

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

EDERSON PAULO VOGEL

**ESTUDO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE SINAL DE  
TENSÃO SEM CONTATO E SEM ATERRAMENTO,  
EM MÉDIA TENSÃO**

São Leopoldo, RS

2017



EDERSON PAULO VOGEL

**ESTUDO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE SINAL DE  
TENSÃO SEM CONTATO E SEM ATERRAMENTO,  
EM MÉDIA TENSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. César David Paredes Crovato

São Leopoldo, RS

2017

V878e Vogel, Ederson Paulo.  
Estudo de sistema de medição de sinal de tensão sem contato e sem aterramento, em média tensão / por Ederson Paulo Vogel. -- São Leopoldo, 2017.

83 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, RS, 2017.

Orientação: Prof. Dr. César David Paredes Crovato, Escola Politécnica.

1. Engenharia elétrica. 2. Medidas elétricas. 3. Medidores elétricos. 4. Correntes elétricas – Medição. 5. Energia elétrica – Distribuição. I. Crovato, César David Paredes. II. Título.

CDU 621.3  
621.31  
621.317

Catálogo na publicação:  
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

EDERSON PAULO VOGEL

**ESTUDO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE SINAL DE  
TENSÃO SEM CONTATO E SEM ATERRAMENTO,  
EM MÉDIA TENSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 22 de fevereiro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Giovani Bulla** - Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

---

**Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva  
Pereira** - Universidade do Vale do Rio dos  
Sinos (UNISINOS)

Prof. Dr. César David Paredes Crovato (Orientador)

Visto e permitida a impressão  
São Leopoldo,

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod  
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica



*Dedico este trabalho à minha amada esposa, Cristiane Maria Klein  
e aos meus pais, Ari e Maria Teresinha Vogel pelo apoio  
dado para a concretização de mais  
essa etapa em minha vida.*



# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me abençoado e permitido esta conquista muito importante. Aos meus pais Ari e Terezinha, que lutaram comigo para que esta vitória acontecesse e por serem à base da minha educação e formação pessoal. Agradeço pela compreensão quando, por inúmeras vezes, não lhes dei a devida atenção. Aos colegas da Universidade do Vales do Rio dos Sinos (Unisinos), aos meus amigos e colegas de trabalho, pela inestimável força ao encorajar-me em muitos momentos desta trajetória. A empresa AES Sul e RGE Sul, pelo apoio e suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eng. César David Paredes Crovato, toda a minha consideração, respeito e admiração. Agradeço pela confiança e o empenho dedicado ao longo deste trabalho. Por toda a contribuição, paciência e competência profissional dedicados a mim. Ao Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod pelo apoio desde o início dessa jornada, disponibilizando laboratórios e orientando para o andamento demais atividades necessárias.

A ESSS - *Engineering Simulation e Scientific Software* e toda a equipe de suporte pelo apoio na simulação computacional que foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Me. Eng. Juliano Fujioka Mogni por me demonstrar de forma muito didática, toda a base necessária para o estudo do software.

A minha amada esposa Cristiane Maria Klein ficam todos meus agradecimentos, devo a ti a realização desse sonho, compreendendo os momentos difíceis e por ser a pessoa que me faz cada vez mais feliz.



*“O que sabemos é uma gota;  
o que ignoramos é um oceano.”  
(Isaac Newton)*



# Resumo

A medição de corrente e tensão (assim como dos índices derivados dos mesmos), na rede de distribuição de energia elétrica torna-se cada vez mais necessária nos dias atuais. As concessionárias de energia buscam distribuir aos seus clientes, confiabilidade e estabilidade no fornecimento desta energia com níveis admissíveis de qualidade estabelecidos pelo órgão regulador do sistema elétrico. Com o objetivo de realizar um estudo de um sistema de medição de sinal sem a necessidade de seccionamento dos condutores de média tensão de energia elétrica e sem utilização de um referencial aterramento, o presente trabalho descreve uma metodologia baseada na análise do campo elétrico gerado por estes condutores para armazenar energia e inferir uma tensão em um capacitor de placas paralelas com determinadas características, situado à uma certa distância destes. Com a utilização de simulação computacional através de software baseado nas equações de Maxwell, é possível obter valores da diferença de potencial para sistemas com topologia monofásica e correlacioná-la com a tensão que gerou estes campos elétricos. Para rede com topologia bifásica e trifásica, não foi possível realizar esta correlação, porém há espaço para aplicar técnicas digitais de separação sega de fontes com o intuito de discriminar a contribuição de cada fase no elemento sensor.

**Palavras-chaves:** Qualidade de Energia Elétrica. Medição de forma de onda da média tensão monofásica. Campo elétrico.



# Abstract

The measurement of current and voltage (as well as the indexes derived from them) in the electricity distribution network becomes more and more necessary in the present day. The power concessionaires seek to distribute to their customers, reliability and stability in the supply of this energy with admissible levels of quality established by the regulatory body of the electric system. In order to carry out a study of a signal measurement system without the need to disconnect medium voltage electrical conductors and without using a ground reference, the present work describes a methodology based on the analysis of the electric field generated by these Conductors to store energy and infer a voltage in a capacitor of parallel plates with certain characteristics, situated at a certain distance from them. With the use of computational simulation through software based on the Maxwell equations, it is possible to obtain values of the potential difference for systems with single-phase topology and to correlate it with the voltage that generated these electric fields. For a network with two-phase and three-phase topology, it was not possible to perform this correlation, however there is room to apply digital seeding techniques of sources with the purpose of discriminating the contribution of each phase in the sensor element.

**Key-words:** Quality of Electric Power. Measurement of single-phase medium voltage waveform. Electric field.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Caminho de uma carga de prova em um campo elétrico. . . . .	31
Figura 2 – Linhas de Fluxo saindo de um condutor. . . . .	31
Figura 3 – Linhas de força para diferentes distribuições de carga. . . . .	32
Figura 4 – Uma linha de cargas infinita envolta por uma superfície gaussiana cilíndrica. . . . .	33
Figura 5 – Capacitor de Placas Paralelas. . . . .	36
Figura 6 – Fonte de tensão contínua conectada à placas paralelas. . . . .	37
Figura 7 – Circuito equivalente do sensor de tensão. . . . .	46
Figura 8 – Circuito de front-end do Sensor. . . . .	47
Figura 9 – Diagrama do circuito equivalente da parte frontal do sensor varactor. . . . .	47
Figura 10 – Estrutura convencional de rede com topologia monofásica. . . . .	53
Figura 11 – Estrutura convencional monofásica, tipo <i>U1</i> . . . . .	54
Figura 12 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão monofásico. . . . .	54
Figura 13 – Projeção do componente capacitor. . . . .	55
Figura 14 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão trifásico. . . . .	56
Figura 15 – Estrutura convencional trifásica, tipo <i>T1</i> . . . . .	57
Figura 16 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão trifásico, caixa de ar e solo. . . . .	57
Figura 17 – Variação da <i>ddp</i> do capacitor em relação à distância do condutor. . . . .	59
Figura 18 – Campo elétrico incidente no elemento capacitor. . . . .	60
Figura 19 – Valores de tensão do condutor eletricamente energizado. . . . .	61
Figura 20 – Valores de tensão do condutor eletricamente energizado (vista geral). . . . .	62
Figura 21 – Campo elétrico no entorno do condutor. . . . .	63
Figura 22 – Campo elétrico no entorno do condutor (vista lateral). . . . .	63
Figura 23 – <i>ddp</i> em <i>rms</i> do sistema monofásico, em 60 Hz. . . . .	64
Figura 24 – Sinal de tensão no sistema monofásico, em 60 Hz. . . . .	65
Figura 25 – Valores da <i>ddp</i> em relação à frequência: sistema Monofásico. . . . .	66
Figura 26 – Projeto sistema trifásico. . . . .	66
Figura 27 – Variação da <i>ddp</i> do capacitor em relação à distância dos condutores (sistema trifásico). . . . .	68
Figura 28 – Campo eletrostático (sistema trifásico, eixo x). . . . .	69
Figura 29 – Campo eletrostático (sistema trifásico 3D). . . . .	70
Figura 30 – <i>ddp</i> em <i>rms</i> do sistema trifásico, em 60 Hz. . . . .	70
Figura 31 – Sinal de tensão no sistema trifásico, em 60 Hz. . . . .	71
Figura 32 – Valores da <i>ddp</i> em relação à frequência: sistema Trifásico. . . . .	71
Figura 33 – Campo Elétrico e Tensão. . . . .	81

Figura 34 – Parametrização básica da topologia monofásica: simulação Maxwell 3D. 83

Figura 35 – Parametrização básica da topologia trifásica: simulação Maxwell 3D. . 83

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Níveis de Tensão da Rede Primária . . . . .	51
Tabela 2 – Valores de tensão em <i>rms</i> da <i>ddp</i> em relação à seção do condutor em 60 Hz: sistema monofásico. . . . .	62
Tabela 3 – Valores de tensão em <i>rms</i> da <i>ddp</i> em relação à seção do condutor em 60 Hz: sistema trifásico. . . . .	67
Tabela 4 – <i>ddp</i> x distância do capacitor em relação ao condutor. . . . .	68



# Lista de abreviaturas e siglas

A/D	Conversão Analógico / Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica
ANDE	Administración Nacional de Electricidad
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWG	American Wire Gauge
CA ou AC	Corrente ALternada
CC ou DC	Corrente Contínua
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
ddp	diferença de potencial
DEC	Duração Equivalente por Consumidor
ESSS	Engineering Simulation and Scientific Software
FEC	Frequência Equivalente de interrupção por Consumidor
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Força Eletromotriz
FF	Medição entre Fases de um Sistema: Fase-Fase
FN	Medição entre Fase e Neutro de um Sistema: Fase-Neutro
HFSS	High Frequency Electromagnetic Field Simulation
Hz	Unidade de Frequência Hertz
IEM	Interferência Eletromagnética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kV	Unidade de Tensão Quilo Volts
LCM	Loop Current Method

LTSpice	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
MCM	1000 Circular Mils
MCU	Microcontroller Unit
MEFS	Micromachined Electric Field Sensor
MNA	Modified Nodal Analysis
MNA	Modified Nodal Analysis
NR10	Norma Regulamentadora N° 10
NTD	Norma Técnica de Distribuição
NVM	Node Voltage Method
ONS	Operador Nacional do Sistema
PLC	Power Line Communication
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
Qt	Carga Teste
RF	Sinal de Radiofrequência
SCAM	Symbolic Circuit Analysis in MatLab
SEs	Subestações de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SoC	Sistem-on-Chip
Vin	Tensão de Entrada do Circuito Elétrico
Vout	Tensão de Saída do Circuito Elétrico
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks (Redes de Sensores sem Fio)
XLPE	Cross-Linked PolyEthylene (Composto termofixo à base de polietileno reticulado)
ZC	Zona Controlada
ZL	Zona Livre
ZR	Zona de Risco

# Lista de símbolos

$\varepsilon$	Permissividade Elétrica no Vácuo
$\sigma$	Densidade Superficial de Carga
$k$	Permissividade Absoluta
$\pi$	Proporção numérica que tem origem na relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, conhecida como <i>Pi</i>
$\lambda$	Densidade de Carga Linear Constante
$^{\circ}$	Medida dos ângulos planos correspondendo a $\frac{1}{360}$ de uma circunferência



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>Delimitações do Trabalho</b>	<b>26</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>27</b>
1.2.1	Objetivo Geral	27
1.2.2	Objetivos Específicos	27
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>29</b>
2.1.1	Campo Eletrostático	29
2.1.1.1	Distribuição de Cargas em Simetria Cilíndrica	32
2.1.2	Tensão	34
2.1.3	Capacitância	34
2.1.4	Interferência Eletromagnética	39
2.1.5	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	39
2.1.5.1	Qualidade de Energia Elétrica	40
2.1.5.1.1	PRODIST: Módulo 5 - Sistemas de Medição	42
2.1.5.1.2	PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica	42
2.1.5.2	Harmônicos	43
2.1.6	Aterramento	44
<b>2.2</b>	<b>Estudos Relacionados</b>	<b>45</b>
2.2.1	Medições de Carga sem Contato	45
2.2.2	Comunicação dos Sensores de Medição	48
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E MATERIAIS</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Primeiro Estudo: Topologia Monofásica</b>	<b>53</b>
<b>3.2</b>	<b>Segundo Estudo: Topologia Bifásica e Trifásica</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados do Primeiro Método: Topologia Monofásica</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados do Segundo Método: Topologia Trifásica</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A – CAMPO ELÉTRICO E TENSÃO DOS CONDUTORES: SISTEMA TRIFÁSICO COM A FASE A ENERGIZADA. . . . .</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE B – PARAMETRIZAÇÃO BÁSICA: SISTEMA MONOFÁSICO E TRIFÁSICO . . . . .</b>	<b>83</b>

# 1 Introdução

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tem sido usado em sentido amplo para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Abrangentemente pode-se definir QEE como sendo uma medida eficiente da energia elétrica utilizada pelos consumidores. Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas (PORCARELLI et al., 2013).

A QEE está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude do sinal, na forma de onda ou na frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Esta designação também se aplica às interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da distribuição e utilização da energia elétrica (SILVA, 2008).

Assim, o conceito de QEE, como campo de estudo, avançou nos últimos anos juntamente com a evolução das técnicas de processamento eletrônico tal como por exemplo nas aplicações: industriais (acionamentos e controles de máquinas elétricas), embarcadas (aeroespaciais, navais e transportes terrestres), informática (microcomputadores e sistemas de informação), controle e segurança (residencial, comercial e industrial), residenciais (tv, videocassete, videogame, microondas, aparelhos de som, etc...), etc (CANESIN, 2004).

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a contar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção. A questão da QEE aparece, portanto, a partir do momento em que os consumidores constatarem interrupções no fornecimento, mas à medida que tais consumidores tornam-se mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, outros fatores começam a ser considerados.

Nos dias atuais, além da disponibilidade de energia, a qualidade de fornecimento torna-se imprescindível. Diversos aspectos permitem a avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, entre eles pode-se citar a continuidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicações (MEHL, 1996).

Medições de tensões convencionais distribuídas pelas concessionárias de energia elétrica, em média tensão, exigem conexão de instrumentos diretamente no circuito a ser medido os quais normalmente precisam ser isolados fisicamente devido à tensão à que são submetidos. Sendo assim, para este isolamento observam-se variações de acordo

com o volume, peso e custo dos instrumentos que aumentam com este nível da tensão (WIJEWEERA; SHAFAI; RAJAPAKSE, 2008).

No que tange à conexão de instrumentos diretamente à rede de energia elétrica, medidas de controle são necessárias para trabalhos com eletricidade. Define-se que *medidas de controle* são titulações de itens que representam o coletivo das ações estratégicas de prevenção destinadas a eliminar ou reduzir, mantendo sob controle, as incertezas e eventos indesejáveis com capacidade potencial para causar lesões ou danos à saúde dos trabalhadores e, dessa forma, transpor as dificuldades possíveis na obtenção de um resultado esperado, dentro de condições satisfatórias (BARROS et al., 2014).

Quando mencionado o trabalho com eletricidade, o profissional necessita de um treinamento especial, habilitando-o a executar atividades no Sistema Elétrico de Potência, o chamado SEP. Assim, normas regulamentadoras devem ser conhecidas, tais como a Norma Regulamentadora 10 (NR10) mencionada no presente trabalho.

De acordo com a classe de tensão a ser medida, um fator de grande relevância é o quesito de segurança, onde distâncias mínimas para trabalhos com eletricidade devem ser respeitadas, conforme estabelece a NR10. Desta forma, estas distâncias são padronizadas de acordo com o nível de tensão aplicado (CUNHA, 2008). Estas são classificadas da seguinte forma:

- Zona Livre (ZL): sem restrições quanto ao trabalho com eletricidade;
- Zona Controlada (ZC): restrita a trabalhadores autorizados;
- Zona de Risco (ZR): restrita a trabalhadores autorizados e com a adoção de técnicas, instrumentos e equipamentos apropriados ao trabalho.

