01%	(h17):	0,39%	0,14%	-0,25%	(h34):	0,21%	0,12%	-0,09%
(Fnd):	100%	100,00%	0,00%	(h18):	0,35%	3,91%	3,56%	(h35):	1,15%	7,34%	6,19%
(h2):	0,06%	0,50%	0,44%	(h19):	0,09%	4,89%	4,80%	(h36):	0,29%	3,40%	3,11%
(h3):	0,24%	1,85%	1,61%	(h20):	0,11%	5,15%	5,04%	(h37):	0,63%	3,52%	2,89%
(h4):	0,27%	1,20%	0,93%	(h21):	0,76%	6,29%	5,53%	(h38):	0,23%	6,11%	5,88%
(h5):	1,69%	6,78%	5,09%	(h22):	0,19%	0,16%	-0,03%	(h39):	0,44%	0,10%	-0,34%
(h6):	0,49%	0,16%	-0,33%	(h23):	0,05%	3,46%	3,41%	(h40):	0,57%	4,41%	3,84%
(h7):	1,85%	7,33%	5,48%	(h24):	0,46%	4,94%	4,48%	(h41):	0,36%	1,19%	0,83%
(h8):	0,12%	4,34%	4,22%	(h25):	0,15%	0,08%	-0,07%	(h42):	0,05%	4,30%	4,25%
(h9):	0,20%	1,17%	0,97%	(h26):	0,15%	4,17%	4,02%	(h43):	0,44%	1,18%	0,74%
(h10):	0,15%	0,50%	0,35%	(h27):	0,55%	4,04%	3,49%	(h44):	0,11%	3,55%	3,44%
(h11):	0,30%	0,58%	0,28%	(h28):	0,17%	4,13%	3,96%	(h45):	0,11%	4,09%	3,98%
(h12):	0,31%	4,89%	4,58%	(h29):	0,12%	0,15%	0,03%	(h46):	0,53%	4,07%	3,54%
(h13):	0,15%	0,37%	0,22%	(h30):	0,10%	4,12%	4,02%	(h47):	0,46%	4,11%	3,65%
(h14):	0,21%	0,11%	-0,10%	(h31):	0,26%	4,20%	3,94%	(h48):	0,73%	4,56%	3,83%
(h15):	0,13%	4,84%	4,71%	(h32):	1,12%	4,23%	3,11%	(h49):	0,36%	1,13%	0,77%
(h16):	0,16%	1,12%	0,96%	(h33):	0,03%	4,14%	4,11%				

A melhoria na representatividade do modelo matemático, usando o modelo matemático π , com resistência elétrica em paralelo, foi a responsável pela seleção deste modelo para representação do comportamento da LT.

Se o ajuste nos valores dos parâmetros elétricos, mais especificamente a capacitância, fosse realizado de forma mais efetiva, os resultados poderiam ser melhorados. Esta efetividade é discutida no próximo item.

4.4 MODELO COM SUPERPOSIÇÃO DAS FONTES EM FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS

Pela necessidade do ajuste individual para cada frequência utilizou-se a capacitância em cada harmônico. Este modelo é representado no circuito, conforme é mostrada pela Figura 4.12.

É importante notar que o circuito é o mesmo apresentado no item 4.3, porém, a nova configuração possibilita a inserção de valores individuais de capacitância por frequência harmônica.

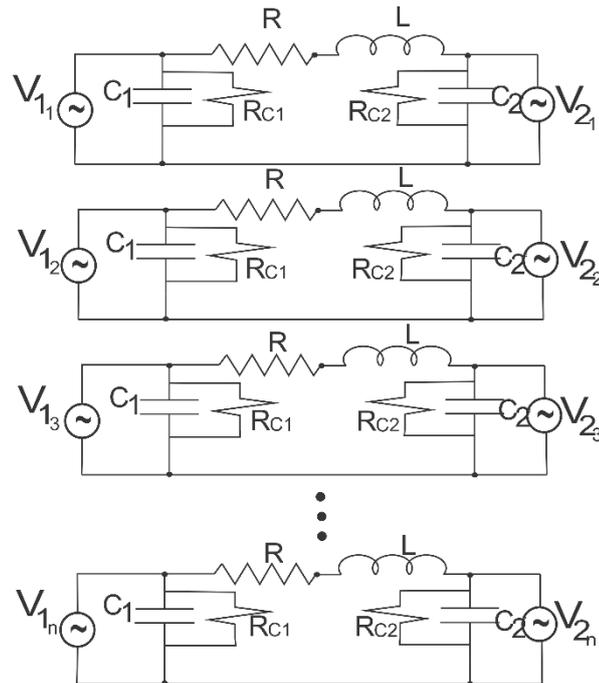


Figura 4.12 – Modelo com superposição das fontes em frequências harmônicas

O item a seguir descreve a maneira utilizada para o ajuste da capacitância.

4.4.1 Técnica de Ajuste de Capacitância por Harmônico

Inicialmente os sinais de entrada do modelo matemático, são decompostos em suas componentes senoidais. As “senóides puras” (60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, etc.) cada uma servirá de excitação para um respectivo circuito elétrico equivalente. A I_F medida, continua a ser obtida pela equação $I_F = I_{SE_Guamá} - I_{SE_Utinga}$, todavia a diferença será realizada entre as respectivas senóides. Os valores dos parâmetros resistência elétrica da linha (R) e indutância elétrica (L), permanecem sempre com o mesmo valor para todos os circuitos. Já o valor da capacitância pode ser ajustado comparando-se os picos das I_F geradas pelas senóides do modelo matemático com a correspondente senóide da I_F medida. O tamanho do passo pela procura do melhor valor de capacitância é de $0,36\text{ nF}$, devido fornecer resíduos de I_F menores que 200 mA, que correspondem à algumas falhas em isoladores poluídos. Após todos os circuitos terem suas capacitâncias ajustadas, o sinal resultante deste processo é novamente somado, constituindo a I_F calculada pelo modelo matemático. Da mesma maneira o sinal medido é novamente somado, formando a I_F medida.

Na Figura 4.13 é mostrado o comportamento da I_F medida e da I_F calculada pelo modelo matemático.

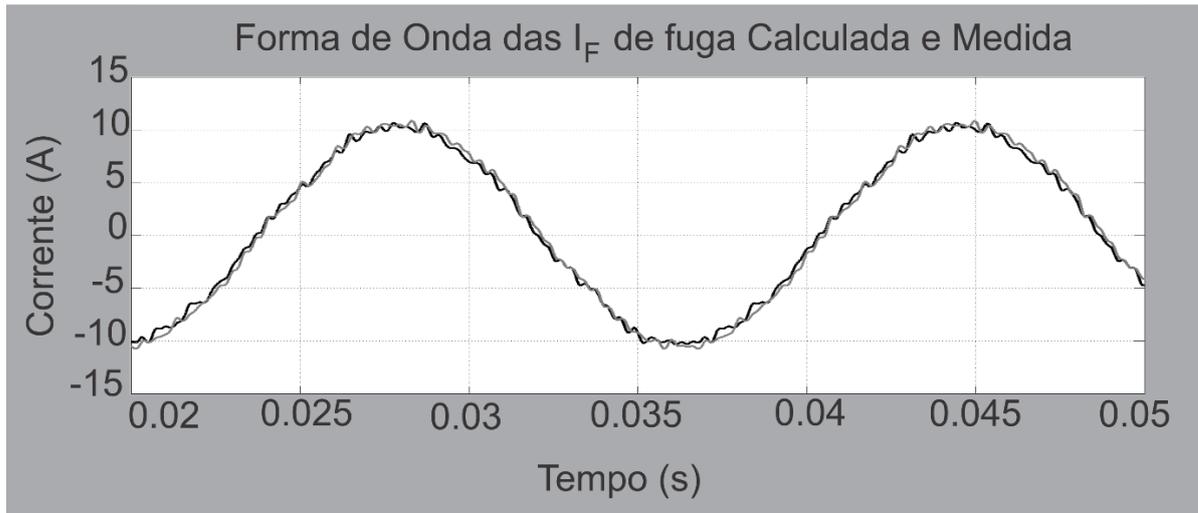


Figura 4.13 – Superposição das formas de onda da I_F medida (Cinza) e calculada pelo modelo matemático (Preto)

A diferença entre as duas formas de onda é menor que 0,4 A pp o MSE ficou em aproximadamente 0,0192, enquanto que o RMSE ficou em torno de 0,138 o que significa um grande avanço em relação aos demais modelos utilizados até aqui.

Já na Figura 4.14 é mostrada a DCH da I_F calculada, com o valor da capacitância da isolamento ajustada individualmente para cada frequência.

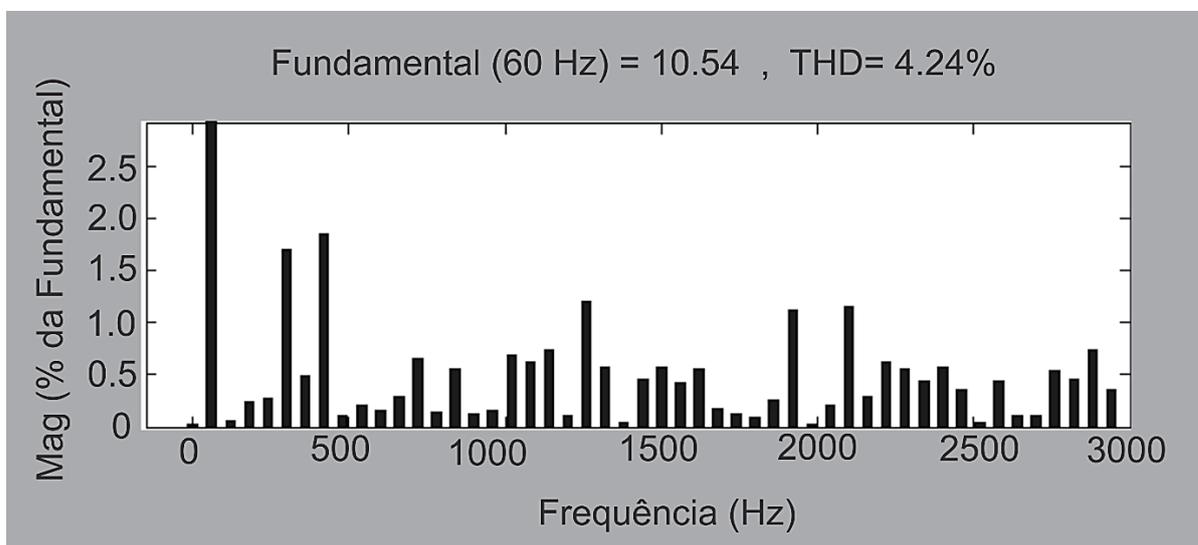


Figura 4.14 – DCH da I_F utilizando superposição das fontes em frequências harmônicas.

O MSE para a DCH ficou em torno 0,0001, enquanto que o RMSE foi de 0,0031, um erro bastante pequeno. Na tabela 4.5 é mostrada a diferença absoluta, entre a DCH da I_F medida e a DCH da I_F calculada pelo modelo matemático.

Tabela 4.5 –DCH da I_F calculada pelo modelo PI, em que se tem o valor da fundamental como valor de máximo, e os harmônicos em percentuais em relação ao valor da Fundamental (60Hz – 10,54), junto com o THD = 4,24%, além da diferença absoluta Δ .

Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ	Harm.	Real	Estim.	Δ
(DC):	0,02%	0,02%	0,00%	(h17):	0,39%	0,39%	0,00%	(h34):	0,21%	0,21%	0,00%
(Fnd):	100%	100%	0,00%	(h18):	0,35%	0,35%	0,00%	(h35):	1,15%	1,15%	0,00%
(h2):	0,06%	0,06%	0,00%	(h19):	0,09%	0,09%	0,00%	(h36):	0,29%	0,28%	-0,01%
(h3):	0,24%	0,24%	0,00%	(h20):	0,11%	0,11%	0,00%	(h37):	0,63%	0,64%	0,01%
(h4):	0,27%	0,27%	0,00%	(h21):	0,76%	0,76%	0,00%	(h38):	0,23%	0,23%	0,00%
(h5):	1,69%	1,69%	0,00%	(h22):	0,19%	0,19%	0,00%	(h39):	0,44%	0,44%	0,00%
(h6):	0,49%	0,49%	0,00%	(h23):	0,05%	0,05%	0,00%	(h40):	0,57%	0,57%	0,00%
(h7):	1,85%	1,85%	0,00%	(h24):	0,46%	0,46%	0,00%	(h41):	0,36%	0,36%	0,00%
(h8):	0,12%	0,12%	0,00%	(h25):	0,15%	0,15%	0,00%	(h42):	0,05%	0,06%	0,01%
(h9):	0,20%	0,20%	0,00%	(h26):	0,15%	0,15%	0,00%	(h43):	0,44%	0,44%	0,00%
(h10):	0,15%	0,16%	0,01%	(h27):	0,55%	0,55%	0,00%	(h44):	0,11%	0,11%	0,00%
(h11):	0,30%	0,30%	0,00%	(h28):	0,17%	0,17%	0,00%	(h45):	0,11%	0,11%	0,00%
(h12):	0,31%	0,31%	0,00%	(h29):	0,12%	0,12%	0,00%	(h46):	0,53%	0,53%	0,00%
(h13):	0,15%	0,15%	0,00%	(h30):	0,10%	0,10%	0,00%	(h47):	0,46%	0,46%	0,00%
(h14):	0,21%	0,21%	0,00%	(h31):	0,26%	0,26%	0,00%	(h48):	0,73%	0,73%	0,00%
(h15):	0,13%	0,13%	0,00%	(h32):	1,12%	1,13%	0,01%	(h49):	0,36%	0,36%	0,00%
(h16):	0,16%	0,16%	0,00%	(h33):	0,03%	0,03%	0,00%				

É importante ressaltar que para a DCH, tanto a magnitude da fundamental, quanto o valor da distorção harmônica também melhoraram em relação aos dados reais.

Haja visto melhor desempenho do modelo matemático, dentro da faixa de erro desejado, e ainda, da sistemática adotada para a obtenção da forma de onda e DCH da I_F calculada, o modelo matemático com superposição das fontes em frequência foi o selecionado para prosseguimento da pesquisa.

Uma outra discussão se faz necessária. A simulação realizada foi através de blocos de funções. O tópico a seguir descreve estes blocos e suas parametrizações.

4.5 CONFIGURAÇÕES DOS BLOCOS DE FUNÇÕES E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Algumas dúvidas surgiram durante o desenvolvimento da modelagem matemática da linha de transmissão. Uma dessas dúvidas foi, quanto a quantidade de entradas e saídas para o cálculo da I_F . Estas entradas e saída são as variáveis elétricas tensão e corrente elétricas. Existem basicamente duas possibilidades de modelagem matemática para LT. Elas podem ser com três entradas e uma saída, ou duas entradas e duas saídas.

A discussão para este tipo de modelo, é que devido ter-se quatro variáveis elétricas em um trecho de LT, (tensão na fonte, corrente na fonte, tensão no receptor e corrente no

receptor), espera-se que se utilize três destas variáveis para a determinação da quarta variável. Na Figura 4.15 é representado o circuito elétrico com essas variáveis de entrada e saída.

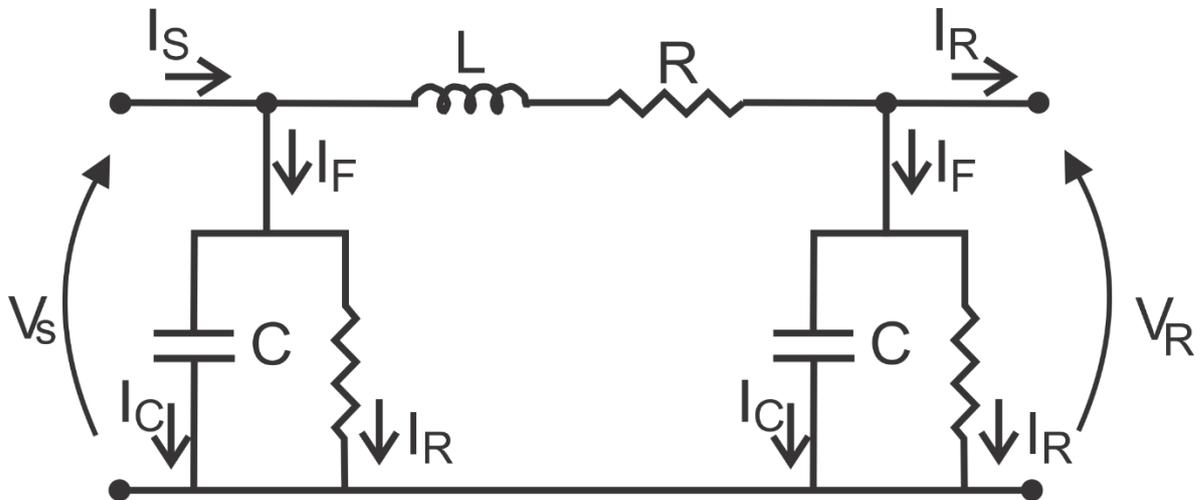


Figura 4.15 – Circuito elétrico de uma LT com suas correspondentes entradas e saídas.

Já na Figura 4.16 é mostrado um esquema em blocos, dos números de entradas e o número de saídas.

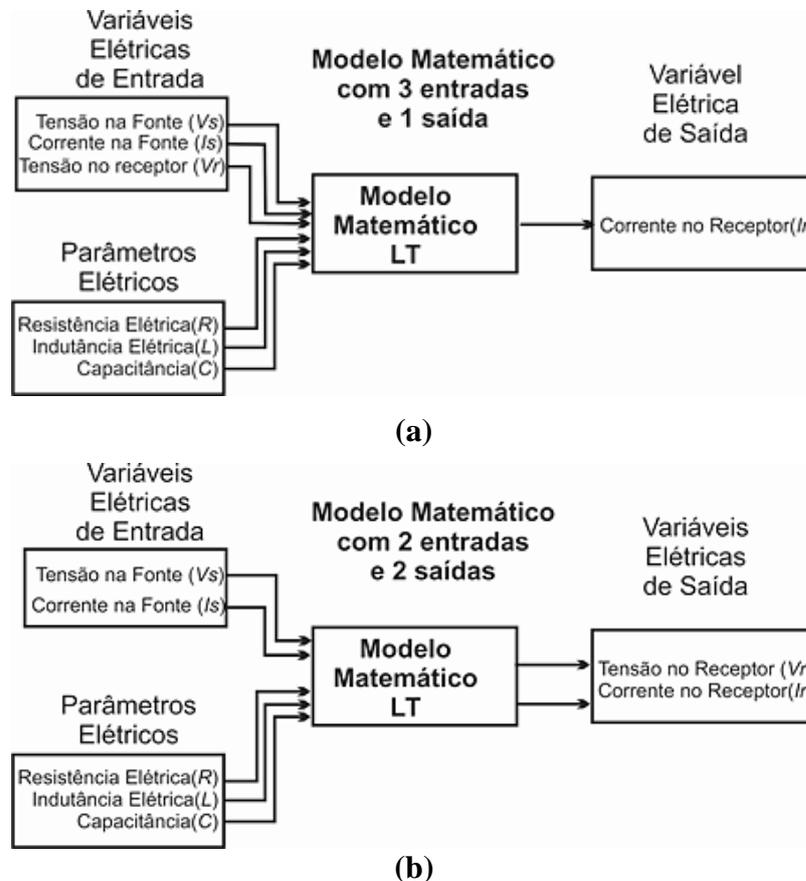


Figura 4.16 – Diagrama em blocos das configurações dos modelos matemáticos, quanto ao número de entradas e número de saídas. (a) Modelo matemático com três entradas e uma saída; (b) Modelo matemático com duas entradas e duas saídas.

Na Figura 4.17 é exibido o diagrama em blocos do modelo matemático selecionado. A ferramenta utilizada para esta simulação foi o Simulink/MATLAB®, e conta com três entradas correspondentes as variáveis elétricas -Tensão da SE Guamá, Corrente da SE Utinga e Tensão da SE Utinga. Os parâmetros elétricos também são inicializados na entrada do modelo matemático - Resistência elétrica da LT, Indutância elétrica da LT, Resistência elétrica paralela à capacitância e a Capacitância da LT). O cálculo da saída do modelo matemático é a corrente na SE Guamá (uma saída – quarta variável elétrica) e a I_F .

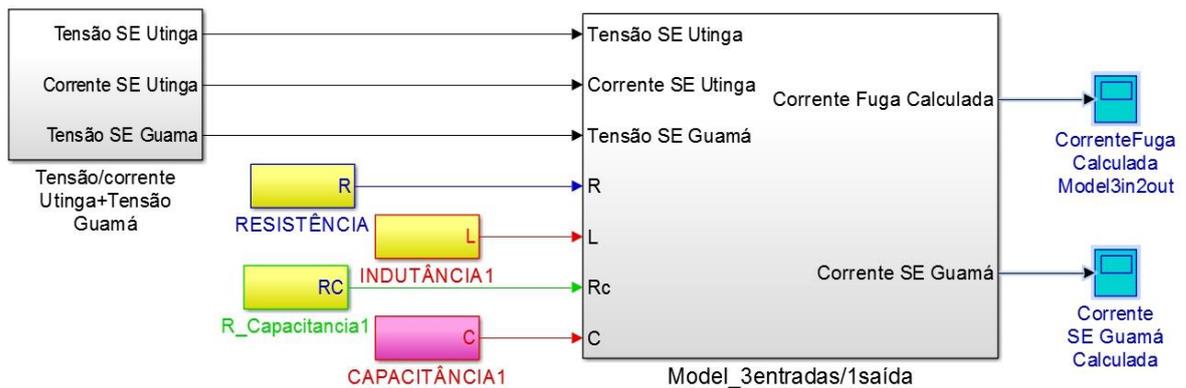


Figura 4.17 – Diagrama em blocos do modelo matemático selecionado, com três entradas e uma saída.

A variável elétrica de saída corrente SE Guamá foi calculada com êxito, o erro entre o valor calculado e o valor medido é de aproximadamente 0,019 – MSE. As duas formas de onda podem ser observadas por meio da Figura 4.18.

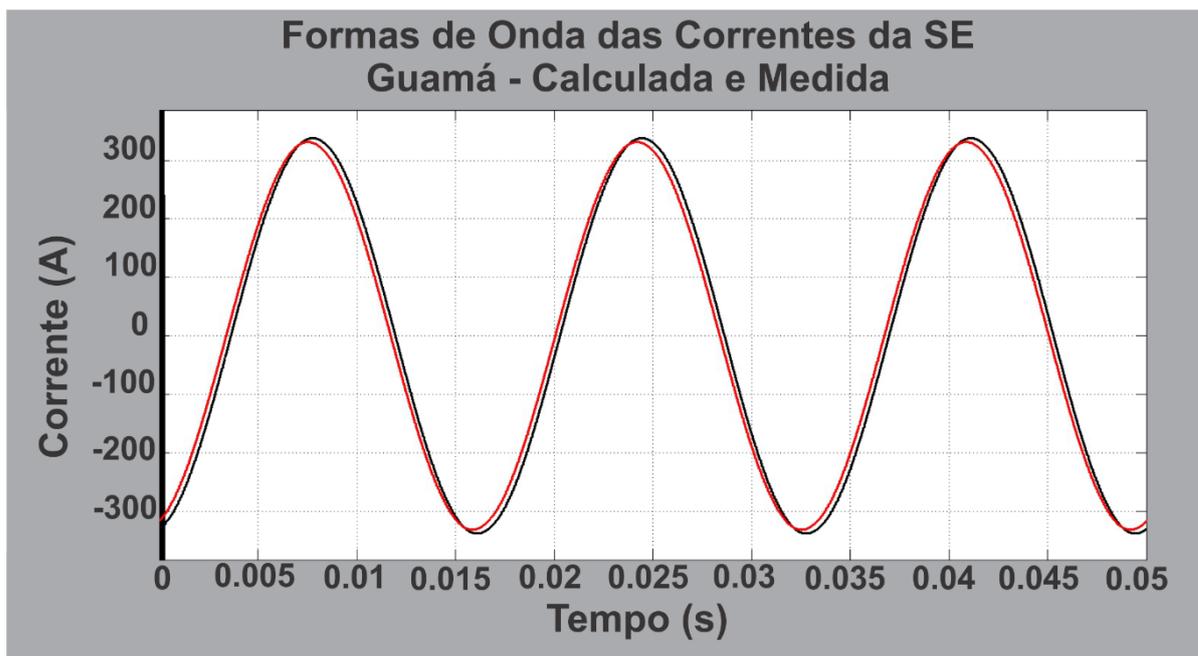


Figura 4.18 - Formas de onda das corrente na SE Guamá calculada (Vermelho) e medida (preto).

Já para o cálculo do circuito com duas entradas e duas saídas, primeiramente deve-se esclarecer o comportamento das equações do modelo matemático PI. As duas principais equações que regem o modelo matemático PI são:

$$V_S = (1 + Z_e Y_2) V_R + Z_e I_r \quad (4.28)$$

$$I_s = (Y_1 + Z_e Y_1 Y_2 + Y_2) V_R + (1 + Z_e Y_1) I_r \quad (4.29)$$

Na Figura 4.19 é ilustrado o circuito equivalente π para melhor entendimento.

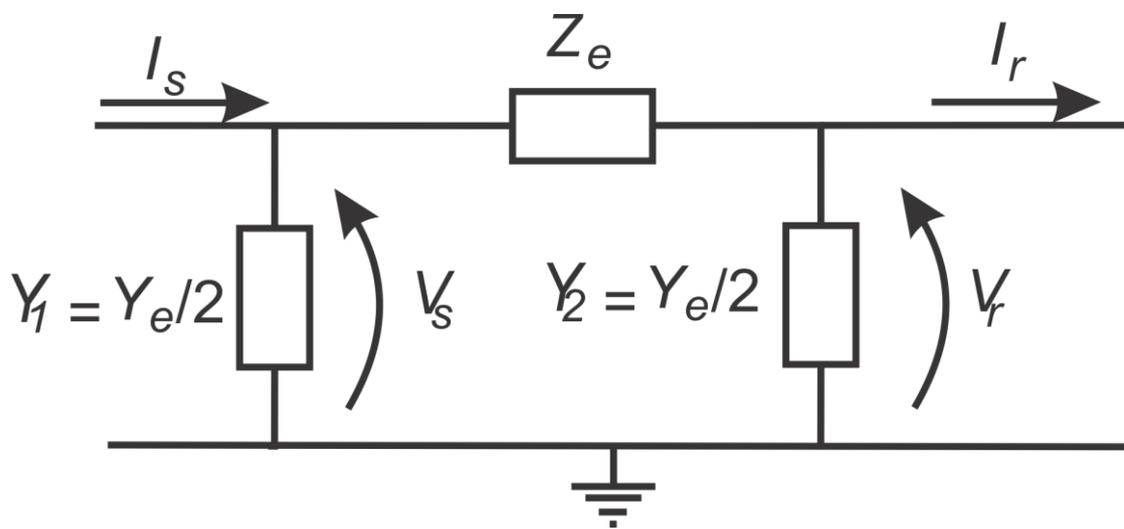


Figura 4.19 - Modelo π .equivalente

É importante destacar que tanto para o cálculos de V_S quanto de I_s , apenas é necessário conhecer os valores V_S e I_s nas equações (4.28) e (4.29). O outros valores são todos referentes aos parâmetros elétricos – resistência elétrica, indutância elétrica e capacitância. Segundo Fuchs (1979, pág. 74) através das equações gerais de corrente senoidais de regime permanente, é possível relacionar tensões e correntes em qualquer ponto ao longo das linhas, em função das condições existentes no receptor. Evidentemente que as equações (4.28) e (4.29) são equações que admitiram algumas hipótese para simplificação (quanto a consideração dos parâmetros distribuídos). Porém mesmo com estas simplificações, continua válida a premissa de conhecida (ou especificadas) as tensões e corrente em um ponto da linha, determinam-se essas mesmas grandezas em outro ponto da linha (Fuchs,1979, pág. 115). Esse fato também permite que os circuitos π sejam associados em cascata.

Na Figura 4.20 é exibido o diagrama em blocos no Simulink utilizado para o cálculo da corrente da SE Guamá e da I_F .

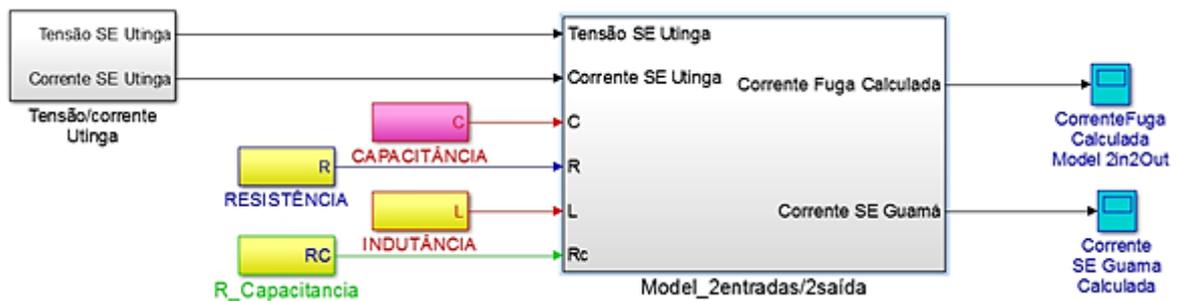


Figura 4.20 – Diagrama em blocos do modelo matemático selecionado, com três entradas e uma saída.

Da mesma forma na Figura 4.21 é retratado em vermelho, o comportamento da forma de onda da corrente medida na SE Guamá para o 1º harmônico, enquanto que em azul, tem-se o comportamento da forma de onda da corrente na SE Guamá calculada para o 1º harmônico.

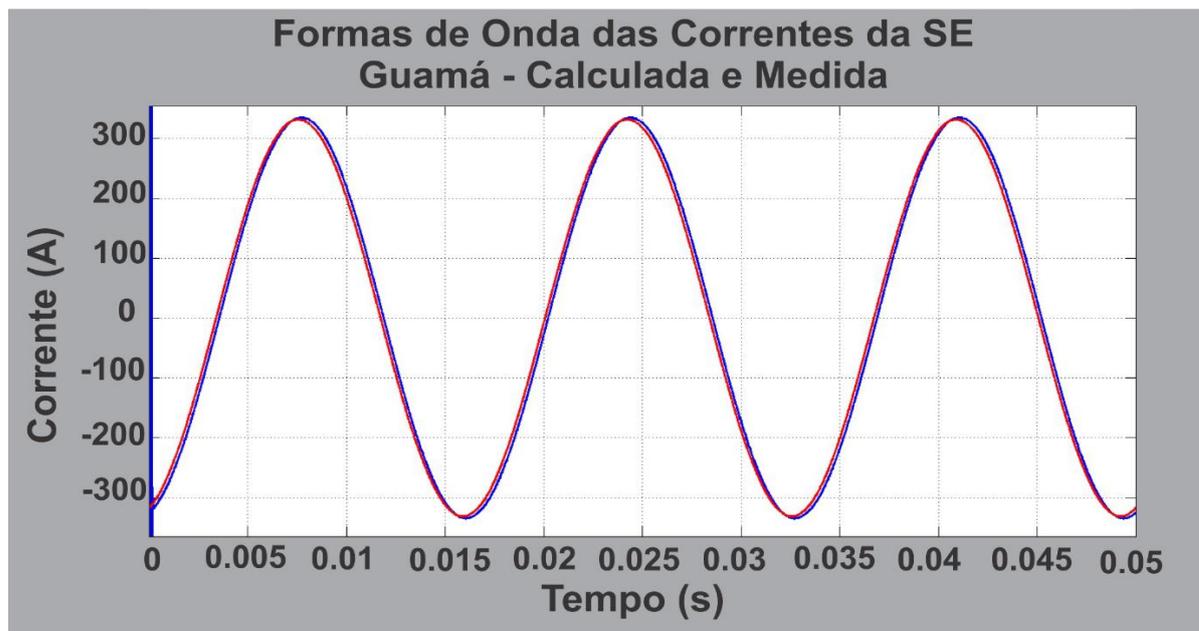


Figura 4.21 - Formas de onda das correntes na SE Guamá medida (Vermelho) e calculada (Azul).

O MSE entre as duas correntes foi de aproximadamente 0,0082. Ainda menor que o conseguido com o modelo com três entradas. Na Figura 4.22, a seguir, é mostrado o comportamento das três formas de onda da corrente da SE Guamá para o 1º harmônico. É possível notar que ambos os modelos calculam o valor da corrente com bastante fidelidade.

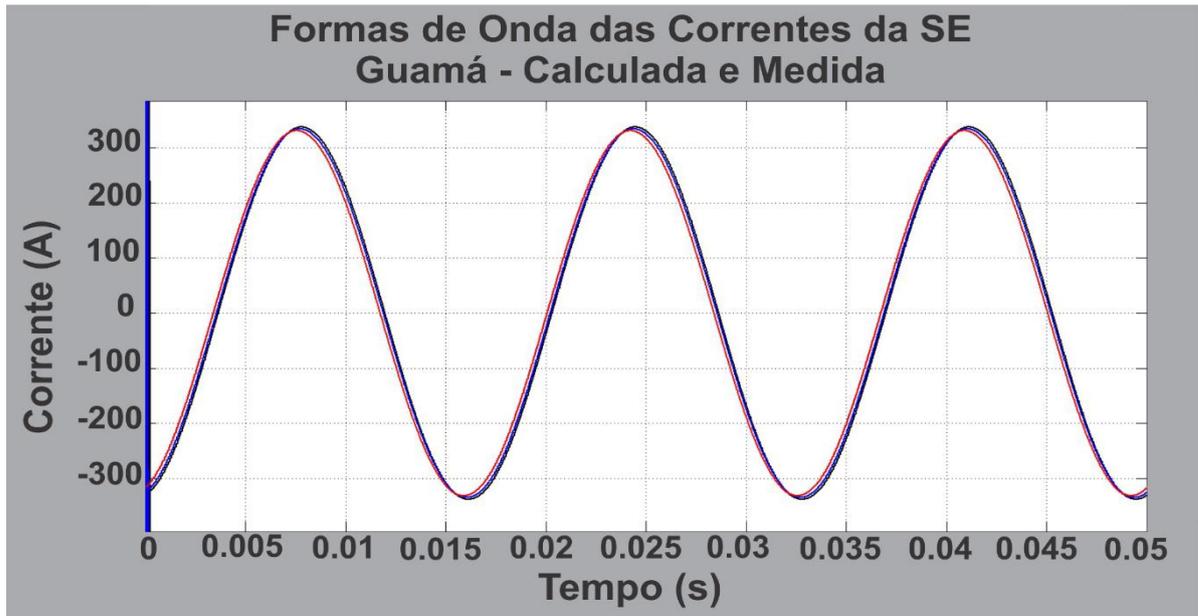


Figura 4.22 - Formas de onda das correntes na SE Guamá calculada (Azul) e medida (Vermelho).

Porém é necessário a verificação do desempenho dos modelos matemáticos para o cálculo da I_F , para apenas o 1º harmônico. Por isso foi realizada a comparação entre as formas de onda das correntes de fuga calculadas pelos modelos matemáticos para o 1º harmônico. Na Figura 4.23 é exibido o comportamento da I_F calculada pelos modelos.

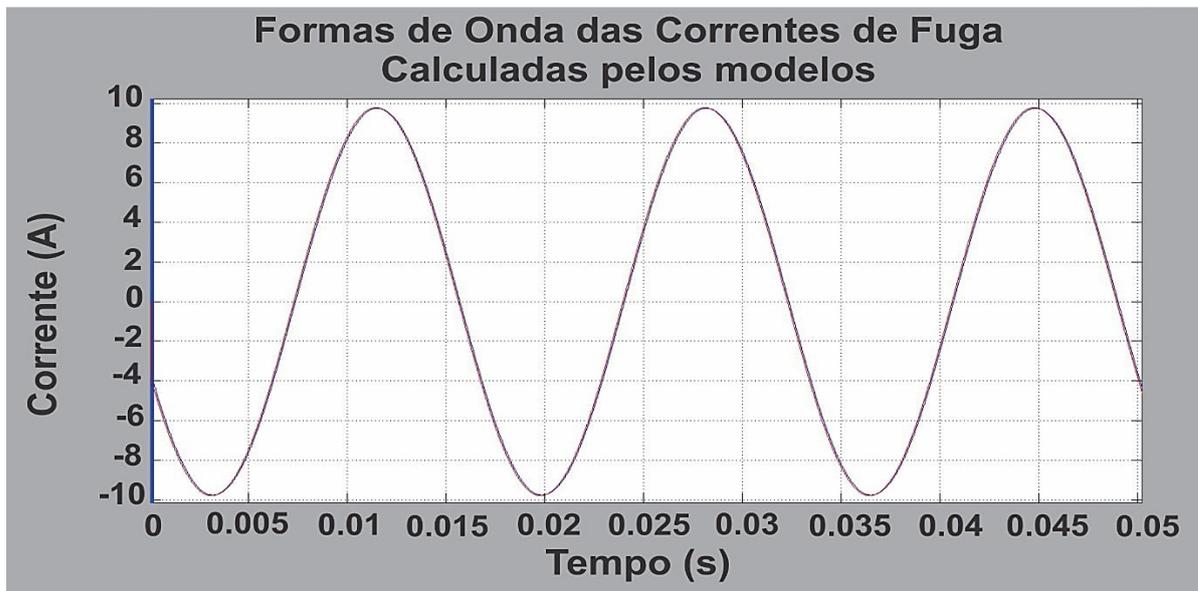


Figura 4.23 - Formas de onda das I_F calculadas pelos modelos matemáticos. Modelo 3 entradas e 1 saída (Vermelho) e modelo 2 entradas e 2 saídas (Azul).

O MSE entre as duas formas de onda é de aproximadamente 0,0031, as formas de onda são praticamente iguais. Também foi realizada a comparação entre estas formas de onda

e a I_F medida real para o 1º harmônico. Por meio da Figura 4.24 é possível visualizar o comportamento das formas de onda das três I_F para o 1º harmônico.

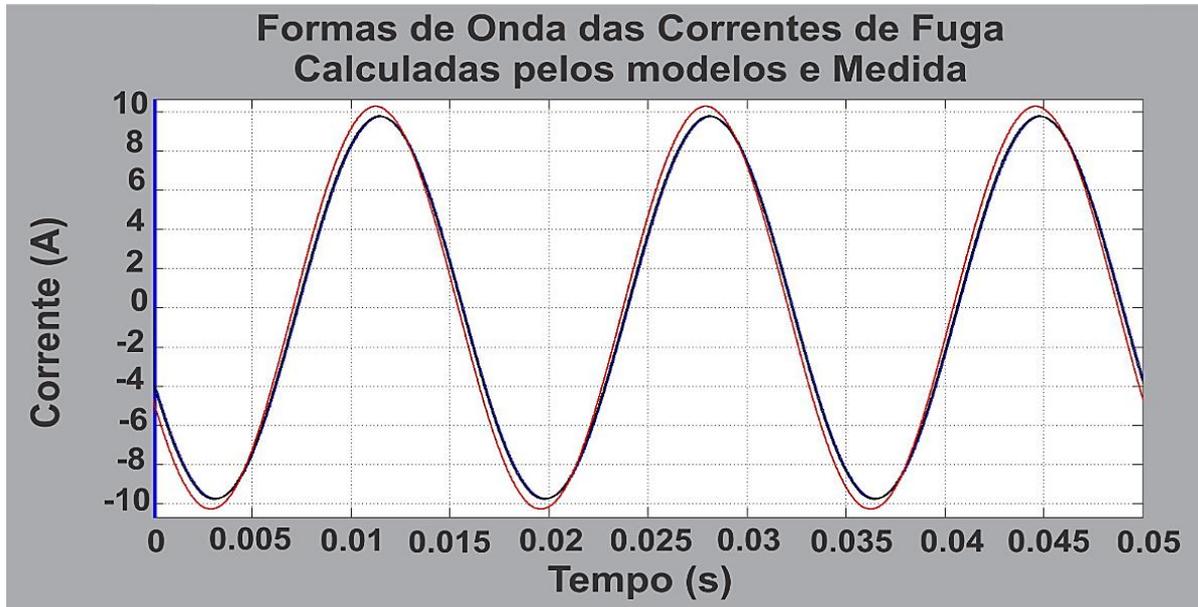


Figura 4.24 - Formas de onda das I_F calculadas pelos modelos matemáticos. Modelo 3 entradas e 1 saída (preto) e modelo 2 entradas e 2 saídas (Azul) e a Medida (Vermelho).

O erro existente (MSE) entre as correntes de fuga calculadas pelos modelos e a I_F medida em campo é de aproximadamente 0,053, um erro bastante pequeno, a diferença no valor da corrente entre as formas de onda calculada e a medida é de menos de 0,12 A, também bastante baixo.

Foi possível, por meio desse modelo, e utilizando a configuração de superposição das fontes em frequências harmônicas, ajustar-se mais eficientemente as magnitudes de cada harmônico.

4.6 CONCLUSÃO

Foram testados diversos modelos matemáticos, como por exemplo o modelo matemático Tee, o π e o modelo RC do isolador. Sendo que o modelo matemático RC foi com certeza o mais eficaz, para obtenção da forma de onda da I_F com a exatidão requerida.

Foram testadas, ainda, diversas configurações dos blocos de funções e parametrizações do modelo matemáticos com três entradas ou duas entradas.

O Ajuste do valor de capacitância se mostrou extremamente eficiente na obtenção da DCH da I_F . A fim de melhorar a fidelidade do modelo quanto às magnitudes na DCH, optou-se por um estudo no ajuste por frequência harmônica (senóides puras) da capacitância. Para isto, foram utilizadas as teorias de superposição das fontes em frequências harmônicas. O ajuste de capacitância é específico para cada momento medido, e é por meio do comportamento deste ajuste que será analisada a LT.

Além da seleção adequada do modelo matemático, outro passo importante é a verificação da confiabilidade dos dados. A metodologia desenvolvida trata, gerencia e analisa dados provenientes de uma linha de transmissão. Estes valores são as leituras de suas tensões e correntes elétricas.

Os equipamentos, como analisadores de energia de linhas de transmissão foram desenvolvidos para exercerem suas funções dentro de uma exatidão, estipulado pelo fabricante. Os limites dos equipamentos devem ser levados em consideração na análise dos dados.

Outro fato a ser atentado, são as condições de onde os analisadores foram instalados. Em geral os analisadores são instalados a jusante de Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs), e mesmo as exatidões destes instrumentos devem ser levados em considerações.

Todo esse cuidado é necessário para evitar, leituras errôneas, falhas ou travamento, ou ainda, procedimentos que possam vir a danificar o equipamento. Por isso é necessário um estudo que possa vir a validar os dados coletados. Esta discussão é apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5.0 VALIDAÇÃO DOS DADOS

O estudo desenvolvido neste trabalho utiliza medidas dos componentes harmônicos das formas de onda de tensão e corrente. Por outro lado os dispositivos de medição como Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs) são normalmente projetados para atuarem em condições ideais, de frequência constante (60Hz). Entretanto as formas de ondas não são perfeitamente senoidais. Por essa razão é necessária análise dos aparelhos e dispositivos utilizados para verificar o quanto são adequados para as medições realizadas em campo.

Nas SEs os analisadores de energia foram conectados no TP e TC. Estes componentes são desenvolvidos para atuarem em uma frequência específica (60Hz - Fundamental). Leituras de frequências acima desta fundamental sofrem atenuações. Assim, é necessário um estudo sobre transformadores. Abrangendo principalmente, seu comportamento em frequências acima da fundamental.

