

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

**MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO,
CONTEMPLANDO INFLUÊNCIAS AMBIENTAIS,
PARA O TRECHO GUAMÁ – UTINGA, LOCALIZADO
EM BELÉM, PERTENCENTE À ELETRONORTE.**

MARTIN MAX LUIS DE CASTRO NEGRÃO

DM ____/____

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARTIN MAX LUIS DE CASTRO NEGRÃO

**MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO,
CONTEMPLANDO INFLUÊNCIAS AMBIENTAIS,
PARA O TRECHO GUAMÁ – UTINGA, LOCALIZADO
EM BELÉM, PERTENCENTE À ELETRONORTE.**

DM ____/____

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARTIN MAX LUIS DE CASTRO NEGRÃO

**MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO,
CONTEMPLANDO INFLUÊNCIAS AMBIENTAIS,
PARA O TRECHO GUAMÁ – UTINGA, LOCALIZADO
EM BELÉM, PERTENCENTE À ELETRONORTE.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da UFPA, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

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

**MODELO MATEMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO,
CONTEMPLANDO INFLUÊNCIAS AMBIENTAIS,
PARA O TRECHO GUAMÁ – UTINGA, LOCALIZADO
EM BELÉM, PERTENCENTE À ELETRONORTE.**

AUTOR: MARTIN MAX LUIS DE CASTRO NEGRÃO

Dissertação de mestrado submetida à avaliação da banca examinadora, aprovada pelo colegiado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica, da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica, na área de sistemas de energia elétrica.

Aprovada em ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira.
(ORIENTADOR – UFPA)

Prof. Dr^a. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr^a. Dionne Cavalcante Monteiro
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr^a. Maria Emília Tostes
(MEMBRO –UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGEE/CT/UFPA)

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a 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 compreensão, nas minhas ausências, e indispensável ajuda na finalização dessa dissertação.

Em especial ao Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira, pela sua sábia orientação e apoio.

Ao Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior, pela sua amizade, sugestões e paciência durante a realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Paula Renatha e Cristiane Ruiz 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 indiretamente para a construção desta dissertação.

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

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 corpo condutor atravessado por uma corrente elétrica.....	42
Figura 3.1 - Transmissão de energia de duas bobinas por indução através de um núcleo de ferro	47
Figura 3.2 - Transmissão de energia de duas bobinas por indução através de um “núcleo de ar	48
Figura 3.3 Escoamento cruzado num cilindro (ou esfera).....	51
Figura 3.4 - Cilindro Horizontal, ou esfera, imerso num fluido que apresenta temperatura diferente da temperatura superficial do corpo	53
Figura 3.5 - Interação térmica radiativa entre duas entidades que representam temperaturas diferentes	54
Figura 3.6 - Gráfico resistência elétrica versus corrente elétrica, usando os conceitos de ampacidade para determinação da corrente elétrica	57
Figura 4.1 - Capacitor cilíndrico com raios R_1 e R_2 . A placa interna encontra-se aterrada enquanto a externa está a um potencial V_1 . As placas têm carga Q de sinais opostos.....	60
Figura 4.2 -diagrama de blocos representativo da cuba	64
Figura 4.3 - circuito equivalente do arranjo experimental.....	64
Figura 4.4 - cuba de ensaios, equipamentos e transformado para o aumento da tensão	66
Figura 4.5- Vista lateral esquerda da cuba, em que se encontra o sensor para medição da velocidade do vento, e da umidade relativa do ar.....	67
Figura 4.6 - Vista lateral direita, em que se encontram os simuladores de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento	67
Figura 4.7 - Comportamento entre a permissividade relativa e a tensão aplicada no capacitor, sob uma temperatura de 36°C	71
Figura 4.8 - Comportamento da permissividade elétrica conforme variação de temperatura e a tensão	72
Figura 4.9 - Comportamento da permissividade elétrica com a variação de temperatura.....	73
Figura 4.10 - Comportamento linear da corrente elétrica com a permissividade elétrica	74
Figura 4.11 - Comportamento entre a permissividade e a tensão aplicada no capacitor, sob uma Umidade Relativa do Ar em 90%	75
Figura 4.12 - Comportamento da permissividade com a variação de Umidade Relativa do Ar e a tensão	76
Figura 4.13 - Comportamento da permissividade elétrica com a variação da umidade relativa do ar	77
Figura 4.14 - Aproximação por uma função quadrática do comportamento da permissividade elétrica em função da Umidade Relativa do Ar.....	78

Figura 4.15 - Comportamento entre a permissividade e a tensão aplicada no capacitor, sob uma velocidade do vento de 1,7 m/s	80
Figura 4.16 - Comportamento da permissividade relativa com a variação da tensão e velocidade do vento	80
Figura 4.17 - Comportamento da permissividade relativa com a variação de velocidade do vento	81
Figura 4.18 – Gráfico da temperatura ambiente e permissividade, proveniente de dados coletados dos equipamentos de medição, que monitoram a LT	86
Figura 4.19 - Gráfico da umidade relativa do meio e permissividade, proveniente de dados coletados dos equipamentos de medição, que monitoram a LT	87
Figura 4.20 - Análise dos dados coletados da LT pelos equipamentos de monitoração e pelo experimento, para a Temperatura ambiente	88
Figura 4.21 - Análise dos dados coletados da LT pelos equipamentos de monitoração e pelo experimento, para a Umidade Relativa do Meio	89
Figura 5.1 – Modelo matemático de um trecho da linha de transmissão	92
Figura 5.2 - Diagrama de blocos do trecho LT.....	93
Figura 5.3 – Diagrama de blocos utilizado pelo SIMULINK para simulação numérica da LT94	
Figura 5.4. – Bloco responsável, pela correlação entre os parâmetros elétricos e as Variáveis ambientais.....	94
Figura 5.5 – Blocos responsáveis pelo cálculo da resistência elétrica e capacitância da LT ...	95
Figura 5.6 – Diagrama em blocos para o modelo matemático desenvolvido para cálculo de parâmetros elétricos, sob os efeitos das variáveis ambientais, e cálculo da corrente de fuga. ...	96
Figura 5.7 - Formato da tela para entrada de dados pelo Power sentinel com auxílio do software PSCSV	97
Figura 5.8- Formas de onda das três fases da corrente obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Utinga.	99
Figura 5.9 - Formas de onda das três fases da corrente obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Guamá.....	99
Figura 5.10 – Formas de onda das três fases da tensão obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Utinga	100
Figura 5.11 - Formas de onda das três fases da tensão obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Guamá.....	100
Figura 5.12 – União das formas de ondas das três fases da tensão e corrente, para verificação dos defasamentos existentes	101
Figura 5.13 –Modulo responsável pela extração da FFT dos sinais gerados pelo 'modelo PI' modificado; com resultados em barras e em tabela.....	102

Figura 5.14 – Capacitâncias intrínsecas da linha, em seus isoladores, entre fases e entre fase e terra.....	106
Figura 5.15 – Diagrama responsável pela soma das correntes que atravessam as capacitâncias da LT, modelo matemático em blocos	107
Figura 5.16 – Forma de onda, apenas um ciclo, para a corrente fuga calculada pelo modelo	107
Figura 5.17 – Forma de onda para corrente de fuga calculada pelo modelo PI modificado ..	108
Figura 5.18 – Decomposição harmônica do sinal da corrente de fuga, mostrada pela figura 5.16	109
Figura 6.1 – Linha de transmissão Guamá-Utinga-Miramar, monitorado	111
Figura 6.2 - Torre e distância entre as linhas para a LT/ELETRONORTE tipo SOD – Guamá – Utinga. Vista frontal	113
Figura 6.3-Casa de relé da estação Guamá, onde está instalado um medidor PS	114
Figura 6.4 - Esquema da transmissão de dados dos medidores.....	115
Figura 6.5 - Detalhes do medidor de energia Arbiter, apresentado a conexão para saída de dados.....	115
Figura 6.6 - Detalhe das interfaces para a transmissão dos dados.....	117
Figura 6.7 - Sala de comunicação onde será instalado o computador para recebimento dos dados.....	117
Figura 6.8 - Aplicação do teorema de Gauss, para superfícies fechadas, para um trecho de linha de transmissão	119
Figura 6.9 - Forma de onda, apenas um ciclo para corrente de fuga medida experimentalmente	120
Figura 6.10 – Forma de onda para corrente de fuga medida pelo PS	120
Figura 6.11 - Decomposição harmônica da forma de onda da corrente de fuga, mostrada pela figura 6.9.....	121
Figura 6.12 - Superposição das formas de onda da tensão calculada (azul) e medida(vermelho)	122
Figura 6.13 Diferença de amplitude das formas de onda da tensão medida e calculada.....	123
Figura 6.14- Formas de onda da tensão com as 3 fases medidas e calculadas pelo modelo ...	123
Figura 6.15 - Superposição das formas de onda da corrente calculada e medida	124
Figura 6.16 - Diferença de amplitude das formas de onda de tensão medida e calculada	124
Figura 6.17 - Formas de onda da tensão com as 3 fases medidas e calculadas pelo modelo ..	125
Figura 6.18 - Superposição das formas de onda da corrente calculada (azul) e medida (vermelho)	126
Figura 6.19 – Decomposição harmônica da corrente de fuga medida na LT, referente a figura 6.18	126

Figura 6.20 - Decomposição harmônica da corrente de fuga calculada na LT, referente a figura 6.18	127
Figura 6.21 - Super posição para as formas de onda das correntes de fuga calculada (azul) .e. a medida (vermelho), para as condições ambientais temperatura ambiente 25°C, umidade. do. ar de 71% , radiação solar 200W/m2, velocidade do vento 6m/s e direção do vento 100oNV...	129
Figura 6.22 - Decomposição espectral da corrente de fuga medida mostrada na figura 6.26.	130
Figura 6.23 - Decomposição espectral da corrente de fuga calculada referente a figura 6.18.	131
Figura 6.24 - Diagrama esquemático de um isolador.....	132
Figura 6.25 - Inserção de fator externo para variação da capacitância no modelo matemático, simulando um defeito no isolador para testar a sensibilidade da corrente de fuga, gerada pelo modelo	133
Figura 6.26 – Superposição das Forma de onda, das correntes de fuga calculadas, com a capacitância normal (vermelho) e com a capacitância alterada para $20 \times 10^{-9}F$	134
Figura 6.27 – Decomposição harmônica da corrente fuga, com o valor de capacitância alterado no 4° bloco para $20 \times 10^{-9}F$	135
Figura 6.28 – Superposição da forma de onda, das correntes de fuga calculadas, com a capacitância normal (vermelho) e com a capacitância alterada para $5 \times 10^{-9}F$	136
Figura 6.29 - Decomposição harmônica da corrente fuga, com o valor de capacitância alterado no 4° bloco para $5 \times 10^{-9}F$	137
Figura 6.30 – Superposição entre corrente de fuga medida (vermelho) e a corrente de fuga calculada pelo modelo PI, sem as variáveis ambientais (azul).....	138
Figura 6.31 - Decomposição harmônica,para corrente de fuga calculada pelo modelo PI s/ influência das Vas.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações constitutivas	41
Tabela 2.2 – Equivalências entre a teoria de circuito e a teoria eletromagnética.....	45
Tabela 4.1 – Intervalo de valores da Capacitância determinados experimentalmente	69
Tabela 4.2 – valores para constante dielétrica e respectivas Temperaturas Ambiente.....	70
Tabela 4.3 valores para constante dielétrica e respectivas Umidades Relativas do Ar	75
Tabela 4.4 - Valores para constante dielétrica e respectivas Velocidades do vento	79
Tabela 4.5 – Valores coletados pelos equipamentos para temperatura	85
Tabela 4.6- Valores coletados pelos equipamentos para Umidade Relativa do Meio	87
Tabela 5.1- Comportamento da resistência elétrica segundo variações ambientais sugeridas	104
Tabela 5.2 – Comportamento da capacitância, segundo variações ambientais sugeridas	105
Tabela 6.1 - Plano de Traçado do Sistema de Transmissão Tucuruí (LT 230 kV), trecho Guamá – Utinga.....	112
Tabela 6.2 - Distância média entre as torres do trecho Guamá - Utinga.....	112
Tabela 6.3 - Quantidade e tipo de torres do trecho Guamá - Utinga.....	113
Tabela 6.4 - Distribuição espectral da corrente de fuga medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 15h20min temperatura ambiente 33°C, velocidade do vento (10m) 10 m/s, Umidade relativa do meio 65%, direção do vento 88oNV, 380 W/m2	128
Tabela 6.5 - Distribuição espectral da corrente de fuga calculada para o dia 11 de Novembro de 2008, às 15h20min temperatura ambiente 33°C, velocidade do vento (10m) 10 m/s, Umidade relativa do meio 65%, direção do vento 88oNV, 380 W/m2.....	128
Tabela 6.6 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s2.....	130
Tabela 6.7 - Distribuição espectral da corrente de fuga calculada para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s2	131
Tabela 6.8 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s2, imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo	135

Tabela 6.9 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s2, imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo137

Tabela 6.10 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s2, imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo140

RESUMO

Teoricamente, a predição de falha em cadeia de isoladores pode ser observada pela verificação do comportamento harmônico da corrente através dos isoladores, chamada de corrente de fuga. Isto porque a capacitância de uma cadeia de isoladores permite a passagem das componentes harmônicas de maior ordem da corrente na linha. No entanto os projetos e planejamento de linhas de transmissão só levam em consideração as dimensões e geometrias da linha; esquecendo ou ignorando os efeitos ambientais em uma linha de transmissão. A omissão de tais efeitos, podem confundir um diagnóstico de falha no sistema de isolamento da linha, de forma que foi necessário desenvolver uma metodologia para determinação dos valores dos parâmetros elétricos, resistência elétrica e capacitância em função de variáveis ambientais como: temperatura ambiente, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e direção do vento, particularmente a determinação do comportamento da capacitância, em função dessas variáveis ambientais se deu de maneira inovadora e experimental, tendo em vista obter um modelo matemático de linha de transmissão mais realista e dinâmico, que possa identificar de maneira precisa os parâmetros elétricos, sob a influência das variáveis ambientais. Nesse trabalho é desenvolvido esse modelo, que, além de ser alimentado com dados elétricos e ambientais reais, é feito o estudo da decomposição harmônica da corrente de fuga; além da comparação com resultados de outros modelos já existentes. São realizadas ainda, simulações de falhas virtuais, que comprovam a eficiência e limitações do modelo, além de sugerir uma forma de monitoração em tempo real e a baixos custos.

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

ABSTRACT

Theoretically, the prediction of failure in the chain of insulators can be found by checking the behavior, of the harmonic current through the insulators, called leakage current. This is because the capacitance of a chain of insulators allows the passage of components of higher order harmonics of the current line, however the design and planning of transmission lines, only take into account the size and geometry of the line, forgetting or ignoring the effects environment in a line of transmission, the omission of such effects can confuse the diagnosis of failure in the system of isolation of the line, so it was necessary to develop a methodology for determining the values of electrical parameters, electrical resistance and capacitance as a function of environmental variables as: temperature, solar radiation, relative humidity, wind speed and wind direction, particularly the determination of the behavior of capacitance as a function of environmental variables was so innovative and experimental, in order to obtain a mathematical model of line transmission of more realistic and dynamic, that can more precisely identify the electrical parameters under the influence of environmental variables, such work is developed this model, which will be fed with real environmental and electrical data, it made the study of the harmonic decomposition of current leakage, and the comparison with results of other existing models, are still held, virtual simulations of failures, which bought the efficiency and limitations of the model, and suggest a way of monitoring in real time and low cost.

KEYWORDS: Capacitance. Leakage of current. Models of transmission lines.

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 PROBLEMÁTICA	19
1.2 JUSTIFICATIVA/IMPORTÂNCIA.....	21
1.3 OBJETIVOS	22
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
CAPÍTULO 2 MODELOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO	25
2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO: ESTADO DA ARTE	31
2.1.1 Modelo π Concentrado	32
2.1.2 Modelagem Modal.....	33
2.1.3 Modelagem em Coordenadas de Fase	34
2.2 MODELO UNIVERSAL.....	37
2.3 MODELO ELETROMAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	41
CAPÍTULO 3 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PARÂMETROS ELÉTRICOS	46
3.1 INDUTÂNCIA	47
3.2 RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	48
3.2.1 Transmissão de Calor por Convecção em Cabos de Linhas de Transmissão ...	50
3.3 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA SOB EFEITO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	55
CAPÍTULO 4 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	59
4.1 TEORIA SOBRE O EXPERIMENTO	60
4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	63
4.2.1 Cálculos Realizados com o Arranjo Experimental	68
4.3 COMPOTAMENTO DA CONSTANTE DIELETRICA MEDIANTE A VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	69
4.3.1 Temperatura.....	70
4.3.2 Umidade Relativa do Meio (Ar).....	74

4.3.3 Velocidade do Vento	78
4.3.4 Estendendo o Resultado para a Linha de Transmissão.....	82
4.3.5 Método de Ajuste de Capacitância em uma Linha de Transmissão	83

CAPÍTULO 5 MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....91

5.1 DESCRIÇÃO BÁSICA DO MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL.....	91
5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	96
5.2.1 Cálculo da Resistência Elétrica para a Linha de Transmissão.....	95
5.3 DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS ENVOLVIDOS	97
5.4 SIMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	103
5.4.1 Obtenção Teórica da Resistência Elétrica e da Capacitância.....	103
5.4.2 Obtenção da Corrente de Fuga em uma Linha de Transmissão	105

CAPÍTULO 6 COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO110

6.1 ESCOLHA DO TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO	111
6.2 MONITORAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE.....	114
6.2.1 Monitoração das Variáveis Elétricas.....	114
6.2.2 Monitoração das Variáveis Ambientais	116
6.2.3 Procedimentos para Substituição dos Dados no Modelo Matemático	118
6.3 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DA CORRENTE DE FUGA	119
6.3.1 Confronto Entre os Valores Medidos e Calculados pelo Modelo	121
6.3.1.1 Comparação entre valores de Tensão e Corrente na Linha de Transmissão .	122
6.3.2 Validação do Modelo Matemático pela Forma de Onda da Corrente de Fuga	125
6.4 SIMULANDO CADEIAS DE ISOLADORES COM DEFEITO	132

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E SUGESTÃO SPARA TRABALOS FUTUROS.....141

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
BIBLIOGRAFIA	144
ANEXO.....	149
APENDICES.....	151

CAPÍTULO 1.0 INTRODUÇÃO

A complexidade atual do sistema elétrico, aliada às novas cargas e a privatização do setor, tem tornado o mercado de energia cada vez mais competitivo, exigindo das concessionárias, grandes investimentos no setor elétrico para a obtenção de novas formas de geração de energia. No Brasil, entretanto, apesar destes investimentos, esta energia é, ainda, obtida por grandes usinas hidrelétricas; localizadas distantes dos pontos de consumo e conectadas a estes através de extensas linhas de transmissão (LT's).

Estas LT's, que objetivam o transporte de energia elétrica da geração até o consumidor final, são em sua grande parte, feitas por linhas aéreas. Estas linhas são constituídas por cabos condutores suportados em estruturas metálicas (torres) através de isoladores, que os mantêm separados eletricamente das mesmas. Por sua vez as linhas aéreas sofrem grandes solicitações tanto mecânicas quanto elétricas podendo causar uma interrupção no fornecimento de energia elétrica. Em relação às solicitações mecânicas, pode-se citar: as forças verticais causados pelo peso do condutor e as forças horizontais axiais e transversais devido à ação do vento. No entanto, a preocupação maior está nas solicitações de natureza elétrica; mas particularmente nas solicitações a que um isolador está submetido, pois é ele o responsável em resistir a elevadas tensões que podem ocorrer na linha, como por exemplo, *sobre-tensões* em frequência industrial, surtos de sobre-tensão causada por manobras e sobre-tensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito elevadas e variadas.

1.1 PROBLEMÁTICA

Um isolador é considerado eficiente quando é capaz de suportar, em condições normais ou severas, seu nível de isolamento mantendo uma distribuição balanceada em seu gradiente potencial no ar, com o objetivo de assegurar tensões de descargas adequadas evitando a rádio interferência; e, além disso, suportando as intempéries provocadas pelas mudanças meteorológicas locais. A falha de um isolador ocorre quando no interior do material ou na superfície do mesmo verifica-se a passagem de uma corrente em alta frequência, causando perdas de energia, descargas parciais ou totais (fenômeno este

conhecido como *flashover*). Isto ocorre quando há ruptura da isolação devido à sobre-tensão causada por: descarga atmosférica, isoladores poluídos, ou mesmo por imperfeições no isolador ou outras razões menos corriqueiras, como por exemplo, o efeito corona causado pela ionização do ar em torno do condutor.

A isolação de uma linha de transmissão pode ser verificada pela observação da rigidez dielétrica que separa suas partes energizadas (cabos, ferragens de suporte e fixação dos cabos) e aterradas (torres, bases, alicerces, ferragens de ancoragens). Esta separação elétrica, ou diferença de potencial entre as partes energizadas e não energizadas pode ser representada através da capacitância. Portanto, monitorando a capacitância de uma linha de transmissão verificam-se as condições de falhas por seus isolamentos, sejam estes o ar (cuja rigidez dielétrica é 15 kV/cm) ou os isoladores. Pois, é sabedor que uma falha de isolação ocorre quando a rigidez dielétrica do isolamento é reduzida, conseqüentemente o isolamento da LT não suporta a solicitação de potencial requerida.

Atualmente, existem métodos de detecção em tempo real de falhas em LT's que analisam a tensão e a corrente de linha, normalmente observando a fase entre elas para a detecção de falhas. Essa forma de detecção em tempo real de falhas é observada na patente de invenção CA2314838 (HEGGIE; GRAEME, 2001). Outras patentes de invenção analisam características dos fatores tensão e corrente para fazer a estimativa do estado das linhas de transmissão como citado na patente EP1324455 (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, como citado na patente de invenção US6397156 (BACHMANN, 2002).

Através da análise desses parâmetros, esses métodos podem identificar falhas nas linhas de transmissão e alertar para a necessidade de manutenção. Esses métodos, contudo, não têm o poder de estimar o estado de isolamento da linha de transmissão e nem predizer um futuro caso de falha na linha de transmissão (GOMES JR., 2007). No entanto, a predição de falhas na cadeia de isoladores na linha de transmissão pode ser observada, teoricamente, pela verificação do comportamento harmônico da corrente através dos isoladores. Isto porque a capacitância de uma cadeia de isoladores permite a passagem das componentes harmônicas de maior ordem da corrente de linha (CORREA, 2004).

1.2 JUSTIFICATIVA / IMPORTÂNCIA

A parametrização das perdas em uma linha de transmissão varia de região para região e de topologia de rede para topologia de rede. Assim, deve-se desenvolver uma verificação experimental para que se possa obter um "modelo matemático" mais realista, que permita identificar os parâmetros a serem observados, para predição de falhas em cadeias de isoladores de uma maneira genérica (CORREA, 2004, grifo nosso). Os parâmetros unitários das linhas de transmissão, resistência por unidade de comprimento (Ω/km), indutância por unidade de comprimento (H/km) e capacitância por unidade de comprimento (F/km), também conhecidos como parâmetros RLC (resistência, indutância e capacitância), não podem, em geral, ser considerados como concentrados e distribuem-se igualmente pela linha. A condutância G normalmente pode ser desconsiderada excetuando-se os estudos de efeito corona. Esses parâmetros de RLC de uma linha de transmissão são usualmente determinados através dos aspectos construtivos e distâncias envolvidas. Portanto, os valores das capacitâncias são obtidos teoricamente, e tendo como agravante o fato de serem imutáveis, em pleno início do século XXI, em que o mundo passa por sérias transformações ambientais, optar por um modelo estático é, no mínimo, sinônimo de prejuízo financeiro, para as empresas. Por outro lado, estes valores poderão ser comprovados e melhorados através de ensaio experimental de desenvolvimento de curvas de permissividade e ajuste da resistência e capacitância através da corrente de fuga.

Apesar de muito se conhecer sobre o comportamento da resistência em relação às condições ambientais, como por exemplo Weedy (1973) em sua obra intitulada *Electric Systems of Power*, traduzido para o Brasil como "Sistemas Elétricos de Potência", descreveu o comportamento dos cabos da LT em função da temperatura, Fuchs (1979) uma das literaturas mais utilizadas na academia "Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente", descreve o comportamento da resistência elétrica dos cabos em função da temperatura e velocidade dos ventos e Labegalini et al. (1992) uma obra mais recente "Projetos Mecânicos das Linhas de Aéreas de Transmissão", em que o autor utiliza o conceito de "ampacidade" em relação a algumas variáveis ambientais (VA's). A metodologia empregada para determinação da resistência elétrica utiliza conceitos conhecidos, somados a novos conhecimentos, além de sugerir uma metodologia para a determinação da capacitância da Linha de transmissão.

1.3 OBJETIVOS

A importância de conhecer os efeitos das variáveis ambientais no comportamento da capacitância da linha de transmissão é a garantia de se conhecer o nível de isolamento da linha de transmissão e de se conhecer seu comportamento (GOMES, 2006).

Diante de todo o exposto, a presente pesquisa objetiva principalmente desenvolver um modelo matemático em que estejam correlacionadas as variáveis elétricas e ambientais.

De maneira mais específica objetiva apresentar o monitoramento de um trecho, de uma linha de transmissão (trecho Guamá-Utinga); onde, por meio de sua utilização, é possível parametrizar as diversas perdas identificando aquelas devido à fuga de corrente pela cadeia de isoladores.

Outro objetivo específico é desenvolver uma metodologia experimental que sinalize o comportamento da capacitância às variáveis ambientais, que são: a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a direção do vento e a radiação solar; não é convencional e representa a dissertação de mestrado intitulada **Modelo Matemático de Linhas de Transmissão, Contemplando Influências Ambientais para o Trecho Guamá – Utinga, Localizado em Belém, Pertencente à Eletronorte**, tornando-o inovador. Este modelo ainda comprova que a capacitância nos isoladores da torre, que usualmente é desconsiderada, pode servir como referência para localização de falhas em Linhas de Transmissão.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De uma maneira geral, as concessionárias que detém as LT's devem ter sempre planos de contingência para o caso que se necessite de manutenção corretiva, como as ocorridas com quedas de torres, incêndios entre outros. Em contrapartida, para outras formas de manutenção (preventiva e preditiva), a inspeção prévia é quase onipresente para a execução da correção nas linhas, pois tais inspeções são bastante dispendiosas, devido alguns fatores, tais como: distância, dificuldade de acesso das linhas, equipamentos de última

geração e, principalmente, o fato da linha estar desligada, em manutenção (NEPOMUCENO, 2002). Com isso, as concessionárias necessitam de um método eficiente e de baixo custo, para que haja uma melhoria na manutenção das linhas de transmissão.

A técnica proposta neste trabalho permite a monitoração em tempo real e contínua, a baixos custos; baseando-se na *predição* de falha da cadeia de isoladores, conhecendo-se sua capacitância, na possibilidade de verificação da decomposição harmônica da potência perdida em um trecho da linha de transmissão. A predição desta falha pode ser obtida pela verificação do comportamento harmônico da corrente através dos isoladores. Isto porque a capacitância de uma cadeia de isoladores permite a passagem de, percentualmente, maiores correntes para componentes harmônicas de ordem elevada. Um aspecto importante a considerar refere-se à fonte de harmônico. A decomposição harmônica da corrente de fuga possui um teor harmônico característico dos aspectos construtivos dos geradores. Por meio do monitoramento de um trecho de uma linha de transmissão, pode-se parametrizar as diversas perdas identificando aquelas devido à fuga de corrente pela cadeia de isoladores. Para identificação desta fuga devem-se verificar as capacitâncias típicas. Portanto, além da contribuição, em se desenvolver, uma metodologia que utiliza um modelo matemático dinâmico que se atualiza com a variação dos parâmetros climáticos e do meio ambiente onde o sistema opera, também foi desenvolvida uma técnica para monitoração da linha. Com isso, através de uma monitoração em tempo real e contínua, o sistema elétrico se torna mais confiável, fazendo com que a operação e manutenção otimizadas das linhas de transmissão sejam mais eficientes à predição de possíveis falhas, como por exemplo, falta *fase-terra* (considerada uma das mais freqüentes), devido curtos-circuitos através das cadeias de isoladores. Outra vantagem de uma monitoração em tempo real das linhas de transmissão é o fator econômico, devido às concessionárias de energia elétrica utilizarem técnicas bastante dispendiosas, como se pode citar: a monitoração das linhas de transmissão por inspeção visual através de meios terrestres e aéreos a custos elevados, com uma periodicidade e com diagnósticos incompletos (CORREA, 2004); além da técnica de se observar o efeito corona através de meios aéreos (helicópteros), tornando a inspeção mais confiável, mas ainda dispendiosa, periódica e de elevada periculosidade, pela baixa altitude de vôo e existência de vegetações que restringem a visualização (GOMES JR, 2007).

O conteúdo dessa dissertação de mestrado está distribuído em sete (7) capítulos e apêndices. As referências citadas em toda a dissertação estão apresentadas ao final do trabalho e compreendem publicações bibliográficas, normativas e técnicas.

Segue um breve resumo do que está exposto em cada capítulo:

- ✓ No capítulo 2, **Linhas de Transmissão: Estado da Arte**, é apresentado um breve estudo sobre os modelos de linhas de transmissão atualmente estudados, destacando-se as particularidades de cada modelo;
- ✓ No capítulo 3, **Correlação entre Variáveis Ambientais e a Resistência Elétrica em uma LT**, são apresentados os métodos utilizado para a determinação do parâmetro Elétrico Resistência Elétrica de uma linha de transmissão;
- ✓ No capítulo 4, **Proposta Metodológica para Determinação Experimental da Capacitância em Função das Variáveis Ambientais**, é apresentada uma teoria básica sobre capacitores, junto com um experimento em ambiente controlado, utilizado para se relacionar a capacitância com as variáveis ambientais e extensão dos resultados para uma Linha de Transmissão;
- ✓ No capítulo 5, **Modelo Matemático Considerando as Variáveis Ambientais**, apresenta-se a modelagem matemática de uma Linha de Transmissão comprovada através de simulação com dados reais, utilizando o SIMULINK/MATLAB, bem como o comportamento harmônico da corrente de fuga;
- ✓ No capítulo 6, **Comprovação Experimental do Modelo Matemático Desenvolvido**, são descritos os equipamentos a serem utilizados para a monitoração e aquisição das grandezas elétricas e meteorológicas de um sistema de potência em um trecho da Linha de Transmissão, definição da instrumentação para a determinação da corrente de fuga nos isoladores na LT, comprovação dos resultados teóricos a partir de um modelo matemático adequado, e a própria simulação do modelo matemático da linha de transmissão, através de cadeias de isoladores;

- ✓ No capítulo 7, **Conclusões e Proposta para Trabalhos Futuros**, são apresentadas as principais conclusões e propostas para futuros trabalhos que visem ampliar as possibilidades da estrutura proposta nesta dissertação.

CAPÍTULO 2.0 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica estão se tornando cada vez mais interconectados, aumentando com isto a complexidade da malha de transmissão. Isto possibilita o surgimento de diversos fenômenos atípicos em termos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, além de fenômenos de caráter meteorológicos. É necessário, então, uma otimização elétrica e econômica do sistema de transmissão, e um aumento do nível de detalhamento dos componentes envolvidos (LIMA et al., 2002). Daí a necessidade de desenvolver modelos matemáticos mais fidedignos, que representem com mais veracidade tais fenômenos e contemplem toda 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 linhas de transmissão. Estes transitórios são funções do tempo e da posição na linha. 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 LT's. 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, pára-raios, disjuntores, 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 LT's 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.

Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as LT's podem ser representadas por:

- **Modelos a parâmetros concentrados:** a linha de transmissão (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 sujeito a atenuações até ser refletido nos terminais da linha, existindo um atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos.

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

- **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.

Além disso, podem-se modelar as LT's polifásicas, tanto no domínio modal ou no domínio de fases.

- **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 LT's 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).

- **Modelos no Domínio de Fases:** visa um modelo sem restrições quanto à geometria ou natureza das linhas de transmissão, trabalhos recentes propõem modelar linha de transmissão diretamente no domínio de fases (MORCHED, 1999; NODA, ET AL.1997; NGUYEN, ET AL.1997)

A idéia 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.

Através de 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 devida 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 LT's 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).

No entanto, um modelo preciso de LT's deve considerar a dependência da frequência dos parâmetros, pois a natureza distribuída da impedância longitudinal da linha de transmissão que, juntamente com o efeito pelicular nos condutores e o retorno pelo solo, resultam em atenuação e distorção nas formas de onda de tensão e corrente que trafegam pela mesma (LIMA, 2002).

No domínio da frequência, uma linha de transmissão é completamente caracterizada pela admitância característica $Y_C(\omega)$ e pelo fator de propagação $A(\omega)$. Uma matriz de transformação $T(\omega)$ calculada através da teoria de autovalores e auto-vetores, é usada para obter $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$ no domínio modal (WEDEPOHL, 1963, DOMMEL; 1992, 1996 e MARTÍ, 1982) ou no domínio de fase (MORCHED, 1999, NGUYEN; DOMMEL; MARTÍ, 1997 e CASTELLANOS, 1997). Apesar dos elementos de $T(\omega)$ serem complexos e dependentes da frequência, programas tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), normalmente assumem estes como reais e constantes, além de usualmente desconsiderarem a condutância em derivação nos cálculos (DOMMEL; 1992, 1996 e WEDEPOHL, 1996).

A literatura tem apresentado diversos modelos capazes de representar mais detalhadamente o comportamento de uma linha de transmissão. No trabalho de Castellanos (1995), visando solucionar alguns problemas com o escalonamento das matrizes de transformação modais foi usada a transformação idempotente ao invés da transformação baseada em auto-vetores do domínio modal. Posteriormente, Castellanos (1995) e Marcano (1997), apresentaram algumas configurações assimétricas e de circuitos múltiplos, em que o modelo idempotente produz resultados teoricamente mais precisos que o modelo modal convencional.

No entanto, o EMTP precisava de uma ferramenta para a representação das funções envolvidas diretamente no domínio discreto (plano z), capaz de permitir a transformação das equações da linha do domínio da frequência diretamente para o domínio do tempo e vice-versa. Então Noda (1996), propôs o uso de um modelo denominado ARMA (*Auto Regressive Moving Average*), que posteriormente foi modificado para a obtenção da resposta no domínio do tempo através de interpolação. Tal implementação é conhecida como IARMA (*Interpolated Auto - Regressive Moving Average*) e consta da versão ATP (*Alternative Transients Program*) do EMTP.

Uma extensão do modelo clássico de parâmetros distribuídos foi criado por Dommel (1996), e desenvolvido por Castellanos (1997) onde a impedância de perdas (resistência e a parte da indutância que varia com a frequência) é representada por uma rede RL em paralelo, e a parcela responsável pela propagação das ondas é modelada por uma linha de transmissão ideal. Mais recentemente este modelo tornou-se híbrido, com as partes sem perdas representadas no domínio modal, a fim de modelar cabos elétricos e não só linha de transmissão (YU; MARTÍ, 2002).

No trabalho de Morched (1999) é apresentado um modelo de LT's no domínio de fases, denominado de modelo universal (*Universal Line Model*). Esse modelo faz uso do método de ajuste vetorial (*vector fitting*) (GUSTAVSEN; 1998a, 1998b) para obter aproximações racionais para $Y_C(\omega)$ e $A(\omega)$, no domínio de fases. O agrupamento de modos com tempos de propagação muito próximos, torna o modelo computacionalmente mais eficiente. Este artifício reduz o número de convoluções no tempo, contribuindo com um ganho em eficiência computacional.

Para uma linha polifásica com ' n ' fases, cada elemento da matriz fator de propagação está associado a n tempos de propagação modal. O compartilhamento de pólos contribui para um aumento na eficiência computacional em simulações no domínio do tempo. No modelo proposto por Fernandes (2001a, 2001), ao contrário do usual, a matriz transformação modal também é complexa e dependente da frequência, se incluídas as condutâncias em derivação no cálculo das matrizes de admitância característica, $Y_C(\omega)$ e de propagação $A(\omega)$ em coordenadas de fases. Tal modelo apresentou uma otimização do modelo universal, onde há um agrupamento de todos os modos existentes em um sistema polifásico, em um único tempo de propagação. Esta aproximação se mostrou precisa, eficiente e numericamente estável.

A maior dificuldade, do ponto de vista teórico, consiste em provar matematicamente que o modelo é estável, independente da configuração. Excetuando-se os modelos no domínio modal, onde a prova de estabilidade é trivial, os diversos modelos híbridos ou em coordenadas de fase ainda carecem de uma comprovação explícita de estabilidade numérica. Portanto, para os modelos em coordenadas de fase, os testes nunca são explícitos e se baseiam em métodos indiretos, como àqueles encontrados em sistemas multi-variáveis, ou na experiência com a aplicação dos modelos em diferentes configurações de rede de transmissão (LIMA, 2002).

Neste capítulo, é apresentado um estudo do estado da arte de modelos de LT's comparando-os em relação à eficiência e estabilidade; além da determinação teórica dos parâmetros característicos de uma linha de transmissão.

2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO: ESTADO DA ARTE

Dentre os diversos modelos de LT's 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.

No ATP/EMTP existem atualmente quatro modelos com parâmetros distribuídos e um com parâmetros concentrados. Destes quatros, 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.

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

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = (R + j\omega L)I \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = (G + j\omega C)V \quad (2.2)$$

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 Eq. (2.1) e (2.2) 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 da Equação (2.1) e (2.2) lida com funções transcendentais, sendo a solução geral no domínio da frequência dado por:

$$V(\omega, x) = e^{-\Gamma x} V_f(\omega) + e^{\Gamma x} V_b(\omega) \quad (2.3.a)$$

$$I(\omega, x) = Y_C(\omega)[e^{-\Gamma x} V_f(\omega) - e^{\Gamma x} V_b(\omega)] \quad (2.3.b)$$

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 EMTDC de Manitoba (2002) disponibiliza um modelo de LT’s no domínio de fases, denominado modelo universal (*Universal Model*), conforme proposto por Morched et al.(1999). Versão recente do programa ATP (NODA et al, 1997) também disponibiliza um modelo de LT’s no domínio de fases, denominado modelo IARMA (*Interpolated Auto-Regressive Moving Average*), conforme proposto por Noda et al.(1996). A seguir são detalhados os principais aspectos dos modelos de LT’s, amplamente estudados.

2.1.1 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 interessante 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 LT’s 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).

2.1.2 Modelagem Modal

Modelos modais de LT's 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).

2.1.3 Modelagem em Coordenadas de Fase

As LT's 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 auto-vetores 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 apresentado 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 praticamente 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:

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= Z_{i-int}(\omega) + Z_{ext}(\omega) + Z_{solo}(\omega) \\ Y(\omega) &= Y_{ext}(\omega) + j \cdot \omega \cdot L(\omega) \end{aligned} \quad (2.4)$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E(\omega)}{\partial x^2} &= Z(\omega) \cdot Y(\omega) \cdot E(\omega) \\ \frac{\partial^2 I(\omega)}{\partial x^2} &= Z(\omega) \cdot Y(\omega) \cdot I(\omega) \end{aligned} \quad (2.5)$$

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

Nos modelos no domínio modal, as n equações acopladas em (2.5) 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:

$$T^{-1}(\omega).Y(\omega).Z(\omega).T(\omega) = \lambda(\omega) \quad (2.6)$$

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 (2.6) é calculada diretamente no domínio de fases, pelas equações de 2.7:

$$Y_C(\omega).E_k(\omega) - I_{km}(\omega) = [Y_C(\omega).E_k(\omega) + I_{km}(\omega)].A(\omega) \quad (2.7.a)$$

$$Y_C(\omega).E_m(\omega) - I_{mk}(\omega) = [Y_C(\omega).E_k(\omega) + I_{km}(\omega)].A(\omega) \quad (2.7.b)$$

Sendo

$$Y_C(\omega) = \sqrt{Y(\omega).Z(\omega).Z(\omega)^{-1}} \quad e \quad (2.8)$$

$$A(\omega) = e^{-\sqrt{Y(\omega).Z(\omega)}.d} \quad (2.9)$$

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 (2.8) e (2.9), podem ser calculados a partir dos parâmetros modais (FERNANDES, 2001a):

$$Y_C(\omega) = T(\omega).Y_{C_{mod}}(\omega).T^{-1}(\omega) \quad (2.10)$$

$$A(\omega) = T(\omega).A_{mod}(\omega).T^{-1}(\omega)$$

Observa-se em (2.10) 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 auto-vetores. 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).

2.2 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:

$$A_{mod-i}(j\omega) \cong P_i(j\omega) \cdot e^{-j\omega \tau_i} \quad (2.11)$$

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 (2.11) 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:

$$e_i^{+s\tau} \cdot A_{mod-i}(s) \cong \sum_{m=1}^N \frac{c_m}{s-p_m}, \text{ para } s = j \cdot \omega \quad (2.12)$$

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 (2.13) 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:

$$\Omega. \Delta\tau_{ij} < 2. \pi. (10/360) \quad (2.13)$$

sendo,

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

De posse dos pólos 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:

$$A_{ij}(s) = \sum_{k=1}^n \left[\left(\sum_{m=1}^{N_k} \frac{c_{mk-ij}}{s - P_{mk}} \right) \cdot e^{-s \cdot \tau_k} \right] \quad (2.14)$$

Sendo, $A_{ij}(s)$ - elemento (i, j) da matriz $A(s)$ no domínio de fases; p_{mk} - pólos 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 pólos 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,

$$Y_{c-ij}(s) \cong d_{ij} + \sum_{k=1}^n \frac{c_{k-ij}}{s-p_k}, \text{ para } s = j.\omega \quad (2.15)$$

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 novo 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:

$$Y_C(j\omega) = T_i(j\omega).Y_{c-mod}(j\omega)T_i(j\omega)^T \quad (2.16)$$

$$A(j\omega) = T_i(j\omega).A_{mod}(j\omega)T_i(j\omega)^{-1}$$

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

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 (2.16), como expressado a seguir:

$$Y_{C_{ij}}(j\omega) = |Y_{ij}(j\omega)|.e^{j-\theta_{ij}(j\omega)} \quad (2.17)$$

$$A_{ij}(j\omega) = |A_{ij}(j\omega)|.e^{j-\psi_{ij}(j\omega)}e^{j.\omega.\tau} \quad (2.18)$$

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_{min} , dentre os modos, tal que $\tau_{min} < \tau_i, i = 1, 2, \dots, n$. Faz-se então $\tau = \tau_{min}$, 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 (2.18) possui uma parcela devida 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 desta matriz. Mesmo para LT's extensas em que há maior diferença entre os tempos de propagação, esta associação não resulta em funções com oscilações no módulo ou nos ângulos de fase.

Na obtenção deste 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 pólos 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. (FERNANDES, 2001).

No entanto, é possível notar que em todos os modelos até aqui estudados nenhum deles aborda a influência de qualquer variável ambiental que seja em qualquer um dos parâmetros elétricos: resistência elétrica, capacitância e indutância elétrica.

Atualmente, com o aumento da instabilidade climática em nosso país, existe a necessidade do desenvolvimento de um modelo que reflita de forma fidedigna o comportamento em uma linha de transmissão de energia elétrica, frente às novas mudanças climáticas. No entanto existe um modelo, que possui em sua essência, variáveis que relacionam-se com as variáveis ambientais, este é o chamado modelo eletromagnético de linhas de transmissão.