Nos últimos anos, os esforços da comunidade científica no campo de distribuição de energia elétrica e de gestão têm se movido em duas direções: Redes Inteligentes e Medição Inteligente, do inglês *Smart Grids* e *Smart Metering* respectivamente. O fator determinante é o constante aumento da procura dos clientes por energia industrial, comercial e doméstica, enquanto os recursos energéticos disponíveis são limitados. Além disso, o uso irresponsável da energia elétrica e a má qualidade da transmissão da fonte de alimentação determinam desperdício desta energia devido a baixa confiabilidade dos sistemas de distribuição (PORCARELLI et al., 2013).

## 1.1 Delimitações do Trabalho

Este trabalho limita-se ao estudo da possibilidade de realizar medições do sinal da forma de onda de tensão em redes de energia elétrica de média tensão sem necessidade de

contato elétrico e nem de aterramento, buscando também, analisar e avaliar a qualidade do sinal medido com a técnica proposta.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos se dividem em geral e específicos.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar um sistema que possibilite a medição do sinal da forma de onda da tensão nominal da rede de energia elétrica de média tensão de 13,8 kV e 23,1 kV, topologia monofásica e bifásica/trifásica, sem necessidade do contato elétrico com o condutor e sem necessidade do ponto de aterramento. Assim como possibilitar a avaliação da qualidade de energia do sistema elétrico neste ponto de medida.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Com a possibilidade de realizar medições de índices de QEE sem que haja um contato elétrico com esta rede e sem que haja aterramento, os objetivos específicos para o presente trabalho são:

- a) identificar e analisar os equipamentos atuais para medição de média tensão de energia elétrica;
- b) identificar e analisar sensores e componentes eletrônicos que não possuem interferência direta com os efeitos eletromagnéticos os quais serão submetidos;
- c) estudar os efeitos do campo elétrico gerado pelo(s) condutor(es) de energia elétrica de média tensão;
- d) estudar componentes eletrônicos capazes de, através do campo elétrico gerado pela rede de distribuição de energia elétrica, obter um nível de tensão para correlacionar à forma de onda da média tensão desta rede;
- e) identificar e analisar materiais específicos que podem fazer o papel (se necessário) de aterramento do sistema, capaz de atingir uma diferença de potencial;
- f) estudar um sistema capaz de enviar informações suficientes para análise de processamento digital de sinais, através de conexão sem fio;
- g) analisar os resultados obtidos e as alternativas presentes para atingir o objetivo principal deste trabalho.

### 1.3 Justificativa

Atualmente, por questões de segurança e de confiabilidade no sistema, as concessionárias de energia elétrica monitoram o comportamento de suas redes através de equipamentos, muitos destes utilizando sistemas telecomandados instalados ao longo de sua extensão, na maioria das vezes, ou através da comunicação das próprias subestações de energia, também chamadas de *SEs*, situadas em pontos estratégicos de carga. Porém, não é possível realizar uma medição pontual na média tensão em determinado local de forma rápida, eficaz e com baixo custo, sem a instalação de equipamento medidor devidamente aterrado, ou sem que haja um seccionamento dos condutores desta rede através da instalação de chaves seccionadoras.

As distribuidoras de energia elétrica possuem equipamentos nas *SEs* que monitoram o sistema elétrico e suas características. Similarmente, a exemplo de equipamentos caracterizados como chaves telecomandadas chamados de *reliadores*, possuem a necessidade de seccionamento da rede de média tensão, aterramento do equipamento e ainda sim, do trabalho de profissionais habilitados para a instalação destes. Além disto, tais equipamentos possuem uma robustez em função dos níveis de tensão e corrente elétrica em que são submetidos, que fazem com que os custos destes sejam muito expressivos.

Desta forma, este trabalho tem como justificativa buscar um método que possibilite reduzir o custo de homem/hora, seja na instalação do equipamento para medir o sinal de tensão ou na necessidade de trabalho para construção do seccionamento da rede de energia elétrica em média tensão. Assim, realizar um estudo e apresentação de um método para mensurar o sinal de tensão de energia elétrica sem que haja o contato elétrico com os condutores energizados e sem a utilização de um aterramento do sistema.

Este trabalho busca apresentar um estudo de método possível de analisar a forma de onda da média tensão em 13,8 kV ou 23,1 kV sem utilizar este referencial terra e sem que seja necessário seccionar a rede de energia elétrica, evitando gastos com equipamentos devidamente isolados para suportar este nível de tensão para possibilitar resultar em diminuição do tempo gasto para tal procedimento.

Estudando os valores da intensidade do campo elétrico gerado pelo condutor de média tensão eletricamente carregado, deduz-se possibilidade de um nível de tensão utilizando algum dispositivo que armazene o campo elétrico para correlacionar com os valores de tensão da rede de energia elétrica.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os embasamentos teóricos para o estudo da presente dissertação na seção *Fundamentação Teórica* (2.1), bem como os trabalhos, artigos e outros, descritos como referência da técnica ou da área científica, alcançado em um tempo definido, elencados na seção *Estudos Relacionados* (2.2).

### 2.1 Fundamentação Teórica

#### 2.1.1 Campo Eletrostático

Nesta seção, serão abordadas as teorias referentes às *linhas de campo eletrostático* ou também chamado de *campo elétrico*. Este tópico é diretamente relacionado com a presente dissertação em função da importância do entendimento de como estes campos elétricos influenciam na medição da forma de onda.

Conceitualmente descrito por Bartkowiak (1998) e também por Sadiku (2012), quando ocorre a eletrificação, o resultado são cargas iguais positivas e negativas; cargas iguais se repelem e cargas diferentes se atraem, e a força exercida por duas forças é dada pela Lei de Coulomb conforme equação 2.1. O vetor campo elétrico  $\vec{E}$  tem sempre a mesma direção da força a que a carga está sujeita e, no caso da carga ser positiva, o mesmo sentido. O módulo é calculado da seguinte forma:

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q} \rightarrow |\vec{F}| = k \frac{Q_1 Q_2}{\rho^2} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon} \right) \frac{Q_1 Q_2}{\rho^2} \quad (2.1)$$

Sendo:

$\vec{E}$  = vetor de intensidade do campo elétrico (N/C).

$\vec{F}$  = vetor de força do campo elétrico (N).

$q$  = quantidade de cargas elétricas (C).

$k$  = permissividade absoluta (Nm<sup>2</sup>C<sup>-2</sup>).

$\rho$  = distância entre as duas cargas pontuais (m)

$Q_1$  e  $Q_2$  = respectivos valores das cargas (C)

$\epsilon$  = permissividade elétrica no vácuo (N/m<sup>2</sup>C<sup>-2</sup>).

A força  $F$  obtida em *Newtons*, as cargas com  $Q_1$  e  $Q_2$  em *Coulomb*,  $r$  dado em metros e  $k$  está em função da constante chamada de *permissividade absoluta*, definida

como  $k = 8,9875 \cdot 10^9 \text{Nm}^2\text{C}^{-2}$ , válido para cargas separadas no espaço livre ou vácuo. Para qualquer outro meio,  $k$  pode ser calculado usando-se o valor adequado de  $\varepsilon$ .

Na equação 2.1, o campo elétrico  $\vec{E}$  é resultado da relação entre a força  $\vec{F}$  deste campo com a quantidade de cargas  $q$  elétricas presentes. Também, pode-se descrever que esta lei estabelece que o módulo da força entre duas cargas elétricas puntiformes ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) é diretamente proporcional ao produto dos valores absolutos (módulos) das duas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$  entre eles. Esta força pode ser atrativa ou repulsiva dependendo do sinal das cargas. É atrativa se as cargas tiverem sinais opostos e repulsiva se as cargas tiverem o mesmo sinal. Desta forma, conforme Bartkowiak (1998), a Lei de Coulomb enuncia é que a intensidade da força elétrica de interação entre cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos módulos de cada carga e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

Cardoso (2011) descreve que o campo elétrico em cargas pontuais é entendido como a propriedade adicional que o espaço adquire quando é colocada uma carga elétrica em suas proximidades, sendo descrita como a ação de uma força atuante em outra carga colocada neste espaço. Esta depende diretamente da sua quantidade e intensidade de campo presente, representada na equação 2.1. Assim, obtém-se o campo elétrico gerado por uma carga em um ponto diretamente proporcional ao seu valor e inversamente proporcional ao quadrado da distância, representado na equação 2.2:

$$E = k \cdot \frac{Q}{d^2} \quad (2.2)$$

Sendo:

$$E = \text{campo elétrico (N/C)}.$$

$$k = \text{permissividade absoluta (Nm}^2\text{C}^{-2}\text{)}.$$

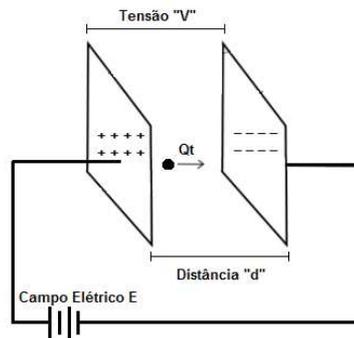
$$Q = \text{respectivo valor de carga (C)}$$

$$d = \text{distância a carga e a força atuante (m)}$$

Portanto, a equação 2.2 descreve que o valor do campo elétrico de determinada carga depende, basicamente, da distância em que esta se encontra do ponto de medição.

A partir da Lei de Coulomb, a região em torno de uma carga é caracterizada pelo fato de que outras cargas que estejam nesta região sofrem ação de forças, sendo este o termo chamado de *campo eletrostático* ou *campo elétrico*. Na figura 1 é ilustrada a carga teste  $Qt$  considerada como positiva e suficientemente pequena de forma a não interferir no espaço existente, demonstrando o caminho de uma carga de prova em um campo elétrico entre as placas por uma linha de campo invisível, chamada de *linha de força elétrica* (BARTKOWIAK, 1998).

Figura 1 – Caminho de uma carga de prova em um campo elétrico.

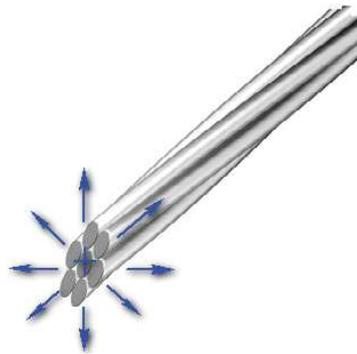


Fonte: Autor (2016).

A figura 1 é representada por um circuito que possui duas placas em determinada distância  $d$  em paralelas e uma carga de teste  $Qt$  no centro destas. Este por sua vez, alimentado por um campo elétrico  $E$ , faz com que uma tensão  $ddp$  seja gerada entre estas placas movendo a  $Qt$  do campo elétrico positivo para o negativo.

Estas linhas de força elétrica são caracterizadas como possuindo origem em uma carga positiva e terminarem em uma carga negativa, entrando ou saindo perpendicularmente à superfície de carga. Esta perpendicularidade das linhas em relação à superfície, na figura 2 apresentada, de um condutor de energia elétrica, mostra as linhas de força saindo de um condutor conduzindo corrente considerando uma carga estacionária, formando um campo cilíndrico carregado (BARTKOWIAK, 1998).

Figura 2 – Linhas de Fluxo saindo de um condutor.

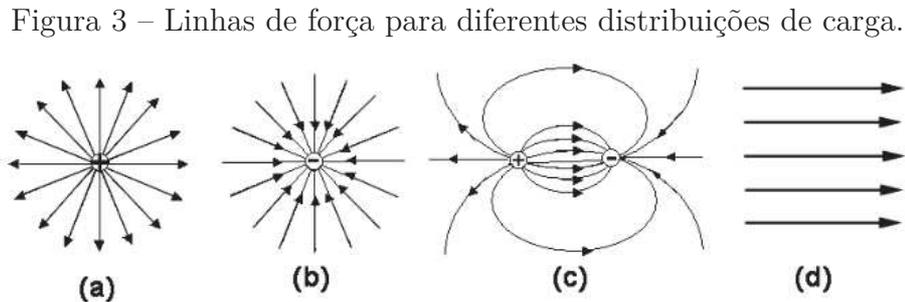


Fonte: Autor (2016).

Conforme descreve Clayton (2006), cargas produzem forças em outras cargas. Assim, pode-se observar um campo de *força invisível* em torno de cargas estacionárias. Esse campo de força será uma das principais grandezas eletromagnéticas, chamadas de campo elétrico.

Segundo Graça (2012), a ideia de representar a região em torno das cargas por linhas de campo elétrico, traçando curvas que apontam para qualquer ponto na mesma direção que o vetor campo elétrico, foi introduzida por Michael Faraday que a representava

por linhas de força, criando uma forma de visualizar essa propriedade do espaço em torno das cargas elétricas. Na figura 3, são ilustrados alguns aspectos das linhas de força que constituem um campo elétrico para diferentes distribuições de carga, sendo (a) *puntiforme positiva*, (b) *puntiforme negativa*, (c) *um dipolo elétrico* e (d) *campo elétrico homogêneo, sem carga no meio*:



Fonte: Graça (2012).

Conforme ilustrado na figura 3, o sentido das linhas de campo elétrico varia de acordo com a carga elétrica em questão: das cargas positivas para as cargas negativas.

Em uma região com presença de cargas elétricas, o espaço envolvente adquire propriedades que não apresentavam quando essas cargas não estavam presentes. Tal propriedade consiste na capacidade de aplicar uma força em uma carga qualquer colocada neste espaço envolvente (CARDOSO, 2011).

Buscando descrever os principais fundamentos teóricos referentes às técnicas estudadas neste trabalho, as teorias fundamentais e principalmente as que tangem ao eletromagnetismo, são utilizadas como referência balizadora para o desenvolvimento da técnica necessária ao estudo da medição do sinal da forma de onda de tensão, sem o contato elétrico com os condutores e sem aterramento. Esta análise limita-se à média tensão.

#### 2.1.1.1 Distribuição de Cargas em Simetria Cilíndrica

Segundo Sadiku (2012), define-se como fluxo do campo elétrico o resultado da intensidade de campo elétrico com a área perpendicular ao campo. No entanto, em geral o valor deste campo  $E$  varia ao longo de determinada superfície que nem sempre é perpendicular à esta. Assim, dividi-se a superfície em elementos menores de modo que  $E$  seja constante nessa área infinitesimal. Como resultado, este fluxo elétrico através de determinada área  $A$  é dado pela integral de superfície, conforme equação 2.3, onde o vetor área se aproxima de um limite diferencial  $d\vec{A}$  e a soma da equação se transforma em uma integral que deve ser feita sobre toda a superfície fechada, segundo a Lei de Gauss, que relaciona o fluxo elétrico através de uma superfície fechada  $A$  com a carga elétrica dentro da superfície.

$$d\phi = \vec{E} \cdot d\vec{A} \Rightarrow \phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon} \quad (2.3)$$

Sendo:

$\phi = \text{fluxo elétrico (V.m)}$ .

$d\vec{A} = \text{vetor de área infinitesimal}$ .

$q_{in} = \text{carga elétrica interna da superfície gaussiana (C)}$ .

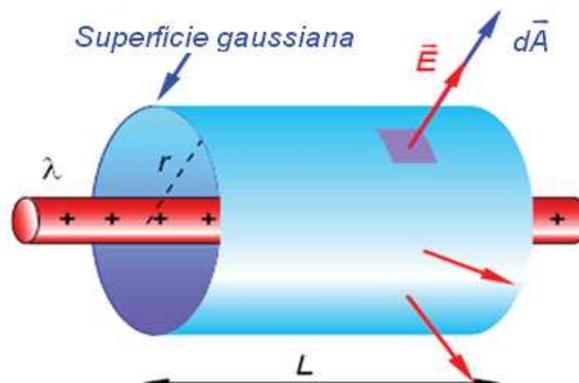
A Lei de Gauss é uma das equações de Maxwell e, sendo assim, uma lei fundamental do eletromagnetismo.