Foi ainda realizada uma descrição sobre os equipamentos instalados. Para tanto utilizou-se dados técnicos de seu manual.

5.1 MEDIDAS DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A fim de manter um fornecimento de energia eficiente e efetivo é necessário definir os níveis de distorção permitidos sobre os sistemas de potência. Esta necessidade resulta no desenvolvimento de uma série de instrumentos de medição e técnicas de estabilidade aumentando a sofisticação levando à geração atual de equipamentos de medidas baseados em microprocessadores.

Segundo Albertazzi & Sousa (2008), “O Sistema de medição é um meio pelo qual as medições são efetuadas. É construído de forma que permita a comparação do mesurando com a unidade de medição”. Chama-se de mensurando aquilo que se vai medir (processo, sistema entre outros).

O papel desse sistema de medição é fundamental, pois trata-se da transferência da informação entre um sistema que se está medindo e um operador que utilizará essas informações (ORLANDO, 2004). Uma vez que a necessidade por informação tenha sido estabelecida, as

medições requeridas para prover esta informação precisam ser identificadas. Essas medições são as das variáveis elétricas tensão, corrente, potência, fluxo de potência e ainda seus harmônicos.

Uma vez que a escolha das variáveis elétricas tenha sido feita então o sistema de medição pode ser definido. Em baixa tensão a conexão direta do instrumento é possível, dispensando a necessidade de transformadores e vínculos de comunicação. Quando os níveis de tensão e corrente de sistemas aumentam então a escolha apropriada do transformador torna-se importante. A exigência para localização remota do equipamento de medição e a necessidade de transmitir dados através de um ambiente eletricamente ruidoso, tal como um pátio de manobras de uma indústria, influenciará na seleção da conexão de comunicação utilizada. Para o instrumento de medição as opções se limitam entre um equipamento digital ou analógico, cada um destes é capaz de proporcionar uma variação particular de funções. Na escolha do equipamento, devem ser realizadas as seguintes considerações: quais variáveis elétricas serão medidas? E qual a finalidade das medições?

A seleção de um equipamento mais sofisticado, que o realmente necessário, pode aumentar os custos e/ou ocorrer em aumento na complexidade na configuração do equipamento. Uma tentativa para utilizar um equipamento inadequado resultará na falha de todo o processo de medição.

5.2 O DESENVOLVIMENTO DE MEDIÇÕES DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Thompson em 1905 realizou estas aproximações usando 18 ordenadas adquiridas do registrado de um oscilograma para obter os nove primeiros termos da Série de Fourier pelo método de ordenada selecionada (selected ordinate method). Essa análise durava em torno de uma hora.

Desenvolveu-se em 1916 uma análise similar utilizando a amplitude e o tempo de um ciclo de uma forma de onda registrada em um oscilógrafo e obtendo aproximações para as integrações nas equações de Fourier. As amplitudes dos harmônicos e os ângulos de fase foram então avaliados.

Por algum tempo os registros de oscilógrafo foram muito utilizados para fundamentar a análise de harmônicos das formas de onda de sistemas de potência. O método de

integração foi, então, modificado para melhorar o processo e facilitar o desenvolvimento do mesmo. Contudo, o procedimento de análise permaneceu tedioso e para qualquer harmônico individual a precisão atingida era somente em torno de meio por cento da amplitude fundamental. Este fato levou o desenvolvimento de instrumentos capazes de proporcionar uma medida mais precisa das componentes harmônicas.

5.2.1 Analisadores de Espectro

O analisador de espectros é um instrumento utilizado para a análise de sinais alternados no domínio da frequência. O resultado da medida é apresentado em uma tela, tendo a amplitude no eixo das ordenadas e a frequência no eixo das abscissas. Um analisador de espectros é essencialmente um receptor de rádio passivo, com uma interface gráfica (*display*) para a análise e medida do sinal no domínio da frequência. Os analisadores de espectros indicam geralmente a informação contida no sinal de forma direta, tais como a tensão, a potência, o período e a frequência.

5.2.2 Analisadores de Harmônicos

Estes medem as amplitudes dos sinais somente nas frequências harmônicas. A fim de se realizar, a medição é referenciada com a frequência fundamental e uma compensação é feita para qualquer variação nesta frequência. O analisador de harmônicos gera um espectro de saída que é um subconjunto específico do espectro das amplitudes dos sinais dos quais poderiam ser produzidos por um analisador de espectro convertendo somente a frequência contida no intervalo dos harmônicos.

Apesar de ter-se equipamentos mais sofisticados e estáveis, tais analisadores para medirem um grau elevado de tensão e corrente (230kV e 300A, por exemplo) o fazem de maneira indireta. Dentro das SEs, os analisadores precisam ser conectados em equipamentos que adequem os níveis de tensão e corrente, esses equipamentos são os TPs e TCs, respectivamente. Os TPs e TCs atenuam os sinais das harmônicas presentes nas tensões e corrente elétricas medidas nas SEs. O próximo item discutirá o comportamento dos TPs e TCs frente as variações harmônicas que são submetidos.

5.3 ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E MODELAGEM DE TPs e TCs

Os transformadores de potência são equipamentos vitais aos sistemas elétricos, pois são eles os responsáveis pela mudança da tensão para um nível adequado, possibilitando a transmissão econômica de energia elétrica das unidades geradas até os centros de consumo. Além dos transformadores de potência, existe também uma grande diversidade de tipos de transformadores responsáveis em atender às mais variadas aplicações, tais como: transformadores para instrumentos de medição, TCs e TPs, transformadores de distribuição e pequenos transformadores para uso em aparelhos eletrodomésticos e industriais (RIES, 2007).

As concessionárias de energia elétrica solicitam a realização do ensaio de resposta em frequência dos transformadores com o intuito de se obter a assinatura do transformador. A partir da assinatura medida em fábrica, torna-se possível diversos tipos de análise na parte ativa do transformador. As análises podem ser realizadas com o intuito de verificação de falhas (ZAMBRANO, 2009), levantamentos de modelos matemáticos (DICK, 1980) ou simplesmente a verificação da faixa de frequência que o transformador pode atuar adequadamente.

Devido aos dispositivos de eletrônica de potência, saturação de transformadores, fornos a arco, entre outros, as distorções de tensão e corrente no sistema CA tem aumentado consideravelmente. Essas ondas não-senoidais podem produzir respostas em frequência imprecisas em TPs e TCs, por exemplo.

Com o objetivo de adequar os circuitos equivalentes às frequências harmônicas, os modelos matemáticos clássicos do TP e TC foram modificados para incluir, as chamadas capacitâncias parasitas e outros efeitos. Essas capacitâncias podem aparecer na isolação entre enrolamentos, e para altas frequências podem modificar bastante a resposta dos TPs e TCs. Além disso, a inclusão de outros efeitos como perdas por histerese e correntes de Foucault poderiam contribuir para melhorar, ainda mais, os modelos matemáticos.

5.4 CIRCUITOS EQUIVALENTES CLÁSSICOS

Circuitos equivalentes permitem que TP ou TC sejam estudados com formas de onda distorcidas usando a análise no domínio da frequência. Nas Figuras 5.1(a) e (b) são apresentados circuitos típicos do TP e TC para estudos com frequências harmônicas.

A análise da resposta em frequência por meio de modelo matemático permite na simulação a alteração virtual dos parâmetros do transformador, a fim de se analisar melhor o transformador para um fim específico.

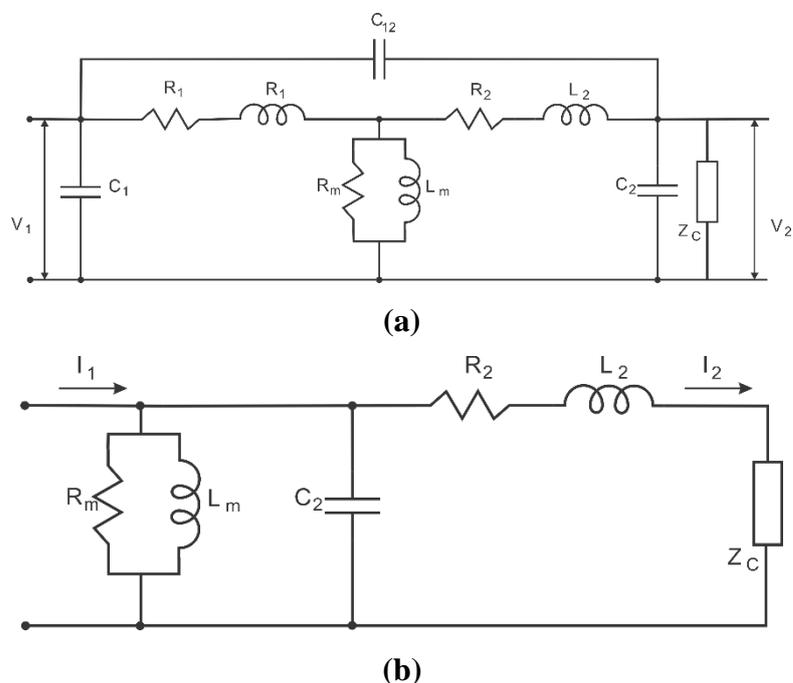


Figura 5.1 - Circuitos equivalentes com inclusão de capacitâncias parasitas. (a) TP indutivo (TP) e (b) TC do tipo barra (TC).

Nestas Figuras:

L_m, R_m = ramo magnetizante, indutância e resistência, respectivamente;

R_1, R_2 = resistência do enrolamento primário e do secundário, respectivamente;

L_1, L_2 = indutância do enrolamento primário e do secundário, respectivamente;

C_1, C_2 = capacitâncias parasitas associadas ao enrolamento primário e secundário, respectivamente;

C_{12} = capacitâncias parasitas entre o primário e secundário;

V_1, V_2 = Tensão RMS de entrada e saída respectivamente;

I_1, I_2 = Corrente RMS de entrada e saída respectivamente;

As resistências e indutâncias necessárias ao modelo são facilmente avaliadas por meio dos testes clássicos de circuito aberto e de curto-circuito, os valores de capacitância (capacitâncias parasitas), podem ser calculados segundo Samesina (1991). Esse cálculo é baseado na identificação de duas funções de transferência, ambas relacionadas a resposta em frequência do TP ou do TC. A primeira função é chamada de “teórica”, pois esta deriva da descrição matemática do circuito equivalente proposto. A segunda função é chamada de

“experimental”, encontrada por meio de teste em laboratório. Por comparação dos coeficientes das funções de transferência, as capacitâncias são determinadas.

5.5 MEDIÇÃO DE CORRENTE

O tipo mais comum de TC é o transformador toroidal utilizando um núcleo ferromagnético. Este possui, em virtude de sua construção, baixos valores de indutância de dispersão no primário e no secundário, e de resistência do enrolamento no primário. Sob condições normais de operação a corrente no primário do transformador será substancialmente menor do que o necessário para a saturação do núcleo, e a operação será sobre a porção nominalmente linear da característica de magnetização. Dessa forma, o circuito equivalente linear simples ilustrado na Figura 5.2 pode ser usado como base para o modelo de TC.

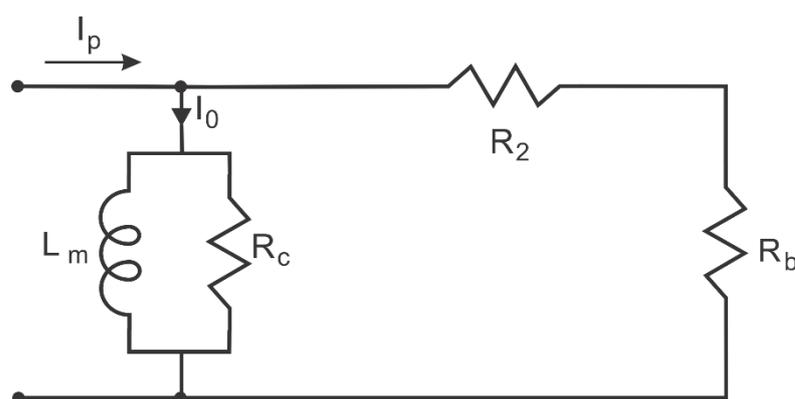


Figura 5.2 - Circuito equivalente de um TC básico.

A resposta em frequência dos TCs é determinada efetivamente pela capacitância presente e sua relação com a indutância. Essa capacitância pode ser apresentada como capacitâncias entre espiras, entre enrolamentos ou parasitas (*stray*). O efeito dessas várias capacitâncias pode, então, ser modeladas no circuito equivalente incluindo uma capacitância apropriada em paralelo com o braço de magnetização como na Figura 5.3(a).

Testes têm mostrado que, enquanto essa capacitância pode possuir um efeito significativo na resposta em altas frequências, o efeito nas frequências para o 50º harmônico é negligenciável, visto que sua impedância nessas frequências é muito maior do que no braço de magnetização, conforme mostrado na Figura 5.3(b).

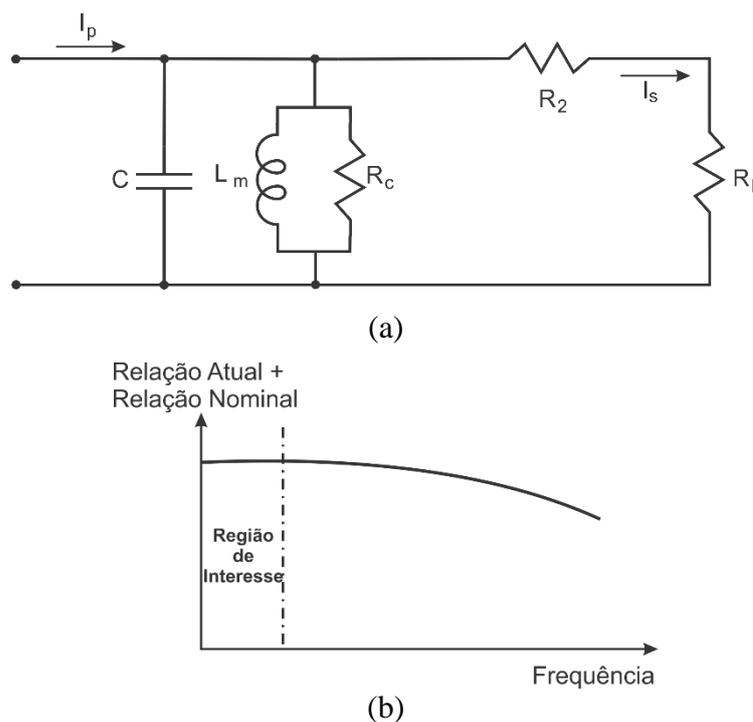


Figura 5.3 - Características da resposta em frequência de um TC: (a) circuito equivalente do TC incluindo capacitância; (b) resposta em frequência.

Além do que, formas de onda para frequências harmônicas também é possível que a corrente no primário contenha uma componente C.C. Se apresentar, essa componente C.C. não será transformada, mas causará o fluxo de núcleo do transformador tornando-o desequilibrado (*offset*). Se este desequilíbrio for suficientemente grande, o transformador será forçado na saturação com a perda subsequente de informação (ver Figura 5.4). Uma condição similar poderia originar-se do fluxo residual presente no núcleo do transformador como resultado de chaveamento.

Por esta razão, onde existe suspeita da presença da componente C.C. é utilizado um TC com um gap de ar no núcleo. Este gap de ar reduz o efeito da componente C.C. pelo aumento da relutância do núcleo e possibilita que a linearidade seja mantida. Devido a carga no TC tender a aumentar com a frequência, o fator de potência associado reduz-se com o aumento da frequência e o transformador produzirá uma tensão harmônica de saída maior do que se fosse para uma carga puramente resistiva. A magnetização aumentada resultante produzirá um erro adicional.

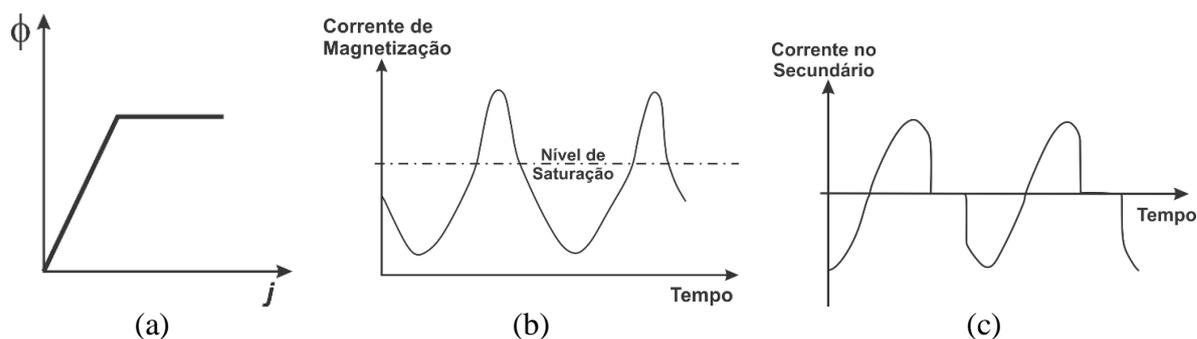


Figura 5.4 - Efeito da saturação da corrente secundária do núcleo do TC para uma carga resistiva: (a) característica magnetizante idealizada; (b) corrente magnetizante; (c) corrente do secundário.

As seguintes recomendações práticas são úteis e devem ser observadas sempre que possível:

- Se o TC é um tipo multi-secundário, deve ser utilizado a maior taxa. Altas taxas requerem baixas correntes de magnetização e tendem a ser mais precisas.
- A carga do TC deve ser de impedância muito baixa, para reduzir a tensão requerida no TC e, conseqüentemente, a corrente de magnetização.
- O fator de potência da carga deve ser máximo para prevenir sua impedância da elevação com a frequência e causando erros com a corrente de magnetização aumentada.
- Sempre que possível, é sugerido que o secundário do TC de medição seja curto-circuitado e a corrente monitorada com um TC *clamp-on* de precisão.

5.6 MEDIÇÃO DE TENSÃO

5.6.1 O Transformador de Tensão Magnético

O transformador de tensão magnético é geralmente modelado pelo circuito equivalente da Figura 5.5(a). Embora este circuito modele adequadamente a frequência fundamental não se consideram altas frequências. Para permitir estas, o circuito equivalente é modificado para o mostrado na Figura 5.5(b), com os capacitores C_1 à C_4 incluídos para representar as capacitâncias entre espiras, entre enrolamentos e parasitas do transformador.

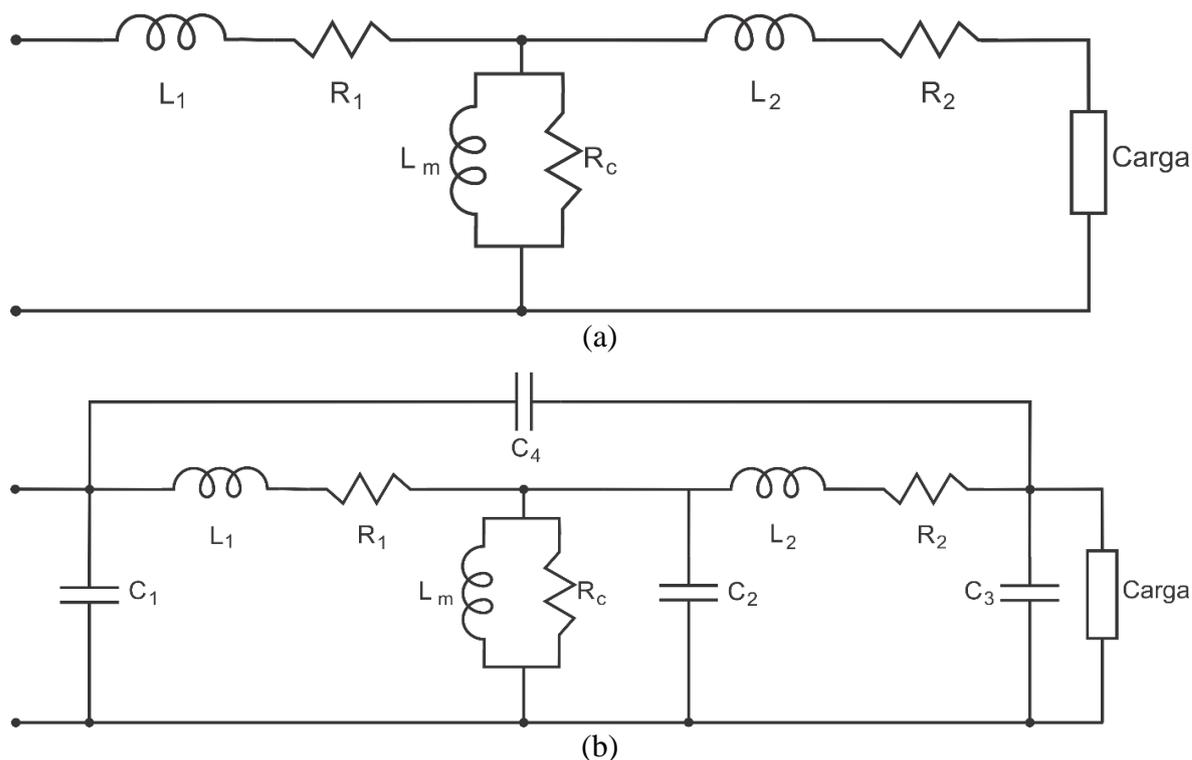


Figura 5.5 - Circuitos equivalentes de TP magnético: (a) circuito equivalente básico; (b) com capacitância adicionada.

Estudos como o de Silva et al.(2012) em TPC têm mostrado, com o estudo de modelos matemáticos, que transformadores operando em tensões próximas a 500 kV, é obtida uma atenuação linear para frequências de aproximadamente 1 kHz. Também Fernandes Jr.(2007) verificou que os TPCs possuem respostas aproximadamente lineares até 600Hz.

Em níveis de tensão elevados o transformador tende a exibir ressonâncias a baixas frequências, visto que os valores de capacitância interna e indutância variam com a isolamento necessária e sua construção. Os resultados apresentados na Figura 5.6 são ilustrativos do tipo de resposta obtido. A resposta exata para uma unidade particular será uma função de sua construção.

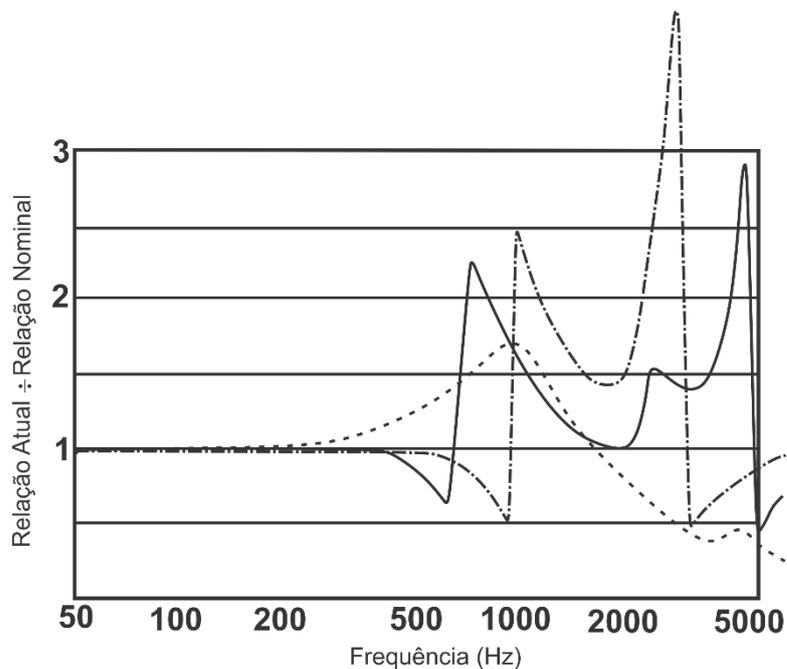


Figura 5.6 - Resposta em frequência dos TPs magnético. Tensão do primário de 400kV (linha cheia); tensão do primário de 200kV (traço e ponto); tensão no primário de 20kV (linha tracejada).

Fonte: ANEEL - Contribuição para Normalização da Qualidade de Energia Elétrica.

Samesina (1991) propôs um circuito equivalente para o TP magnético. Este circuito é ilustrado na Figura 5.7.

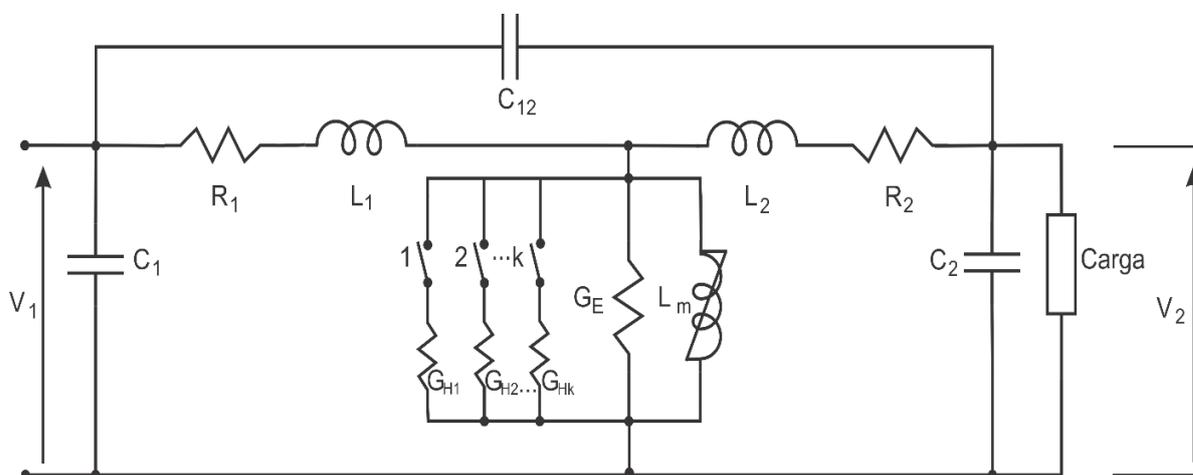
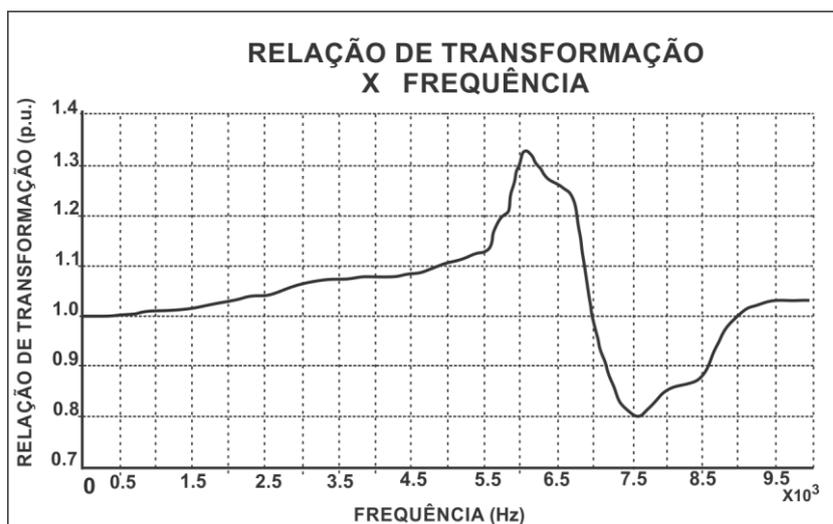
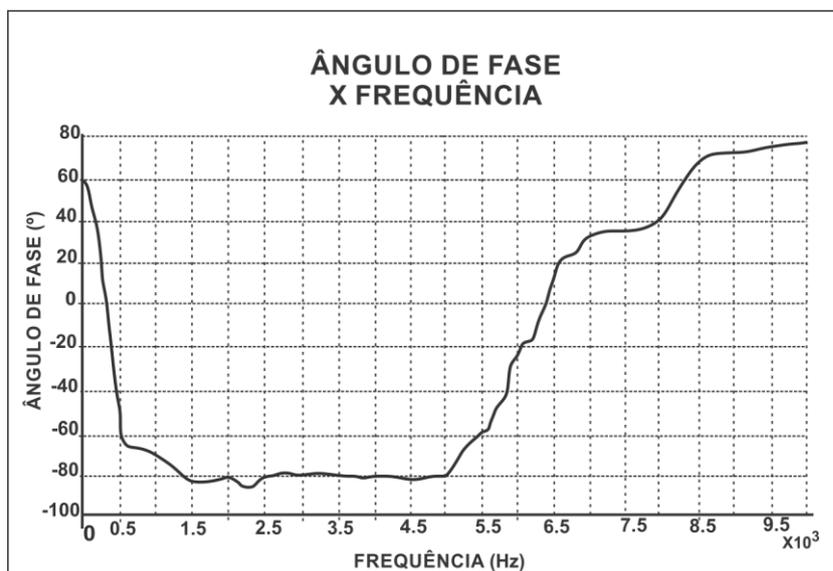


Figura 5.7 – Circuito equivalente do TP para o domínio da frequência.

Os valores necessários para as condutâncias G_{H1} , G_{H3} , G_{H5} e G_E , foram calculados segundo os parâmetros de projeto do TP magnético, os quais são 7×10^{-8} S, 2×10^{-8} S, $1,3 \times 10^{-8}$ S e $5,5 \times 10^{-8}$ S, respectivamente. As relações por unidade e ângulo de fase correspondente estão ilustrados na Figura 5.8.



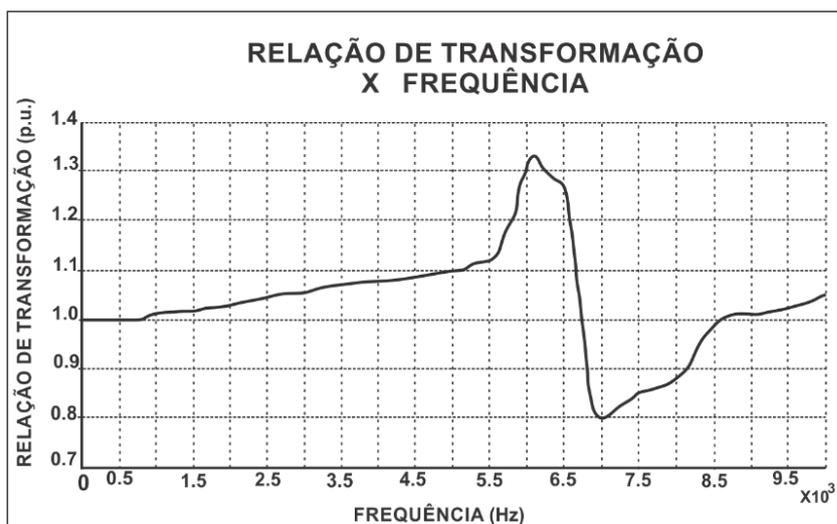
(a)



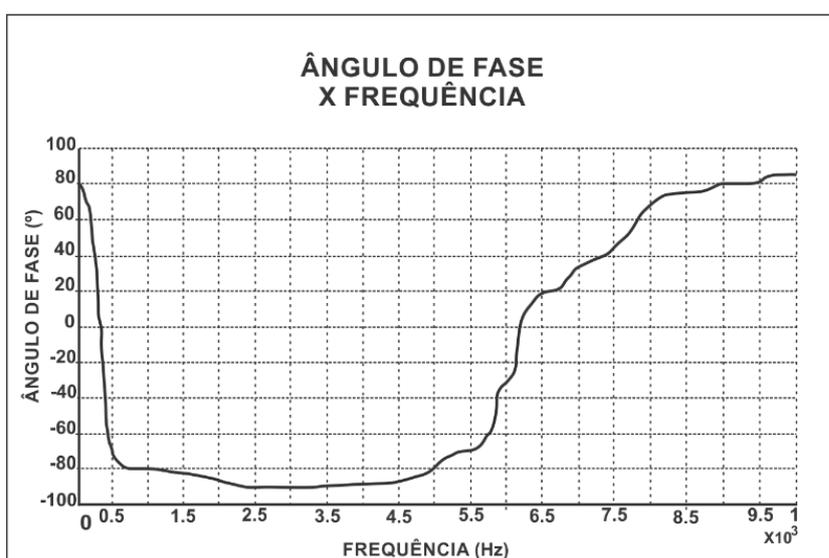
(b)

Figura 5.8 – Resultados computacionais associados ao modelo com capacitâncias parasitas e dependentes da frequência. (a) Relação de transformação e (b) Ângulo de Fase.

Em seguida os valores medidos no laboratório foram repetidos e estão ilustrados nas Figuras 5.9 (a) e (b). Nestas Figuras estão associadas a relação de transformação (em p.u.) *versus* frequência e ângulo de entrada/saída *versus* frequência.



(a)



(b)

Figura 5.9 – Resultados práticos para o TP. (a) Relação de transformação e (b) ângulo de fase frequência.

Alguns valores típicos estão ilustrados na Tabela 5.1, levando em consideração os valores medidos como referência, portanto a relação de transformação e o ângulo de fase são comparados com o valor esperado.

Tabela 5.1 – Valores medidos e calculados para a relação de transformação e ângulo de fase do TP.

ff (Hz)	Resultados Medidos		Modelo com capacitâncias parasitas e dependentes da frequência			
	k_T	θ	k_T	$\Delta \epsilon_k \%$	θ	$\Delta \epsilon_\theta \%$
60	1,0	80	1,0	0	60	25
500	1,0	-70	1,0	0	-50	-28
1000	1,01	-80	1,015	-1	-82	3
2000	1,03	-85	1,03	0	-81	-5
5000	1,1	-78	1,1	0	-80	3
10.000	1,05	85	1,020	3	75	12

É possível verificar uma grande semelhança entre os valores de ensaios e a resposta do modelo matemático, principalmente para as frequências menores que 1 kHz.

5.6.2 Transformador de Tensão Capacitivo

O Transformador de Tensão Capacitivo (TPC) combina um divisor de potencial capacitivo com um TP magnético como mostrado na Figura 5.10. Essa combinação possibilita as necessidades de isolamento da unidade magnética para ser reduzida com uma economia associada ao custo.

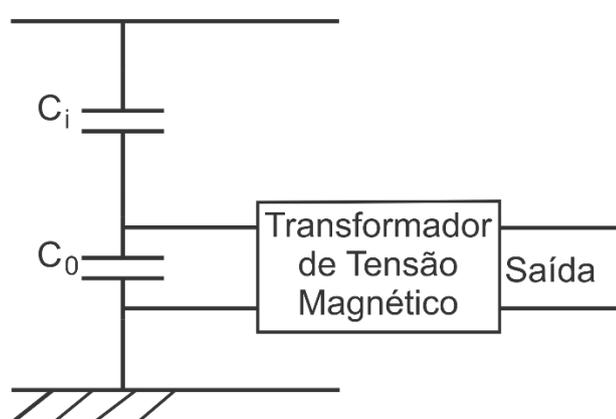


Figura 5.10 – TP capacitivo

Tem-se verificado que a forma da resposta em frequência obtida é dependente na magnitude da componente fundamental e seu relacionamento para qualquer ponto de transição na característica de magnetização do aço do transformador. Uma grande mudança na forma da resposta em frequência pode resultar em pequenas alterações na magnitude de fundamental. Na Figura 5.11 é apresentado este efeito.

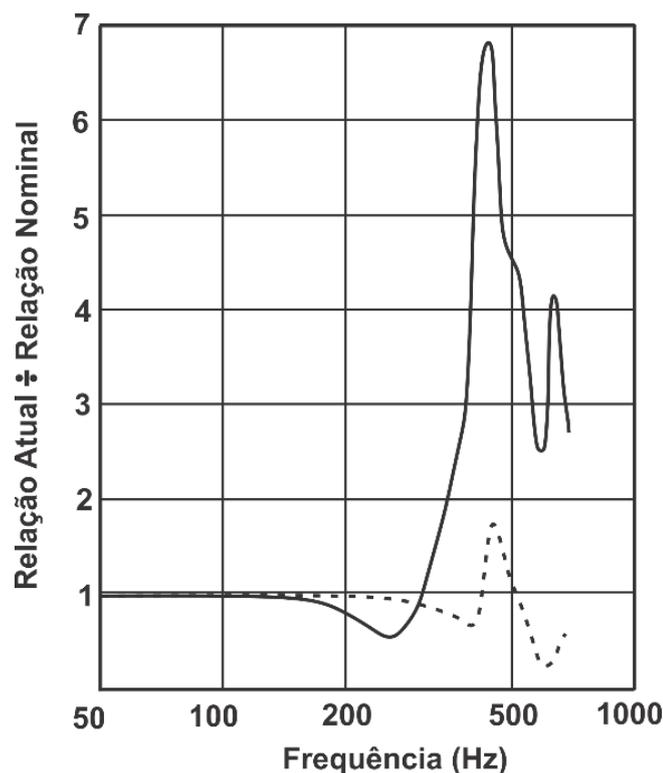


Figura 5.11 - Resposta em frequência de um TP capacitivo mostrando o efeito de uma pequena variação na tensão fundamental. V_1 (linha cheia); V_2 (linha tracejada); $V_2 > 99V_1/100$.

Fonte: Contribuição para Normalização da Qualidade de Energia Elétrica.

5.7 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVO EM 230KV

Em Fernandes Jr. (2003) foi apresentado um modelo de um TP capacitivo (TPC) que pode ser utilizado em programas tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Uma rotina computacional foi desenvolvida para o cálculo dos parâmetros R , L e C lineares de um TPC de 230 kV a partir dos valores de amplitude e fase da relação de tensão do TPC medidos em laboratório, de 10 Hz a 10 kHz. Os erros de amplitude e fase foram pequenos em toda a faixa de frequência. O acoplamento magnético entre os múltiplos enrolamentos do TP indutivo (para simular efeitos de ferroressonância) e as características não lineares do núcleo magnético e do para-raios de carboneto de silício foram levadas em conta no modelo a fim de melhorar a resposta do TPC a sobretensões transitórias. A tensão de disparo do centelhador do para-raios foi medida em laboratório de alta tensão para estimar a tensão residual dos para-raios e obter a sua característica não linear.

Simulações de sobretensões oriundas do fenômeno da ferroressonância foram realizadas. Os resultados revelam que alguns cuidados devem ser observados no cálculo dos

parâmetros do Circuito Supressor de Ferroressonância (CSF) para evitar problemas de instabilidade numérica em simulações no domínio do tempo. O circuito de proteção é bastante eficiente no amortecimento de tensões transitórias que aparecem no TPC quando um curto-circuito é interrompido em um de seus terminais secundários.

Deve-se destacar a importância dos ensaios realizados por Fernandes Jr. (2003), pois são estes resultados que interessam a esta pesquisa.

5.7.1 Medições em Laboratório

Medições de resposta em frequência de amplitude e fase da relação v_o/v_i foram realizadas em um TPC de 230 kV. Um filtro RC passa-baixa, conectado entre os terminais secundários Y1 – Y3, foi usado para atenuar ruídos de alta frequência. Um gerador de sinal alimentando um amplificador, com tensão máxima de 2 kV pico a pico, foi conectado entre o terminal de alta tensão e o terra, como é mostrado na Figura 5.12.

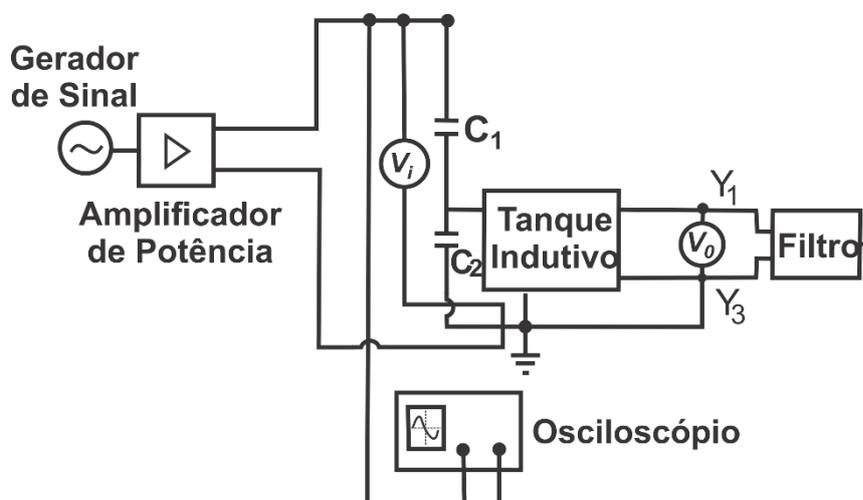


Figura 5.12 – Diagrama esquemático Para medição de resposta em frequência em laboratório.

5.7.2 Medições da Característica não Linear do TPC

Uma fonte de tensão senoidal foi aplicada entre os terminais do TPC e gradualmente elevada até 251,3 V. Os valores de tensão e corrente eficazes foram obtidos. Os dados foram convertidos em valores de pico $\lambda - i$ usando uma rotina de Neves (1993). Para estimar a saturação do núcleo magnético do TP, a indutância de núcleo de ar foi calculada pela expressão:

$$L_{sat} \cong \frac{N^2 \mu_0 S}{l} \quad (5.1)$$

Sendo, $N = 81$ o número de espiras do enrolamento secundário, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$ é a permeabilidade magnética do vácuo, $S = 91,5 cm^2$ é a área da seção transversal do núcleo e $l = 71,28 m$ é o comprimento médio do enrolamento secundário. Foi considerado que a saturação ocorre com uma densidade de fluxo de $2,1 T$ que corresponde a $\lambda_{joelho} = 1,556415 V.s$. O valor de i_{joelho} foi calculado a partir de Neves (1993) depois de uma extrapolação logarítmica dos pontos da curva $V - I$ rms. Isto corresponde ao penúltimo ponto do conjunto de pontos $\lambda - i$ mostrado na Tabela 5.2. A inclinação do último segmento é L_{sat} .

Tabela 5.2 – Relação V-I para medição de características não lineares.

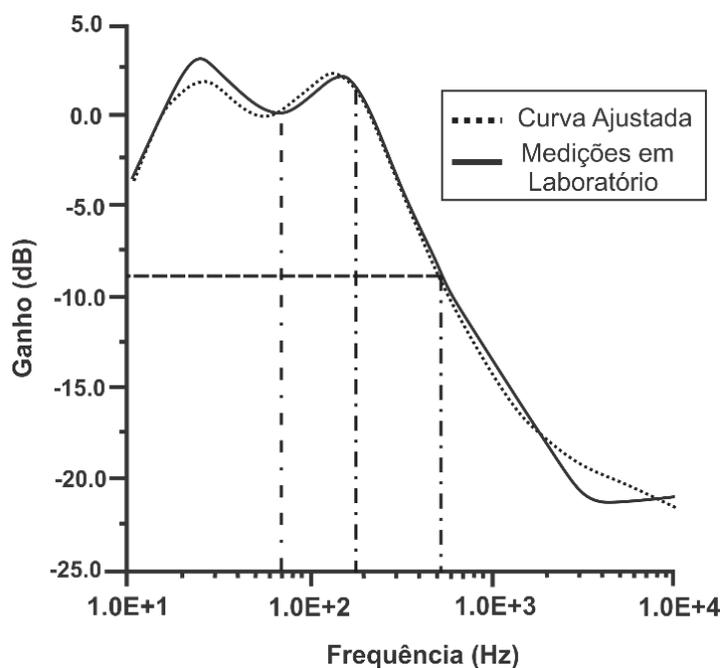
CORRENTE (A)	FLUXO (V.s)
0,072881	0,025772
0,076368	0,189066
1,429369	0,396889
2,511675	0,748388
3,662012	0,863553
4,587227	0,903317
5,712037	0,942706
55,527018	1,556415

5.7.3 Parâmetros do Modelo do TPC de 230 kV

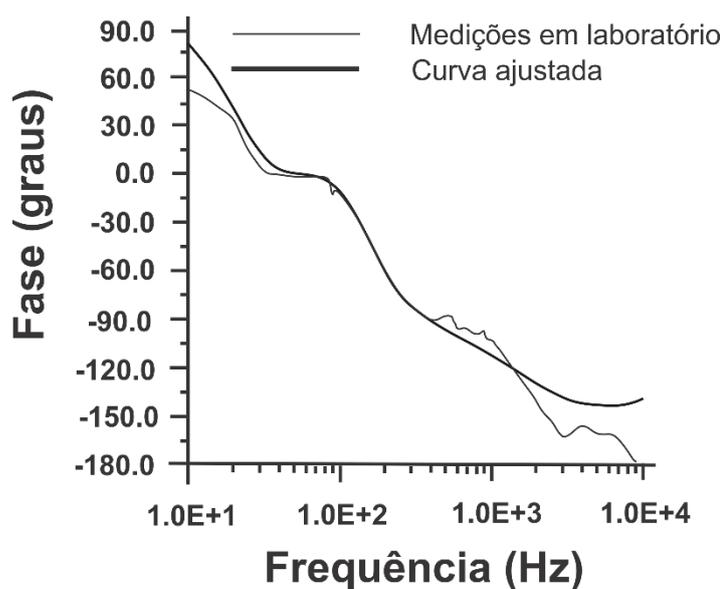
Os parâmetros do TPC de 230 kV foram estimados a partir dos dados de amplitude e fase da relação de tensão medidos em laboratório. Os parâmetros ajustados para o modelo matemático, são mostrados na Tabela 5.3. As curvas de amplitude e fase da relação de tensão medidas e ajustadas são mostradas por meio da Figura 5.13.