2.3 MODELO ELETROMAGNÉTICO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

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 (tabela 2.1):

Tabela 2.1 Relações constitutivas

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

(Fonte: SHADIKU, 1978, p.126)

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 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.

Equações de Maxwell

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad \text{Lei de Indução de Faraday} \quad (2.19)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Forma diferencial da lei de Coulomb} \quad (2.20)$$

$$\nabla \times \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{Lei de Ampère} \quad (2.21)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Dipolo Magnético} \quad (2.22)$$

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

Como o trecho de LT analisado, é atendido em baixas frequências (60 Hz); da teoria de circuitos, de acordo com a figura 2.1, é conveniente descrevê-la como uma vareta de comprimento l e área s , cuja representação quantitativa é feita pela resistência (R), a qual pode ser determinada pela 'Primeira Lei de Ohm, na Equação' (2.23) e representada pela figura 2.1, seguinte:

$$\vec{V} = R\vec{I} \quad (2.23)$$

Em que:

\vec{V} - Diferença de potencial (Tensão), [V]; e

\vec{I} - Corrente, [A].

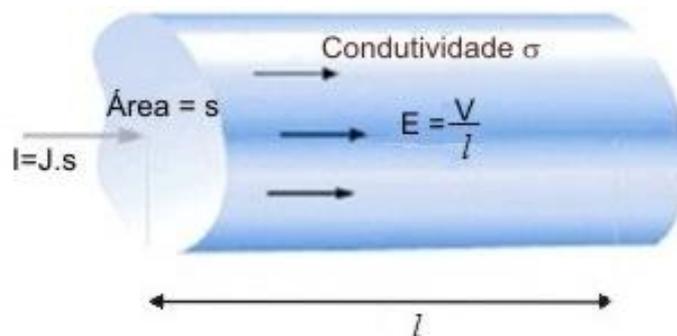


Figura 2.1 Corpo condutor atravessado por uma corrente elétrica

Fonte: (SHADIKU, 1978, p.126)

Para a teoria do campo é considerado um determinado campo elétrico (\vec{E}) em um ponto da vareta dada pela seguinte relação constitutiva na equação (2.24).

$$\vec{J} = \vec{E}\sigma \quad (2.24)$$

Em que:

\vec{J} - Densidade de corrente, [$A.m^{-2}$]; e

σ - Condutividade do meio, [$(\Omega.m)^{-1}$];

Para determinar o valor da diferença de potencial \vec{V} , entre as extremidades da vareta, basta integrar o campo elétrico em função do seu comprimento, e caso a vareta seja uniforme e de densidade também uniforme, a equação pode ser expressa como uma equivalente à 'Lei de Ohm', na teoria do campo.

$$\vec{V} = \frac{\vec{J}l}{\sigma} = \vec{J}_S \frac{l}{\sigma S} \quad (2.25)$$

Em que:

$I = J_S$ - Corrente através da vareta, [A];

$R = \frac{l}{\sigma S}$ - Resistência da vareta, [Ω]; e

S - Área da seção transversal da vareta, [m^2].

Para determinar os demais parâmetros da LT, ou seja, indutância e capacitância pela teoria de campo; considera-se a estrutura como um todo, em seguida pode-se perfeitamente, imaginar-se um condutor submetido a um campo elétrico total (\vec{E}_{total}), o qual é resultado da soma de um campo \vec{E}_e relacionado com as forças eletro-motriz ($FEMs$) e um campo E induzido por cargas e correntes neste condutor, conforme a equação (2.26)

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_e + \vec{E} \quad (2.26)$$

O campo elétrico total E_{total} da Figura 2.1 é obtido de acordo com a equação (2.26) e o campo induzido \vec{E} por cargas e correntes é obtido pela equação (2.27).

$$\vec{E}_{total} = \frac{\vec{J}}{\sigma} \quad (2.27)$$

e sabendo-se que

$$\frac{\vec{J}}{\sigma} = \vec{E}_e - \left(\nabla \vec{V} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \text{ ou } \vec{E}_e = \frac{\vec{J}}{\sigma} + \nabla \vec{V} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.28)$$

Fazendo-se a integração ao longo do condutor em todos os termos de (2.28) tem-se a expressão em (2.29), a seguir, que determinam os potenciais envolvidos no condutor.

$$\oint \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = \oint \frac{\vec{J}}{\sigma} \cdot d\vec{l} + \oint \nabla \vec{V} \cdot d\vec{l} + \oint \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{l} \quad (2.29)$$

ou

$$\oint \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = \oint \vec{J} \rho \cdot d\vec{l} + \oint \nabla \vec{V} \cdot d\vec{l} + \oint \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{l} \quad (2.30)$$

Em que ρ é a condutibilidade do condutor

Analisando o membro esquerdo da equação (2.30), verifica-se que resulta no potencial referente às forças eletro-motrizes (fem's) envolvidas no problema, neste caso, o potencial do gerador.

Partindo para o membro da direita, no primeiro termo pode-se verificar facilmente, que esta é a parte resistiva, mostrada na equação (2.31), e o segundo termo é a parte capacitiva de nossa linha, enquanto que o terceiro termo é responsável pela parte indutiva, equações (2.32) e (2.33) respectivamente.

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\epsilon d \vec{V}}{d dt} \quad (2.31)$$

$$\vec{I}_d = \vec{J}_d \cdot s = \frac{\epsilon s d \vec{V}}{d dt} = C \frac{d \vec{V}}{dt} \quad (2.32)$$

$$\frac{d \vec{I}}{dt} \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \frac{dI}{dt} \oint \frac{\vec{A}}{I} \cdot d\vec{l} \quad (2.33)$$

Do desenvolvimento destas relações obtidas nas equações de (2.31) à (2.33) é apresentada a tabela 2.2 (a seguir), na qual estão as equivalências que relaciona a teoria de circuitos elétricos e a de campos magnéticos.

Pode-se notar, ainda, observando a tabela 2.2, que através das unidades, permissividade elétrica, resistividade e permeabilidade magnética, que são unidades relacionadas com o meio ao qual o sistema está imerso, é possível relacionar os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão (Resistência Elétrica, Capacitância e Indutância) com o meio ao qual a LT está circundada, com isso, abre-se um leque de possibilidades em um estudo para determinar o quanto as variações ambientais, influenciam nos valores desses Parâmetros Elétricos (PE's), é perfeitamente possível equacionar-se a relação entre parâmetros elétricos e variáveis ambientais.

Tabela 2.2 – Equivalências entre a teoria de circuito e a teoria eletromagnética

TEORIA DE CIRCUITOS	TEORIA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS
I	$\vec{J} \cdot s$
L	$\frac{s\epsilon}{d}$
C	$\frac{\mu H}{I}$
R	$\frac{l}{\sigma s}$

Fonte: elaboração própria

Dentre os muitos modelos estudados, aquele que mais supriu a necessidade da pesquisa foi o modelo de *parâmetros PI concentrados*, no entanto este modelo determina os parâmetros da LT somente levando em conta as dimensões e a geometria da linha. Daí a necessidade de incorporar os conceitos do modelo de linha de transmissão eletromagnética no modelo de parâmetros PI concentrados. Essa mescla de modelos se *denominará modelo PI de parâmetros concentrados modificado*.

CAPÍTULO 3.0 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E A RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O conhecimento das características da LT e a verificação do sistema são fundamentais para a otimização de transporte de energia além de ferramenta para a verificação e prevenção de comportamentos futuros como sobrecargas ou falhas. A finalidade de um sistema de supervisão é realizar o monitoramento das condições gerais da linha, além do comportamento da tensão e corrente nossas variáveis elétricas (VE's), o comportamento das Variáveis Ambientais (VA's) Temperatura ambiente (T_{amb}), Velocidade do vento (V_{vent}), Direção do Vento (D_{vent}), Radiação Solar (R_{sol}) e Umidade do meio (U_{meio}), e ainda dos parâmetros elétricos (PE's) Resistência elétrica, Capacitância e Indutância elétrica.

Acredita-se que o monitoramento das VE's e VA's permite fazer previsões do sistema elétrico a fim de prevenir acidentes, como por exemplo: o conhecimento das condições térmicas e ambientais associadas ao conhecimento de corrente e tensão da linha dão a possibilidade de uma manutenção preditiva em isoladores (CORREA 2004), e provavelmente estendido a cabos, e até mesmo nas emendas dos cabos, nesse último em particular, distinguir-se entre uma situação de mudança de temperatura ambiental que surte algum efeito de natureza elétrica no cabo ou o afrouxamento da emenda que também teria como conseqüências o aumento da temperatura no cabo e um efeito de perda elétrica (a distinção entre esses dois eventos, por exemplo, é necessária para determinar o tipo de manutenção a ser aplicada na linha).

Para tanto, necessita-se da descrição primeiramente dos PE's de uma LT usualmente determinados através dos aspectos construtivos e distâncias envolvidas. Portanto os valores das RLC's são obtidos teoricamente considerando como fatores relevantes a disposição dos condutores e a geometria das torres e ainda as dimensões dos próprios cabos. O Modelo Matemático desenvolvido inclui o estudo dos efeitos das variáveis ambientais, sobre os PE's, e conseqüentemente, a influência das VA's sobre as VE's, Tensão e Corrente elétricas, a fim de se ter um modelo que represente uma linha de transmissão; de modo mais preciso e detalhado, isto é, que leve em conta as variáveis ambientais. Será visto a seguir a indutância.

3.1 INDUTÂNCIA

A indutância gerada em uma linha de transmissão é proveniente do campo magnético associado a esta linha (Fuchs, 1979, p.281). Pode-se entender melhor a indutância em uma linha de transmissão fazendo uso da expressão:

$$L = \frac{N^2 \mu s_n}{l_b} \quad (3.1)$$

Em que

L - Indutância

N - Número de espiras

μ - Permeabilidade Magnética

s_n - Área da Secção Transversal do núcleo

l_b - Comprimento da bobina em metros

Por outro lado, é bom lembrar que a indutância através de sua permeabilidade magnética, depende do meio magnetizador em que a “bobina” estiver inserida.

A figura 3.1, a seguir, é de um transformador, onde as bobinas são acopladas por um núcleo de ferro, e é através dele que o fluxo magnético flui, neste caso, a constante de permeabilidade, tem um fator grande na indutância.

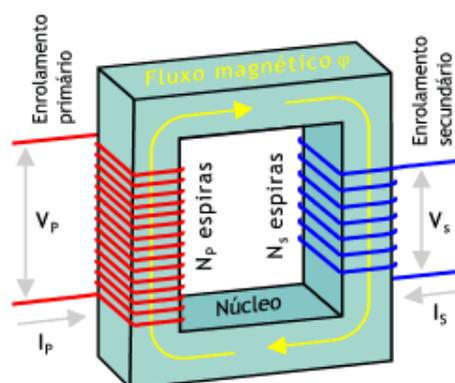


Figura 3.1 - Transmissão de energia de duas bobinas por indução através de um núcleo de ferro.

Fonte: elaboração própria

No entanto, pode-se imaginar essas duas bobinas, unidas por um núcleo não magnetizável, como por exemplo, o ar. Tem-se ainda

$$-\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \text{ ou ainda } \Phi_B = L \cdot i$$

Como o fluxo magnético é diretamente proporcional as correntes que atravessam as bobinas, $\Phi_B = Li$, seria necessário uma corrente fora do normal, isto é muito grande, ou pelo menos fora dos padrões de uma linha de transmissão normal.

Na figura 3.2, é possível observar a transmissão de energia de duas bobinas por indução através de um “núcleo de ar”, que sem um núcleo magnetizável (o ar, neste caso) não existe fluxo magnético entre as duas bobinas, com isso, a indutância é igual a zero.

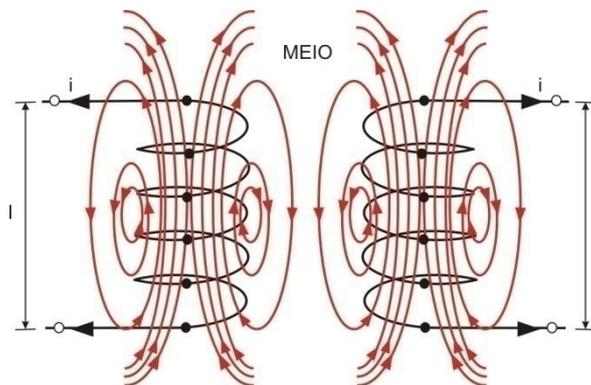


Figura 3.2 - Transmissão de energia de duas bobinas por indução através de um núcleo de ar
Fonte: elaboração própria

Conclui-se então, que para as variáveis ambientais estudadas: T_{amb} , U_{meio} , D_{vent} e V_{vent} , e ainda, a R_{sol} , estas não influenciam para alteração na indutância da linha. Por esse motivo o estudo, se restringiu apenas na investigação do comportamento dos PE's Resistência elétrica e Capacitância, sob os efeitos das variáveis ambientais.

3.2 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Inicialmente serão descritas as principais causas ambientais que recaem sobre a Resistência elétrica. Os fenômenos descritos aqui estão diretamente ligados com o comportamento da temperatura de um cabo em uma LT em relação ao meio que o circunda. O estudo prossegue, verificando a influência da regionalização climatológica na capacidade de

transmissão das linhas aéreas. Esta influência é verificada através do registro da temperatura do condutor; usada no cálculo da '*ampacidade*', que nada mais é do que a capacidade da linha em transportar energia elétrica, limitada pelo aquecimento dos seus condutores, o qual é devido à corrente elétrica associada à carga alimentada e às condições climatológicas, como T_{amb} , U_{meio} , D_{vent} e V_{vent} , e ainda, a R_{sol} , dentre outras.

Embora muitos trabalhos tenham sido publicados acerca dos limites elétricos de transmissão de energia (WEEDY, 1973; TAVARES, 1999; CAMARGO, 2006), com a influência direta da temperatura ambiente sobre cabos de alta tensão, (STELLA, 1984; WADDICOR; 1964) e, utilizando já uma tecnologia de sensores nos cabos (NOGUEIRA; AZZAM, 2001), para o cálculo da estabilidade em regime permanente e transitório (ARAÚJO; NEVES, 2005), em um grande número de casos essa energia, é fixada pelo aumento de temperatura de vários componentes da linha. Entram neste caso, os elos de interligação de pequeno comprimento onde estabilidade não é fator limitante.

É bom lembrar que a temperatura ambiente, influenciada pela estação do ano é fator determinante no limite térmico de uma LT. A estação do ano influi de modo favorável, quando coincide a maior demanda de energia elétrica com os dias frios de inverno. As limitações térmicas para capacidade de transmissão de energia elétrica são rigidamente fixadas, mas devem ser determinadas, de modo a se obter a utilização ótima da instalação. (WEEDY, 1973).

Segundo Nascimento et.al. (1999, p. 03), a ampacidade é uma função do perfil térmico dos condutores calculado na fase de projeto da linha, que está relacionada a três fatores fundamentais:

- i) Distância do condutor ao solo – segurança operacional, dependente do peso e da dilatação térmica do material do condutor, que é definida em normalização técnica pertinente [NBR 5422, 1985];
- ii) Energia a ser transportada ou carga admissível da linha, e
- iii) Limite térmico máximo do condutor, isto é, preservar a vida útil devido à elevação excessiva do perfil de temperatura do condutor.

A partir desses três fatores, é possível selecionar um condutor com perfil térmico que atenda à carga requerida no projeto da linha. Com o cálculo do perfil térmico do condutor

é definida a corrente elétrica associada a uma temperatura de operação, e conseqüentemente, definida a ampacidade da linha. A elevação de temperatura dos condutores das linhas aéreas pode ser calculada em regime permanente e em regime dinâmico. Os detalhes desta formulação podem ser encontrados em Anjan (2000).

Para Fernandes (2001) há duas fontes de calor, bem específicas, a saber: a perda através de I^2R e o calor absorvido do sol, processo de transmissão de calor por irradiação, além do resfriamento ocasionado por outra forma de transmissão de calor, a convecção do ar, processos esses que serão descritos a seguir.

3.2.1 Processo de Transmissão de Calor por Convecção em Cabos de uma Linha de Transmissão

Segundo Bejan (1996, p.180) o Processo de Transmissão de Calor por Convecção (PTCC) está associado aos escoamentos de fluidos, e se distingue das configurações de condução, devido o meio em que ocorre a transferência de calor está em movimento, em tais casos a transferência de calor é realizada por convecção. Pode-se dizer que a condução é o mecanismo de transferência de calor que subsiste quando não existe mais o movimento no meio em que ocorria a transferência de calor por convecção, com isso, a convecção é a designação utilizada para o mecanismo de transferência de calor por ação de um fluido.

A convecção pode ser classificada como natural ou forçada, dependendo do que é do que está na origem do escoamento. Na convecção forçada, o fluido é forçado a escoar-se sobre uma superfície ou no interior de uma tubagem, por ação de elementos exteriores como um ventilador ou uma bomba, nesta pesquisa o vento faz o papel do elemento exterior. Na convecção natural, ou convecção livre, o fluido escoar naturalmente (sem a presença de um *dispositivo* externo) porque o movimento é provocado pelos efeitos do empuxo. Este efeito atua distribuídamente no fluido e está associado com a tendência geral dos fluidos expandirem (ou, em casos especiais, contraírem) quando aquecidos a pressão constante

Foi estudado tanto o PTCC forçada quanto a natural, no entanto apenas os do tipo convecção externa, mais exatamente as que ocorrem na configuração de Escoamento

Perpendicular a um Cilindro (para a convecção forçada) e a configuração Cilindro Vertical (para a convecção natural), que serão respectivamente vistos a seguir.

Considere a transferência de calor entre um cilindro longo e um escoamento que apresenta velocidade e temperatura tendendo ao infinito, respectivamente, iguais a U_∞ e T_w , admita que o eixo do cilindro é perpendicular a velocidade tendendo ao infinito de acordo com a figura 3.3, e que a temperatura superficial do cilindro é uniforme e igual a T_p .

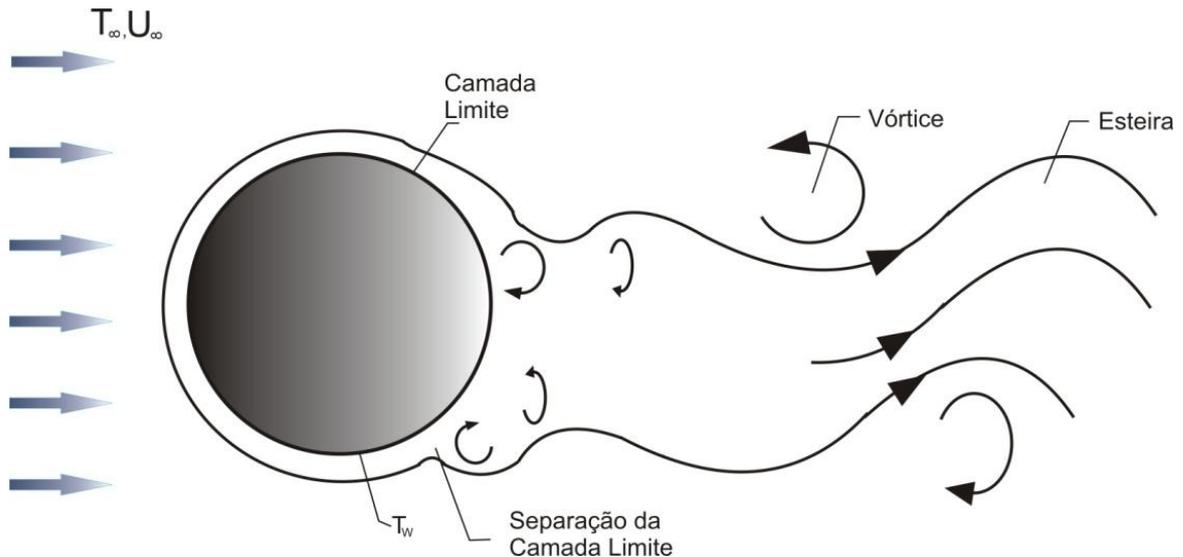


Figura 3.3 - Escoamento cruzado num cilindro (ou esfera)

Fonte: (BEJAN, 1996, p.214)

É instintivo, se perceber uma troca de calor por convecção entre o cilindro e o escoamento. Para esta pesquisa os cilindros serão os cabos de uma LT, que estão sujeitos a escoamentos de ar (vento) neles. Porém, um cabo ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) não tem uma superfície cilíndrica perfeitamente lisa. O encordoamento leva a uma superfície rugosa, ou seja, ela apresenta protuberâncias ondulantes. Para fins de transferência de calor por convecção forçada, essa rugosidade pode melhorar em muito o coeficiente de Reynolds² e conseqüentemente a transferência de calor. A partir de certo número de Reynolds, o efeito da rugosidade fica muito acentuado em relação à superfície cilíndrica lisa. Abaixo desse número, a rugosidade melhora o coeficiente de Reynolds em

² O coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. É utilizado, por exemplo, em projetos de tubulações industriais e asas de aviões. O seu nome vem de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro hidráulico irlandês.

apenas cerca de 10% com relação ao cilindro liso, segundo Morgan (1991), o número de Reynolds crítico para cabos desse tipo é :

$$Re_D = 1500 \frac{0,035}{RR} \quad (3.2)$$

Em que RR – é a rugosidade, que é dada por

$$RR = \frac{d}{2(D - d)} \quad (3.3)$$

Sendo:

D - Diâmetro nominal do cabo (m)

d - Diâmetro dos fios que compõe o cabo (m)

É importante atentar que a Re_D depende unicamente da rugosidade.

O escoamento perpendicular a um cilindro, com seus devidos ajustes, é a melhor aproximação utilizada para cabos de linhas aéreas, (*Handbook Aluminum Electrical*,1979, p.42), o método simplificado utilizado para elaboração de curvas de ampacidade, sendo uma das referências mais aceitas para projetos de linhas aéreas de transmissão Labegalini et al.(1992), e aqui já transposto para o Sistema Internacial (SI) de medidas, para o PTCC forçada é dado por

$$q_{CF} = 945,6(t - t_0) \cdot 10^{-4} 0,32 + 0,43(45946,8 \cdot D \cdot V)^{0,52} \quad (3.4)$$

q_{CF} - Quantidade de calor transferida por convecção forçada (W/m)

t_0 - Temperatura do ambiente ($^{\circ}C$)

t - Temperatura do cabo ($^{\circ}C$)

D - Diâmetro nominal do cabo (m)

V - Velocidade do vento (m/s)

Além da convecção forçada o cabo também pode sofrer resfriamento por convecção natural.

No PTCC natural, existem também muitas configurações em que o fluido que circunda o objeto que está sendo aquecido, ou resfriado, no entanto a descrição por agora será

apenas da configurações PTCC natural de cilindro horizontal isotérmico. Na convecção natural em cilindros horizontais isotérmicos, é utilizado o diâmetro do cilindro (que é uma superfície curva) como a dimensão característica para o escoamento (similar a convecção em superfícies verticais), surgindo assim as relações de transferência de calor similares a de uma superfície vertical (CHURCHILL, 1977). É o que mostra a figura 3.4, seguinte.

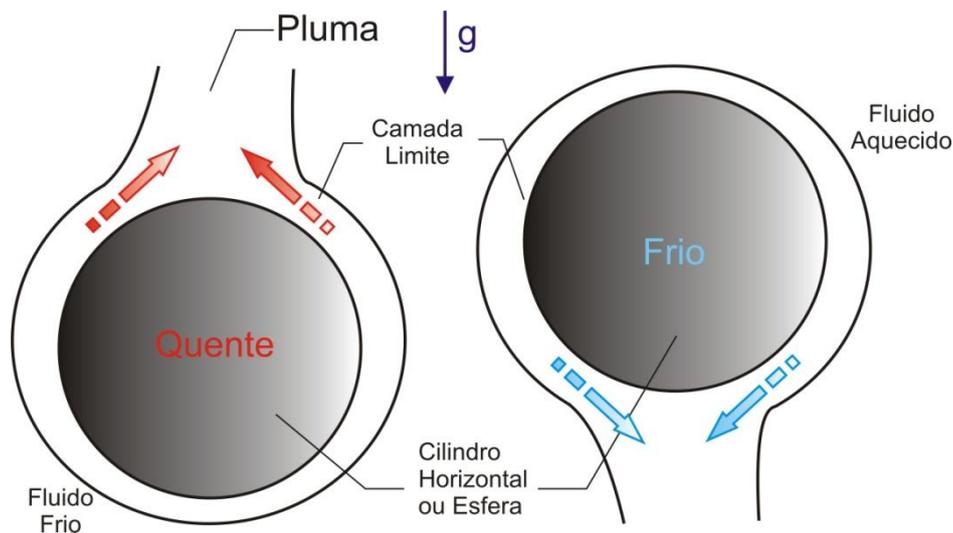


Figura 3.4 - Cilindro Horizontal, ou esfera, imerso num fluido que apresenta temperatura diferente da temperatura superficial do corpo.

Fonte: (BEJAN,1996, p.294)

De acordo com a obra (*Handbook Aluminum Eletrical*, 1979) a melhor aproximação, e mais utilizada em projetos é dada por

$$q_{CN} = 0,0205 \cdot \rho f^{0,5} \cdot D^{0,75} \cdot (T_c - T_a)^{1,25} \quad (3.5)$$

q_{CN} - Quantidade de calor transferida por convecção forçada (W/m)

T_0 - Temperatura absoluta do ambiente (K)

T - Temperatura absoluta do cabo (K)

D - Diâmetro nominal do cabo (m)

f_r - Frequencia da rede (Hz)

ρ - Condutibilidade

Pode-se verificar que para o caso específico de uma LT os processos de convecção, pelos quais os cabos passam são de convecção forçada através de um escoamento

perpendicular a um cilindro e convecção natural, com escoamento do cilindro horizontal, como são fenômenos mutuamente dependentes, isto é, existe apenas uma das situações, ou o cabo sofre convecção forçada ou sofre a natural. A norma IEEE 738-1993 (*Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*), recomenda que sejam calculadas ambas as formas de dissipação, sendo adotada a que resultar em maior valor. Já para o processo ou armazenamento de calor, as principais parcelas são provenientes do efeito joule (I^2R) e do 'Processo de Transmissão de Calor por Irradiação'-PTCI. No mecanismo da transferência de calor por irradiação deve-se ressaltar que esta transferência não é local e pode ser realizado sem contato físico direto entre as entidades que apresentam temperaturas diferentes. A transferência líquida de calor que é radiada pode ocorrer mesmo que o espaço entre as duas superfícies esteja totalmente evacuado.

A radiação térmica pode ser encarada como o fluxo de radiação eletromagnética emitido por uma entidade material (corpo sólido, banho de líquido, mistura de gases) devido a temperatura absoluta finita da entidade. A temperatura e a radiação térmica emitida são reflexos do grau de agitação das moléculas do material. A questão fundamental da transferência de calor por radiação pode ser levantada a partir da análise da Figura 3.5, ou seja, qual é a transferência líquida de calor entre os dois corpos (T_1) e (T_2).

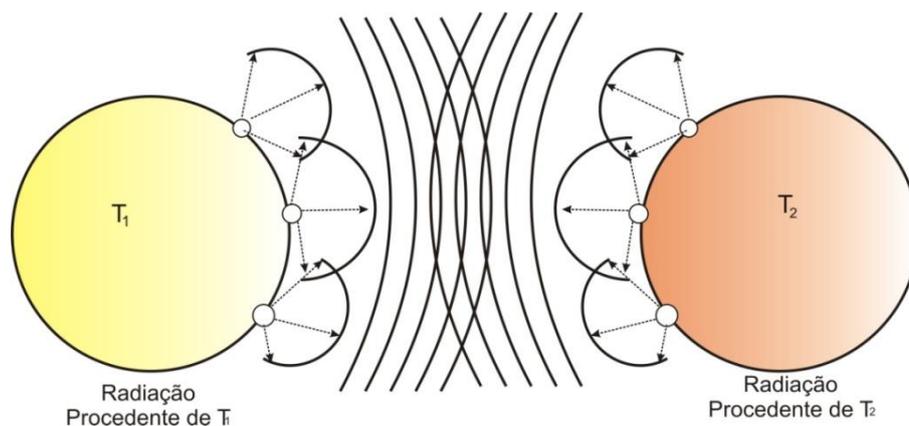


Figura 3.5 - Interação térmica radiativa entre duas entidades que apresentam temperaturas diferentes
 Fonte: (FAIRES, 1966, p. 420)

É possível observar na figura 3.5. que: os dois corpos emitem radiação térmica em todas as direções a que tem acesso. Tais corpos podem ter formatos quaisquer e eles foram desenhados como esferas por simplicidade. De fato, cada ponto (considerado um elemento de área de cada corpo) emite radiação em todas as direções. Apenas uma fração da energia total emitida por T_1 é interceptada e possivelmente absorvida pelo corpo T_2 . Esta fração depende

da forma, tamanho dos dois corpos e também da posição relativa, da condição das superfícies dos corpos (rugosidade, limpeza) e da natureza do ambiente. De modo análogo, apenas uma fração da radiação emitida por T_2 é interceptada e possivelmente absorvida pelo corpo T_1 .

Lebengalini (1992) fornece duas importantes equações para determinação das parcelas de irradiação solar, a absorvida pelo cabo q_{Rs} (em função da latitude - d), e ainda à determinação da irradiação de calor q_{Ic} (energia) externada pelo cabo, são elas:

$$q_{Ic} = 179,2 \times 10^3 \varepsilon \cdot d \cdot \left[\left(\frac{T}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] \quad (3.6)$$

$$q_{Rs} = 204 \cdot d \quad (3.7)$$

Em que:

- q_{Ic} - Quantidade de calor perdida pelo cabo pelo processo de irradiação (W/m)
- q_{Rs} - Quantidade de calor recebida pelo cabo pelo processo de irradiação (W/m)
- ε - Permissividade absoluta do meio
- d - Diâmetro do cabo (m)
- T - Temperatura absoluta do cabo (K)
- T_0 - Temperatura absoluta do ambiente (K)

A equação (3.7) é o valor médio indicativo em climas temperados, enquanto que para a eq (3.6) a permissividade (ε) varia de 0,23 a 0,90, sinalizado pela cor do cabo. Para cabos de alumínio, $\varepsilon \cong 0,5$ é recomendado. (*Handbook Aluminum Electrical*, 1979).

Neste momento pode-se passar para o cálculo do ajuste da resistência elétrica da linha de transmissão.

3.3 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA SOB EFEITO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS PARA O CABO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

As correntes elétricas, ao percorrem os cabos das linhas aéreas de transmissão, provocam perdas de energia, como consequência do efeito Joule. Essa energia se manifesta através da geração de calor, provocando o seu aquecimento, que será tanto maior quanto maior for a

densidade de corrente nos cabos.

Esse problema deverá ser encarado sob dois aspectos: o econômico e o técnico. Sob o ponto de vista econômico é possível identificar para cada linha de transmissão uma densidade de corrente que resulte não nas menores perdas e sim num valor considerado o mais econômico. As máximas temperaturas de cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) para operação segura em regime permanente são fixados entre 70 e 85°C, podendo em contingências curtas, operar com 90°C (LEBENGALINI, 1992).

A capacidade de condução da corrente de um cabo denominada *ampacidade*, é fixada com a corrente permissível no mesmo para que, nas condições ambientais prefixadas, não ultrapasse o valor máximo de temperatura fixado para regime permanente. Para sua determinação é necessário estabelecer alguns parâmetros ambientais de referência como temperatura do ambiente, insolação, velocidade e direção do vento. Verificou-se que cerca de (treze) 13 fatores podem afetar a temperatura de um cabo de linha aérea de transmissão. Alguns são dominantes, outros de influência praticamente insignificante.

Stella (1984, p.49) elucida a respeito. Um método simplificado e bastante divulgado e aproveitado nesta pesquisa por meio do livro “*The Aluminum Association-Aluminum Electrical. Conductor Handbook*” (1979), para a elaboração das curvas de ampacidade e já transposto para o Sistema Internacional (S.I). Um método aceitável para a maioria das aplicações práticas.

Um cabo atinge uma temperatura em regime permanente quando houver equilíbrio entre o calor ganho e o calor perdido pelo cabo. Um cabo ganha calor, principalmente, pelo efeito Joule $q_J = I^2R$ [W/km] e pela radiação solar q_{RS} [W/m] e perde calor por dois mecanismos conhecidos: por irradiação q_{IC} [W/m] e por convecção q_C [W/m]. A equação de equilíbrio será:

$$I^2R + q_{RS} = q_{IC} + q_C \quad (3.8)$$

Da qual obtém-se

$$I = \sqrt{\frac{q_{IC} + q_{CF} - q_{RS}}{R}} \quad (3.9)$$

O estudo feito, nas secções anteriores permite agora através da equação (3.9), o cálculo da ampacidade da linha. É importante notar que na confecção dos projetos da linha é a temperatura máxima que um condutor pode atingir sob ação da corrente na linha em sobreposição às condições ambientais existente, pois desta temperatura dependerá o valor de flexa nos cabos e, conseqüentemente a distância dos condutores ao solo.

Neste caso, inicialmente foi calculado o valor da resistência elétrica para a LT, utilizando a metodologia segundo Correa (2004), para três valores fixos de temperatura. Neste trabalho, foi determinado para as temperaturas de 20°C, 40°C e 70°C. Neste momento, pode-se traçar um gráfico $R \times I$, com os três valores de resistência e três valores de ampacidade, determinados a partir de uma condição ambiental que se deseja. Em seguida é necessário o valor de corrente máxima no cabo, isso é facilmente conseguido, se a linha estiver sendo monitorada, podendo posteriormente fazer uma interpolação de valores entre a corrente que foi monitorada e se determinar a resistência no cabo, como mostra a figura 3.6 seguinte:

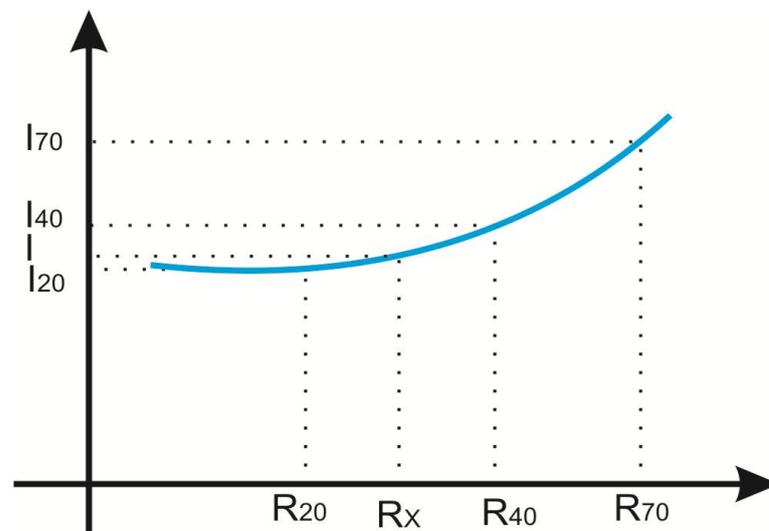


Figura 3.6 – Gráfico da Resistência elétrica versus corrente elétrica, usando os conceito de ampacidade para determinação da corrente elétrica.

Fonte: elaboração própria

Note que o valor desta resistência já contempla o efeito das variáveis ambientais, devido sua dependência de q_{IC} , q_C e q_{RS} . Verificou-se que já existem muitos estudos, sobre trocas de calor entre os corpos em diversas áreas. No entanto, ao que se refere a LT's, apenas é feito o estudo para determinação da ampacidade do cabo para uma estimativa do valor de flexa nos cabos (LEBEGALINI et al., 1992, p. 37), metodologia adotada neste estudo. No

entanto, o cálculo da resistência do cabo por essa metodologia é eficiente, pois além de utilizar aplicações matriciais, ainda consegue-se associar o fator ambiental por meio das equações de quantidade de calor deduzidas (CORREA, 2004). Contudo, para o PE capacitância muito se buscou na literatura, como este parâmetro varia com as modificações ambientais, ou um método para seu cálculo que contemplasse mais que dimensões e disposições geométricas na LT. Em diversos trabalhos e literaturas (FUCHS, 1977; MONTICELLI; GARCIA, 2003) e (ARAÚJO; NEVES, 2005) só se encontram relações geométricas para determinação da capacitância. Gomes Jr (2007) desenvolveu um método de cálculo para capacitância da linha por Elementos finitos, algo que fugiu da literatura citada, no entanto, mesmo este novo método para o cálculo da capacitância, refere-se apenas as condições de formato e material aos quais os isoladores da LT são fabricados, além do potencial elétrico que passa por eles. Pouco ou quase nada se tem registrado; para o cálculo da capacitância em uma LT sob efeitos das variáveis ambientais. Nesse caso, houve a necessidade do desenvolvimento de um experimento que permitisse verificar o comportamento da capacitância com as VA's. Isto será visto no capítulo 04.

CAPÍTULO 4.0 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Diferentemente do PE resistência elétrica, o estudo da capacitância, no que diz respeito à sua dependência com as variáveis ambientais, pouco ou nada se fala na literatura. Jeffers (1998) através de um artigo intitulado *Electric and Magnetic Fields and Ecology* faz referência aos supostos efeitos da capacitância ao meio ambiente. Araújo e Neves (2005) determinam um cálculo para capacitância para transitórios eletromagnéticos, mas todas estas abordagens mostram a linha como algo imutável, fixo e que seu comportamento apenas dependem de sua estrutura dimensional e geométrica.

Nos dias atuais, em que a quantidade de energia transmitida para as regiões é pelo menos cinco vezes maior e a quantidade de energia elétrica consumida por habitante dessas regiões e pelo menos três vezes maior; conceber uma LT como algo imutável e rígido é no mínimo sinônimo de prejuízo financeiro para uma empresa. Com isso, o prosseguimento do desenvolvimento do modelo matemático sugerido exige que se conheça uma dependência da capacitância com a variação das VA's. Daí a necessidade de se confeccionar um arranjo experimental que possibilite deduzir algumas relações entre capacitância e VA's

As perdas em LT's podem ser perdas ôhmicas, perdas magnéticas e perdas dielétricas, no caso da capacitância essas são perdas dielétricas e estão relacionadas com a tensão da linha e com sua capacitância (C), daí a necessidade do desenvolvimento de uma **metodologia experimental** adequada para obtenção desses valores de capacitância para LT com um enfoque diferente do atual, isto é, supondo que este parâmetro da linha pode variar com as condições de operação da LT, levando-se em conta as variáveis ambientais, pois do contrário uma LT que foi montada no norte da Europa, fisicamente semelhante a outra construída, por exemplo, no Brasil, especificamente na região norte, deveriam apresentar os mesmos valores de capacitância, o que seguramente é uma inverdade. A determinação das perdas é importante, pois através dela, pode-se verificar a eficiência da LT, além de fornecer dados para verificar as condições de isolamento da LT.

4.1 TEORIA SOBRE O EXPERIMENTO

Um *capacitor* é um dispositivo utilizado para armazenar energia, na forma de energia potencial, contida em campos elétricos. Os capacitores têm várias aplicações além de servirem como armazenadores de energia. Eles constituem elementos importantes nos circuitos elétricos de transmissores e de receptores de rádio e televisão.

A geometria escolhida, por se perceber, que melhor soluciona o problema da simulação experimental para determinação do comportamento da capacitância, segundo variações das variáveis ambientais (T_{amb} , U_{meio} , D_{vent} e V_{vent} , e ainda, a R_{sol}), é a cilíndrica. Por isso é necessário um estudo desse tipo de capacitor.

A Figura 4.1 mostra a seção transversal de um capacitor cilíndrico de comprimento l_c , formado por dois cilindros *coaxiais* de raios R_1 e R_2 . Supom-se que $l_c \gg R_1$, de modo que pode-se desprezar a "distorção" das linhas de força do campo elétrico que ocorre nas extremidades dos cilindros, o chamado *efeito de bordas*. Cada placa contém uma carga de módulo Q . O potencial elétrico na placa externa designado aqui como V_1 , enquanto a placa interna encontra-se aterrada, isto é, um potencial nulo ($V = 0$).

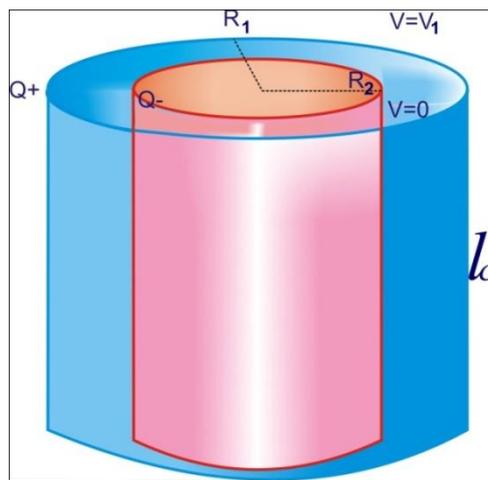


Figura 4.1-Capacitor cilíndrico com raios R_1 e R_2 . A placa interna encontra-se aterrada enquanto a externa está a um potencial V_1 . As placas têm carga Q de sinais opostos.

Fonte: elaboração própria

A fim de se calcular a capacitância, primeiramente, escreve-se a Lei de Gauss,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

Em que \vec{E} é o campo elétrico, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, Q_{int} é a carga, contida dentro de uma superfície gaussiana $d\vec{s}$ e a integral é calculada sobre esta. Para o capacitor cilíndrico, as superfícies equipotenciais, na figura 4.1, são cilindros concêntricos, em que as linhas de força são retas radiais.

Mas sabe-se que

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4.2)$$

Em que V é o potencial elétrico. Desta relação tem-se,

$$V_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l_c} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (4.3)$$

Mas, (Bastos, 2008) como o potencial elétrico em qualquer seção transversal entre as placas é dado por:

$$V = \frac{V_1}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \ln \frac{r}{R_2} \quad (4.4)$$

Substituindo a relação (4.5) em (4.4), obtém-se

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (4.5)$$

Admitindo que as placas sejam homogêneas ao longo do comprimento do capacitor, projeta-se o capacitor no plano definindo um C' , denominado capacitância por unidade de comprimento, dado por:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (4.6)$$

A partir da equação (4.6), a primeira vista nota-se que a capacitância por unidade de comprimento de um capacitor cilíndrico concêntrico depende somente dos fatores geométricos, Faraday descobriu que a capacitância aumentava de um fator numérico, devido ao que ele chamou de *dielétrica*³. Ele investigou que quando o espaço entre as placas de um capacitor está completamente preenchido com um material dielétrico, a capacitância fica aumentada por um fator k_d , chamado *constante dielétrica*⁴, que é característica do material (GILBERT, 1982, p.66). Na verdade, a constante dielétrica (também chamada permissividade relativa) é o quociente entre a permissividade absoluta do material dielétrico e a permissividade do vácuo. Numa região completamente preenchida por um dielétrico, todas as equações eletrostáticas contendo ϵ_0 devem ser modificadas substituindo-se ϵ_0 por $k_d\epsilon_0$, como a constante é a divisão entre dois fatores com mesma unidade ela é adimensional.

$$k_d = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4.7)$$

Em que

k_d - Constante dielétrica ou permissividade relativa

ϵ - Permissividade absoluta do meio

ϵ_0 - Permissividade do vácuo

Neste caso, as equações 4.5 e 4.6 sofrem pequenas, mas importantes, mudanças: E novamente admitindo que as placas sejam homogêneas ao longo do comprimento do capacitor, pode-se definir um C'' , denominado capacitância por unidade de comprimento, dado por:

$$C = 2\pi k_d \epsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (4.8)$$

³ Dielétrica é um termo derivado de dielétrico, isto é um material isolante.