Cargas elétricas podem deslocar-se livremente no interior de condutores elétricos. Desta forma em uma situação de equilíbrio eletrostático (sem cargas em movimento), o campo elétrico é nulo no interior de um condutor (ROQUE, 2010).

Segundo Turano (2016), a Lei de Gauss fornece um outro modo equivalente, de escrever esta relação através da definição de uma superfície fechada hipotética, chamada de *superfície gaussiana*. Essa superfície fechada pode ter a forma que for desejada para análise, porém mais útil para uma superfície adequada de acordo com a simetria de um dado problema.

A simetria de uma distribuição de cargas em um condutor cilíndrico requer que o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  seja perpendicular às linhas de cargas no sentido interno ao externo deste condutor. Para a parte curva da superfície (envoltório que é chamado de superfície gaussiana) ilustrada na figura 4,  $\vec{E}$  possui módulo constante e perpendicular à esta superfície em cada ponto. Outrossim, observa-se que os fluxos através das bases superior e inferior da superfície cilíndrica são nulos, já que  $E$  é paralelo a estas superfícies (TURANO, 2016).

Figura 4 – Uma linha de cargas infinita envolta por uma superfície gaussiana cilíndrica.



Fonte: Turano (2016).

Na aplicação da Lei de Gauss sobre toda a superfície gaussiana, baseando-se que nesta o valor de  $\vec{E} \cdot d\vec{A}$  é igual a zero, considera-se apenas a integral sobre a superfície curva do cilindro, conforme equação 2.4:

$$\phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \oint dA = EA = \frac{q_{in}}{\varepsilon} = \frac{\lambda \cdot l}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

Sendo:

$\phi = \text{fluxo elétrico (V.m)}$ .

$d\vec{A} = \text{vetor de área infinitesimal}$ .

$q_{in} = \text{carga elétrica interna da superfície gaussiana (C)}$ .

$l = \text{comprimento do condutor cilíndrico (m)}$ .

$\lambda = \text{densidade de carga linear constante (C/m)}$ .

Observando-se que a área  $A$  é dada por  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ , a relação é

$$E(2 \cdot \pi \cdot r \cdot l) = \frac{\lambda \cdot l}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

, resultando na equação 2.6:

$$E = \frac{\lambda}{(2 \cdot \pi \cdot r) \varepsilon} \quad (2.6)$$

Portanto, a intensidade do campo elétrico  $E$  devido a uma distribuição de cargas com simetria cilíndrica, varia com  $\frac{1}{r}$  (TURANO, 2016).

### 2.1.2 Tensão

A *tensão, força eletromotriz (FEM)* ou também chamada de *diferença de potencial (ddp)* cuja medida é dada em volts (V), consiste na energia necessária para deslocar um carga unitária através de um campo elétrico. Desta forma, a tensão entre dois pontos em um circuito elétrico é a energia (ou trabalho) necessária para deslocar uma carga unitária entre estes pontos (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

### 2.1.3 Capacitância

Conceitualmente, quando dois corpos condutores quaisquer, independentemente do formato e do tamanho que tenham, estão separados por um meio isolante denominado *dielétrico*, formam um capacitor (ULABY, 2007).

O estudo desta seção auxilia no entendimento da capacitância como carga por unidade de diferença de potencial, seja entre condutores paralelos ou entre um condutor

e o referencial terra, tal capacitância é uma constante que depende das dimensões e do afastamento entre os condutores (HAYT; BUCK, 2013).

Em uma rede de distribuição de energia elétrica de média tensão, a capacitância é resultado da diferença de potencial entre os condutores. Esta, por sua vez, faz com que os condutores se tornem carregados de modo semelhante às placas de um capacitor entre as quais exista uma diferença de potencial, conforme é descrito a seguir pela equação 2.7.

Segundo cita Hayt e Buck (2013), a capacitância mede a capacidade de armazenamento de energia em equipamentos e dispositivos elétricos. Ela pode ser deliberadamente projetada para um propósito específico ou pode existir como um subproduto inevitável da estrutura do equipamento que opera com esta capacidade de armazenar energia. O conceito da capacitância é fundamental para todos os aspectos da engenharia elétrica e, no caso da presente dissertação, será projetada para o propósito de possibilitar a realização da medição deste sinal da forma de onda da média tensão sem a necessidade de seccionamento do condutor, utilizando o campo elétrico gerado pelos condutores energizados.

Seguindo na mesma linha de Hayt e Buck (2013), o armazenamento de energia através do dispositivo capacitor pode ser associado a uma carga acumulada ou relacionada a um campo elétrico. Assim, em semelhança a um indutor que armazena fluxo eletromagnético, o capacitor armazena um fluxo elétrico.

A carga de um capacitor pode ser analisada, como exemplo, através de simples descrição: aplicando-se uma bateria a dois condutores metálicos, a carga será transferida a estes condutores. A carga positiva residirá em um condutor de carga igual, mas oposta, no outro. Esta carga é descrita como carga livre, de forma que os elétrons fluem através dos condutores supracitados (CLAYTON, 2006). Para uma tensão (V) aplicada entre ambos condutores, resultando em uma carga livre total (Q), depositada ou armazenada nos condutores do capacitor, a capacitância (C) da estrutura é definida conforme descreve a equação 2.7:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.7)$$

Sendo:

$C =$  capacitância (F).

$Q =$  carga livre total (C).

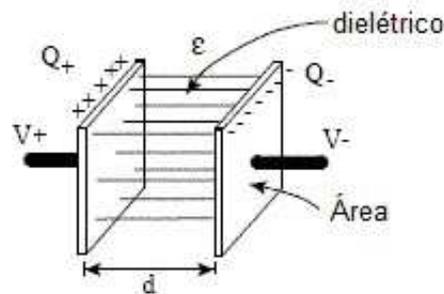
$V =$  tensão aplicada (V).

Nesta equação 2.7, o valor da capacitância de um capacitor, dado em *farads*, é a relação entre a carga livre total, dada em *Coulomb*, e a tensão aplicada entre as placas deste capacitor.

A estrutura mais simples de um capacitor é a de placas planas e paralelas, as quais consistem em duas placas condutoras de área definida como  $A$  e distância entre elas, definida como  $d$ . Desta forma, a carga livre sobre as placas gera um campo elétrico dirigido de uma placa para a outra. Entre estas placas paralelas existe um material isolante chamado de dielétrico de permissividade elétrica podendo ser mica, cerâmica ou o próprio ar (DORF; SVOBODA, 2012).

Na mesma linha de Dorf e Svoboda (2012), quando uma tensão é aplicada às placas deste capacitor, cargas elétricas positivas e negativas são armazenadas nestas placas e um campo elétrico é criado na região entre elas. A representação desta estrutura é ilustrada na figura 5, onde observa-se que a direção desse campo é perpendicular a placa e o sentido saindo da placa se  $Q$  é positivo e entrando na placa quando  $Q$  é negativo.

Figura 5 – Capacitor de Placas Paralelas.



Fonte: Autor (2015).

Grande parte das linhas de campo é perpendicular às placas, porém, uma pequena parte deste campo elétrico curva-se, ocorrendo o chamado *campo de franjamento* ou *linhas de campo de bordas*. No entanto, sendo este franjamento praticamente desprezível, o campo elétrico é definido conforme equação 2.8, descrevendo que a diferença de potencial  $ddp$  entre as placas relaciona-se com o campo de acordo com a relação de tensão e distância entre estas placas (CLAYTON, 2006):

$$E = \frac{V}{d} = \frac{Q}{\epsilon A} \quad (2.8)$$

Sendo:

$E$  = campo elétrico (N/C).

$V$  = tensão aplicada (V).

$d$  = distância entre as placas (m).

$Q$  = carga livre total (C).

$\epsilon$  = permissividade elétrica no vácuo ( $N/m^2C^{-2}$ ).

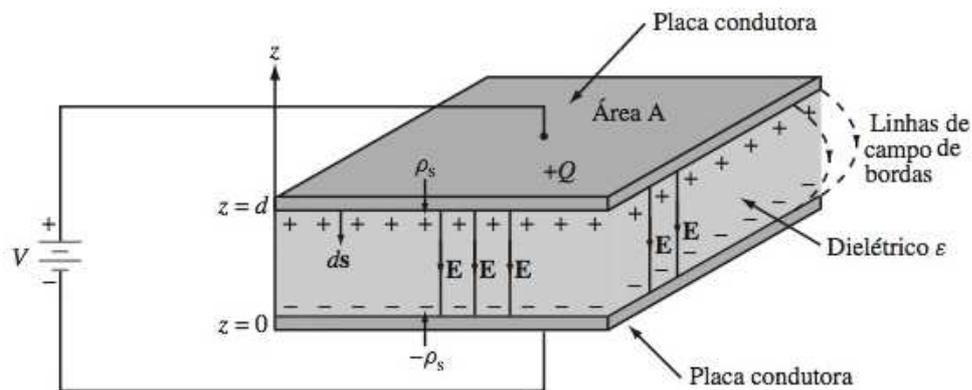
$A = \text{área das placas } (m^2).$

Conforme Fernandez (2010), o capacitor esquematizado na figura 5 pode ser aproximado considerando duas placas infinitas carregadas com cargas  $Q+$  e  $Q-$  e separadas por uma distância  $d$ .

Outra forma de demonstrar um capacitor de placas paralelas é descrita por Ulaby (2007) ilustrada na figura 6 e descreve que, devido a diferença de tensão  $V$  aplicada, a carga  $Q+$  se acumula na placa superior e  $Q-$ , na placa inferior. Entre as placas, as cargas induzem um campo elétrico uniforme na direção  $z-$ , ou seja, no sentido das cargas positivas para as negativas.

O campo elétrico, conforme Dorf e Svoboda (2012), é definido a partir da força que age sobre uma carga positiva unitária situada em um certo ponto do espaço.

Figura 6 – Fonte de tensão contínua conectada à placas paralelas.



Fonte: ULABY (2007).

Na figura 6 observa-se duas placas condutoras da área  $A$  separadas por uma distância  $d$  e um dielétrico, no caso o vácuo, entre estas.

Assim, na região fora das placas os campos elétricos gerados por cada placa apontam em sentidos opostos e se cancelam. Entre as placas eles se somam e geram um campo elétrico de módulo utilizando a Lei de Gauss, determinando-se que o campo de uma placa infinita é dado pela equação 2.9:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon} \quad (2.9)$$

Sendo:

$E = \text{campo elétrico } (N/C).$

$\sigma = \text{densidade superficial de carga } (C/m^2).$

$\epsilon = \text{permissividade elétrica no vácuo } (N/m^2C^{-2}).$

Observa-se que a placa “infinita” é apenas para efeitos matemáticos, como uma aproximação. Sendo assim, a densidade superficial de carga em cada placa é assumida uniformemente distribuída e, para ambas as placas, descreve-se conforme o resultado na equação 2.10 (CLAYTON, 2006):

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{\frac{Q}{\varepsilon A}d} = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (2.10)$$

Sendo:

$$C = \text{capacitância (F)}$$

$$\varepsilon = \text{permissividade elétrica no vácuo (N/m}^2\text{C}^{-2}\text{)}.$$

$$A = \text{área das placas (m}^2\text{)}.$$

$$d = \text{distância entre as placas (m)}.$$

Para um capacitor de placas paralelas, nota-se que a capacitância é proporcional a área e só depende de fatores geométricos do capacitor, ou seja, a equação 2.10 demonstra que conhecendo as características tais como a área das placas e a distância entre elas, é possível obter um valor de capacitância definida.

Considerando que o campo elétrico seja conhecido, torna-se possível calcular a diferença de potencial entre as duas placas, conforme pode ser observado na equação 2.11. Esta descreve que  $ddp$  entre as placas superior e inferior é obtida pela integração do campo elétrico  $E$  pela distância entre estas placas.

$$ddp = V_+ - V_- = - \int_0^d \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.11)$$

Sendo:

$$V = \text{tensão (V)}.$$

$$\varepsilon = \text{permissividade elétrica no vácuo (N/m}^2\text{C}^{-2}\text{)}.$$

$$d = \text{distância entre as placas (m)}.$$

$$\vec{E} = \text{vetor de intensidade do campo elétrico (N/C)}.$$

Existem muitos equipamentos nos quais as cargas são produzidas por indução, mas o mais famoso e histórico é o eletróforo, desenvolvido por Johannes Wilcke e Alessandro Volta no século XVIII. O eletróforo consiste de um capacitor com duas placas, sendo uma metálica e outra isolante, onde a carga obtida por fricção da placa isolante é transferida por indução a placa metálica (GRAÇA, 2012).

### 2.1.4 Interferência Eletromagnética

Nesta seção, é realizado um estudo teórico sobre a Interferência Eletromagnética (IEM) como base para posterior análise em um sistema de medição do sinal de tensão da rede de distribuição de energia elétrica. Estas interferências podem resultar em alterações nos valores de obtenção deste sinal a ser mensurado.

Pode-se definir interferência eletromagnética, ou IEM, como a degradação na performance de um sistema ou circuito elétrico causada pelo ruído eletromagnético. É possível dizer que um sistema ou um circuito elétrico alcança compatibilidade eletromagnética, ou CEM, se ele for capaz de operar em um ambiente eletromagnético sem ser suscetível a ruídos e sem causar interferência em outros circuitos (WENTWORTH, 2009).

Na mesma linha seguida por Wentworth (2009) em referência ao ponto de aterramento, ao criar um referencial terra de sinal (ou terra de referência), o objetivo é gerar um caminho de retorno de baixa impedância entre cargas e fontes. A variação no potencial sobre um bom terra de referência será insignificante se comparada com o potencial do sinal. Cargas elétricas induzem campos elétricos e correntes elétricas induzem campos magnéticos. Enquanto as distribuições de carga e corrente permanecem constantes no tempo, o mesmo ocorre com os campos que elas induzem.

Conforme cita Graça (2012), a interpretação das forças eletrostáticas entre cargas pode ser feita de duas maneiras: na primeira aplica-se a Lei de Coulomb, e instantaneamente cada uma das partículas ou elementos com carga possam “sentir” a presença da resultante das forças de interação com as demais cargas; na segunda cada carga modifica as propriedades do espaço ao seu redor produzindo um campo elétrico, que interage com partículas, ou com outros campos do mesmo tipo, propagando-se no meio com a velocidade da luz. Essas são as duas maneiras que se utilizam para estudar o que se chama interação elétrica.

### 2.1.5 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o segmento de distribuição se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado à entrega de energia elétrica para um usuário final. Como regra geral, o sistema de distribuição pode ser considerado como o conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam, geralmente, em tensões inferiores a 230 kV, incluindo os sistemas de baixa tensão. Assim, pode-se descrever que o conceito da média tensão é a tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e inferior a 69 kV (ANEEL, 2010).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser divididos em três tópicos: sistema de subtransmissão, sistemas de distribuição e sistema de distribuição primária. No presente trabalho, é estudado somente o conceito breve das redes de distribuição primária,

ou seja, sistemas de média tensão. Estas redes emergem das Subestações de Energia, chamadas de SE, e operam, no caso de redes com topologia aérea, com possibilidade de transferência de blocos de carga entre circuitos para atendimento da operação em condições de contingência. Estas redes atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição. São chamadas de *tronco* de alimentadores a rede principal, ou de *ramal* de alimentadores, redes derivadas das principais (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Segundo a Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica (ABRADEE), além das redes de subtransmissão, as distribuidoras operam linhas de média e baixa tensão, também chamadas de redes primárias e secundárias, respectivamente. As linhas de média tensão são aquelas com tensão elétrica entre 2,3 kV e 44 kV, e são muito fáceis de serem vistas em ruas e avenidas das grandes cidades, frequentemente compostas por três fios condutores aéreos sustentados por cruzetas de madeira em postes de concreto. Nas redes de distribuição de média tensão são encontrados equipamentos auxiliares para medição e/ou correção da qualidade do fornecimento da energia elétrica, tais como capacitores (configurados como banco de capacitores) e reguladores de tensão. Ambos são utilizados para corrigir anomalias na rede, as quais podem prejudicar a própria rede elétrica ou mesmo os equipamentos dos consumidores. (ABRADEE, 2015).