Tabela 5.3 – Parâmetros estimados do TPC de 230 kV.

$R_C = 0,39 \Omega$	$L_P = 4,92 \text{ mH}$	$L_{f2} = 47,39 \text{ mH}$
$L_C = 3,71 \text{ mH}$	$R_m = 50,6 \Omega$	$R_f = 4,99 \Omega$
$C_C = 11486 \mu\text{F}$	$L_m = 700 \text{ mH}$	$M = 9,31 \text{ mH}$
$C_P = 216,3 \text{ nF}$	$L_{f1} = 10,87 \text{ mH}$	
$R_P = 0,0395 \Omega$	$C_f = 166,39 \mu\text{F}$	



(a)



(b)

Figura 5.13 – (a) Curva de resposta em frequência do módulo do TPC de 230 kV. (b) Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada.

É possível verificar que existe uma atenuação de aproximadamente 7(sete) decibéis, isto é, para um sinal lido no secundário, existe uma queda de aproximadamente de aproximadamente 5 vezes o sinal que realmente deveria ser lido na frequência de 600Hz.

De acordo com Fernandes Jr. (2003) os erros médios de amplitude e fase para a estimativa inicial dos parâmetros são, respectivamente, 23,3 % e 16,0°. No final do ajuste, os erros médios de amplitude e fase são, respectivamente, iguais a 5,5 % e 8,9°. No processo de

ajuste, alguns parâmetros conhecidos do TPC com razoável precisão, que são os casos de L_c e R_p , ficaram dentro de uma tolerância de 20 % para realizar um ajuste fino.

Deve-se ressaltar que, para a maioria das concessionárias, os perfis detalhados do consumo e da geração harmônica por parte dos consumidores, na sua representação como uma fonte harmônica global, bem como o impacto causado no sistema supridor, são praticamente "desconhecidos" (TOSTES, 2003).

5.7.4 Escolha do TPC para Medição da Grandeza

Em Tostes (2003) realizou-se o levantamento da resposta em frequência de vários TPCs, inclusive o TPC que está instalado o analisador de energia que coletou os dados para esta pesquisa. Observou-se que alguns TPCs (ver Tabela 5.4) apresentam uma resposta em frequência linear dentro da faixa de frequência de 60Hz a 3000Hz, conforme mostrado na Figura 5.14.

Tabela 5.4 – Dados técnicos do TP ensaiado.

Nr. De Série	SP 13724
Tipo	TPMC 69
Nível de Isolamento	69
Nível de Impulso	350 V-U
Tensão Nominal	Primária 40.250 V
Secundário	115/67,08 V
Classe de exatidão	0,3 200
Potência	4000 VA
Regime de tensão permanente	1,15
Relação de Transformação	350:1 (1-3; 4-6) 600:1 (2-3;5-6)

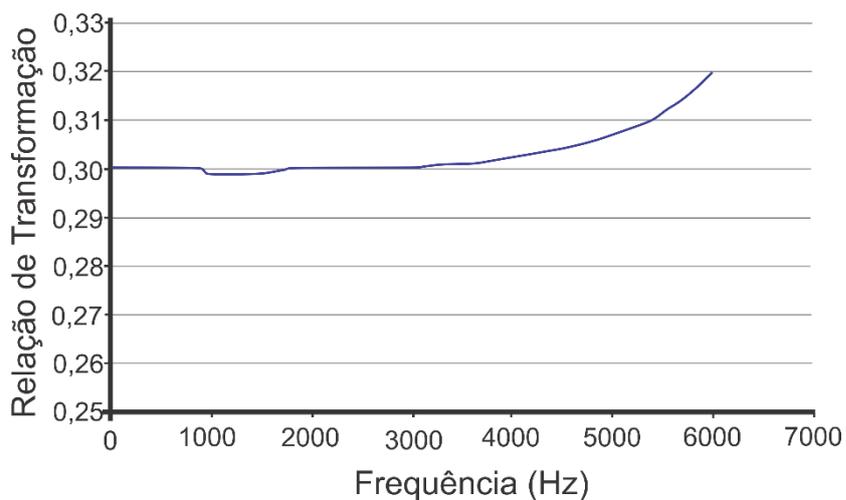


Figura 5.14 - Curva de saída do secundário do TP de 69 kV, entrada 104,9V- SP 13724/ TPMC 69.

Entretanto, a grande maioria dos TPs encontrados, na prática, nas subestações são o VTOF245 e o CVE245/900/60 especificados nas Tabelas 5.5 e 5.6, e tem seu comportamento apresentado, conforme mostrado nas Figuras 5.15 e 5.16 respectivamente. É necessário o destaque para o transformador representado pela tabela 5.6, pois este é o TPC em que está instalado os analisadores de energia na SE Guamá.

Tabela 5.5 – Resposta em frequência linear na faixa de 60 a 3000 Hz, para o TP VTOF245.

Nr. De Série	82104801
Tipo	VTOF245
Tensão Nominal	Primária 230 kV
Secundário	115/67,08 V
Fabricante	Siemens
Relação de Transformação	2000:1

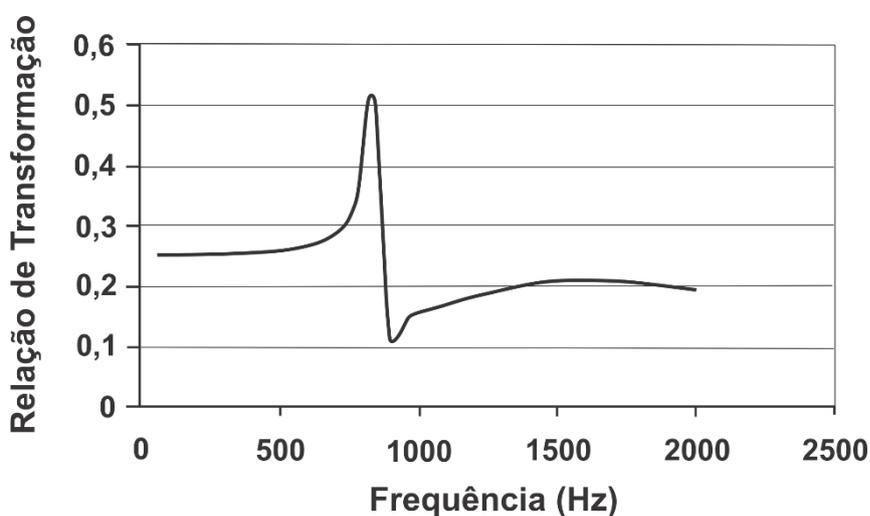


Figura 5.15 - Curva de saída do secundário do TP de 69 kV, entrada 104,9V- VTOF245.

Tabela 5.6 – Descrição do TPC CVE 245, onde estão instalados os analisadores de energia na SE Guamá.

Nr. De Série	S17118
Tipo	CVE 245/900/60
Tensão Nominal	Primária 230 kV
Secundário	115/67,08 V
Fabricante	HAEFELY
Relação de Transformação	2000:1

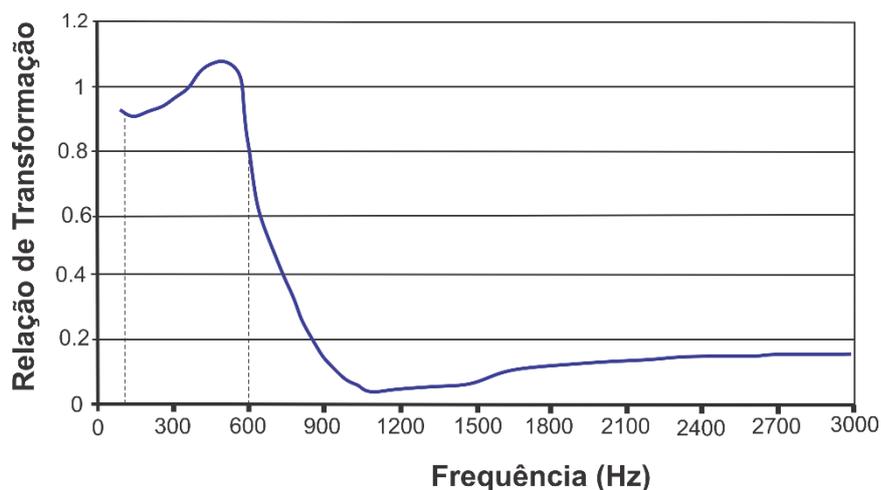


Figura 5.16 - Curva do secundário da DCP 230kV, na SE Guamá.

As medições realizadas nestes TPCs apresentam distorções consideráveis, precisando sofrer ajustes específicos para cada frequência. Principalmente nas frequências acima de 600 Hz, pois a partir desta frequência a atenuação é bastante significativa (Tostes 2003). Apesar de ter sido realizado com a finalidade da verificação da resposta em frequência para o “Desenvolvimento do Protótipo de um Instrumento Virtual para Análise on-line de Perturbações” com o próprio nome do artigo descreve. Aqui foi utilizado para verificação do comportamento das harmônicas no secundário deste TPC. Com isso é possível verificar-se um bom grau de precisão na leitura do secundário deste TPC, até a 10ª harmônica (600Hz). Para valor de frequência existe a necessidade de compensação de aproximadamente 0,5 dB. Esta compensação pode ser feita através do analisador de energia que será descrito.

5.8 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO POWER SENTINEL 1133 A

O modelo 1133A *Power Sentinel*, é um Dispositivo Elétrico Inteligente (IED) projetado para prover medições de alta precisão, operando largamente em estações de fornecimento de energia.

Para máxima utilização e flexibilidade, a Arbiter tem projetado um software, PSCSV para o sistema operacional Windows que proporciona uma grande seleção de configurações de instrumentos e opções de aquisição de dados para o modelo 1133A. Podem ser feitas alterações (*off-site*) via conexão Ethernet 10Base-T por até oito portas COM virtuais separadas. Uma porta IrDa é disponível para uso do PSCSV quando estiver equipado para esse tipo de comunicação. E também, futuras atualizações (*firmware*) poderão ser acessadas através de quaisquer das conexões seriais (*on-site ou off-site*).

As seis principais funções do 1133A são:

- Medição de tensão e corrente: enquanto os medidores watt/hora tradicionais estão limitados em 0,1% de precisão (em laboratório), o 1133A possui 0,025% sob diversas condições. Utilizando a tecnologia *Energy DSA* e a sincronização de tempo GPS, o 1133A torna-se um bom instrumento multifuncional.
- Monitoração de qualidade de energia: os algoritmos de análise digital de sinais, *Energy DSAT*, provêm a informação adicional requerida para tornar decisões de ajuste de energia, automático como necessário proceder. Valores como **harmônicas**, Fator-K, *flicker*, interrupções e registros de dado por intervalo de tempo são muito importantes para o faturamento e gerenciamento da energia. As harmônicas de corrente e tensão são medidas além da 50ª harmônica (3 kHz) e podem ser especificadas pelo PSCSV disponível por download da página da web, disco flexível ou CD.
- Controle e Medição de Sistema: o 1133A mede ângulo de fase, defasagem de frequência, e defasagem de tempo. Dados de fasor conforme o padrão IEEE 1344, a uma taxa de 20/segundo. Com esses dados o monitoramento em tempo real e o controle de estabilidade e fluxo de potência são práticos.
- Sincronização por GPS interno: um receptor de satélite GPS interno sincroniza o 1133A dentro de 1 μ s da Coordenada de Tempo Universal (UTC), o qual pode ser ajustado ao tempo local. Com a sincronização, dados de rendimento podem ser acumulados num intervalo de tempo tão curto quanto um minuto. Outros equipamentos de subestação, tal como registradores digitais de falhas relés de estado sólido, unidades de estação remota, e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) podem ser sincronizados com uma saída padrão IRIG-B.
- Registrador de Dados e Eventos: registradores padrão de 16 MB, e 32 MB opcional, memória flash interna para gravação de todas as formas de dados. Essa memória não volátil pode ser usada para gravação de dados de rendimentos, qualidade de energia, falhas detectadas internamente, alarmes, eventos internos e externos, etc. A memória também pode ser

particionada para propósitos específicos. Quatro entradas de eventos opticamente isolados podem ser conectadas diretamente ao equipamento para monitorar eventos externos específicos.

- **Comunicações de Dados:** existe um host com possibilidades de conexão para configurar e carregar dados do 1133A. Essas possibilidades incluem duas portas seriais (conectores RJ-11) que podem ser especificados como RS-232, RS-458 ou Modem V.34bis. Para a Ethernet, existe uma porta 10Base-T (conector RJ-45) configurada com oito portas virtuais endereçáveis no 1133A. Finalmente, uma porta IrDa localizada no painel frontal para fácil e eficiente conexão.

O 1133A possui também autocalibração em tempo real que elimina muitas fontes de erro. Esse processo mede a saída de uma fonte de calibração interna, tempo multiplexado junto com os sinais de entrada. Um conjunto completo de medidas de calibração é executado uma vez a cada segundo. Passando o sinal de calibração através dos mesmos circuitos de medida como os sinais de entrada, acúmulos em valores componentes, sensibilidades de temperatura, e muitos outros erros são completamente removidos. Essa aproximação de projeto minimiza o número de componentes, as quais podem afetar a precisão.

Para assegurar a máxima exatidão, existem calibrações TC e TP. Utilizando uma TC de referência calibrada, uma fonte de corrente e um dispositivo de medida de canal dual, TCs podem ser caracterizadas e constantes introduzidas no 1133A. Aplicando este método, um TC de 1% pode ser usado a 0,025%, assegurando a exatidão do instrumento. Através deste recurso é possível ajustar os ganhos do instrumento.

5.8.1 Características Gerais

O 1133A usa um terminal *strip* para a entrada de energia, e um cabo de energia *user-supplied*. Todos os sinais elétricos medidos usam conectores destacáveis, incluindo a antena. As conexões de interface de dados são por conectores *RJ-style* e uma porta IrDa no painel frontal. Para coleta de dados e configuração de instrumentos, o PSCSV permite ao usuário montar horários prescritos de medição e transmissão de dados on-line ou por conexão direta.

A antena fornecida com o 1133A é projetada especificamente para usar com os receptores GPS, resistente às intempéries, estão incluso 15 metros de cabo coaxial RG-6 *weatherproof* baixa perda.

Um módulo terminal strip de 3 pinos de entrada de energia, *power*, provê conexão para o suprimento de energia interna, o qual é calculado geralmente em 85- 264 Vac, 47-63 Hz ou 110-275 Vdc, 5 VA. Um *kit* de montagem inclui dois jogos separados para montagem em suporte padrão de 19 polegadas.

5.8.2 Especificações Técnicas e Parâmetros Operacionais

5.8.2.1 Entradas de Tensão e Corrente C.A.

Os conectores de entrada de tensão e corrente permitem medições até três fases de tensão e corrente. Todos os outros valores — tais como potência e energia são derivados dessas medidas e do relógio GPS interno. As configurações e variações de entrada possíveis são especificadas abaixo:

a) Configurações de Entrada

3 Fases	3 elementos, 2 1/2 elementos, 2 elementos
1 fase	2 elementos, 1 1/2 elemento, e 1 elemento

b) Tensão de Entrada

Variação (3 ϕ /1 ϕ)	0-69, 120, 240, ou 480 Vrms, selecionável (fase-fase para 2 elementos, fase-neutro para 2 1/2 e 3 elementos).
Over Range	88, 175, 350 ou 700 Vrms, nominal

c) Corrente de Entrada

Variação (3 ϕ /1 ϕ)	2.5, 5, 10, ou 20 Arms selecionável, por elemento
<i>Over Range</i>	2.9, 5.9, 7, 11, ou 23.5 Arms, nominal (corrente J máxima de entrada Contínua: 20 Arms por elemento)

d) Volt-Amps (VA), Watts (W), Volt-Amps-Reactance (VAR)

Variação	Produto de tensão e da corrente calculadas e números de elementos.
----------	--

e) Razões e Constantes de Compensação

TC e TP	Razoes nominais, compensação de magnitude e fase, CT utiliza o modelo de curva quadrática <i>spline</i> .
Transformador	Compensação de cobre e ferro

f) Frequência de Entrada

Variações	45 — 65 Hz, para precisão especificada
Harmônicas	Até 3 kHz

g) Conectores de Potência Nominal de Entrada

Os conectores de tensão e corrente de entrada AC são especificados abaixo:

Conexões	Terminal parafuso-braçadeira removível, aceitando condutores <i>stranded</i> ou sólidos de 02 — 4 mm ² (AWG 24 -10)
Isolação	400 V, nominal, para neutro/chassi, oscilação de tensão classe III 600 V, nominal, para neutro/chassi, oscilação de tensão classe II

5.8.2.2 Interface de Instrumentos

Quatro conexões de saída, conectores de 3 polos no painel traseiro do 1133A para equipamento externo quando existe uma condição predeterminada. Estas quatro saídas são especificadas como mostra a tabela abaixo. A programação dessas saídas de contato através do PSCSV ainda não está disponível.

Número e Tipo	Quatro, contato tipo C (SPDT) com 4
Conexões	Terminal <i>strip</i> com 12 pólos conectores iguais de 3 pólos de 5 mm,
Potência Nominal	250 Vac /125 Vdc, 8 A max. 200 VA / 150 Wmax.
Isolação	4000 Vrms para 1 minuto para o chassi
Funções Seleccionáveis	Controle programável de carga, com tempo prefixado ou pela interface do sistema; Falha <i>Failsafe</i> (<i>faulted with power off</i>); <i>Alarme Failsafe</i> ; <i>Out-of-Lock/Failsafe</i> . Um pulso por hora; circuito fechado por um minuto até uma hora; Outras funções, como requeridas.

a) Conexões de Eventos de Entrada

Quatro conexões de entrada com 2 polos no painel traseiro para aceitar um nível de externo que pode ser marcado utilizando o relógio GPS interno. Esses eventos podem ser registrados na memória e lidos pelo painel frontal ou através do programa. Os eventos também

podem ser interpretados como níveis de entrada de tensão e corrente C.A., ou muitas outras quantidades, tais como o nível mínimo de memória flash.

Número e Tipo	Quatro entradas, isoladas opticamente de 24 — 240 Vdc (pode ser configurado para nível Lógico 5 V)
Conexões	Terminal strip com 8 polos de 5 mm, com 4 conectores iguais de 2 polos.
Isolação	4000 Vrms para 1 minuto para chassi
Resolução	1s

b) Armazenamento de Dados na Memória flash

Capacidade	16 MB (incluso), 32 MB (opcional), o número de registros armazenados depende dos itens de dados selecionados.
Configurações	250, 64K bloc/cs de registros de dados(padão 16MB)
Dados	Selecionáveis de todas as funções medidas e totalizadas pelo 1 133A; cada registro é armazenado com uma etiqueta de tempo, <i>time tag</i> .
Intervalo de Armazenamento	Selecionável; padrão: 15 min - Variação de Tensão, Corrente, Harmônicas Frequência; 10 min — <i>Flicker</i> ; 24 h — IVDF; Potência — outros intervalos tão curtos quanto 1 min podem ser selecionados; Dados de eventos registrados em ocorrência.
Tempo de vida	MÍNIMO de 100000 ciclos de registro
Retenção de dados	Indefinido; não é necessário bateria ou alimentação para reter os dados.

c) Especificações de Medições

As especificações de precisão incluem algumas fontes de incerteza. Exceto conforme foi notificado, as especificações aplicam-se para o âmbito de operação completo, incluindo temperatura (-10°C até +50°C), tensão de linha, variação de entrada contendo over-range especificado, fator de potência, frequência de entrada, e acúmulos sobre um intervalo de calibração de um ano. As especificações assumem sincronização para GPS e operação em modo de 3 elementos ou em um sistema bem equilibrado onde o desequilíbrio não degrade a exatidão.

Watts, Wh	0,025% de leitura, 10% de variação ou melhor e PF>0,2
<i>Under-range</i>	0,0025% de variação, abaixo de 10% de variação
Fator de Potência	0,005% de VA, PF > 0.2
VA, VAh	0 mesmo como em W, Wh sem efeito PF
VAR, VARh	0 mesmo como em W, Wh substituindo PF por $(1 - PF^2)^{0.2}$
Vrsm	0,02% de leitura ou 0,002% de variação
Arsm	0,03% de leitura ou 0,0031 de variação

V ² h	0,04% de leitura ou 0,004% de variação
A ² h	0,06% de leitura ou 0,006% de variação
Ângulo de Fase, Fator de Potência	0,01°, fase-fase ou tensão-corrente, 10% de variação mínima 0,0002 Sen (φ), 10% de variação mínima.
Harmônicas	0,05% THD
Frequência	<1 ppm (0,0001%) de leitura, 50 ou 60 Hz nominal,
Fase de Sistema	Mais o erro de tempo de base 0,03° mais (erro de tempo de base. 360°. Frequência).
Tempo de Sistema	1 μ s mais o erro de tempo de base
Entradas de Eventos	$\pm 10\mu$ s (típico)

5.8.2.3 Capacidade de Medição de Qualidade de Energia

a) Medidas de Harmônicos

Os dados de harmônicas são especificados através do PSCSVT sob duas categorias: *Acquire Real Time Harmonic Data*, e *Acquire Real Time Harmonic Summary*.

b) Tempo, Fase e Frequência do Sistema

Comparando o sistema de tempo e frequência gerados, ao sinal GPS como uma referência. O 1133A pode medir e gravar a diferença (integrada) em tempo e frequência, como também outros fatos de tempo relacionados ao sistema.

Tempo do Sistema	Acumulação ilimitada com resolução de $\pm 1 \mu$ s
Frequência	7 dígitos, xx.xxxxx Hz
Fase do Sistema	0- 360 graus com resolução de 0,01 graus
Efeito de DC e Harmônicas	Nenhum; rejeitado por filtro digital de banda estreita.

c) Sincronização GPS

O 1133A inclui um receptor GPS de oito canais, os quais provêm tempo exato para instantes menores que um microssegundo. Comparando-se à saída do receptor GPS a um oscilador interno de 10 MHz o 1133A mantém a precisão.

5.8.2.4 Informações do GPS

a) Características de Cabo / Antena GPS

Tracking	GPS-L1 (1575,42 MHz) 8 canais (tracks up to 8 satellites)
Aquisição	Geralmente em 2 minutos
Precisão	UTC — USNO $\pm 1\mu s$.
Indicação de <i>out-of-lock</i>	Via interface do sistema e monitor de estados; via fechamento de contato, <i>contact closure</i> , opcional.
Alimentação	+5 Volts CC, 22 mA, fornecido pelo cabo da antena do 1133A
Frequência	1575,42 MHz

b) Diagrama de Conexão no Sistema Elétrico

A seguir é apresentado o diagrama que descrevem como foi conectado o 1133A no sistema. Na Figura 5.17 é apresentado o diagrama da montagem física do equipamento e como este está ligado na subestação.

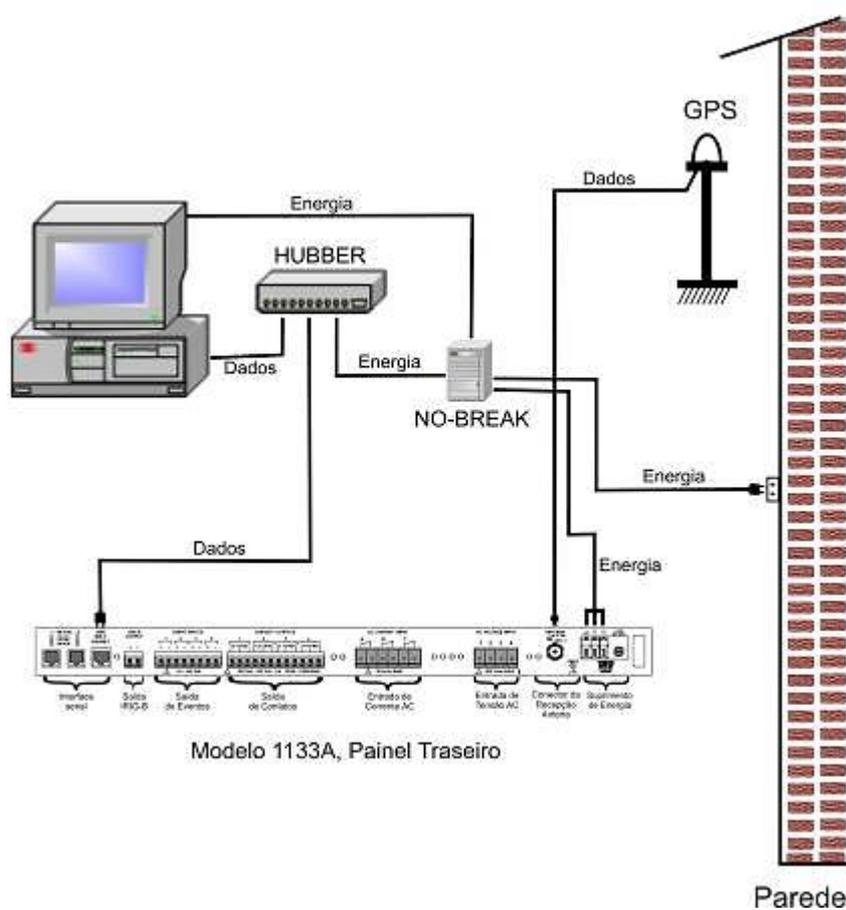


Figura 5.17 – Esquemático da ligação do 1133A nas subestações do Guamá e Utinga.

5.9 VALIDAÇÃO DAS MEDIÇÕES

5.9.1 – Erro do GPS

O GPS possui uma sincronia de $\pm 1\mu s$. Para dois aparelhos que devem estar sincronizados para uma mesma medição, na pior situação eles estariam com um deslocamento temporal de aproximadamente $2\mu s$. Na figura 5.18 é mostrado a configuração da instalação na SE do GPS.

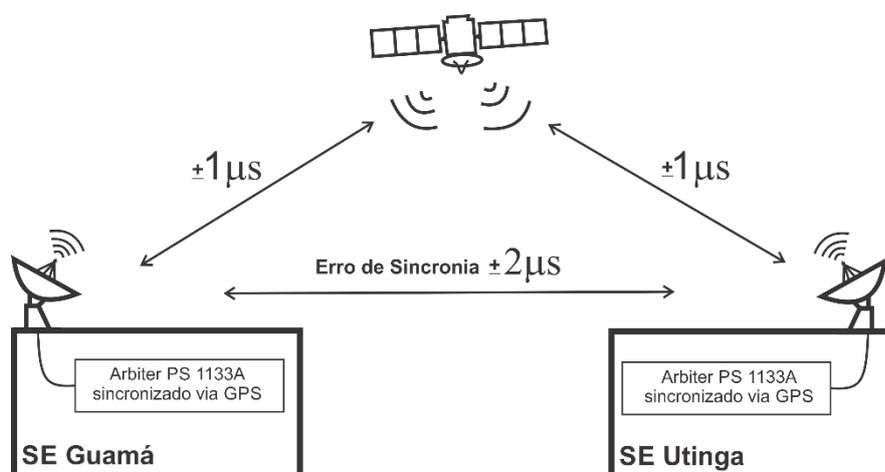


Figura 5.18- Diagrama da diferença de sincronia entre os GPS dos analisadores de energia nas SE

A harmônica fundamental (60Hz) possui um período de 0,017s, que é 8500 vezes mais lento que o atraso na sincronia entre os dois equipamento. Neste caso para a fundamental é possível medir o mesmo ciclo, com um atraso desprezível.

É necessário estender esta análise para a 10ª harmônica (600Hz), a fim de verificar a medição das variáveis elétricas no limite harmônico proposto.

O período da 10ª harmônica é de 0,0017s, que é 833 mais lento que o atraso dos analisadores, dando uma boa margem de segurança para medição desta frequência.

5.9.2 Erros do TP/TC

Como já foi visto, o valor indicativo de uma medição em um TP ou TC, é aquele que agrega o valor real da medição, os efeitos parasitas, e a influência do instrumento de medição sobre o componente ou circuito a ser medido. O valor obtido e mostrado pelo instrumento de medição, guarda em si uma perda de informação relacionada à classe de exatidão do instrumento. Por este motivo, os valores indicativos contêm erros quando

comparados aos valores efetivo e verdadeiro. Eles também variam de medição para medição dependendo das condições encontradas em campo (temperatura, conexões). Quanto mais o valor indicativo se aproximar do valor efetivo mais qualidade se tem na medição (o valor efetivo é o que se interessa medir, de fato).

Tomando como base o estudo de modelos e de ensaios de transformadores, determinou-se os limites seguros para aquisição de medições em que seus valores obtidos estão próximo do valor efetivo que se deseja medir. Por isso restringir as medições até a 10ª harmônica, tem como consequência a segurança na confiabilidade dos valores medidos.

Outro fato que aumenta a confiança nas medições, é a tecnologia apresentada nos analisadores de energia. Essa tecnologia, permite a compensação para atenuações das harmônicas bem acima da estipulada (600Hz). Os analisadores fazem essa compensação, comparando com dados pré-instalados que servem como referência, disponibilizando ao analisador maior confiabilidade. Dessa forma os dados adquiridos pelas medições das variáveis elétricas até a 10ª harmônica são suficientes para o desenvolvimento da metodologia para detecção do estado de funcionamento da LT.

5.10 CONCLUSÃO

Neste capítulo descreveu-se a resposta em frequência e modelagem de transformadores de medição sob fontes de tensão e corrente harmônicas. Este estudo foi necessário para esclarecer que os transformadores foram desenvolvidos para atuarem em determinada faixa de frequência. Por conta disto, atentou-se à necessidade de se investigar qual a faixa de frequência pode ser lida com segurança pelo transformador instalado nas SEs em que os instrumentos estão instalados.

Utilizando um trabalho já realizado, nas SEs monitoradas, sobre justamente os TPCs em questão, identificou-se que é possível a leitura até a 10ª harmônica. Porém é preciso fazer ajuste. Este ajuste pode ser realizado por software. A partir da 11ª harmônica seria necessário a utilização de um outro equipamento.

Apurou-se ainda, as limitações do equipamento (analisador de energia) instalado nas SEs. Foi relatado em quais configurações junto a rede o equipamento pode ser instalado. O grau de confiabilidade dada pelo equipamento pelos harmônicos lidos. Onde se verificou que em leituras realizadas até a 10ª harmônica o equipamento oferece segurança. Foi averiguado

ainda, a precisão da sincronia por GPS entre os equipamentos e a sincronização de tempo exata, *cost-effective* que analisa o pulso disparo do GPS tem uma grande precisão 0,025% para a maioria das situações. Com isso constatou-se que pelo período das frequências limites é indiscutível a sincronia entre os equipamentos. O atraso de aproximadamente $2\mu\text{s}$, garante o sincronismo.

Dessa forma para maior confiabilidade dos dados, a partir deste ponto restringiu-se o estudo desta pesquisa para até a 10^a harmônica. Podendo os resultados desta pesquisa serem generalizados para harmônicos de ordem superior à 10^a, desde de que sanadas as questões de atenuação nos TPCs e TCs.

CAPÍTULO 6.0 ÍNDICE PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DE LT

Nos capítulos anteriores houve o estudo de métodos para monitoração do estado de funcionamento de linhas de transmissão. Dentro desse estudo, visando a verificação do estado de funcionamento da LT, optou-se pela técnica de análise do comportamento de variáveis e parâmetros elétricos, que exige um modelo mais preciso que os empregados na operação e projeto de LTs descritos no capítulo 2. No capítulo 4 foi verificado que as curvas da I_F calculada no modelo proposto podem ser ajustadas a partir do valor das capacitâncias de cada circuito harmônico considerado separadamente. Através desta constatação pode-se supor que cada ajuste das capacitâncias representa fisicamente um estado de funcionamento. Analisou-se também a resposta dos transformadores e analisadores elétricos dentro da sistemática adotada e ainda avaliou-se as respostas obtidas pelo modelo matemático sobre dados reais medidos na LT. Com o propósito da melhor aproximação entre a I_F medida e a calculada foi limitado o estudo do ajuste da capacitância até o 10º harmônico. Este último capítulo propõe utilizar a constatação do ajuste da curva da I_F pela variação do valor da capacitância como um indicador para a condição de funcionamento em LT. Para tanto é apresentada uma metodologia que será realizada para um exemplo genérico.

6.1 COMPORTAMENTO HARMÔNICO DA CORRENTE DE FUGA COM A CAPACITÂNCIA

A I_F calculada possui um comportamento harmônico que pode ser ajustado pela comparação das amplitudes das formas de onda de cada um dos harmônicos (I_{FH_n}) que a compõe com a respectiva forma de onda harmônica obtida pela medição, como é descrito pela equação 6.1 e ilustrada por meio da Figura 6.1.

$$I_F = I_{FH_1} + I_{FH_2} + I_{FH_3} + \dots + I_{FH_n} \quad (6.1)$$

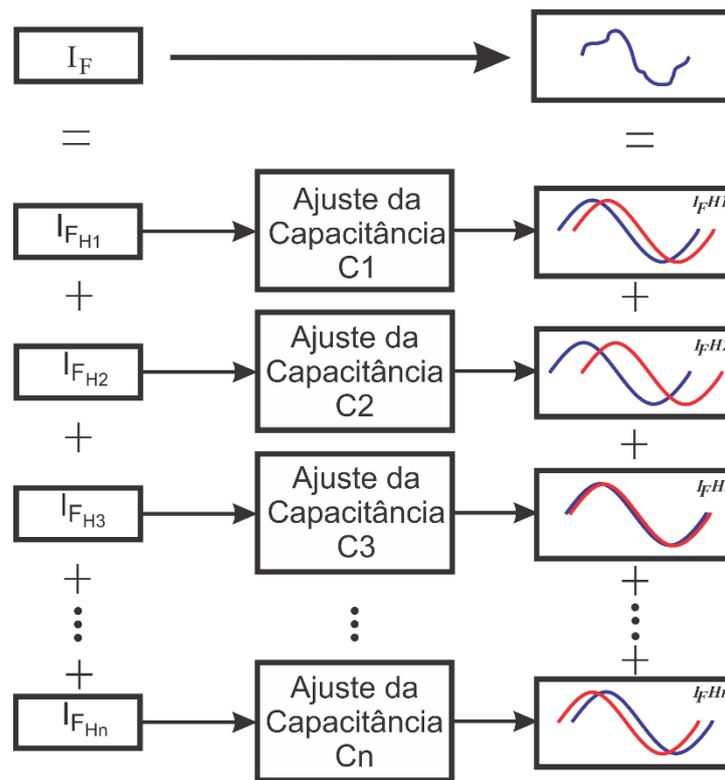


Figura 6.1 – Superposição de modelos para ajuste individual das componentes da I_F .

Esta comparação é efetivada a partir da observação das amplitudes, como mostrado na Figura 6.2 com os harmônicos completos até a 50ª harmônica, e que descreve dados obtidos no dia 13 de novembro de 2008. A partir deste ponto, a amostra se limita à 10ª harmônica.

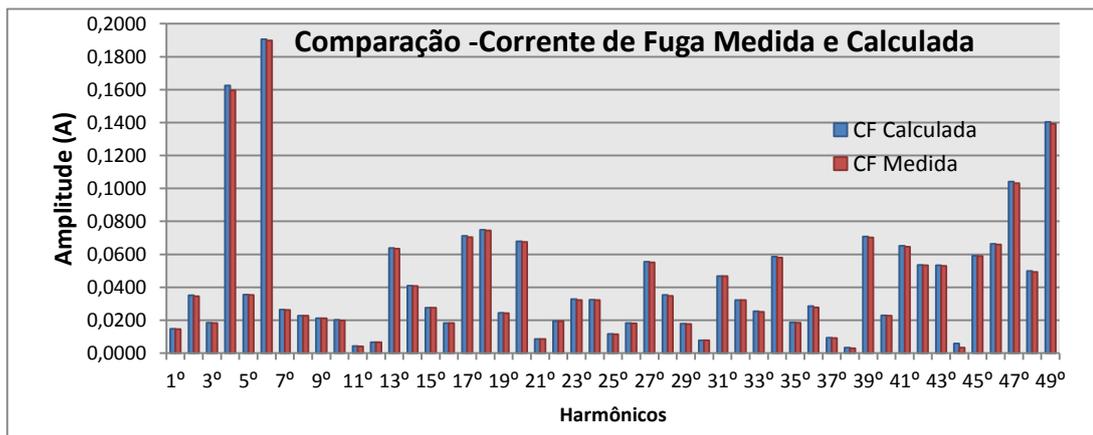


Figura 6.2 – Comparação das Amplitudes entre a I_F Medida (em Vermelho) e a Calculada em (azul)

Os resultados para ordem superior devem ser validados considerando os aspectos descritos no capítulo 5, no que diz respeito à saturação do sinal pelo transformador TC.

Uma metodologia para verificação que estes ajustes podem representar um estado de funcionamento da LT é o cálculo da dispersão destes ajustes.

Este padrão identificado não caracteriza um comportamento normal ou anormal. Isto porque a observação de LT é para verificar se seu estado de funcionamento está melhor ou pior.

A condição de normalidade ou anormalidade é de difícil constatação, considerando que não se pode afirmar com certeza que em um determinado instante todos os isoladores, emendas, aterramentos estão em perfeito estado mesmo depois de uma rigorosa inspeção.

Uma maneira de fazer esta comprovação é a verificação das amplitudes características destes ajustes, ou seja, a dispersão. Caso estes valores de dispersão sejam pequenos, então pode-se caracterizar um padrão de funcionamento, seja anormal ou normal.

As amplitudes apresentadas na Figura 6.2 podem ser analisadas, para até a 10ª harmônica, através da tabela 6.1 que compara a I_F calculada e medida, com seus respectivos valores de pico. Em que I_{pico} é a amplitude de pico da I_F e I_{h1} são as dos harmônicos.

Tabela 6.1 - Resultados numéricos da comparação entre as amplitudes da I_F medida e calculada, com suas respectivas diferenças absolutas e em percentual.

Variável	Medida	Calculada	Diferença	
			Absoluta	%
I_{pico}	10,232	10,229	0,03	0,921
I_{h1}	0,0147	0,0146	0,000078	0,529
I_{h2}	0,0351	0,0346	0,000500	1,427
I_{h3}	0,0184	0,0182	0,000126	0,684
I_{h4}	0,1625	0,1596	0,002975	1,831
I_{h5}	0,0354	0,0353	0,000106	0,301
I_{h6}	0,1906	0,1898	0,000792	0,416
I_{h7}	0,0264	0,0262	0,000156	0,590
I_{h8}	0,0227	0,0226	0,000023	0,102
I_{h9}	0,0212	0,0211	0,000042	0,199
I_{h10}	0,0201	0,0197	0,000339	1,691

Na tabela são apresentadas as diferenças das I_F calculadas e medidas pelo modelo, harmônico por harmônico. É possível verificar por meio dos erros apresentados que tem-se um bom grau de fidelidade do modelo matemático.

Com o aprimoramento do modelo matemático, neste estudo foi considerado esta I_F como tendo representado uma LT com comportamento normal de funcionamento. Entretanto tem-se a necessidade de um modelo anormal de funcionamento, ou modelo matemático com falha. Após a obtenção de um modelo matemático com falha (ou modelo matemático Anormal) é possível fazer comparações entre os dois modelos.

6.2 MODELO MATEMÁTICO COM FALHA

Inicialmente é necessário a inserção de uma falha no modelo matemático. O procedimento utilizado para tanto, passa pela seleção da falha, e a inserção da mesma na entrada do modelo matemático.

O interesse é relacionado à falha de isolamento de LT, por isso foi selecionado uma falha em isoladores referido em Suda (2001). O artigo estabelece um método para estudo da contaminação em isoladores. O autor apresenta forma de onda de I_F tanto as amplitudes quanto as frequências, como pode ser visualizado na Figura 6.3.

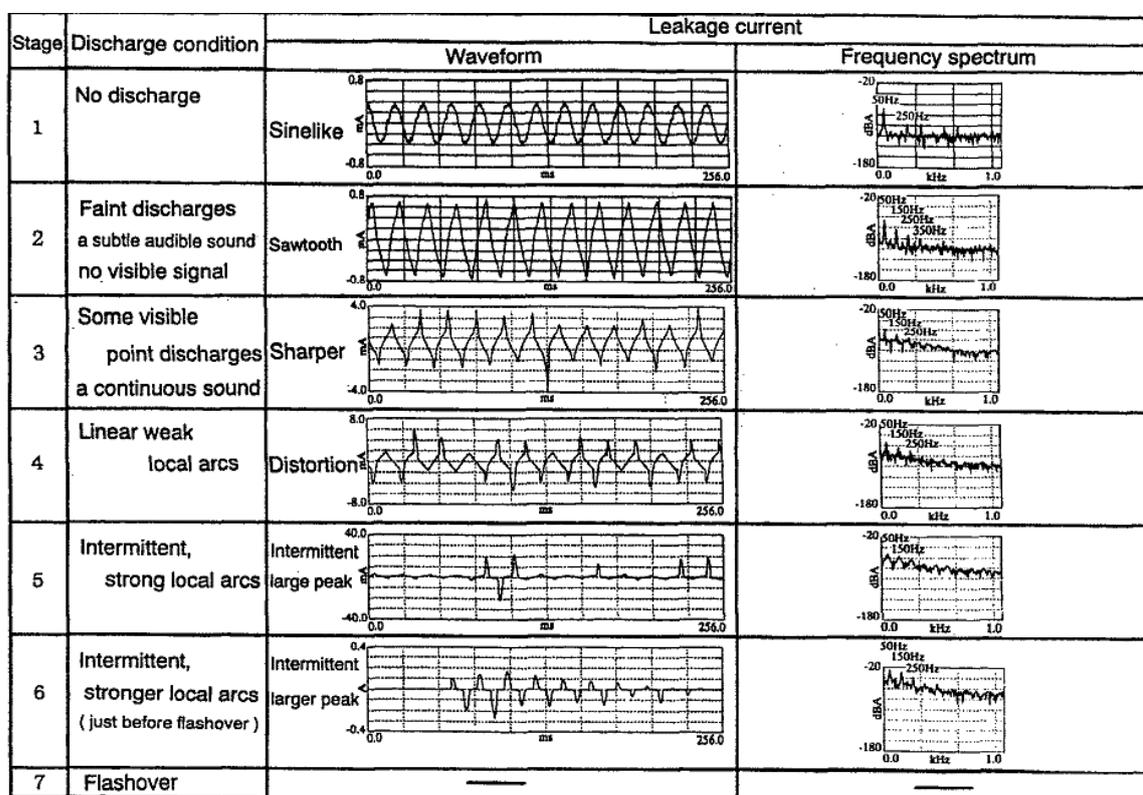


Figura 6.3 - Comportamento da forma de onda e DCH para os diversos estágios de contaminação salina em isoladores, segundo SUDA (2001) Comportamento dos estágios de forma de onda e DCH da I_F .