⁴ Constante dielétrica é outro termo para permissividade relativa.

$$C'' = \frac{2\pi k_d \varepsilon_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (4.9)$$

A partir da próxima secção desse capítulo, é desenvolvida uma metodologia experimental usando um protótipo de uma cuba que funcionará como um ambiente controlado a fim de se efetuar a medição da capacitância, considerando as influências das variáveis ambientais. A finalidade é estender os resultados obtidos no experimento para as linhas de transmissão.

4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

As principais condições obedecidas para a confecção da cuba são:

1. A geometria Cilíndrica foi à escolhida para o capacitor, para minimizar o efeito de capacitâncias espúrias;
2. O comprimento do Cilindro mais externo e muito maior que o raio deste, para que se possa desprezar a distorção das linhas de força do campo elétrico (efeito das Bordas), além
3. A carcaça esta devidamente aterrada, para que exista um auto-isolamento do capacitor (HAYT JR, 1983, p. 329).

A cuba para ensaios de medição experimental da capacitância levando em considerações as variações ambientais é constituída dos seguintes módulos: Controle de Temperatura, Controle de Velocidade do Vento, Controle de Umidade e Medições das grandezas envolvidas no processo e Módulo Capacitor Coaxial.

O diagrama de blocos representativo da cuba está ilustrado na figura 4.2, a seguir.

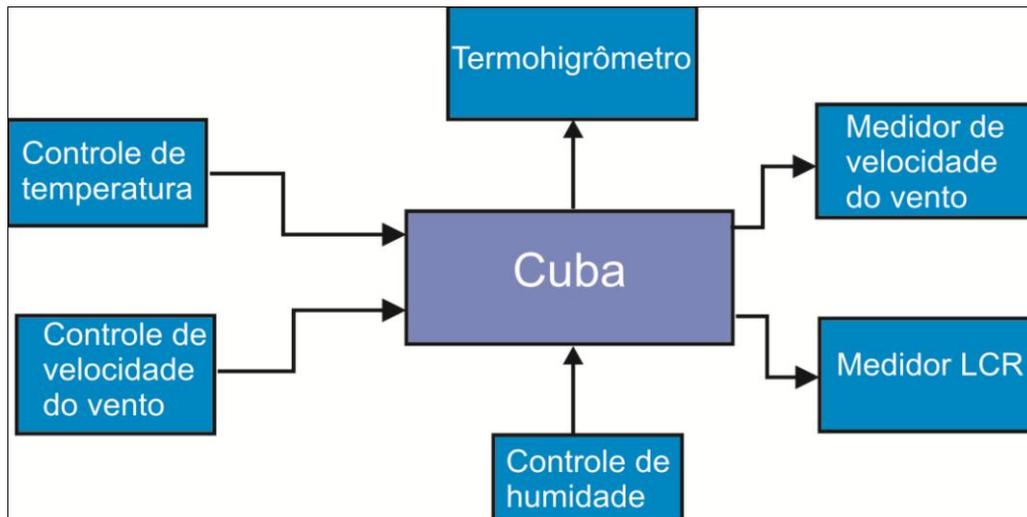


Figura 4. 2 - diagrama de blocos representativo da cuba.

Fonte: elaboração própria

Como já foi dito, o arranjo é um capacitor cilíndrico (coaxial) e um resistor colocados em série, alimentados por um transformador variável (0-115V), e um transformador elevador de tensão (0-15kV); que são colocados, em paralelo, figura 4.3 mostra o circuito montado, em que V_1 corresponde ao transformador variável, V_3 é o transformador elevador de tensão, V_2 representa a queda de tensão no resistor de $10M\Omega$ (R_{10M}) e C é o capacitor cilíndrico, V_{ar} é um anemômetro que possui um termômetro acoplado, enquanto que W é um termo-higrômetro, que serão melhores descritos mais à frente.

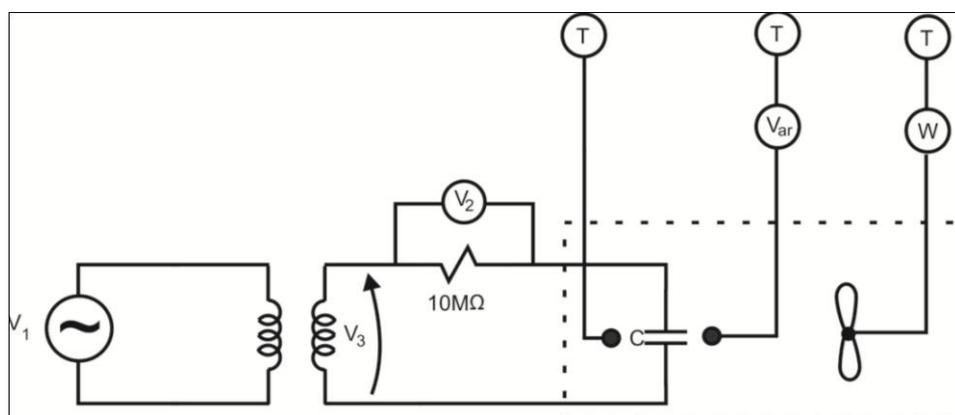


Figura 4. 3 Circuito equivalente do arranjo experimental

Fonte: elaboração própria

As equações de 4.10 à 4.14 auxiliam na determinação dos valores desejados

$$V_3 = V_1/0,007667 \quad (4.10)$$

O cálculo da corrente que passa pelo capacitor (I_c), de acordo com Figura 4.3, é dada por

$$I_c = \frac{V_2}{R} \quad (4.11)$$

Para determinar da impedância Z , se dá

$$Z = \frac{V_3}{I_c} \quad (4.12)$$

E finalmente para a determinação da capacitância, no experimento

$$C = \frac{1}{2\pi f \sqrt{Z^2 - R^2}} \quad (4.13)$$

O valor de permissividade relativa é feito teoricamente por meio da manipulação da equação (4.8)

$$k_d = \frac{C \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{2\pi\epsilon_0 l_c} \quad (4.14)$$

Um modelo específico de folha para ensaios, deste experimento, utilizada para coleta de dados pode ser visto no apêndice 3.

A cuba foi confeccionada, em acrílico, devido este material ser um excelente isolante térmico e elétrico, além de permitir acompanhar visualmente todos os fenômenos possíveis a olho nu, por sua condição de transparência. No entanto, visto que sobre o experimento recairia a utilização de alta tensão (15 kV), todo o aparato foi devidamente isolado, com componentes apropriados, por exemplo, isoladores específicos que suportam tal tensão, barras de cobre chatas, com dimensões apropriadas, além de um banho de prata nos

cilindros do capacitor para melhor condução. A relação entre a tensão V_1 na entrada do transformador que eleva a tensão para V_3 é de 1:130,43, de acordo com o fabricante, o que foi confirmado experimentalmente. A figura 4.4, a seguir, mostra o aparato experimental utilizado para levantamento dos dados para se traçar as curvas características da permissividade. Pode-se notar na parte superior o termo-higrômetro e o anemômetro, responsáveis pela monitoração dos valores de umidade relativa do meio e de velocidade do vento, respectivamente.

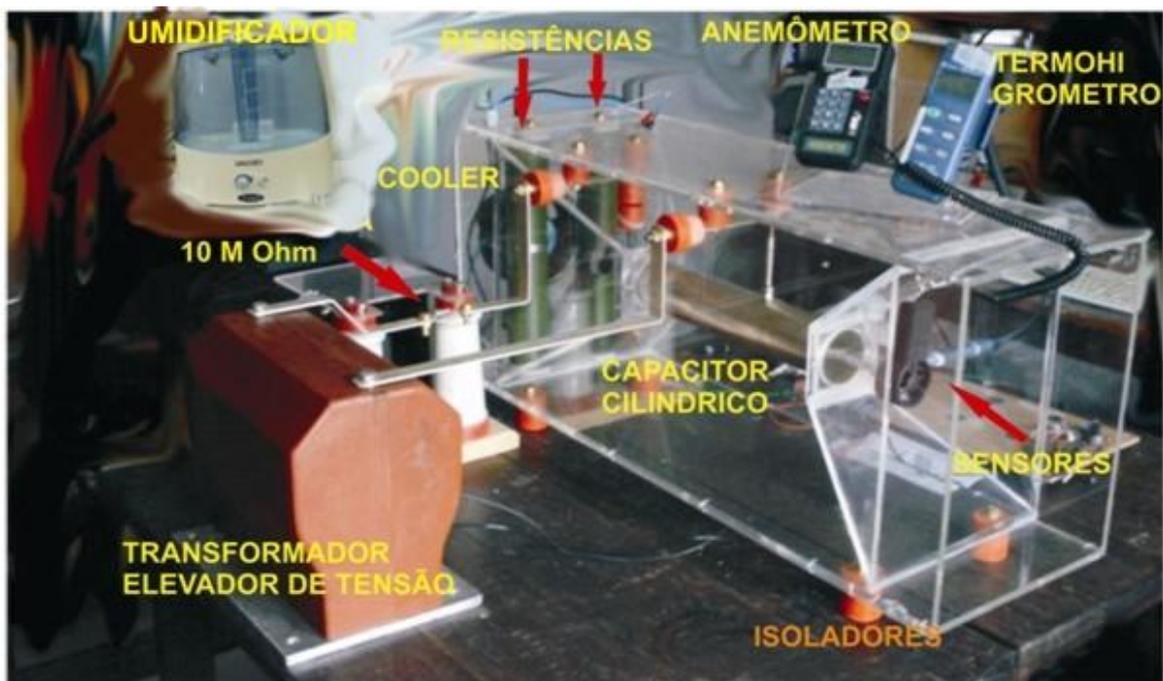


Figura 4.4 – Cuba de ensaios (equipamentos e transformador elevador de tensão)

A figura 4.4 também ilustra o transformador utilizado para se elevar a tensão, aplicada na cuba em até 15 kV, os equipamentos utilizados para medição das variáveis ambientais. Ainda é possível notar o isolamento da cuba, os isoladores em laranja foram confeccionados para suportarem uma tensão de até 30 kV.

Na figura 4.5 é possível localizar os sensores utilizados pelo anemômetro e termohigromêtro, responsáveis respectivamente para medição da velocidade do vento e da umidade relativa do meio.

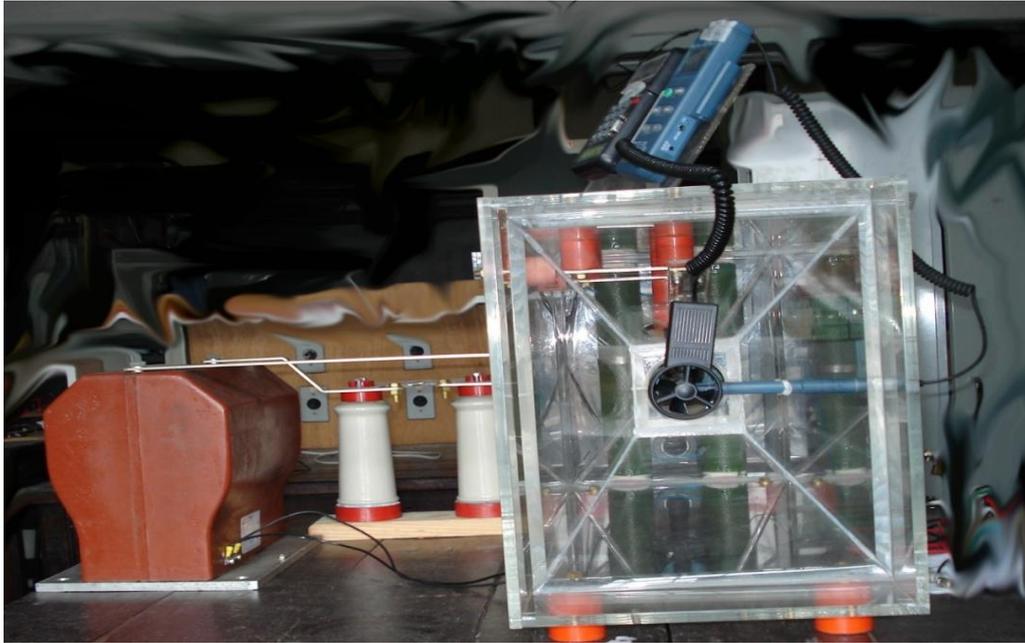


Figura 4.5 - Vista lateral esquerda da cuba, em que se encontra o sensor para medição da velocidade do vento, e da umidade relativa do ar.

Pode-se observar na figura 4.6, a seguir, o umidificador de ar, responsável por simular a variável ambiental, umidade relativa do ar, o *cooler* responsável pela velocidade do vento e as resistências (em verde) responsáveis pela temperatura ambiente.



Figura 4.6 – Vista lateral direita, em que se encontram os simuladores de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Na figura 4.6, acima, também pode ser visto a resistência $10M\Omega$ (R_{10M}), a qual está associada em série com o capacitor, conforme foi descrito na figura 4.5.

4.2.1 Cálculos Realizados com o Arranjo Experimental

Como já foi expresso na equação (4.14), pode-se facilmente determinar o valor da constante dielétrica k_d , que caracteriza o meio em que as placas cilíndricas estão imersas. É importante lembrar que os valores de capacitância serão calculados após a coleta dos dados, haja vista que os valores de R_1 , R_2 , ϵ_0 e L já são conhecidos.

O primeiro procedimento é o de estipular valores iniciais para o arranjo. Neste caso, ele foi colocado à $25^\circ C$, temperatura ambiente medida, pressão igual a 1 atm, a umidade relativa do ar igual a 50%, velocidade do vento inicialmente igual a zero, e o dielétrico entre os cilindros é o ar. Já com relação aos valores das variáveis elétricas aplicadas no experimento, foi aplicado uma tensão que varia entre 0V e 15 kV na entrada do circuito da cuba (saída do transformador elevador de tensão), já nos terminais do capacitor algo, entre 0V e 10 kV, devido o capacitor estar associado em série com um resistor, por eles passa uma corrente da ordem de micro Amper (μA).

Neste caso pode-se determinar analiticamente o valor da constante dielétrica. Utilizando a equação (4.9) para os seguintes valores:

$$L = 40 \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8,854187 \text{ nF/m}$$

$$D_{\text{externo}} = 7,3 \text{ cm}$$

$$D_{\text{interno}} = 1,22 \text{ cm}$$

Encontra-se o valor de

$$C = 12,446009 \times 10^{-9} \tag{4.15}$$

Verifica-se facilmente a proximidade do valor determinado para a capacitância na eq. (4.15) com a média determinada no experimento através da tabela 4.1. O que valida e dá credibilidade ao experimento.

Tabela 4.1 – intervalo de valores da Capacitância determinados experimentalmente

Valor \ Vas	Temperatura Ambiente (T_{amb})	Umidade Relativa do Ar (U_{ar})
Valor Máximo	14,3818 nF	14,256 nF
Valor Mínimo	11,6015 nF	13,157 nF

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa.

Após a aferição do Arranjo, segue-se a descrição do comportamento da constante dielétrica em função das VA's simuladas, segundo o arranjo experimental.

4.3 COMPORTAMENTO DA CONSTANTE DIELETRICA MEDIANTE A VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes ao comportamento da permissividade relativa do meio com a temperatura e em seguida o comportamento em função da umidade relativa do ar e, finalmente em função da velocidade do vento. Tendo como resultado principal as equações que descrevem como se comporta a permissividade relativa do meio, com suas respectivas variáveis ambientais.

Todos os gráficos e tabelas a seguir, foram montados ao longo do estudo.

4.3.1 Temperatura

Inicialmente variou-se o valor de tensão dentro da cuba em 15 (quinze valores distintos) para uma mesma temperatura, primeiramente 36°C, mantendo os valores das demais variáveis ambientais (Umidade Relativa do ar e a Velocidade do Vento) fixos, foram calculados 15 (quinze) valores da permissividade relativa do ar. Em seguida variou-se o valor da temperatura para 41°C e novamente foi variado para os mesmos 15 (valores) de tensão anteriores dentro da cuba, resultando em mais 15 (quinze) valores da permissividade relativa do ar, e este procedimento foi repetido para as temperaturas de 46°C, 56°C, 66°C, 77°C e 83°C resultando em 105 (cento e cinco) valores de permissividade relativas do ar, a partir destes dados pôde-se inferir sobre o comportamento da permissividade elétrica, em função da temperatura, como ilustrado pela da tabela 4.2, a seguir:

Tabela 4 .2 – valores para constante dielétrica e respectivas Temperaturas Ambiente

	T 36°C	T 41°C	T 46°C	T 56°C	T 66°C	T 77°C	T 83°C
5V	1,031263	1,014900	0,998452	1,052300	1,106217	1,186100	1,229672
10V	1,003373	0,991500	0,979613	1,053900	1,128101	1,188700	1,221769
15V	0,992472	0,981200	0,970021	1,042400	1,114837	1,180200	1,215861
20V	0,981641	0,973700	0,96581	1,039600	1,113488	1,170700	1,201907
25V	0,966821	0,960300	0,953832	1,031000	1,108071	1,163900	1,194279
30V	0,953003	0,951000	0,949087	1,026000	1,102898	1,155600	1,18434
35V	0,947112	0,944200	0,941276	1,019200	1,097223	1,150200	1,179049
40V	0,936949	0,935800	0,934608	1,004900	1,075105	1,136700	1,170292
45V	0,934672	0,933800	0,93285	1,007300	1,081732	1,135700	1,165121
50V	0,933795	0,933200	0,932659	1,007700	1,082718	1,127300	1,151608
55V	0,934768	0,933700	0,932642	1,005100	1,077586	1,119700	1,142704
60V	0,92985	0,931900	0,934023	1,004500	1,075064	1,115900	1,138099
65V	0,921589	0,927100	0,932674	1,001600	1,070443	1,107700	1,127949
70V	0,920508	0,927700	0,934859	0,992100	1,049408	1,093900	1,118208
75V	0,922697	0,928300	0,933943	0,990100	1,046179	1,088000	1,110819

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

A tabela 4.2 (anterior) possibilitou a confecção do gráfico representado pela figura 4.7, que descreve o comportamento da permissividade com a tensão elétrica aplicada.

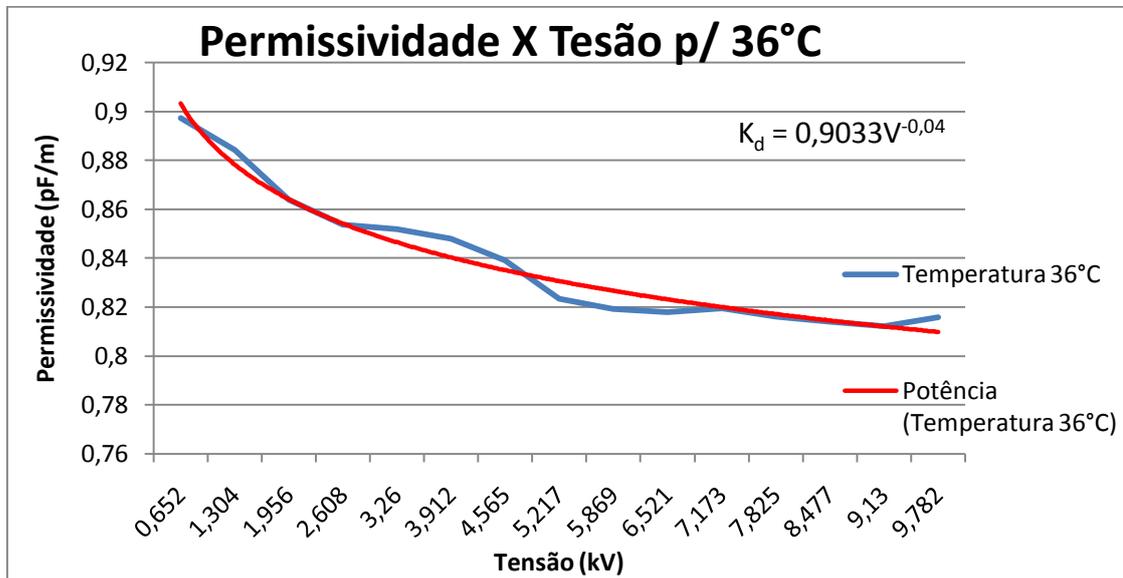


Figura 4.7 - Comportamento entre a permissividade relativa e a tensão aplicada no capacitor, sob uma temperatura de 36°C

Fonte: elaborado ao longo da pesquisa

A equação $k_d = 0,9033V^{-0,04}$ é a equação que melhor aproxima os dados, através de uma exponencial (potência). a figura 4.7, mostra um comportamento exponencial entre a tensão e a permissividade para esta temperatura (36°C), especificamente para esta temperatura, nota-se que ainda nada se pode inferir a respeito do comportamento da temperatura com a permissividade elétrica.

No entanto ao repetir este procedimento para temperaturas diferentes, descritas na tabela 4.2, neste caso para as temperaturas de 36°C, 41°C, 46°C, 56°C, 66°C, 77°C e 83°C, é produzido um gráfico de superfície, ao qual já se podem fazer algumas inferências sobre o comportamento da permissividade com a temperatura (figura 4.8, a seguir)

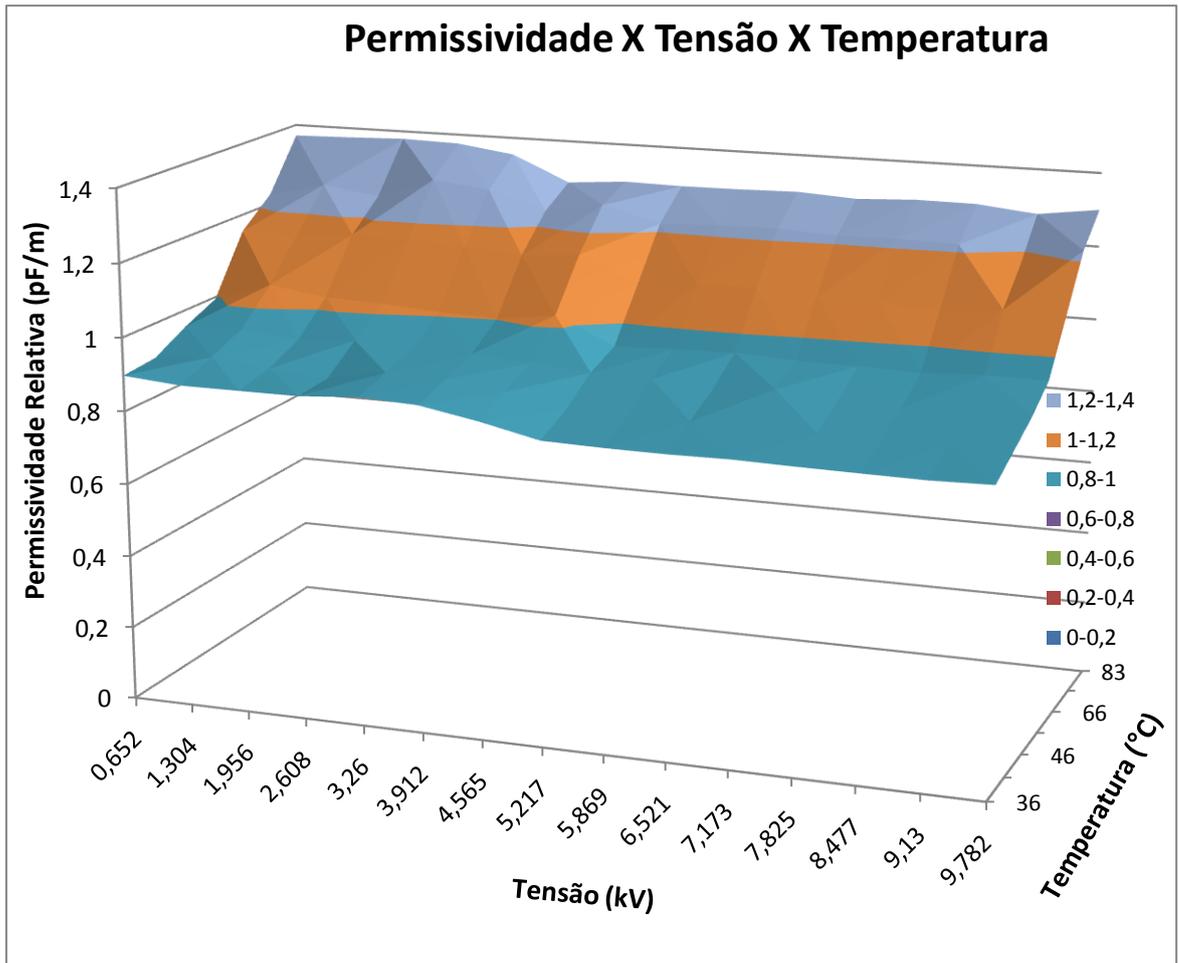


Figura 4.8 - Comportamento da permissividade elétrica conforme variação de temperatura e a tensão.

Fonte: elaborado ao longo da pesquisa

A figura 4.8 é um gráfico em superfície que mostra o comportamento entre as variáveis, tensão elétrica, permissividade e temperatura, representado pelas sete séries (36°C, 41°C, 46°C, 56°C, 66°C, 77°C e 83°C), respectivamente. No entanto o que mais interessa para a pesquisa é especificamente o comportamento da temperatura com a permissividade.

Isso pode ser visualizado com uma rotação de 90° no eixo z do gráfico acima (figura 4.8). Pode-se notar uma boa aproximação da curva por uma função quadrática, essa figura 4.9, a seguir, é uma das mais importantes na pesquisa, é por meio dela que se infere o comportamento da permissividade relativa (constante dielétrica) com a temperatura, segundo a experimentação.

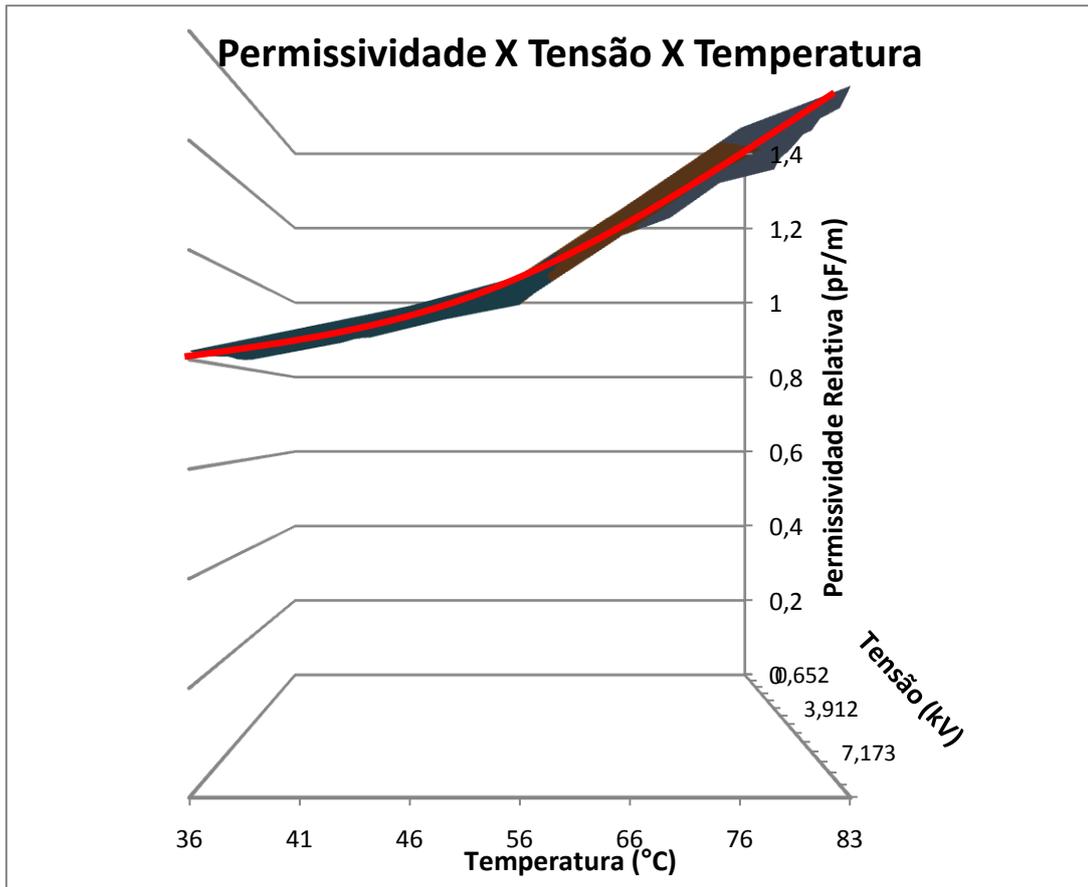


Figura 4.9 - Comportamento da permissividade elétrica com a variação de temperatura

Fonte: elaborado ao longo pesquisa

A equação que mais se aproxima dos dados é

$$k_d(T_{amb}) = 5 \times 10^{-5} T_{amb}^2 + 62 \times 10^{-4} T_{amb} + 0,51354 \quad (4.16)$$

Da mesma forma foi feita com a corrente elétrica que circula pelo capacitor, em que se confeccionou o gráfico $I \times k_d$.

Por meio do gráfico da figura 4.10, a seguir, nota-se que a corrente elétrica que passa pelo capacitor varia quase que linearmente, como era de se esperar, pois o circuito elétrico formado com a resistência e o capacitor, que uma resistência elétrica e uma reatância capacitiva, que é claro obedecem a lei de ohm.

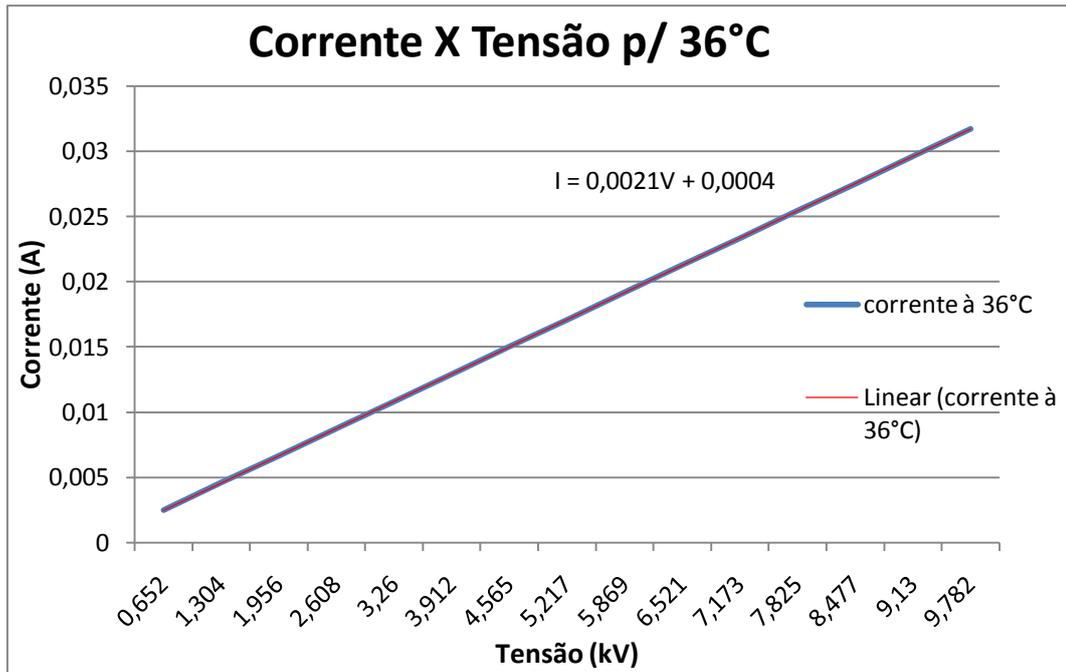


Figura 4.10 - Comportamento linear da corrente elétrica com a tensão elétrica para uma temperatura de 36°C

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

4.3.2 Umidade Relativa do Meio (Ar)

Dando prosseguimento ao ensaio, foi variado o valor da umidade relativa do meio, neste caso o ar (U_{ar}), dentro da cuba no arranjo, contudo, os valores das demais variáveis ambientais foram mantidos (temperatura ambiente - T_{amb} , e velocidade do vento - V_{vent}) fixos, e posteriormente seguindo a descrição da rotina da secção 4.3.1, isto é, análogo à temperatura, tendo sido realizados 15(quinze) medições com umidades relativas do ar distintas correspondentes a: 79%, 83%, 87%, 91% e 95%, ao analisar-se o comportamento da permissividade relativa foi possível confeccionar a tabela 4.3, a seguir

Tabela 4 .3- valores para constante dielétrica e respectivas umidades relativas do ar

	Uar 79%	Uar 83%	Uar 87%	Uar 91%	Uar 95%
5V	1,156217	1,1529	1,149653	1,1288	1,108016
10V	1,144994	1,1402	1,1354	1,1182	1,100983
15V	1,131522	1,1264	1,121322	1,1072	1,093003
20V	1,12862	1,1229	1,117245	1,1013	1,085339
25V	1,120712	1,115	1,109222	1,0952	1,081151
30V	1,112175	1,1069	1,101713	1,0878	1,073803
35V	1,107434	1,103	1,098637	1,0845	1,070347
40V	1,095105	1,0926	1,090193	1,0757	1,061296
45V	1,08879	1,0869	1,084925	1,0706	1,056226
50V	1,080774	1,0775	1,074212	1,0624	1,050518
55V	1,075657	1,0721	1,068575	1,0579	1,047308
60V	1,069347	1,0636	1,057812	1,0488	1,039767
65V	1,059685	1,0514	1,043182	1,0363	1,029381
70V	1,047801	1,043	1,038268	1,0319	1,025535
75V	1,03673	1,0343	1,031801	1,0263	1,020799

De acordo com os dados da tabela 4.3 (acima), foi possível confeccionar o seguinte gráfico representado pela figura 4.11, a seguir.

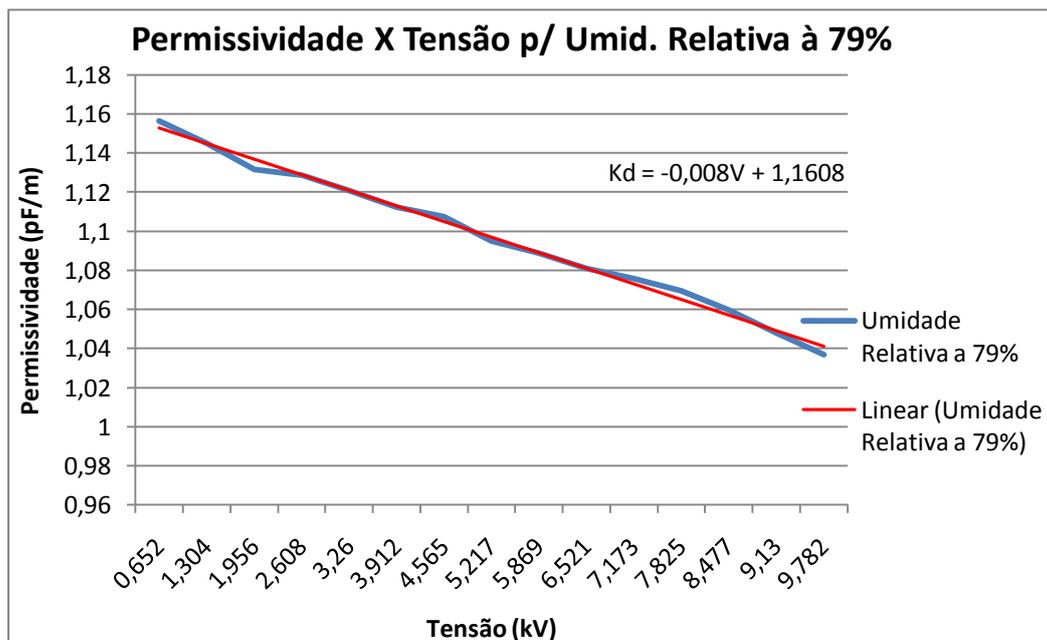


Figura 4.11 - permissividade e tensão aplicada no capacitor, sob uma umidade relativa de 79%

Diferentemente da temperatura, a umidade do ar tem um comportamento linear. No entanto, ainda nada se pode inferir sobre a variação da permissividade com a umidade relativa do ar. O Procedimento utilizado foi o mesmo da temperatura. São selecionados valores para a umidade relativa do ar, aqueles descritos na tabela 4.3 (na página anterior), e com eles, confeccionando-se o gráfico de superfície da figura 4.12 (a seguir).

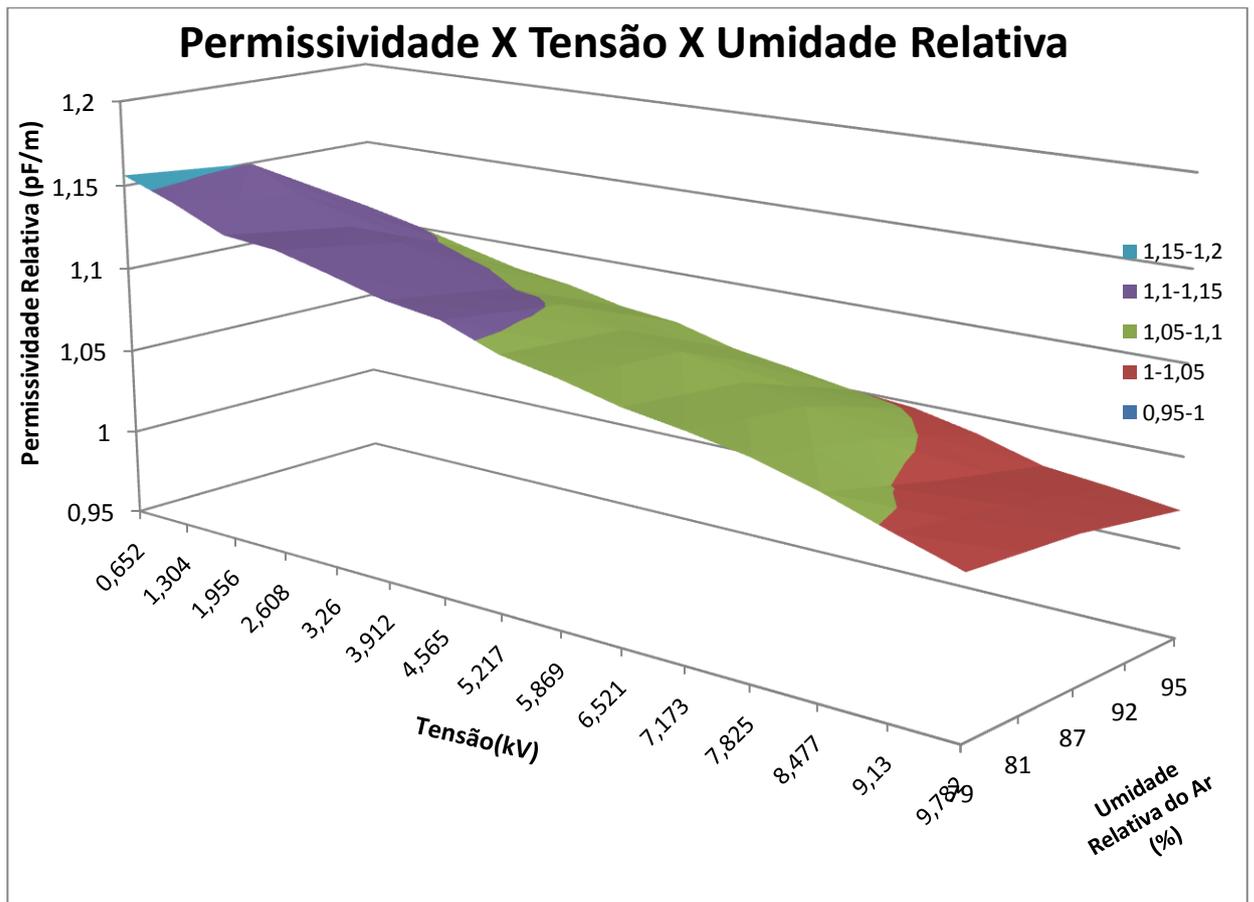
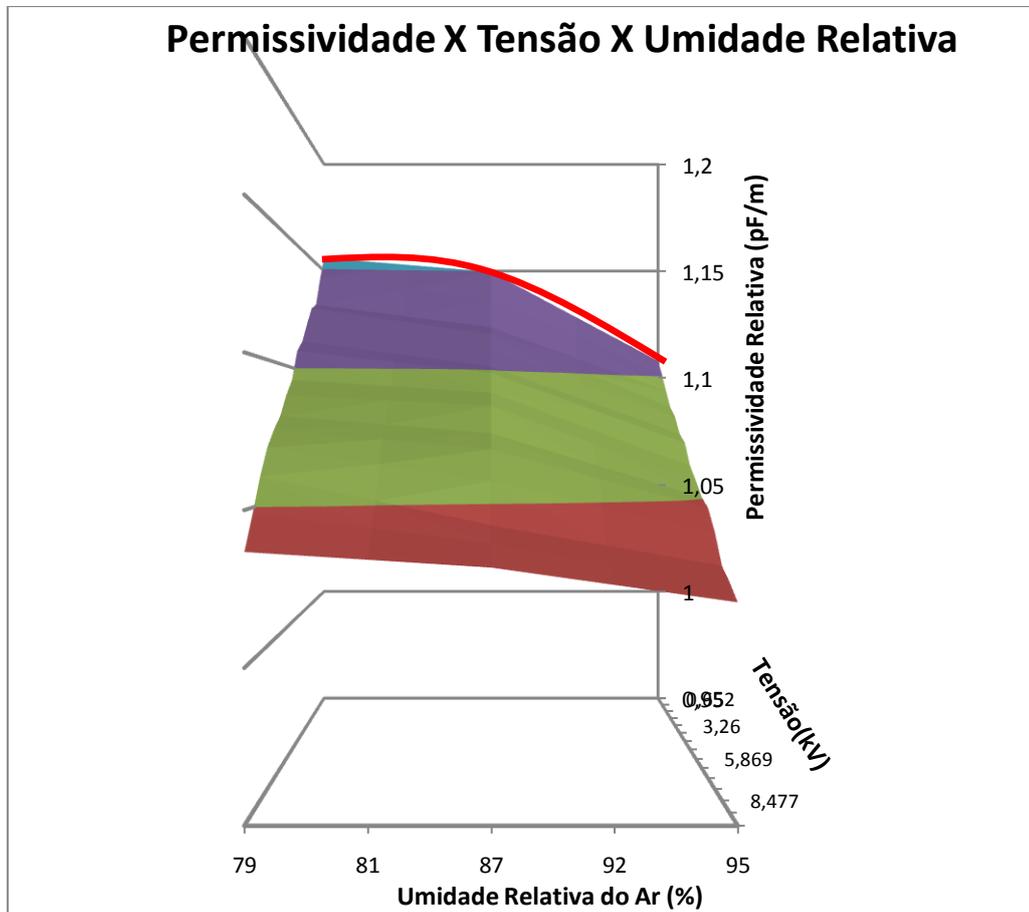


Figura 4.12 Comportamento da permissividade com a variação de Umidade Relativa do Ar e a tensão
Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

O gráfico apresentado na figura 4.12, representa os valores de tensão, permissividade e umidade do ar. Porém o que realmente nos interessa é o comportamento da permissividade com a umidade do ar, melhor visualizado na figura 4.13, a seguir, que é uma rotação de 90°,

sobre o eixo z, da figura 4.12, em que se nota um comportamento decrescente entre a umidade relativa do ar e a permissividade relativa.