Em relação ao sistema brasileiro de energia elétrica, mais especificadamente na transmissão, a usina hidrelétrica de Itaipú que fornece esta energia para o Brasil e Paraguai, tem a incumbência de entregar a energia produzida na usina até os pontos de conexão com o Sistema Interligado, segundo ITAIPÚ (2015). No lado brasileiro a conexão é localizada na subestação de Foz do Iguagu de propriedade de Furnas, que transmite a energia até os centros de consumo juntamente com a COPEL. No lado paraguaio, a conexão é realizada na subestação Margem Direita, situada na área da usina de Itaipu. No Brasil, a coordenação e controle da operação do sistema elétrico é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema (ONS) e, no Paraguai, a responsabilidade é da Administración Nacional de Electricidad (ANDE).

Em termos de geração de energia, o escoamento da energia da usina hidroelétrica de Itaipu para o sistema interligado brasileiro, a partir da subestação de Foz do Iguagu no Paraná, é realizado por Furnas e Copel. A energia na frequência de 60 Hz utiliza o sistema de 765 kV de Furnas e o sistema de 525 kV da Copel. E o ONS é o responsável pela coordenação e controle da operação da transmissão (ITAIPÚ, 2015).

#### 2.1.5.1 Qualidade de Energia Elétrica

Conforme descreve Kagan, Oliveira e Robba (2005), a qualidade do produto é caracterizada basicamente pela forma de onda de tensão do componentes de um sistema trifásico, que contempla principalmente os seguintes fenômenos:

- *variação de frequência*: são variações de frequência oriundas de variações da carga do sistema. Este opera em frequência de 60 Hz no Brasil;
- *variação de tensão de longa duração*: são as variações de tensão em barras de unidades consumidoras que ocorrem em função da variação contínua da carga do sistema elétrico. Esta tensão, por sua vez, sofre variação ao longo do dia;
- *variação de tensão de duração curta*: são variações nos níveis de tensão acarretadas principalmente por faltas no sistema elétrico ou por outros tipos de eventos, tais como partida de motores de grande porte;
- *distorções harmônicas de tensão e corrente*: são distorções em regime permanente ou não, da forma de onda de tensão ou de corrente, normalmente causadas por cargas não lineares existentes no sistema. Geralmente são composições de formas de onda periódicas com frequência múltipla inteira da fundamental da rede de distribuição de energia elétrica.

As distribuidoras de energia elétrica possuem indicadores que *norteiam* os níveis aceitáveis de fornecimento aos consumidores, onde destacam-se o chamado *Duração Equivalente por Consumidor* (DEC) que descreve o espaço de tempo médio que um consumidor ficou sem energia, e o *Frequência Equivalente de interrupção por Consumidor* (FEC), que descreve o número de interrupções médio de energia que cada consumidor sofreu (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Em geral, os problemas relacionados com a QEE são identificados quando um equipamento alimentado pela rede elétrica não funciona adequadamente. Assim, equipamentos operando com sobreaquecimento, proteção atuando intempestivamente, capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes podem ser indícios de problemas relacionados diretamente com QEE (DECKMANN; POMILIO, 2016).

Ainda na mesma linha descrita por Deckmann e Pomilio (2016) em termos de monitoramento da QEE, a partir da identificação de uma falha ou mau funcionamento de uma instalação ou equipamento, se inicia uma pesquisa para diagnosticar as causas do problema relativo à qualidade da energia elétrica. Tratando-se de um problema de compatibilidade eletromagnética, uma pesquisa pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico.

Desta forma, o estudo desta seção para o presente trabalho enfatiza a necessidade de realizar a medição da forma de onda de tensão de forma rápida e prática, a fim de possibilitar, por exemplo, a instalação de equipamentos temporários na rede, não seccionando os condutores de energia.

### 2.1.5.1.1 PRODIST: Módulo 5 - Sistemas de Medição

O Módulo 5 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL, tem como objetivo estabelecer os requisitos mínimos para medição das grandezas elétricas do sistema de distribuição aplicáveis ao faturamento, à qualidade da energia elétrica, ao planejamento da expansão e à operação do sistema de distribuição; também, de apresentar os requisitos básicos mínimos para a especificação dos materiais, equipamentos, projeto, montagem, comissionamento, inspeção e manutenção dos sistemas de medição bem como possui o objetivo de estabelecer procedimentos fundamentais para que os sistemas de medição sejam instalados e mantidos dentro dos padrões necessários aos processos de contabilização de energia elétrica e verificar que as disposições estejam de acordo com a legislação vigente, as exigências do INMETRO, as normas técnicas da ABNT, tendo sido considerados os Procedimentos de Rede e as Regras e os Procedimentos de Comercialização para os sistemas de medição para faturamento de energia elétrica (ANEEL, 2016a).

Este módulo 5 do PRODIST possui quatro aspectos definidos como seções:

- a) *aplicabilidade*: identifica os agentes aos quais este módulo se aplica, sua abrangência e as responsabilidades;
- b) *especificação dos sistemas de medição*: uniformiza os critérios para as especificações dos sistemas de medição de energia elétrica utilizados nos sistemas de distribuição, destinados ao faturamento da energia elétrica, ao planejamento da expansão do sistema, à apuração das perdas técnicas e à qualidade da energia elétrica;
- c) *implantação, inspeção e manutenção dos sistemas de medição*: define as responsabilidades e procedimentos para os agentes envolvidos nas atividades de implantação, inspeção e manutenção dos sistemas de medição nas unidades consumidoras ou instalações da distribuidora;
- d) *leitura, registro, compartilhamento, e disponibilização das informações de medição*: estabelece os procedimentos básicos para leitura, registro, compartilhamento e disponibilização das informações de medição de grandezas elétricas dos agentes conectados, acessados ou acessantes, ao sistema de distribuição.

### 2.1.5.1.2 PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica

O Módulo 8 dos Procedimentos do PRODIST da ANEEL, tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado; também, define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime

permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE e estabelecer a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades (ANEEL, 2016b).

Conforme descreve o PRODIST da ANEEL (2016b), os aspectos considerados da qualidade do produto, que no caso é a própria energia elétrica, em regime permanente ou transitório são:

- a) *tensão em regime permanente*: são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente;
- b) *fator de potência*: metodologia de medição, onde os registros dos valores reativos deverão ser feitos por instrumentos de medição adequados, preferencialmente eletrônicos, empregando o princípio da amostragem digital e aprovados pelo órgão responsável pela conformidade metrológica. Também, descreve valores de referência e as definições de excedentes reativos;
- c) *harmônicos*: as distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental;
- d) *desequilíbrio de tensão*: o desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição.
- e) *flutuação de tensão*: a flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão;
- f) *variação de tensão de curta duração*: variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo;
- g) *variação de frequência*: o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

#### 2.1.5.2 Harmônicos

Em termos de QEE, o estudo dos harmônicos se torna imprescindível para avaliação do processo de medição do sinal de nível de tensão. Assim, se tratando de um sistema elétrico ideal, as tensões devem ser perfeitamente senoidais e equilibradas. A magnitude

da distorção de tensão depende da impedância equivalente vista pela carga não linear ou fonte de corrente harmônica e da corrente suprida por ela. Portanto, sendo o objetivo do estudo da presente dissertação a medição do sinal de média tensão, estas distorções harmônicas influenciam nos resultados almejados.

A distorção da forma de onda pode ser definida como um desvio em regime permanente do sistema, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e caracterizada pelo seu conteúdo espectral, principalmente.

A palavra *harmônico* foi originalmente definida em acústica, cujo significado era a vibração de um fio ou uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante. Fenômenos semelhantes a este ocorrem na Engenharia Elétrica, onde deformações das tensões e correntes elétricas também tem sido registradas. Neste caso, os fundamentos físicos e matemáticos utilizados naquela área da física podem ser imediatamente aplicados às questões elétricas (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

Os sistemas elétricos são compostos por tensões puramente senoidais, com frequência e amplitude constantes, considerando uma situação ideal. Entretanto, desvios nesse padrão se tornaram mais significativos e comuns. Esse advento, o qual denomina-se harmônico, é o conteúdo de um sinal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência real do sistema. Assim, ocasionado pelos efeitos da proliferação das chamadas cargas não lineares, as quais provocam uma desproporcionalidade entre os sinais de corrente e tensão (DINIZ, 2014).

Tecnicamente, conforme descreve Velasco (2007), um harmônico é um componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (por exemplo, nos sistemas típicos brasileiros de distribuição de energia elétrica, a frequência fundamental é de 60 Hz, segundo ITAIPÚ (2015)). As harmônicas no sistema de energia são oriundas de equipamentos e cargas não lineares instaladas no sistema de distribuição.

Usualmente, consideram-se as harmônicas até a 50ª ordem, em relação à fundamental, a partir desse valor elas são consideradas, normalmente, desprezíveis na análise de sistemas elétricos de distribuição de energia. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas não representam maiores problemas aos sistemas de potência de distribuição (VELASCO, 2007).

### 2.1.6 Aterramento

Conforme a proposta da presente dissertação em realizar a medição do sinal da forma de onda da média tensão para redes de distribuição de energia elétrica primárias sem o referencial terra, o entendimento do conceito de aterramento é fundamental para buscar a não utilização deste e obter-se os resultados almejados.

Essencialmente, aterramento é uma conexão elétrica à terra, representando o valor

da resistência de aterramento, a eficácia desta ligação, ou seja, quanto menor a resistência, melhor o aterramento. O aterramento pode desempenhar várias funções no sistema elétrico, tais como funções associadas à proteção deste e proteção de equipamentos, permitindo o escoamento para a terra de cargas ou de correntes de descarga. Além disto, promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo quando for injetada corrente elétrica em seus eletrodos (BELTANI, 2007).

O aterramento elétrico, segundo Capelli (2000), possui três principais funções:

- proteção do usuário do equipamento por descargas atmosféricas através de caminho alternativo para a terra;
- “descarregar” cargas estáticas acumuladas na estrutura dos equipamentos;
- facilitar o funcionamento dos dispositivos de proteção, tais como fusíveis, chaves entre outros, buscando desvio de corrente elétrica para a terra.

## 2.2 Estudos Relacionados

Os trabalhos a seguir apontam para a solução pretendida no presente trabalho. Nem todas possuem esse foco, mas são fundamentais para entender os métodos utilizados em trabalhos tidos como referência.

### 2.2.1 Medições de Carga sem Contato

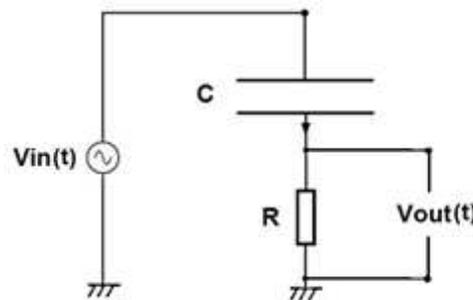
No trabalho realizado por Balsamo et al. (2013), se apresenta uma técnica de abordagem não-invasiva para medir a forma de onda de tensão de elementos condutores, tais como arames ou cabos, não requerendo qualquer contato com a rede de energia elétrica. Desta forma, os dados de amplitude e de harmônicos são enviados através de conexão sem fio por meio do padrão IEEE 802.15.4. O sensor proposto não se destina a ser utilizado na monitorização da tensão de condutores cilíndricos, tais como fios ou cabos, mas para monitorização da tensão sobre uma superfície genérica, ou seja, abordagem não-invasiva para medir a baixa tensão (230 V a 400 V) na forma de onda de elementos condutores cilíndricos.

Esta técnica, utilizada por Balsamo et al. (2013), baseia-se em um sensor que é constituído de um condutor usado para cobrir uma parte da superfície de isolamento do fio, necessário para criar um acoplamento capacitivo entre o condutor interno do fio e o corpo externo. A capacitância obtida, definida como  $C$ , pode ser modelada como um condutor cilíndrico de raio definido. Portanto, a capacitância de tal estrutura depende dos raios destes cilindros, do comprimento do condutor e da permissividade que varia com a natureza de forma entre eles.

Para o método apresentado, a capacitância  $C$  é pré-definida, ou seja, tabelada de acordo com a seção do condutor que se pretende medir o sinal de tensão e corrente elétrica. Na figura 7, é ilustrado o circuito equivalente do sensor de tensão desenvolvido por Balsamo et al. (2013).

Os valores de  $C$  são armazenados e associados com o tipo de cabo para uma tabela de consulta, processada a partir da utilização de um Microcontrolador para definir a função de transferência do sensor, com uma frequência de 50 Hz, para se obter a amplitude e a fase inicial da tensão de entrada  $V_{in}(t)$ .

Figura 7 – Circuito equivalente do sensor de tensão.



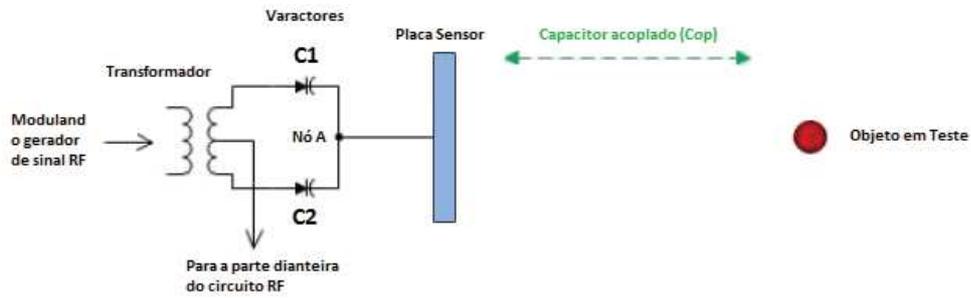
Fonte: Balsamo (2013).

Na figura 7, o circuito RC alimentado por uma tensão senoidal  $V_{in}(t)$  gera uma corrente elétrica no componente resistor  $R$ , sendo possível observar uma *ddp* no tempo através da tensão  $V_{out}(t)$ , correlacionando-a à tensão da fonte geradora  $V_{in}(t)$  (BALSAMO et al., 2013).

No trabalho proposto por Noras (2014), ele descreve um embasamento teórico para o funcionamento de um sensor de campo elétrico contendo um capacitor variável em estado sólido. O foco apresentado é sobre métodos que utilizam o acoplamento capacitivo, ou seja, medição do campo elétrico por indução. Estas técnicas podem ser classificadas como sensores de corrente, tensão dinâmica induzida e sensores de sonda Kelvin. Sensores dinâmicos exigem modificações no campo elétrico a fim de serem capazes de detectar este campo. Técnicas padronizadas para medição do campo elétrico próximo e distante, empregadas no trabalho proposto por Noras (2014), envolvem uma antena acoplada a uma tensão ou instrumento de medição atual.

O sistema de detecção de campos elétricos sob consideração pode ser representado como um diagrama mostrado na figura 8. O *Objeto em Teste*, que é a fonte de um campo elétrico, utiliza um capacitor acoplado ( $C_{op}$ ) para a placa de detecção do sensor. A placa é um *nó* comum para dois componentes varactores. Estes, por sua vez, estão sendo alimentados com um sinal de portadora de  $RF$  através de um transformador, onde o gerador de  $RF$  e a parte de detecção do circuito estão galvanicamente separados.