Para tanto utiliza o arranjo experimental visualizado na Figura 6.4.

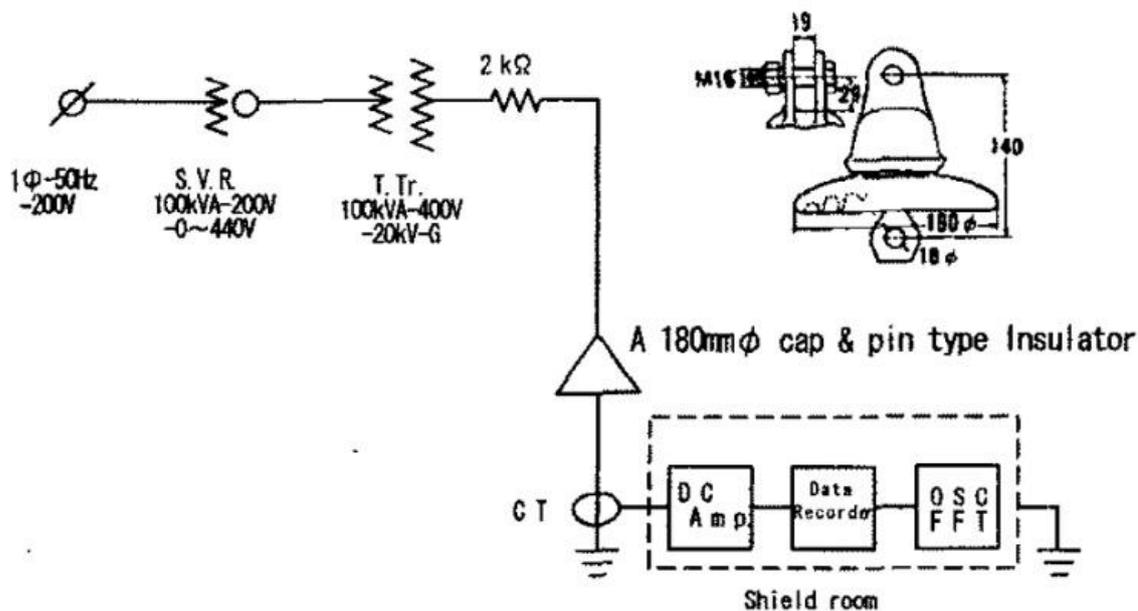


Figura 6.4 - Arranjo experimental utilizado no artigo de Suda (2001) para estudo de I_F em isoladores poluídos.

Para obter formas de onda de I_F foram utilizados um transformador S.V.R 100kVA-200V/0~440V em série com um transformador T.Tr 100kVA/400V-20kV-G. Foi utilizado ainda um TC (TC 411, *Pearson Electronics, Inc*; faixa de frequência de resposta linear 1 Hz a 20 MHz), além de um amplificador cc (frequência intervalo de 0 a 5 kHz), e foram registrados os dados na faixa de frequência de 0 a 2,5kHz.. E ainda, o estudo da transição de formas de onda de I_F até o *flashover*.

Como resultado, verificou-se que a forma de onda de I_F se torna semelhante e simétrica, no momento em que ocorrem fortes arcos locais; daí, a intensidade nas componentes de ordem ímpar das harmônicas, para o primeiro estágio.

Suda (2001) descreve um total de sete estágios para uma cadeia de isoladores com poluição. Inicialmente no estágio 1, sem descargas: formas de onda de I_F tornaram-se como ondas senoidais no início da aplicação de tensão devido à passagem da corrente resistiva (camada de superfície totalmente molhada, não há bandas secas, nenhuma descarga). Já no estágio 2, com surgimento de sinal sonoros sem aparecimento de sinal visível: a forma de onda se torna triangular ou como dente de serra, ocorrem descargas fracas e um som audível sutil e nenhum sinal visível. Para o estágio 3, com alguns sinais visíveis e sinal audível contínuo: As pontas das formas de onda triangular do estágio 2 se tornam mais nítidas e alongadas, ocorrem algumas descargas pontuais visível corona (Apud SUDA, 2001), com um som contínuo perto da tampa na superfície superior (formação da banda seca, ocorre durante os estágios de 1 a 3). Para o estágio 4, com arcos locais fracos: as formas de onda de I_F tornam-se semelhante e

simétricas, na presença de arcos filamentos, linear, fracos e locais (flâmula ou de descarga parcial [Apud SUDA, 2001]) nas extremidades algumas (5 ou 6) manchas perto da tampa na superfície superior. No estágio 5, com fortes arcos locais intermitentes: a I_F com um grande valor de pico aparece, semelhante as ondas simétricas no estágio 4, somado a presença de intermitente e fortes arcos locais sobre a superfície inferior. Estágio 6, com aumento da intensidade dos arcos locais intermitentes: O valor de pico de formas de onda de I_F se torna grande imediatamente antes *flashover* na presença de intermitente, forte arcos locais em ambas as superfícies (arco de alongamento). Finalmente no estágio 7 ocorre o *flashover*.

O estágio da falha selecionado para inserção no modelo matemático, foi o estágio 5, devido, ter-se uma forma de onda razoavelmente deformada e sua DCH, estar bastante destacada, como verifica-se nas Figuras 6.5 e 6.6.

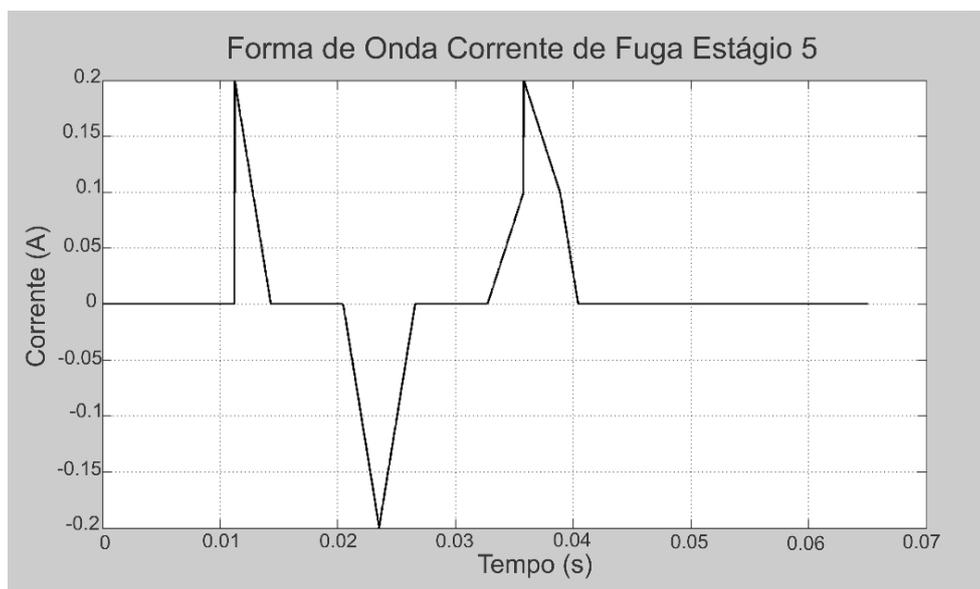


Figura 6.5 - Forma de Onda do estágio 5 da I_F em isoladores, reproduzida a partir do trabalho de Suda (2001).

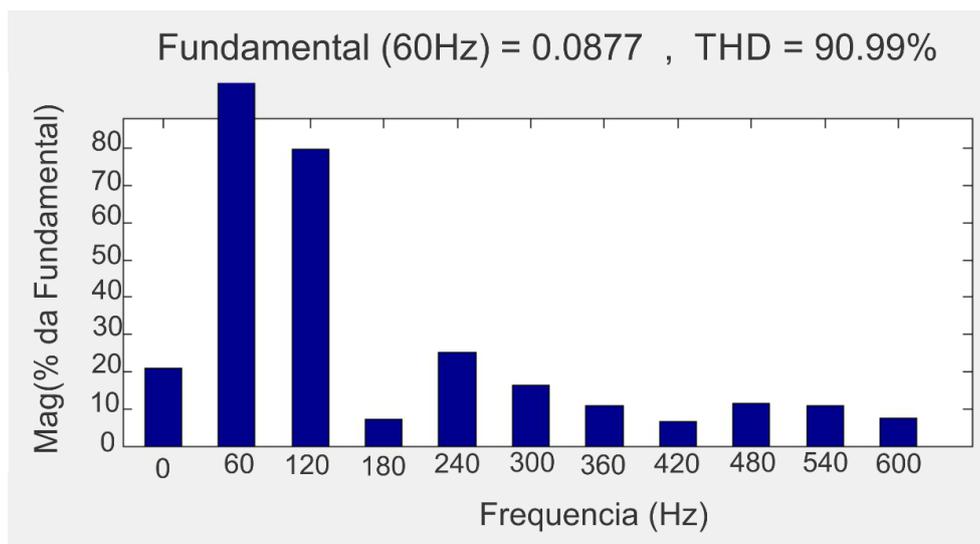


Figura 6.6 - DCH do estágio 5 da I_F em isoladores, reproduzida a partir do trabalho de Suda (2001).

A inserção do sinal de falha é realizada por meio de uma soma do sinal da corrente característica de um isolador com falha com o sinal da corrente medida (dados reais de corrente elétrica da SE Utinga). A amplitude do sinal de falha, é de aproximadamente 10^3 vezes menor que a amplitude da corrente medida. Após esta soma tem-se uma nova entrada, agora com falha, para o modelo matemático. Com isso tem-se um modelo matemático dito normal, e um segundo modelo matemático com a falha inserida (Figura 6.7).

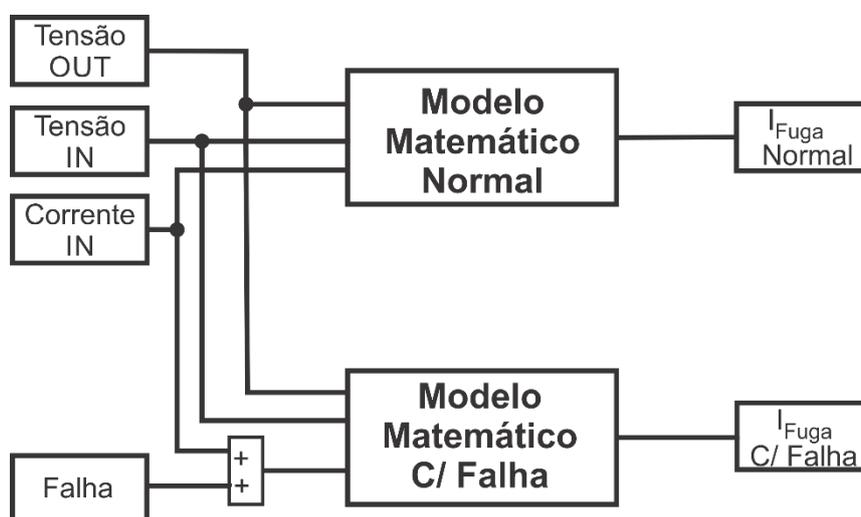


Figura 6.7 - Diagrama de blocos para obtenção de modelo matemático com falha.

De posse dos dois modelos matemáticos é possível fazer algumas inferências. Inicialmente pode-se comparar o comportamento da forma de onda das I_F sem falha e com falha. A Figura 6.8, mostra a superposição entre a I_F sem falha e com a falha. É possível verificar a grande proximidade das duas formas de onda.

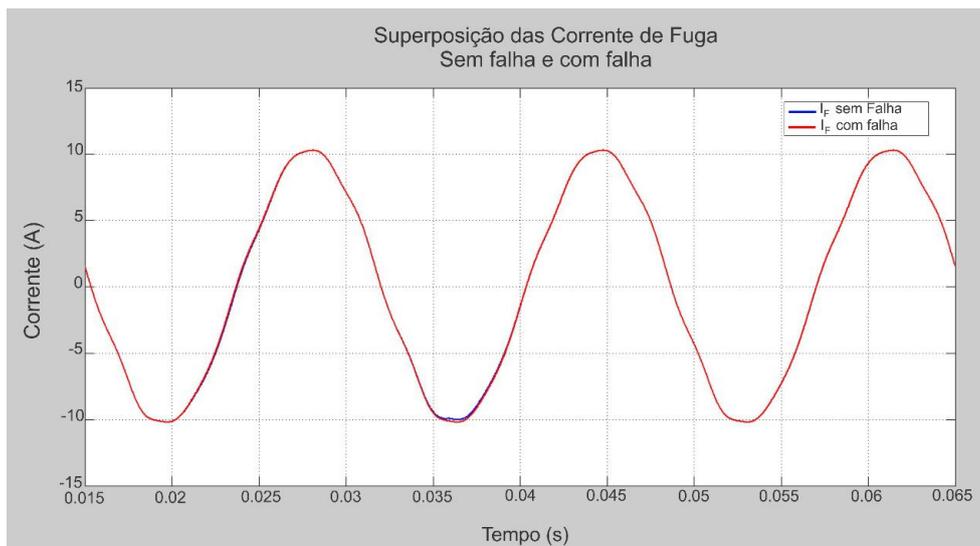


Figura 6.8 - Superposição das formas de ondas das I_F sem falha (Azul) e com falha (Vermelho).

A grande proximidade dos pontos da forma de onda da I_F , tem como principal consequência a dificuldade na distinção dos sinais. Torna árdua a tarefa de seleção de uma ferramenta adequada para diferenciá-las.

Outra averiguação foi o comportamento da DCH da I_F . Na Figura 6.9 é mostrada a superposição da DCH da I_F , sinais da Figura 6.8 anterior, isto é, da I_F com e sem a falha.

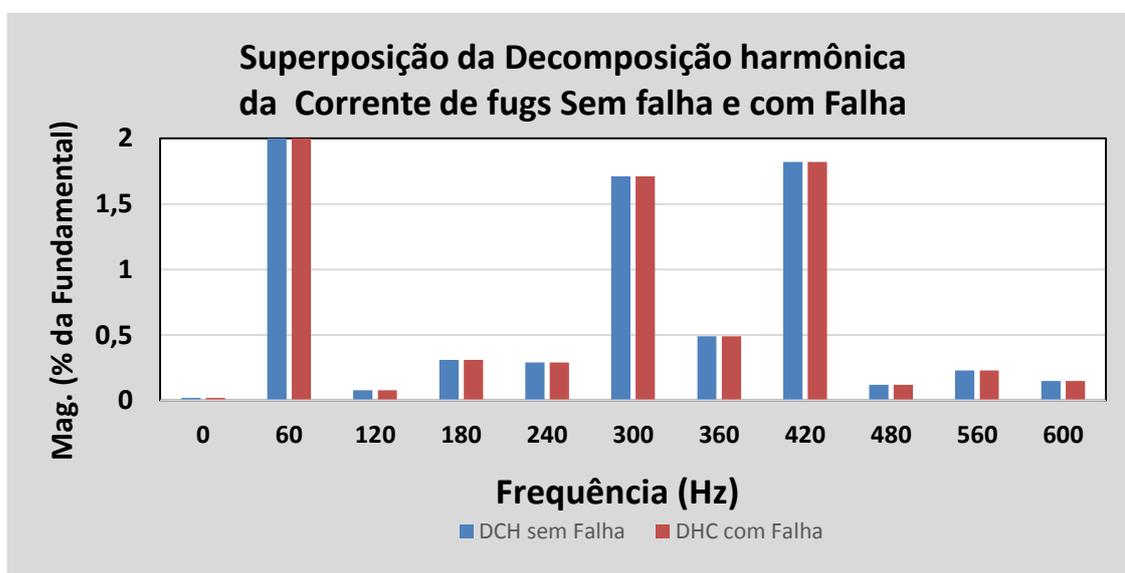


Figura 6.9 - Superposição das DCH's das I_F sem falha (Azul) e com falha (Vermelho).

Na tabela 6.2 é percebido o quão semelhantes são as DCH dos dois sinais.

Tabela 6.2 - Valores numéricos das DCHs dos sinais de I_F gerados pelo modelo matemático, sem falha e com falha.

Harmônica	I_F sem Falha	I_F com Falha
0 Hz (DC)	0,02	0,02
60 Hz (Fundamental)	2,000	2,000
120 Hz (h2)	0,080	0,083
180 Hz (h3)	0,310	0,310
240 Hz (h4)	0,290	0,290
300 Hz (h5)	1,710	1,700
360 Hz (h6)	0,490	0,490
420 Hz (h7)	1,820	1,823
480 Hz (h8)	0,120	0,120
540 Hz (h9)	0,230	0,230
600Hz (h10)	0,150	0,150

Com os dados apresentados não é possível distinguir as formas de onda com e sem falha. Portanto é necessário tratar estes dados.

A solução encontrada é obter dados correlacionados com a variação de capacitância para o ajuste de cada curva. Verificou-se que as variações das capacitâncias para ajuste de cada curva evidencia as diferenças de amplitudes para cada harmônico tomado separadamente. Isto será apresentado nos próximos tópicos deste capítulo.

6.3 COMPORTAMENTO DA CAPACITÂNCIA POR HARMÔNICO

É importante notar que dentre os parâmetros da linha (Resistência, Indutância e capacitância) a capacitância é o que menos varia com a frequência, o que significa que para determinação da corrente de entrada de um trecho da LT e da corrente de saída deste trecho uma variação no valor da capacitância pouco vai significar na amplitude destes sinais. Entretanto, ao se analisar a corrente de fuga de um trecho de LT, por meio do modelo matemático, verificou-se um relação proporcionalidade direta entre o valor da capacitância e a amplitude do sinal de corrente de fuga. Isto se dá devido o sinal de corrente de fuga no modelo matemático ser representado exclusivamente pela corrente que atravessa o conjunto RC (isolação). No modelo matemático foi testado o aumento e a diminuição dos valores de resistência da Linha e Indutância da linha, e só foi notada alguma modificação significativa na amplitude do sinal de corrente de fuga, quando os parâmetros resistência da linha e indutância da linha eram modificados para valores cem vezes maiores ou menores. Com isso atestou-se que para a corrente de fuga a influência maior é do parâmetro capacitância, enquanto que os

parâmetros resistência da linha e indutância da linha praticamente em nada influenciam no sinal de corrente de fuga.

A capacitância, dentro do modelo matemático, é o parâmetro diretamente ligado ao isolamento de LT. Nos modelos matemáticos, os isoladores elétricos das LT, são representados por capacitâncias.

A sistemática de ajuste dos valores de capacitância continua sendo pela comparação entre as amplitudes de I_F medida e calculada, sendo que o valor da capacitância varia em $0,36 \eta F$, para o módulo da menor diferença entre os valores de pico das curvas. O método de busca é linear, pois são estimadas várias formas de onda, em seguida é realizada a busca pelo módulo da menor diferença entre essas amplitudes estimadas e a amplitude medida, posteriormente é retornado o valor correspondente de capacitância, como já foi descrito no capítulo 4. Permaneceu a análise individual por harmônico. Para formação do banco de dados, inicialmente reuniu-se todos os valores de capacitância ajustados por harmônico, o que totalizou mais de 1000 valores de capacitância coletados nos anos de 2005 e 2008 do trecho da linha de transmissão Guamá – Utinga. Está apresentada na Figura 6.10 uma amostra da dispersão de alguns destes dados.

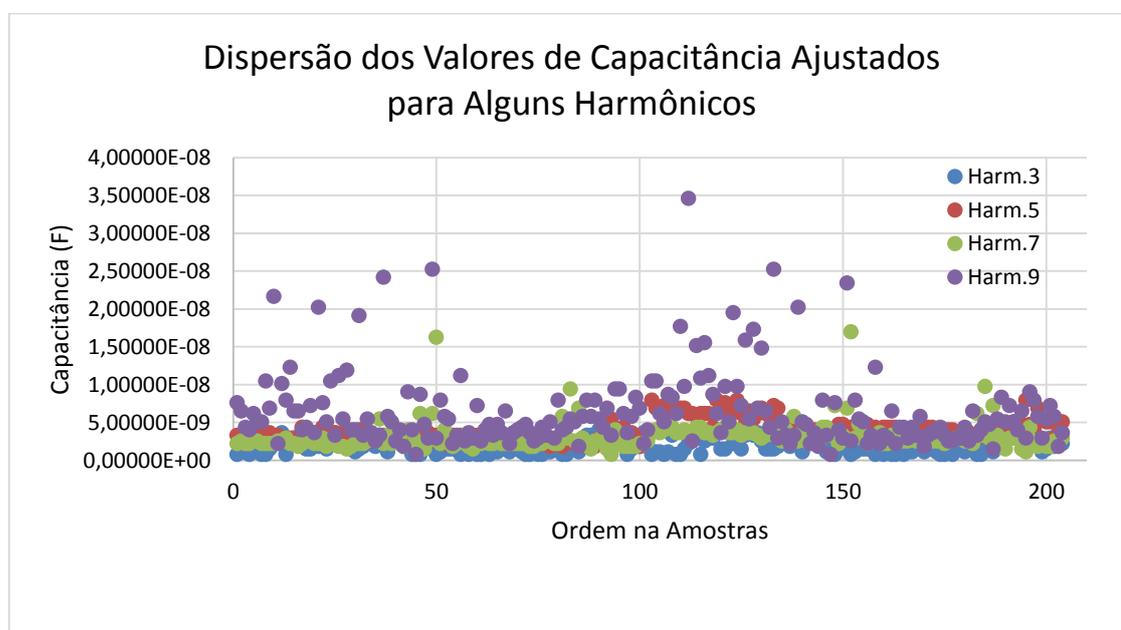


Figura 6.10 – Dispersão dos valores de capacitância ajustados pelo modelo matemático.

Uma forma de medir a dispersão entre dados de uma amostra é por meio do Coeficiente de Variação (CV). Trata-se de uma medida relativa de dispersão útil para a comparação em termos relativos do grau de concentração em relação à média. O CV é a relação entre o desvio padrão (S) e a média (\bar{x}), como é mostrada nas equações 6.2 e 6.3.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (6.2)$$

$$CV\% = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Segundo Correa (2003), Diz- se que uma distribuição tem:

- Baixa dispersão: $CV \leq 15\%$
- Média dispersão: $15\% < CV < 30\%$
- Alta dispersão: $CV \geq 30\%$

Em seguida, estes dados foram separados por harmônico, e verificou-se a nova dispersão. Na Figura 6.11 está representada a dispersão dos valores de capacitância ajustados para o primeiro harmônico.

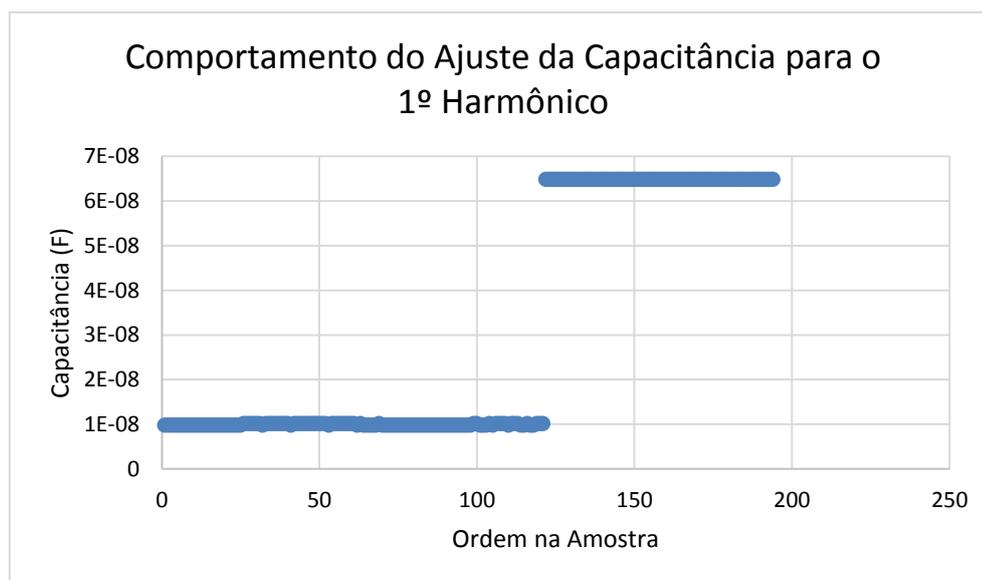
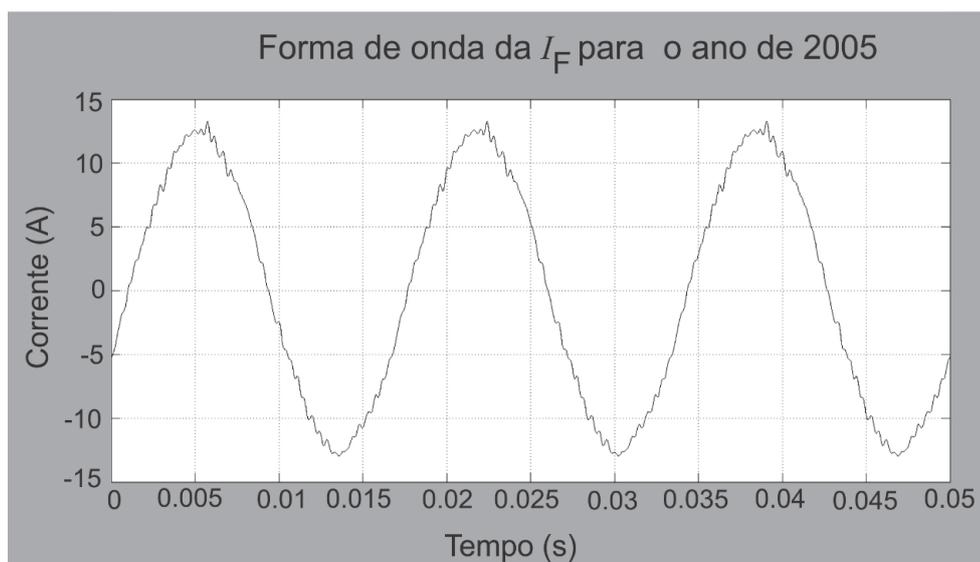
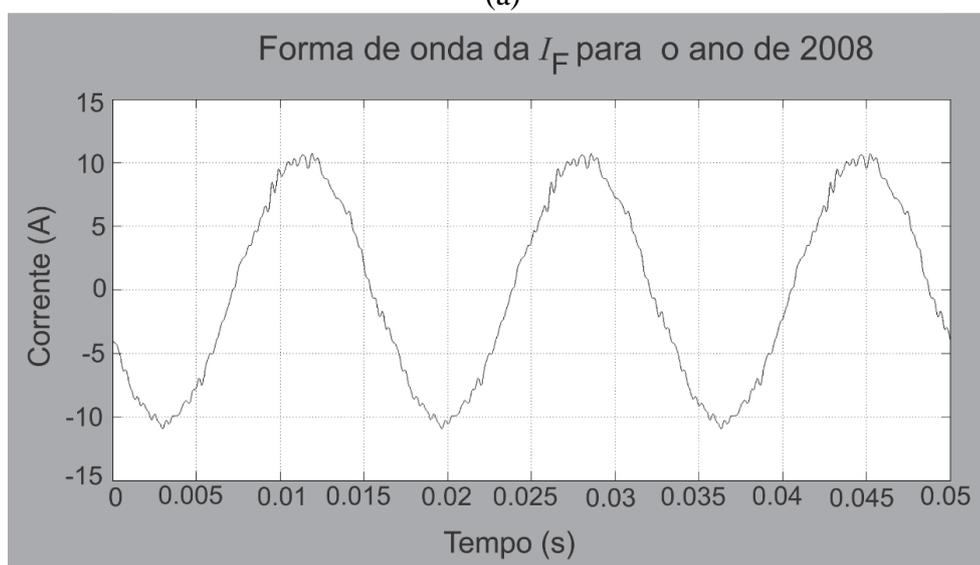


Figura 6.11 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para apenas o primeiro harmônico.

É possível calcular um CV de 1,05% e verificar uma baixíssima dispersão, os valores maiores de aproximadamente $6,48 \times 10^{-9}$, são de capacitâncias do ano de 2005. Os valores de capacitância de aproximadamente $1,01 \times 10^{-9}$, são de capacitâncias do ano de 2008, e foi calculado um CV de 1,7%. Estes dados evidenciam uma dinâmica deste parâmetro ao longo do tempo. Claramente um indicativo de melhoria da linha. A redução a I_F entre os anos de 2005 e 2008 pode ser visualizado comparando-se as amplitudes das formas de onda das I_F medidas, mostradas nas figuras 6.12(a) e 6.12(b).



(a)



(b)

Figura 6.12 – (a) Forma de onda da I_F Medida no dia 13 de novembro de 2005; (b) Forma de onda da I_F Medida no dia 18 de novembro de 2008. Ambos no horário de 09:20H. A diferença nos valores de amplitude sinalizam para manutenções realizadas na LT.

Retornando a análise do ajuste da capacitância, o baixo grau de dispersão nos valores de capacitância permanece por todo conjunto de dados (ímpares) até aproximadamente a 9ª harmônica. Por conta desta dispersão surgem padrões para o conjunto de capacitância, os quais pode-se associar a estados de funcionamento da linha de transmissão.

Acima da 10ª harmônica tem-se um aumento no grau de dispersão dos valores ajustados de capacitância, o CV foi de 45,38% isso pode ser visualizado por meio da Figura 6.13, que representa a 11ª primeira harmônica.

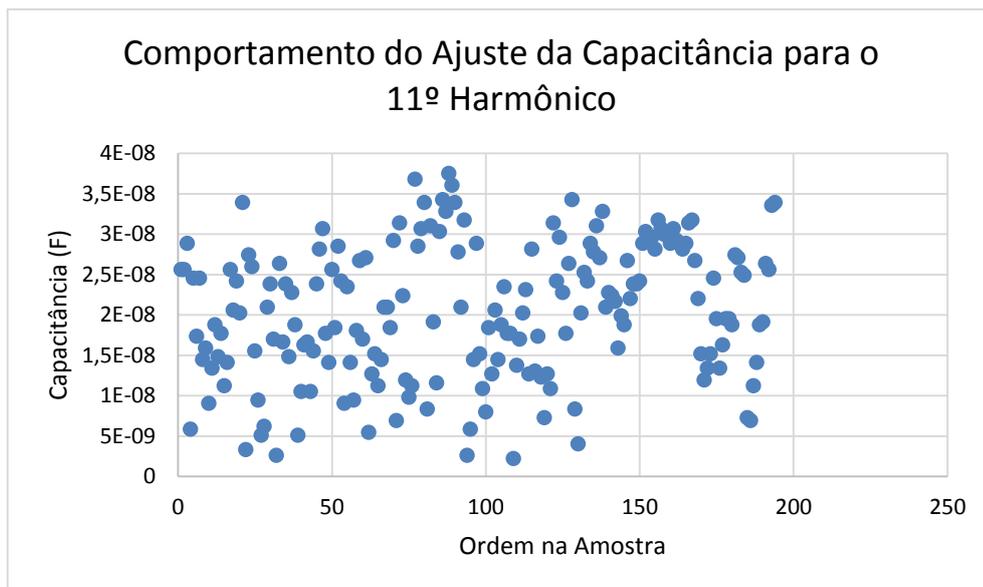


Figura 6.13 – Dispersão no ajuste da capacitância para a 11ª harmônica. Aumento gradativo na dispersão dos dados de ajuste de capacitância para harmônicas acima da 10ª Harmônica.

Já na Figura 6.14, visualiza-se o comportamento do ajuste de capacitância para a 16ª harmônica. O ajuste para esta harmônica mostrou-se com um alto grau de dispersão, CV em 44,33%.

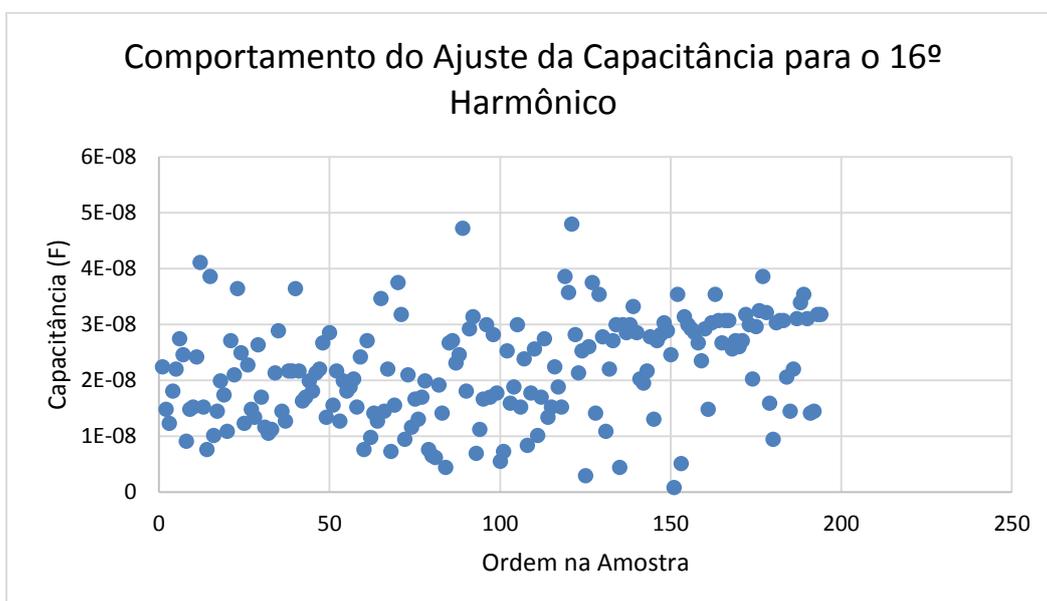


Figura 6.14 – Dispersão no ajuste da capacitância para a 16ª harmônica. Aumento gradativo na dispersão dos dados de ajuste de capacitância para harmônicas acima da 10ª.

Desviando deste comportamento de dispersão, à 35ª e 37ª harmônicas, tiveram um comportamento similar às harmônicas de ordem inferior a 10ª. As harmônicas 35ª e 37ª tem um baixo grau de dispersão, foi calculado um CV de 9,3% e 16,79%, respectivamente como visualizadas por meio das Figuras 6.15 e 6.16.

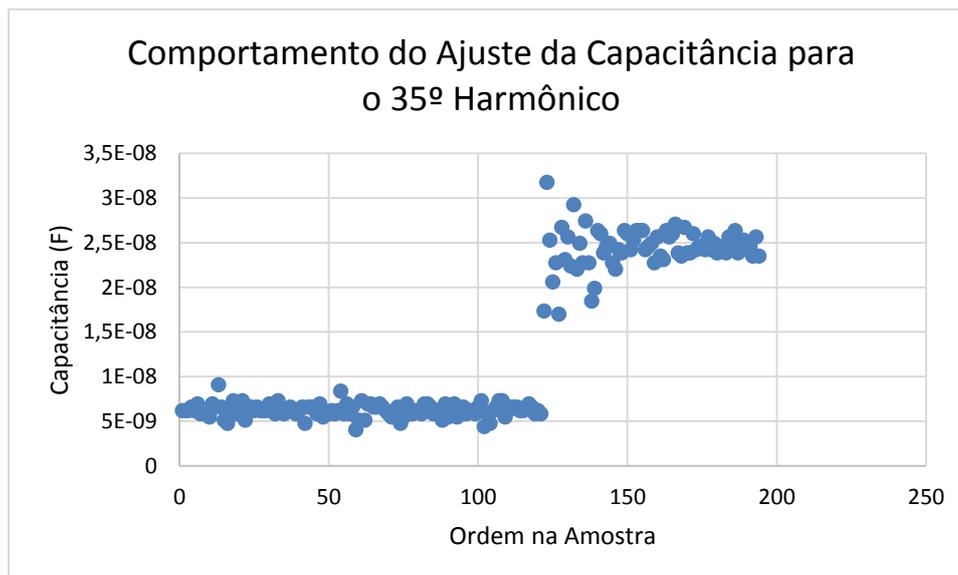


Figura 6.15 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para a 35ª harmônica, com baixo grau de dispersão.

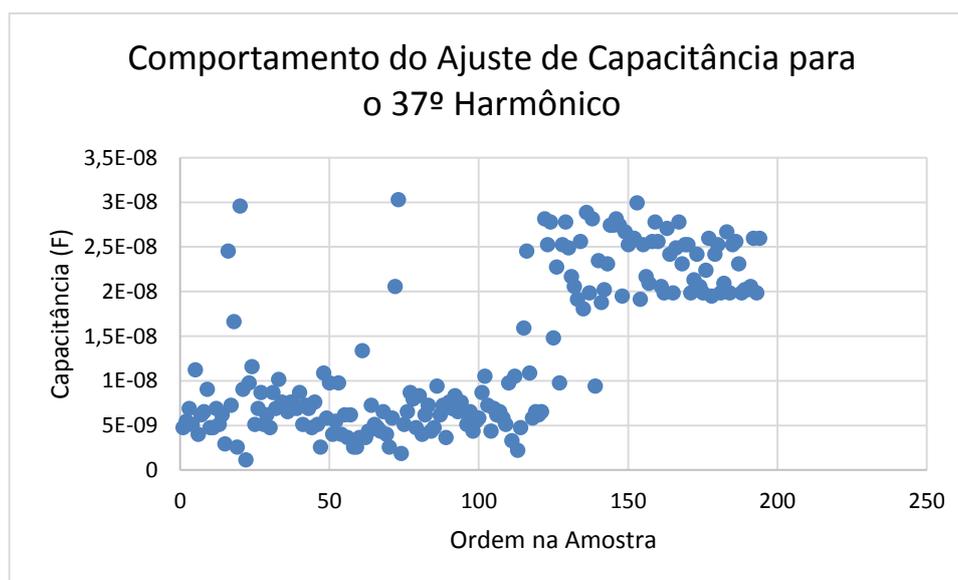


Figura 6.16 – Comportamento dos valores de capacitâncias ajustados pelo modelo matemático, para a 37ª harmônica, com baixo grau de dispersão.

Para estudo da metodologia apresentada nesta pesquisa foi utilizado o estudo do ajuste da capacitância até a 10ª harmônica. Essa redução é perfeitamente aceitável, visto esta análise ser qualitativa, e precisa-se mostrar que padrões de capacitância estão associados a estados de funcionamento da LT.

O estudo perpassa pela análise do comportamento da capacitância em diversos horários, em que se tem situações de consumo diferentes.

6.4 COMPORTAMENTO DA CAPACITÂNCIA POR HORÁRIO

A linha de transmissão opera em condições climáticas e de carregamento distintos. Estas condições podem ser correlacionadas com horários típicos. Para instantes específicos destes horários foram analisados os ajustes de capacitância.

6.4.1 Comportamento da Capacitância nos Períodos de Ponto de Orvalho

O ponto de orvalho é fenômeno relacionado com a temperatura onde começa o processo de saturação da água no ar, ou seja, o ponto onde já é possível ver pequenas gotículas de água se formando. É muito comum encontrar uma camada fina de água em LT ao amanhecer. Segundo Fuchs (1979), o ponto de orvalho compreende os horários entre 01:00h e 06:00h.

Na Figura 6.17 é mostrado o comportamento do ajuste da capacitância, para os pontos de orvalho na LT monitorada, para até a 10ª harmônica.

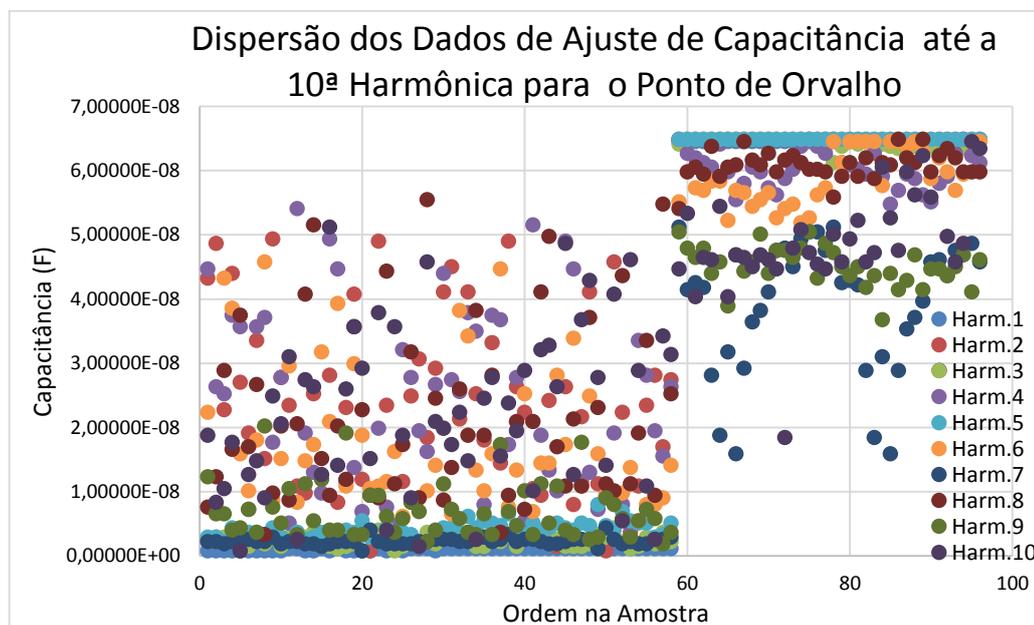


Figura 6.17 – Ajuste do valor de capacitância para o período de ponto de orvalho da LT.

Para uma melhor visualização, na Figura 6.18 é mostrado o comportamento do ajuste de capacitância para a 5ª harmônica, que obteve um CV de 3,06% para os valores de capacitância de 2008, enquanto que para 2005 o CV foi de 0.

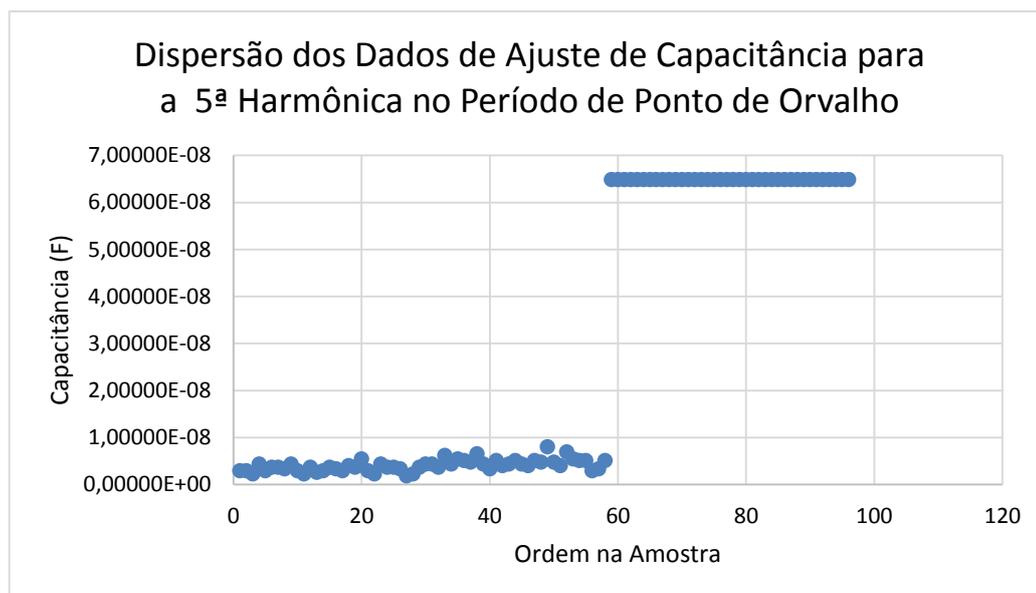


Figura 6.18 – Ajuste do valor de capacitância para o período de ponto de orvalho da LT, para a 5ª harmônica.