(a)

Figura 4.13 - Comportamento da permissividade elétrica com a variação da umidade do ar
Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

Da mesma maneira como foi informada para a temperatura ambiente, a função aproximada que descreve o comportamento dos dados da permissividade relativa pela umidade relativa do ar é a equação (4.17)

$$k_d(U_{ar}) = 5 \times 10^{-5} U_{ar}^2 - 9,5 \times 10^{-3} U_{ar} + 1,06144 \quad (4.17)$$

Neste caso, pode-se afirmar que para mudanças acentuadas, isto é, variações de 30% na Umidade do Ar causam um acentuado aumento da capacitância da LT ocasionando

também, um aumento na corrente de fuga. Na verdade, foi verificado que a variável ambiental que mais influenciou no comportamento da constante dielétrica, foi à umidade relativa do ar. A próxima figura retrata o comportamento da corrente elétrica para a umidade relativa do ar em 79%, continuando com o comportamento linear, obedecendo a primeira lei de ohm.

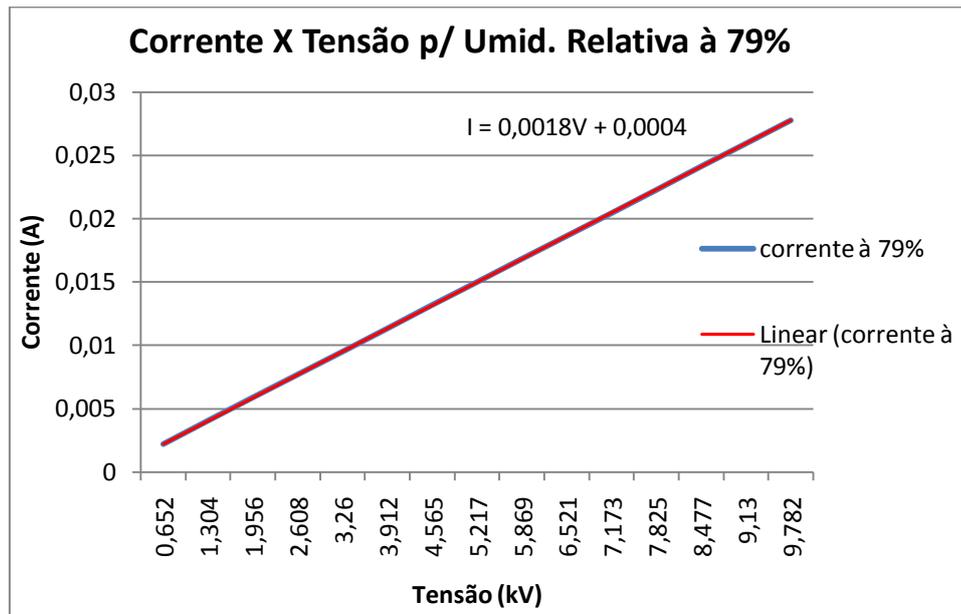


Figura 4.14 – Comportamento da corrente elétrica no circuito com a tensão elétrica aplicada no circuito,, para uma umidade relativa de 79%

Com procedimentos análogos, podem-se obter resultados para a variação da velocidade do vento. No entanto para esta variável em particular foi notado uma particularidade como será descrito na secção a seguir.

4.3.3 Velocidade do Vento

Como o procedimento para análise da velocidade do vento e análogo aos realizados para Temperatura e Umidade do Ar. Segue apenas a tabela e os gráficos obtidos a partir dos

dados coletados, com velocidades do vento iguais a 1,7 m/s, 2,4 m/s, 3,8 m/s, 4,1 m/s e 4,9 m/s e as respectivas inferências.

A tabela 4.4 fornece valores coletados para as distintas velocidades do vento, aplicadas no experimento para o cálculo de suas respectivas permissividades

Tabela. 4 .4 - valores para constante dielétrica e respectivas Velocidades do vento

	1,7m/s	2,4m/s	3,8m/s	4,1m/s	4,9m/s
5	0,995171	0,9995866	0,994208	0,9948627	0,994528
10	0,945508	0,9546598	0,955107	0,9558209	0,959611
15	0,942891	0,9426563	0,942912	0,9427844	0,942595
20	0,93367	0,9346598	0,933949	0,9335654	0,932902
25	0,931038	0,9385962	0,931259	0,9324835	0,930433
30	0,922202	0,9259865	0,921066	0,9211665	0,929293
35	0,913647	0,9145989	0,915354	0,9135989	0,914907
40	0,902319	0,9023459	0,902522	0,9025465	0,902465
45	0,902524	0,9598960	0,902381	0,9126569	0,902534
50	0,902998	0,9033495	0,902637	0,9126448	0,903083
55	0,90453	0,9042263	0,904549	0,9045568	0,903839
60	0,902791	0,9025689	0,902791	0,9029764	0,902891
65	0,903579	0,9044659	0,90407	0,9037946	0,903813
70	0,902161	0,9028956	0,902401	0,9023858	0,902219
75	0,901152	0,9011895	0,901099	0,9011969	0,901398

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

Utilizando os dados da tabela 4.4 foi possível traçar os gráficos mostrados nas figuras subsequentes

Assim, como a análise das demais variáveis ambientais, a velocidade do vento seguiu o mesmo padrão de correspondência em exponencial entre a tensão aplicada e a constante dielétrica, como é mostrado na figura 4.15.

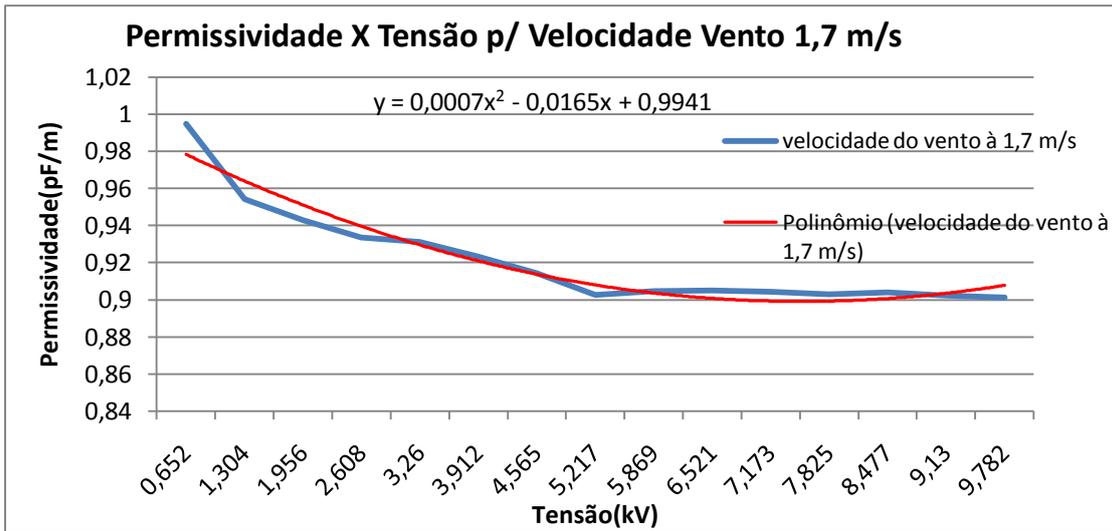


Figura 4.15 - Comportamento entre a permissividade e a tensão aplicada no capacitor, sob uma velocidade do vento de 1,7 m/s

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

Já o gráfico da figura 4.16 (a seguir), é uma superfície formada entre os valores de tensão, permissividade relativa e velocidade do vento.

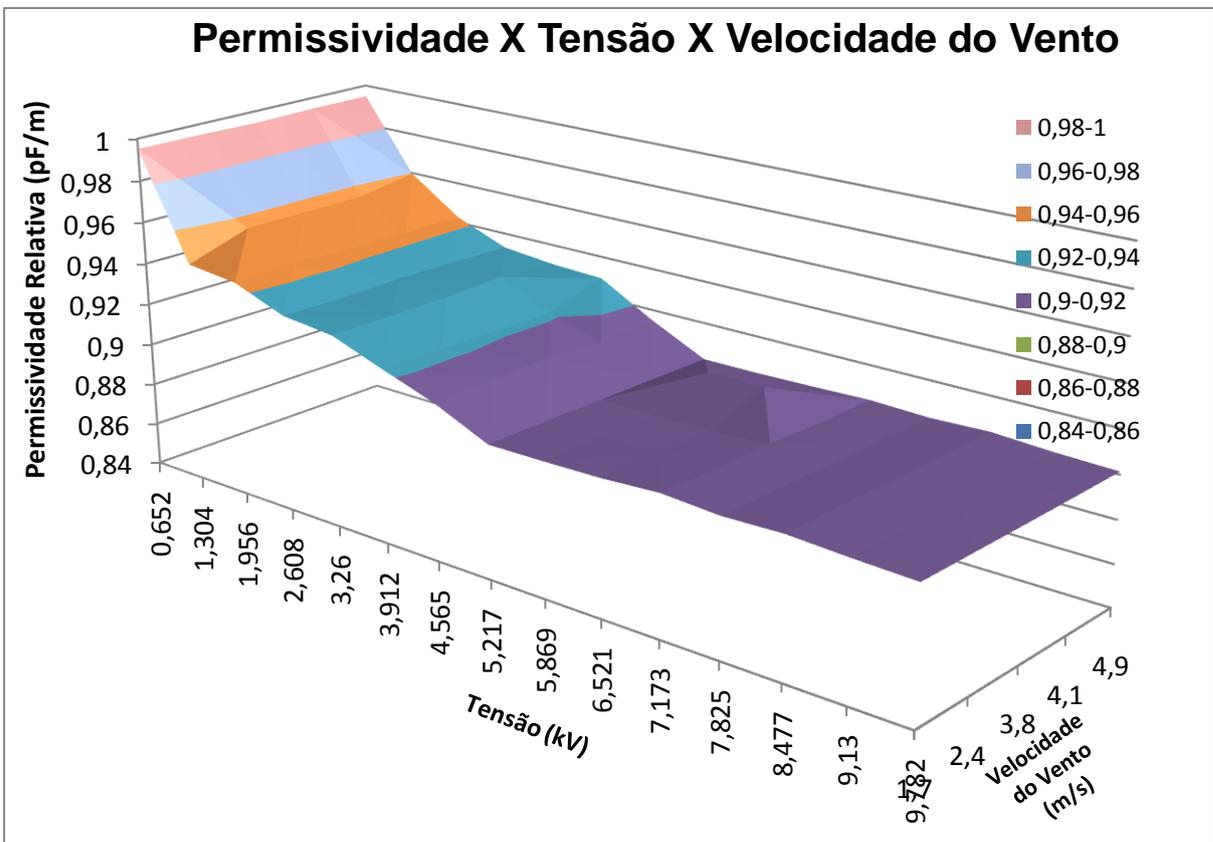


Figura 4.16 - Comportamento da permissividade com a variação da Velocidade do vento e a tensão
 Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

É possível notar o comportamento segundo uma exponencial para a tensão e a velocidade do vento, e ainda observar um comportamento sem muitas mudanças praticamente constante, mesmo os dados estejam sendo aproximados de uma reta inclinada, pode-se verificar que seu coeficiente angular é bastante pequeno, aproximando-se de uma reta horizontal (função constante).

Por meio do gráfico da figura 4.17 (a seguir), é possível notar um comportamento constante para os eixos responsáveis por sinalizarem a permissividade relativa e a velocidade do vento. O que demonstra que dentro do universo de Va's escolhido para esta pesquisa, a capacitância varia apenas com a temperatura, e principalmente a umidade relativa do ar.

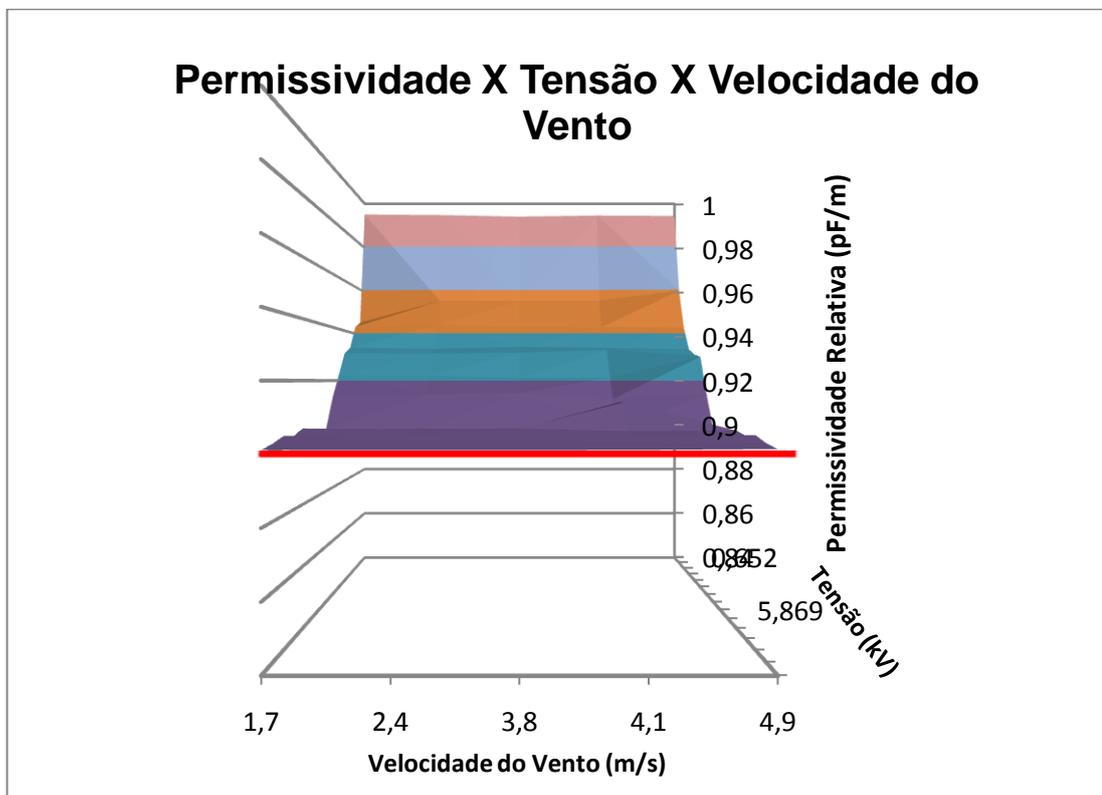


Figura 4.17 - Comportamento da permissividade relativa com a variação de velocidade do vento
Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

A velocidade do vento pode não influenciar diretamente na permissividade, mas ele é responsável pela diminuição da temperatura no ambiente. Isto se dá através do fenômeno de transferência de calor da convecção, como já foi explicado na seção 3.3, do capítulo 3 (três), desta dissertação, que trata da ampacidade dos cabos em uma LT. No

entanto, apenas será considerada a temperatura e a umidade relativa do ar, por serem visivelmente as que mais influenciam no comportamento da capacitância.

4.3.4 Estendendo os Resultados para uma Linha de Transmissão

O comportamento da capacitância, no experimento, como já foi verificado, tem seu valor modificado, conforme existam mudanças na temperatura e umidade relativa do meio em que o capacitor esteja. Outro fato interessante é que os fenômenos meteorológicos são independentes, neste caso o fato do dia ter uma temperatura elevada, não implica que a umidade do ar seja alta ou baixa, ou mesmo a velocidade do vento.

Sendo fenômenos independentes, pode-se escrever uma única equação, linearmente independente, em que seus coeficientes dependem dos fatores ambientais correspondentes; ou fazer a determinação das variações da constante dielétrica, segundo as modificações das variáveis ambientais independentemente e em seguida, tirar uma média entre esses valores, fazendo finalmente que o valor determinado para k_d , tenha influência; tanto da temperatura ambiente quanto da umidade relativa do ar. A opção escolhida é a segunda.

Neste caso, há necessidade de se fazer ajustes entre os coeficientes determinados nas equações (4.16) e (4.17), pois lembre que os coeficientes determinados foram para o experimento, agora o que foi determinado será estendido para os valores de uma LT.

Com isso agora será apresentada a metodologia utilizada para se fazer os ajustes da constante dielétrica e conseqüentemente da capacitância, que neste capítulo é o objeto principal.

4.3.5 Metodologia para Ajuste de Capacitância em uma Linha de Transmissão

Segundo Gomes (2006), o cálculo da capacitância do trecho estudado é feito pela equação

$$C_s = \frac{0,02412 \times 10^{-6}}{\log \frac{D_m D_{II}}{r D_I}} \text{ F/km} \quad (4.18)$$

Em que

D_I - Distância média geométrica entre condutores que conduzem as correntes de mesma fase

D_{II} - Distância média geométrica entre condutores que conduzem correntes de fases diferentes

D_m - Distância média geométrica entre os condutores

r - Raio externo (raio do condutor múltiplo)

Na equação (4.18), pode-se notar facilmente a ausência das variáveis ambientais, apenas existem valores referentes à geometria e a dimensão da LT, além de uma similaridade muito grande a equação 4.17, apresentada na secção 4.3.2, o que mostra claramente que a opção no engendro experimental por uma configuração cilíndrica foi uma escolha estratégica. Entretanto ao analisar o valor de $0,02412 \times 10^{-6}$ na equação abaixo, segundo Fuchs (1979, p.384) esse valor é consequência de

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{2h_a}{r_a} \quad (4.19)$$

Mais especificamente do termo

$$\frac{2\pi k_d}{2,30258509} \quad (4.20)$$

Em que

k_d - Permissividade relativa do meio

2,30258509 - Valor utilizado para mudança de base entre o logaritmo natural e o logaritmo na base decimal.

De acordo com a tabela 2.1, do item 2.3 do capítulo 2, o modelo eletromagnético, que foi o escolhido, relaciona a capacitância na teoria de circuitos com a permissividade do meio, com isso, a estratégia agora é calcular a capacitância da LT, pela equação (4.18), no entanto, com os efeitos determinados pelo experimento inseridos na permissividade.

Portanto a equação a ser utilizada para o cálculo da capacitância será

$$C_s = \frac{0,02412 \cdot k_d(T, U_{ar}) \times 10^{-6}}{\log \frac{D_m D_{II}}{r D_I}} \text{ F/km} \quad (4.21)$$

Devido o trecho ser monitorado em seu início e fim, e supondo que a corrente de fuga (diferença existente entre a corrente no início do trecho e no seu final) seja motivada pela capacitância da linha, principalmente a existente na cadeia de isoladores; com a ajuda dos equipamentos de monitoração, é possível ter uma idéia inicial de quanto deva ser a capacitância da linha; mais exatamente para cada fase desta.

De acordo com as leituras dos equipamentos de monitoração, os valores mais apropriados para cada fase são:

- ❖ Fase A – 98,66 nF
- ❖ Fase B – 105,16 nF
- ❖ Fase C – 100,245 nF

Com isso foi possível, por meio da manipulação da equação (4.21), se estimar os valores da permissividade para cada fase da LT e comparar tais valores com os valores gerados pelas equações determinadas pelo experimento. Foi feito um confronto entre os valores determinado pelos equipamentos de monitoração e os resultados obtidos pelo experimento.

Neste caso, deve-se existir uma função para a constante dielétrica em função da temperatura ambiente $k_d (T_{amb})$; e uma função para a constante dielétrica, em função da umidade relativa do ar $k_d (U_{ar})$. O próximo passo então foi determinar essa função aproximada. Segundo dados fornecidos pelos equipamentos, obtém-se então os dados da tabela 4.5, abaixo:

Tabela 4 .5 – Valores coletados pelos equipamentos para temperatura

Velocidade do Vento (m/s)	Umidade Relativa do Ar (%)	Temperaturas (°C)	Permissividade
11,2	60	15	0,39897
9,5	63	16,7	0,4003
8,2	55	18,3	0,40378
12,5	57	20	0,40543
9,4	65	21,7	0,40823
7,1	59	23,3	0,41019
11,1	61	25	0,41431
10,9	65	26,7	0,41659
11,3	63	28,3	0,42102
9,6	58	30	0,42662

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

É importante lembrar que os valores de temperatura de 15°C, 20°C 25°C e 30°C foram coletados pela estação meteorológica, são dados reais enquanto que as temperaturas que as intermediam na tabela 4.5 são valores resultantes de uma interpolação por *Splines* (algoritmos desenvolvidos em MATLAB, encontram-se no apêndice 2)

Por meio da tabela 4.5, foi possível confeccionar o gráfico da figura 4.18, seguinte.

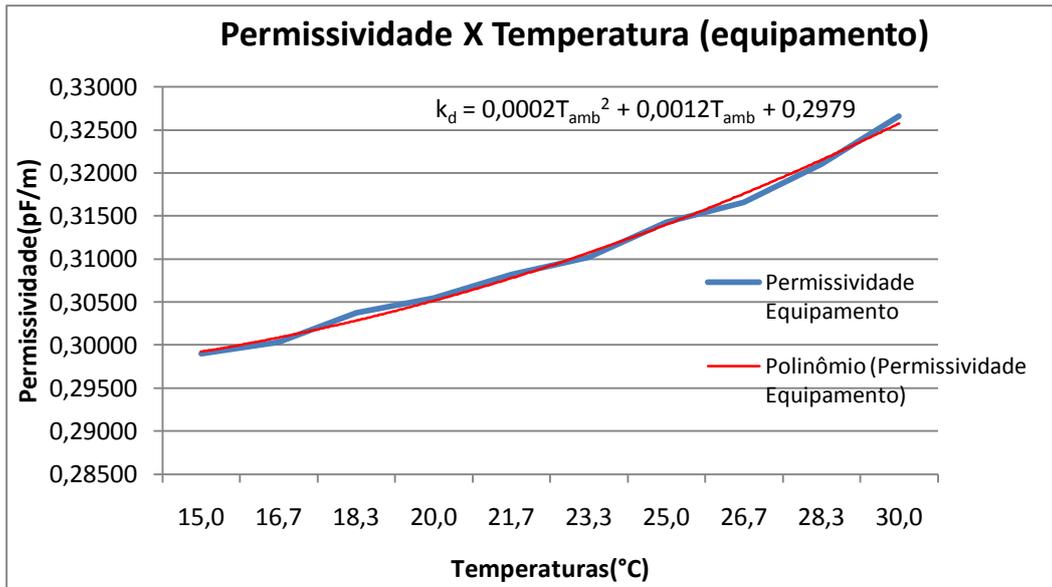


Figura 4.18 – Gráfico da temperatura ambiente, proveniente de dados coletados dos equipamentos de medição, que monitoram a LT

Em geral, a preocupação foi em determinar os coeficientes da equação que mais se aproxima dos dados coletados pelos equipamentos de medição elétrica e meteorológica.

É importante que seja notada a preocupação em se trabalhar com os valores de temperatura fornecidos pela estação meteorológica e que os dados da tabela 4.5 com relação à umidade relativa do meio possuem uma afinidade, um intervalo de umidade relativa compreendido entre 58% e 65% e velocidade dos ventos a 10m entre 9,4 m/s e 11,3 m/s, essa seleção de dados foi necessária posto que se obtivesse apenas os efeitos das temperaturas no valor de k_d .

A linha em azul representa os dados plotados, enquanto que a linha em vermelho foi à interpolação realizada, segundo um polinômio de ordem dois, descrito pela equação (4.22)

$$k_d(T_{amb}) = 3 \times 10^{-5}T_{amb}^2 + 49 \times 10^{-5}T_{amb} - 0,28420 \quad (4.22)$$

O mesmo procedimento foi realizado para a umidade relativa do meio, cujos dados estão apresentados na tabela 4.6, a seguir

Tabela 4 .6 - Valores coletados pelos equipamentos para Umidade Relativa do Meio

Velocidade do vento (m/s)	Umidade Relativa do Meio (%)	Temperaturas (°C)	Permissividade (F/m)
11,2	45	23,2	0,6278
9,5	47,5	23,7	0,6151
8,2	48,4	24,6	0,6109
12,5	50	23,8	0,6029
9,4	53,6	25,1	0,5875
7,1	55	23,5	0,5802
11,1	57,9	24,9	0,5697
10,9	60,6	23,6	0,5597
11,3	63,1	23,8	0,5503
9,6	65	24,5	0,5415

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa.

Da mesma maneira que foi feito para a T_{amb} , os valores de U_{meio} de 45%, 50% 55% e 65% foram coletados pela estação meteorológica. São dados reais enquanto que as umidades relativas que as intermedeiam na tabela 4.6 (anterior) são valores resultantes de uma interpolação, eles possibilitaram a confecção do gráfico da figura 4.19, em que a linha em azul descreve o comportamento dos dados coletados pelo equipamento e a linha em vermelho descreve a aproximação polinomial de ordem dois utilizada.

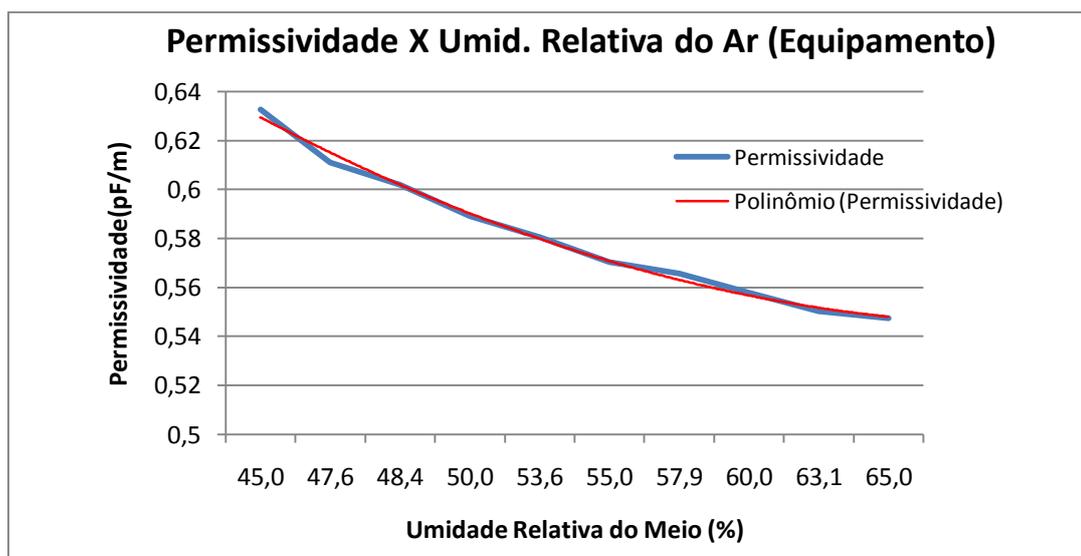


Figura 4.19 - Gráfico da Umidade relativa do meio, proveniente de dados coletados dos equipamentos de medição, que monitoram a LT

É possível verificar um comportamento decrescente da permissividade em relação à umidade relativa do meio, correspondente a

$$k_d(U_{meio}) = 4 \times 10^{-5} U_{meio}^2 - 875 \times 10^{-5} U_{meio} + 0,93775 \quad (4.23)$$

Neste momento da pesquisa, as funções determinadas pelos equipamentos de monitoração e pelo experimento serão analisadas. A partir do confronto de informações, será retirada apenas uma equação que determinará o comportamento da permissividade em função da temperatura e outra equação que fará o mesmo com a umidade relativa do meio.

O ajuste das equações será efetuado por meio de uma média ponderada entre os coeficientes das equações (4.16) e (4.22) para a temperatura ambiente e o mesmo para a umidade relativa do ar, por meio das equações (4.17) e (4.23).

A figura abaixo mostra perfeitamente o comportamento das duas equações (4.16) e (4.22) para a temperatura.

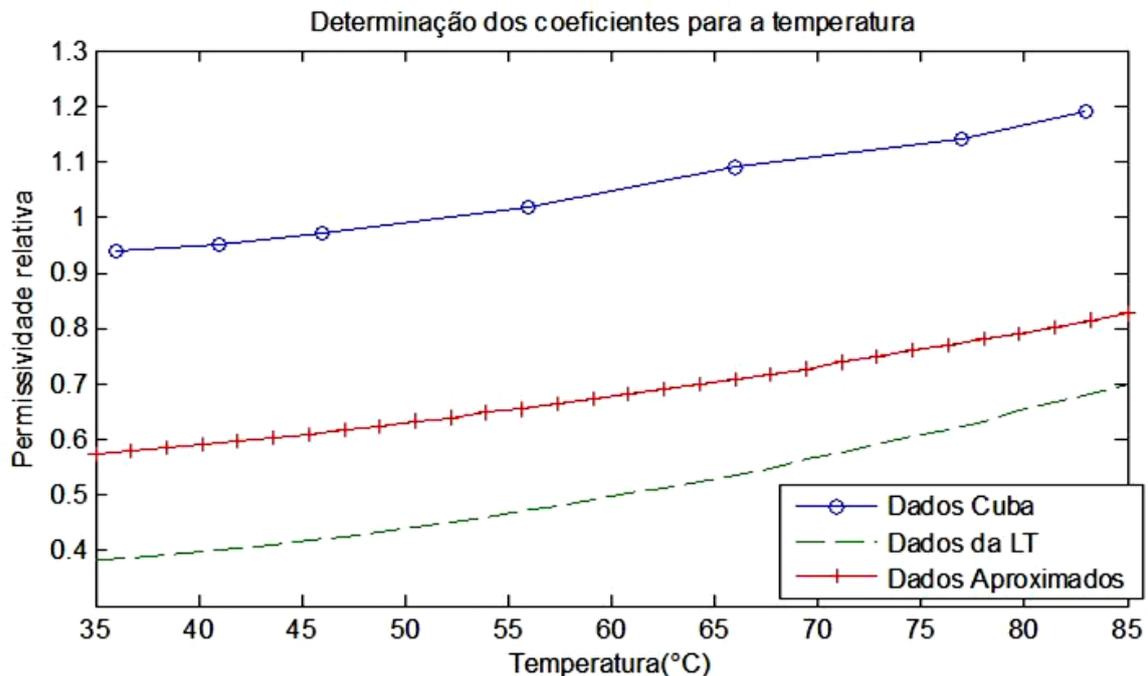


Figura 4 .20 – Análise dos dados coletados da LT pelos equipamentos de monitoração e pelo experimento, para a Temperatura ambiente

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa.

Os dados aproximados (em vermelho) são o resultado da média ponderada entre os valores gerados pelos polinômios desenvolvidos a partir dos dados retirados da cuba (em azul), equação (4.16) e dos dados coletados pelos equipamentos que monitoram a LT (em verde), equação (4.22).

A figura 4.8 mostra o polinômio (em vermelho) que será utilizado no modelo matemático para determinação do comportamento da constante dielétrica em função da temperatura ambiente, e que corresponde à equação (4.24), a seguir

$$k_d(T_{amb}) = 5 \times 10^{-5} T_{amb}^2 + 62 \times 10^{-2} T_{amb} + 0,51354 \quad (4.24)$$

De maneira análoga, procede-se com a variável ambiental, umidade relativa do meio.

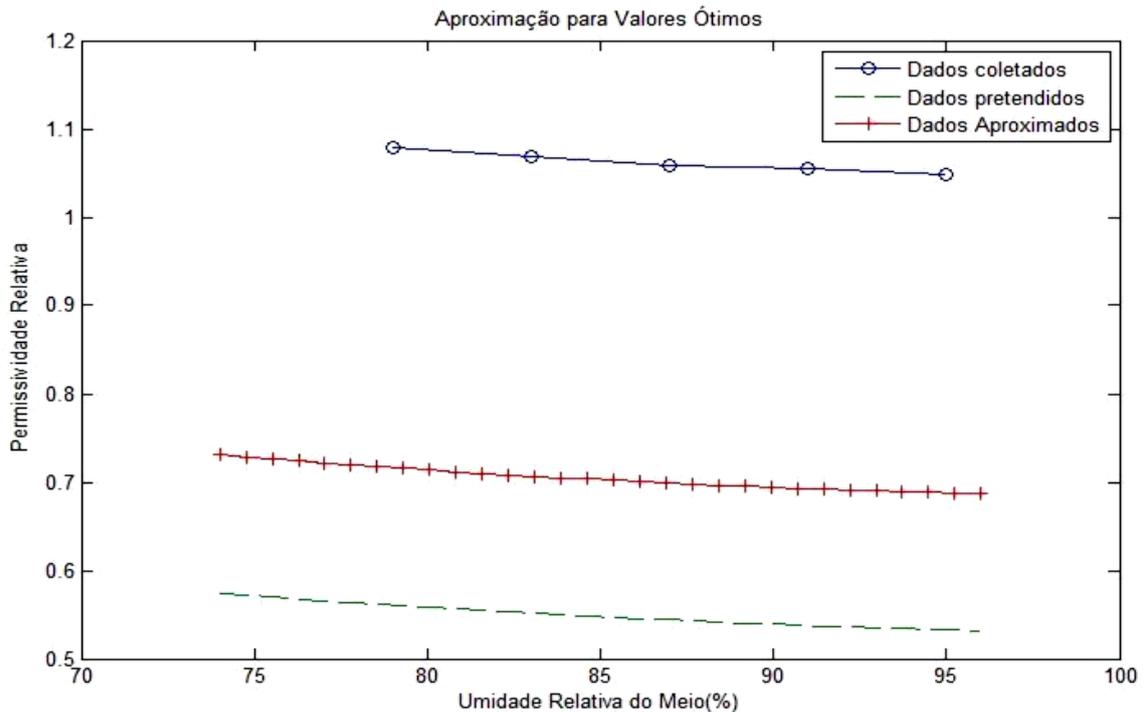


Figura 4.21- Análise dos dados coletados da LT pelos equipamentos de monitoração e pelo experimento, para a Umidade Relativa do Meio

Fonte: elaborada ao longo da pesquisa

A média ponderada (em vermelho) para a umidade relativa do meio resultou na equação (4.25)

$$k_d(U_{meio}) = 5 \times 10^{-5} U_{meio}^2 - 9,5 \times 10^{-3} U_{meio} + 1,06144 \quad (4.25)$$

A dedução das duas equações que descrevem o comportamento da permissividade segundo a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, respectivamente. Os valores determinados para permissividade pelo experimento foram bem próximos do teórico. O erro médio quadrático (MSE) foi em torno de 0,015, após a análise dos dados foi confirmado que existe uma relação entre a capacitância e as variáveis ambientais. No entanto para a extensão dos resultados obtidos na cuba para uma LT foi necessário fazer-se ajustes nos valores dos coeficientes das equações determinadas pelo experimento.

De posse das equações, pode-se dar início às simulações para validação do modelo matemático, além de ter sido um grande passo, no que se refere ao desenvolvimento de uma metodologia experimental para determinação da capacitância de uma LT que possua as mesmas características de monitoramento do trecho estudado.

CAPÍTULO 5.0 MODELO MATEMÁTICO PARA LINHA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

O modelo matemático PI (π) é bastante utilizado, devido à concentração dos parâmetros elétricos e por sua razoável eficiência. No entanto, o fato deste modelo, em geral serem utilizados os valores dos parâmetros elétricos como constantes, isto é, dependem sempre das dimensões e da geometria da LT, fez-se necessário uma complementação em seus conceitos, com isso, ao introduzir neste modelo as influências das Va's nos PE's, tal modificação fez com que ele se enquadre à metodologia sugerida.

Baseando-se no que foi exposto é possível verificar o comportamento da Linha de Transmissão em estudo, isto é, o trecho Guamá – Utinga pertencente a empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), através de um modelo matemático simples. Utilizando este modelo, pode-se simular numericamente o trecho da LT e obter suas correntes, tensões, potência na carga e perdas de potência (nas suas capacitâncias, resistências e indutâncias).

Neste capítulo inicialmente, serão descritas as equações que regem o modelo matemático desenvolvido, os blocos que formam tal modelo, além do detalhamento dos algoritmos desenvolvidos para determinação das variáveis que servirão de entrada no modelo matemático. Posteriormente será realizada uma simulação para verificação do comportamento e respostas fornecidas pelo modelo matemático criado.

5.1 DESCRIÇÃO BÁSICA DO MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL

O modelo matemático escolhido está representado no circuito da figura 5.1, em que a LT esta representada, por seus parâmetros de resistência elétrica, capacitância e indutância, todos concentrados.

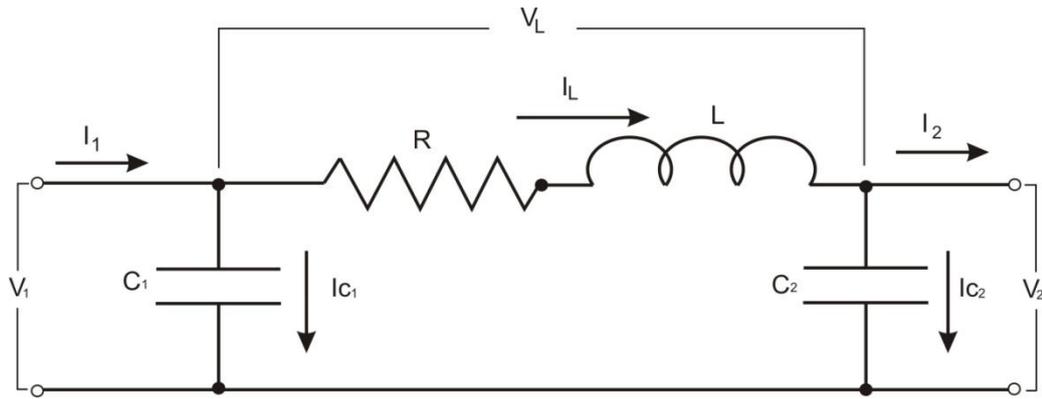


Figura 5.1 – Modelo matemático de um trecho da linha de transmissão.

Fonte: elaboração própria

No modelo é possível determinar as correntes e tensões do circuito, suas reatâncias e resistências, bastando para isto usar a leis das malhas e a lei dos nós. Isto leva ao seguinte conjunto de equações:

➤ *Equações de nó:*

$$I_L = I_{C2} + I_2 \quad (5.1)$$

$$I_{C1} = I_1 - I_L \quad (5.2)$$

➤ *Equações de elemento*

$$I_{C2} = C_2(T_{amb}, U_{rm}) \frac{dV_2}{dt} \quad (5.3.a)$$

$$I_{C1} = C_1(T_{amb}, U_{rm}) \frac{dV_1}{dt} \quad (5.3.b)$$

$$V_L = R(T_{amb}, U_{rm}, V_{vent}, D_{vent}, R_{sol}) \cdot I_L + L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (5.4)$$

➤ *Equação da malha*

$$V_1 = V_L + V_2 \quad (5.5)$$

5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Inicialmente, para que se possa estudar a LT, fez-se um bloco único representando todo o trecho monitorado, tanto o modelo matemático, quanto as simulações foram desenvolvidos utilizando-se o aplicativo Simulink (*Dynamic System Simulation for MATLAB*). Posteriormente foi dividida a LT em 10 pequenos trechos. O diagrama de blocos da figura 5.2 representa apenas uma das dez partes que formam a LT (trecho Guamá-Utinga).

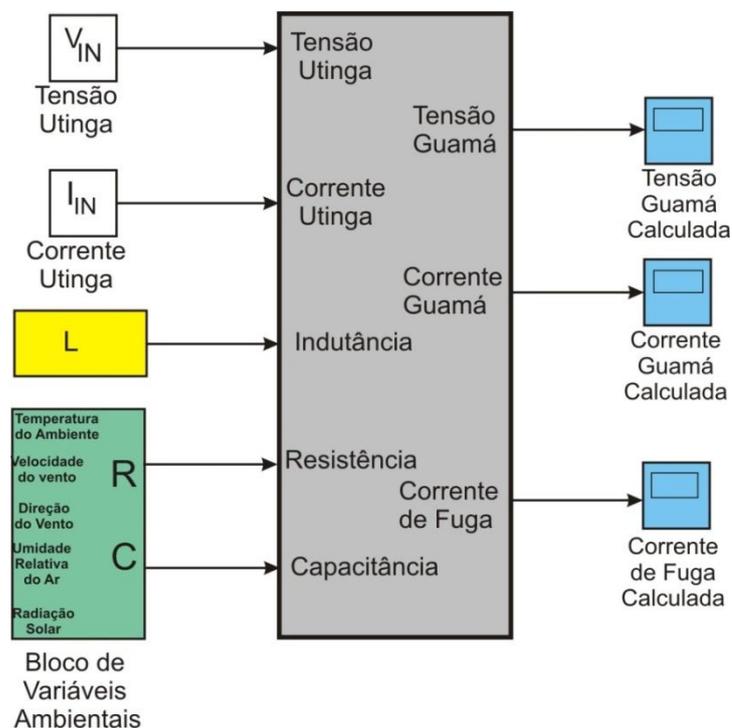


Figura 5.2 - Diagrama de blocos do trecho LT.

Fonte: elaboração própria

As Equações diferenciais 5.1 e 5.2 são resolvidas por meio de um diagrama em blocos onde cada bloco possui uma função específica (derivação, integração, produto, soma, etc.).

A figura 5.3, a seguir, representa o diagrama de blocos que está contido na figura 5.2. O diagrama de blocos mostrado na figura 5.3 é constituído de 5 portas de entrada e 3 portas de saída; sendo que na entrada além dos parâmetros da LT (resistência, indutância e capacitância), este possui as variáveis reais tensão e corrente coletados na subestação do Utinga representando o tipo de carregamento da linha; e na saída, possui as variáveis tensão e

corrente na subestação do Guamá, que servirá de parâmetros para a comprovação do modelo além da corrente capacitiva que atravessa as cadeias de isoladores.

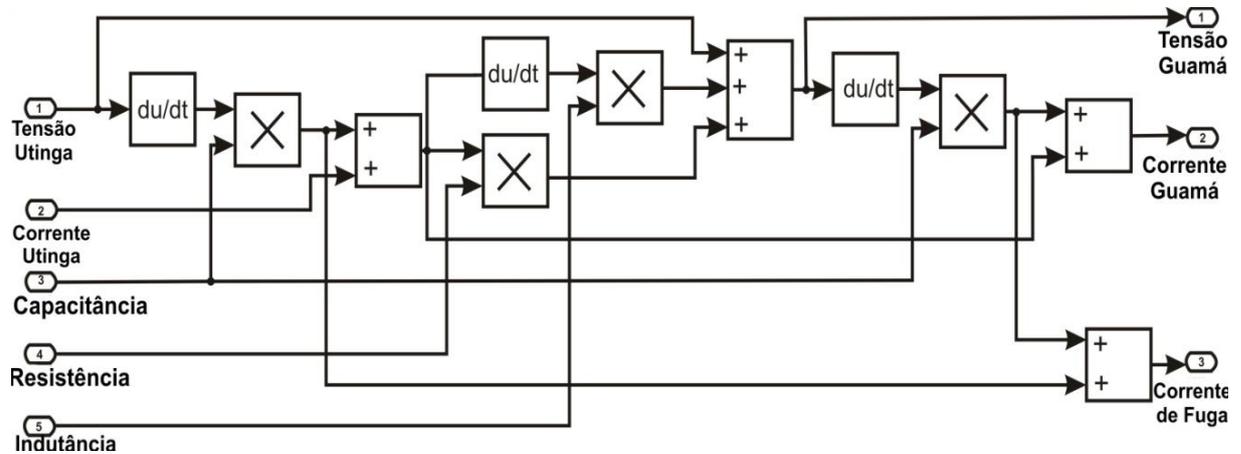


Figura 5.3 – Diagrama de blocos utilizado pelo SIMULINK para simulação numérica da LT

Fonte: elaboração própria

No entanto, o bloco mais importante desta pesquisa, é o responsável pelo cálculo da resistência elétrica e da capacitância segundo as variações das variáveis ambientais.