Figura 8 – Circuito de front-end do Sensor.

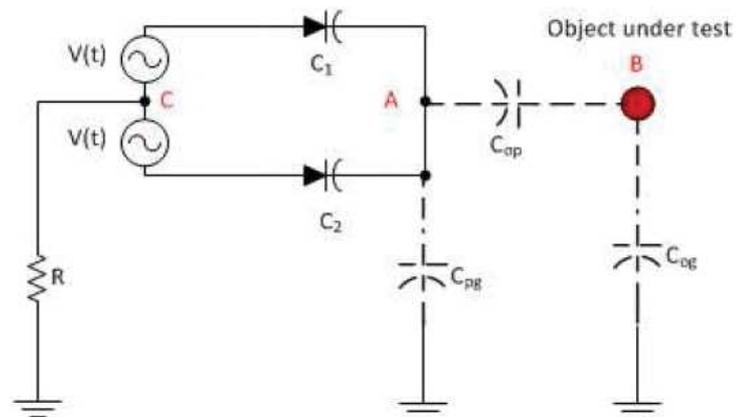


Fonte: Adaptado de Noras (2014).

Nesta figura 8, o *Objeto em Teste*, que no caso representa um condutor de energia elétrica, gera um campo elétrico cuja a distância em relação à *Placa Sensor* conhecida descreve o fenômeno capacitivo entre o condutor e esta placa. Desta forma, enviando o sinal através do *Nó A* e do *Modulador e gerador de sinal RF*, é possível realizar a transmissão do sinal obtido pela placa sensora.

Na figura 9 representada a seguir, é demonstrado um circuito que possui duas fontes de tensão  $V(t)$ . Ambos os catodos dos varactores são ligados ao elemento sensor no *Nó A*. Juntos, eles formam um capacitor variável dependente da tensão. A placa sensor é acoplada ao solo e ao objeto em teste (Cop). Partindo do princípio de que o objeto possui uma carga elétrica  $Q$  fixa, a tensão em relação à terra depende de seu acoplamento capacitivo com o solo e a placa sensor. Desta maneira, o potencial da placa sensor que é flutuante no valor médio do transportador de sinal, é igual a zero. Uma vez que o tamanho da placa é relativamente pequeno, presume-se que o potencial do objeto depende apenas da capacitância do objeto para o aterramento ( $C_{og}$ ) cuja a capacitância ( $C_{pg}$ ) pode ser negligenciada.

Figura 9 – Diagrama do circuito equivalente da parte frontal do sensor varactor.



Fonte: Noras (2014).

A utilização de capacitores com capacitância fixa faz com que a corrente elétrica

seja muito baixa em medições sem contato, sendo necessário equipamentos muito precisos e com custos elevados para se obter resultados. Assim, quanto maior for o movimento das placas do capacitor em relação ao tempo, maior corrente a corrente elétrica (NORAS, 2014).

Para Noras (2014) o conceito básico do sensor pode ser melhor explicado como tendo duas capacitâncias em série entre a placa sensor e o objeto a ser testado, e capacitância dos varactores. A capacitância destes varactores pode ser variada, tornando a detecção de campos elétricos de corrente contínua possíveis. Além disso, devido à característica não linear, a tensão induzida na placa sensor é convertida para corrente elétrica que pe comparativamente maior, aumentando assim a sensibilidade do sistema.

### 2.2.2 Comunicação dos Sensores de Medição

O artigo apresentado por Noras (2014) pode ser utilizado como base fundamental para a presente dissertação. Estando estas técnicas para níveis de tensão inferiores ao proposto, a metodologia aplicada em baixa tensão pode ser avaliada para utilização em média tensão através de adaptações para suportar este nível de sinal de tensão mais elevado.

Em termos de comunicação do sinal de tensão a ser medido, conforme é almejado na presente dissertação, pode-se analisar o trabalho realizado por Porcarelli et al. (2013) mesmo não possuindo um foco direto para a técnica necessária. No entanto, baseia-se no estudo que aplica uma tecnologia de utilização de sensores de baixa potência que possuem um baixo custo e são dispositivos não-invasivos.

No trabalho descrito por Porcarelli et al. (2013) foi utilizado a tecnologia denominada *Wireless Sensor Networks* (WSNs) com o qual é possível criar um sensor *wireless* para medir a corrente consumida por aparelhos individuais. A motivação ocorre em função da necessidade cada vez maior do controle na qualidade da energia, consumo eficiente e demais fatores das companhias de energia elétrica. Imposições regulatórias/jurídicas exigem controles nos aspectos supracitados e abordam em detalhes sobre os equipamentos utilizados para as medições. Normalmente, estas questões são abordadas utilizando o sistema integrado *System-on-Chip* (SoC), que inclui sensores A/D, MCU, *interface* de comunicação e memória.

Análises, segundo Porcarelli et al. (2013), de duas técnicas de rede podem ser exploradas em uma rede de área inicial: uma alternativa é transmitindo dados em linhas de energia usando os equipamentos elétricos, o chamado *Power Line Communications* (PLC), e a outra é a utilização de rede transmissão sem fio para enviar e receber dados, porém a uma taxa de dados muito menor que *WLAN* típico (*wireless*).

Segundo descreve Wijeweera, Shafai e Rajapakse (2008), um novo tipo de sensor

de campo elétrico em miniatura que pode ser utilizado para medir as tensões do sistema remoto de alimentação. A capacidade de medir tanto em corrente alternada *AC* quanto em corrente contínua *DC* é uma vantagem significativa deste sensor, em comparação com outros sensores que só podem medir em *AC* ou *DC*. Esse tipo de sensor usado para medição da tensão baseia-se em um *Micromachined Electric Field Sensor* (MEFS) que utiliza um *grounded* aterrado para expor periodicamente e proteger os eletrodos de subjacentes a um campo elétrico incidente. Atuadores térmicos são ligados em obturadores, onde a corrente elétrica que percorre através destes faz com que se aqueçam e expandam. Assim, movendo o obturador ao longo dos eletrodos de detecção.

Quanto ao funcionamento deste sensor desenvolvido por Wijeweera, Shafai e Rajapakse (2008), no momento em que o obturador cobre e descobre os eletrodos de detecção na presença de um campo elétrico, uma corrente alternada é induzida nestes eletrodos. Conclusões deste experimento demonstraram que a resposta do sensor foi linear com a tensão de linha e que um sensor de campo elétrico usado na medição é capaz de mensurar campos elétricos CA e CC, ou seja, poderia ser utilizado para monitorizar tensões remotamente, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua.

McKenzie e Record (2010) analisaram uma metodologia de medição de tensão baseada no princípio de uma capacitância de vibração implementada eletronicamente, ou seja, medição de tensão sem contato utilizando uma variação eletrônica de capacitância. Esta técnica permite a medição não invasiva de tensões CC.

A metodologia utilizada de um circuito elétrico equivalente da sonda Kelvin com base em uma capacitância sintética descrita por Abbadi e Jaradat, permite eliminar a necessidade de quaisquer peças fisicamente em movimento. Desta forma, ao utilizar um transdutor para injetar corrente no condensador em fase adicional sem alterar a tensão de entrada de forma eficaz, obtém-se uma alteração na capacitância que é determinada pela intensidade de corrente injetada.

Conforme cita Noras (2002), o método de vibração do capacitor é um método muito bem conhecido e eficaz para investigações de potenciais elétricos de superfície, descrito através do princípio de funcionamento da *sonda capacitor vibrando*.

Existem muitos fatores que determinam a sensibilidade e precisão da sonda Kelvin, tais como a vibração dos condutores, efeitos piezoelétricos, campos elétricos externos, entre outros. A influência de alguns deles podem ser limitados pelo adequado projeto da sonda, utilizando uma blindagem, projeção de circuito eletrônico especial (NORAS, 2002).



### 3 Métodos e Materiais

Analisando as técnicas dos trabalhos tidos como base para alcançar o objetivo do presente estudo, a utilização do componente capacitor é apresentada em todos os métodos para medir sinais de tensão e/ou de corrente elétrica, sem contato elétrico com condutores de energia elétrica.

Para contextualizar o método abordado estudado neste trabalho, utiliza-se o campo elétrico  $E$  percorrido no espaço entre o condutor energizado e a terra para armazenar energia elétrica no componente capacitor, situado entre estes, para obter-se a  $ddp$  das placas. Quando estão presentes cargas distribuídas em um fio retilíneo uniforme, a integração destas cargas resultam em um campo elétrico considerando todas estas. Portanto, o papel do capacitor neste circuito é justamente armazenar esta energia e mensurar uma  $ddp$  entre as placas paralelas deste componente capacitor para correlacionar com a tensão do condutor.

Este trabalho é subdividido em estudos que possibilitam a análise de cada situação, tais como os materiais utilizados, bem como as técnicas abordadas, para almejar o objetivo da presente dissertação. Desta forma, dois destes estudos foram analisados para realizar a medição do sinal de média tensão da rede de distribuição de energia elétrica:

- o primeiro estudo baseia-se na análise de um circuito de média tensão com topologia monofásica. Utiliza-se da influência do campo elétrico em um componente capacitor distanciado do condutor energizado com uma tensão senoidal para um sistema de 13,8 kV, para medição de uma  $ddp$  entre as placas paralelas deste componente;
- o segundo estudo baseia-se em análise similar ao primeiro, porém para um circuito com topologia trifásica, ou seja, com três condutores energizados a uma tensão senoidal para o sistema de 13,8 kV e tensões defasadas em  $120^\circ$ .

Os níveis dos valores de média tensão aplicados no estado do RS são ilustrados conforme tabela 1:

Tabela 1 – Níveis de Tensão da Rede Primária.

Topologia de Rede Primária	Tensão Nominal (kV)	
	Sistema 13.8 kV	Sistema 23.1 kV
Monofásica (FN)	7,9	13,3
Trifásica (FF)	13,8	23,1

Fonte: Autor, 2016.

Segundo descreve a Normativa Técnica de Distribuição N°2 ou a chamada de NTD 002 (AES Sul, 2016) da AES Sul, as características elétricas nominais do sistema para a área de concessão desta distribuidora também são aplicadas para as demais do estado RS. A informação referente a topologia entre Fase-Neutro (FN) descreve a diferença de potencial do sistema monofásico entre o condutor e o referencial terra, visto que este sistema é composto de apenas um condutor eletricamente carregado. Para um sistema monofásico com dois condutores (casos pontuais), sistema bifásico ou sistema trifásico, a tensão nominal é descrita entre Fase-Fase (FF). No caso do estudo do presente trabalho, foi analisado somente o sistema 13,8 kV.

Inicialmente, a ferramenta de simulação computacional utilizada foi software da ANSYS, chamado de *High Frequency Electromagnetic Field Simulation* (HFSS). Este software, segundo a ANSYS é o padrão da indústria para a simulação de campos eletromagnéticos de onda completa em formato 3D. Sua precisão padrão *Gold*, solvers avançados e tecnologias de computação de alto desempenho, o tornaram uma ferramenta essencial para engenheiros encarregados de executar os projetos precisos e rápidos em dispositivos eletrônicos de alta frequência e com plataformas de alta velocidade. Assim, o HFSS oferece tecnologias de *solver state-of-the-art* baseadas em elementos finitos, equação integral, métodos assínticos e híbridos avançados para resolver uma ampla gama de microondas, sinais RF e aplicações digitais de alta velocidade (ANSYS, 2016a).

Desta forma, o HFSS consegue simular estruturas muito mais complexas do que a propostas no presente trabalho, porém em frequências na escala de MHz até GHz. Este se trata de um *solver full wave* (calcula-se a equação de onda completa de Maxwell). Porém estes solvers não são estruturados para simular sistemas eletricamente pequenos, como é o caso. Este tipo de simulação requer solvers estáticos e quase estáticos.

Segundo auxílio da *Engineering Simulation e Scientific Software* - ESSS (1995) para que houvesse uma análise adequada do sistema proposto no presente trabalho, foi avaliado como exemplo, o processo de adaptação da malha onde a *ddp* no capacitor não convergiu (como critério para convergência, foi inserido o valor de 1%, o que significa que quando a *ddp* variar menos que 1% entre passos, o software não processa). Após, avaliando 15 passos, foi observado uma variação de mais de 500%. Assim, a distribuição de campo elétrico resultante descreve que o comportamento não é coerente.

O software utilizado para a simulação computacional do problema exposto, foi o Maxwell 3D da mesma ANSYS. O Maxwell utiliza solvers estáticos e quase estáticos, diferente do HFSS, ideais para simulações na ordem de grandeza de Hz a kHz. Neste caso, observa-se que a *ddp* no capacitor converge em 09 passos e a distribuição de campo é considerada de forma mais próxima da realidade. Esta simulação, auxiliada pela ESSS, foi descrita como coerente e cabível para a análise do sistema exposto no presente trabalho.

Este é um pacote de software interativo, segundo a ANSYS (2016b) de alto

desempenho que utiliza Análise de Elementos Finitos (FEA) para resolver sistemas elétricos, magnetostáticos, correntes de *Foucault* e problemas transitórios.

O software Maxwell resolve os problemas de campo eletromagnético por resolução de equações de Maxwell numa região de espaço finito com condições de fronteira apropriadas, quando necessário, e com o utilizador especificado de condições iniciais a fim de obter uma solução com singularidade garantida. O ANSYS Maxwell é a ferramenta de simulação para análise do campo eletromagnético de baixa frequência para engenheiros encarregados de projetar e analisar em 2D e dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos em 3D, incluindo os motores, atuadores, transformadores, sensores e bobinas. O software Maxwell utiliza o método dos elementos finitos precisos para resolver um sistema estático no domínio da frequência, campos eletromagnéticos e campos elétricos variáveis no decorrer do tempo.

Portanto, para o andamento do estudo do presente trabalho, considera-se a utilização do software da Maxwell da ANSYS, parametrizada pela ferramenta de *solver Eletrostatic*.

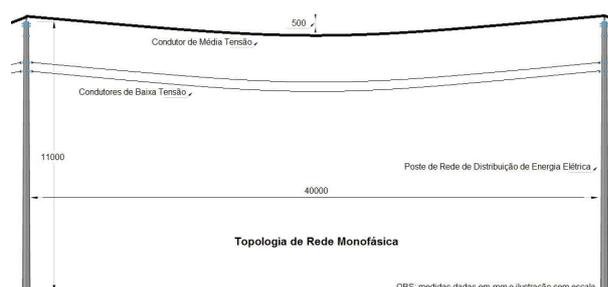
### 3.1 Primeiro Estudo: Topologia Monofásica

Este primeiro estudo tem por objetivo analisar através de simulação computacional, a possibilidade de um *ddp* entre as placas de uma capacitor com determinadas características geométricas, próximo à um condutor eletricamente carregado.

De acordo com características de algumas regiões da concessão de energia elétrica das distribuidoras, o sistema com topologia monofásica é muito comum. Este tipo de configuração do sistema foi acrescido do programa do governo nacional, chamado de *Programa Luz Para Todos* e atualmente, utilizado como *Universalização* (ANEEL, 2010).

Para o entendimento no desenvolvimento da simulação de uma rede de distribuição de energia elétrica, a figura 10 ilustra uma estrutura padrão de rede do tipo monofásica, segundo a NTD 002 da AES Sul (2016), aplicada na área de concessão das distribuidoras do estado do RS. Este padrão é composto por postes separados por vãos que variam de 35 m a 120 m.