Verifica-se que para o horário do surgimento de gotículas de orvalho tem-se o mesmo padrão de ajuste de capacitância. É importante destacar que apesar da situação com condições de umidade relativa diferente dos demais períodos do dia, a tendência é que o valor de capacitância permaneça com uma dispersão pequena.

Ao selecionar um determinado harmônico, como por exemplo o 5º, verifica-se que para diferentes horários o valor de pico de I_F são distintos. Os valores de pico da I_F no momento do surgimento do orvalho são diferentes do valor de pico da corrente nos demais horários. Ao se analisar os valores das capacitâncias estes também variam, em comparação com os demais horários. Contudo estas diferenças não são significativas.

6.4.2 Comportamento da Capacitância nos Períodos de Alto Consumo

O trecho de linha pesquisado, tem seu maior consumo de energia, no horário de 18:00h até as 22:00h, e da mesma maneira que foi analisado o comportamento para o ponto de orvalho, analisou-se o comportamento do ajuste de capacitância por harmônico no horário de maior demanda do trecho.

Na Figura 6.19 é visualizado o valor de capacitância para o ajuste no horário de pico. Pela Figura é possível verificar novamente que alguns valores de capacitâncias permanecem praticamente inalterados, similarmente aos valores determinados para os pontos de orvalho.

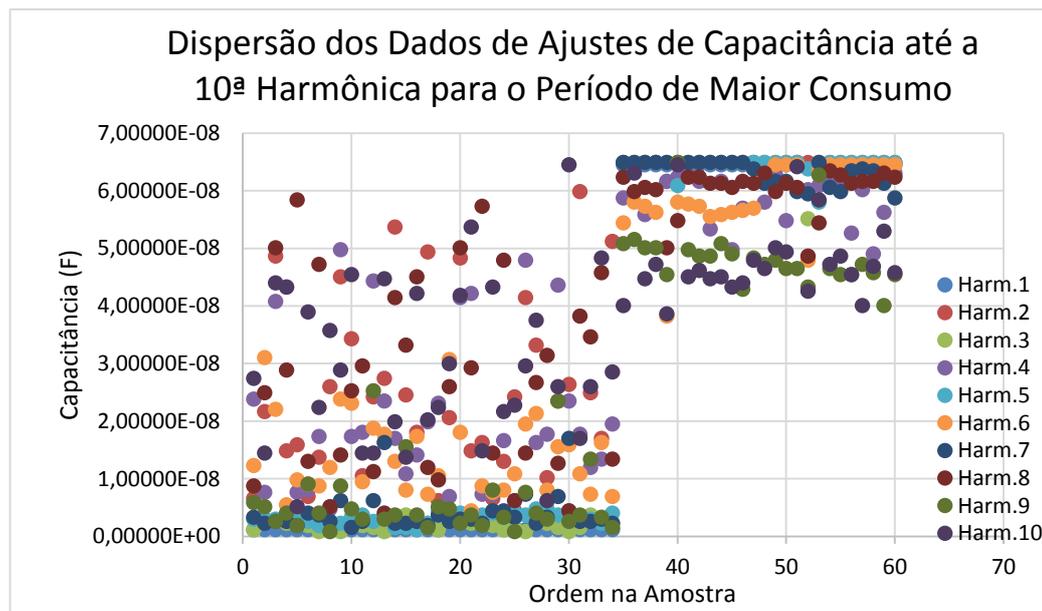


Figura 6.19 – Ajuste do valor de capacitância para o período de alto consumo da LT.

Na Figura 6.20 é mostrada a seleção dos dados de ajuste da capacitância do 5º harmônico para dados no horário de ponto de orvalho e para o horário de maior consumo (horário de ponta). Pode-se notar que os valores observados, nestas situações distintas, são diferentes, porém mantendo-se sempre próximos. Para o ano de 2008 esses valores foram de aproximadamente $3,0 \times 10^{-9}F$ e CV de 4,27% enquanto que para 2005 foi de aproximadamente $6,0 \times 10^{-8}F$ e CV de 1,48%.

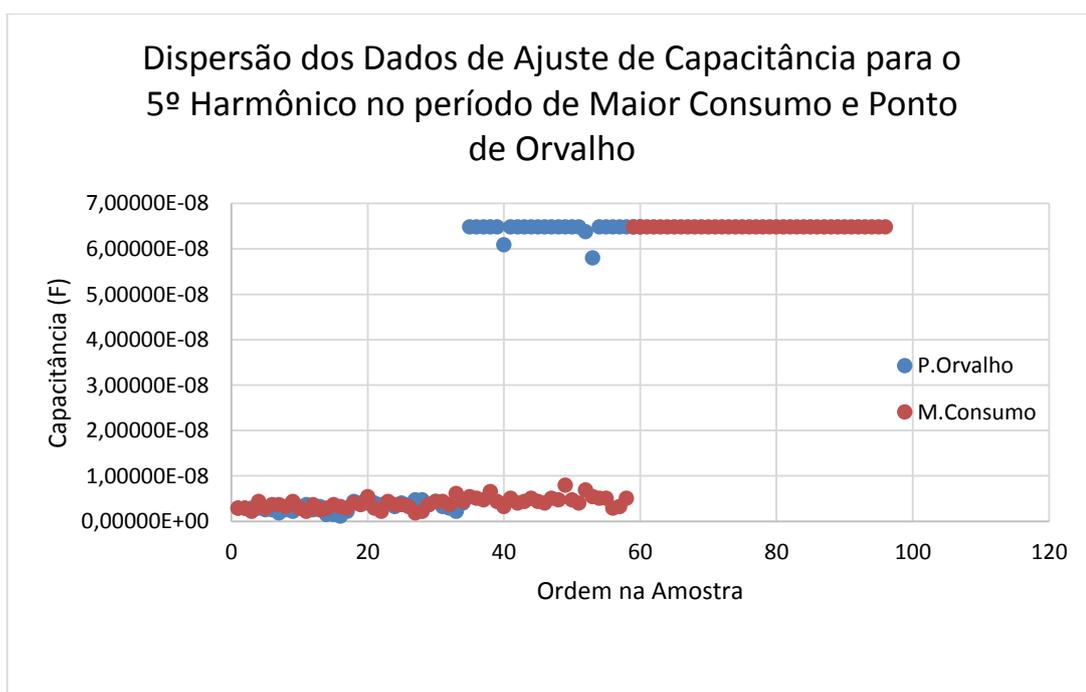


Figura 6.20 – Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico nos períodos de maior consumo e Ponto de orvalho na LT.

6.4.3 Comportamento da Capacitância nos Períodos de Chuva

Segundo Fuchs (1979) o efeito corona é um mecanismo de descarga que acontece devido à ionização em um gás, sujeito a um campo elétrico de intensidade acima de um nível crítico.

De um modo geral, as perdas por corona que ocorrem nas linhas estão relacionadas com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais (Wendy, 2009).

Além dos gradientes de potencial na superfície dos condutores, as perdas sob chuva dependem do índice de precipitações, e também do número de gotículas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores. Esse número é maior nos condutores novos do que nos usados, pois nos condutores novos as gotas d'água aderem mais facilmente à geratriz inferior dos condutores. Por isso, a importância da verificação do comportamento do ajuste da capacitância, na situação de tempo com chuva.

Por meio da Figura 6.21, pode-se visualizar o comportamento da capacitância ajustada em situação de chuva.

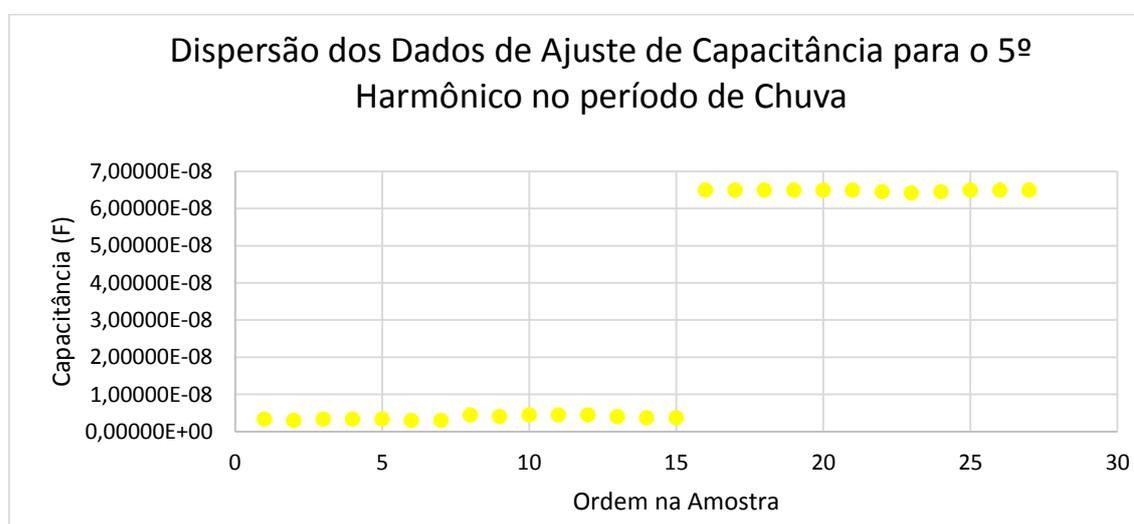


Figura 6.21 – Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico no período de chuva na LT.

Na Figura 6.22 são apresentados dados do ajuste da capacitância para situação de chuva, ponto de orvalho e maior consumo, para o 5º harmônico. É possível constatar que o comportamento da capacitância continua aproximadamente o mesmo.

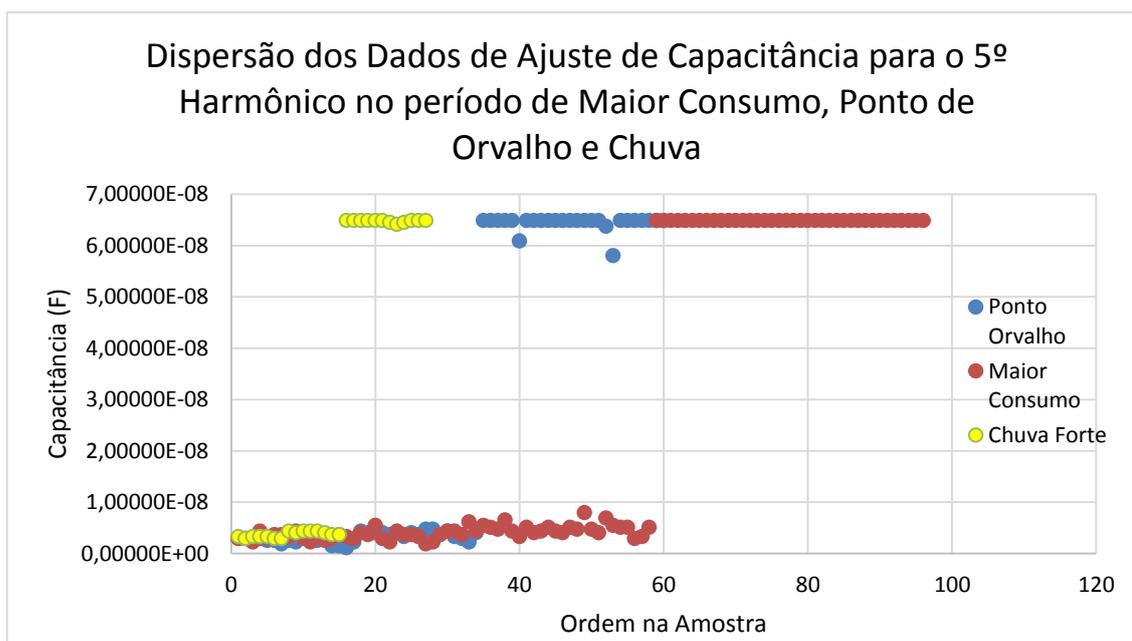


Figura 6.22 – Ajuste do valor de capacitância para o período de chuva forte na LT, juntamente com o período de maior consumo e ponto de orvalho.

Como o ajuste da capacitância varia com o ponto de orvalho, chuva e corrente da linha é importante observar estas situações na faixa de controle durante análise de verificação do estado de funcionamento da LT.

6.5 ASSOCIANDO CAPACITÂNCIA AO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DA LT

Deve-se esclarecer, que o único parâmetro elétrico ajustado na LT foi a capacitância. O analisador de energia (Power Sentinel 1133A) mede as três fases (A, B e C), neste caso ao determinar o sinal de corrente de fuga para cada uma destas fases (A, B e C), os efeitos de capacitância mútua (entre as fases) e de capacitância entre a terra já estão inseridos no sinal medido. Ao proceder com o ajuste no valor da capacitância (seja na fase A, B ou C), por meio da comparação do sinal de corrente de fuga medido (nas fases A, B ou C) e calculado pelo modelo (na fase correspondente), este valor de capacitância já tem imbuído os efeitos de capacitância mútua e de capacitância entre a terra. Portanto para o desenvolvimento e validação da metodologia de detecção apenas uma das fase é necessária, neste caso a fase selecionada foi a fase A.

Para determinação do estado de funcionamento da LT, é necessário conhecer o valor da capacitância por harmônico, e além disto associar esse valor e uma específica condição de funcionamento da linha.

A correlação do estado de funcionamento de LTs é obtida analisando valores de ajustes de capacitância. É importante frisar que o estado de funcionamento de LTs estará correlacionado a um conjunto de valores, que pode ser chamado de **vetor de capacitância**.

Neste caso o vetor capacitância representa um padrão de funcionamento de isolamento da linha. Isto é, para um conjunto tal de valores de capacitâncias tem-se um estado de funcionamento da LT.

Nas Figuras de 6.23 a 6.26 são mostrados o comportamento do ajuste de capacitância para os dias de 11 a 14 de novembro 2008 para os harmônicos ímpares do 1º ao 7º, respectivamente.

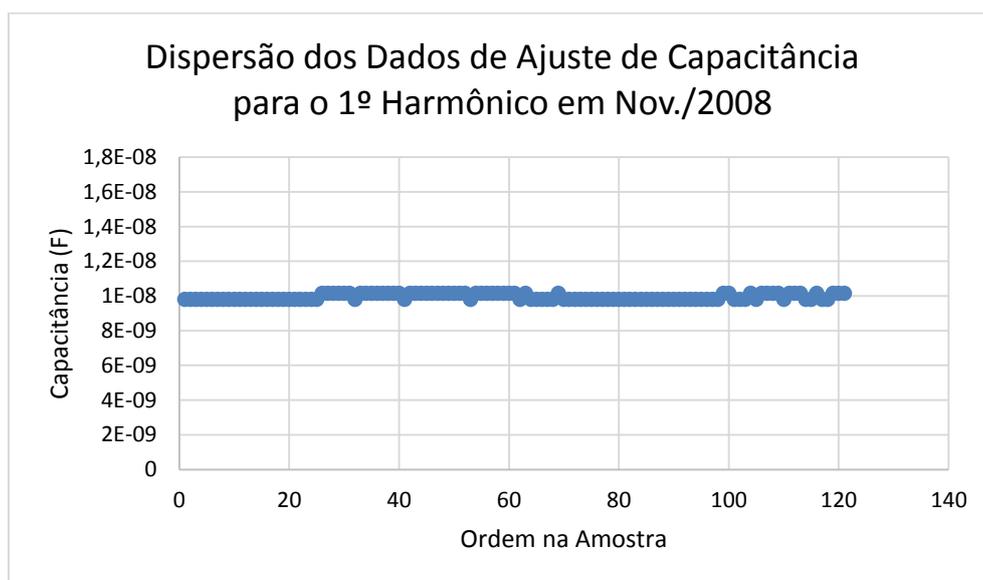


Figura 6.23 – Ajuste do valor de capacitância para o 1º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, com CV= 2,35%.

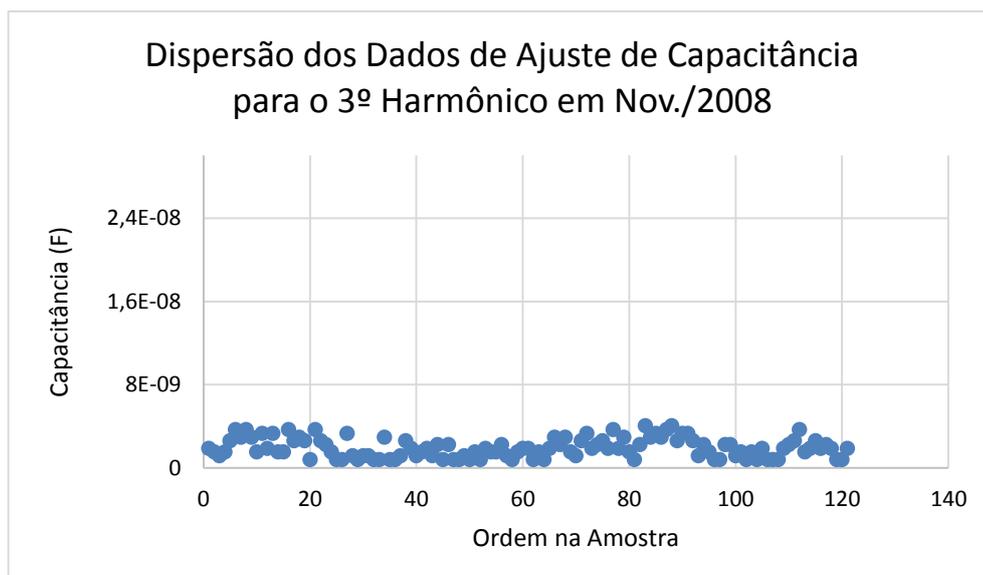


Figura 6.24 – Ajuste do valor de capacitância para o 3º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, com CV= 12,04%.

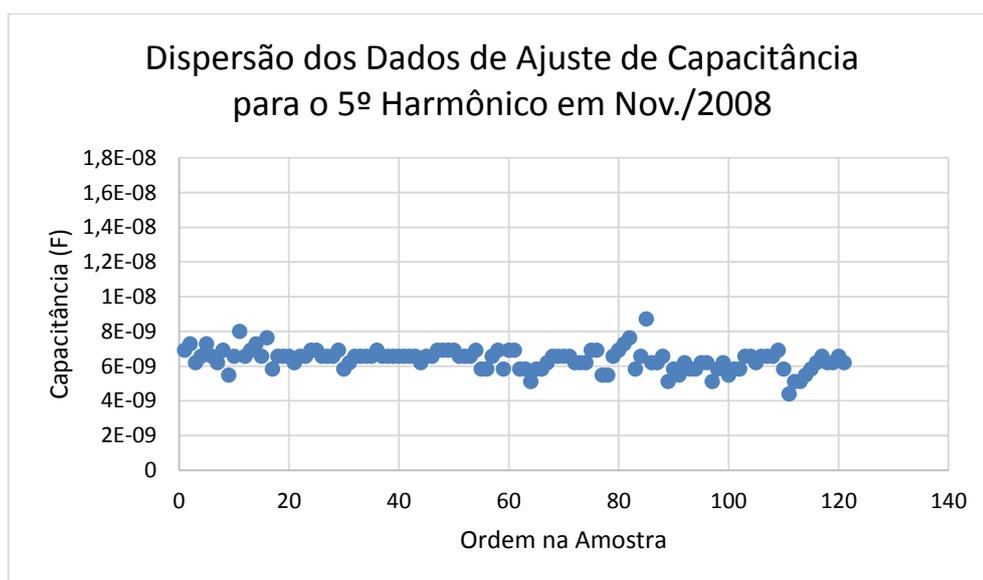


Figura 6.25 – Ajuste do valor de capacitância para o 5º harmônico, no período compreendido entre 11 à 14 de novembro de 2008, CV= 9,49%.

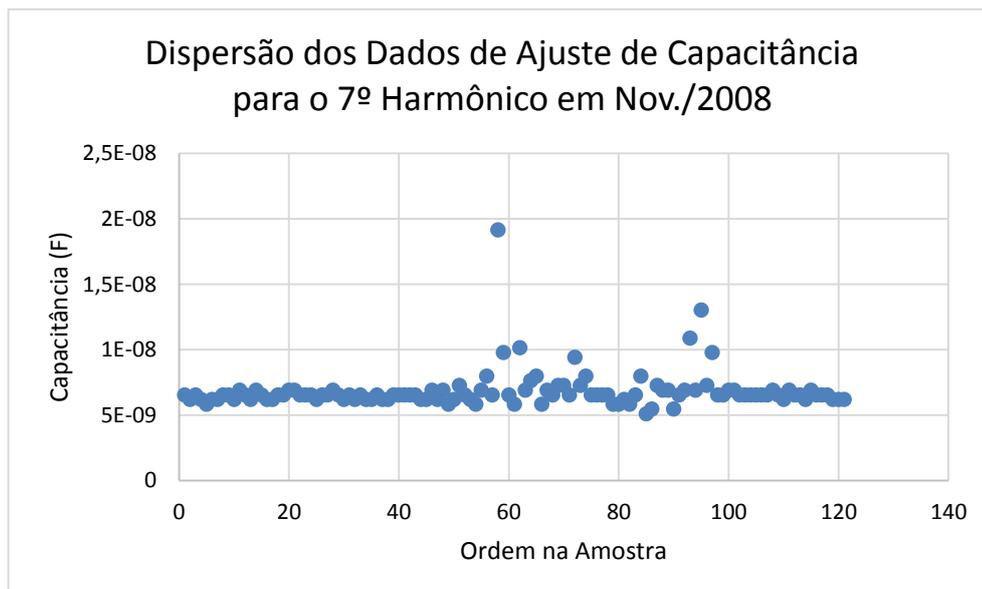


Figura 6.26 – Ajuste do valor de capacitância para o 7º harmônico, no período compreendido entre 11 a 14 de novembro de 2008. CV= 13,04%.

É possível verificar visualmente, o baixo grau de dispersão entre os diversos valores de capacitâncias em todas as Figuras de 12 a 15. Estatisticamente o coeficiente de variação dos valores dos seus respectivos gráficos estão abaixo de 15%, isso remete a baixa dispersão. O que mostra uma regularidade entre os valores de ajuste de capacitância para os harmônicos ímpares.

As Figuras de 6.27 a 6.30 mostram o comportamento do ajuste de capacitância para os dias de 11 a 14 de novembro 2008 para os harmônicos pares do 2º ao 8º.

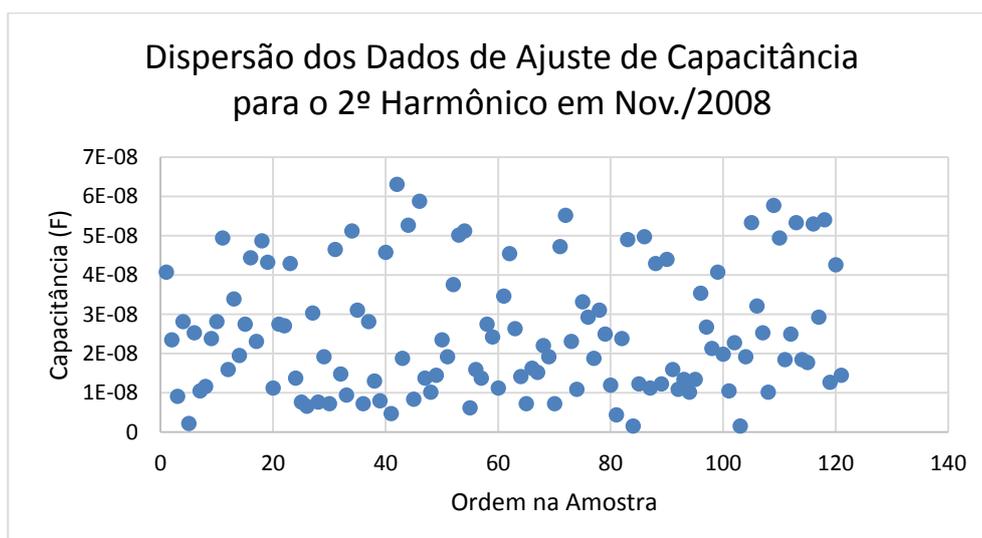


Figura 6.27 – Ajuste do valor de capacitância para o 2º harmônico, no período compreendido entre 11 a 14 de novembro de 2008, CV= 62,06%

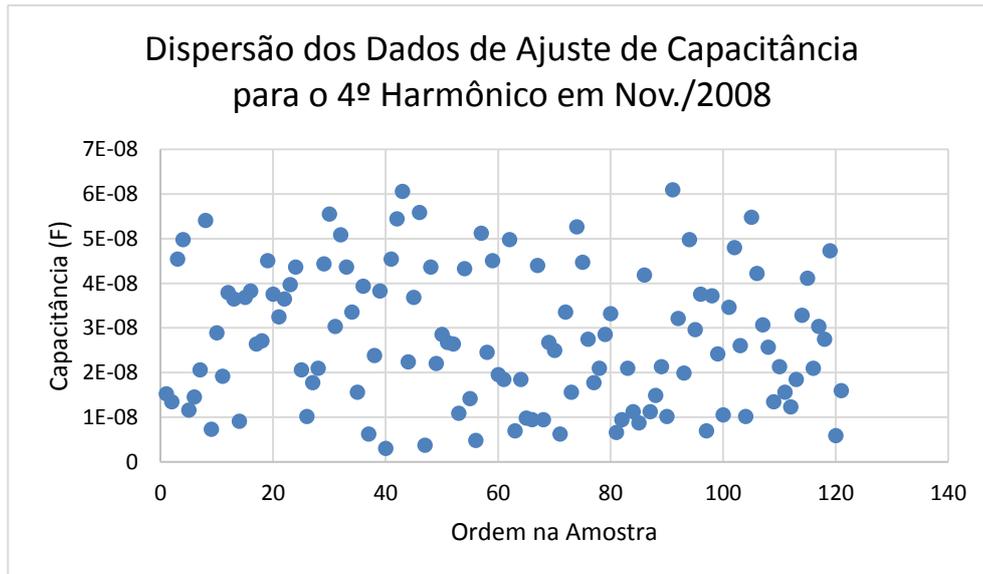


Figura 6.28 – Ajuste do valor de capacitância para o 4º harmônico, no período compreendido entre 11 a 14 de novembro de 2008, CV= 54,24%

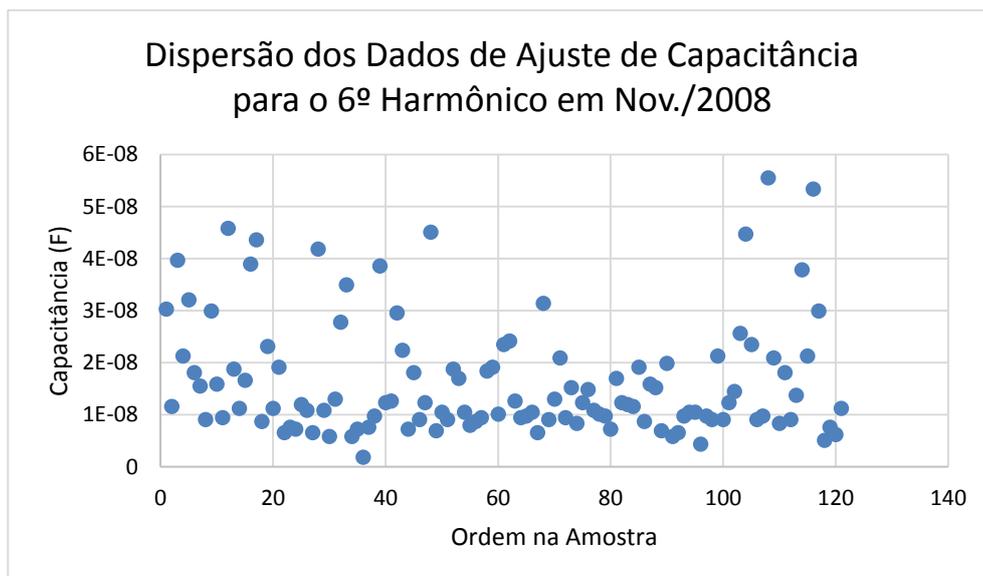


Figura 6.29 – Ajuste do valor de capacitância para o 6º harmônico, no período compreendido entre 11 a 14 de novembro de 2008, CV=68,01%.

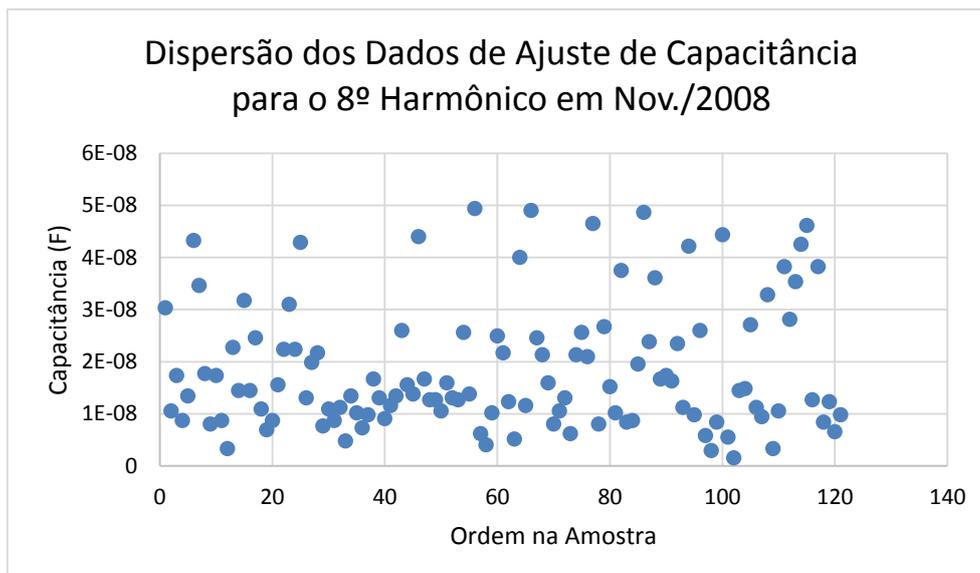


Figura 6.30 – Ajuste do valor de capacitância para o 8º harmônico, no período compreendido entre 11 a 14 de novembro de 2008, CV= 65,20%

É possível verificar visualmente, o altíssimo grau de dispersão entre os diversos valores de capacitâncias em todas as Figuras de 6.27 a 6.30. Estatisticamente o coeficiente de variação dos valores dos seus respectivos gráficos é bastante grande, todos acima de 30%, indicando uma alta dispersão. O que mostra uma irregularidade entre os valores de ajuste de capacitância para os harmônicos pares.

Na análise do ajuste de capacitância é constatado que para os harmônicos pares há um alto grau de dispersão, enquanto que para os ímpares um reduzido grau de dispersão na faixa de frequência até a 10ª harmônica.

Aparentemente ideia de associar o estado de funcionamento da LT com um padrão de capacitância, é possível apenas para os harmônicos ímpares e praticamente inviável para os harmônicos pares. Analogamente os trabalhos dos autores Suwarno (2006) e Muniraj (2009) obtiveram estas mesmas observações trabalhando com a obtenção da I_F em isoladores. Os autores comprovaram experimentalmente, através de ensaios, que as harmônicas ímpares (3ª, 5ª, 7ª e 9ª) são as mais afetadas por falhas provenientes de poluição salina. Neste caso a análise das harmônicas ímpares podem sinalizar para uma possível detecção de falhas em isoladores¹.

A procura de padrões, para o processo de detecção, passa inicialmente pela comparação do comportamento do ajuste de capacitância por harmônico, sem e com a

¹ É importante destacar, que os autores Suwarno (2006) e Muniraj (2009), em seus artigos trabalham com a DCH, e esta pesquisa trabalha com os valores de capacitância.

introdução da falha no modelo matemático. Na Figura 6.31 é mostrado o gráfico do comportamento do ajuste de capacitância para o 3º harmônico no dia 14 de novembro de 2008. Neste gráfico a curva em azul representa comportamento do ajuste de capacitância para o 3º harmônico sem falha (Normal) e a curva em vermelho o comportamento do ajuste de capacitância para o 3º harmônico com falha (Anormal). É possível verificar a coincidência de alguns pontos nos dois traços, existindo uma pequena, porém significativa diferença para as últimas amostras.

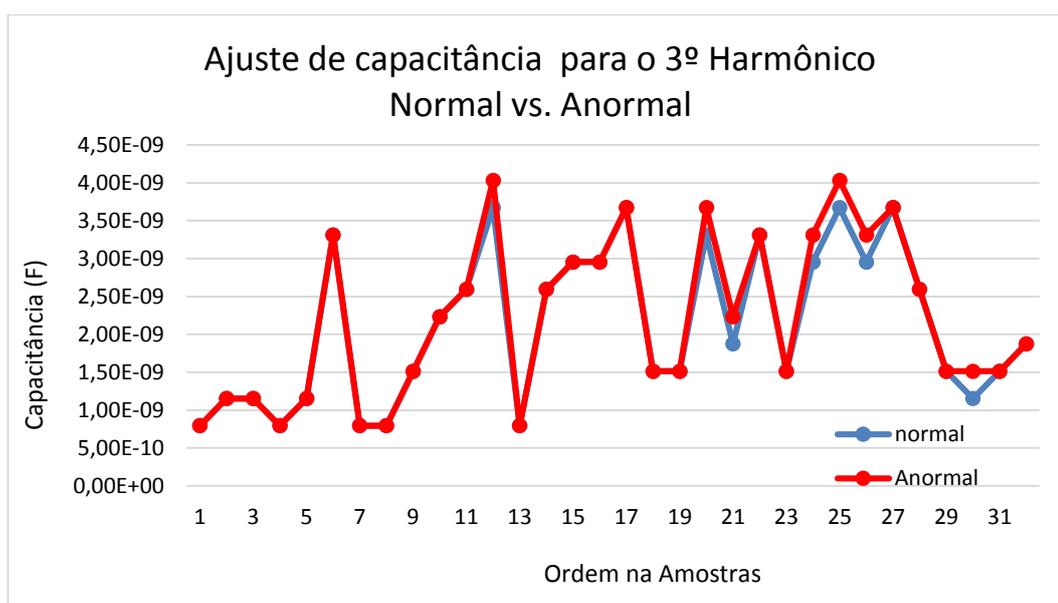


Figura 6.31 - Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 3º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha

Do mesmo modo, na Figura 6.32 está mostrado o gráfico do comportamento do ajuste de capacitância para o 5º harmônico para o dia 14 de novembro de 2008. Com a linha em azul o comportamento do ajuste de capacitância para o 5º harmônico sem falha (Normal) e em vermelho, o comportamento do ajuste de capacitância para o 5º harmônico com falha (Anormal). Porém, para o 5º harmônico é possível verificar que os pontos entre os dois traços guardam uma distância de 50% entre os dois traços, o que representa uma significativa diferença.

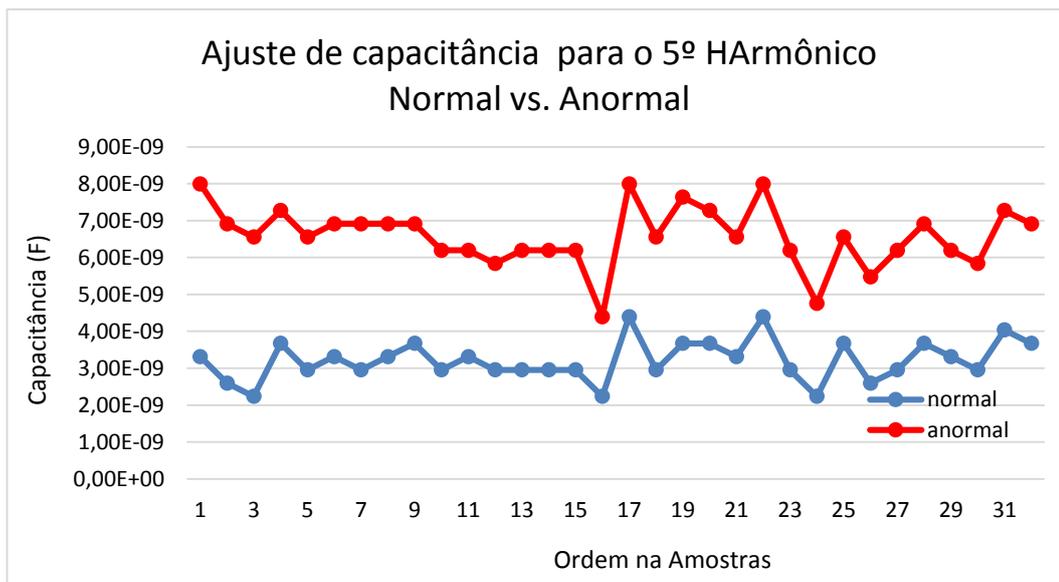


Figura 6.32 - Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 3º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha.

Do mesmo modo, nas Figura 6.33 e 6.34 é visualizado o ajuste de capacitâncias para os harmônicos 7º e 9º.

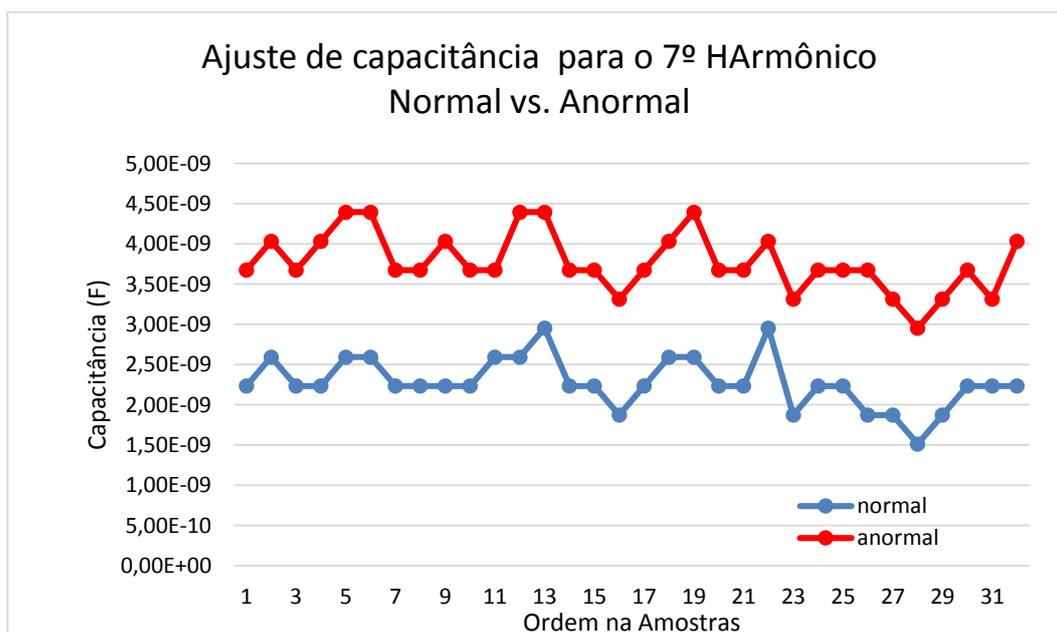


Figura 6.33 - Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 7º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha.

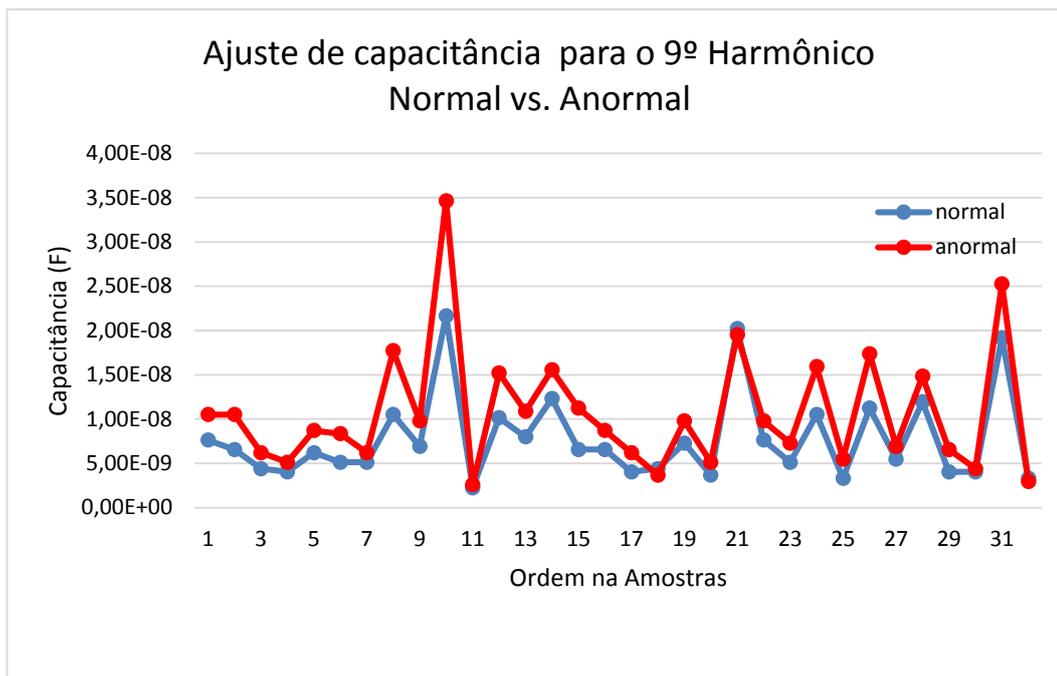


Figura 6.34 - Comportamento de alguns ajustes de capacitância referentes ao dia 14 de novembro de 2008 para o 9º harmônico. Em azul sem a falha, em vermelho com a falha.

É possível visualizar pelas Figuras de 6.31 e 6.34 que o comportamento do ajuste das capacitâncias por harmônico em sua maioria apresentam diferenças para um mesmo instante (horário). Essa diferença é crucial, pois por meio dela é possível o agrupamento e talvez a formação de padrões para classificação.

O reconhecimento de padrões pode ser feito por meio de ferramentas como Redes neurais artificiais (RNA), redes Bayesianas, tratamento estatísticos entre outros. Para esta pesquisa serão analisados padrões de classificação normal e anormal apenas das harmônicas de ordem ímpar.

6.6 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) surgiram como uma tentativa de simulação matemática do sistema nervoso humano (SARLE, 1994). Uma rede neural é uma representação matemática de neurônios dispostos de forma a permitir a análise de sinais de entrada específicos.

Uma RNA é formada por uma camada de neurônios de entrada, outra de saída e uma ou mais camadas intermediárias ou ocultas (Figura 6.35). Essa rede de conexões visa a

transmitir informações entre os neurônios de forma unidirecional afirmam (TAFNER et al., 1996) e (HISHBERG & ADAR, 1997).