A figura 5.4 representa o bloco, que faz a correlação entre as variáveis ambientais escolhidas (T_{amb} , U_{meio} , V_{vent} , D_{vent} e R_{sol}), com os parâmetros elétricos resistência elétrica e capacitância.

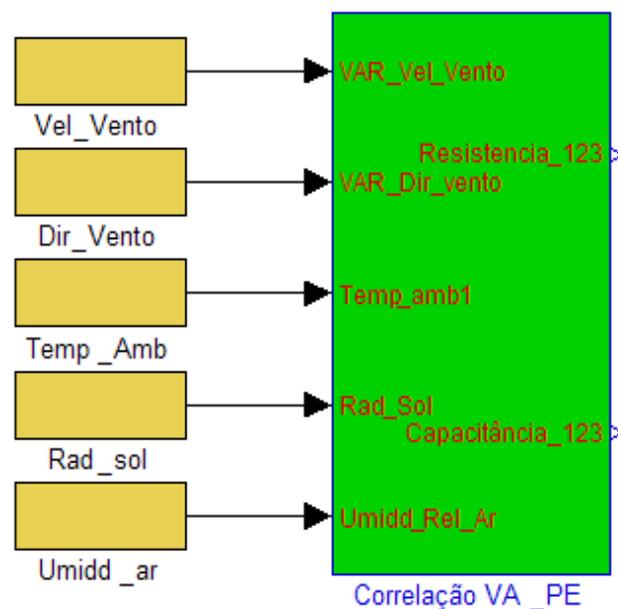


Figura 5.4. – Bloco responsável, pela correlação entre os parâmetros elétricos e as Variáveis ambientais

Fonte: elaboração própria

5.2.1 Cálculo da Resistência Elétrica e Capacitância no Modelo

As equações determinadas no capítulo 3, mais especificamente as equações 3.4, 3.5 e 3.6 e 3.7 correspondem aos fenômenos de transmissão de calor, já descritos naquele capítulo são inseridas em um bloco azul, cujas entradas são as variáveis ambientais Temperatura Ambiente (1), Velocidade do Vento (2), Direção do Vento (3) e Radiação Solar (4) para a determinação da Resistência Elétrica. Isto está representado na figura 5.5. O bloco em verde da mesma figura (5.5) representa o conjunto de equações desenvolvidas no capítulo 4, equações (4.24) e (4.25). Para o cálculo da capacitância as entrada são as variáveis ambientais, Temperatura Ambiente (1) e Umidade Relativa do ar (5).

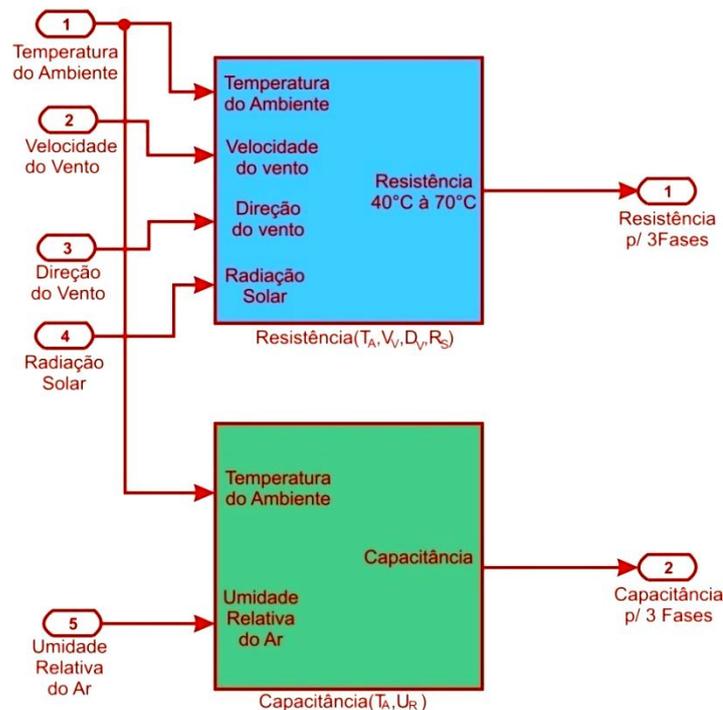


Figura 5. 5 – Blocos responsáveis pelo cálculo da resistência elétrica e capacitância da LT
Fonte: elaboração própria

O Diagrama completo para a simulação do modelo matemático é mostrado na figura 5.6, (a seguir), onde se nota perfeitamente a divisão da linha escolhida em dez trechos (blocos cinzas). As entradas do modelo matemático são as variáveis elétricas, tensão e corrente elétrica, o parâmetro elétrico indutância, além das variáveis ambientais, necessárias para o cálculo da Capacitância e Resistência Elétrica.

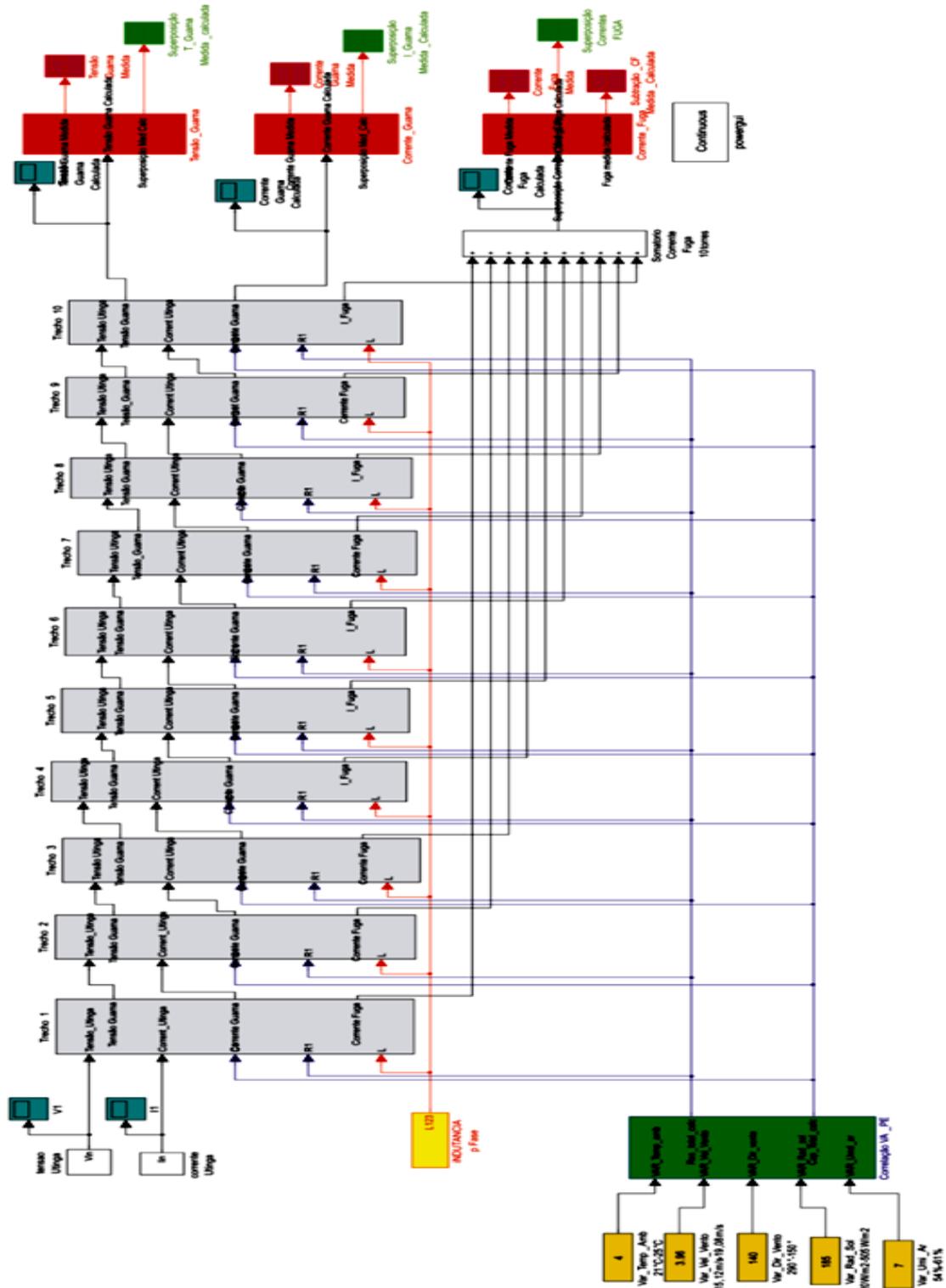


Figura 5.6 – Diagrama em blocos para o modelo matemático desenvolvido para cálculo de parâmetros elétricos, sob os efeitos das variáveis ambientais, e cálculo da corrente de fuga.

5.3 DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS ENVOLVIDOS.

Inicialmente, necessitamos entender a interface criada entre o equipamento do qual retiram-se as informações de corrente, tensão e os respectivos harmônicos; o modelo 1133A *Power Sentinel* (PS) – ARBITER (sua instalação e procedimentos será melhor detalhado no próximo capítulo), fornece um software, denominado, *Power Sentinel* CSV – PSCSV™, para armazenamento de dados em um microcomputador. É através desse software que se podem obter os dados de corrente, tensão, potência (ativa, reativa e aparente), fator de potência nas três fases e as componentes harmônicas de tensão e corrente. O aspecto da tela é mostrado na figura 5.7, a seguir:

UTC Time	GPS Local Time	Fundamental A V mag	Fundamental A V ph	A Y 2 mag	A Y 2 ph	A Y 3 mag	A Y 3 ph	A Y 4 mag	A Y 4 ph	A Y 5 mag
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:50	132239.296675	33.714993	33.974182	34.187550	951.601257	85.522635	56.863695	-151.005...	1128.494019
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:51	132181.000000	36.891926	28.601074	32.267395	953.308960	95.722724	57.376841	-146.126...	1144.092651
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:52	132052.815000	39.620235	32.406952	114.856430	947.825806	103.735184	57.759647	-130.795...	1141.148926
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:53	132137.109375	43.158253	40.475353	111.667290	949.380310	113.403671	59.758362	-134.442...	1108.729126
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:54	132116.687500	46.441723	26.503494	18.920126	951.090759	124.082542	54.905449	-105.803...	1116.897327
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:55	132145.015625	50.099312	23.558470	-11.093376	947.872742	134.496536	49.079556	-89.013954	1141.717041
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:56	132135.515625	53.265373	25.504383	*128.446...	943.602478	144.276505	59.149325	-78.781036	1156.617188
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:57	132157.671875	55.779976	21.987951	175.832260	941.504700	151.577133	59.870232	-77.060056	1135.671875
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:58	132216.000000	56.697041	28.874636	-147.927...	945.978333	159.900891	54.200878	-60.995960	1129.831665
11-17-05 17...	11-17-05 14:59:59	132136.562500	60.761166	48.088718	-179.588...	943.018066	166.432762	59.581661	-48.056499	1112.192261
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:00	132153.095950	63.189527	49.248956	-159.987...	947.948242	173.196552	59.363636	-45.494057	1090.602783
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:01	132177.906250	66.071404	61.505305	-177.527...	940.065857	-177.709...	68.963493	-26.530970	1083.222046
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:02	132176.815000	69.053139	55.031891	-179.861...	955.176208	-170.280...	60.844655	-42.833309	1107.911621
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:03	132209.343750	72.256279	35.063049	122.956947	966.485107	-157.904...	56.319466	19.029575	1107.351196
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:04	132185.250000	75.616714	25.665684	-130.542...	963.225281	-148.765...	59.406211	4.694988	1135.422241
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:05	132100.906250	79.127596	31.935770	126.707237	934.908325	-138.117...	67.695506	13.463348	1125.102051
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:06	132054.201250	80.831689	27.613640	78.256612	940.739990	-132.387...	63.676708	33.109825	1128.940771
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:07	132083.078125	82.210014	32.978447	171.531189	933.070068	-129.936...	55.361488	23.273392	1114.976074
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:08	132097.256250	82.527367	33.614006	44.464363	935.814697	-127.610...	60.204395	50.305740	1118.133789
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:09	132092.281250	81.190964	45.002218	62.108192	951.563293	-131.217...	51.224808	50.104473	1122.204834
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:10	132185.078125	79.209862	35.094175	-0.112349	960.632764	-137.939...	50.507694	36.515301	1137.013006
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:11	132194.437500	76.109070	29.100307	-76.628682	955.762592	-146.429...	48.964684	23.234140	1126.253906
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:12	132144.015625	71.877792	31.476435	-63.338024	943.915100	-161.085...	52.086319	-4.434503	1125.275146
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:13	132109.156250	66.104744	33.240871	33.083523	938.274109	-177.778...	61.356131	-21.912910	1126.132524
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:14	132133.062500	59.948078	51.204536	3.995757	940.128540	163.164810	42.359473	-57.582053	1125.069970
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:15	132174.468750	52.762108	48.729183	31.455252	952.856079	142.046310	44.435145	-68.412621	1136.034790
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:16	132190.578125	45.003397	26.663187	-82.805733	949.888733	119.231621	38.016441	-108.464...	1132.054688
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:17	132239.453125	37.547287	29.333155	-59.979763	963.465454	96.597641	36.607014	-125.038...	1118.745728
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:18	132140.015625	28.692198	25.604197	-22.316729	956.937256	70.167992	33.976555	-165.134...	1145.765991
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:19	132180.453125	19.887763	23.036566	-127.159...	954.016968	43.190695	39.951992	162.351532	1131.113770
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:20	132135.968750	10.319320	21.086676	-134.305...	950.443420	14.943661	34.160122	113.249988	1128.167480
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:21	132099.890625	0.654542	21.462999	-104.468...	946.935242	-12.975056	37.966702	82.101372	1120.835449
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:22	132153.281250	-8.676318	21.813351	-95.384850	951.128052	-41.522266	39.814194	26.626959	1106.827637
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:23	132169.250000	-17.765879	20.058434	-109.458...	954.203552	-69.984428	32.530449	13.868771	1120.161965
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:24	132215.000000	-25.300888	30.570372	-150.315...	950.718915	-91.207153	34.720558	-25.968294	1121.449585
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:25	132201.609375	-32.378948	29.213541	-163.219...	972.153381	-112.497...	34.715892	-63.548917	1122.856934
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:26	132286.562500	-39.080578	37.280308	-158.812...	984.200562	-132.451...	39.660744	-93.641151	1113.316284
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:27	132285.062500	-45.090034	55.631386	156.534164	974.210938	-151.553...	44.871164	-114.228...	1149.988892
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:28	132228.906250	-51.729382	40.518658	157.414032	974.719482	-170.877...	46.612091	-107.212...	1151.180054
11-17-05 18...	11-17-05 15:00:29	132204.312500	-58.683620	53.964417	165.260609	961.497131	167.616913	43.632939	176.157166	1147.241333

Figura 5.7 – Formato da tela para entrada de dados pelo *Power Sentinel*, com auxílio do software PSCSV™

É interessante lembrar que os valores de tensão, corrente e potência são medidos diretamente através deste equipamento e que os valores de resistência, capacitância e indutância foram calculados, pelas equações do Modelo Matemático, deduzidas nos capítulos 3 e 4. O programa foi feito de modo a considerar as entradas de tensão e corrente de 50 harmônicos das três fases fornecidas pelo analisador, e os parâmetros R, L, C da linha,

calculados para um trecho qualquer. As saídas do programa são: tensão e corrente na extremidade remota e a corrente de fuga total do trecho. Os parâmetros R, C, são dinâmicos e variam de acordo com a mudança climática em quanto L é o único parâmetro elétrico constante, mas todos podem ser facilmente atualizados para contemplar a monitoração de outro trecho de LT. Os dados de entrada de tensão e corrente são seis matrizes distintas de 2×13201 , onde três são de tensão e três de corrente, cada matriz representando uma fase. A primeira linha da matriz possui os períodos de tempo e a segunda os módulos de tensão ou corrente. É importante salientar que o modelo necessita de dados de tensão e corrente de apenas um dos terminais da linha. A utilização de dois analisadores, um em cada extremidade, foi necessária unicamente para validar o modelo.

Os dados fornecidos pelo PSCVSTM têm o formato CSV, no entanto este pode ser transformado facilmente em formato (extensão) TXT, simplesmente selecionando os dados gerados pelo PS e enviando para um processador de texto, (por exemplo, o bloco de notas). O próximo passo é a organização dos dados para a simulação no programa MATLAB, para isso foi escrito um algoritmo para ajudar na transformação de formato entre o arquivo fornecido pelo *Power Sentinel 1133A* (PS) e o MATLAB.

O programa escrito em MATLAB age lendo cada linha e seus respectivos valores e espaços, organizando os dados do arquivo “TXT” em um imenso vetor com os dados que necessitamos, atualmente ele está escrito para organizar os dados para 100 valores de tensão da fase A (VA), corrente da fase A (IA), tensão da fase B (VB), corrente da fase B (IB), tensão da fase C (VC) com suas respectivas intensidades e fases (para esclarecimento, por exemplo, são 50 valores de intensidade da tensão A e mais 50 valores de fase da tensão A, num total de 100 valores para a tensão A), como se tem um arquivo desses para cada fase, perfazem o total de 13201 valores, como já foi mencionado.

Depois de organizado o arquivo, é importado para dentro do *workspace* em que se irá trabalhar no MATLAB. O algoritmo importante no MATLAB é identificado por '*main_GuamaUtinga*', ele é o programa principal, por intermédio dele pode-se gerar os Sinais de entrada para a simulação do modelo matemático. Ele trabalha ainda em função de duas outras sub-rotinas que são: *tesutinga* e a *corrutinga*, sendo que em ambas sub-rotinas estão presentes as funções para o cálculo, tanto das tensões quanto das correntes, respectivamente, de acordo com o modelo matemático desenvolvido (As rotinas desenvolvidas estão descritas no apêndice 2).

Esta sub-rotina é responsável pelo cálculo das correntes. Neste momento os dados trabalhados são os dados adquiridos pelo *Arbiter*, isto é, dados reais. Tais dados são apresentados pelas figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, seguintes.

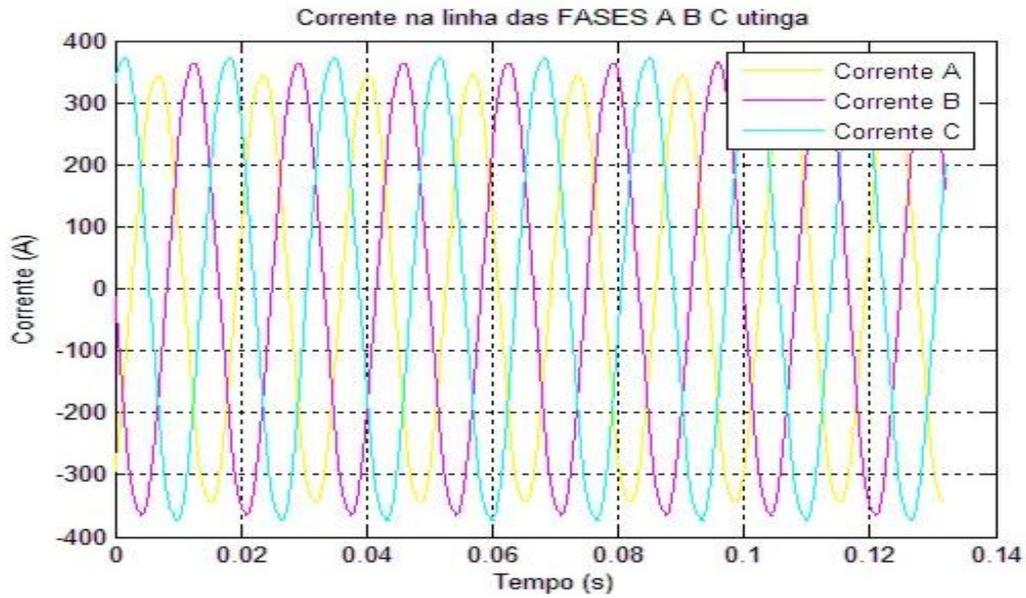


Figura 5.8- Formas de onda das três fases da corrente obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Utinga

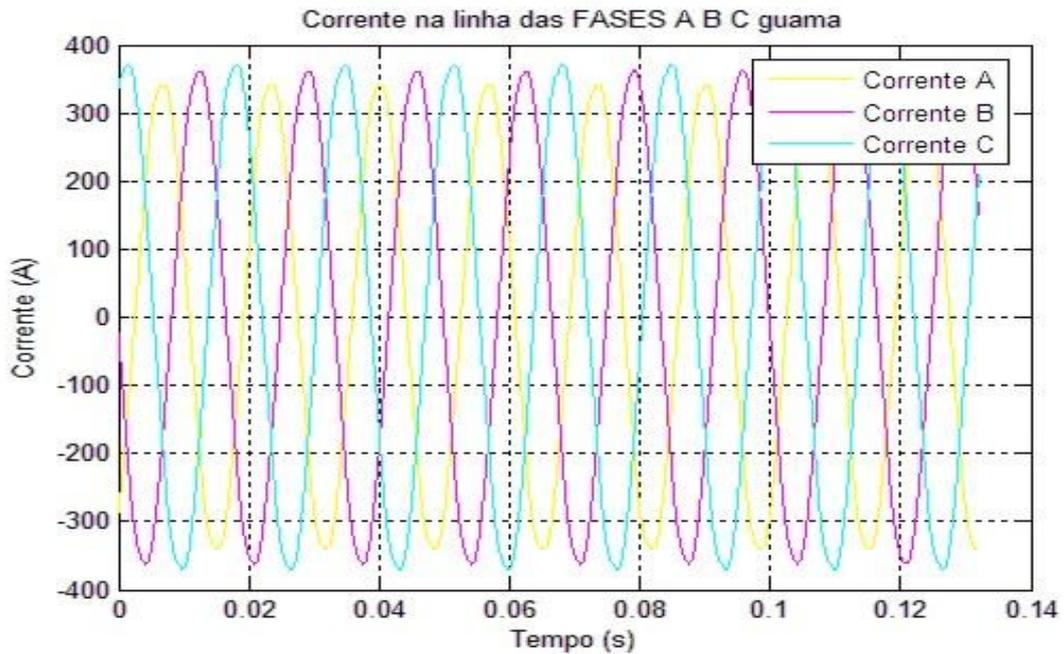


Figura 5.9- Formas de onda das três fases da corrente obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Guamá

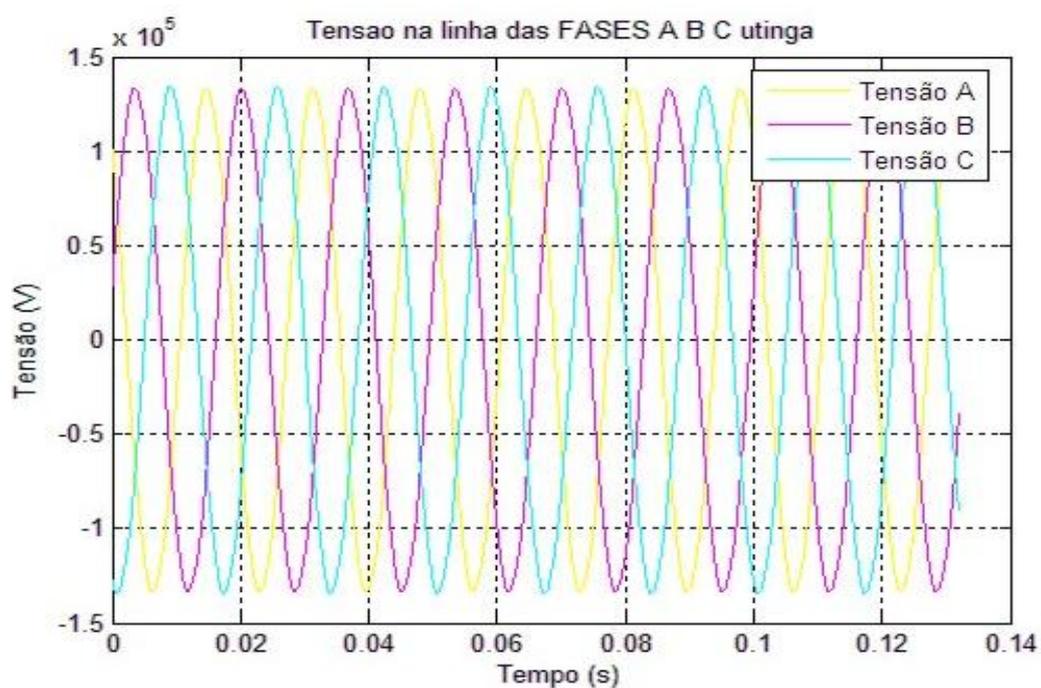


Figura 5.10- Formas de onda das três fases da tensão obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Utinga



Figura 5.11- Formas de onda das três fases da tensão obtidas a partir dos dados numéricos do vetor VI, na SE Guamá

O vetor VI tem dimensão de 1X1600 (dupla precisão) que são os 300 valores de tensão (100 tensão A + 100 tensão B + 100 tensão C) e mais 300 valores de corrente. Em seguida são escolhidos somente os valores de corrente; que estão contidos no vetor VI, compreendidos nos intervalos de [301, 400] para a corrente da fase A, [101, 200] para a corrente da fase B e de [501, 600] para a corrente da fase C.

A sub-rotina ‘tesguama’ é similar a sub-rotina ‘corrutinga’, como se verifica agora serão escolhidos somente os valores de tensão que estão contidos no vetor VI, compreendidos nos intervalos de [1, 100] para a tensão da fase A, [201, 300] para a tensão da fase B e de [401, 500] para a corrente da fase C.

A figura a seguir (5.12), apresenta a união das correntes e tensões medidas e representadas nas figuras anteriores.

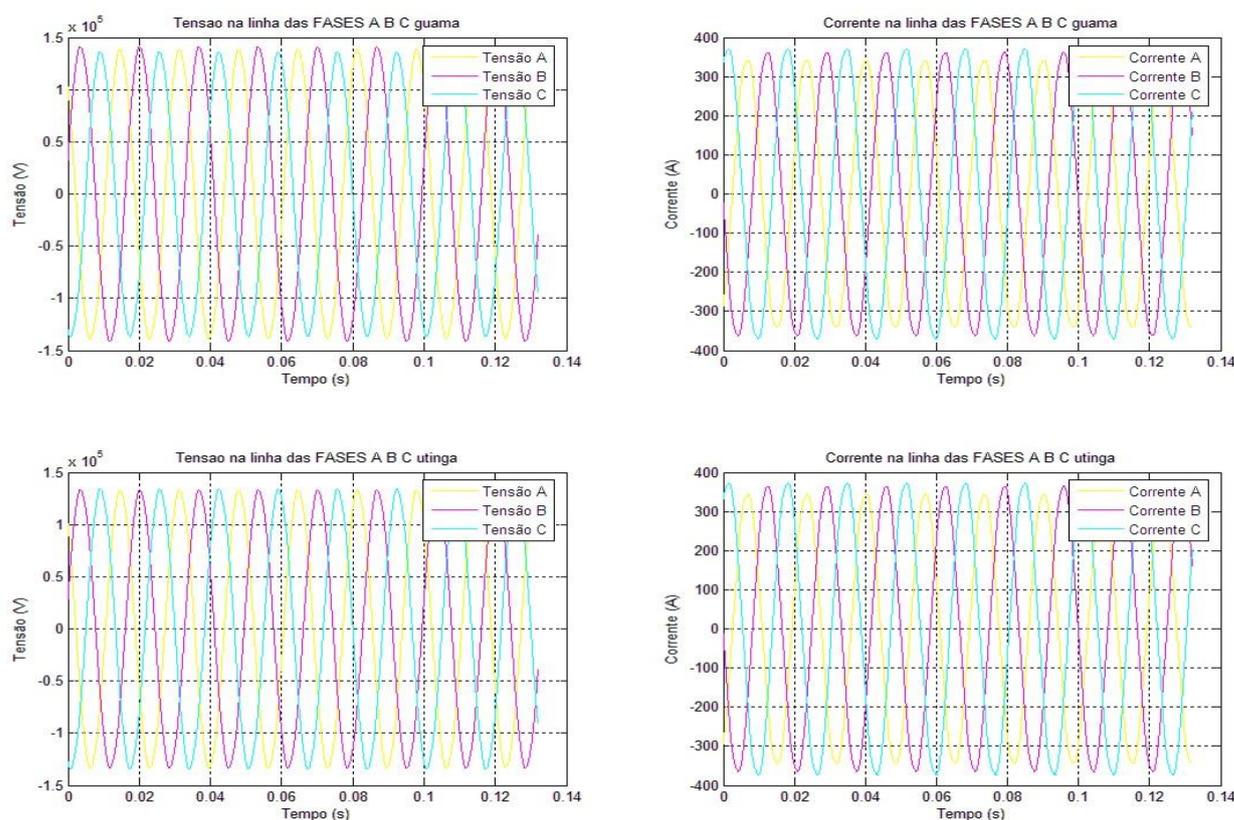


Figura 5.12 – União das formas de ondas das três fases da tensão e corrente, para verificação dos defasamentos existentes

Após executar o programa, são gerados três arquivos do tipo MATLAB data file no domínio do tempo, que são: *va_guamá*, *vb_guamá* e *vc_guamá*, em que se tem os valores de tensões e seus correspondentes tempos, indispensáveis para a confecção dos gráficos

ilustrados nas figuras de 5.10 à 5.12, além do tempo de processamento ser de aproximadamente 12 segundos em um *Personal Computer*, com processador Core2Quad 2.0GHz, 2 Gb de memória RAM, HD 250Gb, o que para monitoração de falhas é um bom tempo. De maneira análoga foram criadas rotinas similares para geração de resultados para o medidor instalado na SE Guamá, no entanto os dados da SE Guamá serão utilizados apenas para validação do modelo matemático (Capítulo 6).

O diagrama de blocos conta ainda com um bloco chamado *powergui*, entre muitas funções deste bloco a mais interessante para este trabalho e a determinação da 'FFT' (*Fast Fourier Transform*) dos sinais no domínio do tempo gerado pelo modelo, mas principalmente o da corrente de fuga, este bloco possuem duas maneiras de apresentação para seus resultados, que podem ser por meio de barras ou de tabelas (vide figura 5.13, abaixo)

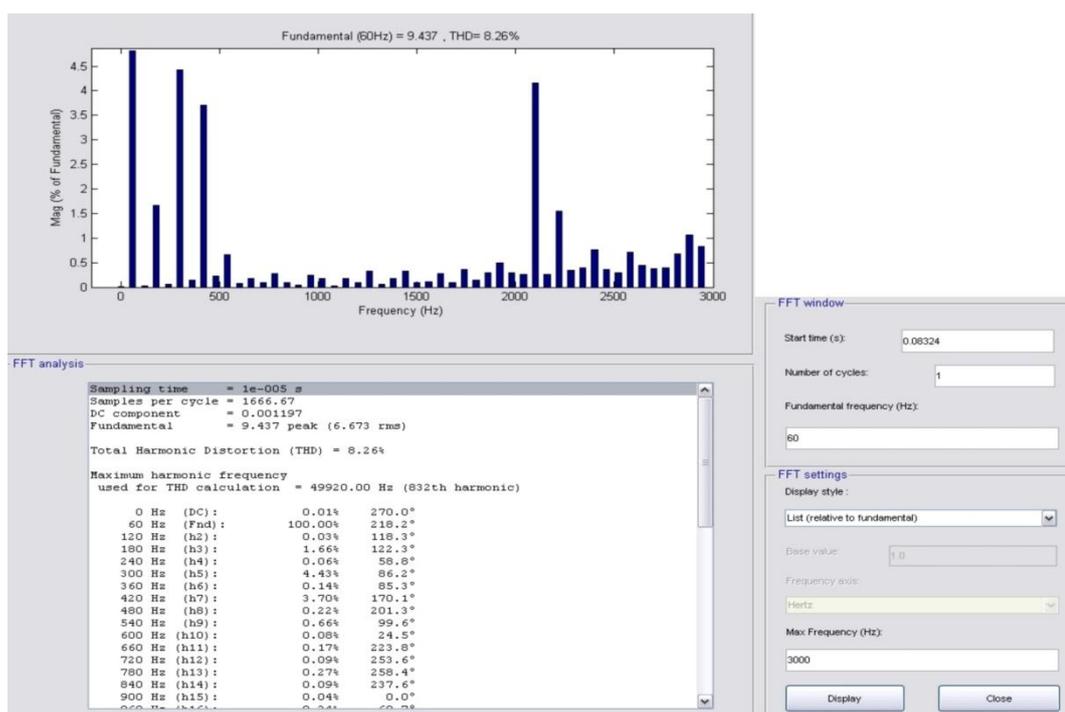


Figura 5.13 – Módulo responsável pela extração da FFT dos sinais gerados pelo 'modelo PI' modificado; com Resultados em barras e em tabela

Para os dados meteorológicos, estes são coletados a partir de uma Estação Remota Meteorológica (ERM) produzida pela *Vaisala* (fabricante), que da mesma maneira que o *Power Sentinel* 1133A (PS) possui um software específico chamado *malware*, responsável por disponibilizar os dados através de uma interface bastante amigável for Windows. Os

procedimentos para inserção dos dados meteorológicos são bem mais simples que os do PS, para as ERM's, basta selecionar os dados gerados, e enviar para um processador de texto, (por exemplo, o bloco de notas), essa facilidade é justificada principalmente pela quantidade de dados coletados, em torno de nove (9) valores, e ainda o fato que, apenas cinco (5), são introduzidos diretamente no modelo matemático em blocos

Agora passaremos para a fase de simulação do modelo, e para isto utilizaremos o software *SIMULINK*.

5.4 SIMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A linha de transmissão em estudo foi modelada através do amplamente conhecido 'modelo PI', no entanto com as modificações já descritas e justificadas nos capítulos anteriores.

Para que a simulação do trecho de linha de transmissão em estudo pudesse incorporar os dados obtidos pelo analisador *Power SentinelTM 1133A* e alterar seus parâmetros constitutivos R, C, segundo modificações ambientais foi criado um programa em Matlab (*Toolbox Simulink*) que utiliza as equações básicas do modelo PI. No entanto antes de se partir para a simulação propriamente dita, serão mostrados os resultados obtidos para valores de resistência elétrica e capacitância, além de posteriormente, abordar o conceito de corrente de fuga, pois esta é também um dos objetos de estudo, além de se fazer necessário para demonstrar a veracidade dos resultados provenientes do modelo sugerido.

5.4.1 Obtenção Teórica da Resistência Elétrica e da Capacitância

Como já foi visto o bloco de correlação de variáveis ambientais e parâmetros elétricos são responsáveis por verificar o quanto estes são influenciados por aquelas. As tabelas a seguir mostram o comportamento tanto da resistência elétrica quanto da capacitância segundo a variação ambiental (bloco de correlação das VA's).

A tabela 5.1 mostra o comportamento da resistência elétrica, segundo o modelo PI modificado, com a utilização das equações definidas nos capítulos 2 e 3. É possível se fazer algumas inferências sobre o comportamento da resistência elétrica segundo variações das VA's. primeiramente o seu comportamento diretamente proporcional a temperatura ambiente e a radiação solar, o que já era esperado e segundo o seu comportamento inversamente proporcional com a velocidade do vento.

Tabela 5.1 - Comportamento da Resistência elétrica, segundo variações ambientais sugeridas.

	Tem_amb 20°C	Tem_amb 23°C	Tem_amb 25°C	Tem_amb 28°C	Tem_amb 31°C	Tem_amb 33°C	
Vel_vento 03 m/s	1,837 Ω	1,901 Ω	1,918 Ω	1,950 Ω	1,971 Ω	1,990 Ω	D_vent 90°
Vel_vento 08 m/s	1,82900 Ω	1,843 Ω	1,860 Ω	1,880 Ω	1,889 Ω	1,904 Ω	D_vent 60°
Vel_vent 10 m/s	1,8150 Ω	1,827 Ω	1,838 Ω	1,853 Ω	1,880 Ω	1,895 Ω	D_vent 45°
Vel_vent 12 m/s	1,809 Ω	1,819 Ω	1,835 Ω	1,845 Ω	1,853 Ω	1,861 Ω	D_vent 30°
	Rad_sol 250W/m ²	Rad_sol 300W/m ²	Rad_sol 350W/m ²	Rad_sol 400W/m ² °	Rad_sol 450W/m ² °	Rad_sol 500W/m ²	

Fonte: elaborada ao longo do trabalho.

Observando a tabela 5.2, é possível notar o comportamento de proporcionalidade direta da capacitância, com a temperatura e um comportamento inverso em função da umidade relativa do ar, e ainda nas extremidades da tabela temos alguns pontos críticos, em que se têm os máximos e mínimos da capacitância, por exemplo, a maior capacitância se deu à temperatura ambiente de 33°C (maior temperatura da Tabela 5.2, a seguir) e umidade relativa do ar igual a 60% (menor umidade relativa da Tabela 5.2), enquanto que a menor capacitância foi encontrada quando a temperatura ambiente foi de 20°C e a umidade relativa do meio foi de 80%, vale frisar que o modelo foi alimentado com dados do período de 23 de agosto de 2008 a 30 de outubro de 2008.

Tabela 5.2 - Comportamento da Capacitância, segundo variações ambientais sugeridas.

	Tem_amb 20°C	Tem_amb 23	Tem_amb 25°C	Tem_amb 31°C	Tem_amb 33°C
U_rel_ar 60%	$9,892 \times 10^{-9}F$	$9,955 \times 10^{-9}F$	$9,998 \times 10^{-9}F$	$10,13 \times 10^{-9}F$	$10,18 \times 10^{-9}F$
U_rel_ar 65%	$9,693 \times 10^{-9}F$	$9,756 \times 10^{-9}F$	$9,799 \times 10^{-9}F$	$9,935 \times 10^{-9}F$	$9,982 \times 10^{-9}F$
U_rel_ar 70%	$9,524 \times 10^{-9}F$	$9,587 \times 10^{-9}F$	$9,630 \times 10^{-9}F$	$9,766 \times 10^{-9}F$	$9,813 \times 10^{-9}F$
U_rel_ar 75%	$9,386 \times 10^{-9}F$	$9,449 \times 10^{-9}F$	$9,492 \times 10^{-9}F$	$9,628 \times 10^{-9}F$	$9,675 \times 10^{-9}F$
U_rel_ar 80%	$9,279 \times 10^{-9}F$	$9,342 \times 10^{-9}F$	$9,385 \times 10^{-9}F$	$9,521 \times 10^{-9}F$	$9,568 \times 10^{-9}F$

Fonte: elaborada ao longo do trabalho.

5.4.2 Obtenção Teórica da Corrente de Fuga em uma Linha de Transmissão

Parte da validação do modelo desenvolvido está vinculada à teoria das superfícies gaussianas - Superfícies fechadas (BUTKOV, 1983), e para o modelo matemático PI modificado, se partirá da suposição que a corrente de fuga é motiva pela perda de corrente nas capacitâncias surgidas através dos isoladores e pelo efeito da terra, sempre lembrando que existem 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 carcaças na Terra e a outra na própria LT), como mostra a figura 5.14, seguinte

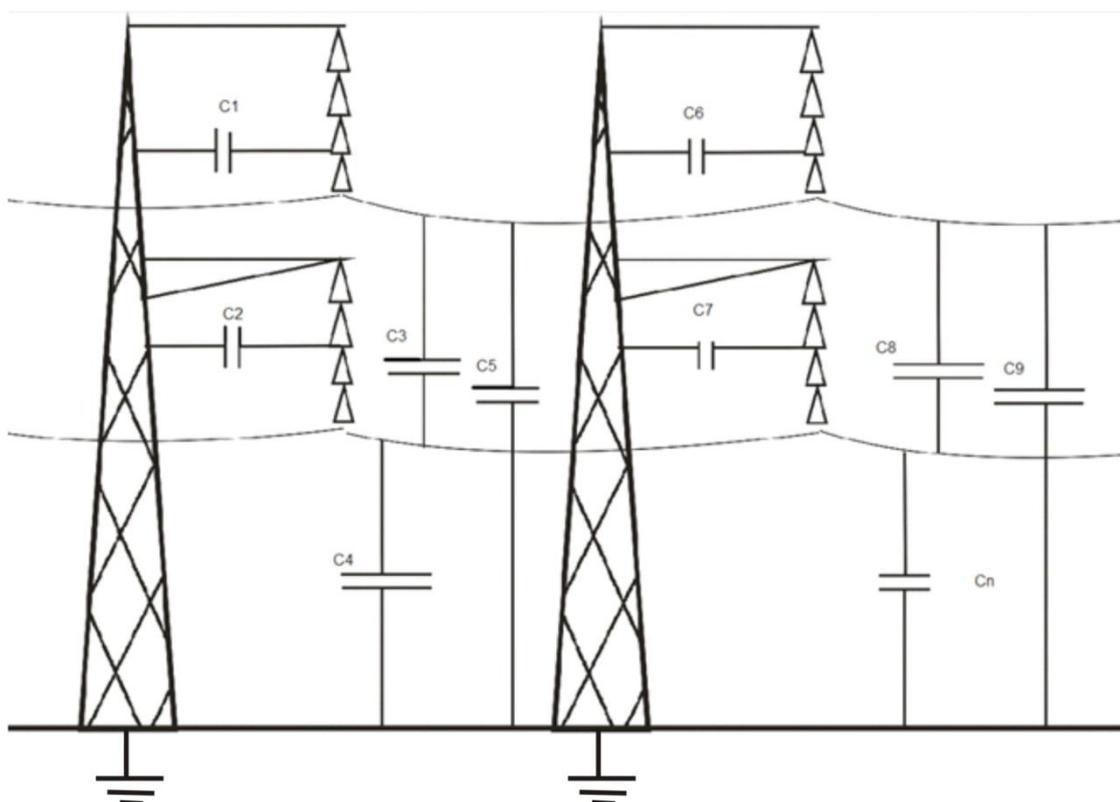


Figura 5.14 – Capacitâncias intrínsecas da linha, em seus isoladores, entre fases e entre fase e terra.