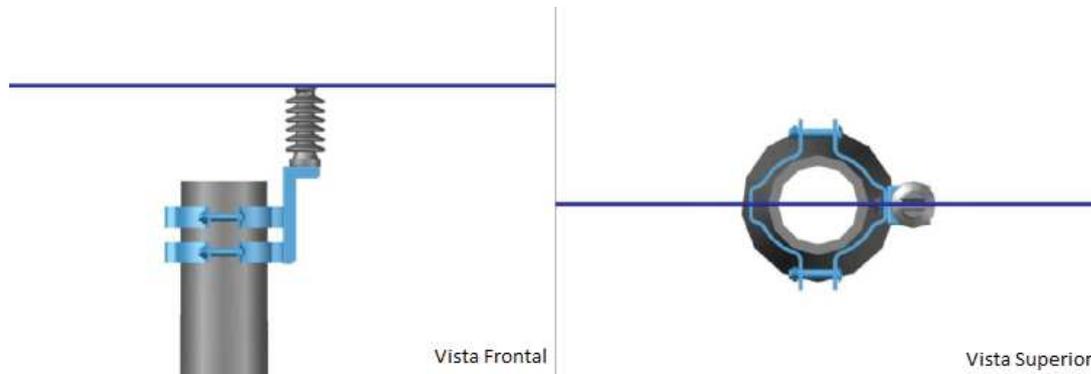
Figura 10 – Estrutura convencional de rede com topologia monofásica.



Fonte: Autor (2016).

Como exemplo utilizado, na figura 11 é ilustrada a estrutura detalhada da rede do tipo monofásica, denominada *U1*, suspensa em poste de concreto armado fixado ao isolador de média tensão.

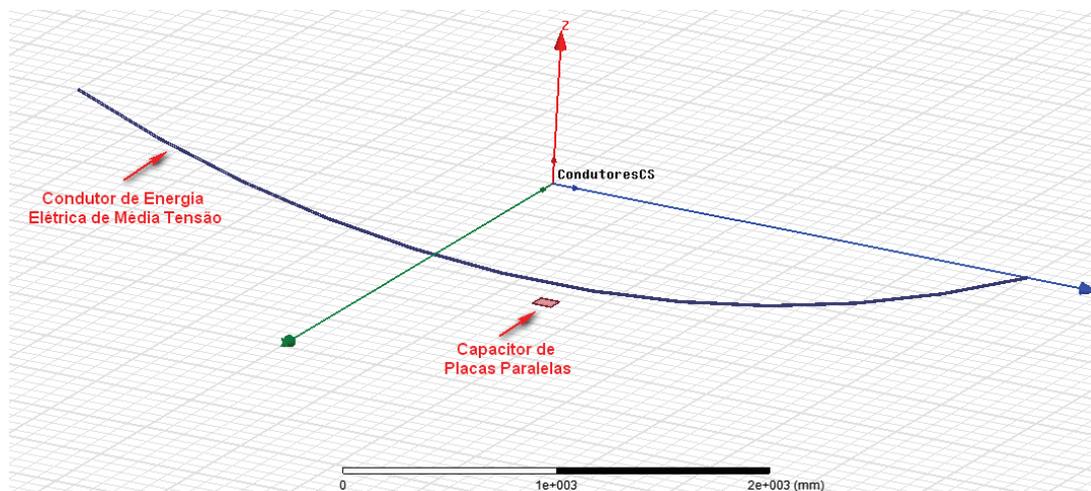
Figura 11 – Estrutura convencional monofásica, tipo *U1*.



Fonte: AES Sul (2016).

Desta forma, conforme o padrão ilustrado na figura 10, o projeto elaborado no para início da análise de simulação computacional é demonstrado na figura 12, buscando uma situação mais próxima da condição real do sistema elétrico com esta topologia.

Figura 12 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão monofásico.



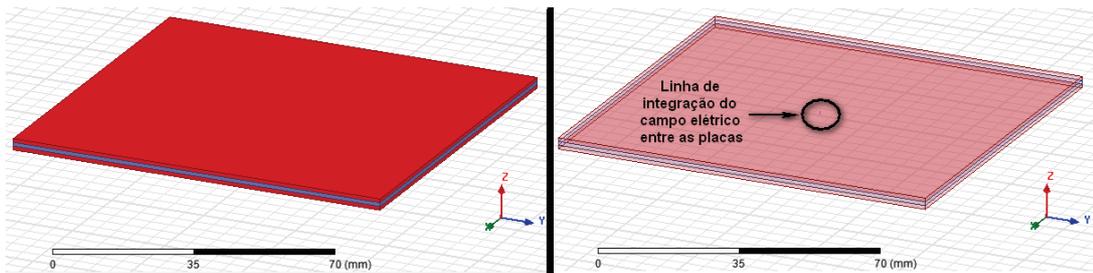
Fonte: Autor (2016).

Conforme projeto ilustrado na figura 12, o condutor eletricamente carregado está em paralelo ao eixo *y* (demarcado em cor azul), perpendicular ao eixo *x* (demarcado em cor verde), e possui comprimento de 40 m com uma flecha central de 0,50 m (em relação ao eixo *z*, demarcado em cor vermelha), cujos padrões construtivos podem ser observados na NTD 002 da AES Sul (2016). Situado abaixo deste e centralizado em uma distância de 0,10 m em relação ao condutor, foi projetado o capacitor de placas paralelas. Este é um projeto que ilustra o sistema de energia elétrica monofásico em 3D. Para que fosse possível

a simulação, uma “caixa” de ar envolve o sistema e um solo também foi projetado, situado à 11 m em relação ao eixo z do ponto central do condutor.

Na figura 13 é ilustrada no detalhe, a projeção do capacitor de placas paralelas e demarcada a linha de integração do campo elétrico com o vácuo projetado entre estas placas. Este componente se encontra em posição paralela ao solo, ou seja, posicionado no plano xy da geometria em 3D.

Figura 13 – Projeção do componente capacitor.



Fonte: Autor (2016).

Através das geometrias previamente definidas, parâmetros são necessários com o objetivo de avaliar os efeitos do campo elétrico no capacitor:

- tensão e corrente elétrica de operação AC a ser estudada, definida como sistema de 13,8 kV e 5 A, respectivamente. A tensão nominal do sistema monofásico, conforme verificado na tabela 1, é de 7,9 kV;
- diâmetro do condutor utilizado em redes com esta topologia, definido como um range de variação entre 5,19 mm e 11,68 mm, ou seja, variação de 4 AWG a 4/0 AWG;
- distância do capacitor variando de 1 cm a 150 cm do condutor energizado;
- frequência de análise de 60 Hz a 4 kHz, contemplando as harmônicas que serão observadas;
- linhas inseridas na geometria descritas como objeto não contido no modelo de simulação, do inglês *non model object* afim de, através de integração do campo elétrico, obter-se os valores de  $ddp$  entre as placas do capacitor;
- geometria de entorno do sistema para simulação computacional, sendo projetada uma caixa de ar e o solo com grandes dimensões.

Através da elaboração dos parâmetros descritos, o resultado das simulações é demonstrado no capítulo 4 específico, contendo detalhes da análise dos parâmetros supracitados definidos.

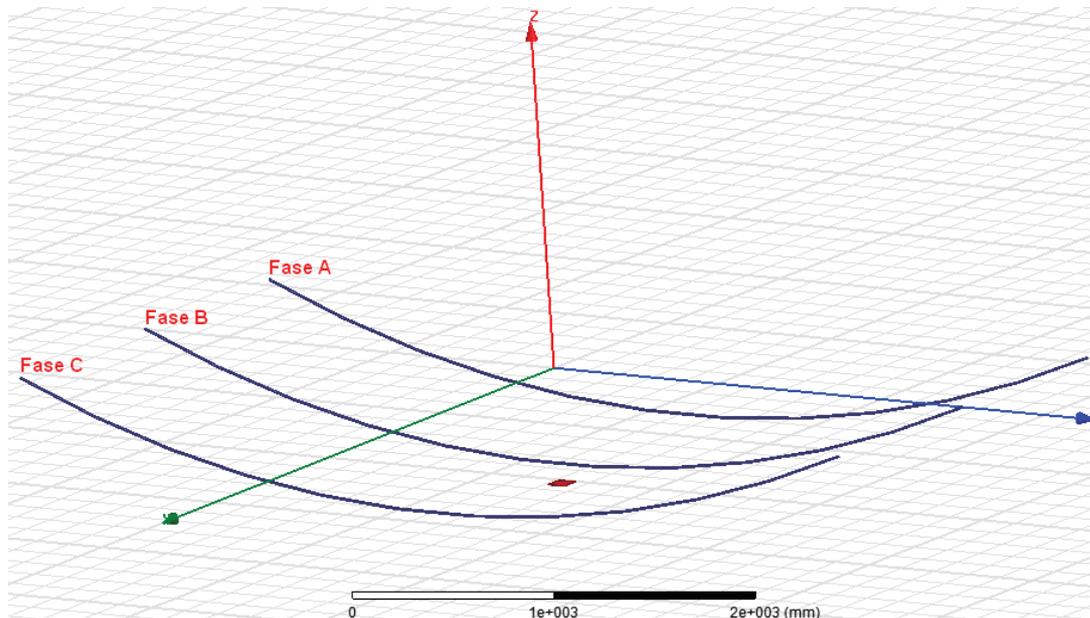
Nesta análise do sistema monofásico, o objetivo é simular uma relação direta entre o condutor energizado e a  $ddp$  obtida entre as placas do capacitor sem a interferência das demais fases de um sistema bifásico ou trifásico.

### 3.2 Segundo Estudo: Topologia Bifásica e Trifásica

A análise deste segundo método baseia-se na simulação similar ao primeiro, descrito anterioremente, com topologia monofásica, porém para uma rede do tipo trifásica. Este tipo de sistema é composto de um valor de tensão aplicado em cada condutor, no qual a energia elétrica é transmitida por meio da composição dos três sinais de tensão defasados de  $\frac{2\pi}{3}$  radianos ( $120^\circ$ , ou  $\frac{1}{3}$  de um ciclo) (ANEEL, 2016b).

A projeção elaborada para este tipo de topologia é idêntica ao primeiro método para análise no Maxwell 3D. Desta forma, a figura 14 ilustra o projeto elaborado para início da análise de simulação computacional.

Figura 14 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão trifásico.

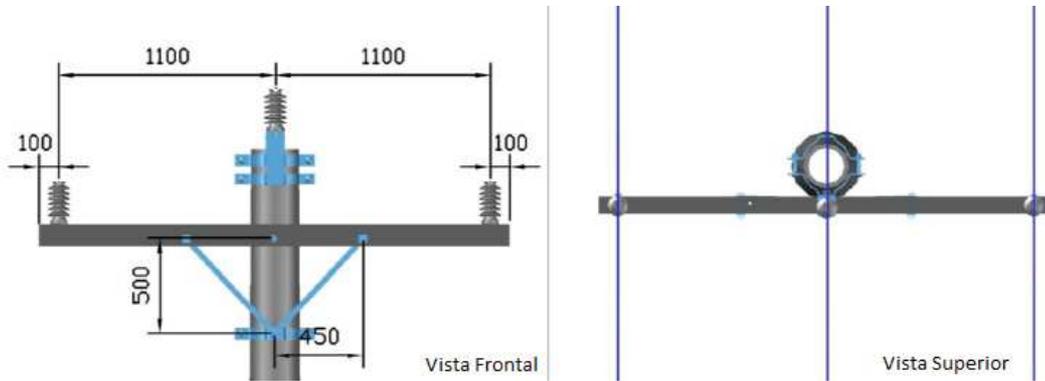


Fonte: Autor (2016).

Para a projeção do sistema trifásico, o mesmo parâmetro foi utilizado para o sistema monofásico, porém, com os demais condutores em paralelo ao eixo  $y$ , demarcados em cor azul e identificados como *Fase A*, *Fase B* e *Fase C*. As distâncias entre estes condutores é de 1,10 m em relação ao eixo  $x$  demarcado em verde e as características são similares para todos estes. O capacitor permanece a uma distância de 0,10 m do condutor central, que neste caso refere-se ao demarcado como *Fase B*.

Neste tipo de rede de distribuição de energia elétrica, os condutores utilizados na simulação são distanciados conforme normativa AES Sul (2016) e estrutura similar à chamada do tipo *T1*; estes, por sua vez, estão equidistantes conforme ilustrado na figura

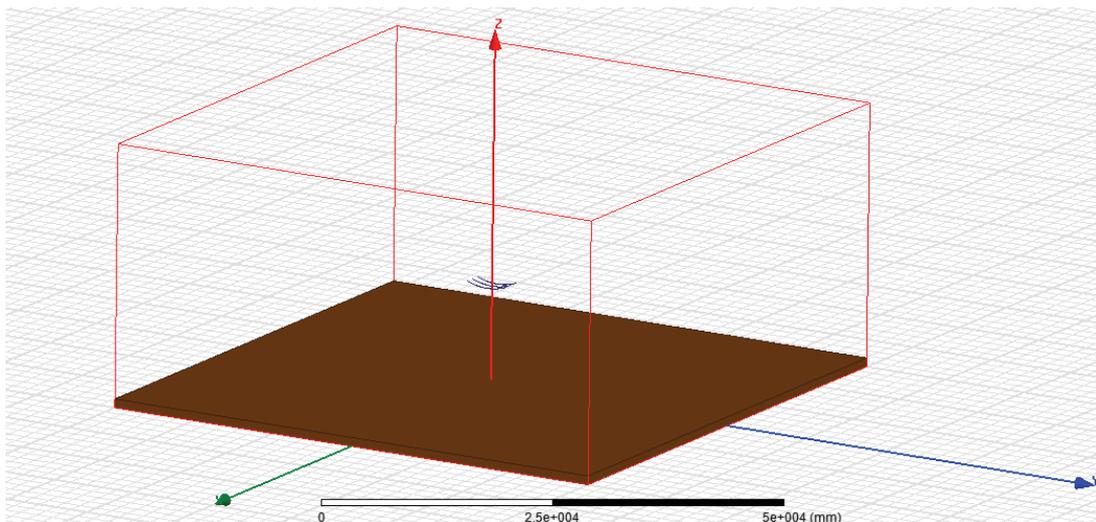
Figura 15 – Estrutura convencional trifásica, tipo *T1*.



Fonte: AES Sul (2016).

A caixa de ar bem como da estrutura definida como solo, demarcado em cor marrom, com as informações mencionadas anteriormente, podem ser observadas na figura 16. Em torno do sistema projetado dos três condutores e projetado em linhas vermelhas, esta caixa com dimensões muito superiores à geometria dos condutores, foi definida para que não haja interferências externas ou alguma limitação nos cálculos processados pelo software.

Figura 16 – Projeto para simulação de um circuito de média tensão trifásico, caixa de ar e solo.



Fonte: Autor (2016).

Na figura 16, os condutores são demonstrados na parte central, onde é possível observar a relação com a geometria da caixa de ar e o solo. Estas parametrizações são necessárias para definição das condições de contorno que possibilitam a simulação no

software, sendo o ar conforme pré definido no Maxwell 3D e o solo a referência definida como tensão de 0 V.

Para o sistema monofásico, esta estrutura também é presente com as mesmas dimensões.

Observa-se tanto neste método quanto no primeiro, que a elaboração das geometrias buscam uma similaridade à situação encontrada no sistema de distribuição de energia elétrica brasileira. Como base no caso da projeção da rede no estado do RS, a estrutura de montagem tem uma composição da seguinte forma: redes de média tensão em cabo de alumínio, vãos médios entre postes de 35 m (urbana) a 100 m (rural) e estruturas tipo convencional (cruzetas de comprimento cerca de 2,40 m que podem ser de madeira, composição polimérica, de concreto ou metálica) (AES Sul, 2016). Estruturas de montagem do tipo compacta também são comumente utilizadas para distribuição de energia elétrica em redes de média tensão. Estes condutores são protegidos com material *XLPE*, sustentados por um cabo descrito como mensageiro ou cordoalha de aço através de espaçadores poliméricos, distanciados cerca de 0,20 m entre eles. Para este tipo de estrutura, o presente trabalho não aborda o estudo e/ou análise computacional pelo software.