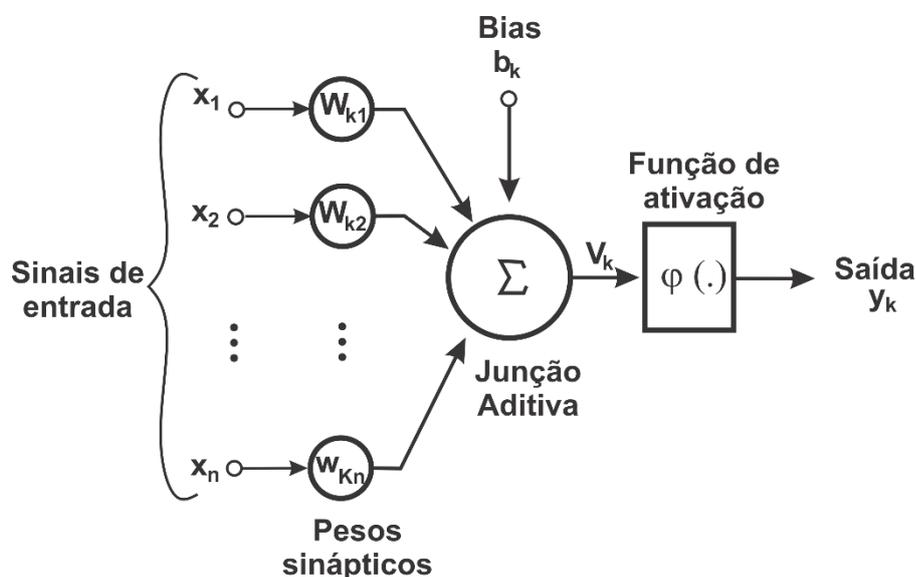


Figura 6.35 - Representação funcional de um neurônio Artificial.

As RNAs podem ser entendidas como um processador paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, correspondendo aos neurônios, que têm a capacidade de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso (HAYKIN, 2001; PILON & TANDBERG, 1997).

As RNAs são ferramentas com a notável capacidade de generalizar, aproximar funções, reconhecer padrões e também classificar robustamente conjuntos de dados imprecisos. Tais características resultam em soluções para uma variedade de problemas de classificação como reconhecimento de sinais, de caracteres ou de voz. Ao mesmo tempo, é uma poderosa ferramenta de previsão e modelagem de sistemas físicos complexos e controle de processos. Numa forma mais geral a RNA é uma máquina projetada para modelar a maneira como o cérebro realiza uma tarefa particular. A rede é normalmente implementada utilizando-se componentes eletrônicos ou fazendo simulações através de programação em um computador digital.

Segundo Haykin (2001), uma RNA é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que tem a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Sua semelhança com o cérebro humano é evidenciada em dois aspectos:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem;

2. Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

Atualmente, as RNAs têm sido largamente utilizadas na tarefa de reconhecer padrões presentes em conjuntos de dados. O objetivo desse processo é apresentar à rede um conjunto de dados conhecidos de modo que, através de um processo de aprendizado, ela determine subconjuntos de dados com características semelhantes (padrões), e seja capaz de reconhecer tais características em um novo elemento qualquer, que a ela seja apresentado, de acordo com um dos padrões previamente fixados.

Uma referência clássica sobre o assunto pode ser obtida em Bishop (1995) onde diversas técnicas e aplicações podem ser encontradas e analisadas. Para complementar a leitura básica, pode-se citar (RIPLEY & HJORT, 1995).

A arquitetura da rede é a forma pela qual os neurônios de uma RNA estão estruturados (interconectados) está intimamente relacionada ao algoritmo de aprendizagem a ser utilizado para treiná-la. As principais arquiteturas de redes neurais artificiais, podem ser distinguidas em três classes fundamentais de arquiteturas: redes *feedforward* de uma única camada, redes *feedforward* de múltiplas camadas e redes recorrentes.

6.6.1 Redes *Feedforward* de uma Única Camada

No caso mais simples de redes em camadas (*layers*), tem-se uma camada de entrada com neurônios cujas saídas alimentam a última camada da rede. Geralmente, os neurônios de entrada são propagadores puros, ou seja, eles simplesmente repetem o sinal de entrada em sua saída distribuída. Por outro lado, as unidades de saída costumam ser unidades processadoras, como apresentado na Figura 6.36. A propagação de sinais nesta rede é puramente unidirecional (*feedforward*) onde os sinais são propagados apenas da entrada para a saída, e nunca vice-versa. Esta arquitetura está ilustrada na Figura 6.36(a) e a direção de propagação dos sinais na Figura 6.36(b).

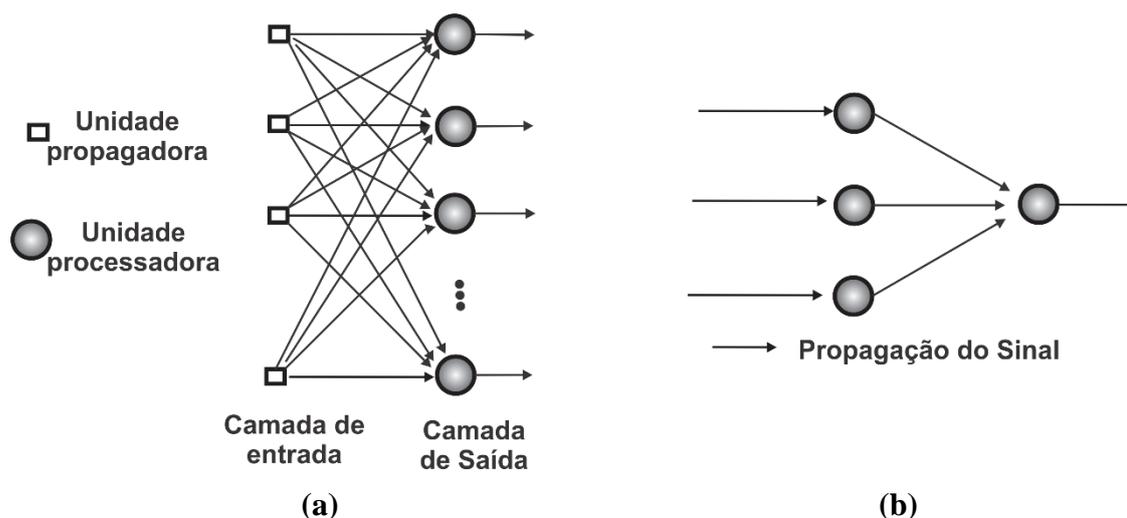


Figura 6.36 - Redes neurais tipo *feedforward* com uma única camada de unidades processadoras. (a) Arquitetura. (b) Sentido de propagação do sinal funcional.

6.6.2 Redes *Feedforward* de Múltiplas Camadas

A segunda classe de rede *feedforward* distingue-se pela presença de uma ou mais camadas intermediárias ou escondidas (camadas em que os neurônios são efetivamente unidades processadoras, mas não correspondem à camada de saída).

Adicionando-se uma ou mais camadas intermediárias, aumenta-se o poder computacional de processamento não-linear e armazenagem da rede. O conjunto de saídas dos neurônios de cada camada da rede é utilizada como entrada para a camada seguinte. A Figura 6.37(a) ilustra uma rede *feedforward* de múltiplas (duas) camadas intermediárias.

As redes *feedforward* de múltiplas camadas, são geralmente treinadas usando o algoritmo de retro-propagação do erro (*error backpropagation*), embora existam outros algoritmos de treinamento. Este algoritmo requer a propagação direta (*feedforward*) do sinal de entrada através da rede, e a retro-propagação (propagação reversa, ou *backpropagation*) do sinal de erro, como ilustrado na Figura 6.37(b).

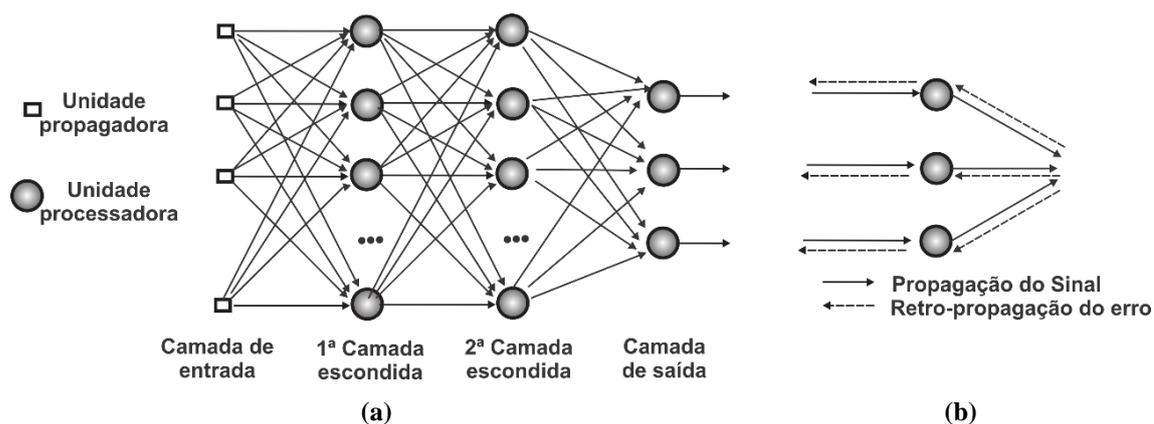


Figura 6.37 - Redes neurais tipo *feedforward* com múltiplas camadas. (a) Arquitetura. (b) Sentido de propagação do sinal funcional e do sinal de erro.

6.6.3 Redes Recorrentes

As redes recorrentes distinguem-se das redes *feedforward* pela existência de pelo menos um laço (*loop*) de recorrência (*feedback*). Por exemplo, uma rede recorrente pode consistir de uma única camada de neurônios com cada neurônio alimentando seu sinal de saída de volta para a entrada de todos os outros neurônios. O laço de recorrência possui um grande impacto na capacidade de aprendizagem e no desempenho da rede (dos SANTOS & VON ZUBEN, 2000). Além disso, este laço envolve a utilização de ramos particulares compostos de unidades de retardo ($z-1$), resultando em um comportamento dinâmico não-linear, assumindo que a rede possui componentes não-lineares.

6.6.4 Aplicação da Rede *Feedforward* aos Dados

A escolha da RNA, se deu simplesmente pela necessidade de uma ferramenta que verificasse a existência de padrões, padrões estes que são resultados dos ajustes de capacitância por harmônico.

No estudo do comportamento dos valores ajustados de capacitância por harmônico, verificou-se um grau mínimo de dispersão para os valores de capacitância ajustados nas harmônicas ímpares. O que indica um forte indício de formação de padrão para detecção de normalidade na isolação da LT. Dentro do contexto de uma RNA, para associação de padrões a estados (normal ou anormal) é necessário que estes estados sejam representados por número. Organizou-se os dados de entrada da rede como sendo os valores de capacitância e a saída será

o estado de funcionamento, que pode ser normal (representado numericamente na RNA como 0) ou anormal (representado numericamente na RNA como 1). Os dados (valores de capacitâncias normais ajustadas) empregados para treinamento e validação foram os obtidos pela medição nos dias 12, 13 e 14/nov./2008. A tabela 6.3 foi formada com alguns destes valores de capacitância organizados segundo os horários.

Tabela 6.3 - Alguns valores de capacitância para os harmônicos ímpares, após ajuste da forma de onda, para estado de funcionamento normal, em ηF , com seus respectivos dias e horários da medição, empregados como dados de entrada da RNA para treinamento e validação.

Data	14/nov/08	14/nov/08	14/nov/08	14/nov/08	14/nov/08	14/nov/08
Código	L01	L02	L03	L04	L05	L06
Hora/Corresponde	00:00:00	00:20	00:40:00	01:00:00	01:20:00	01:40:00
Capacitância (ηF) do 1º harmônico	9,79421	9,79421	9,79421	9,79421	9,79421	9,79421
Capacitância (ηF) do 3º harmônico	1,87421	1,51421	1,15421	1,51421	2,59421	3,67421
Capacitância (ηF) do 5º harmônico	6,91421	7,27421	6,19421	6,55421	7,27421	6,55421
Capacitância (ηF) do 7º harmônico	6,55421	6,19421	6,55421	6,19421	5,83421	6,19421
Capacitância (ηF) do 9º harmônico	3,31421	3,50740	3,67421	4,03421	4,2342	5,11421

Os valores de capacitância foram distribuídos de vinte em vinte minutos, isto é, a cada hora foram realizadas três medições. Tem-se para os estados de funcionamento normal e anormal, doze valores, de capacitância por hora para cada harmônico. Foram utilizados os dados dos dias 12, 13 e 14 de 2008, além dos dados de 17 e 18 de 2005, perfazendo um total de 1760 (1030 do ano de 2008 e mais 730 do ano de 2005).

O vetor de capacitância é obtido da tabela 3, por exemplo, o vetor capacitância L01 é descrito em ηF como sendo:

$$\begin{bmatrix} H_3 \\ H_5 \\ H_7 \\ H_9 \end{bmatrix}_{L01} = \begin{bmatrix} 1,87421 \\ 6,91421 \\ 6,55421 \\ 3,31421 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

A topologia da RNA é mostrada na Figura 6.38, a seguir.

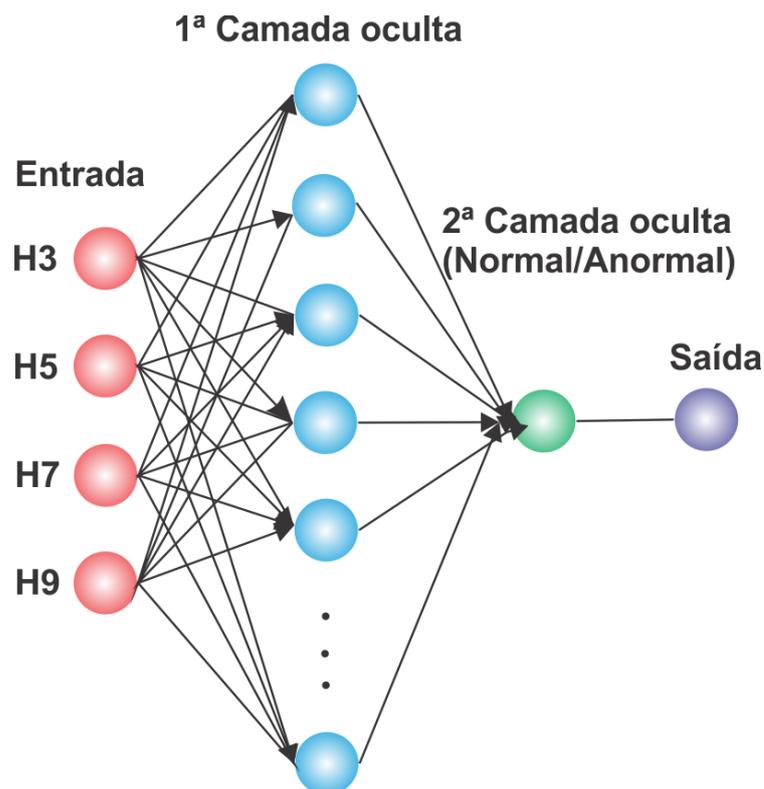
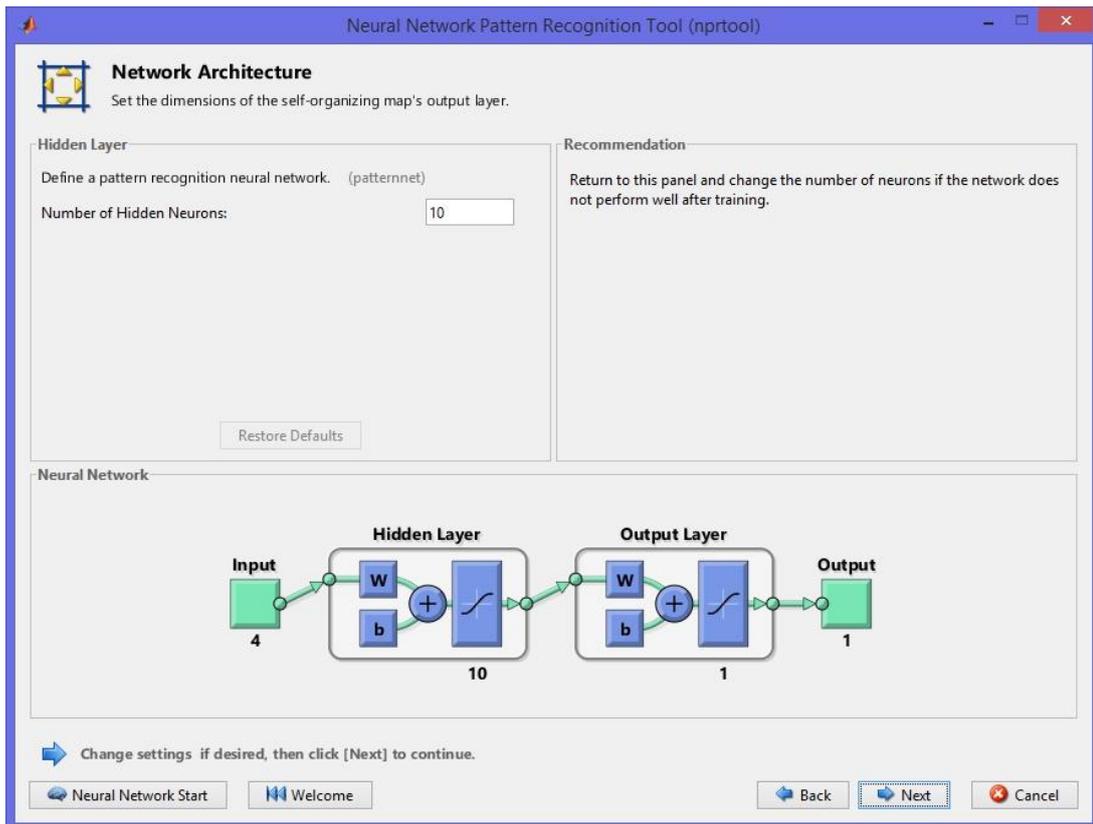


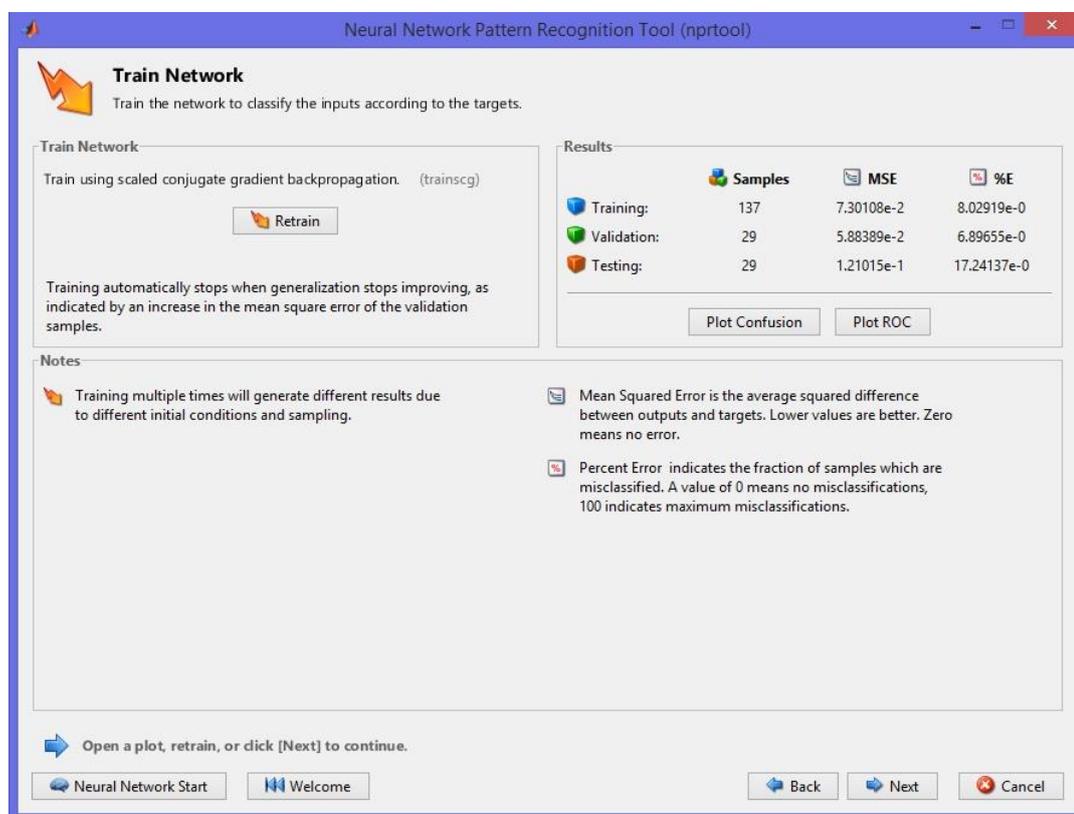
Figura 6.38 - Topologia da RNA com suas entradas como valores de capacitância e grupo pertencente por horário e a saída da rede que pode ser normal ou anormal.

A rede foi criada pela *toolbox* de reconhecimento de padrões do *software* MATLAB[®]. Quanto a sua identificação a rede utilizada pela *toolbox* é uma *Feedforward*, com treinamento *backpropagation* com gradiente conjugado escalonado², foram utilizados ainda duas camadas, sendo uma camada escondida (tangsimóide) com 10 neurônios e uma camada de saída (Sigmóide). Para o treinamento foi disponibilizado 70% dos dados, enquanto para a validação posteriormente os testes foram disponibilizados 15% para cada um. Na Figura 6.39 é apresentado os passos dados para a criação e utilização da rede.

² Diferente dos outros algoritmos *Backpropagation* existentes que requerem uma pesquisa na direção da busca a cada iteração. Essa pesquisa é computacionalmente onerosa, pois requer que sejam computadas, várias vezes para cada pesquisa, as respostas da rede para todas as entradas de treinamento. O algoritmo Gradiente Conjugado Escalonado foi projetado para evitar esse consumo de tempo. Esse algoritmo combina uma abordagem de modelo de região de confiança usado no algoritmo de Levenberg-Marquard com a técnica do gradiente conjugado. A função *Trainscg* do Matlab é utilizada para implementar esse algoritmo de treinamento.



(a)



(b)

Figura 6.39 - Criação da rede neural (10 neurônios na camada escondida) e topologia (a); Função de treinamento por gradiente conjugado escalonado e resultado do treinamento, validação e teste (b).

Após o treinamento da rede, pode-se verificar por meio do gráfico na Figura 6.40 o comportamento dos processos de treinamento, validação e teste da RNA utilizada. O melhor ponto é configurado pela convergência do treinamento e da validação para um ponto de menor erro possível. É possível verificar que a rede é treinada por 17 épocas e que tem seu melhor desempenho da décima primeira época com um erro de 0,089391 (MSE). Neste ponto da rede é possível verificar no gráfico que validação e treinamento convergem completamente, e após este ponto volta a divergir.

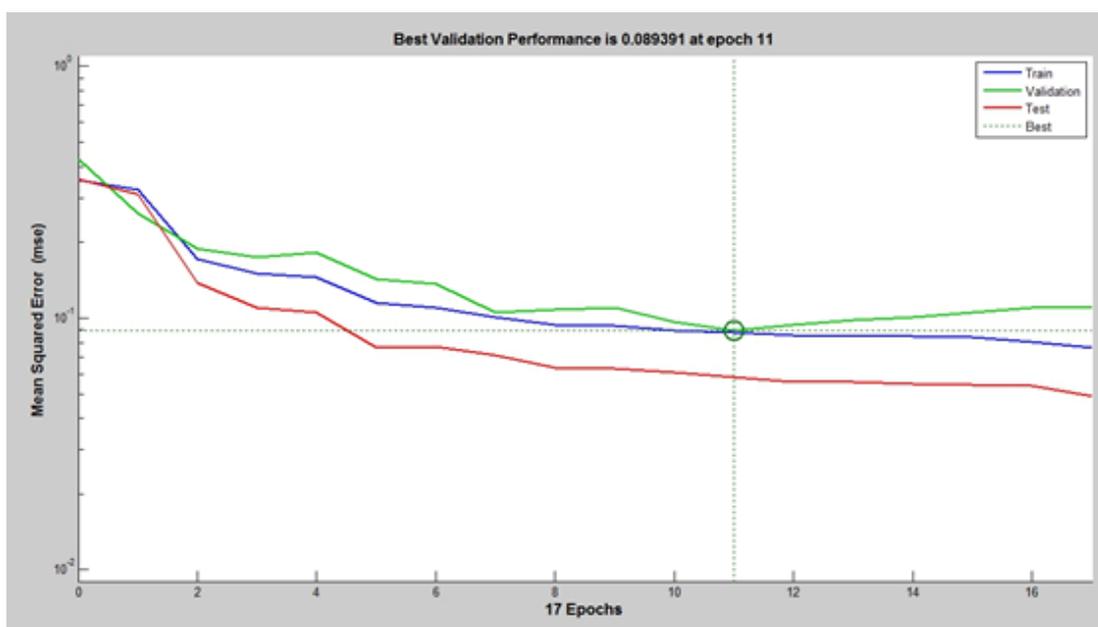


Figura.6.40 - Performance da RNA desenvolvida, com melhor ponto entre treinamento validação sendo na décima primeira época com um MSE de 0,089391.

Outra maneira de avaliar o desempenho da RNA é a matriz de classificação. A matriz de classificação mostra o número de classificações corretas em oposição às classificações preditas pela RNA para cada classe.

Por meio da Figura 6.41 (a) é mostrada a matriz classificação do treinamento. Por meio dela verifica-se que dos 137 vetores de capacitância (correspondente à 70% dos dados), 60 (43,8%) são vetores de capacitância de estado de funcionamento normal (0) enquanto 62 (45,3%) são de estado de funcionamento anormal (1). No treinamento da rede obteve-se 89,1% de acertos para a classificação. Já na Figura 6.41 (b) dos 29 vetores de capacitância (15% dos dados) é possível verificar que a classificação para o estado de funcionamento normal foi de 16 (55,2%) todos os vetores foram classificados corretamente para este estado de funcionamento, enquanto que para o estado de funcionamento anormal obteve-se 11 (37,9%) classificados, tem-

se então dos vetores de capacitância escolhidos para o processo de validação 93,1% de acertos para a classificação. Na Figura 6.41 (c) tem-se a matriz de classificação para teste, dos 29 vetores de capacitância 12 (41,4%) foram classificados como estado de funcionamento normal, enquanto que 15 (51,7%) foram classificados como estado de funcionamento anormal, num total de 93,1% de classificações corretas. E finalmente na Figura 6.41 (d) é apresentada a matriz de classificação total, que é a reunião das matrizes anteriores (Figura 6.38 (a), (b) e (c)), e mostra 88 (45,1%) vetores de capacitância com classificação de estado de funcionamento normal, e também 88 (45,1%) vetores de capacitância anormal com um acerto de 93,1% de classificação corretas.

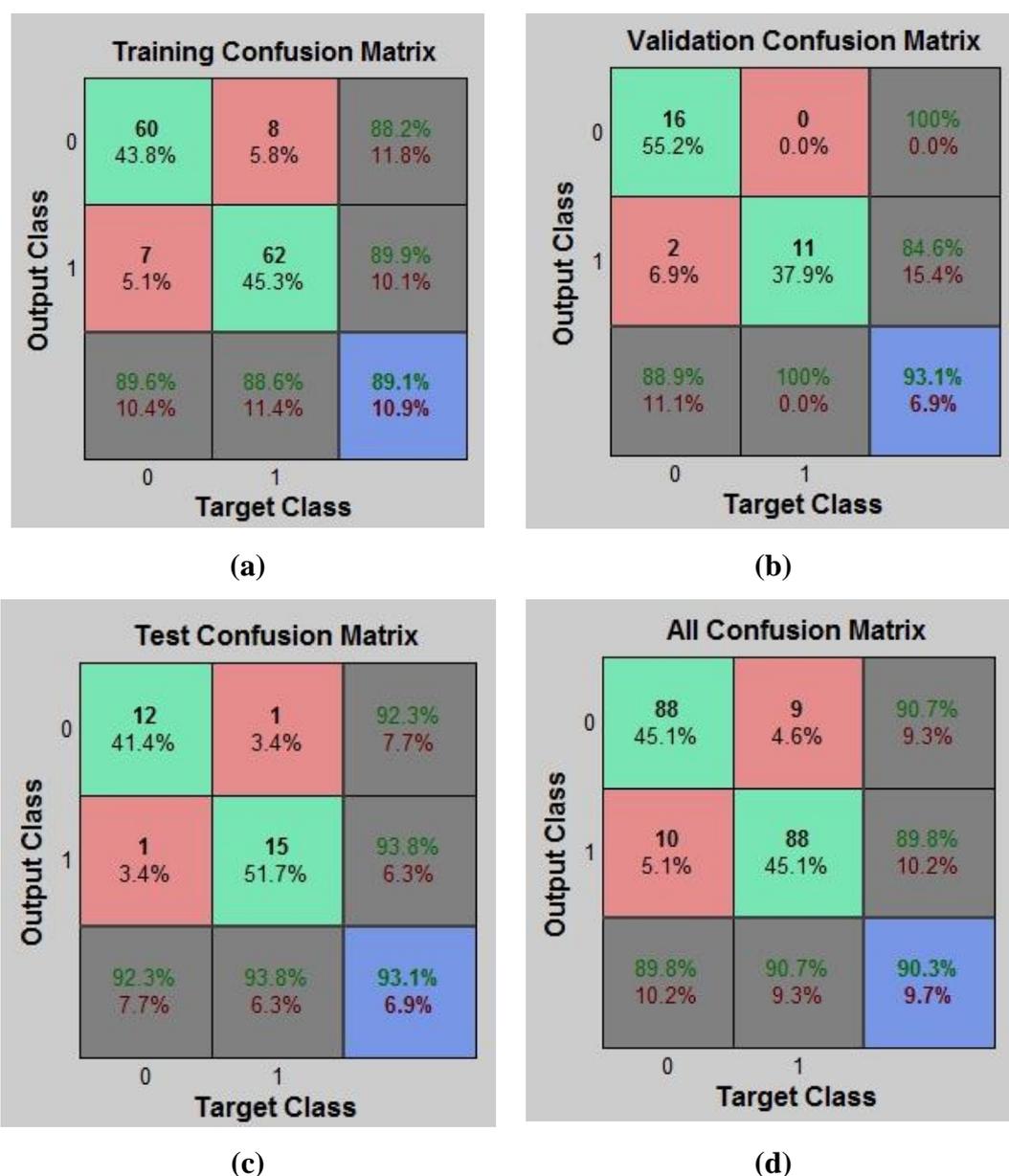


Figura 6.41 - Matriz de classificação (confusão) de treinamento (a); Matriz de classificação de validação (b); Matriz de classificação de teste (c) e Matriz de classificação total (d).

Além das matrizes de classificação, é possível analisar a curva de ROC. (*Receiver Operating Characteristic*). A curva de ROC é um método gráfico para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnóstico e/ou predição. Em Mineração de Dados é utilizada como uma ferramenta para a avaliação de modelos de classificação Bradley (1997) e Spackman (1989). As curvas ROC são uma forma de representar a relação, normalmente antagônica, entre a sensibilidade e a especificidade de um teste diagnóstico quantitativo, ao longo de um contínuo de valores de "*cutoff point*". Quando se tem uma variável contínua, resultado da aplicação de um teste de diagnóstico quantitativo, e se pretende transformá-la numa variável dicotômica, em nosso caso do tipo funcionamento normal / funcionamento anormal, têm-se que utilizar um determinado valor na escala contínua que discrimine entre essas duas classes. A esse valor dá-se o nome de "*cutoff point*". Neste caso é valor que determina se um determinado vetor capacitância será classificado como estado de funcionamento do isolamento normal ou anormal. Outro destaque da curva de ROC é que o ponto de maior equilíbrio entre a classificação das classes, e o ponto superior mais à esquerda, isto é a coordenada (0,1). Neste ponto todas as classes são classificadas corretamente, por isso o "*cutoff point*" deve ser o ponto da curva de ROC mais próximo das coordenadas (0,1).

Na Figura 6.42 (a) é representada a curva de ROC para o treinamento da RNA, nela é possível sugerir um valor aproximado de 0,1 no eixo de Falso positivo como sendo o "*cutoff point*". Nesse caso para novos vetores de capacitância a serem testados, pode ser utilizado este ponto para a classificação. Da mesma maneira a Figura 6.42 (b) retrata o comportamento da curva de ROC para a validação, enquanto que a curva de ROC da Figura 6.42 (c) retrata o mesmo para o teste. Pela Figura 6.42 (d) é observado o comportamento da curva de ROC a partir da média entre as curvas da Figura (a), (b) e (c). A importância desta última curva, está em seu "*cutoff point*", pois é este o valor utilizado para novas classificações. É possível sugerir um valor aproximado de 0,0912, que será utilizado para novas classificações.

O valor do "*cutoff point*" em 0,0912, determina que todo valor calculado pela RNA menor é classificado como **Condição normal**, enquanto que os de maior valor é classificado como **Condição anormal**.

Esses novos vetores de capacitância, foram obtidos de medições realizadas nos dias 10 e 11 de novembro de 2008. Os vetores de capacitância por harmônicos com sua respectiva data de medição foram organizados como são apresentados na Tabela 6.4. Foi ainda destacado o interior das células da tabela em azul para sinalizar os vetores capacitância correspondentes ao estado de funcionamento normal, e em vermelho os em estado de funcionamento anormal.

Tabela 6.4 - Organização dos dados coletado, organizados (em vetores capacitância) e selecionados nos dias 10 e 11 de novembro de 2008 para teste da metodologia de detecção de falha em LT.

Data/Código	H3	H5	H7	H9	Valor Agregado/RNA
10_11_08_L45	2,23421E-09	2,95421E-09	1,87421E-09	1,08742E-08	0,010343509
10_11_08_L44	7,94210E-10	2,95421E-09	1,87421E-09	3,67421E-09	0,037416615
10_11_08_L43	7,94210E-10	2,95421E-09	2,23421E-09	2,59421E-09	0,05581598
11_11_08_L66	3,67421E-09	1,51421E-09	2,23421E-09	1,55540E-08	2,17E-04
11_11_08_L67	1,51421E-09	1,51421E-09	2,23421E-09	3,67421E-09	0,004526585
11_11_08_L68	1,87421E-09	2,23421E-09	2,23421E-09	7,27421E-09	0,004579438
11_11_08_L69	2,59421E-09	2,59421E-09	2,95421E-09	1,37540E-08	0,003103214
11_11_08_L70	1,87421E-09	2,95421E-09	2,23421E-09	1,37540E-08	0,006998734
11_11_08_L71	2,23421E-09	2,95421E-09	2,23421E-09	4,03421E-09	0,031996335
11_11_08_L72	1,87421E-09	2,95421E-09	2,23421E-09	1,26740E-08	0,008368474
10_11_08_L45	2,23421E-09	3,67421E-09	2,23421E-09	9,79421E-09	0,243414417
10_11_08_L44	7,94210E-10	3,67421E-09	2,23421E-09	3,31421E-09	0,435000244
10_11_08_L43	7,94210E-10	3,67421E-09	2,59421E-09	2,59421E-09	0,528905586
11_11_08_L66	3,67421E-09	2,95421E-09	2,59421E-09	1,33940E-08	0,005907781
11_11_08_L67	1,51421E-09	3,31421E-09	2,59421E-09	3,67421E-09	0,163561507
11_11_08_L68	2,23421E-09	3,67421E-09	2,59421E-09	6,55421E-09	0,381082711
11_11_08_L69	2,59421E-09	4,03421E-09	3,31421E-09	1,23140E-08	0,778764449
11_11_08_L70	1,87421E-09	4,39421E-09	2,59421E-09	1,12342E-08	0,925261576
11_11_08_L71	2,23421E-09	4,39421E-09	2,59421E-09	3,67421E-09	0,958806681
11_11_08_L72	1,87421E-09	4,03421E-09	2,59421E-09	1,15942E-08	0,660277782

Com os dados já organizados em vetores capacitância, e utilizando o valor de "*cutoff point*" de 0,0912 pode-se traçar um perfil de classificação destas novas situações do isolamento da LT. O resultado da classificação é apresentado na tabela 6.5, onde os dados estão organizados pela data/código de horário, o valor calculado pela Rede Neural e a classificação do isolamento da LT.

Tabela 6.5 - Classificação por meio da metodologia sugerida, para as novas condições de funcionamento do isolamento da LT.

Data/Código	Valor Agregado pela RNA	Classificação do isolamento da LT
10_11_08_L45	0,010343509	Condição normal
10_11_08_L44	0,037416615	Condição normal
10_11_08_L43	0,05581598	Condição normal
11_11_08_L66	2,17E-04	Condição normal
11_11_08_L67	0,004526585	Condição normal
11_11_08_L68	0,004579438	Condição normal
11_11_08_L69	0,003103214	Condição normal
11_11_08_L70	0,006998734	Condição normal
11_11_08_L71	0,031996335	Condição normal
11_11_08_L72	0,008368474	Condição normal
10_11_08_L45	0,243414417	Condição anormal
10_11_08_L44	0,435000244	Condição anormal
10_11_08_L43	0,528905586	Condição anormal
11_11_08_L66	0,005907781	Condição normal
11_11_08_L67	0,163561507	Condição anormal
11_11_08_L68	0,381082711	Condição anormal
11_11_08_L69	0,778764449	Condição anormal
11_11_08_L70	0,925261576	Condição anormal
11_11_08_L71	0,958806681	Condição anormal
11_11_08_L72	0,660277782	Condição anormal

Devido ao "*cutoff point*" em 0,0912, verifica-se os valores nas células azul clara **Condição normal**, enquanto que os registrados nas células vermelho claro foram classificados como **Condição anormal**, isto é foi detectada a falha de isolador que foi previamente inserida.

Para este teste, apenas o vetor capacitância do correspondente ao dia 11 de novembro de 2008 das 21h:40min foi classificado erroneamente, portanto houve um acerto na classificação de 95%. Assim, pode-se concluir que o conjunto de valores de capacitância (vetor capacitância) que é associado a um estado de funcionamento da LT, pode ser empregado como **índice para determinação do estado de funcionamento da LT**. Por meio deste índice é possível verificar o surgimento de uma falha.

6.7 CONCLUSÃO

Este capítulo abordou inicialmente, o estudo da I_F por harmônicos, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Verificou-se a necessidade da utilização de uma modelo matemático de falha. Para isso foi selecionado um sinal de falha de um isolador

poluído, e este sinal foi somado vetorialmente com os dados de entrada do modelo matemático, gerando assim o modelo matemático com falha. Realizou-se comparações entre o modelo matemático sem falha (Normal) e o modelo matemático com falha (Anormal). No domínio do tempo, com as formas de ondas dos dois modelos, foi observado a impossibilidade de utilizar estes sinais para o processo de detecção de falhas. Em seguida foi realizada comparação dos dois modelos, normal e anormal no domínio da frequência, observando o comportamento das DCHs da I_F . A diferença entre os dois modelos era praticamente imperceptível, inviabilizando a utilização no processo de detecção de falha.

Posteriormente, foi ajustado o valor do parâmetro capacitância da LT, harmônico por harmônico para aproximar a forma de onda dos modelos com a forma de onda medida. Este procedimento foi realizado no modelo matemático sem falha e no modelo com falha. Como resultado foi constatado que os valores de capacitâncias ajustadas perceptivelmente diferentes para os modelos matemáticos (sem falha e com falha). Restava a questão de se verificar se estas diferenças entre as capacitâncias entre os dois modelos representariam padrões capazes de identificar os estados distintos de funcionamento da LT em seu estado normal e anormal. Para verificar os padrões foram observadas as dispersões, através das quais foi possível constatar que somente os harmônicos ímpares se comportavam de maneira a formar padrões.

Em seguida foi desenvolvida uma metodologia para classificar estes padrões como normal e anormal empregando RNA. Deduziu-se a possibilidade da formação de padrões, ao agrupar os valores de ajuste de capacitância em um vetor, que foi chamado de vetor capacitância. O vetor capacitância só possui significado matemático. Foram criados vários vetores capacitâncias e eles foram associados ao estado de funcionamento normal e anormal.

A RNA utilizada foi uma *Feedforward* com treinamento *backpropagation* com gradiente conjugado escalonado. A camada de entrada com 4 neurônios (harmônicos 3º, 5º, 7º e 9º). A rede possui ainda duas camadas, sendo uma camada escondida com 10 neurônios, e outra camada escondida para saída (Normal ou Anormal). Foram empregados dados de medição dos dias 12, 13 e 14 de novembro de 2008 para validação e treinamento, a RNA foi testada por dados obtidos pelas medições dos dias 10 e 11 de novembro. O total de dados empregados foi de 820. A rede realizou o treinamento com 70% dos dados disponíveis, a validação com 15% dos dados disponíveis e o teste com o restante 15% dos dados disponíveis. Os dados utilizados na RNA foram os dos dias 12, 13 e 14 de novembro de 2008.

Foi analisada a performance da RNA através da obtenção de sua convergência. A rede precisou de 11 épocas para obter a melhor convergência entre o treinamento e a validação para um MSE de aproximadamente 0,089391. Outro instrumento para verificação do desempenho da RNA foi a tabela de classificação. Pela Tabela de classificação, 45,1% dos dados representados para a classe normal e 45,1% para a classe anormal, perfazendo um total de 90,2% de dados classificados corretamente. Outra análise realizada dirigida a RNA foi a curva de ROC. Por meio desta curva foi possível determinar o valor de 0,0912 para classificação entre as classes normal e anormal. O resultado foi uma classificação de 95% de acertos para estes dados que estavam fora da amostra inicial.

Como isso foi comprovada a relação existente entre os valores ajustados de capacitância e o estado de funcionamento do isolamento da LT. É possível realizar detecções do estado de funcionamento da LT, pelo comportamento da capacitância, e esse novo índice, foi chamada de índice de determinação de funcionamento da LT (NEGRÃO, 2012).

CAPÍTULO 7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Pelo presente capítulo são apresentadas as considerações finais, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi discutido no capítulo 2, algumas técnicas de Detecção e Isolação de Falhas – FDI. Dentre essas técnicas a que mais se adequou à proposta deste trabalho foi a de detecção por meio de modelos matemático. Além do modelo matemático foi descrita a instalação do sistema responsável pela monitoração online da LT, e selecionados os parâmetros a serem analisados.

No capítulo 3 foi apresentado um estudo do Estado da Arte de modelos matemáticos de LTs.

No capítulo 4, foram testados, por meio de simulações três modelos matemático. O modelo matemático “Tee - T”, “PI – π ” e o “PI – π ” com resistência paralela junto ao parâmetro capacitância, sendo este último o modelo selecionado.

Tanto a forma de onda quanto à decomposição harmônica do modelo matemático selecionado, geram respostas bem adequadas em comparação ao comportamento real. Houve a necessidade de uma adaptação no uso do modelo. Os sinais de entrada do modelo foram inicialmente decompostos em suas “senóides puras”. Em seguida o modelo matemático efetuou seus cálculos e obteve uma respectiva saída. Após o modelo matemático efetuar os cálculos com todos os harmônicos, as saídas geradas foram somadas. A saída resultante da soma, tem uma forma de onda e uma decomposição harmônica, com boa fidelidade da forma de onda real coletada pelos equipamentos (Capítulo 4).

No capítulo 5 foram validados os dados adquiridos dos equipamentos e dispositivos de medição. Os analisadores de energia estavam instalados na casa de relé de proteção das subestações. Sabe-se da atenuação que os TPs e TCs podem causar nas medidas de alta frequência. Por isso, buscou-se o conhecimento sobre os limites dos transformadores, e até que faixa de frequência os dados poderiam ser adquiridos pelos analisadores de energia. Para isso foram estudados alguns trabalhos de ensaios em frequência realizados em transformadores

semelhantes e também no transformador em questão. Foi utilizada ainda, tecnologia de compensação e amplificação disponível no analisador observando os limites impostos pelos fabricantes. Como resultado dos estudos realizados neste capítulo foi verificada uma restrição dos dados válidos para o estudo proposto até o 10º harmônico.