Fonte: elaboração própria

Neste caso a corrente de fuga 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 corrente de fuga teórica, de acordo com a figura 5.14, corresponde a equação 5.1

$$I_{Fuga} = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + \dots + I_{Cn} \quad (5.1)$$

A figura 5.15, apresenta o bloco responsável pelo somatório das correntes conseqüentes das capacitâncias naturais dos isoladores e da própria terra

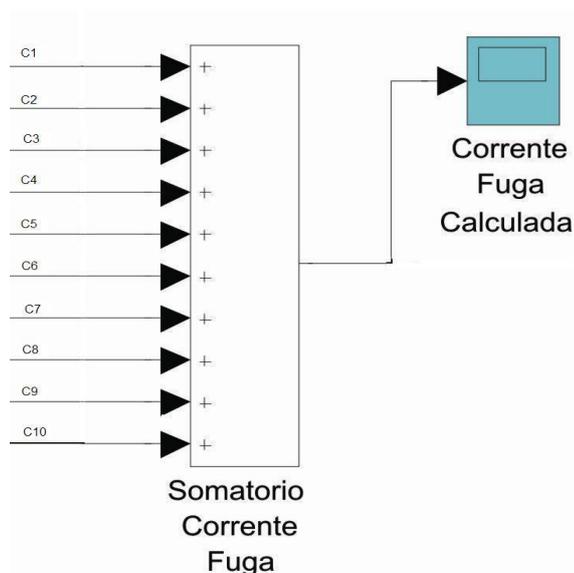


Figura 5.15 – Diagrama responsável pela soma das correntes que atravessam as capacitâncias da LT, modelo matemático em blocos

Fonte: elaboração própria

Já a figura 5.16 ilustra a corrente de fuga teórica (calculada) gerada pelo modelo com apenas um ciclo.

Um fato importante, é que o tempo de processamento estar em torno 5s no *Personal Computer* utilizado para a simulação (configuração já descrita), o que para monitoração de falhas é um excelente tempo.

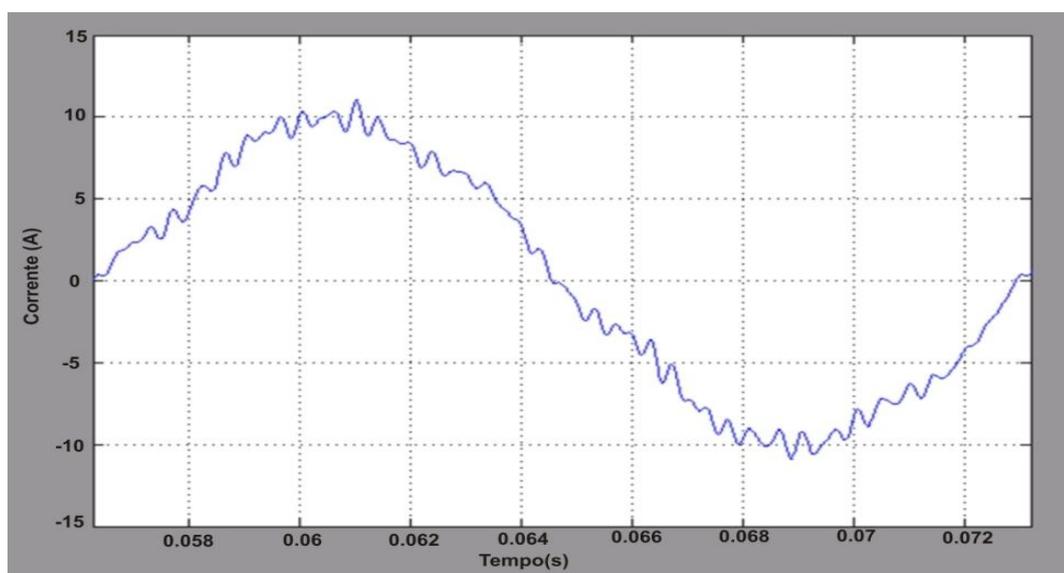


Figura 5.16 – Forma de onda, apenas um ciclo, para a corrente fuga calculada pelo modelo

A corrente de fuga para as três fases fornecidas pelo modelo PI modificado está ilustrada na figura 5.17.

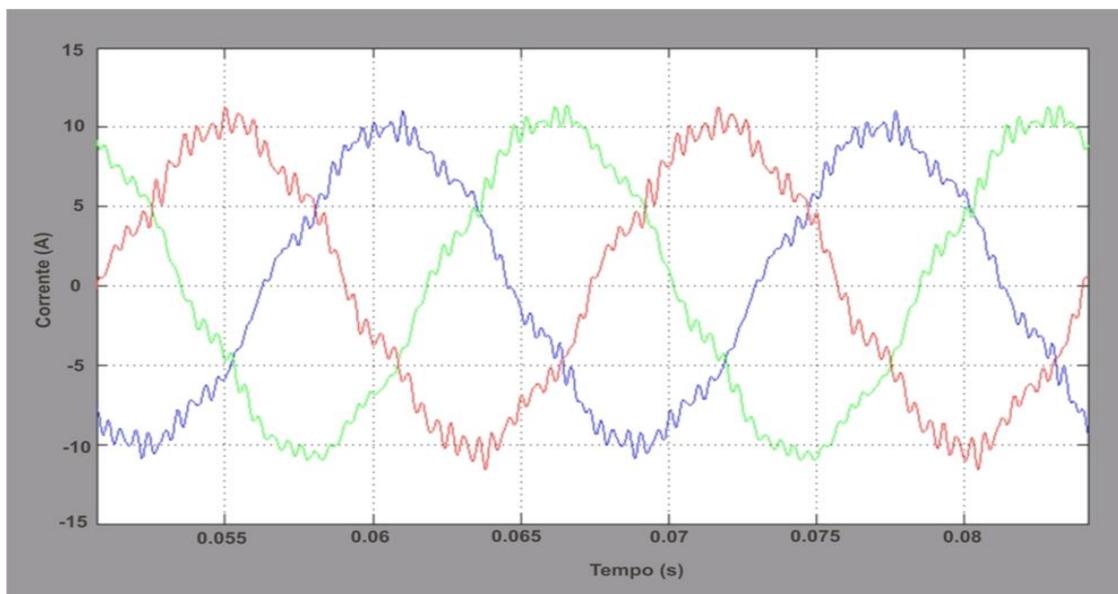


Figura 5.17 – Forma de onda para corrente de fuga calculada pelo modelo PI modificado

Outro ponto importante nesta pesquisa, é a decomposição harmônica da corrente de fuga, pois acredita-se que por meio desta, é possível se inferir características da LT, e até mesmo se localizar falhas, principalmente se estas falhas são decorrentes pela variação da capacitância na linha, de uma maneira geral no sistema, por problemas no isolamento entre a linha e as torres (Gomes, 2006).

A figura 5.18 ilustra o comportamento da decomposição harmônica, para a forma de onda, mostrada por meio da figura 5.16. As frequências da decomposição harmônica variam de 60 Hz até 2940 Hz, informando ainda o valor da distorção harmônica total (THD). Os algoritmos apresentados são rápidos, levando em conta a quantidade de dados envolvidos e o principal foco do modelo, que é a monitoração para futura determinação de falhas no sistema de transmissão de energia elétrica.

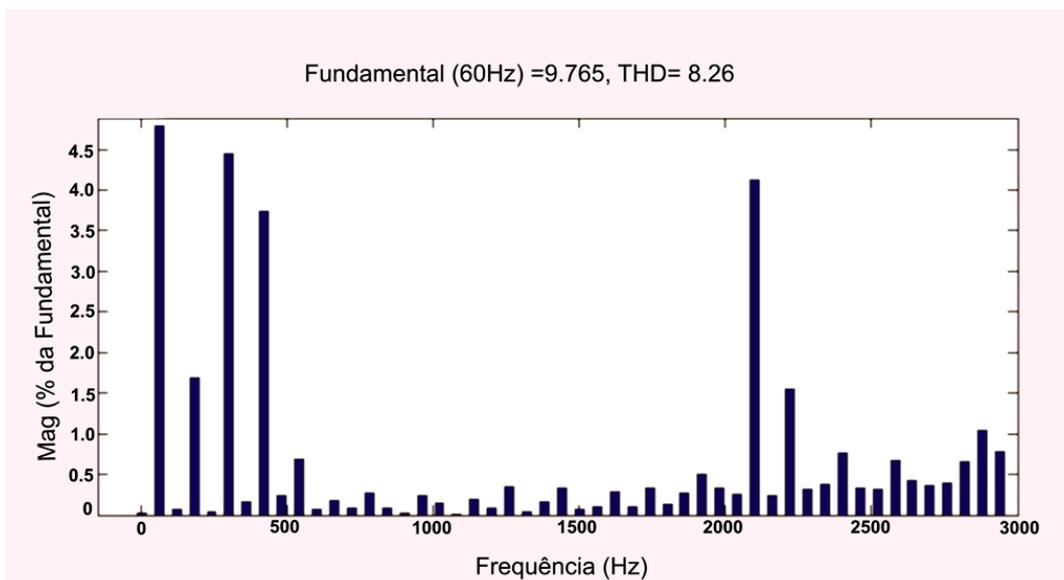


Figura 5.18 – Decomposição harmônica do sinal da corrente de fuga, mostrada pela figura 5.16

As primeiras simulações se mostram promissoras e condizem perfeitamente com as equações estudadas nos capítulos três e quatro. Além da possibilidade de se poder analisar, por intermédio do modelo o comportamento, tanto do sinal da corrente de fuga, quanto da sua decomposição harmônica. No entanto, o modelo matemático desenvolvido (PI modificado), necessita ser validado, para que se mostre sua fidelidade aos dados reais e sua confiabilidade.

CAPÍTULO 6.0 COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO

As linhas de transmissão são usadas para transmitir energia e sinais de um ponto a outro, ou seja, uma linha de transmissão básica conecta uma fonte a uma carga (HAYT JR, 1983). A continuidade dos serviços em linhas de transmissão é comprometida na ocorrência de falhas que podem acarretar desligamento da mesma. Uma das mais frequentes falhas em linhas de transmissão é a falta fase-terra. Dentre as diversas causas destes curtos-circuitos a que possui o maior número de ocorrências é aquela que percorre a cadeia de isoladores. Por isso, acredita-se que através da monitoração on-line dos parâmetros elétricos de tensão e correntes, em uma linha de transmissão, é possível obter indiretamente medidas de capacitância.

A capacitância equivalente de uma linha é um parâmetro que varia com o nível de isolamento da linha, pois é diretamente proporcional a permissividade do meio. Assim na falha de um isolador, por exemplo, a permissividade (ϵ) do isolador torna-se muito menor que a condutividade (σ), na frequência de operação da linha de transmissão (ω), ou seja: $\sigma \gg \omega\epsilon$ e o isolador passa a ser condutor, causando assim a passagem de uma corrente pelo isolador, corrente esta denominada corrente de fuga.

O texto, apresentado neste capítulo, consiste na descrição da metodologia aplicada para a aquisição das grandezas elétricas e meteorológicas de um sistema de potência, como por exemplo: tensão, corrente, potências ativas e reativas, harmônico de tensão e corrente, temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, radiação solar e umidade relativa do meio; além do confronto dos resultados obtidos no modelo matemático com dados reais (harmônico da corrente de fuga na linha de transmissão) em estudo, extraídos dos medidores. Também serão analisados os valores obtidos pelo modelo sem as influências das VA's e valores de capacitância fixos testados por outros métodos.

6.1 ESCOLHA DO TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão escolhida para monitoração foi a Guamá-Utinga – Miramar, pertencente ao Sistema de Transmissão Tucuruí 230 kV (TUC 86 – 3003R – 5), representado na figura 6.1. Porém o trecho monitorado foi somente entre as subestações (SE) do Guamá e do Utinga, pertencente ao sistema de transmissão da empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil-ELETRONORTE. Trecho este conhecido como Guamá-Utinga.

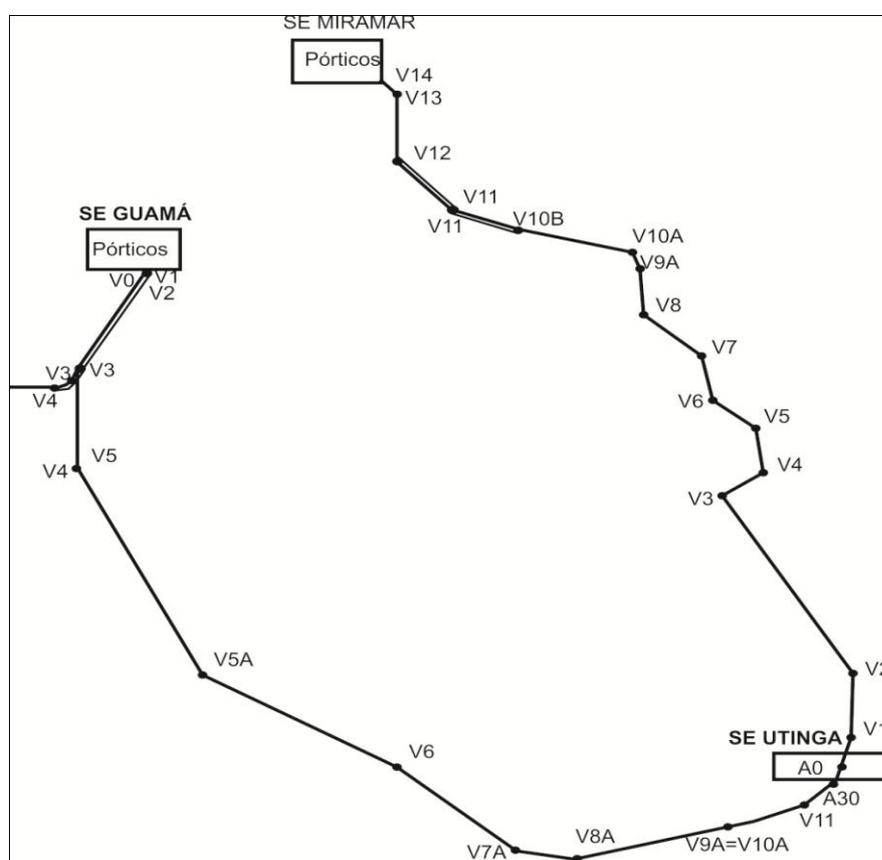


Figura 6.1 - Linha de transmissão, Guamá-Utinga - Miramar pertencente à Eletronorte

No trecho Guamá-Utinga foram encontradas um total de 50 torres, com distância média entre elas de $374,36m$, em um percurso total de $19.049,68 m$. A tabela 6.1, a seguir mostra o plano traçado do trecho Guamá-Utinga.

Os dados construtivos da linha de transmissão como tipos de estruturas das torres, número de vãos, pórticos, distâncias parciais e totais, direção e cota foram obtidos com o auxílio da Eletronorte.

Tabela 6.1 - Plano de Traçado do Sistema de Transmissão Tucuruí (LT 230 kV), trecho Guamá-Utinga.

TORRES	MARCOS	DEFLEXÕES	RUMOS	DISTÂNCIAS PARCIAIS (m)	DISTÂNCIAS PROGRESSIVAS (m)
PÓRTICO	PÓRTICO		67°58'25"NE	112,60	0,00
1	V-1	8°05'19"D	76°03'45"NE	98,58	112,60
2	V-2	41°13'35"D	62°42'40"SE	1.008,46	211,18
5	V-3	54°56'00"E	62°21'06"NE	1.121,39	1.219,64
8	V-4	10°07'07"E	52°13'59"NE	2.450,84	2.341,03
14	V-5	22°40'11"E	29°33'48"NE	3.198,44	4.791,87
22	V-6	15°46'18"D	45°20'06"NE	4.778,27	7.981,31
33	V-7A	27°45'00"E	17°25'06"NE	881,71	12.759,58
35	V-8A	27°20'11"E	9°54'05"NW	3.672,48	13.641,29
45	V-9 ≡ V-10	25°03'04"E	34°57'09"NW	1.389,76	17.313,77
49	V-11	29°59'46"E	64°56'00"NW	286,92	18.989,45
50	V-12	-	-	60,23	19.049,68
-	-	-	-	-	-

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE

A tabela 6.2, em seguida apresenta a distância média entre as torres de um marco ao outro.

Tabela 6.2 - Distância média entre as torres do trecho Guamá-Utinga

TORRES	MARCOS	Distância Média entre as Torres	TORRES	MARCOS	Distância Média entre as Torres
PÓRTICO	PÓRTICO	0,00	22	V-6	398,68
1	V-1	112,6	33	V-7A	434,388
2	V-2	98,58	35	V-8A	440,855
5	V-3	336,153	455	V-9=V-10	367,248
8	V-4	373,796	49	V-11	347,19
14	V-5	408,473	50	V-12	286,92

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE

A tabela 6.3 exibe o tipo, a quantidade e a numeração das torres no trecho.

Tabela 6.3 - Quantidade e tipo de torres do trecho Guamá - Utinga.

TIPO	Nº FATORES	Nº TOTAL DE TORRES DESTE TRECHO
SOD	3,4,6,7,9,10,11,13,21,36,37,38,39	39
A30D	8,22	7
A55FLD	1,2,5,50	4

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE

O tipo de torre mais presente no trecho Guamá-Utinga é a SOD, ilustrada na figura 6.2, abaixo:

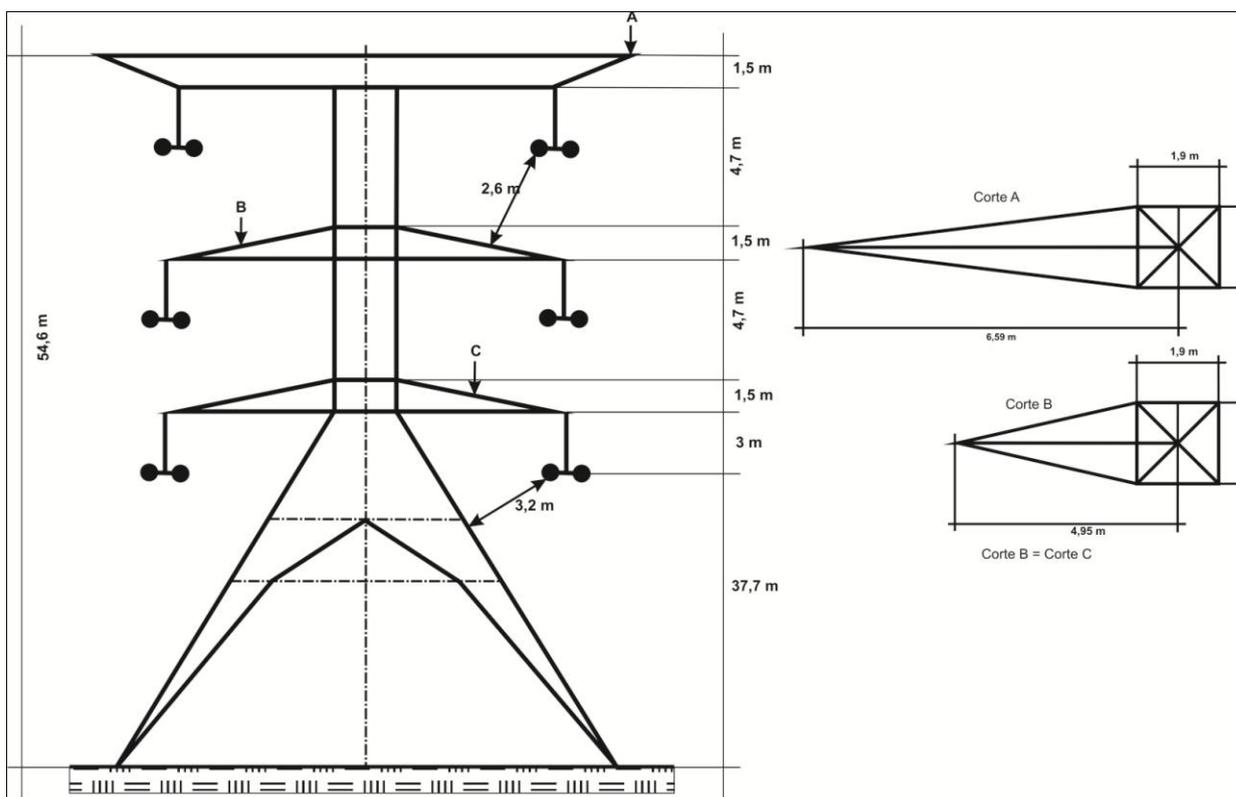


Figura 6.2 – Torre e distância entre as linhas para a LT/ELETRONORTE tipo SOD – Guamá – Utinga. Vista frontal.

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil - ELETRONORTE

6.2 MONITORAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE

Inicialmente serão apresentados os medidores elétricos e as estações meteorológicas remotas (EMR) que executaram a aquisição de dados para a monitoração da LT, suas características de transmissão dos dados, e ainda o local onde estão instalados. Em seguida será descrito o projeto da transmissão de dados, destes medidores até o computador onde tais dados foram processados.

6.2.1 Monitoração das variáveis elétricas

A Monitoração *on-line*, de Linhas de Transmissão é realizada em tempo real, para condições de operação da LT pela monitoração da corrente de fuga, considerando as variáveis ambientais. Para a medição da corrente de fuga estão instalados dois medidores de energia modelo 1133A da Arbiter, um, na sub-estação (SE) Guamá e outro na SE Utinga, a figura 6.3 mostra a casa de relé da SE Guamá, no qual um dos medidores está instalado.



Figura 6.3 - Casa de relé da sub-estação Guamá, onde está instalado um medidor PS.

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE

Para a verificação das condições ambientais, estão instaladas duas Estações Meteorológicas remotas – EMR's da Vaisala, em duas torres do trecho da LT entre as SE's Guamá e Utinga. Os dados fornecidos por estes medidores deverão ser transmitidos para um computador através da *intranet* da ELETRONORTE, conforme sugere o esquema da figura 6.4, seguinte, onde serão realizadas as análises das condições da LT.

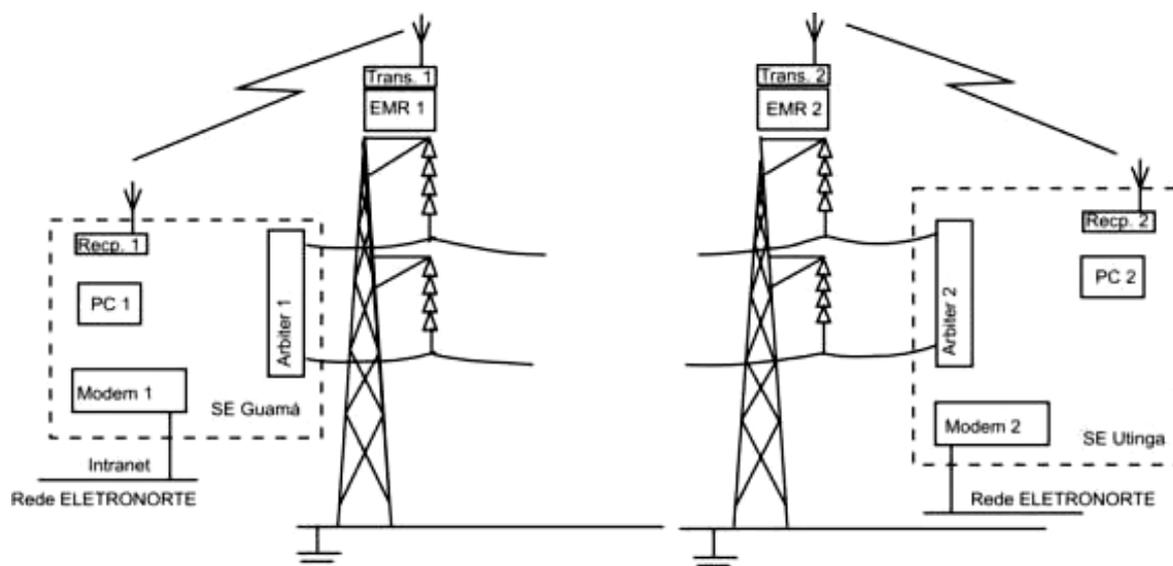


Figura 6.4 - Esquema da transmissão de dados dos medidores.

Fonte: Elaboração Própria

Os medidores de energia instalados nas SE's possuem IP e saída através de cabo par trançado padrão UTP com conexão RJ45 que permite conectá-los diretamente à rede de computadores, conforme mostra a figura 6.5, a seguir

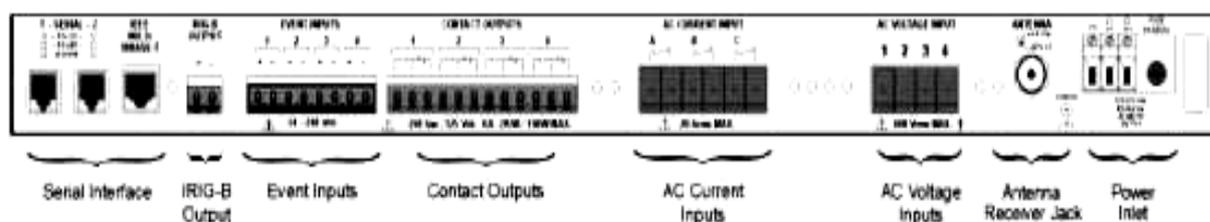


Figura 6.5 - Detalhes do medidor de energia Arbiter, apresentado as conexões para saída de dados.

Os dois medidores PS modelo 1133A estão instalados cada um, em uma das casas de relés da SE's Guamá e Utinga. Suas medidas são sincronizadas através de GPS. Os sinais

de corrente e tensão medidos são obtidos dos TP's e TC's de proteção. Os dados são armazenados em um computador conectado ao medidor através de cabo para interface serial conectado a terminais RJ45, mostrado na figura 6.5 (anterior). Cada medidor possui um número IP/TCP. Assim os medidores podem transmitir os dados através da *intranet*.

6.2.2 Monitoração das variáveis ambientais

A obtenção e o tratamento dos dados do PS e da estação meteorológica são realizados por um computador industrial, do tipo rack 19 com as seguintes características:

- ❖ Processador Core 2 quad E2160 1.8GHz;
- ❖ Memória RAM de 2 Gigas;
- ❖ HD de 250 Gb;

As EMRs transmitem seus sinais via rádio a uma frequência de 2,4 GHz em um raio de até 16 km através de antenas tipo 'Yag-Uda'. Este sinal de rádio é recebido por uma antena receptora ligada a um cabo coaxial, ilustrada pela Figura 6.6 (a), e fornecido ao computador através de um conversor, mostrado na Figura 6.6 (b). Com os dados no PC este pode ser transmitido usando a *intranet*. Portanto, integrando o sistema de comunicação são necessários três (3) computadores: um para fazer a análise das condições da LT e outros dois para receber os dados das EMRs e disponibiliza-los na *intranet*. A possibilidade de dispor os dados na internet foi descartada para facilitar a segurança da rede corporativa de computadores da ELETRONORTE (*intranet*).



(a)



(b)

Figura 6.6 - Detalhe da interface para transmissão de dados das EMRs: (a) Antena receptora e cabo coaxial, (b) Conversor para padrão RS232I

A antena receptora está instalada na torre da sala de comunicação da SE, o computador para recebimento dos dados e conexão com a *intranet* está instalado na sala de comunicações, sala esta visualizada por meio da figura 6.7. Quanto aos medidores de energia, estão instalados nas casas de relés das SE's Guamá e Utinga, estes também são conectados a rede *intranet* da empresa. Com isso, se tem o sistema de aquisição de dados todo utilizando a rede corporativa da empresa, fazendo com que a coleta e transmissão de dados ganhe em velocidade de aquisição



Figura 6.7 - Sala de comunicação onde será instalado o computador para recebimento dos dados.

Cada EMR instalada nas torres de linha de transmissão possui uma antena transmissora direcionada para uma antena receptora instalada na torre de comunicação da SE mais próxima. Neste caso, as EMR's após coletarem as informações ambientais e armazená-las em um *datalogger*, enviam os dados a um dos computadores descritos no início desta seção. Este computador por estar ligado à rede *intranet* da ELN possibilita o acesso dessas informações de qualquer outro terminal habilitado dentro da empresa.

Os dados adquiridos agora seguem juntos com os coletados pelos medidores para compor o banco de dados para inserção no modelo matemático.

6.2.3 Procedimentos para substituição dos dados no Modelo Matemático

Inicialmente o modelo matemático precisa ser alimentado com os dados coletados do *Power SentinelTM 1133A*, da SE Utinga, isto é, os dados dos harmônicos de tensão e corrente, e ainda, os dados da EMR Utinga.

Os resultados fornecidos pelo modelo são as tensões e correntes provenientes da SE Guamá, além da corrente de fuga, que neste caso, de acordo com o teorema das superfícies de Gauss, pode-se determinar, a partir da subtração da corrente proveniente da SE Guamá e SE Utinga. Esses resultados teóricos (calculados) são confrontados com os dados reais coletado na SE Guamá, e com a corrente de fuga medida.

Os dados coletados passam por algumas etapas até serem inseridos no modelo. Primeiramente é a coleta dos dados dos medidores, estes fornecem 300 dados por segundo, que são 50 harmônicos de amplitude e 50 harmônicos de fase, e isso para apenas uma das fases, das 3 (três) que o trecho possui. Todos esses dados são recebidos no formato *CSV* e transformados para o *TXT*. Em seguida, é a vez dos dados da estação meteorológica; também em formato específico e transformado em *TXT*, e para serem mesclados em um único vetor, com exatos 304 componentes, que serão correlacionados em rotinas programadas em *MATLAB*, posteriormente esses dados são enviados ao *SIMULINK*, que é um complemento do *MATLAB*, onde são executadas simulações.

Todas as figuras e tabelas apresentadas neste capítulo, a partir deste ponto, foram elaboradas e montadas ao longo deste estudo.

6.3 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DA CORRENTE DE FUGA

Como já foi citado anteriormente, parte da validação do modelo desenvolvido está vinculada à teoria das superfícies gaussianas para superfícies fechadas, a qual assegura que a soma algébrica das corrente que entram e saem de uma superfície fechada é igual a zero (BUTKOV, 1983. p.420)

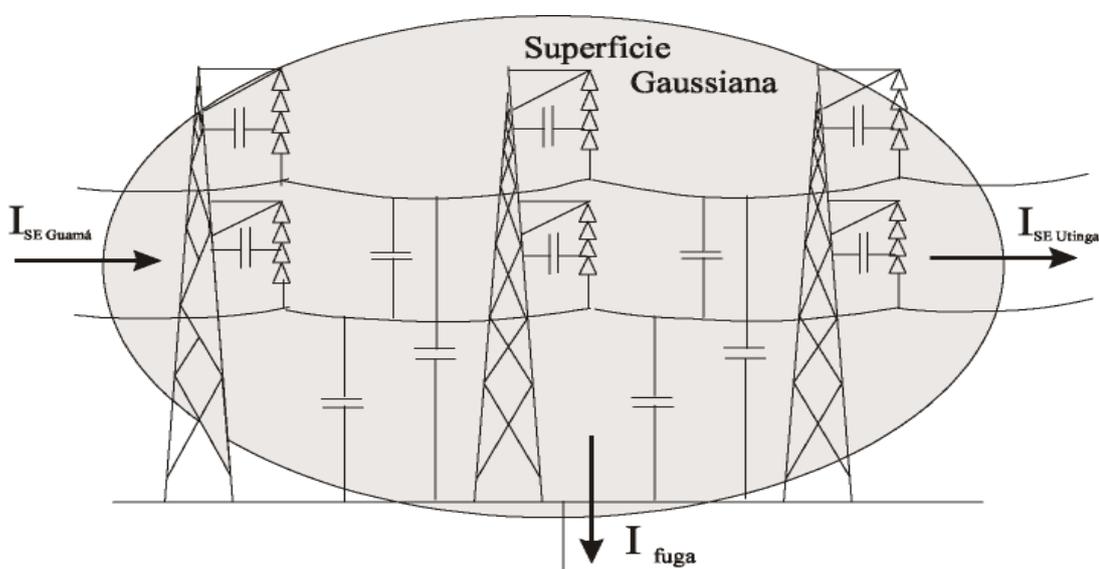


Figura 6.8 – Aplicação do teorema de Gauss para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão.

Aplicando este teorema em um trecho de uma linha de transmissão, pode-se obter a corrente de fuga desta linha, como sugerido pela figura 6.8. Com os analisadores *PS* sincronizados instalados nas subestações de Guamá e Utinga, obtendo valores da decomposição harmônica de corrente, pôde-se obter, experimentalmente, a corrente de fuga de acordo com a equação 6.1.

$$I_{Fuga} = I_{SE_{início}} - I_{SE_{final}} \quad (6.1)$$

Para validar o modelo utilizado, inicialmente foi feita uma rotina baseada na idéia do teorema das superfícies fechadas, de modo que esta forneça a corrente de fuga a partir da subtração dos dados reais da corrente de fase A da SE início (Guamá) (50 harmônicos) pela da SE final (Utinga) (50 harmônicos).

A figura 6.9 (a seguir), busca ilustrar a corrente de fuga gerada pela rotina em apenas um ciclo, é bom lembrar que esta é a corrente de fuga medida.

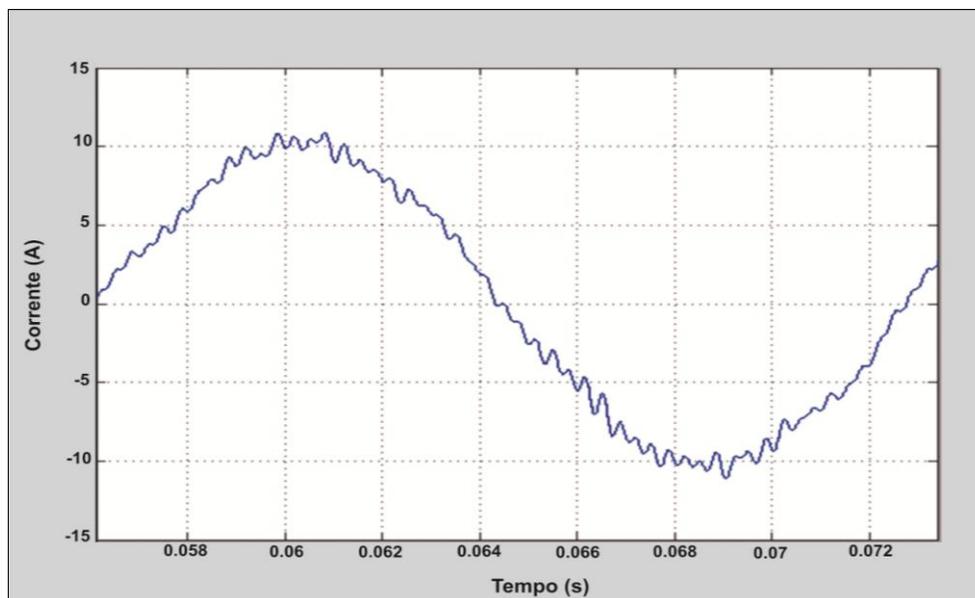


Figura 6.9 – Forma de onda, apenas um ciclo, para a corrente fuga medida experimentalmente

A corrente de fuga para as três fases fornecidas pelo equipamento PS está ilustrada na figura 6.10, seguinte

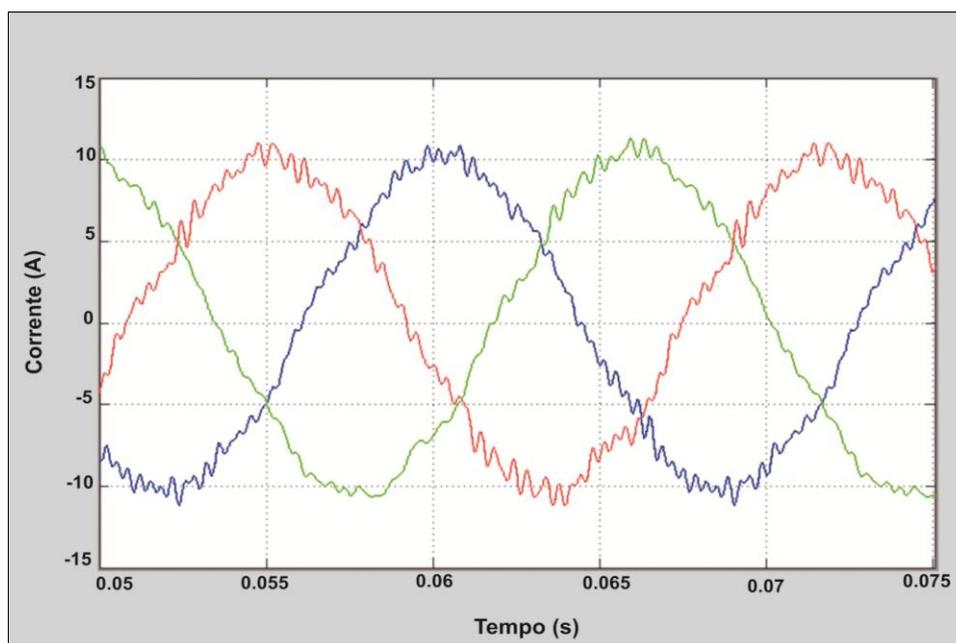


Figura 6.10 – Forma de onda para corrente de fuga medida pelo PS

A decomposição harmônica da corrente de fuga medida é ilustrada na figura 6.11, referente ao sinal da figura 6.9.

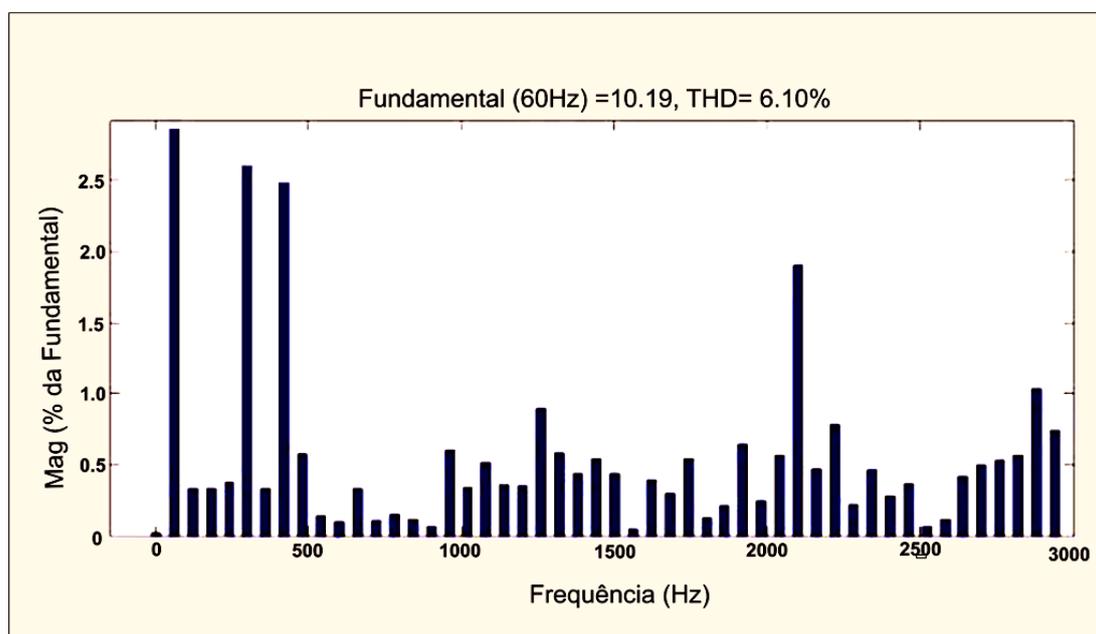


Figura 6.11 Decomposição harmônica da forma de onda da corrente de fuga, mostrada pela figura 6.9

6.3.1 Confronto entre os valores medidos e os calculados pelo modelo

Neste momento será apresentada a comparação entre os valores determinados pelo modelo e os valores coletados em campo, por meios dos medidores de energia instalados nas SE's, a fim de validar e comprovar a eficiência deste modelo matemático. Inicialmente foi verificada a fidelidade da forma de onda de tensão e em seguida da corrente elétrica, e só posteriormente a corrente de fuga. É bom lembrar o fato de que os valores de tensão e corrente utilizados para validação do modelo são dados reais, pois o modelo tem como entrada dados reais (tensão e corrente elétrica) da SE Utinga, e simulará como resposta formas de onda e decomposições harmônicas que em teoria seria a resposta que deve-se ter da SE Guamá, como se tem um medidor de energia PS na SE Guamá, basta comparar as respostas do modelo com os dados coletados na SE Guamá.

6.3.1.1 Comparação de valores para Tensão e Corrente Elétrica na Linha de Transmissão

Na figura seguinte (6.12), é apresentada a superposição entre as formas de onda para a tensão medida e a calculada, em apenas um ciclo (para facilitar a visualização)

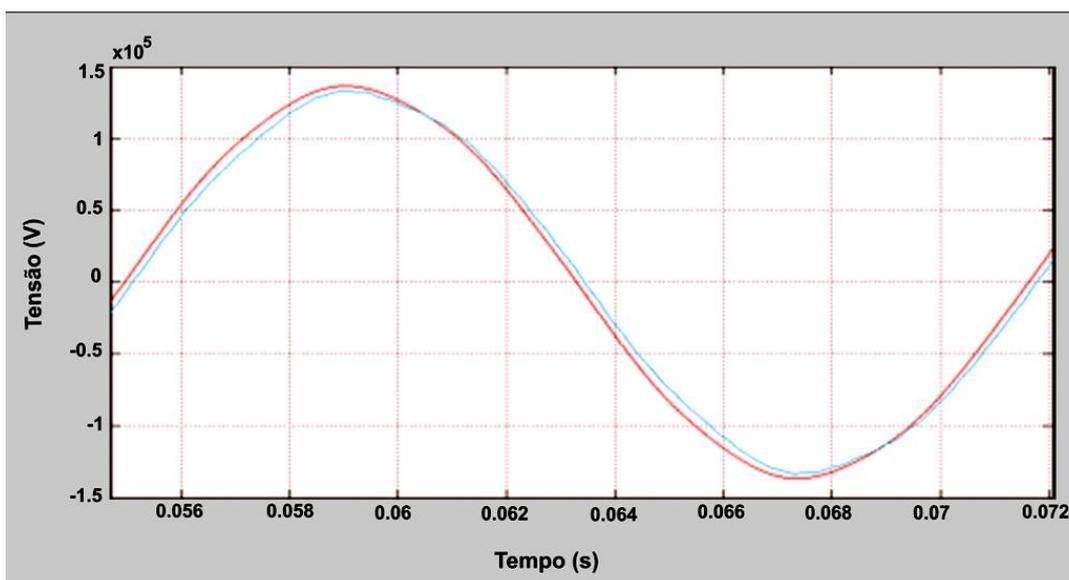


Figura 6.12 - Superposição das formas de onda da tensão calculada (azul) e medida (vermelho)

É possível notar, uma menor amplitude na tensão calculada (em azul), provavelmente devido ao fato de que cada trecho é alimentado pelo seu antecessor, e esse comportamento recursivo faz com que existam perdas na amplitude, em relação à tensão medida (em vermelho), como se observa, por meio da ampliação no ponto de maior amplitude, na figura 6.13.