## 4 Análise dos Resultados

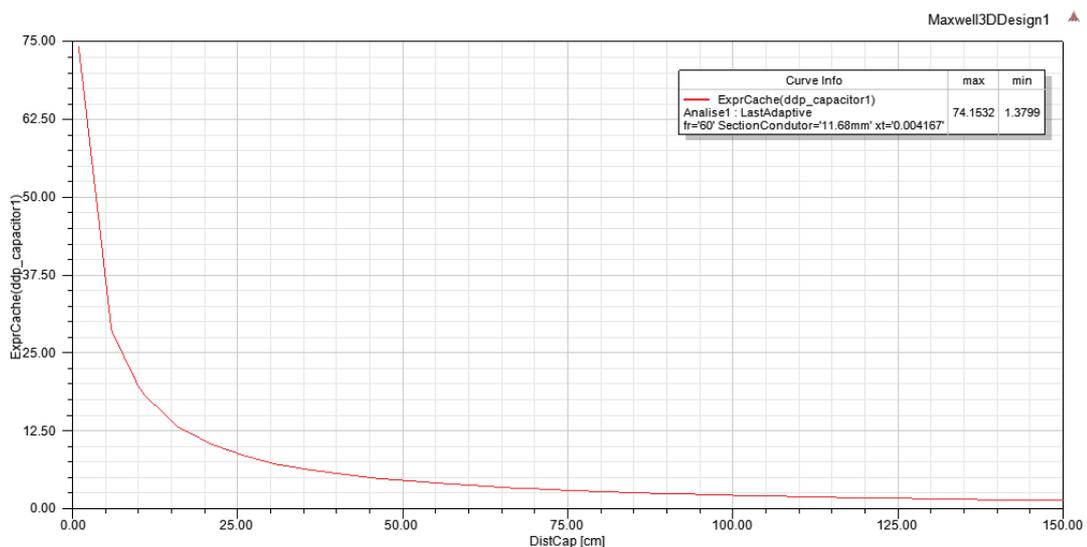
Neste capítulo são abordados os resultados teóricos obtidos no presente trabalho. Conforme simulações realizadas no software Maxwell da ANSYS para sistemas de distribuição de energia elétrica tipo monofásico e trifásico de média tensão, são demonstrados valores de medição da  $ddp$  entre placas de um capacitor gerada através da ação do campo elétrico, com as características que serão descritas a seguir neste capítulo.

### 4.1 Resultados do Primeiro Método: Topologia Monofásica

Nas simulações realizadas neste tipo de sistema de distribuição de energia elétrica com tensão de 13,8 kV, muito comum pra o fornecimento desta em áreas rurais, os resultados obtidos são variáveis de acordo com a parametrização definida no software.

Um dos parâmetros observados com grande relevância no resultado da  $ddp$  do capacitor, foi a distância a qual este se encontra do condutor eletricamente energizado. No gráfico ilustrado na figura 17, esta análise considera o valor registrado momentâneo no ponto máximo da senóide do sistema de 13,8 kV:

Figura 17 – Variação da  $ddp$  do capacitor em relação à distância do condutor.



Fonte: Autor (2016).

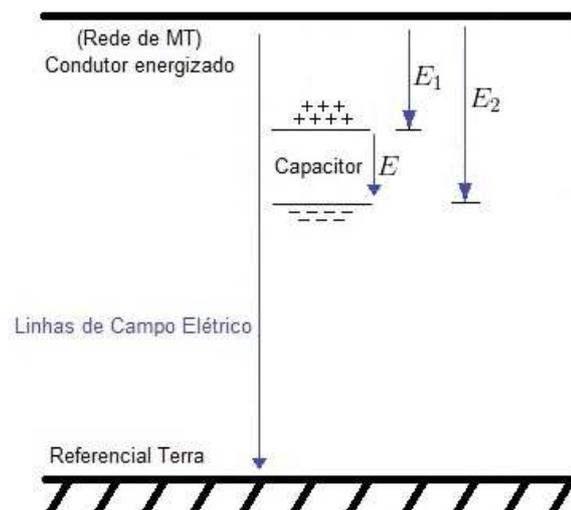
No gráfico, o eixo horizontal descrito como  $DistCap$  representa a variação da distância, dada em  $cm$ , entre a placa superior do capacitor e a extremidade inferior do condutor de média tensão. O eixo vertical, descrito como  $ExprCache(ddd\_capacitor1)$

representa os valores de variação da tensão, dada em  $V$ , obtidos através da expressão parametrizada no software para calcular a  $ddp$ .

Conforme é possível observar na tabela ilustrada no canto direito superior na figura 17, a variação parametrizada elencada no capítulo 3 de 1 cm a 150 cm, resulta em uma  $ddp$  de 74,15 V a 1,38 V, respectivamente.

O campo elétrico  $E$  gerado por um condutor cilíndrico foi descrito teoricamente no capítulo 2, resultando na equação 2.6 que determina que, devido a uma distribuição de cargas com simetria cilíndrica, a intensidade do campo elétrico  $E$  varia com  $\frac{1}{r}$ . Analisando desta forma e observando o ilustrado na figura 18, obtendo-se o valor de intensidade deste campo elétrico  $E_1$  na placa superior do elemento capacitor e o  $E_2$  da placa inferior, obtém-se o campo elétrico resultante  $E$  pela diferença destes.

Figura 18 – Campo elétrico incidente no elemento capacitor.



Fonte: Autor (2017).

Na figura 18 são ilustradas as linhas de campo elétrico oriundas do condutor eletricamente energizado incidindo no elemento capacitor de placas paralelas. Desta forma, o campo elétrico  $E$  é dado pela equação 4.1

$$E = E_1 - E_2 = \frac{\lambda}{(2.\pi.r_1)\epsilon} - \frac{\lambda}{(2.\pi.r_2)\epsilon} = \frac{\left(\frac{1}{2.r_1} - \frac{1}{2.r_2}\right)\lambda}{\pi\epsilon} \quad (4.1)$$

e, conforme adequação nos termos da equação 2.8, para a equação 4.2

$$E = \frac{V}{d} \Rightarrow E = \frac{V_+ - V_-}{d} \Rightarrow E = \frac{ddp}{d} \quad (4.2)$$

, o resultado da diferença de potencial  $ddp$  é dado pela equação 4.3:

$$ddp = \frac{\left(\frac{1}{2.r_1} - \frac{1}{2.r_2}\right) \lambda.d}{\pi\varepsilon} \quad (4.3)$$

Sendo:

$ddp$  = diferença de potencial entre as placas do capacitor (V).

$r_1$  = distância entre o condutor e a placa superior do capacitor (m).

$r_2$  = distância entre o condutor e a placa inferior do capacitor (m).

$\varepsilon$  = permissividade elétrica no vácuo ( $N/m^2C^{-2}$ ).

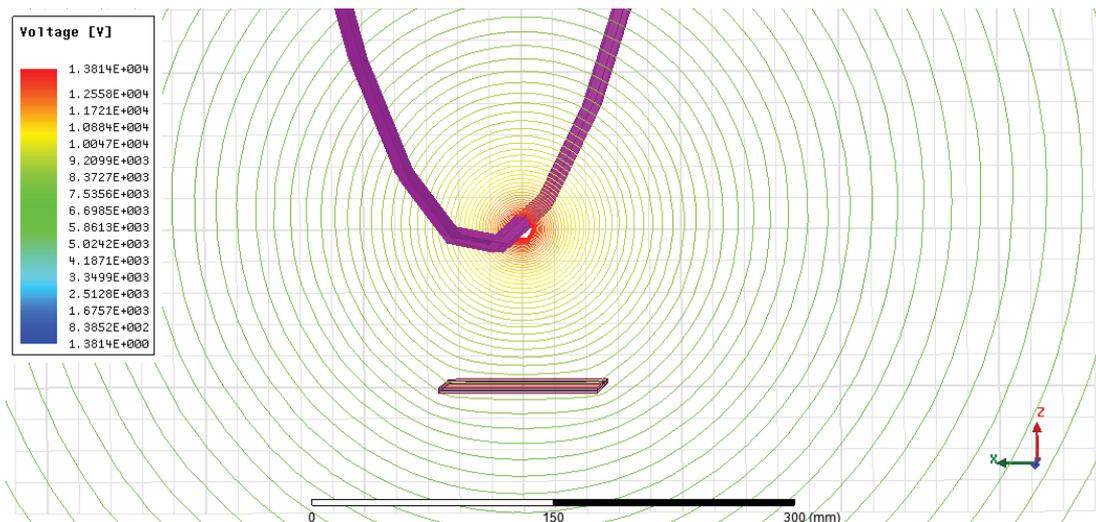
$\lambda$  = densidade de carga linear constante (C/m).

$d$  = distância entre as placas (m).

Portanto, o resultado que é obtido no software para a os valores da  $ddp$  pode ser matematicamente analisado pela equação 4.3, que descreve uma relação entre as distâncias das placas do capacitor em relação ao condutor.

Na situação ilustrada nas figuras 19 e 20, que demonstra as linhas de valores de tensão, em  $V$ , nas proximidades do condutor energizado, o resultado da  $ddp$  entre as placas do capacitor distanciado a 10 cm perpendicularmente deste fio ilustrado no gráfico da figura 17, descreve uma redução de cerca de 88,15% nesta tensão.

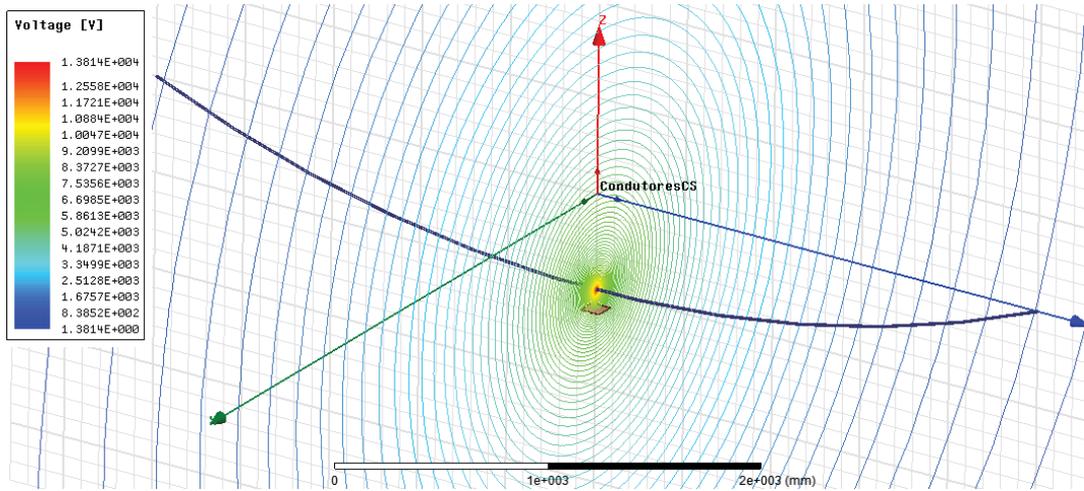
Figura 19 – Valores de tensão do condutor eletricamente energizado.



Fonte: Autor (2016).

Conforme demonstrado nas figuras 19 e 20, a coloração destas linhas descreve a variação de tensão perpendicular em torno do condutor eletricamente carregado em mesma situação, porém, demonstradas em ângulos distintos: próximo ao condutor e distanciado.

Figura 20 – Valores de tensão do condutor eletricamente energizado (vista geral).



Fonte: Autor (2016).

Para a análise do parâmetro da seção do condutor ou no caso a avaliação da variação do diâmetro, a interferência no resultado pode ser considerada irrelevante ou até mesmo ínfima. Os valores de tensão para o valor máximo do sistema de 13,8 kV de 60 Hz, demonstrado na tabela 2, foram simulados com o objetivo de apresentar como este processo pode ser utilizado em praticamente todas as configurações do sistema de distribuição de energia elétrica monofásica, resultando em pequenas variações que podem ser corrigidas aplicando métodos de processamento digital dos sinais obtidos.

Tabela 2 – Valores de tensão em *rms* da *ddp* em relação à seção do condutor em 60 Hz: sistema monofásico.

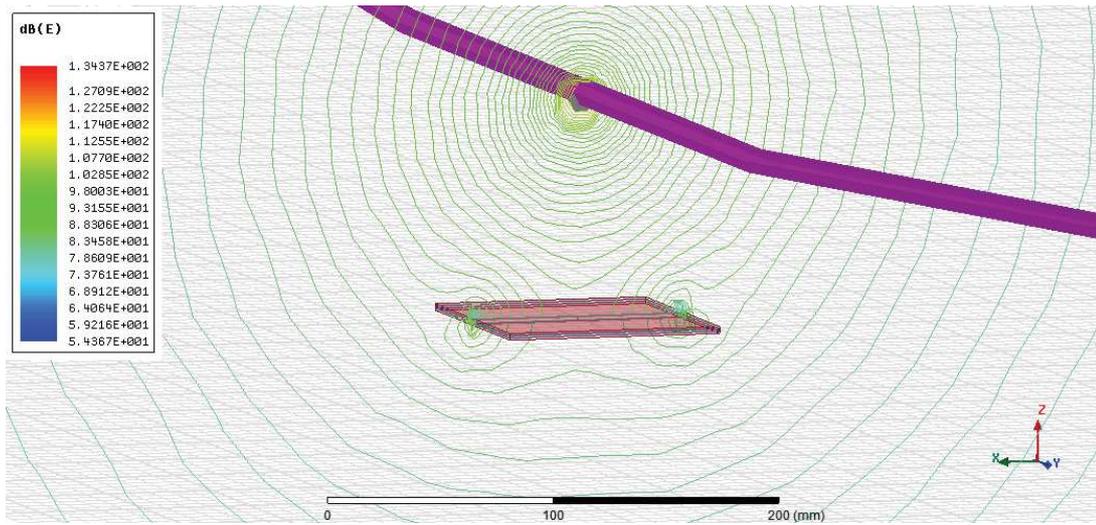
Condutor (diâmetro)		ddp no Capacitor (V)
AWG	mm	
4	5,19	12,79
2	6,81	12,99
1/0	8,44	13,39
3/0	10,06	13,57
4/0	11,68	13,93

Fonte: Autor, 2016.

Desta forma, na tabela 2 observa-se a relação do diâmetro do condutor em *AWG* e comparado em *mm* para os valores resultantes da *ddp* no capacitor. A nomenclatura utilizada expressa nos projetos das distribuidoras de energia elétrica é o *AWG* onde a seção varia de acordo com a necessidade de capacidade de corrente elétrica gerada pelas cargas conectadas ao longo do trecho de distribuição. Além das seções descritas na tabela 2, também existe o condutor com 336,4 MCM que normalmente é utilizado em situações muito pontuais em estruturas convencionais para saídas de SEs. No entanto, este não foi considerado para análise do estudo do presente trabalho.