No capítulo 6, inicialmente foi desenvolvido um modelo matemático de falha. Esse modelo matemático foi obtido somando-se vetorialmente uma corrente com falha à da corrente de entrada do modelo matemático sem falha, desenvolvido no capítulo 4. A falha selecionada foi reproduzida de um ensaio de isoladores poluídos. Com isso, tem-se dois modelos: um modelo matemático sem falha (Normal) e um modelo matemático com falha (Anormal).

Inicialmente a hipótese era, que na comparação entre as formas de onda respectivas e/ou das decomposições harmônicas respectivas dos dois modelos matemáticos houvesse um valor de resíduo razoável e por meio dessa diferença pudesse chegar a detecção da falha. Verificou-se que tanto a forma de onda quanto a decomposição harmônica possuem resíduo exíguos. Por outro lado ao ajustar-se os valores de capacitância por harmônico nos respectivos modelos, verificou-se um resíduo razoável entre o modelo matemático com falha e o modelo matemático sem falha.

Quanto ao comportamento da capacitância, no modelo matemático sem falha, pode-se destacar, a proximidade entre os valores para harmônicos ímpares, sugerindo um padrão. Todos os valores de capacitância ajustados (para harmônicos ímpares) no intervalo entre 10 e 14 de novembro de 2008, tiveram valores aproximados, com um baixo grau de dispersão.

Para harmônicos pares, no mesmo período (10 à 14 de novembro de 2008), e também para o modelo matemático sem falha, os valores dos ajustes de capacitância são bem distantes um do outro, tendo como consequência um alto grau de dispersão.

Em seguida verificou-se o comportamento dos valores de capacitância para o modelo matemático com falha. Atestou-se também que para as harmônicas ímpares, os valores de capacitância tinham um baixo grau de dispersão. E para harmônicos pares um alto grau de dispersão, sugerindo padrão de reconhecimento.

A extração do resíduo entre os valores de capacitância dos harmônicos ímpares, mostrou-se satisfatória, pelo seu valor e pela sua regularidade. A análise do resíduo mostrou uma certa sensibilidade da capacitância na presença de falhas. O resíduo dos valores de capacitância dos harmônicos pares, refletiu em valores irregulares.

O conhecimento do comportamento de baixa dispersão somente nos ajustes de capacitância para harmônicos ímpares, pode ser adaptado a outros trabalhos de ensaios em isoladores poluídos. Nestes ensaios, foi verificado que os harmônicos ímpares são os mais afetados pelo tipo de falha que foi simulado no modelo matemático. Com isso, foi restringida a metodologia de detecção de falha, às harmônicas ímpares (3^a, 5^a, 7^a e 9^a), pois à estas, devido sua regularidade, é possível a formação de padrões.

Para a determinação de padrões e por consequência detecção da falha, foi utilizada uma ferramenta de inteligência computacional, a RNA. A Rede Neural utilizada foi uma *feedforward* com algoritmo de treinamento *backpropagation* de gradiente escalonado. A rede tinha na sua topologia quatro neurônios de entrada (Harmônicos 3^o, 5^o, 7^o e 9^o), duas camadas escondidas, sendo um das camadas com 10 neurônio e outra com o neurônio de saída que determinava se o resultado era normal ou anormal.

Os valores de entrada da rede, correspondem aos valores dos ajustes de capacitância das harmônicas ímpares. A esse conjunto denominei de vetor capacitância, e a esse vetor está associado um estado de funcionamento do isolamento da LT.

O desempenho da rede foi medido, pelo gráfico de performance, em que foi informado que o treinamento durou por 11 épocas e o erro convergiu em 0,089391 (mse).

Outro medida de desempenho foi a matriz de classificação, que mostrou 45,1% de classificações corretas para o estado normal e 45,1% de classificações corretas para o estado anormal. O total de classificações corretas foi de 90,3%, o que é um ótimo nível de classificação.

As curvas de ROC foram utilizadas para a determinação do valor de ponto de corte "cutoff point" de 0,0912. Este é o valor que define em que classe um determinado vetor capacitância pertence.

O índice de determinação do estado de funcionamento da LT, é representado pelo vetor capacitância e a associação ao estado da LT.

Com isso verifica-se ser possível a determinação do estado de funcionamento da LT, através do estudo do comportamento da capacitância. A análise dos resultados, sinalizam para a generalização para harmônicos de ordem superior.

7.2 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia capaz de monitorar e detectar o estado de funcionamento do isolamento de uma LT, com base na medição da corrente de fuga, por meio do ajuste do parâmetro elétrico capacitância, com o auxílio de modelagem matemática.

A metodologia desenvolvida realizou a medição e análise da corrente de fuga total medida em um trecho de LT, submetido à sua tensão de operação. Baseado nos sinais medidos, foi desenvolvida uma modelagem matemática, fundamentada na superposição das fontes harmônicas, capaz de representar estes sinais com boa exatidão. Em seguida foi realizado o ajuste de capacitância comparando-se os valores de pico de amplitudes, por harmônico. Foi desenvolvido um modelo de falha, com a introdução de uma falha de isolador, nos dados de campo que correspondem a entrada do modelo matemático. A partir dos modelos sem e com falha foi possível extrair características do comportamento das capacitâncias, mais especificamente dos ajustes realizados correspondentes às harmônicas ímpares (3^a, 5^a, 7^a e 9^a). Com as características extraídas dos ajustes de capacitância, desenvolveu-se o vetor de estado capacitância. O vetor capacitância representa um estado de funcionamento da LT. Realizou-se a construção de bases de dados a serem utilizadas no treinamento e teste de um classificador de estados de funcionamento de isolamento da LT. O classificador é baseado em Redes Neurais Artificiais denominadas *Feedforward* Multicamadas.

Foram proposto e realizadas medições de corrente de fuga de um trecho compreendido entre as SE Guamá e Utinga, utilizando analisadores de energia sincronizados via GPS, que mediam sinais de tensão e corrente do trecho. Com o intuito de se construir bases de dados de sinais de corrente de fuga a serem utilizadas nos testes e validação da metodologia desenvolvida.

Por fim, foi proposto, testado e validado com dados de campo, o estado de funcionamento do isolamento de LT, baseado na utilização de redes neurais *Feedforward* multicamadas, as quais são capazes de realizar o agrupamento automático de padrões segundo um grau de similaridade. Com isso, obtém-se a formação de grupos por padrões (características extraídas dos ajustes de capacitância) correspondente ao estado de funcionamento normal (sem falha) ou anormal (com falha). A taxa de acerto para as classificações se o sistema estava normal ou anormal foi de 90,3%. Estes resultados são bastante expressivos, dada a complexidade do problema. O classificador conseguiu detectar estados de funcionamento do isolamento com

diferenças sutis (encontradas nos ajustes de capacitância correspondentes à 3ª e 9ª harmônicas), em que regras simples de classificação, baseadas em limiares, por exemplo, certamente falhariam.

Dessa maneira, conclui-se que é possível realizar a monitoração e a detecção do estado de funcionamento do isolamento da LT, a partir da análise do ajuste teórico de capacitância, tendo como base de comparação a corrente de fuga. É possível ainda, afirmar que a metodologia de detecção apresentada gera resultados com um bom grau de exatidão, uma vez que a elevada taxa de acerto de classificação do estado de funcionamento do isolamento da LT, foi encontrado para a dicotômica situação analisada. Com isso tem-se que a técnica de detecção para o estado de funcionamento do isolamento da LT proposta neste trabalho foi desenvolvida, testada e validada com sucesso.

7.3 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugiro:

- Análise mais minuciosa ao comportamento do ajuste da capacitância para os harmônicos pares, a fim de determinação de padrões que auxiliem na detecção do estado de funcionamento da LT;
- Inserção de outras falhas, com o intuito de classificação de diversas falhas, isto é, diagnóstico de falhas em LTs;
- Complementação da modelagem matemática da LT, que reproduza o comportamento de transformadores na entrada da LT, com o intuito de compensação das harmônicas de ordem superior à 10ª harmônica.

Referências

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia. Científica e Industrial.** Editora Manole. 1º Edição. 2008.

ANEEL – **Contribuição para Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas – Instrumentos de Medição**, Relatório Parcial 4, Universidade Federal de Uberlândia, julho de 2006.

ARAHAL, Manuel R., SORIA, Manuel Berenguel, DÍAZ, Francisco Rodríguez, “**Técnicas de Predicción com Aplicaciones em Ingeniería**”, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, ISBN 84-472-1076-X, España, 2006.

BACHMANN, BERNHARD. - **Impedance Measurement System for Power System Transmission Lines** – (Patente) ABB Inc. US6397156, 2002.

BAUNGARTEN, A.P., FELIX, D., MARTINS, M., MÜLLER, M., CALMON, A.T. Mapeamento a Laser, GIS BRASIL 2003 – **9º Show de Geotecnologias – 3ª Mostra do Talento Científico.**

BEZERRA, J. M. B.; RÉGIS Jr. O; LUNA R. **Monitoração de Parâmetros Eletromecânicos de Linhas de Transmissão com Vistas A Avaliação do Estado Operacional e Recapacitação** – XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNTPEE Foz do Iguaçu. Outubro de 1999.

BIRDWELL, J.D., Castanon, D.A., Athans, M., On Reliable Control System Designs, Systems, IEEE Transactions on Man and Cybernetics, Sept. 1986, Volume: 16, Issue: 5, p.p. 703 – 711, ISSN: 0018-9472.

BUTKOV, E, **Física Matemática.** Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 1983.

CARSON, J. R., “**Wave propagation in overhead lines with ground return**”. Bell System Technical Journal, Nova Iorque, outubro de 1926. Vol. 5, págs. 539-555.

CORREA, S.M.B.B., **Probabilidade e Estatística** – 2ª ed. - Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

COSTA, F. B. **Deteção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Campina Grande 2000.

CTEEP. **Linhas de Transmissão.** Disponível em:
<http://www.ctEEP.com.br/port/institucional/negocio/linhas.asp>. Acessado em: 21 de Setembro de 2008.

DICK, E. P., WATSON, W., **Transformer models for transients studies based on field measurements**; Paper F80 244-4, IEEE Winter Meeting, 1980. Transformadores Pág. 2.

DOUAR M.A. MEKHALDI A. AND BOUZIDI M.C.; “**Frequency Analysis of the Leakage Current under Non Uniform Polluted Conditions on One Insulator Plane Model.**”. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 978-1-4244-9470-5/10 IEEE.

ENDERS, A.R; TREITEL S. **Geophysical Signal Analysis**, 2ª ed. Inc. Englewood Cliffs, 1977, Prentice Hall.

FERNANDES JR D., NEVES W. L. A, VASCONCELOS. J. C. A. **Um Modelo de Transformador de Potencial Capacitivo para Estudos de Sobretensões Transitórias**. V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, Sergipe, Brasil, 2003.

FERNANDES, A. B., NEVES, W. L. A. **The Effect of the Shunt Conductance on Transmission Line Models**. IPST-2001 Proceedings, Rio de Janeiro, Brazil: 49-54, 2001a.

_____. **Frequency-Dependent Transformation Matrices for Phase-Domain Transmission Line Models**. IEEE Summer Power Meeting 2001, p. 1782-1787, Vancouver, 2001b.

FERNÁNDEZ, Maria Cruz Garcia, “**Planificación y Medida de la Efectividad del Mantenimiento Predictivo Aplicado a un Proceso Industrial Basándose en el Uso de Técnicas de Modelado de su Comportamiento y de Inteligencia Artificial**”, Tesis Dep. de Electrónica y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, 2004.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. 2ª edição. Rio de Janeiro, Livros técnicos e científicos, 1979.

GOLUB, G.H., LOAN, C.F.V. **Matrix Computations**. 3ª Ed. New York, USA. Editora Johns Hopkins Studies in Mathematical Sciences, 1996.

GOMES JR, L. A. **Modelo Matemático de Linhas de Transmissão para o Trecho Guamá – Utinga localizada em Belém, pertencente a Eletronorte**, Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, 2007.

GOMES, C. R. “**Localização De Falhas Em Linhas De Transmissão Utilizando Decomposição Harmônica E Redes Neurais Artificiais**”, Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, 2006.

GRAEME, HEGGIE. - “**Detection de Defaillance Dans Les Lignes de Transport D’electricite**” – (Patente) ALSTOM UK LTD. CA2314838, 2001.

GRUPO ENERGISA. Disponível em:

<http://www.grupoenergisa.com.br/servicosaaereos/Serviços/tabid/1620/Default.aspx>. Acessado em: 28 de julho de 2012.

GUPTA, Madan M., SINHA, Naresh K., “**Soft Computing and Intelligent Systems: Theory and Applications, Academic Press Series in Engineering**”, ISBN-10: 0126464901, London, 1999.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. **Combined Phase and Modal Domain Calculation of Transmission Line Transient Based on Vector Fitting**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 13, n. 2, p. 596-604, 1998a.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. **Simulation of Transmission Line Transients using Vector Fitting and Modal Decomposition**. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 2: 605-614, 1998b.

HANGAR SERVICIOS. Disponível em: http://www.hangarservicios.com/p_corona1.htm. Acessado em: 28 julho de 2012.

INFORMATION ADMINISTRATION, NATIONAL TELECOMMUNICATION. 1997. Telecommunications Glossary of Telecommunications Terms. Lanham: Government Institutes ISO/CD 10303-226. <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=1385085>

ISERMANN, R.; **Fault-Diagnosis System An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**, New York, Springer, 2006.

JACOBSON, C. A. and Nett, C. N., “**An Integrated Approach to Controls and Diagnostics Using the Four Parameter Controller**, *Control Systems Magazine*”, IEEE, Vol. 11, pp. 22 – 29, Oct. 1991.

KANASHIRO A.G. AND BURANI G.F.; “**Leakage Current Monitoring of Insulators Exposed to Marine and Industrial Pollution**”. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canadá, June 16-19, 1996. 271 pág.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**, 1ª.ed, Rio de Janeiro, Editora: Quality Mark, 1998.

KUROKAWA S., YAMANAKA F. N. R., PRADO A. J., BOVOLATO L. F., PISSOLATO J. **Representação de Linhas de Transmissão por Meio de Variáveis de Estado Levando em Consideração o Efeito da Frequência sobre os Parâmetros Longitudinais**, *Revista Controle & Automação – SBA*, 18: 337-346. 2007.

LEHMANN, E. L.; CASELLA, GEORGE **Theory of Point Estimation** 2nd Ed. New York: Springer. ISBN 0-387-98502-6. MR 1639875. 1998.

LIMA, A. C. S., Fernandes, A. B. e Duque, C. A., **Otimização dos modelos variantes com a frequência para linhas de transmissão aéreas em programas no domínio do tempo**. XIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Natal, Brasil, 2002.

LIMA, A. C. S., PEREIRA, M. P. **Análise Comparativa dos Modelos de Linha de Transmissão para EMTP**. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Campinas, outubro de 2001.

MANITOBA. HVDC Research Center. PSCAD/EMTDC Simulation Program - V3.8, Personal Edition, Winnipeg, Canadá, 2002.

MARCANO, F.; MARTÍ, J. **Idempotent Line Model: Case Studies. Proceedings of IPST'97** – International Conference on Power Systems Transients, p. 62-72, 1997.

MARÇAL, R.F.M. **Um Método para Detectar Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas Baseado em Análise de Vibrações em Lógica Fuzzy** – Tese de Doutorado. Depto. Engenharia Elétrica. UFRGS, Porto Alegre 2000.

MARTÍ, J. R **Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1: 147-157. 1982.**

MARTINEZ V, J. A; GUSTAVSEN, B. **Overview of Overhead Line Models and their Representation in Digital Simulations, Proceedings of IPST. International Conference on Power Systems Transients, 2001. Rio de Janeiro, Brasil, p.01-06.**

MENG, Tang, **The Adaptive Intelligent Model for Diagnosis, Prediction and Control**, Dr. ing Thesis Dep. Production and Quality Eng., Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 2004, ISBN 82-41-6538-4.

MODEL 1133A POWER SENTINEL. **Operational Manual, Arbiter Systems Incorporated, 1999.**

MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. **A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 14, Issue 3, p. 1032-1038, 1999.**

NAIDU, S. R. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**, Campina Grande: Grafset, 1985. 316 p.

NASCIMENTO, C. A. M, Carvalho, R. M., Hortêncio, C. A., Leite, R. L., Vinagre, M. P., Silva, H. F., **Aplicação de Tecnologias de Monitoramento em Tempo Real para Aumentar a Capacidade de Transmissão em LTs Aéreas. VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. Salvador, Brasil, 2007.**

NEGRÃO, M.M.L.C, SILVA P.R.N., GOMES C.R., GOMES H.S., VIEIRA JR., P, SANZ-BOB M.A. **MCHO – A New Indicator for Insulation Conditions in Transmission Lines, International Journal of Electrical Power & Energy Systems – IJEPES, Volume 53, Pages 733–741, December 2013.**

NELLES, Oliver, **Nonlinear System Identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models**, Springer – Verlag, ISBN 3-540-67369-5, Germany, 2001.

NEPOMUCENO, L. X. **“Técnicas de Manutenção Preditiva”**. São Paulo. Edgard Blücher Ltda., 1989, volume 1.

NETO, O. M., TAKAHASHI, R. H. C. **Um método para a síntese de funções de transferência no tempo discreto para aplicação no estudo de transitórios em Linhas de**

Transmissão. 8º Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Belém, setembro de 1990. Vol. 2, pp. 653-658.

NEVES W. L. A, DOMMEL. H W., **On Modeling Iron Core Nonlinearities**, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 417-423, May 1993.

NGUYEN, H. V.; DOMMEL, H. W.; MARTÍ, J. R. (1997). **Direct Phase-Domain Modelling of Frequency-Dependent Overhead Transmission Lines**. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No.3, July: 1335-1342.

NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. **Further Improvements to a Phase- Domain ARMA Line Modeling Terms of Convolution, Steady-State Initialization and Stability**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 12, n. 3, p. 1327-1334, 1997.

NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. **Phase-domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model**, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 11, Jan 1996.

ORLANDO A.F. **Análise da Incerteza de Medição em um Processo Metrológico**. Mestrado em Metrologia, Qualidade e Inovação, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

PAU, Lois-Francois, **Failure Diagnosis and Performance Monitoring**, Marcel Dekker Inc., 1975, ISBN: 0-8247-1087-5.

RIES, W., **Transformadores – fundamentos para o projeto e cálculo**; EDIPUCRS, Porto Alegre - RS, 2007.

SAMESINA, M. I., DIAS, E. M. **Frequency Response and Modeling of Measurement Transformers under Distorted Current and Voltage Supply**, IEEE Transaction on Power Delivery, vol 6. No. 4, October, 1991.

SARTO, M. S.; SCARLATTI, A.; HOLLOWAY, C. L. **On the Use of Fitting Models for the Time-Domain Analysis on Problems with Frequency-dependent Parameters**. Proc. of the 2001 In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2001, Montreal. Proceedings Montreal: [s.n], 2001. p. 588-593.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental – DAIA. **Relatório Ambiental Preliminar – RAP**. Construção do Ramal LT 138 kV Iguape - Trecho Pariquera Açú – Iguape com Aproveitamento de Traçado Existente. 2009.

SHADIKU, Matthew N.O., **Elementos do Eletromagnetismo**, Editora Bookman, 3ª Ed, 1978.

SILVA C. A., LOPES F. V, BAINY R. G., CARDOSO L. F, OTTO R. B, **Influência de Modelos de Transformadores de Potencial Capacitivo Sobre a Estimação de Fasores de Tensão** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Goiânia, Brasil, 2012.

SILVA P.R.N.; NEGRÃO, M.M.L.C, VIEIRA JR., P, SANZ-BOB M.A. **A New Methodology of Fault Location for Predictive Maintenance of Transmission Lines**, International Journal

of Electrical Power & Energy Systems – IJEPES, Volume 42, Issue 1, Pages 568-574, November de 2012.

STENGEL, R.F., “**Intelligent Failure-Tolerant Control**”, IEEE Control Systems Magazine, June 1991, Volume: 11, Issue: 4, p.p. 14 – 23, ISSN: 0272-1708.

SUDA T.; “**Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator**”. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol.8, No.4, August 2001. Pages. 705 à 709.

TAVARES, M. C.; PISSOLATO, J.; PORTELA, C. M. **Mode Domain Multiphase Transmission Line – Use in Transient Studies**, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 14, nº 4, October, 1999.

TOSTES J, BRAMATI N, LIMA W. J. F, VIEIRA L. A, ALVES R.N.C, LIMA R; SOUSA M.C.M, OLIVEIRA M.J.S. **Desenvolvimento do Protótipo de um Instrumento Virtual para Analise On-Line de Perturbações Harmônicas em Sistemas de Potência**. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Salvador, Brasil, 2003.

VEILLETTE, R.J., Medanic, J.B., Perkins, W.R., “**Design of reliable control systems, IEEE Transactions on Automatic Control**”, Publication Date: March 1992, Volume: 37, Issue: 3, p.p. 290 – 304, ISSN: 0018-9286.

WATAGHIN, G. **Eletromagnetismo e óptica**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1973.

WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN, H. V.; IRWIN, G. D. **Frequency-Dependent Phase-Domain Transformation Matrices for Untransposed Transmission Lines Using Newton-Raphson Method**. IEEE Trans. on Power Systems, 126 Vol. 11, No. 3: 1538-1546. 1996.

WEDEPOHL, L. M. **Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase System**. IEE, V. 110, n. 12, p. 2200-2212, 1963.

WEDY, G F. “**Inclusão do Efeito Corona em Modelos de Linhas de Transmissão Bifásica Utilizando a Técnica de Variáveis de Estado**”, Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira, 2009.

ZAMBRANO, G. M. V., **Identificação de Parâmetros de um Circuito Equivalente de Transformadores de Potência**. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro - 2009. Transformadores pág.2.

ZHICHENG G. AND, GUOSHUN C.; “**A study on the leakage current along the Surface of Polluted Insulator**”. Proceedings of the 41h International Conference on hpenies and Apphcatlons of Dielectnc Materials July 3-8, 1994. Brisbane Australia. Paper 5110.

ZIMA, M. REHTANZ, C.- **Electric power transmission network state estimation** – (Patente) ABB RESEARCH LTD. (Affolternstrasse 52, 8050 Zürich, CH) EP1324455, 2005.

ANEXO

1. Rotinas em MATLAB/SIMULINK® para Simulação do modelo matemático selecionado.

- Programa principal

```

%mainVIguama.m - Programa para converter os Sinais de entrada do analisador
% para a simulação do modelo matemático.
%-----
% Universidade Federal do Para
% Instituto de Tecnologia - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissao - GPLT
%-----
% Entrada:
% PG_14_11_08_L06-> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de
% tensão e corrente das tres fases. Subestação Guamã
% PU_14_11_08_L06-> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de
% tensão e corrente das tres fases. Subestação (SE) Utinga
% Dados do dia 14/11/2008 - harm_gua_17_11_05
% Saida:
% Corrente Trifásica SE Utinga
%-----
clear
clc
% LEITRA DOS DADOS DE CAMPO
load PG_14_11_08_L06.txt
VIguama = PG_14_11_08_L06;
load PU_14_11_08_L06.txt
VIutinga = PU_14_11_08_L06;

% DADOS DAS FONTES DE TENSÕES GUAMA
subplot(2,2,1); %figure(1)
[Va_matguama,Harm_Vguama] = tensguama(VIguama);
%hold on;
subplot(2,2,2); %figure(2)
[Ia_matguama, Harm_Iguama] = corrguama(VIguama);
%hold off;
% % DADOS DAS FONTES DE TENSÕES UTINGA
subplot(2,2,3); %figure(3)
[Va_matutinga, Harm_Vutinga] = tensutinga(VIutinga);
%hold on;
subplot(2,2,4); %figure(4)
[Ia_matutinga, Harm_Iutinga] = corrutinga(VIutinga);
%hold off;

disp('carregando valores fixos de capacitancia')
%Carregando os valores de Capacitâncias Criados Para ajuste
load MatColCapacitancias.txt
MatColCap = MatColCapacitancias;

%Determinação da corrente fuga medida, e a determinação do Máximo valor de
%pico desta corrente.
%A determinação da corrente de fuga medida se dá pela subtração vetorial
%entre a corrente de utinga pela de guamá.
% Em seguida A determinação do valor máximo da corrente de fuga se dá pela
%utilização da função MAX do matlab sobre o vetor de corrente de fuga medida.
disp('carregando Harm. Corrente Guama e Utinga')
%Carregamento dos harmônicos da corrente de guama
load iH1_guama.mat;load iH2_guama.mat;load iH3_guama.mat;load iH4_guama.mat;
load iH5_guama.mat;load iH6_guama.mat;load iH7_guama.mat;load iH8_guama.mat;
load iH9_guama.mat;load iH10_guama.mat;load iH11_guama.mat;load iH12_guama.mat;
load iH13_guama.mat;load iH14_guama.mat;load iH15_guama.mat;load iH16_guama.mat;
load iH17_guama.mat;load iH18_guama.mat;load iH19_guama.mat;load iH20_guama.mat;
load iH21_guama.mat;load iH22_guama.mat;load iH23_guama.mat;load iH24_guama.mat;
load iH25_guama.mat;load iH26_guama.mat;load iH27_guama.mat;load iH28_guama.mat;
load iH29_guama.mat;load iH30_guama.mat;load iH31_guama.mat;load iH32_guama.mat;
load iH33_guama.mat;load iH34_guama.mat;load iH35_guama.mat;load iH36_guama.mat;
load iH37_guama.mat;load iH38_guama.mat;load iH39_guama.mat;load iH40_guama.mat;
load iH41_guama.mat;load iH42_guama.mat;load iH43_guama.mat;load iH44_guama.mat;
load iH45_guama.mat;load iH46_guama.mat;load iH47_guama.mat;load iH48_guama.mat;
load iH49_guama.mat;load iH50_guama.mat;

```

```

%Carregamento dos harmônicos da corrente de utinga
load iH1_utinga.mat;load iH2_utinga.mat;load iH3_utinga.mat;load iH4_utinga.mat;
load iH5_utinga.mat;load iH6_utinga.mat;load iH7_utinga.mat;load iH8_utinga.mat;
load iH9_utinga.mat;load iH10_utinga.mat;load iH11_utinga.mat;load iH12_utinga.mat;
load iH13_utinga.mat;load iH14_utinga.mat;load iH15_utinga.mat;load iH16_utinga.mat;
load iH17_utinga.mat;load iH18_utinga.mat;load iH19_utinga.mat;load iH20_utinga.mat;
load iH21_utinga.mat;load iH22_utinga.mat;load iH23_utinga.mat;load iH24_utinga.mat;
load iH25_utinga.mat;load iH26_utinga.mat;load iH27_utinga.mat;load iH28_utinga.mat;
load iH29_utinga.mat;load iH30_utinga.mat;load iH31_utinga.mat;load iH32_utinga.mat;
load iH33_utinga.mat;load iH34_utinga.mat;load iH35_utinga.mat;load iH36_utinga.mat;
load iH37_utinga.mat;load iH38_utinga.mat;load iH39_utinga.mat;load iH40_utinga.mat;
load iH41_utinga.mat;load iH42_utinga.mat;load iH43_utinga.mat;load iH44_utinga.mat;
load iH45_utinga.mat;load iH46_utinga.mat;load iH47_utinga.mat;load iH48_utinga.mat;
load iH49_utinga.mat;load iH50_utinga.mat;
disp('calculando correntes de fuga dos Harm.')
```

```

%Calculo da corrente de fuga medida
%CF_Medida = Id_matutinga - Id_matguama;
CF_MedidaH1 = I1_harmutinga - I1_harmguama;CF_MedidaH2 = I2_harmutinga - I2_harmguama;
CF_MedidaH3 = I3_harmutinga - I3_harmguama;CF_MedidaH4 = I4_harmutinga - I4_harmguama;
CF_MedidaH5 = I5_harmutinga - I5_harmguama;CF_MedidaH6 = I6_harmutinga - I6_harmguama;
CF_MedidaH7 = I7_harmutinga - I7_harmguama;CF_MedidaH8 = I8_harmutinga - I8_harmguama;
CF_MedidaH9 = I9_harmutinga - I9_harmguama;CF_MedidaH10 = I10_harmutinga - I10_harmguama;
CF_MedidaH11 = I11_harmutinga - I11_harmguama;CF_MedidaH12 = I12_harmutinga - I12_harmguama;
CF_MedidaH13 = I13_harmutinga - I13_harmguama;CF_MedidaH14 = I14_harmutinga - I14_harmguama;
CF_MedidaH15 = I15_harmutinga - I15_harmguama;CF_MedidaH16 = I16_harmutinga - I16_harmguama;
CF_MedidaH17 = I17_harmutinga - I17_harmguama;CF_MedidaH18 = I18_harmutinga - I18_harmguama;
CF_MedidaH19 = I19_harmutinga - I19_harmguama;CF_MedidaH20 = I20_harmutinga - I20_harmguama;
CF_MedidaH21 = I21_harmutinga - I21_harmguama;CF_MedidaH22 = I22_harmutinga - I22_harmguama;
CF_MedidaH23 = I23_harmutinga - I23_harmguama;CF_MedidaH24 = I24_harmutinga - I24_harmguama;
CF_MedidaH25 = I25_harmutinga - I25_harmguama;CF_MedidaH26 = I26_harmutinga - I26_harmguama;
CF_MedidaH27 = I27_harmutinga - I27_harmguama;CF_MedidaH28 = I28_harmutinga - I28_harmguama;
CF_MedidaH29 = I29_harmutinga - I29_harmguama;CF_MedidaH30 = I30_harmutinga - I30_harmguama;
CF_MedidaH31 = I31_harmutinga - I31_harmguama;CF_MedidaH32 = I32_harmutinga - I32_harmguama;
CF_MedidaH33 = I33_harmutinga - I33_harmguama;CF_MedidaH34 = I34_harmutinga - I34_harmguama;
CF_MedidaH35 = I35_harmutinga - I35_harmguama;CF_MedidaH36 = I36_harmutinga - I36_harmguama;
CF_MedidaH37 = I37_harmutinga - I37_harmguama;CF_MedidaH38 = I38_harmutinga - I38_harmguama;
CF_MedidaH39 = I39_harmutinga - I39_harmguama;CF_MedidaH40 = I40_harmutinga - I40_harmguama;
CF_MedidaH41 = I41_harmutinga - I41_harmguama;CF_MedidaH42 = I42_harmutinga - I42_harmguama;
CF_MedidaH43 = I43_harmutinga - I43_harmguama;CF_MedidaH44 = I44_harmutinga - I44_harmguama;
CF_MedidaH45 = I45_harmutinga - I45_harmguama;CF_MedidaH46 = I46_harmutinga - I46_harmguama;
CF_MedidaH47 = I47_harmutinga - I47_harmguama;CF_MedidaH48 = I48_harmutinga - I48_harmguama;
CF_MedidaH49 = I49_harmutinga - I49_harmguama;CF_MedidaH50 = I50_harmutinga - I50_harmguama;
disp('determinando os valores máximo de corrente de fuga Medida')
```

```

%Determinação do valor máximo de cada harmonico da corrente de fuga
%calculada
%Max_CF_Medida = max(CF_Medida(2,:))
Max_CF_MedidaH1 = max(CF_MedidaH1(2,:));Max_CF_MedidaH2 = max(CF_MedidaH2(2,:));Max_CF_MedidaH3 =
max(CF_MedidaH3(2,:));
Max_CF_MedidaH4 = max(CF_MedidaH4(2,:));Max_CF_MedidaH5 = max(CF_MedidaH5(2,:));Max_CF_MedidaH5 =
max(CF_MedidaH5(2,:));
Max_CF_MedidaH6 = max(CF_MedidaH6(2,:));Max_CF_MedidaH7 = max(CF_MedidaH7(2,:));Max_CF_MedidaH8 =
max(CF_MedidaH8(2,:));
Max_CF_MedidaH9 = max(CF_MedidaH9(2,:));Max_CF_MedidaH10 =
max(CF_MedidaH10(2,:));Max_CF_MedidaH11 = max(CF_MedidaH11(2,:));
Max_CF_MedidaH12 = max(CF_MedidaH12(2,:));Max_CF_MedidaH13 =
max(CF_MedidaH13(2,:));Max_CF_MedidaH14 = max(CF_MedidaH14(2,:));
Max_CF_MedidaH15 = max(CF_MedidaH15(2,:));Max_CF_MedidaH16 =
max(CF_MedidaH16(2,:));Max_CF_MedidaH17 = max(CF_MedidaH17(2,:));
Max_CF_MedidaH18 = max(CF_MedidaH18(2,:));Max_CF_MedidaH19 =
max(CF_MedidaH19(2,:));Max_CF_MedidaH20 = max(CF_MedidaH20(2,:));
Max_CF_MedidaH21 = max(CF_MedidaH21(2,:));Max_CF_MedidaH22 =
max(CF_MedidaH22(2,:));Max_CF_MedidaH23 = max(CF_MedidaH23(2,:));
Max_CF_MedidaH24 = max(CF_MedidaH24(2,:));Max_CF_MedidaH26 =
max(CF_MedidaH26(2,:));Max_CF_MedidaH25 = max(CF_MedidaH25(2,:));
Max_CF_MedidaH27 = max(CF_MedidaH27(2,:));Max_CF_MedidaH28 =
max(CF_MedidaH28(2,:));Max_CF_MedidaH29 = max(CF_MedidaH29(2,:));
Max_CF_MedidaH30 = max(CF_MedidaH30(2,:));Max_CF_MedidaH31 =
max(CF_MedidaH31(2,:));Max_CF_MedidaH32 = max(CF_MedidaH32(2,:));
Max_CF_MedidaH33 = max(CF_MedidaH33(2,:));Max_CF_MedidaH34 =
max(CF_MedidaH34(2,:));Max_CF_MedidaH35 = max(CF_MedidaH35(2,:));
Max_CF_MedidaH36 = max(CF_MedidaH36(2,:));Max_CF_MedidaH37 =
max(CF_MedidaH37(2,:));Max_CF_MedidaH38 = max(CF_MedidaH38(2,:));
Max_CF_MedidaH39 = max(CF_MedidaH39(2,:));Max_CF_MedidaH40 =
max(CF_MedidaH40(2,:));Max_CF_MedidaH41 = max(CF_MedidaH41(2,:));

```

```

Max_CF_MedidaH42 = max(CF_MedidaH42(2,:));Max_CF_MedidaH43 =
max(CF_MedidaH43(2,:));Max_CF_MedidaH44 = max(CF_MedidaH44(2,:));
Max_CF_MedidaH45 = max(CF_MedidaH45(2,:));Max_CF_MedidaH46 =
max(CF_MedidaH46(2,:));Max_CF_MedidaH47 = max(CF_MedidaH47(2,:));
Max_CF_MedidaH48 = max(CF_MedidaH48(2,:));Max_CF_MedidaH49 =
max(CF_MedidaH49(2,:));Max_CF_MedidaH50 = max(CF_MedidaH50(2,:));
disp(' iniciando simulações')
disp(' simulação para os Harm. 1 a 10')
% simulações
sim('Modelo_Mono_ajustCapacitancia_H1_H10_limpo3_2000pts');
disp(' simulação para os Harm. 11 a 20')
sim('Modelo_Mono_ajustCapacitancia_H11_H20_limpo3_2000pts');
disp(' simulação para os Harm. 21 a 30')
sim('Modelo_Mono_ajustCapacitancia_H21_H30_limpo3_2000pts');
disp(' simulação para os Harm. 31 a 40')
sim('Modelo_Mono_ajustCapacitancia_H31_H40_limpo3_2000pts');
disp(' simulação para os Harm. 41 a 50')
sim('Modelo_Mono_ajustCapacitancia_H41_H50_limpo3_2000pts');
disp(' Final de Simulações')
%Determinação do valor de cpacitancia apropriado para o ajuste
%Inicialmete cortamos os valores elevados que foram gerados pela
%realimentação no modelo matemático
disp(' retirando valores indesejados devido realimentação do modelo')
%CF_Calc_H1.signals.values(:,1)
CF_Calc_HH1 = CF_Calc_H1.signals.values(50:2000,:);
CF_Calc_HH2 = CF_Calc_H2.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH3 = CF_Calc_H3.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH4 = CF_Calc_H4.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH5 = CF_Calc_H5.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH6 = CF_Calc_H6.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH7 = CF_Calc_H7.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH8 = CF_Calc_H8.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH9 = CF_Calc_H9.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH10 = CF_Calc_H10.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH11 = CF_Calc_H11.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH12 = CF_Calc_H12.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH13 = CF_Calc_H13.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH14 = CF_Calc_H14.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH15 = CF_Calc_H15.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH16 = CF_Calc_H16.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH17 = CF_Calc_H17.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH18 = CF_Calc_H18.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH19 = CF_Calc_H19.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH20 = CF_Calc_H20.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH21 = CF_Calc_H21.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH22 = CF_Calc_H22.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH23 = CF_Calc_H23.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH24 = CF_Calc_H24.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH25 = CF_Calc_H25.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH26 = CF_Calc_H26.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH27 = CF_Calc_H27.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH28 = CF_Calc_H28.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH29 = CF_Calc_H29.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH30 = CF_Calc_H30.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH31 = CF_Calc_H31.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH32 = CF_Calc_H32.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH33 = CF_Calc_H33.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH34 = CF_Calc_H34.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH35 = CF_Calc_H35.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH36 = CF_Calc_H36.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH37 = CF_Calc_H37.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH38 = CF_Calc_H38.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH39 = CF_Calc_H39.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH40 = CF_Calc_H40.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH41 = CF_Calc_H41.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH42 = CF_Calc_H42.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH43 = CF_Calc_H43.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH44 = CF_Calc_H44.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH45 = CF_Calc_H45.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH46 = CF_Calc_H46.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH47 = CF_Calc_H47.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH48 = CF_Calc_H48.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH49 = CF_Calc_H49.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);
CF_Calc_HH50 = CF_Calc_H50.signals.values(50:2000,:);%(50:6501,:);

```

```

% Determinação dos máximos valores para cada corrente de fuga(179)
disp(' determinando valores de máximo da corrente de fuga calculada')
CF_Calc_H1_Max = max(CF_Calc_HH1);
CF_Calc_H2_Max = max(CF_Calc_HH2);
CF_Calc_H3_Max = max(CF_Calc_HH3);
CF_Calc_H4_Max = max(CF_Calc_HH4);
CF_Calc_H5_Max = max(CF_Calc_HH5);
CF_Calc_H6_Max = max(CF_Calc_HH6);
CF_Calc_H7_Max = max(CF_Calc_HH7);
CF_Calc_H8_Max = max(CF_Calc_HH8);
CF_Calc_H9_Max = max(CF_Calc_HH9);
CF_Calc_H10_Max = max(CF_Calc_HH10);
CF_Calc_H11_Max = max(CF_Calc_HH11);
CF_Calc_H12_Max = max(CF_Calc_HH12);
CF_Calc_H13_Max = max(CF_Calc_HH13);
CF_Calc_H14_Max = max(CF_Calc_HH14);
CF_Calc_H15_Max = max(CF_Calc_HH15);
CF_Calc_H16_Max = max(CF_Calc_HH16);
CF_Calc_H17_Max = max(CF_Calc_HH17);
CF_Calc_H18_Max = max(CF_Calc_HH18);
CF_Calc_H19_Max = max(CF_Calc_HH19);
CF_Calc_H20_Max = max(CF_Calc_HH20);
CF_Calc_H21_Max = max(CF_Calc_HH21);
CF_Calc_H22_Max = max(CF_Calc_HH22);
CF_Calc_H23_Max = max(CF_Calc_HH23);
CF_Calc_H24_Max = max(CF_Calc_HH24);
CF_Calc_H25_Max = max(CF_Calc_HH25);
CF_Calc_H26_Max = max(CF_Calc_HH26);
CF_Calc_H27_Max = max(CF_Calc_HH27);
CF_Calc_H28_Max = max(CF_Calc_HH28);
CF_Calc_H29_Max = max(CF_Calc_HH29);
CF_Calc_H30_Max = max(CF_Calc_HH30);
CF_Calc_H31_Max = max(CF_Calc_HH31);
CF_Calc_H32_Max = max(CF_Calc_HH32);
CF_Calc_H33_Max = max(CF_Calc_HH33);
CF_Calc_H34_Max = max(CF_Calc_HH34);
CF_Calc_H35_Max = max(CF_Calc_HH35);
CF_Calc_H36_Max = max(CF_Calc_HH36);
CF_Calc_H37_Max = max(CF_Calc_HH37);
CF_Calc_H38_Max = max(CF_Calc_HH38);
CF_Calc_H39_Max = max(CF_Calc_HH39);
CF_Calc_H40_Max = max(CF_Calc_HH40);
CF_Calc_H41_Max = max(CF_Calc_HH41);
CF_Calc_H42_Max = max(CF_Calc_HH42);
CF_Calc_H43_Max = max(CF_Calc_HH43);
CF_Calc_H44_Max = max(CF_Calc_HH44);
CF_Calc_H45_Max = max(CF_Calc_HH45);
CF_Calc_H46_Max = max(CF_Calc_HH46);
CF_Calc_H47_Max = max(CF_Calc_HH47);
CF_Calc_H48_Max = max(CF_Calc_HH48);
CF_Calc_H49_Max = max(CF_Calc_HH49);
CF_Calc_H50_Max = max(CF_Calc_HH50);
%Comparação com o valor máximo da corrente de fuga medida
[min_diferrence, array_Possition] = min(abs(capacit(1,:)- MaxCFMedida))
disp(' Comparando os valores de CF Medida e Calculada ')
[min_diferrence1, array_Possition1] = min(abs(CF_Calc_H1_Max - Max_CF_MedidaH1));
[min_diferrence2, array_Possition2] = min(abs(CF_Calc_H2_Max - Max_CF_MedidaH2));
[min_diferrence3, array_Possition3] = min(abs(CF_Calc_H3_Max - Max_CF_MedidaH3));
[min_diferrence4, array_Possition4] = min(abs(CF_Calc_H4_Max - Max_CF_MedidaH4));
[min_diferrence5, array_Possition5] = min(abs(CF_Calc_H5_Max - Max_CF_MedidaH5));
[min_diferrence6, array_Possition6] = min(abs(CF_Calc_H6_Max - Max_CF_MedidaH6));
[min_diferrence7, array_Possition7] = min(abs(CF_Calc_H7_Max - Max_CF_MedidaH7));
[min_diferrence8, array_Possition8] = min(abs(CF_Calc_H8_Max - Max_CF_MedidaH8));
[min_diferrence9, array_Possition9] = min(abs(CF_Calc_H9_Max - Max_CF_MedidaH9));
[min_diferrence10, array_Possition10] = min(abs(CF_Calc_H10_Max - Max_CF_MedidaH10));
[min_diferrence11, array_Possition11] = min(abs(CF_Calc_H11_Max - Max_CF_MedidaH11));
[min_diferrence12, array_Possition12] = min(abs(CF_Calc_H12_Max - Max_CF_MedidaH12));
[min_diferrence13, array_Possition13] = min(abs(CF_Calc_H13_Max - Max_CF_MedidaH13));