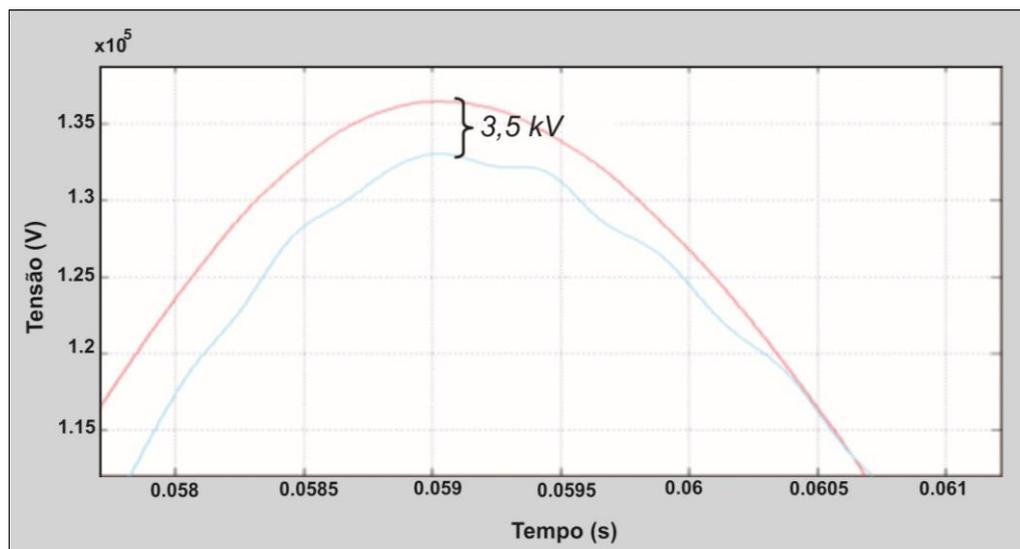


Figura 6.13 – diferença de amplitude das formas de onda de tensão medida e calculada

No entanto, a verificação cuidadosa na escala mostra um pico positivo de tensão de $1,5 \times 10^5 V$ ou $150 kV$, e a diferença entre as amplitudes das tensões medidas e calculadas são de aproximadamente $3,5 kV$, e o erro médio quadrático (MSE - *mean square erro*) de 0,0233, que é bastante aceitável. A figura 6.14 mostra as três fases da LT, com suas respectivas correspondentes calculadas (os sinais de menor amplitudes foram calculados pelo modelo), com o MSE de 0,0279.

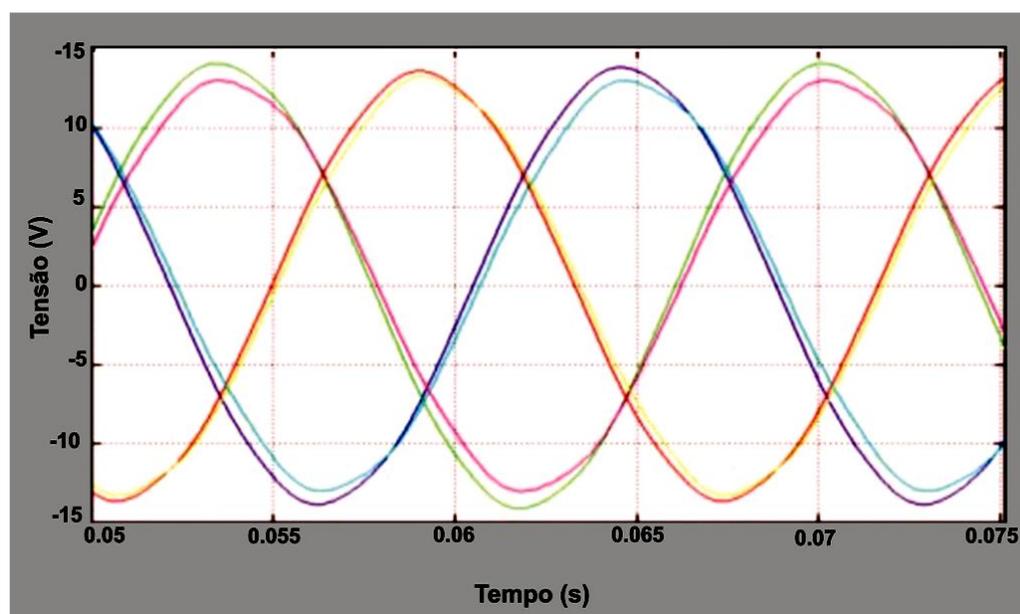


Figura 6.14- Formas de onda da tensão com as três fases medidas e calculadas pelo modelo

Já para a corrente elétrica, obteve-se um resultado bem mais preciso, como ilustra a figura 6.15, isolou-se apenas uma das fases da corrente para comparação entre a forma de onda medida (em vermelho) e a forma de onda calculada (em azul), a seguir

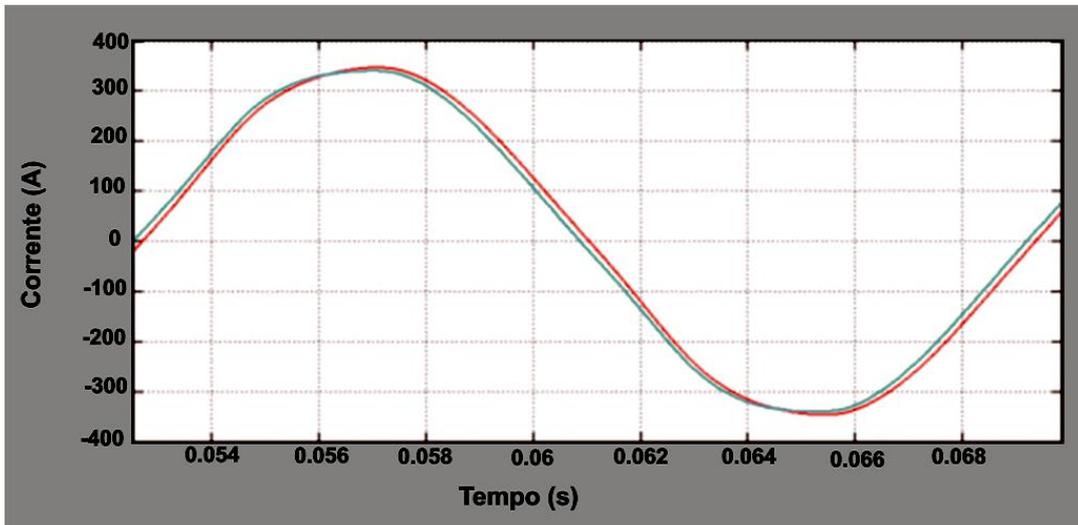


Figura 6.15 - Superposição das formas de onda da corrente calculada (azul) e medida (vermelho)

As amplitudes dos sinais tem uma diferença de até 5A, o que para uma amplitude de quase 400, se tem um MSE de aproximadamente 0,01428, novamente algo aceitável, como mostra a figura 6.16, abaixo.

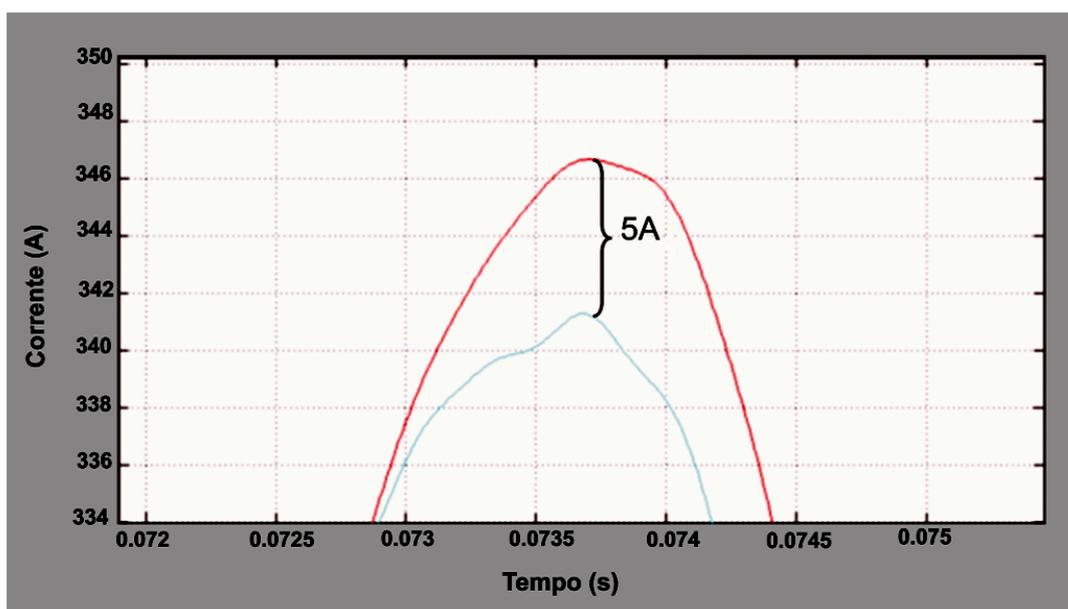


Figura 6.16 - Diferença de amplitude das formas de onda de tensão medida e calculada

É notado novamente uma pequena defasagem de um pouco mais de 1 grau entre os sinais, provavelmente tendo a mesma origem da descrita na tensão. Por meio da figura 6.17 é possível visualizar o comportamento da corrente para as três (3) fases da LT.

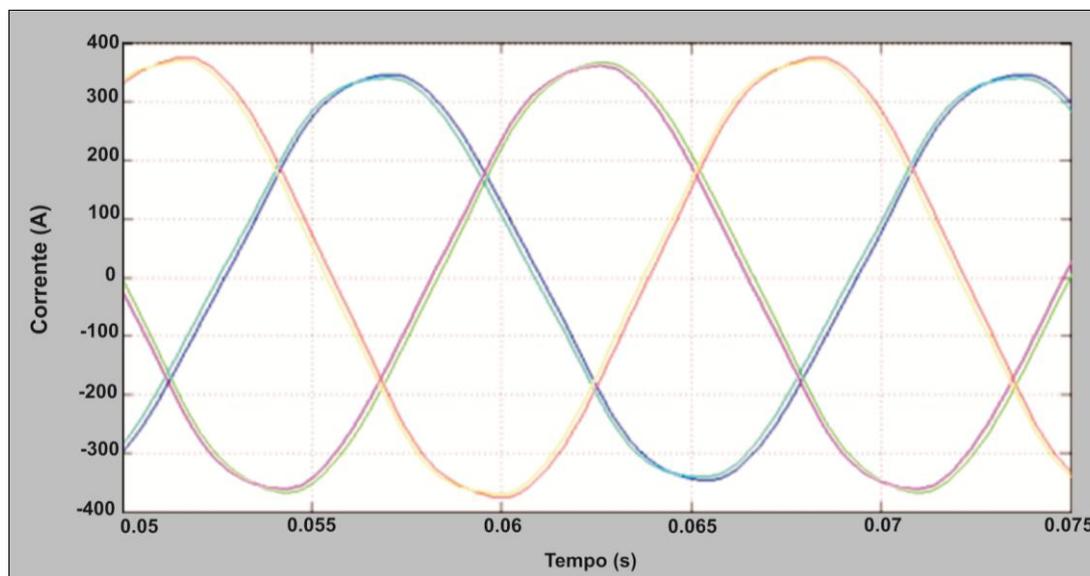


Figura 6.17 - Formas de onda da tensão com as três fases medidas e calculadas pelo modelo

Finalmente, o confronto dos valores determinado pelo modelo matemático e os medidos para a corrente de fuga, com o agravante, de que nessas simulações serão apresentados os valores de variáveis ambientais coletados pela EMR.

6.3.2 Validação do modelo matemático pela forma de onda da corrente de fuga.

Inicialmente serão comparados as formas de onda da corrente de fuga, em seguida a decomposição harmônica destes sinais, seguindo o mesmo procedimento apresentado pela tensão e corrente, e para apenas um ciclo, sempre que possível fazendo a superposição dos sinais para uma melhor visualização.

A figura 6.18 (a seguir) ilustra o comportamento da corrente de fuga medida (em azul) e a corrente de fuga calculada (em vermelho), esses dados foram coletados no dia 11 de novembro de 2008, às 9h20min com temperatura ambiente 33°C, umidade relativa do ar

65%, velocidade do vento a 10m solo 10 m/s, direção do vento 80 oNV, radiação solar de 380 W/m², para um MSE de 0,0681, pequeno e perfeitamente aceitável

O valor da capacitância calculada pelo modelo foi de $107,18 \times 10^{-9} F$ enquanto que o valor da resistência foi de 1,276 Ω .

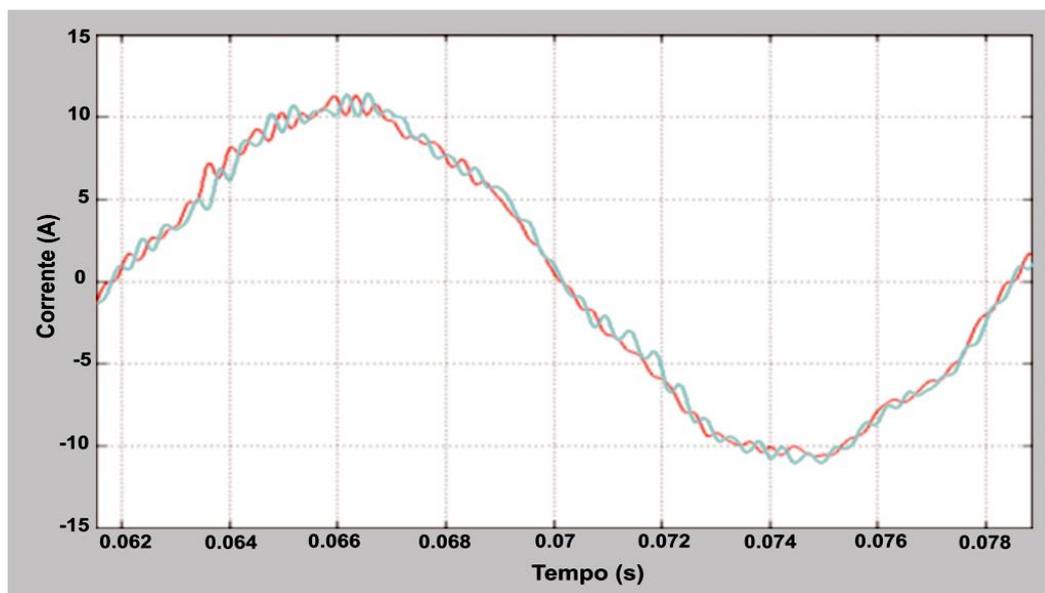


Figura 6.18 - Superposição das formas de onda da corrente calculada (azul) e medida (vermelho)

Para a decomposição harmônica será mostrado inicialmente a da corrente de fuga medida, representada na figura 6.19, seguinte

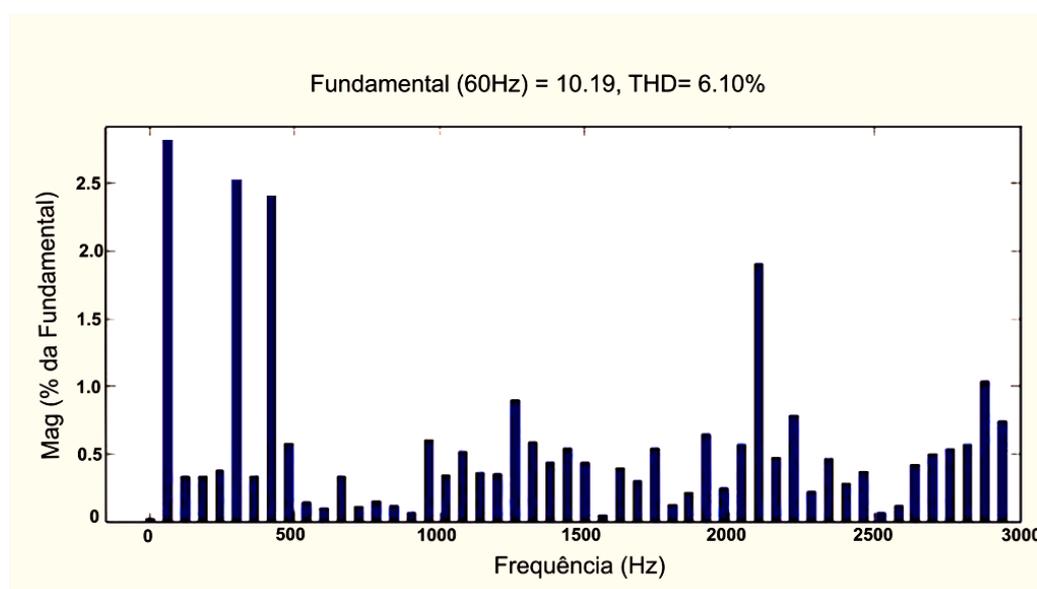


Figura 6.19 – Decomposição harmônica da corrente de fuga medida na LT

A seguir , através da figura 6.20, é possível verificar a decomposição harmônica para a corrente de fuga calculada pelo modelo

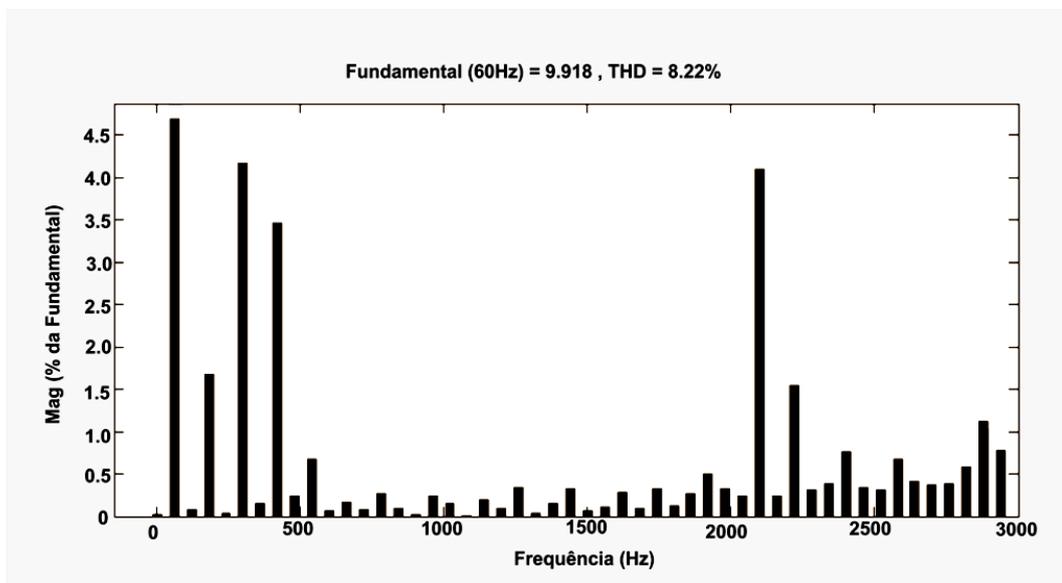


Figura 6.20 - Decomposição harmônica da corrente de fuga calculada na LT

Pode-se verificar, que apesar de na decomposição harmônica, as magnitudes da figura 6.20 (corrente fuga calculada) serem maiores que as magnitudes da figura 6.19 (corrente de fuga medida) os eventos em que se tem maiores magnitudes dentro do espectro estes aparecem claramente, como é o caso das frequências próximas da frequência fundamental (60Hz), no entanto outras também possuem uma grande magnitude, por exemplo as frequência de 2100Hz, 2220 Hz e 2880Hz.

As tabelas 6.4 e 6.5 (seguintes), são os valores correspondentes ao percentual em relação a frequência fundamental (100%), e o ângulo de fase, para corrente de fuga medida e calculada, isto é, a representação percentual em relação a harmônica principal das figuras 6.19 e 6.20, respectivamente.

A tabela 6.4 a seguir, informa os valores percutuais com os seus respectivos harmônicos, a marcação em vermelho são as amplitudes mais evidentes, de acordo com a corrente de fuga medida (figura 6.19)

Tabela 6.4 - Distribuição espectral da corrente de fuga medida para o dia 11 de Novembro de 2008 às 15h20min temperatura ambiente 33°C, velocidade do vento (10m) 10 m/s, Umidade relativa do meio 65%, direção do vento 88oNV, 380 W/m

(DC):	0.02%	(h10):	0.10%	(h20):	0.35%	(h30):	0.12%	(h40):	0.28%
Fnd):	100.00%	(h11):	0.33%	(h21):	0.90%	(h31):	0.21%	(h41):	0.37%
(h2):	0.33%	(h12):	0.11%	(h22):	0.58%	(h32):	0.65%	(h42):	0.07%
(h3):	0.33%	(h13):	0.15%	(h23):	0.44%	(h33):	0.25%	(h43):	0.12%
(h4):	0.38%	(h14):	0.12%	(h24):	0.55%	(h34):	0.57%	(h44):	0.42%
(h5):	2.65%	(h15):	0.07%	(h25):	0.44%	(h35):	1.90%	(h45):	0.50%
(h6):	0.33%	(h16):	0.61%	(h26):	0.04%	(h36):	0.47%	(h46):	0.53%
(h7):	2.52%	(h17):	0.34%	(h27):	0.39%	(h37):	0.79%	(h47):	0.57%
(h8):	0.58%	(h18):	0.52%	(h28):	0.30%	(h38):	0.22%	(h48):	1.04%
(h9):	0.14%	(h19):	0.36%	(h29):	0.54%	(h39):	0.46%	(h49):	0.74%

A tabela 6.5 a seguir, informa os valores percentuais com os seus respectivos harmônicos, a marcação em vermelho são as amplitudes mais evidentes, de acordo com a corrente de fuga calculada (figura 6.20).

Tabela 6.5 - Distribuição espectral da corrente de fuga calculada para o dia 11 de Novembro de 2008, às 15h20min temperatura ambiente 33°C, velocidade do vento (10m) 10 m/s, Umidade relativa do meio 65%, direção do vento 88o NV, 380 W/m²

(DC):	0.03%	(h10):	0.07%	(h20):	0.09%	(h30):	0.12%	(h40):	0.76%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.17%	(h21):	0.35%	(h31):	0.27%	(h41):	0.34%
(h2):	0.08%	(h12):	0.08%	(h22):	0.04%	(h32):	0.50%	(h42):	0.31%
(h3):	1.67%	(h13):	0.26%	(h23):	0.16%	(h33):	0.33%	(h43):	0.67%
(h4):	0.04%	(h14):	0.09%	(h24):	0.33%	(h34):	0.25%	(h44):	0.42%
(h5):	4.43%	(h15):	0.03%	(h25):	0.07%	(h35):	2.10%	(h45):	0.36%
(h6):	0.16%	(h16):	0.24%	(h26):	0.10%	(h36):	0.24%	(h46):	0.38%
(h7):	3.72%	(h17):	0.15%	(h27):	0.28%	(h37):	1.54%	(h47):	0.65%
(h8):	0.24%	(h18):	0.00%	(h28):	0.09%	(h38):	0.31%	(h48):	1.03%
(h9):	0.68%	(h19):	0.19%	(h29):	0.32%	(h39):	0.38%	(h49):	0.77%

A tabela 6.5 e referente a distribuição harmônica, mostrada na figura 6.20, se pode observar facilmente que mesmo na decomposição harmônica a corrente de fuga produzida a partir do modelo matemático PI modificado, tendo uma boa fidelidade quando comparado com dados reais da tabela 6.4, o erro MSE entre todas as componentes é de 0,814, no entanto quando verificamos apenas para as altas frequências, que são as frequências que podem determinar a localização de falhas em cadeias de isoladores esse erro cai para 0,0476. Entretanto, é necessário, analisar o modelo quanto a sua eficiência diante das modificações ambientais, por isso serão feitas comparações com situações ambientais distintas.

Os dados utilizados continuaram a ser os do dia 11 de novembro de 2008, porém em horários diferentes, e que se tenha condições ambientais diferentes.

Inicialmente monitorou-se a linha no horário de 08h40min com uma temperatura ambiente 25°C , umidade do ar de 71% , radiação solar $200\text{W}/\text{m}^2$, velocidade do vento $6\text{m}/\text{s}$ e direção do vento 100oNV . O valor da capacitância calculada pelo modelo foi de $104,98 \times 10^{-9}\text{F}$ enquanto que o valor da resistência elétrica foi de $1,19016 \Omega$.

A figura 6.21 (abaixo), mostra o comportamento da corrente de fuga calculada e medida, para as características descritas acima

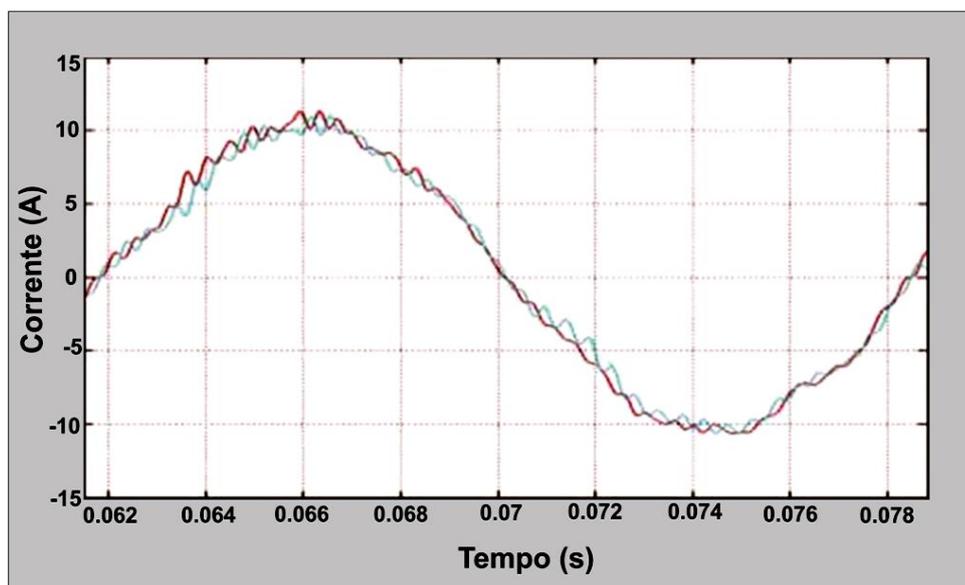


Figura 6.21 - Super posição para as formas de onda das correntes de fuga calculada (azul) e a medida (vermelho), para as condições ambientais temperatura ambiente 25°C , umidade do ar de 71%, radiação solar $200\text{W}/\text{m}^2$, velocidade do vento $6\text{m}/\text{s}$ e direção do vento 100oNV

É possível notar uma pequena diminuição na amplitude da corrente de fuga calculada, isso se dá a alta sensibilidade da equação do modelo a umidade relativa do meio, para esta simulação a umidade relativa chegou a 71%.

A figura 6.22 mostra a decomposição harmônica do sinal correspondente a corrente de fuga medida (referente a figura 6.21), e especificada na tabela 6.6 (a seguir)

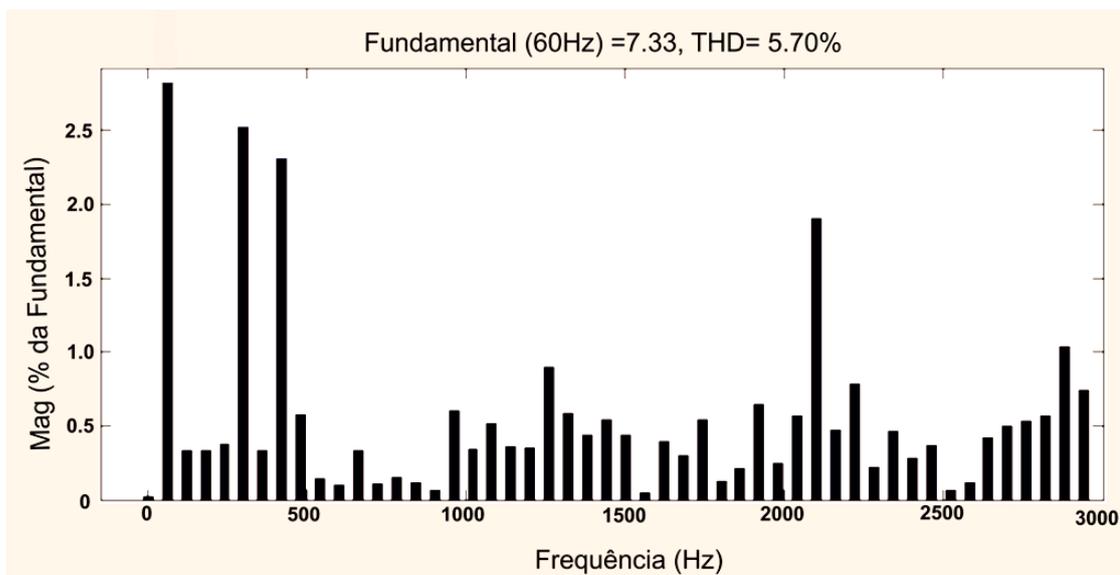


Figura 6.22 - Decomposição espectral da corrente de fuga medida mostrada na figura 6.26

Tabela 6.6 - Distribuição espectral da corrente de fuga medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s²

(DC):	0.02%	(h10):	0.10%	(h20):	0.35%	(h30):	0.12%	(h40):	0.28%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.33%	(h21):	0.90%	(h31):	0.21%	(h41):	0.37%
(h2):	0.33%	(h12):	0.11%	(h22):	0.58%	(h32):	0.65%	(h42):	0.07%
(h3):	0.33%	(h13):	0.15%	(h23):	0.44%	(h33):	0.25%	(h43):	0.12%
(h4):	0.38%	(h14):	0.12%	(h24):	0.55%	(h34):	0.57%	(h44):	0.42%
(h5):	2.65%	(h15):	0.07%	(h25):	0.44%	(h35):	1.90%	(h45):	0.50%
(h6):	0.33%	(h16):	0.61%	(h26):	0.04%	(h36):	0.47%	(h46):	0.53%
(h7):	2.52%	(h17):	0.34%	(h27):	39%	(h37):	0.79%	(h47):	0.57%
(h8):	0.58%	(h18):	0.52%	(h28):	0.30%	(h38):	0.22%	(h48):	1.04%
(h9):	0.14%	(h19):	0.36%	(h29):	0.54%	(h39):	0.46%	(h49):	0.74%

Os valores em vermelho indicam as maiores magnitudes e seus respectivos harmônicos.

Novamente temos a decomposição espectral, apresentada na figura 6.23, que corresponde a corrente de fuga calculada pelo modelo matemático, proveniente da figura 6.21.

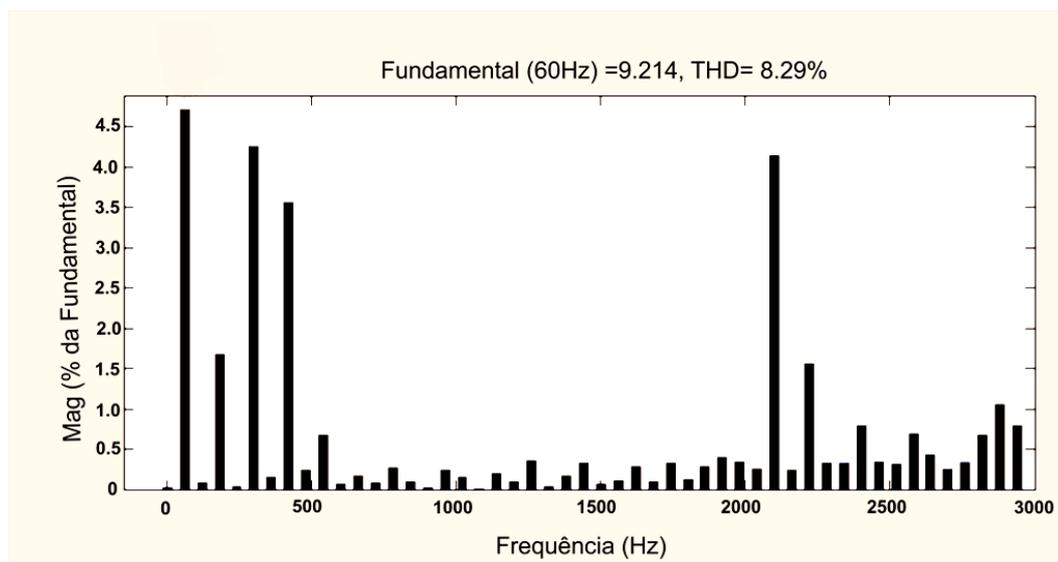


Figura 6.23 - Decomposição espectral da corrente de fuga calculada referente a figura 6.18

Tabela 6.7 - Distribuição espectral da corrente de fuga (calculada) para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s²

(DC):	0.03%	(h10):	0.07%	(h20):	0.09%	(h30):	0.12%	(h40):	0.78%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.17%	(h21):	0.35%	(h31):	0.28%	(h41):	0.34%
(h2):	0.08%	(h12):	0.08%	(h22):	0.04%	(h32):	0.51%	(h42):	0.31%
(h3):	1.67%	(h13):	0.26%	(h23):	0.16%	(h33):	0.34%	(h43):	0.69%
(h4):	0.04%	(h14):	0.09%	(h24):	0.33%	(h34):	0.25%	(h44):	0.43%
(h5):	4.43%	(h15):	0.03%	(h25):	0.07%	(h35):	4.15%	(h45):	0.37%
(h6):	0.16%	(h16):	0.24%	(h26):	0.10%	(h36):	0.24%	(h46):	0.39%
(h7):	3.72%	(h17):	0.15%	(h27):	0.28%	(h37):	1.56%	(h47):	0.67%
(h8):	0.24%	(h18):	0.00%	(h28):	0.09%	(h38):	0.32%	(h48):	1.06%
(h9):	0.68%	(h19):	0.19%	(h29):	0.33%	(h39):	0.39%	(h49):	0.79%

É possível notar, por meio da tabela 6.7 (anterior) que a distribuição espectral da corrente de fuga calculada continua a determinar as maiores magnitudes com eficiência e o MSE foi de 0,07773, bastante baixo. Com isso o modelo é validado e comprovado sua eficiência.

6.4 SIMULANDO CADEIA DE ISOLADORES COM DEFEITO

Uma outra prova que foi imposta ao modelo matemático é referente a sua sensibilidade quanto as modificações da capacitância provenientes de fatores externos, como por exemplo, poluição nos isoladores da linha.

No entanto para isso os resultados apresentados agora são provenientes de uma alteração imposta ao modelo de forma proposital para analisar seu desempenho.

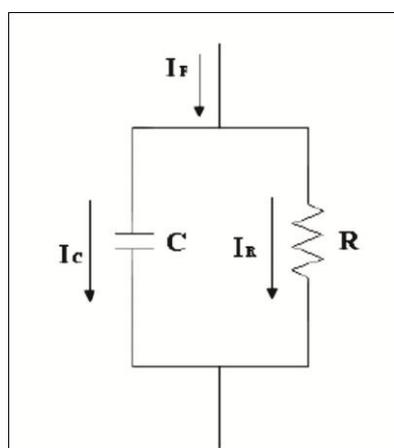


Figura 6.24 - Diagrama esquemático de um isolador
Fonte: elaboração própria

Para as simulações seguintes, será utilizada a teoria de circuitos elétricos. De acordo com a figura 6.24 (acima), a corrente de fuga (I_F) é a contribuição da corrente que atravessa o isolador (I_C) e a corrente que passa pela superfície do isolador (I_R), ou seja:

$$I_F = I_C + I_R \quad (6.2)$$

Como,

$$I_C = \frac{V}{X_c} \quad (6.3)$$

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

Portanto,

$$I_C = V \cdot \omega \cdot C \quad (6.4)$$

Como V e ω são valores constantes então a corrente I_C depende apenas da variação da capacitância. Com isso a estratégia aplicada será introduzir valores de capacitância, para simular um defeito, em algum dos dez (10) blocos responsáveis pelo cálculo da capacitância, e posteriormente verificar como o modelo matemático se comporta.

A figura 6.25 (abaixo) mostra o modelo matemático, destacando o bloco amarelo abaixo do 3º Bloco cinza, esse bloco é responsável pela inserção proposital da capacitância alterada (defeito) no modelo. O valor de capacitância inserido no 4º bloco foi de $20 \times 10^{-9} F$, o que corresponde a aproximadamente 20% a mais do valor que deveria alimentar aquele bloco



Figura 6.25 - Inserção de fator externo para variação da capacitância no modelo matemático, simulando um defeito no isolador para testar a sensibilidade da corrente de fuga, gerada pelo modelo.

Um ponto que deve ser lembrado é que com excessão da introdução da falha (capacitância) essa simulação é a mesma apresentada na secção 6.3.2 e correspondente a figura 6.18, por isso os dados com a introdução da falha na capacitância serão comparados com os da tabela 6.5.

É importante notar que após realizada a validação do modelo, a dimensão para análise do MSE a partir daqui é outra, o erro identificado sinaliza para comprovação que a mudança no valor da capacitância no modelo pode ser visualizada por meio da decomposição harmônica, da forma de onda da corrente de fuga. Por isso, agora tem-se um erro (MSE) maior do que quando o modelo estava sendo validado.

A figura 6.26, seguinte, mostra uma superposição entre as formas de onda da corrente de fuga calculada com o valor de falha na capacitância (azul) e a corrente de fuga calculada sem a falha na capacitância (vermelho). É valido atentar que esta simulação esta toda no âmbito virtual, como o modelo já foi validado a priori, pode-se impor situações ao modelo que teoricamente ele fornece uma resposta, próxima a realidade.

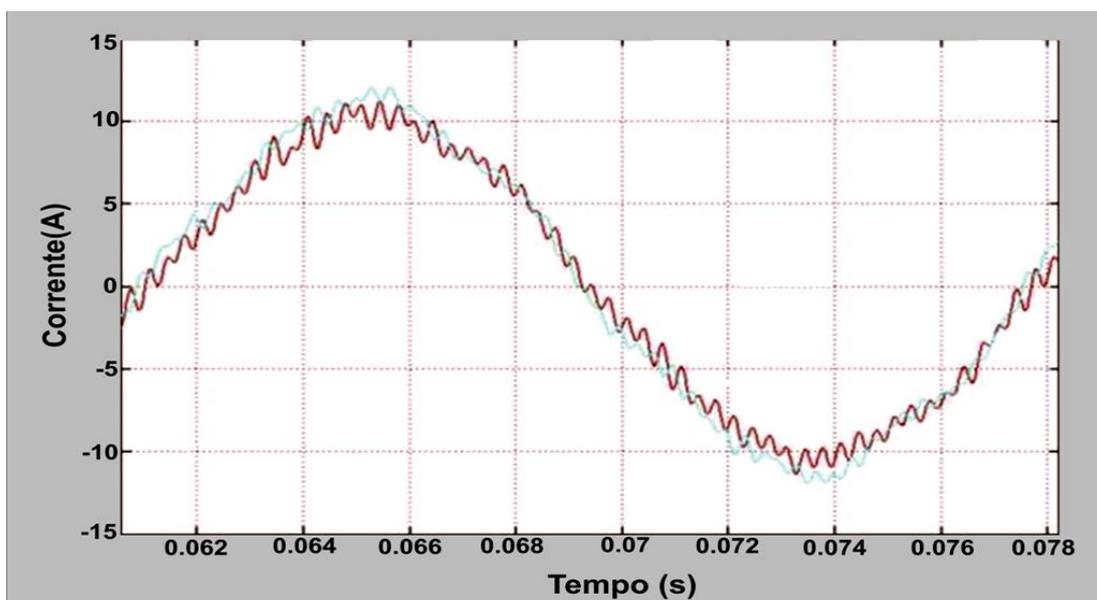


Figura 6.26 – Superposição das Formas de onda, das correntes de fuga calculadas, com a capacitância normal (vermelho) e com a capacitância alterada para $20 \times 10^{-9}F$

Para a forma de onda é bastante perceptível o aumento na amplitude do sinal ao qual se tem a capacitância alterada, em azul, com uma diferença de aproximadamente 2A o que representa um MSE de 0,1667, bem maior que os erros apresentados quando se estava validando o modelo, sinalizando que o modelo consegue perfeitamente identificar uma

alteração desta magnitude na capacitância. Agora se verificará o comportamento da decomposição harmônica para o sinal com a capacitância alterada (figura 6.27)

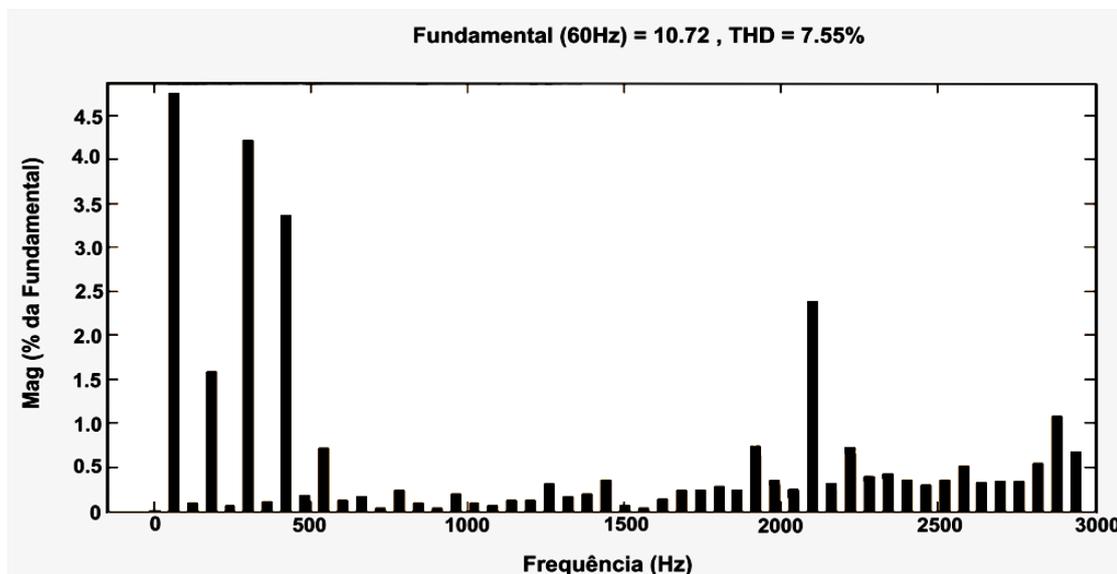


Figura 6.27 – Decomposição harmônica da corrente fuga, com o valor de capacitância alterado no 4° bloco para $20 \times 10^{-9} F$

Tabela 6.8 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min, temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s², imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo

(DC):	0.00%	(h10):	0.12%	(h20):	0.12%	(h30):	0.28%	(h40):	0.35%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.17%	(h21):	0.32%	(h31):	0.23%	(h41):	0.29%
(h2):	0.09%	(h12):	0.04%	(h22):	0.16%	(h32):	0.63%	(h42):	0.35%
(h3):	1.59%	(h13):	0.23%	(h23):	0.20%	(h33):	0.30%	(h43):	0.52%
(h4):	0.07%	(h14):	0.10%	(h24):	0.35%	(h34):	0.15%	(h44):	0.33%
(h5):	4.42%	(h15):	0.04%	(h25):	0.07%	(h35):	2.38%	(h45):	0.34%
(h6):	0.11%	(h16):	0.19%	(h26):	0.04%	(h36):	0.24%	(h46):	0.34%
(h7):	3.43%	(h17):	0.09%	(h27):	0.14%	(h37):	0.66%	(h47):	0.54%
(h8):	0.18%	(h18):	0.07%	(h28):	0.24%	(h38):	0.36%	(h48):	1.08%
(h9):	0.71%	(h19):	0.12%	(h29):	0.24%	(h39):	0.39%	(h49):	0.68%

É possível notar que em alguns harmônicos específicos houve um aumento na magnitude, principalmente os de maiores frequências, como por exemplo os harmônicos (h35), (h37) e h(48), quando comparados com a tabela 6.5, indicando um comportamento devido a alteração da capacitância da linha, o MSE está em torno de 0,0974, sinalizando que também na decomposição harmônica o modelo é sensível a tal modificação da capacitância. Para próxima simulação será mudado o valor da capacitância para a metade do que deveria ser inserida no 4º bloco.