```

```

[min_diferrence14, array_Possition14] = min(abs(CF_Calc_H14_Max - Max_CF_MedidaH14));
[min_diferrence15, array_Possition15] = min(abs(CF_Calc_H15_Max - Max_CF_MedidaH15));
[min_diferrence16, array_Possition16] = min(abs(CF_Calc_H16_Max - Max_CF_MedidaH16));
[min_diferrence17, array_Possition17] = min(abs(CF_Calc_H17_Max - Max_CF_MedidaH17));
[min_diferrence18, array_Possition18] = min(abs(CF_Calc_H18_Max - Max_CF_MedidaH18));
[min_diferrence19, array_Possition19] = min(abs(CF_Calc_H19_Max - Max_CF_MedidaH19));
[min_diferrence20, array_Possition20] = min(abs(CF_Calc_H20_Max - Max_CF_MedidaH20));
[min_diferrence21, array_Possition21] = min(abs(CF_Calc_H21_Max - Max_CF_MedidaH21));
[min_diferrence22, array_Possition22] = min(abs(CF_Calc_H22_Max - Max_CF_MedidaH22));
[min_diferrence23, array_Possition23] = min(abs(CF_Calc_H23_Max - Max_CF_MedidaH23));
[min_diferrence24, array_Possition24] = min(abs(CF_Calc_H24_Max - Max_CF_MedidaH24));
[min_diferrence25, array_Possition25] = min(abs(CF_Calc_H25_Max - Max_CF_MedidaH25));
[min_diferrence26, array_Possition26] = min(abs(CF_Calc_H26_Max - Max_CF_MedidaH26));
[min_diferrence27, array_Possition27] = min(abs(CF_Calc_H27_Max - Max_CF_MedidaH27));
[min_diferrence28, array_Possition28] = min(abs(CF_Calc_H28_Max - Max_CF_MedidaH28));
[min_diferrence29, array_Possition29] = min(abs(CF_Calc_H29_Max - Max_CF_MedidaH29));
[min_diferrence30, array_Possition30] = min(abs(CF_Calc_H30_Max - Max_CF_MedidaH30));
[min_diferrence31, array_Possition31] = min(abs(CF_Calc_H31_Max - Max_CF_MedidaH31));
[min_diferrence32, array_Possition32] = min(abs(CF_Calc_H32_Max - Max_CF_MedidaH32));
[min_diferrence33, array_Possition33] = min(abs(CF_Calc_H33_Max - Max_CF_MedidaH33));
[min_diferrence34, array_Possition34] = min(abs(CF_Calc_H34_Max - Max_CF_MedidaH34));
[min_diferrence35, array_Possition35] = min(abs(CF_Calc_H35_Max - Max_CF_MedidaH35));
[min_diferrence36, array_Possition36] = min(abs(CF_Calc_H36_Max - Max_CF_MedidaH36));
[min_diferrence37, array_Possition37] = min(abs(CF_Calc_H37_Max - Max_CF_MedidaH37));
[min_diferrence38, array_Possition38] = min(abs(CF_Calc_H38_Max - Max_CF_MedidaH38));
[min_diferrence39, array_Possition39] = min(abs(CF_Calc_H39_Max - Max_CF_MedidaH39));
[min_diferrence40, array_Possition40] = min(abs(CF_Calc_H40_Max - Max_CF_MedidaH40));
[min_diferrence41, array_Possition41] = min(abs(CF_Calc_H41_Max - Max_CF_MedidaH41));
[min_diferrence42, array_Possition42] = min(abs(CF_Calc_H42_Max - Max_CF_MedidaH42));
[min_diferrence43, array_Possition43] = min(abs(CF_Calc_H43_Max - Max_CF_MedidaH43));
[min_diferrence44, array_Possition44] = min(abs(CF_Calc_H44_Max - Max_CF_MedidaH44));
[min_diferrence45, array_Possition45] = min(abs(CF_Calc_H45_Max - Max_CF_MedidaH45));
[min_diferrence46, array_Possition46] = min(abs(CF_Calc_H46_Max - Max_CF_MedidaH46));
[min_diferrence47, array_Possition47] = min(abs(CF_Calc_H47_Max - Max_CF_MedidaH47));
[min_diferrence48, array_Possition48] = min(abs(CF_Calc_H48_Max - Max_CF_MedidaH48));
[min_diferrence49, array_Possition49] = min(abs(CF_Calc_H49_Max - Max_CF_MedidaH49));
[min_diferrence50, array_Possition50] = min(abs(CF_Calc_H50_Max - Max_CF_MedidaH50));
disp(' Finalmente Ajustando so valores de capacitância')
%De posse da menor diferença entre os dois pontos e tendo o indice
%correnpondente, pode-se verificar qual o valor da capacitancia, que será a
%capacitância de ajuste
Capacit_Ajust1 = MatColCapacitancias(array_Possition1);Capacit_Ajust2 =
MatColCapacitancias(array_Possition2);
Capacit_Ajust3 = MatColCapacitancias(array_Possition3);Capacit_Ajust4 =
MatColCapacitancias(array_Possition4);
Capacit_Ajust5 = MatColCapacitancias(array_Possition5);Capacit_Ajust6 =
MatColCapacitancias(array_Possition6);
Capacit_Ajust7 = MatColCapacitancias(array_Possition7);Capacit_Ajust8 =
MatColCapacitancias(array_Possition8);
Capacit_Ajust9 = MatColCapacitancias(array_Possition9);Capacit_Ajust10 =
MatColCapacitancias(array_Possition10);
Capacit_Ajust11 = MatColCapacitancias(array_Possition11);Capacit_Ajust12 =
MatColCapacitancias(array_Possition12);
Capacit_Ajust13 = MatColCapacitancias(array_Possition13);Capacit_Ajust14 =
MatColCapacitancias(array_Possition14);
Capacit_Ajust15 = MatColCapacitancias(array_Possition15);Capacit_Ajust16 =
MatColCapacitancias(array_Possition16);
Capacit_Ajust17 = MatColCapacitancias(array_Possition17);Capacit_Ajust18 =
MatColCapacitancias(array_Possition18);
Capacit_Ajust19 = MatColCapacitancias(array_Possition19);Capacit_Ajust20 =
MatColCapacitancias(array_Possition20);
Capacit_Ajust21 = MatColCapacitancias(array_Possition21);Capacit_Ajust22 =
MatColCapacitancias(array_Possition22);
Capacit_Ajust23 = MatColCapacitancias(array_Possition23);Capacit_Ajust24 =
MatColCapacitancias(array_Possition24);
Capacit_Ajust25 = MatColCapacitancias(array_Possition25);Capacit_Ajust26 =
MatColCapacitancias(array_Possition26);
Capacit_Ajust27 = MatColCapacitancias(array_Possition27);Capacit_Ajust28 =
MatColCapacitancias(array_Possition28);
Capacit_Ajust29 = MatColCapacitancias(array_Possition29);Capacit_Ajust30 =
MatColCapacitancias(array_Possition30);
Capacit_Ajust31 = MatColCapacitancias(array_Possition31);Capacit_Ajust32 =
MatColCapacitancias(array_Possition32);

```

```

Capacit_Ajust33 = MatColCapacitancias(array_Possition33);Capacit_Ajust34 =
MatColCapacitancias(array_Possition34);
Capacit_Ajust35 = MatColCapacitancias(array_Possition35);Capacit_Ajust36 =
MatColCapacitancias(array_Possition36);
Capacit_Ajust37 = MatColCapacitancias(array_Possition37);Capacit_Ajust38 =
MatColCapacitancias(array_Possition38);
Capacit_Ajust39 = MatColCapacitancias(array_Possition39);Capacit_Ajust40 =
MatColCapacitancias(array_Possition40);
Capacit_Ajust41 = MatColCapacitancias(array_Possition41);Capacit_Ajust42 =
MatColCapacitancias(array_Possition42);
Capacit_Ajust43 = MatColCapacitancias(array_Possition43);Capacit_Ajust44 =
MatColCapacitancias(array_Possition44);
Capacit_Ajust45 = MatColCapacitancias(array_Possition45);Capacit_Ajust46 =
MatColCapacitancias(array_Possition46);
Capacit_Ajust47 = MatColCapacitancias(array_Possition47);Capacit_Ajust48 =
MatColCapacitancias(array_Possition48);
Capacit_Ajust49 = MatColCapacitancias(array_Possition49);Capacit_Ajust50 =
MatColCapacitancias(array_Possition50);
Cap_Ajust_indice = [
    Capacit_Ajust1 array_Possition1; Capacit_Ajust2 array_Possition2; Capacit_Ajust3
array_Possition3;
    Capacit_Ajust4 array_Possition4; Capacit_Ajust5 array_Possition5; Capacit_Ajust6
array_Possition6;
    Capacit_Ajust7 array_Possition7; Capacit_Ajust8 array_Possition8; Capacit_Ajust9
array_Possition9;
    Capacit_Ajust10 array_Possition10; Capacit_Ajust11 array_Possition11; Capacit_Ajust12
array_Possition12;
    Capacit_Ajust13 array_Possition13; Capacit_Ajust14 array_Possition14; Capacit_Ajust15
array_Possition15;
    Capacit_Ajust16 array_Possition16; Capacit_Ajust17 array_Possition17; Capacit_Ajust18
array_Possition18;
    Capacit_Ajust19 array_Possition19; Capacit_Ajust20 array_Possition20; Capacit_Ajust21
array_Possition21;
    Capacit_Ajust22 array_Possition22; Capacit_Ajust23 array_Possition23; Capacit_Ajust24
array_Possition24;
    Capacit_Ajust25 array_Possition25; Capacit_Ajust26 array_Possition26; Capacit_Ajust27
array_Possition27;
    Capacit_Ajust28 array_Possition28; Capacit_Ajust29 array_Possition29; Capacit_Ajust30
array_Possition30;
    Capacit_Ajust31 array_Possition31; Capacit_Ajust32 array_Possition32; Capacit_Ajust33
array_Possition33;
    Capacit_Ajust34 array_Possition34; Capacit_Ajust35 array_Possition35; Capacit_Ajust36
array_Possition36;
    Capacit_Ajust37 array_Possition37; Capacit_Ajust38 array_Possition38; Capacit_Ajust39
array_Possition39;
    Capacit_Ajust40 array_Possition40; Capacit_Ajust41 array_Possition41; Capacit_Ajust42
array_Possition42;
    Capacit_Ajust43 array_Possition43; Capacit_Ajust44 array_Possition44; Capacit_Ajust45
array_Possition45;
    Capacit_Ajust46 array_Possition46; Capacit_Ajust47 array_Possition47; Capacit_Ajust48
array_Possition48;
    Capacit_Ajust49 array_Possition49; Capacit_Ajust50 array_Possition50];

Cap_Ajust_Inmod = [Capacit_Ajust1;
    Capacit_Ajust1; Capacit_Ajust2; Capacit_Ajust3; Capacit_Ajust4; Capacit_Ajust5;
Capacit_Ajust6; Capacit_Ajust7;
    Capacit_Ajust8; Capacit_Ajust9;Capacit_Ajust10; Capacit_Ajust11;
Capacit_Ajust12;Capacit_Ajust13; Capacit_Ajust14;
    Capacit_Ajust15; Capacit_Ajust16; Capacit_Ajust17; Capacit_Ajust18; Capacit_Ajust19;
Capacit_Ajust20; Capacit_Ajust21;
    Capacit_Ajust22; Capacit_Ajust23; Capacit_Ajust24; Capacit_Ajust25; Capacit_Ajust26;
Capacit_Ajust27; Capacit_Ajust28;
    Capacit_Ajust29; Capacit_Ajust30; Capacit_Ajust31; Capacit_Ajust32; Capacit_Ajust33;
Capacit_Ajust34; Capacit_Ajust35;
    Capacit_Ajust36; Capacit_Ajust37; Capacit_Ajust38; Capacit_Ajust39; Capacit_Ajust40;
Capacit_Ajust41; Capacit_Ajust42;
    Capacit_Ajust43; Capacit_Ajust44; Capacit_Ajust45; Capacit_Ajust46; Capacit_Ajust47;
Capacit_Ajust48; Capacit_Ajust49;
    Capacit_Ajust50]

Cap_Ajust_Indice = [array_Possition1;
    array_Possition1; array_Possition2; array_Possition3; array_Possition4; array_Possition5;
array_Possition6; array_Possition7;

```

```

array_Possition8; array_Possition9; array_Possition10; array_Possition11; array_Possition12;
array_Possition13; array_Possition14;
array_Possition15; array_Possition16; array_Possition17; array_Possition18;
array_Possition19; array_Possition20; array_Possition21;
array_Possition22; array_Possition23; array_Possition24; array_Possition25;
array_Possition26; array_Possition27; array_Possition28;
array_Possition29; array_Possition30; array_Possition31; array_Possition32;
array_Possition33; array_Possition34; array_Possition35;
array_Possition36; array_Possition37; array_Possition38; array_Possition39;
array_Possition40; array_Possition41; array_Possition42;
array_Possition43; array_Possition44; array_Possition45; array_Possition46;
array_Possition47; array_Possition48; array_Possition49;
array_Possition50]

```

- Subrotinas TensGuama; TensUtinga, CorGuama e TensGuama, são similares

```

%tensguama.m - função para converter harmônicos
% Universidade Federal do Para
% Instituto de Tecnologia - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Va_mat, Vb_mat, Vc_mat] = tensguama(VI)
% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das tres fases.
%
% Saida
% va_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase A (50 Harmônicos)
% vb_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase B (50 Harmônicos)
% vc_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase C (50 harmônicos)
%-----
%function [Va_matguama, Vb_matguama, Vc_matguama] = tensguama(VIguama)
function [Va_matguama,Harm_va] = tensguama(VIguama)

Vaguama = VIguama(1,[1:100]); % Vbguama = VIguama(1,[201:300]); Vcguama = VIguama(1,[401:500]);
[l c] = size(Vaguama);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Vaguama(k);
    phia(cont1,1) = Vaguama(k+1); %--> Fase em graus

%     FFb(cont1,1) = Vbguama(k);
%     phib(cont1,1) = Vbguama(k+1); %--> Fase em graus
%
%     FFc(cont1,1) = Vcguama(k);
%     phic(cont1,1) = Vcguama(k+1); %--> Fase em graus
end

clear l c k;
[l c]=size(FFa);
for k =1:l
w(k,1) = 2*pi*60*k; %--> frequência angular
phirad_a(k,1) = (2*pi*phia(k))/360; %--> Fase em radianos
% phirad_b(k,1) = (2*pi*phib(k))/360; %--> Fase em radianos
% phirad_c(k,1) = (2*pi*phic(k))/360; %--> Fase em radianos
end
clear k;

cont = 0;
for t = 0:0.00001:0.066;
    cont = cont + 1; %--> contador
    for k = 1:l
        Fa(k) = FFa(k)*sin(w(k)*t+phirad_a(k));
%         Fb(k) = FFb(k)*sin(w(k)*t+phirad_b(k));
%         Fc(k) = FFc(k)*sin(w(k)*t+phirad_c(k));
        va(cont) = sum(Fa);
%         vb(cont) = sum(Fb);
%         vc(cont) = sum(Fc);
%         %harmônicos separados

```

```

vva(cont,k)=Fa(k);
% vvb(cont,k)=Fb(k);
% vvc(cont,k)=Fc(k);
% Harm_va{k}=vva(:,k);
% Harm_vb{k}=vvb(:,k);
% Harm_vc{k}=vvc(:,k);
end
end
t = 0:0.00001:0.066;

for s= 1:50
% vva(cont,s)=Fa(s);
% vvb(cont,s)=Fb(s);
% vvc(cont,s)=Fc(s);
Harm_va{s}=vva(:,s);
% Harm_vb{s}=vvb(:,s);
% Harm_vc{s}=vvc(:,s);
end

vd=Harm_va{5};
mataguama = [t',va'];
matdguama = [t',vd];

mat_harm1 = [t',Harm_va{1}];mat_harm2 = [t',Harm_va{2}];mat_harm3 = [t',Harm_va{3}];
mat_harm4 = [t',Harm_va{4}];mat_harm5 = [t',Harm_va{5}];mat_harm6 = [t',Harm_va{6}];
mat_harm7 = [t',Harm_va{7}];mat_harm8 = [t',Harm_va{8}];mat_harm9 = [t',Harm_va{9}];
mat_harm10 = [t',Harm_va{10}];mat_harm11 = [t',Harm_va{11}];mat_harm12 = [t',Harm_va{12}];
mat_harm13 = [t',Harm_va{13}];mat_harm14 = [t',Harm_va{14}];mat_harm15 = [t',Harm_va{15}];
mat_harm16 = [t',Harm_va{16}];mat_harm17 = [t',Harm_va{17}];mat_harm18 = [t',Harm_va{18}];
mat_harm19 = [t',Harm_va{19}];mat_harm20 = [t',Harm_va{20}];mat_harm21 = [t',Harm_va{21}];
mat_harm22 = [t',Harm_va{22}];mat_harm23 = [t',Harm_va{23}];mat_harm24 = [t',Harm_va{24}];
mat_harm25 = [t',Harm_va{25}];mat_harm26 = [t',Harm_va{26}];mat_harm27 = [t',Harm_va{27}];
mat_harm28 = [t',Harm_va{28}];mat_harm29 = [t',Harm_va{29}];mat_harm30 = [t',Harm_va{30}];
mat_harm31 = [t',Harm_va{31}];mat_harm32 = [t',Harm_va{32}];mat_harm33 = [t',Harm_va{33}];
mat_harm34 = [t',Harm_va{34}];mat_harm35 = [t',Harm_va{35}];mat_harm36 = [t',Harm_va{36}];
mat_harm37 = [t',Harm_va{37}];mat_harm38 = [t',Harm_va{38}];mat_harm39 = [t',Harm_va{39}];
mat_harm40 = [t',Harm_va{40}];mat_harm41 = [t',Harm_va{41}];mat_harm42 = [t',Harm_va{42}];
mat_harm43 = [t',Harm_va{43}];mat_harm44 = [t',Harm_va{44}];mat_harm45 = [t',Harm_va{45}];
mat_harm46 = [t',Harm_va{46}];mat_harm47 = [t',Harm_va{47}];mat_harm48 = [t',Harm_va{48}];
mat_harm49 = [t',Harm_va{49}];mat_harm50 = [t',Harm_va{50}];

Va_matguama = mataguama';
Vd_matguama= matdguama';
V1_harmguama = mat_harm1'; V2_harmguama = mat_harm2'; V3_harmguama = mat_harm3';V4_harmguama =
mat_harm4';
V5_harmguama = mat_harm5'; V6_harmguama = mat_harm6'; V7_harmguama = mat_harm7';V8_harmguama =
mat_harm8';
V9_harmguama = mat_harm9'; V10_harmguama = mat_harm10'; V11_harmguama = mat_harm11';V12_harmguama
= mat_harm12';
V13_harmguama = mat_harm13'; V14_harmguama = mat_harm14'; V15_harmguama =
mat_harm15';V16_harmguama = mat_harm16';
V17_harmguama = mat_harm17'; V18_harmguama = mat_harm18'; V19_harmguama =
mat_harm19';V20_harmguama = mat_harm20';
V21_harmguama = mat_harm21'; V22_harmguama = mat_harm22'; V23_harmguama =
mat_harm23';V24_harmguama = mat_harm24';
V25_harmguama = mat_harm25'; V26_harmguama = mat_harm26'; V27_harmguama =
mat_harm27';V28_harmguama = mat_harm28';
V29_harmguama = mat_harm29'; V30_harmguama = mat_harm30'; V31_harmguama =
mat_harm31';V32_harmguama = mat_harm32';
V33_harmguama = mat_harm33'; V34_harmguama = mat_harm34'; V35_harmguama =
mat_harm35';V36_harmguama = mat_harm36';
V37_harmguama = mat_harm37'; V38_harmguama = mat_harm38'; V39_harmguama =
mat_harm39';V40_harmguama = mat_harm40';
V41_harmguama = mat_harm41'; V42_harmguama = mat_harm42'; V43_harmguama =
mat_harm43';V44_harmguama = mat_harm44';
V45_harmguama = mat_harm45'; V46_harmguama = mat_harm46'; V47_harmguama =
mat_harm47';V48_harmguama = mat_harm48';
V49_harmguama = mat_harm49'; V50_harmguama = mat_harm50';

save va_guama Va_matguama;
save vd_guama Vd_matguama;
save vH1_guama V1_harmguama;save vH2_guama V2_harmguama;save vH3_guama V3_harmguama;save
vH4_guama V4_harmguama;save vH5_guama V5_harmguama;

```

```
save vH6_guama V6_harmguama;save vH7_guama V7_harmguama;save vH8_guama V8_harmguama;save
vH9_guama V9_harmguama;save vH10_guama V10_harmguama;
save vH11_guama V11_harmguama;save vH12_guama V12_harmguama;save vH13_guama V13_harmguama;save
vH14_guama V14_harmguama;save vH15_guama V15_harmguama;
save vH16_guama V16_harmguama;save vH17_guama V17_harmguama;save vH18_guama V18_harmguama;save
vH19_guama V19_harmguama;save vH20_guama V20_harmguama;
save vH20_guama V20_harmguama;save vH21_guama V21_harmguama;save vH22_guama V22_harmguama;save
vH23_guama V23_harmguama;save vH24_guama V24_harmguama;
save vH25_guama V25_harmguama;save vH26_guama V26_harmguama;save vH27_guama V27_harmguama;save
vH28_guama V28_harmguama;save vH29_guama V29_harmguama;
save vH30_guama V30_harmguama;save vH31_guama V31_harmguama;save vH32_guama V32_harmguama;save
vH33_guama V33_harmguama;save vH34_guama V34_harmguama;
save vH35_guama V35_harmguama;save vH36_guama V36_harmguama;save vH37_guama V37_harmguama;save
vH38_guama V38_harmguama;save vH39_guama V39_harmguama;
save vH40_guama V40_harmguama;save vH41_guama V41_harmguama;save vH42_guama V42_harmguama;save
vH43_guama V43_harmguama;save vH44_guama V44_harmguama;
save vH45_guama V45_harmguama;save vH46_guama V46_harmguama;save vH47_guama V47_harmguama;save
vH48_guama V48_harmguama;save vH49_guama V49_harmguama;
save vH50_guama V50_harmguama;
%save vb_guama Vb_matguama
%save vc_guama Vc_matguama
disp('fim tesguama')
```

2. Toolbox de Classificação de Padrões MATLAB

A partir da janela de linha de comando (*Command Windows*) do MATLAB™, pode-se acessar a *toolbox* de redes neurais artificiais com o comando **nnsat**, seguido da tecla enter.

Este comando retornará a tela da figura A1.

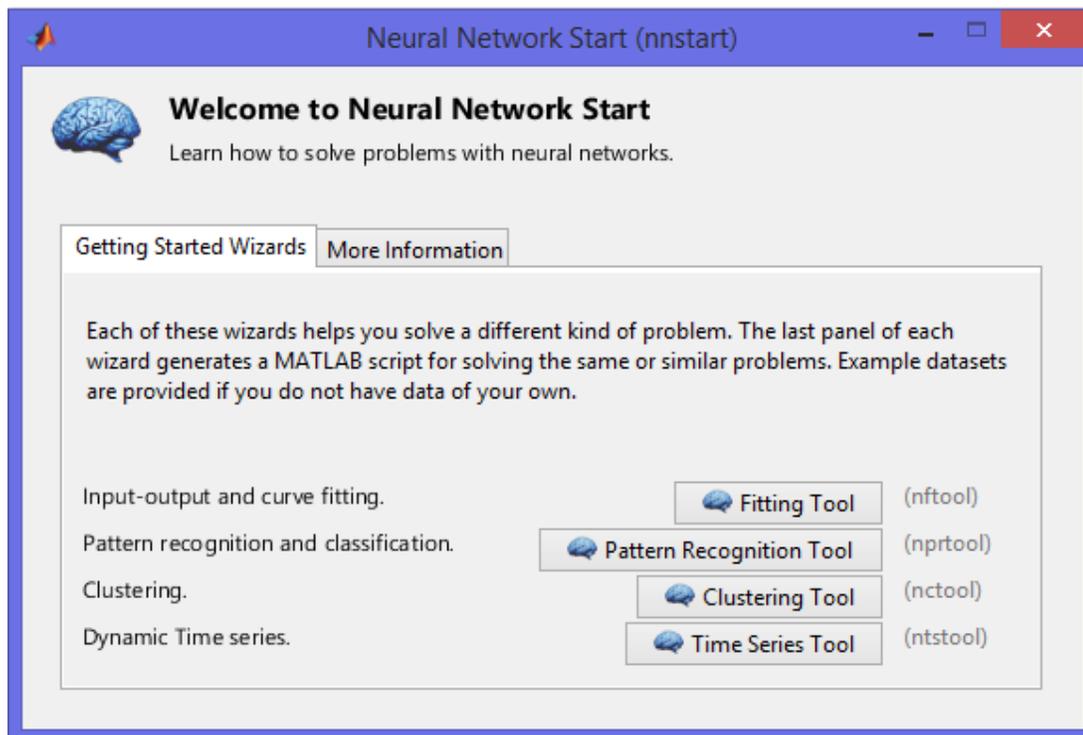


Figura A.1 – Toolbox de Redes Neurais Artificiais do MATLAB™

Cada um desses assistentes ajuda a resolver um tipo diferente de problema. O último painel de cada assistente gera um script MATLAB para resolver os problemas iguais ou semelhantes. Para a Detecção da falha no modelo matemático foi utilizado o assistente *Pattern Recognition Tool* (nprtool).

A *Pattern Recognition* Rede Neural, esta ferramenta irá auxiliar na Introdução (seleção) dos dados, criação e treinamento de uma rede, e avaliação o seu desempenho utilizando erro quadrado e matrizes de classificação (Confusão) médias. Na figura A.2 é apresentado o início de todo este processo.

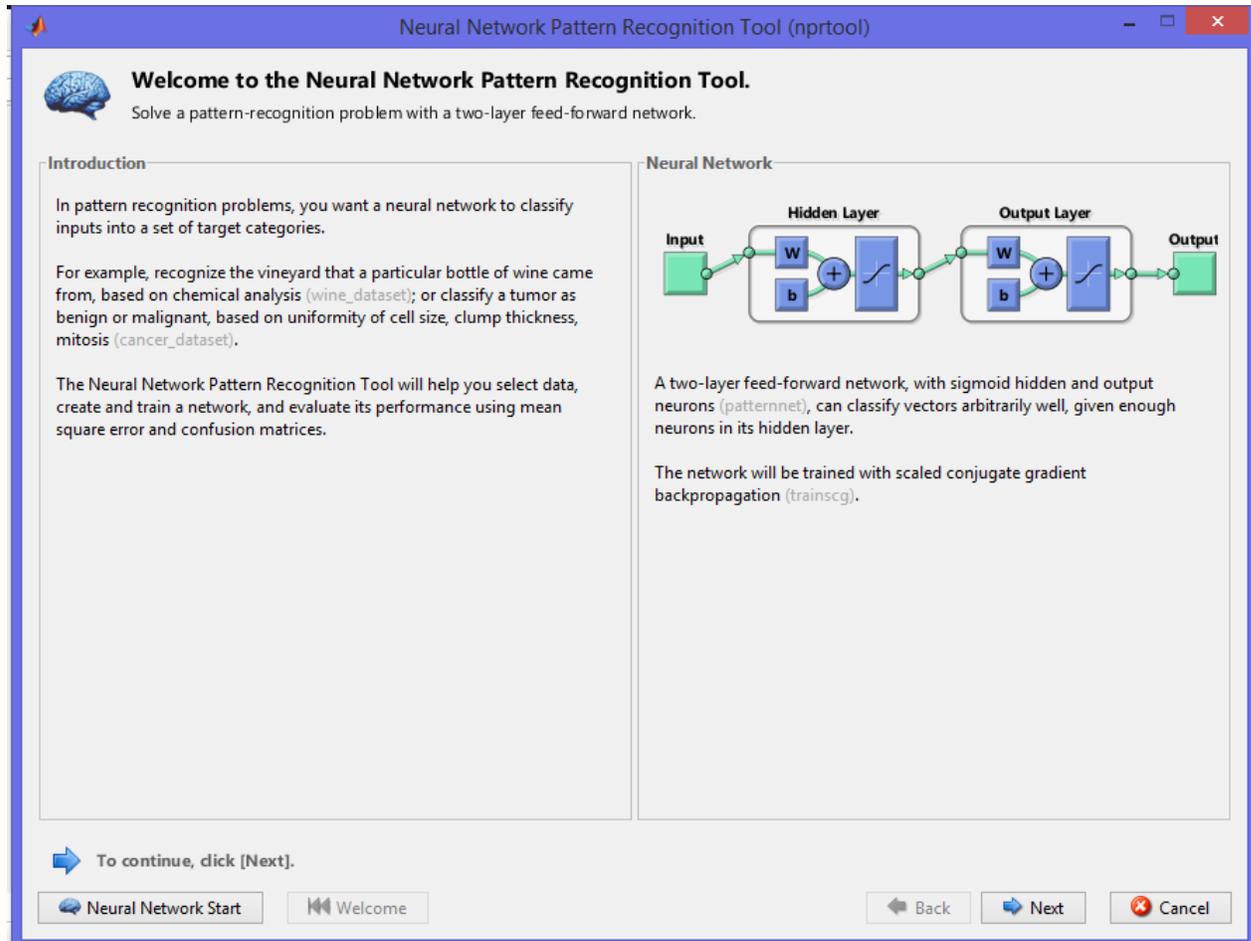


Figura A.2 – Início do processo de inserção dos dados para criação e treinamento da RNA

Em seguida são introduzidos os arquivos com os dados (*TestPattern_3579.txt* e *NormANorm2008AllPattern_AlvoInverse*) para treinamento e validação da RNA, como é mostrado na figura A3.

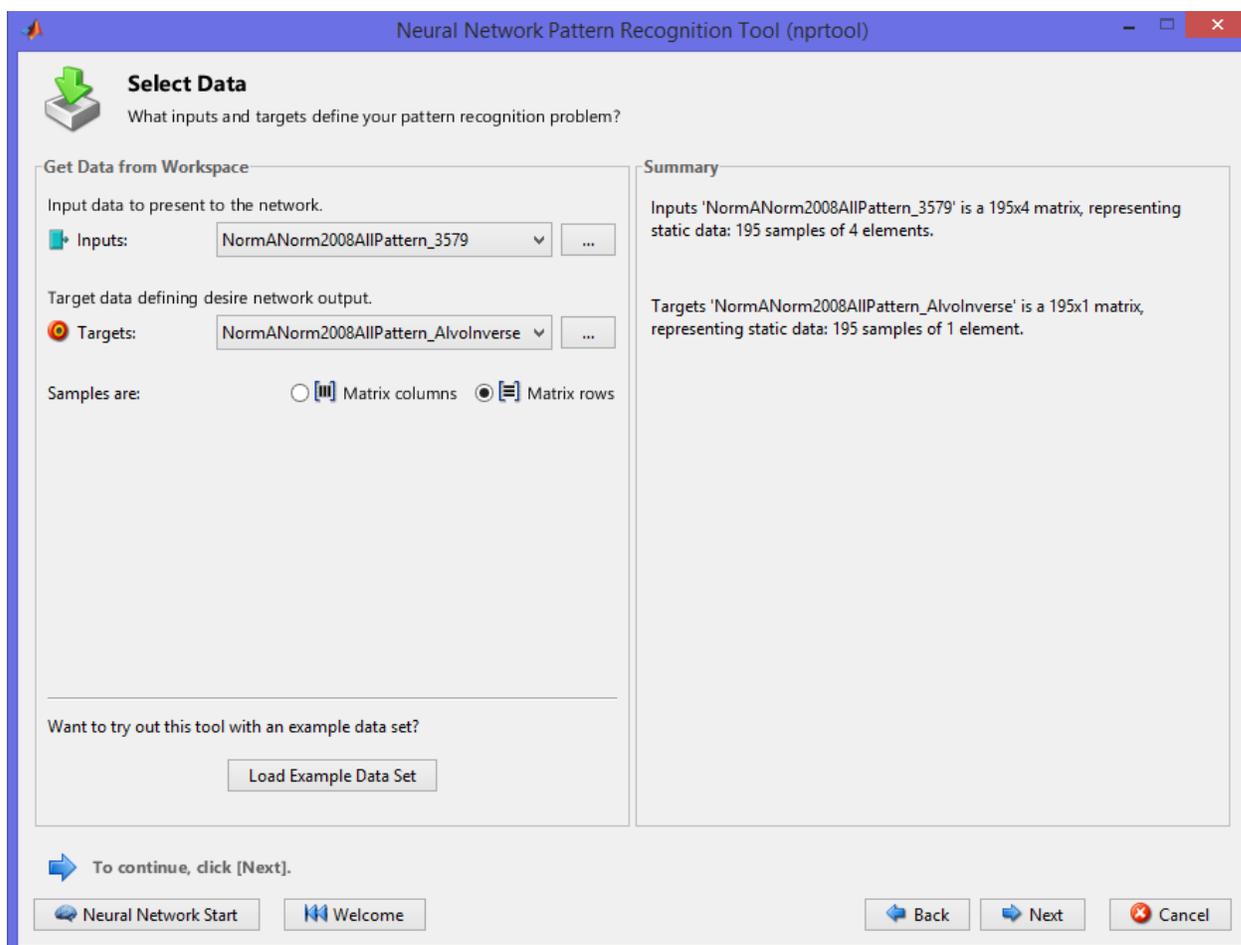


Figura A3 – Introdução dos arquivos contendo os dados para treinamento e validação da RNA.

Em seguida é realizada a seleção da porcentagem de dados selecionados pela própria Toolbox. Por padrão os dados são divididos como sendo 70% para treinamento, 15% para validação e 15% para teste. Como pode ser visualizado por meio da Figura A4.

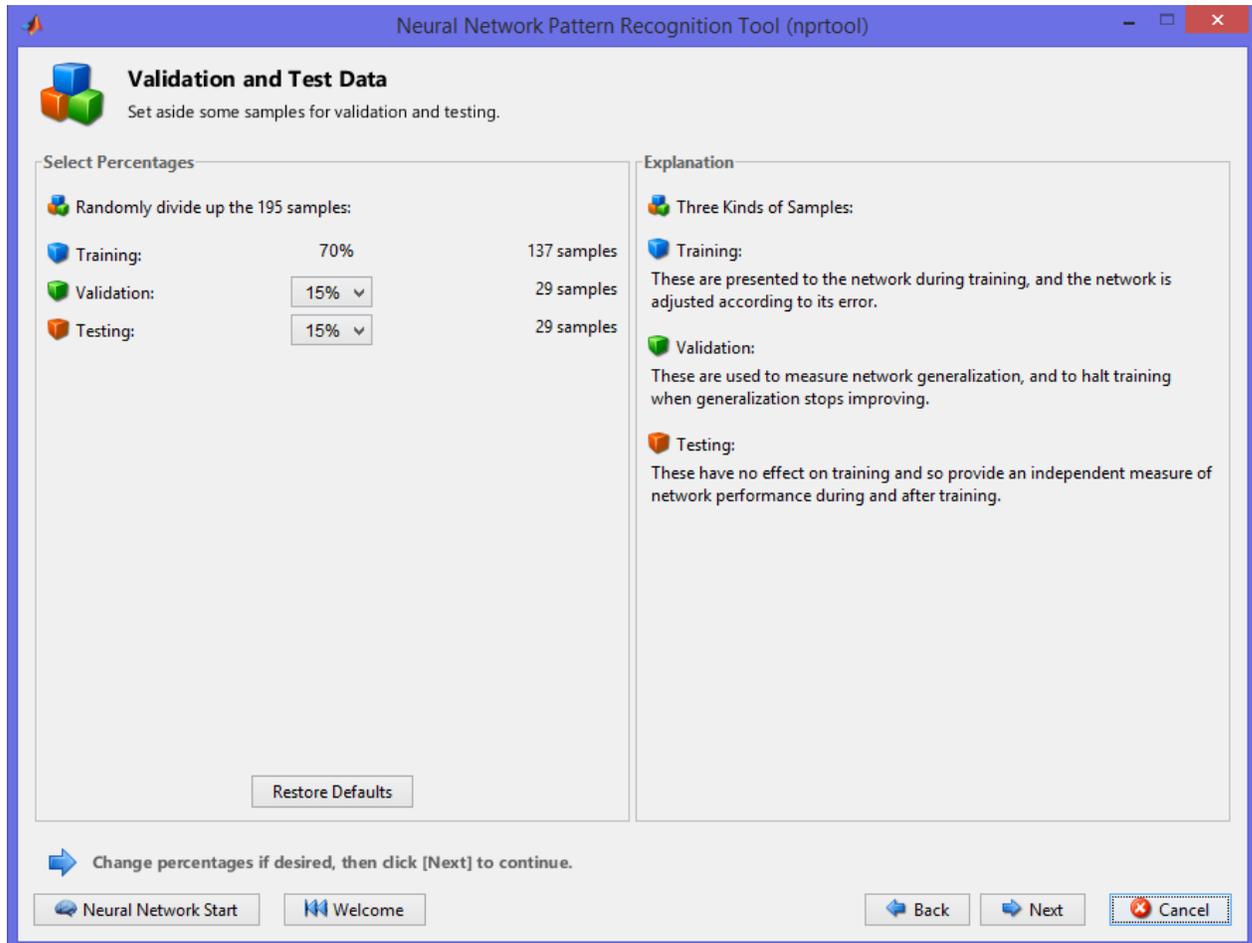


Figura A4 – Seleção da porcentagem de dados utilizados para treinamento, validação e teste para RNA

Em seguida já criada a RNA, esta é treinada e validada. Os resultados desta etapa, podem ser visualizados, acionado os ícones performance, Training State, Error Histogram, Confusion e Receiver Operating Characteristic. Este processo é apresentado na figura A.5.

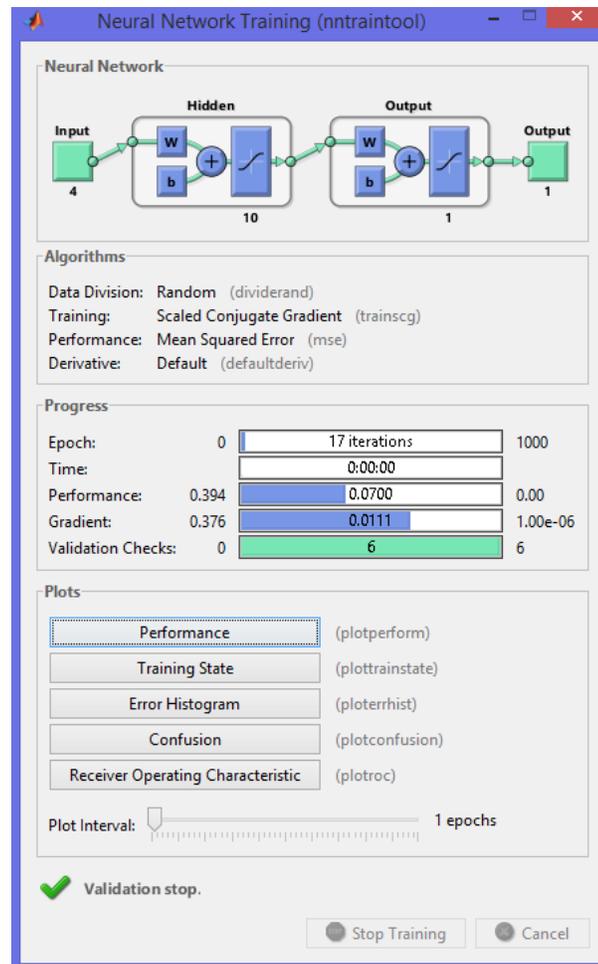


Figura A.5 – Treinamento e validação da RNA

Finalmente, os resultados podem ser todos salvos no workspace do MATLAB, como é mostrado na figura A.6.

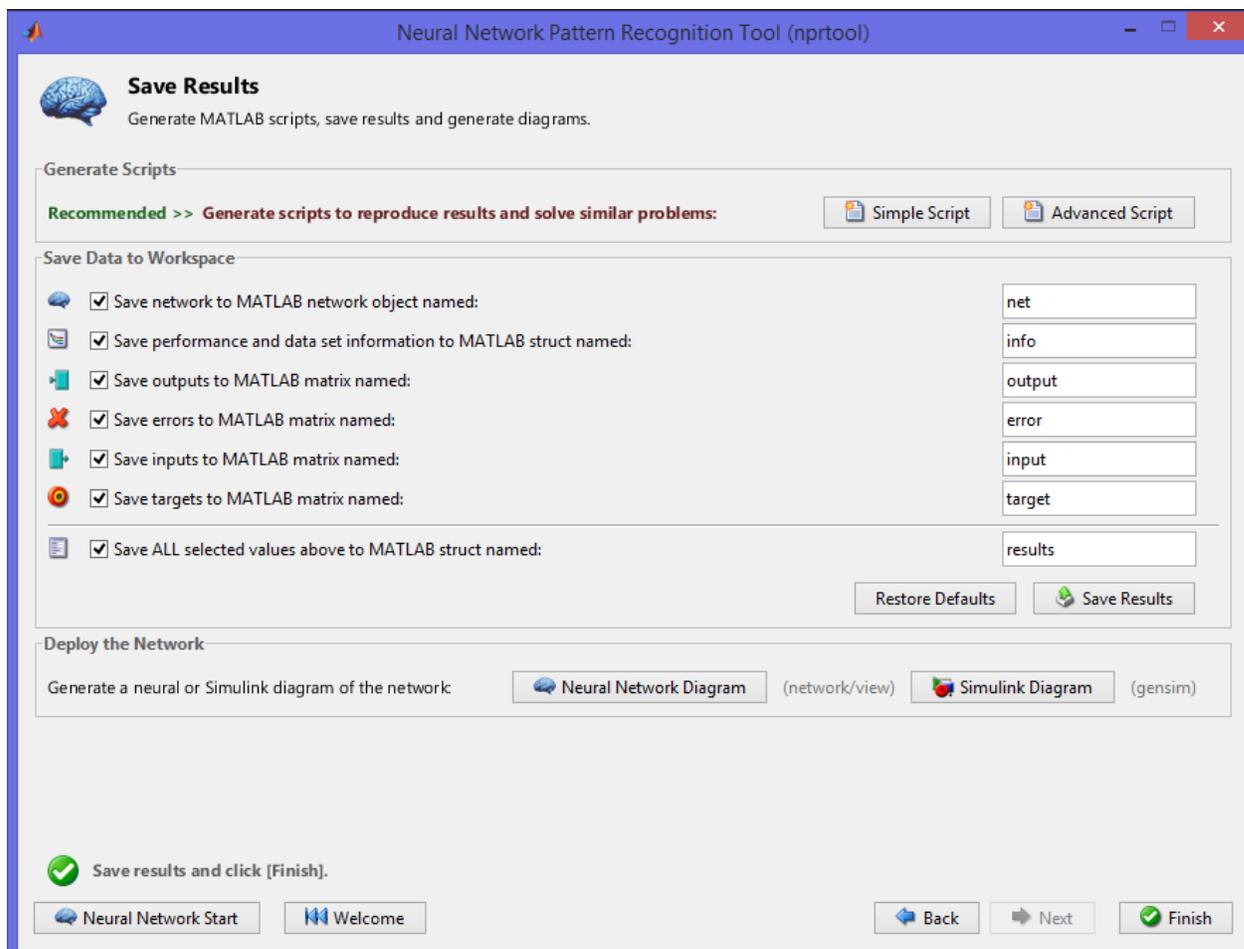


Figura A.6 – Janela para salvamento dos resultados da RNA criada.