A figura 6.28 corresponde as formas de onda da corrente de fuga calculadas com a capacitância normal (vermelho) e com a capacitância alterada (azul), como esperava-se, houve uma diminuição na amplitude do sinal, configurando portanto o caráter direto e proporcional do comportamento da corrente de fuga com a capacitância.

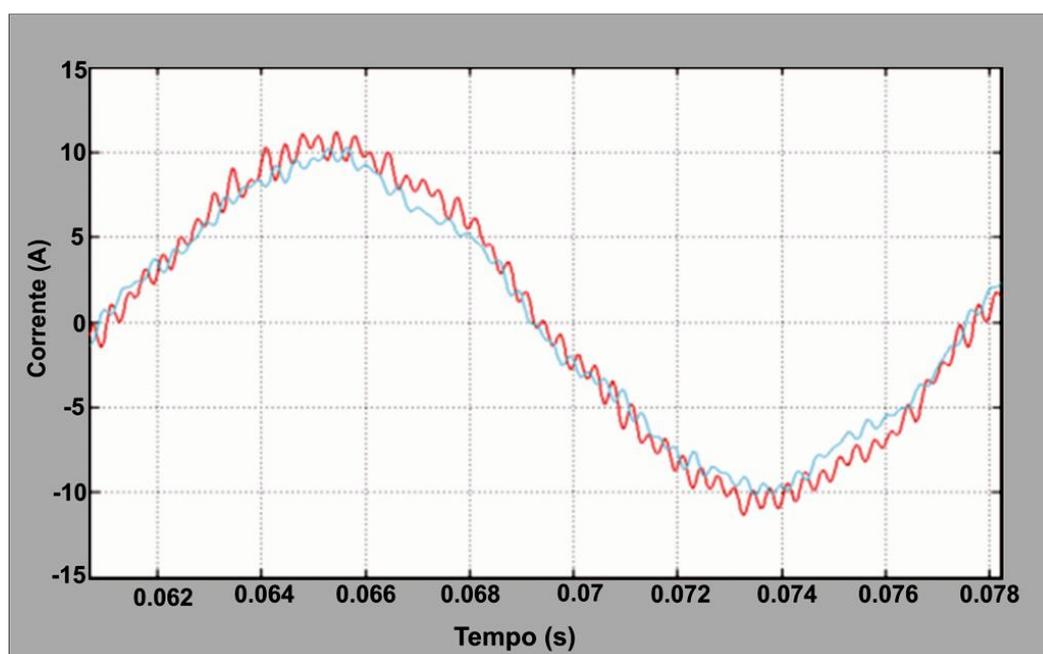


Figura 6.28 – Superposição da forma de onda, das correntes de fuga calculadas, com a capacitância normal (vermelho) e com a capacitância alterada para $5 \times 10^{-9} F$

Tais simulações estão sendo feitas no âmbito virtual, reforçada a idéia de que o modelo matemático já está validado.

A figura seguinte (6.29) apresenta a decomposição harmônica da corrente de fuga

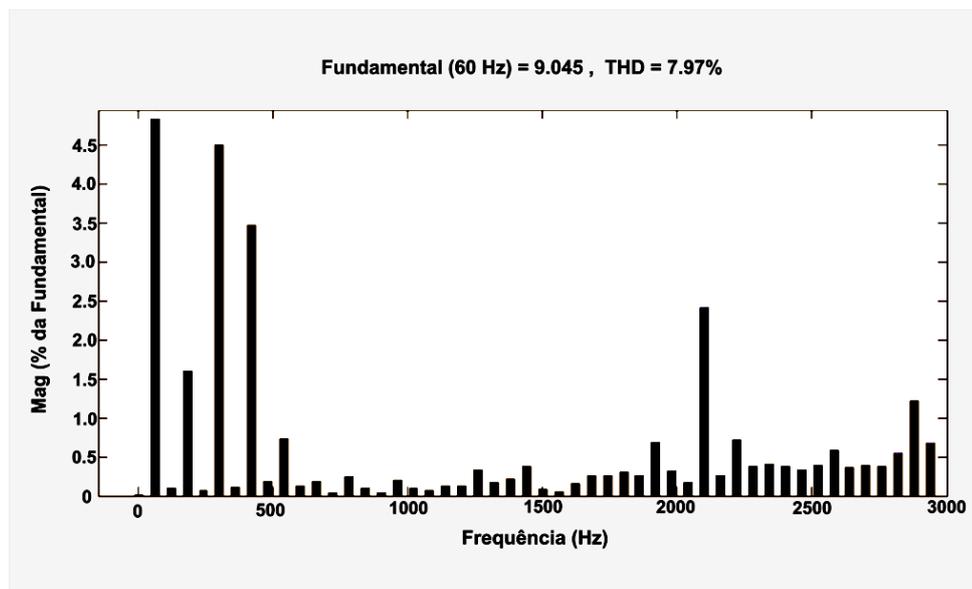


Figura 6.29 - Decomposição harmônica da corrente fuga, com o valor de capacitância alterado no 4° bloco para $5 \times 10^{-9} F$

Na figura 6.29 da decomposição harmônica nota-se, uma diminuição dos valores de magnitude principalmente para os harmônicos das altas frequências, estes poderam ser melhor visualizado pelo tabela 6.9, a seguir.

Tabela 6.9 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente $25^{\circ}C$, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar $290W/s^2$, imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo

(DC):	0.00%	(h10):	0.13%	(h20):	0.13%	(h30):	0.30%	(h40):	0.38%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.18%	(h21):	0.34%	(h31):	0.25%	(h41):	0.32%
(h2):	0.09%	(h12):	0.04%	(h22):	0.17%	(h32):	0.68%	(h42):	0.39%
(h3):	1.59%	(h13):	0.25%	(h23):	0.21%	(h33):	0.32%	(h43):	0.58%
(h4):	0.07%	(h14):	0.10%	(h24):	0.37%	(h34):	0.17%	(h44):	0.37%
(h5):	4.49%	(h15):	0.04%	(h25):	0.07%	(h35):	2.59%	(h45):	0.38%
(h6):	0.11%	(h16):	0.20%	(h26):	0.05%	(h36):	0.26%	(h46):	0.38%
(h7):	3.46%	(h17):	0.09%	(h27):	0.15%	(h37):	0.72%	(h47):	0.61%
(h8):	0.18%	(h18):	0.07%	(h28):	0.25%	(h38):	0.37%	(h48):	1.21%
(h9):	0.72%	(h19):	0.12%	(h29):	0.26%	(h39):	0.40%	(h49):	0.76%

É bastante visível a diminuição na magnitude de todos os harmônicos, mas principalmente os das altas frequências, o MSE está em 0,04759.

Finalmente, se fará agora uma pequena comparação entre o modelo PI modificado (com as influências das Vas) e o modelo PI normal que foi utilizado por Gomes Jr(2007), a fim de verificar a eficiência de se ter um bloco responsável pelo cálculo das influências das variáveis ambientais em uma LT, deve-se lembrar que a comparação entre as tabelas seguintes continua com a tabela 6.5.

A figura (6.30) abaixo, ilustra a forma de onda para a corrente de fuga sem a influência das variáveis ambientais, os valores utilizados de resistência elétrica, capacitância e indutância, informados no capítulo 3, equações de (3.6) à (3.8).

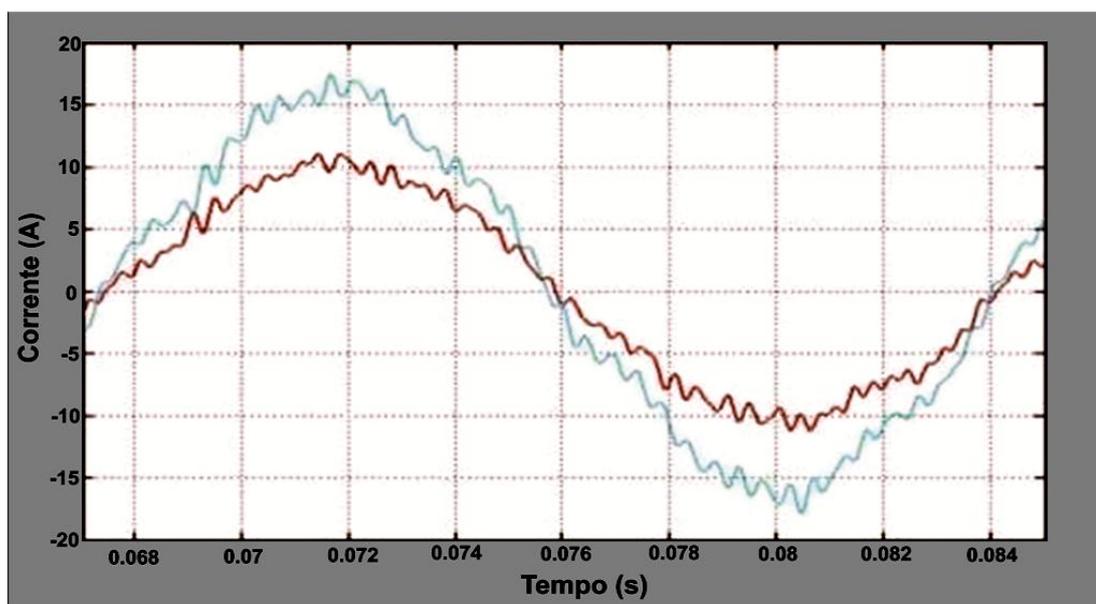


Figura 6.30 – Superposição entre corrente de fuga calculada pelo modelo PI modificado (vermelho) e a corrente de fuga calculada pelo modelo PI sem as variáveis ambientais (azul)

É possível notar a diferença na amplitude dos dois sinais, e, devido a corrente de fuga de uma LT ser pequena em comparação a corrente que flui pela LT, uma diferença de amplitude de aproximadamente 9A, para um valor de pico de 18A, tem-se um MSE de aproximadamente 50%, o que compromete qualquer tipo de análise do comportamento de uma LT pela sua corrente de fuga.

Quanto ao espectro harmônico para o modelo com a capacitância fixa é apresentado na figura 6.31.

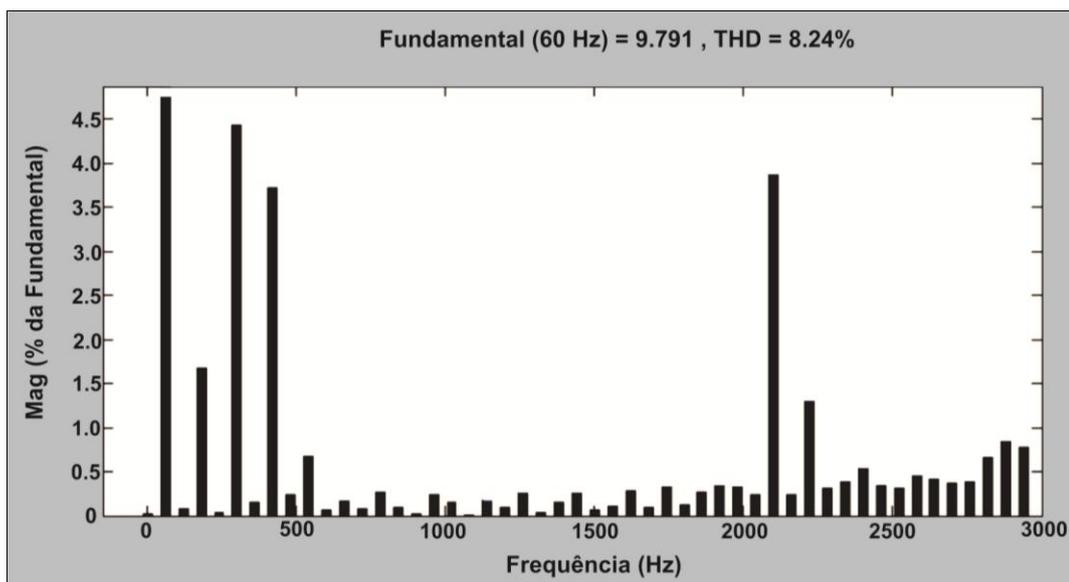


Figura 6.31 - Decomposição harmônica, para corrente de fuga calculada pelo modelo PI s/ influência das Vas

Ao comparar a figura 6.31 (acima) com a figura 6.20, pode-se verificar, que foram respeitados os valores de pico para as frequências até o 12º harmônico, no entanto o comportamento para as frequências maiores que 2500Hz, ficou bastante diferente, o MSE ficou em torno de 2,1, para a análise da corrente de fuga este é um valor bastante elevado, o que poderia, por exemplo, confundir um operador, tendendo para um diagnóstico errado. Isso pode ser perfeitamente visualizado por meio da tabela 6.10 (a seguir). Provavelmente deva existir uma associação de valores para temperatura, umidade do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento, que façam com que o valor de capacitância da LT determinada somente pela geometria da linha coincida com o valor do modelo.

Como consequência, fica quase impossível distinguir através da corrente de fuga, o que é efeito ambiental e o que é efeito externo à linha.

É possível, apesar da pretensão, afirmar que o modelo PI é uma particularidade do modelo PI modificado. Os equipamentos escolhidos suprem a necessidade de monitoração na LT, além de serem de fácil instalação, e ainda, o sincronismo via GPS realizado entre os equipamentos. por parte dos medidores de energia, as EMR são eficientes e possuem várias formas de transmissão dos dados.

Tabela 6.10 - Distribuição espectral da corrente de fuga Medida para o dia 11 de Novembro de 2008, às 08h40min temperatura ambiente 25°C, velocidade do vento (10m) 8 m/s, Umidade relativa do meio 78%, direção do vento 100oNV, radiação solar 290W/s², imposto a uma falha na capacitância do 4° bloco do modelo

(DC):	0.00%	(h10):	0.13%	(h20):	0.12%	(h30):	0.29%	(h40):	0.35%
(Fnd):	100.00%	(h11):	0.16%	(h21):	0.32%	(h31):	0.24%	(h41):	0.31%
(h2):	0.09%	(h12):	0.04%	(h22):	0.16%	(h32):	0.65%	(h42):	0.36%
(h3):	1.55%	(h13):	0.23%	(h23):	0.20%	(h33):	0.31%	(h43):	0.54%
(h4):	0.07%	(h14):	0.10%	(h24):	0.35%	(h34):	0.16%	(h44):	0.34%
(h5):	4.37%	(h15):	0.03%	(h25):	0.07%	(h35):	2.45%	(h45):	0.36%
(h6):	0.11%	(h16):	0.20%	(h26):	0.05%	(h36):	0.24%	(h46):	0.35%
(h7):	3.35%	(h17):	0.09%	(h27):	0.14%	(h37):	0.68%	(h47):	0.57%
(h8):	0.18%	(h18):	0.07%	(h28):	0.24%	(h38):	0.35%	(h48):	1.13%
(h9):	0.70%	(h19):	0.12%	(h29):	0.25%	(h39):	0.37%	(h49):	0.71%

A criação de um banco de dados deixa o sistema de coleta e tratamento de dados mais organizado, rápido e eficiente. A validação do modelo por meio da corrente de fuga medida teve sucesso, tendo alguns ajustes a serem realizados, para altas umidades. É uma boa opção de modelo matemático, por se atualizar a cada momento em que há mudanças climáticas.

A decomposição harmônica para corrente de fuga, a partir do modelo matemático, também trás um bom grau de fidelidade e confiabilidade para se monitorar a degradação do isolamento de uma LT, além da possibilidades de localização de falhas dentro de um trecho da LT.

CAPÍTULO 7.0 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação pesquisou-se um modelo matemático para a LT do trecho Guamá-Utinga, pertencente ao sistema de transmissão da empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE, tendo como foco o estudo dos parâmetros desta linha de forma que fosse desenvolvido um modelo dinâmico; para monitoração em tempo real, que contemple a influência das variáveis ambientais, próximo de uma linha real. Considerou-se, também, como estudo uma pesquisa no Estado da Arte para os Modelos Matemáticos em Linhas de Transmissão, Capítulo 2, para que se pudesse ter uma idéia de qual modelo melhor adaptaria a nossa realidade.

Dentre os modelos de linhas de transmissão pesquisado o modelo π de parâmetros concentrados foi o mais adequado, pois, além de apresentar os parâmetros concentradamente, afasta o uso de aproximações para a matriz de transformação, como em casos de linhas de parâmetros constantes e distribuídos, como por exemplo, linhas não transpostas. Além de as modificações realizadas, para adaptação às variáveis ambientais, permitirem em sua essência que o equacionamento permaneça praticamente o mesmo. A inserção das variáveis ambientais no modelo matemático requereu a utilização de conceitos físicos existentes no modelo eletromagnético de linhas de transmissão, surgindo o *Modelo PI de Parâmetros Concentrados Modificado*, que foi o modelo matemático utilizado.

Cabe ressaltar que para se obter aproximadamente, o comportamento de uma linha de transmissão real, é necessário o uso de várias seções em série. Após a definição do tipo de modelo matemático, os estudos voltaram-se para a determinação dos parâmetros da LT (Resistência, Indutância e Capacitância) a serem usados, este estudo foi feito nos Capítulos 3 e 4. Para o parâmetro L utilizou-se o método de aplicações matriciais. No entanto, para a resistência elétrica, utilizou-se um método de interpolação bastante utilizado na literatura de projetos e para a capacitância, utilizou-se um método novo experimental, baseado na aproximação de curvas de comportamento da permissividade, estas serviram para o ajuste da capacitância, atendendo assim as influências do ambiente o qual a LT esta imersa. É importante notar, que a forma como foi calculada a corrente de fuga no modelo, atende ainda a influência da cadeia de isoladores e da torre, algo que o método tradicional não permite.

No capítulo 6 é validado o modelo, através da comparação, de dados reais e de dados simulados pelo modelo matemático, da forma de onda e decomposição harmônica da corrente de fuga, tensão e corrente, além da diferenciação de falhas no isolamento da linha e alteração ambientais sofridas por esta linha, que é uma nova metodologia para o ajuste e determinação da falha em cadeia de isoladores através da corrente de fuga. Para observar o comportamento da corrente de fuga foi utilizado o emprego de equipamento de análise de energia denominado de *Power SentinelTM 1133A*. Este equipamento foi instalado nas duas subestações (Guamá e Utinga) de um trecho de LT, para obtenção das variáveis de interesse como, por exemplo: corrente, tensão, potências ativa, reativa e aparente, além das harmônicas de corrente e tensão; sendo que, a interface com o usuário foi através de um computador com o auxílio de um programa chamado *Power Sentinel CSV - PSCSVTM*.

A metodologia apresentada nesse capítulo partiu do princípio de que a corrente de fuga de uma linha de transmissão é dependente de sua capacitância e da sua resistência. Essa resistência caracteriza o caminho que a corrente percorre ao longo do isolador. Na alteração dessa resistência (pela falha interna do isolador), a capacitância também se altera. Se a falha for externa, ou seja, se a resistência ao longo do isolador diminui, a capacitância se modificará. Como principal consequência tem-se a alteração do espectro harmônico. Portanto, esta alteração é a base desta nova metodologia, que permite verificar o nível de isolamento da LT, pois, o sistema operando com seu nível normal de isolamento reflete em um espectro harmônico da corrente de fuga bem comportado.

A teoria abordada foi comprovada na pesquisa, através das simulações do modelo matemático desenvolvido, no capítulo 6, para este trecho de LT em estudo, ou seja, mostrou-se através da simulação, que realmente variando a capacitância da LT o espectro harmônico da corrente de fuga se alterava. Então, com a monitoração do espectro harmônico da corrente de fuga permite verificar tanto o nível de isolamento da LT, quanto predizer e detectar a falha em cadeias de isoladores evitando assim o transtorno da falta de energia elétrica.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do trabalho aqui realizado, sugere-se alguns trabalhos que visam ampliar as possibilidades da estrutura proposta:

- Realizar uma pesquisa mais aprofundada para a determinação da capacitância em cadeias de isoladores e para as torres;
- Verificar a resistividade do solo em todo o trecho da linha de transmissão em estudo;
- Verificar a contribuição que outros fatores externos, como por exemplo, emendas, envelhecimento dos cabos, queimadas próximo à linha, produzem na LT;
- Desenvolver métodos por meio de inteligência computacional, para comparações de padrões para a predição de falhas em cadeias de isoladores.

BIBLIOGRAFIA

- ANJAN, K. D. - **Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications** – 1ª Ed. New York, USA, Editora CRC Press, 2000.
- ARAÚJO, Antônio E. A; NEVES, Washington L. A. **Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- BACHMANN, BERNHARD.- **Impedance Measurement System for Power System Transmission Lines** – (Patente) ABB Inc. US6397156, 2002
- BASTOS, J. P.. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. 2ª edição revisada. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.
- BEJAN, A.. **Transferência de Calor**. Tradução de Euryale de Jesus Zerbin e Ricardo Santilli Ekman Simões. São Paulo: Edgar Blucher, 1996.
- BUENO, M.; ASSIS, A. K. T. **Cálculo de indutância e de força em circuitos elétricos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1998.
- BUTKOV, E.. **Física matemática**. Tradução João Bosco Pitombeira F. de Carvalho. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.
- CAMARGO, C. C.. **Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais**. 3ª edição revisada. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.
- 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.
- CASTELLANOS, F., MARTI, J. R., **Multi-Phase Transmission Line Models in Phase Domain**. In: Proceedings of International Conference on Power System Transients, pp. 582-587, Lisboa, July 1995.
- CASTELLANOS, F.; MARTÍ, J.; MARCANO, F. **Phase-Domain Multiphase Transmission Line Models. Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 4, p. 241-248. Elsevier Science Ltda, 1997.
- CHURCHILL, S.W.; BERNSTEIN, M. **A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow**, J. heat transfer, Vol. 99, 1977.1967
- CISNEROS, J. I.. **Ondas Eletromagnéticas: fundamentos e aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.
- COELHO, A. A; COELHO, L. S. **Identificação De Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.
- CORREA, S.M. **Análise de elementos Finitos para Determinação da Capacitância em Linhas de Transmissão**, Dissertação de Mestrado, Dept de Engenharia Eletrica, UFPA, Belém, 2004
- CUNHA, C. **Métodos Numéricos**. 2ª edição revisada e ampliada. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

JEFFERS, D. **Electrical and magnetic fields and ecology**, International commission on non-ionizing Radiation protection, health phys, 1998 p. 494-522

DOMMEL, H. W. **EMTP Theory Book**, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia, 1992.

_____. **Electromagnetic Transients Program Reference Manual**. Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1996.

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

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

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

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.

FAIRES, V. M. **Termodinâmica**. Tradução Borisas Cimblaris. 4ª edição. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A, 1966.

GILBERT, A.. **Origens históricas da física moderna – introdução abreviada**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

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

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

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

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

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.

HANDBOOK ALUMINUM ELECTRICAL CONDUCTOR –2ª Edição The Aluminum Association, 1979

HANSELMAN, Duane; LITTLEFIELD, Bruce. **MATLAB 6: curso completo**. Tradução: Cláudia Sant'ana Martins. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

HAYT JR, W.H. **Eletromagnetismo**, 3º edição. Rio de Janeiro : LTC, 1983, p.329

IEEE Std 738-1993, **IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors**.(Norma).

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2ª Ed. São Paulo, SP. Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.

LIENHARD, J.H. **A heat transfer textbook**. 2ª Ed. Englewood Cliffs, N. J: Prentice-hall, 1987.

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, 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. Campinas, outubro de 2001.

MARCANO, F.; MARTÍ, J. Idempotent Line Model: Case Studies. Proceedings of IPST'97 – **International Conference on Power Systems Transients**, p. 62-72, 1997.

MANITOBA. HVDC Research Center. **PSCAD/EMTDC Simulation Program - V3.8**, Personal Edition, Winnipeg, Canada, 2002.

MARTÍ, J. R. (1982). “**Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations**”. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1: 147-157.

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.

MODEL 1133A POWER SENTINEL. Operational Manual, Arbiter Systems Incorporated, 1999.

MONTECELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2003.

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.

MORGAN, VT “**Thermal Behavior Of Electrical Conductors**” 1991, Research studies press Ltd. Somerset, UK

NAIDU, S. R. “**Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potências**”, Campina Grande: Grafset, 1985. 316 p.

NAKAYAMA, Y; WOODS, W.A.; CLARK, D.G. **Japan Society of Mechanical Engineers**, Eds., Visualized Flow, Pergamon Press, Oxford, 1988

NASCIMENTO, C.A.M.; VASCONCELOS, J.A. - **Controle e Monitoramento de Temperatura de Condutores em Linhas Áreas de Alta Tensão**. 17º Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG, setembro de 2008. Vol. 2, pp. 437- 444.

NBR 5422/1985 - **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**

NEPOMUCENO, L.X.- **Técnicas de Manutenção Preditiva**.. 3ª Ed. vol 2. São Paulo, SP. Editora Edgard Blücher Ltda, 2002.

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, Belém, setembro de 1990. Vol. 2, pp. 653-658.

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 Trans. on Power Delivery, vol. 11, Jan 1996

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.

NOGUEIRA, M.M.;AZZAM, G., Carregamento de Linhas de Transmissão Aéreas: dos Critérios Determinísticos à Monitoração em Tempo Real., XVI SNPTEE, Campinas SP, 2001.

O'MALLEY, John, **Análise de Circuitos**.Tradução: Danuza Scarton R. Alves. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.

REHTANZ, C; NAEDELE, M; BERTSCH, J.,**Protection of an electric power transmission network**, USA, ABB Research Ltd. (Zurich,), CA2314838, 2006

SHADIKU, Mattew N.O., **Elementos do Eletromagnetismo**, Editora Bookman, 3ª Ed, 1978

SOUZA, C C **Curso de simulink 2.0 modelagem simulação e análise de sistemas dinâmicos**, 1ª Ed, Faculdade de engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

STELLA, M.S., **Determinação da Capacidade de Transporte de Corrente de Linhas Aéreasde Transmissão**, Dissertação de Mestrado – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1984.

WADDICOR, H., **The Principles of Eletric Power Transmission**. 5ª Ed. vol 2. New York. Editora Chapman and Hall Ltda, 1964

WATAGHIN, Gleb. **Eletromagnetismo e óptica**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1973.

WEDEPOHL, L. M. (1963). **Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase Systems**. Proc. IEE, Vol. 110,

No. 12: 2200-2212.

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.

WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN, H. V.; IRWIN, G. D. (1996). **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.

WEEDY, B. Mathew. **Sistemas Eléctricos de Potências.** São Paulo: Polígono, 1973.

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, Oct. 1999.

_____. **Quasi-Modes Three- Phase Transmission Line Model – Comparison with Existing Frequency Dependent Models.** Proceedings of the IPST'99- International Conference on Power Systems Transients, Budapest, Hungary: 49-54.

YU, T.C.; MARTÍ, J.R., **A Robust Phase-Coordinates Frequency Dependent Underground Cable Model (zCable) for the EMTP.** IEEE Transactions on Transmission and Distribution. May 2002.

ZIMA, M. REHTANZ, C.- **Electric power transmission network state estimation –** (Patente) ABB RESEARCH LTD. (Affolternstrasse 52, 8050 Zürich, CH) EP1324455, 2005

A N E X O

BITOLA AWG MCM	CÓDIGO	SEÇÃO NOMINAL (mm ²)		FORMAÇÃO E DIÂMETRO mm				MASSA NOMINAL kg/Km	CARGA DE RUPTURA NOMINAL KGF	RMC daN	Rec a 20°C ohms/km	
		AL	AÇO	-	FIOS		ALMA DE AÇO					CABO COMPLETO
					AL	AÇO						
4	Swan	21,18	3,53	6/1	2,12	2,12	2,12	6,36	85,6	843	812	1,35479
2	Sparrow	33,59	5,60		2,67	2,67	2,67	8,01	135,8	1.290	1.246	0,85413
1/0	Raven	53,52	8,92		3,37	3,37	3,37	10,11	216,3	1.990	1.904	0,53615
2/0	Quail	67,33	11,22		3,78	3,78	3,78	11,34	272,1	2.400	2.295	0,42615
4/0	Penguin	107,22	17,87		4,77	4,77	4,77	14,31	433,2	3.790	3.644	0,26761
266,8	Partridge	134,87	21,99	26/7	2,57	2,00	6,01	16,30	544,3	5.124	4.936	0,21430
300	Ostrich	152,19	24,71		2,73	2,12	6,36	17,27	613,3	5.760	5.524	0,19063
336,4	Linnet	170,55	27,83		2,89	2,25	6,75	18,31	688,4	6.390	6.181	0,16925
397,5	Ibis	201,34	32,73		3,14	2,44	7,32	19,88	811,7	7.380	7.130	0,14398
636,0	Grosbeak	321,84	52,49		3,97	3,09	9,27	25,15	1299,0	11.440	11.038	0,08988
795	Drake	402,56	65,44	54/7	4,44	3,45	10,36	28,11	1623,0	14.300	13.742	0,07190
605,0	Duck	306,56	39,75		2,69	2,69	8,07	24,20	1158,0	10.064	9.611	0,09450
66,54	Loon *	33,74	44,97	3 /4	3,78	3,78	--	11,35	445,9	5.713	5.596	0,85122
101,8	Petrel *	51,61	30,07	12/7	2,34	2,34	7,02	11,71	376,9	4.700	4.553	0,56190
110,8	Minorca*	56,13	32,77		2,44	2,44	7,32	12,22	410,3	5.120	4.949	0,51590
134,6	Leghorn*	68,20	39,78		2,69	2,69	8,07	13,46	498,3	6.170	5.983	0,42480

Notas:

- 1) Características conforme NBR 7270
- 2) RMC (Resistência Mecânica Calculada): fios de aço com zincagem classe A
- 3) * Cabos de Alumínio com alma de aço

A P Ê N D I C E S

APÊNDICE 1 – Listagem das rotinas utilizadas para a extração e cálculos dos dados fornecidos pelo equipamento EMR e PS

➤ **Rotina principal**

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% mainVIguama.m - Programa para Gerar os Sinais de entrada para a simulação do
% modelo matemático.
% Entrada:
% harm_gua_17_11_08 -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de
% tensão e corrente das tres fases.
%
% Dados do dia 11/11/2008 as 15:00:00 - harm_gua_11_11_08
% Saida:
% Tensao e Corrente Trifasica
%-----
% LEITRA DOS DADOS DE CAMPO
load PG_081111_08h40m.txt
VIguama = PG_081111_08h40m;
load PU_081111_08h40m.txt
VIutinga = PU_081111_08h40m;
% GERAÇÃO DAS FONTES DE TENSÕES GUAMA
subplot(2,2,1); %figure(1)
[Va_matguama, Vb_matguama, Vc_matguama] = tensguama(VIguama);
hold on;
subplot(2,2,2); %figure(2)
[Ia_matguama, Ib_matguama, Ic_matguama] = corrguama(VIguama);
hold off;
% % GERAÇÃO DAS FONTES DE TENSÕES UTINGA
subplot(2,2,3); %figure(3)
[Va_matutinga, Vb_matutinga, Vc_matutinga] = tensutinga(VIutinga);
hold on;
subplot(2,2,4); %figure(4)
[Imax_ind, Ia_matutinga, Ib_matutinga, Ic_matutinga] = corrutinga(VIutinga);
hold off;
% calculo da ampacidade do cabo, primeiramente calcula-se o valor da
% potencia através do produto da corrente com a tensão

```

```

Va_semtemp=Va_matutinga(2,:);
Vb_semtemp=Vb_matutinga(2,:);
Vc_semtemp=Vc_matutinga(2,:);
Va_semtemp(Imax_ind(2))
Vb_semtemp(Imax_ind(4))
Vc_semtemp(Imax_ind(6))
Tens_equiv=[Va_semtemp(Imax_ind(2)) Vb_semtemp(Imax_ind(4)) Vc_semtemp(Imax_ind(6))];
%determinndo a potencia P=I.V
pot_a=(Va_semtemp(Imax_ind(2))*Imax_ind(1))*(1/sqrt(3));
pot_b=(Vb_semtemp(Imax_ind(4))*Imax_ind(3))*(1/sqrt(3));
pot_c=(Vc_semtemp(Imax_ind(6))*Imax_ind(5))*(1/sqrt(3));
pot_total=[pot_a pot_b pot_c];
pot_total;
save pot_a1 pot_a
save pot_tol pot_total
save tens_equiv Tens_equiv
subrotinas auxiliares

```

➤ TensUtinga

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnologico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissao - GPLT
%-----
%tensutinga.m - função para gerar harmônicos
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnologico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissao - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Va_mat, Vb_mat, Vc_mat] = tensutinga(VI)
% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das tres fases.
%
% Saida
% va_guama.mat -> Fonte de tensao para Fase A
% vb_guama.mat -> Fonte de tensao para Fase B
% vc_guama.mat -> Fonte de tensao para Fase C
%-----
function [Va_matutinga, Vb_matutinga, Vc_matutinga] = tensutinga(VIutinga)

```

```

Vautinga = VIutinga(1,[1:100]); Vbutinga = VIutinga(1,[201:300]); Vcutinga = VIutinga(1,[401:500]);
[l c] = size(Vautinga);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Vautinga(k);
    phia(cont1,1) = Vautinga(k+1); %--> Fase em graus

    FFb(cont1,1) = Vbutinga(k);
    phib(cont1,1) = Vbutinga(k+1); %--> Fase em graus

    FFc(cont1,1) = Vcutinga(k);
    phic(cont1,1) = Vcutinga(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; %--> frquencia 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 = 0:0.00001:0.132;
    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);
    end
end
t = 0:0.00001:0.132;
matautinga = [t,va']; matbutinga = [t,vb']; matcutinga = [t,vc'];
Va_matutinga = matautinga'; Vb_matutinga = matbutinga'; Vc_matutinga = matcutinga';
save va_utinga Va_matutinga
save vb_utinga Vb_matutinga

```

```

save vc_utinga Vc_matutinga
%figure(1)
plot(t,va, 'y-');
grid on;
title('Tensao na linha das FASES A B C utinga');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');
hold on;
plot(t,vb, 'm-');
plot(t,vc, 'c-');
legend ('Tensão A','Tensão B','Tensão C')
hold off;

```

➤ Tensguama

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% tensguama.m - função para gerar harmônicos
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - 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 tensao para Fase A
% vb_guama.mat -> Fonte de tensao para Fase B
% vc_guama.mat -> Fonte de tensao para Fase C
%-----
function [Va_matguama, Vb_matguama, Vc_matguama] = tensguama(VIguama)
Vaguama = VIguama(1,[1:100]); Vbguama = VIguama(1,[201:300]); Vcguama = VIguama(1,[401:500]);
[l c] = size(Vaguama);
contl=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    contl=contl+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; %--> frquencia 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 = 0:0.00001:0.132;
    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);
    end
end
t = 0:0.00001:0.132;
mataguama = [t',va']; matbguama = [t',vb']; matcguama = [t',vc'];
Va_matguama = mataguama'; Vb_matguama = matbguama'; Vc_matguama = matcguama';
save va_guama Va_matguama
save vb_guama Vb_matguama
save vc_guama Vc_matguama
%figure(1)
plot(t,va, 'y-');
grid on;
title('Tensao na linha das FASES A B C guama');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');

```

```

hold on;
plot(t,vb, 'm-');
plot(t,vc, 'c-');
legend ('Tensão A','Tensão B','Tensão C')
hold off;

```

➤ CorUtinga

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----

%corrutinga.m - função para gerar harmônicos de corrente
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Ia_mat, Ib_mat, Ic_mat] = corrutinga(VI)
% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das tres fases.
%
% Saida
% ia_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase A
% ib_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase B
% ic_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase C
%-----
function [Imax_ind, Ia_matutinga, Ib_matutinga, Ic_matutinga] = corrutinga(VIutinga)
Iautinga = VIutinga(1,[101:200]); Ibutinga = VIutinga(1,[301:400]); Icutinga = VIutinga(1,[501:600]);
[l c] = size(Iautinga);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Iautinga(k);
    phia(cont1,1) = Iautinga(k+1); %--> Fase em graus

    FFb(cont1,1) = Ibutinga(k);
    phib(cont1,1) = Ibutinga(k+1); %--> Fase em graus

```

```

    FFc(cont1,1) = Icutinga(k);
    phic(cont1,1) = Icutinga(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; %--> fruencia 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 = 0:0.00001:0.132;
    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));
        ia(cont) = sum(Fa);
        ib(cont) = sum(Fb);
        ic(cont) = sum(Fc);
    end
end
t = 0:0.00001:0.132;
mata = [t,ia']; matb = [t,ib']; matc = [t,ic'];
Ia_matutinga = mata'; Ib_matutinga = matb'; Ic_matutinga = matc';
% determinação da ampacidade do cabo, é necessario sabermos os
% valores de max das correntes em todas as fases e seus indices
% isto é, sua posição dentro do vetor.
ia_semtemp=mata(:,2);
[iamx, iia]=max(ia_semtemp);
iamx;
iia;
ib_semtemp=matb(:,2);
[ibmx, iib]=max(ib_semtemp);
ibmx;
iib;
ic_semtemp=matc(:,2);
[icmx, iic]=max(ic_semtemp);

```

```

icmx;
iic;
% A variavel Imax_ind possui as correntes máximas
% e suas respectivas posições dentro do vetor
Imax_ind=[iamx iia ibmx iib icmx iic]';
Imax_ind;
iamax=[iamx];
ibmax=[ibmx];
icmax=[icmx];
save ia_utinga Ia_matutinga
save ib_utinga Ib_matutinga
save ic_utinga Ic_matutinga
save imax_ind Imax_ind
save iamax1 iamax
save ibmax1 ibmax
save icmax1 icmax
%figure(2)
plot(t,ia, 'y-');
grid on;
title('Corrente na linha das FASES A B C utinga');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente (A)');
hold on;
plot(t,ib, 'm-');
plot(t,ic, 'c-');
legend ('Corrente A','Corrente B','Corrente C')
hold off;

```

➤ Tensguama

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% corruguama.m - função para gerar harmônicos de corrente
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Ia_mat, Ib_mat, Ic_mat] = corr(VI)

```

```

% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das tres fases.
%
% Saida
% ia_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase A
% ib_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase B
% ic_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase C
%-----
function [Ia_matguama, Ib_matguama, Ic_matguama] = corruguama(VIguama)
Iaguama = VIguama(1,[101:200]); Ibguama = VIguama(1,[301:400]); Icguama = VIguama(1,[501:600]);
[l c] = size(Iaguama);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Iaguama(k);
    phia(cont1,1) = Iaguama(k+1); %--> Fase em graus

    FFb(cont1,1) = Ibguama(k);
    phib(cont1,1) = Ibguama(k+1); %--> Fase em graus

    FFc(cont1,1) = Icguama(k);
    phic(cont1,1) = Icguama(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; %--> frquencia 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 = 0:0.00001:0.132;
    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));
    end
end

```

```

    ia(cont) = sum(Fa);
    ib(cont) = sum(Fb);
    ic(cont) = sum(Fc);
end
end
t = 0:0.00001:0.132;
mata = [t,ia']; matb = [t,ib']; matc = [t,ic'];
Ia_matguama = mata'; Ib_matguama = matb'; Ic_matguama = matc';
save ia_guama Ia_matguama
save ib_guama Ib_matguama
save ic_guama Ic_matguama
%figure(2)
plot(t,ia, 'y-');
grid on;
title('Corrente na linha das FASES A B C guama');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente (A)');
hold on;
plot(t,ib, 'm-');
plot(t,ic, 'c-');
legend ('Corrente A','Corrente B','Corrente C ')
hold off;

```

Determinação da função que rege o comportamento da permissividade do meio em função da temperatura, segundo dados obtidos na cuba de ensaios.

➤ **Permissividade X Temperatura**

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Rotina para determinar função de grau 2 que melhor se adapta aos
% valores de permissividade relativa determinado pela cuba de ensaios
% e calcula o polinômio intermediário entre os valores determinados
% pela cuba e determinados a partir do modelo matemático, para ajuste
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
% cálculo da função intermediária entre o valor determinado na cuba

```

```

% (variaveis permY, tempX), e o valor desejado (variaveis permY_desej,
% tempX, xi e y1) o resultado (xi, ymed)
% vetor permissividade, determinado pelo a cuba
permY=[09.39434235 09.51220 09.714123277 10.18513 10.88604581 11.41353 11.90111752];
% vetor permissividade, desejado, são os melhores valores ajustados pelo
% modelo, visualmente de acordo c a corrente de fuga
permY_desej=[04.24295 04.403977 04.617271 04.913592 05.588848 06.17063 06.487966];
% permY_desej=[0.424295 0.4403977 0.4617271 0.4913592 0.5588848 0.617063 0.6487966];
% permY=[0.939434235 0.951220 0.9714123277 1.018513 1.088604581 1.141353 1.190111752];
% Valore de temperatura, reias e interpolados
tempX =[ 36 41 46 56 66 77 83];
% grau do polinomio desejado
n=2;
% função de grau 2 que melhor aproxima os valores de tempX e permY
p=polyfit(tempX, permY, n);
% função de grau 2 que melhor aproxima os valores de tempX e permY_desejado
p1=polyfit(tempX, permY_desej,n);
% função intermediaria entre p1 e p, a partir de uma média ponderada, foi
% tendido mais para p do que para p1
pmed=0.4*p1 + 0.6*p
% p=polyfit(perm_desej, perm, n)
% vetor xi, de valores para interpolação do eixo x, que vai de 30 até 85 com
% 30 pontos de x para y
xi=linspace(30,85,30);
% yi=polyval(p,xi);
% os valores de xi são inseridos no polinomio p1, para calcular seus valores
% correspondentes y1
y1 =polyval(p1,xi);
% os valores de xi são inseridos no polinomio pmed, para calcular seus valores
% correspondentes ymed
ymed=polyval(pmed,xi);
% plotagem das três funções
plot(tempX, permY,'-o',xi,y1,'--', xi,ymed,'-+')

```

Determinação da função que rege o comportamento da permissividade do meio em função da Umidade relativa do meio, segundo dados obtidos na cuba de ensaios.

➤ **Permissividade X Umidade relativa do ar**

```

%%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% calculo da função intermediária entre o valor determinado na cuba
% (variáveis permY, tempX), e o valor desejado (variáveis permY_desej,
% tempX, xi e y1) o resultado (xi, ymed)
% vetor permissividade, determinado pela cuba
permY=[09.39434235 09.51220 09.714123277 10.18513 10.88604581 11.41353 11.90111752];
permY=[10.79480317 10.69377778 10.59289319 10.54933333 10.48975067];
% vetor permissividade, desejado, são os melhores valores ajustados pelo
% modelo, visualmente de acordo com a corrente de fuga
permY_desej=[05.603187 05.527952 05.430642 05.379021 05.332401];
% Valores de temperatura, reais e interpolados
uarX =[79 83 87 91 95];
% grau do polinômio desejado
n=2;
% função de grau 2 que melhor aproxima os valores de tempX e permY
p=polyfit(uarX, permY, n);
% função de grau 2 que melhor aproxima os valores de tempX e permY_desejado
p1=polyfit(uarX, permY_desej, n);
% função intermediária entre p1 e p, a partir de uma média ponderada, foi
% tendido mais para p do que para p1
pmed = 0.7*p1 + 0.3*p;
xi=linspace(45,70,30)
ymed=polyval(pmed,xi);
y1=polyval(p1,xi);
plot(uarX, permY,'-o',xi,y1,'--',xi,ymed,'-+')

```