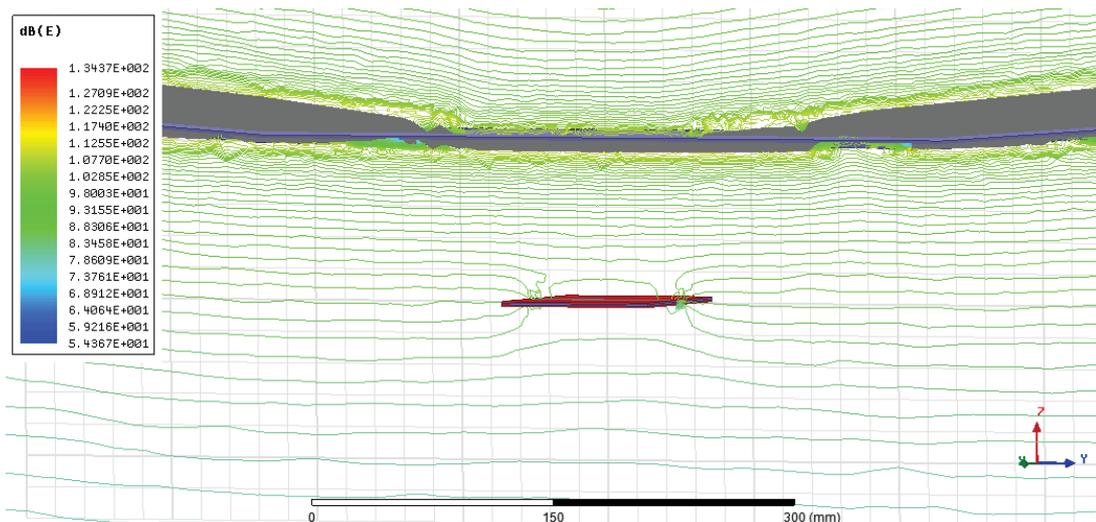
Na avaliação deste método, os campos elétricos observados nesta simulação são ilustrados nas figuras 21 e 22 em dB com o objetivo de facilitar a manipulação dos valores. Conforme descrito anteriormente no capítulo 3, que a tensão descrita no presente trabalho como  $ddp$  é resultado da integração deste campo elétrico com um objeto (linha) cujo modelo não faz parte das geometrias definidas, este campo elétrico também reduz consideravelmente com a distância do condutor eletricamente energizado.

Figura 21 – Campo elétrico no entorno do condutor.



Fonte: Autor (2016).

Figura 22 – Campo elétrico no entorno do condutor (vista lateral).



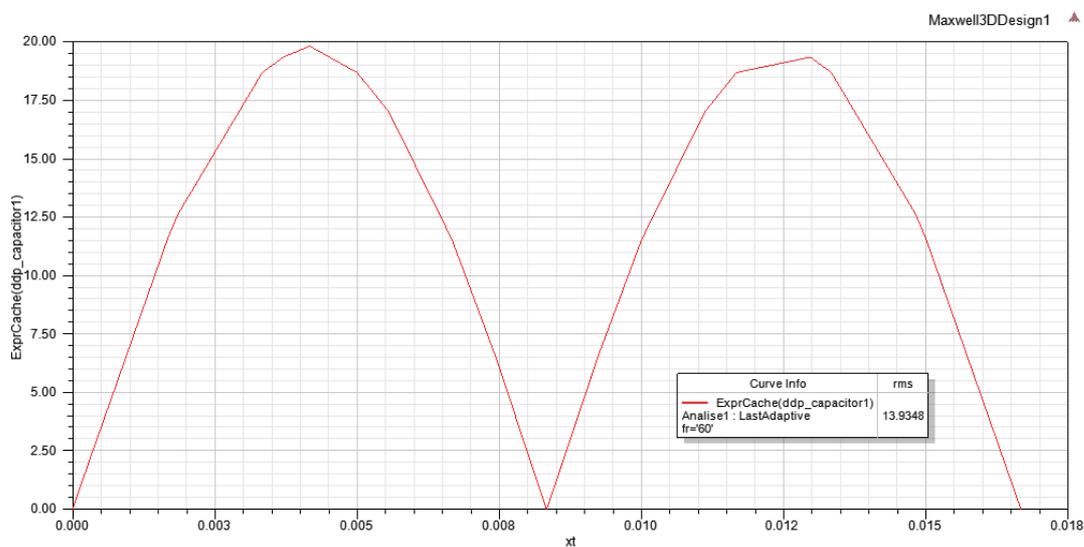
Fonte: Autor (2016).

As figuras 21 e 22 representam os valores do campo elétrico nas proximidades do condutor e das placas do capacitor. Estas ilustrações descrevem que estes valores são influenciados pelo componente. Nestas figuras, as linhas de campo elétrico em torno do

condutor eletricamente energizado evidenciam valores que são demonstrados na legenda situada no canto superior esquerdo da imagem.

Na rede de distribuição de energia elétrica no Brasil, o sistema opera na frequência de 60 Hz. Desta forma, o resultado ilustrado no gráfico da figura 23, descreve em *rms* o valor *ddp* obtido para o sistema monofásico com esta frequência, analisado em um ciclo de operação. Devido à parametrização dos *solvers* do software e dedução de como a capacitância de placas paralelas depende basicamente da sua geometria, o sinal de *ddp* é ilustrado de forma retificada, ou seja, no semi ciclo de tensão negativa, os valores são demonstrados positivos (em módulo).

Figura 23 – *ddp* em *rms* do sistema monofásico, em 60 Hz.



Fonte: Autor (2016).

No gráfico da figura 23, os valores da *ddp* são ilustrados no eixo vertical através da parametrização no software, em *V*, definida como *ExprCache(ddp\_capacitor1)*. Assim, observa-se que em cada semi ciclo da senóide de 60 Hz, a tensão *ddp* resulta em valores próximos a 20 V e, em média, tem-se *rms* de 13,93 V demonstrado na legenda do canto inferior direito da imagem. No eixo horizontal, o tempo dado em segundos, de um ciclo do sistema.

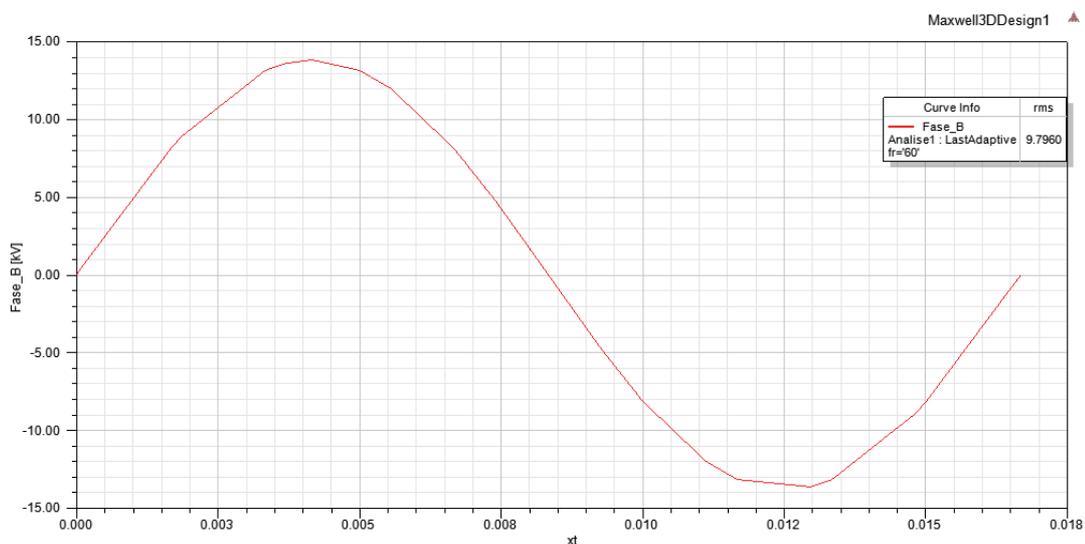
Para que se possa observar graficamente uma senóide com uma maior quantidade de pontos, a parametrização é fundamental no processo da simulação computacional. Assim, a quantidade de passos é de extrema relevância para a convergência do sistema bem como para analisar os detalhes os quais a simulação poderá atingir. Como resultado, este fator inside diretamente no resultado da *ddp* obtida entre as placas do capacitor. Para tanto, a figura 24 ilustra a tensão do sistema de 13,8 kV simulado.

Na figura 24, o sinal de média tensão apresenta uma magnitude de 13,8 kV à -13,8 kV, cujos valores são ilustrados no eixo vertical descrito como *Fase B*, em um ciclo

na frequência de 60 Hz, ou seja, em tempo total de 0,01667 segundos cada ciclo, tempo ilustrado no eixo horizontal. No entanto, o valor é demonstrado em *rms* ou também chamado de valor de tensão eficaz  $V_{ef}$  de 9,79 kV e possui uma tensão nominal, chamada de  $V_n$ , conforme descrito anteriormente na tabela 1, de 7,9 kV.

Segundo normativas das concessionárias de energia elétrica a respeito do fornecimento de equipamentos transformadores tipo monofásicos com apenas uma bucha de média tensão, a classe de tensão para operação do equipamento descreve valores nominais e para proteção deste, de 15 kV para um sistema de 13,8 kV.

Figura 24 – Sinal de tensão no sistema monofásico, em 60 Hz.

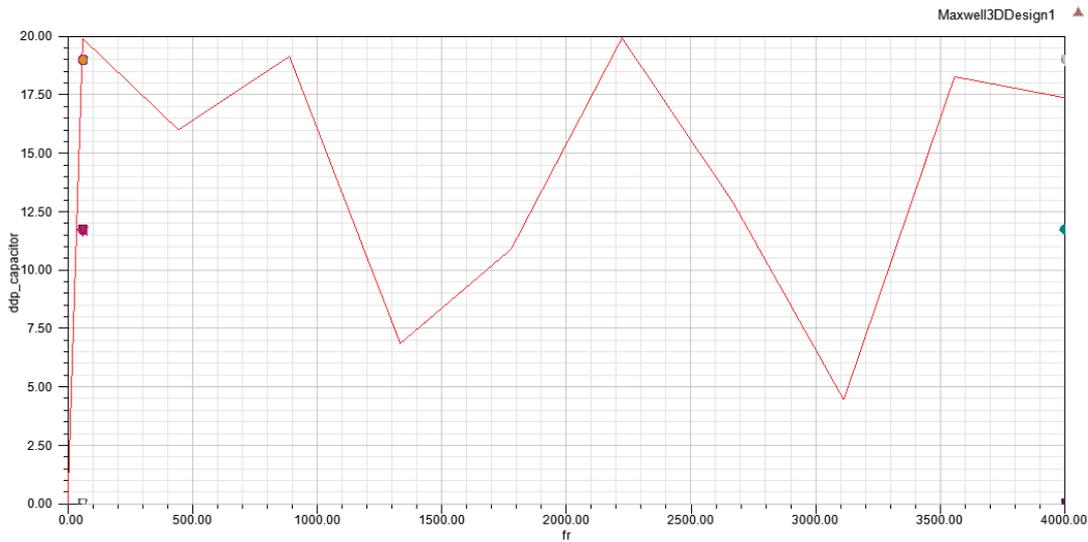


Fonte: Autor (2016).

Para o estudo nas demais frequências com o objetivo de observar as harmônicas do sistema, as variações da *ddp* oscilam de forma que se faz necessário realizar avaliações muito mais detalhadas. Conforme é ilustrado no gráfico da figura 25, pode-se afirmar a possibilidade de mensurar o sinal de tensão obtido através da inserção do campo elétrico do condutor de média tensão no capacitor para as diferentes frequências dos campos harmônicos. Portanto, este exige uma análise criteriosa nos resultados e processamento digital do resultado afim de relacionar com o sinal do sistema de média tensão da rede de energia elétrica.

No gráfico da figura 25, os valores na linha em vermelho da *ddp* informados no eixo vertical como *ddp\_capacitor* estão relacionados às frequências descritas de 0 a 4 kHz, no eixo horizontal *fr*. A análise destas variações neste range de frequência utilizada no software, foi relacionada com o mesmo nível de tensão aplicado às demais simulações, ou seja, 13,8 kV. Os resultados demonstram que é possível avaliar as interferências harmônicas no range de frequência demonstrado. No entanto, um estudo utilizando variações nos níveis de tensão se faz necessário no ambiente de simulação para a validação de valores coerentes.

Figura 25 – Valores da ddp em relação à frequência: sistema Monofásico.

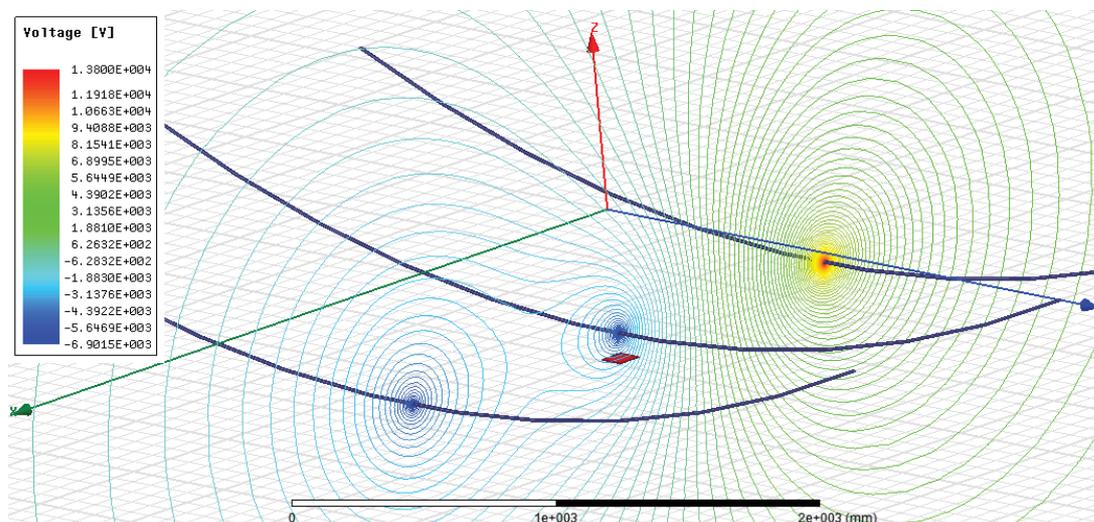


Fonte: Autor (2016).

## 4.2 Resultados do Segundo Método: Topologia Trifásica

Nas simulações realizadas neste tipo de sistema de distribuição de energia elétrica com tensão nominal de 13,8 kV, muito comum pra o fornecimento desta em áreas urbanas, os resultados obtidos também, similar ao sistema tipo monofasico, são variáveis de acordo com a parametrização definida no software. Na figura 26 retratando níveis de tensão em todas as fases do sistema, a topologia trifásica foi projetada com o mesmo objetivo do primeiro método, descrito neste capítulo: avaliar a *ddp* gerada entre as placas do capacitor pela intensidade do campo elétrico do condutor energizado.

Figura 26 – Projeto sistema trifásico.



Fonte: Autor (2016).

O resultado dos níveis de tensão ilustrados na figura 26 através de linhas, representa a magnitude destes valores em relação à proximidade dos condutores eletricamente energizados. Observa-se que no condutor desrito como *Fase A*, ou seja, o situado mais próximo do eixo  $y$ , que os valores de tensão são máximos próximo ao condutor e nas demais *Fase B* e *Fase C*, este fenômeno não ocorre. Este fato se dá em função do momento em que o software gera os valores e da defasagem do sistema trifásico. Também, identifica-se que o componente capacitor situado na parte central da figura, sofrerá a influência das demais tensões dos condutores adjacentes. Brevemente é demonstrado no Apêndice A o resultado da simulação desenergizando as *Fase B* e *Fase C* do sistema. Esta simulação não foi analisada detalhadamente para o presente trabalho.

Para a análise do parâmetro da seção do condutor ou no caso a avaliação da variação do diâmetro, a interferência no resultado, diferente ao sistema monofásico, é considerada com maior relevância devido aos valores da *ddp* encontrados. Os valores de tensão para o valor máximo do sistema de 13,8 kV de 60 Hz, são demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 – Valores de tensão em *rms* da *ddp* em relação à seção do condutor em 60 Hz: sistema trifásico.

Condutor (diâmetro)		ddp no Capacitor (V)
AWG	mm	
4	5,19	11,89
2	6,81	12,35
1/0	8,44	12,69
3/0	10,06	13,02
4/0	11,68	18,71

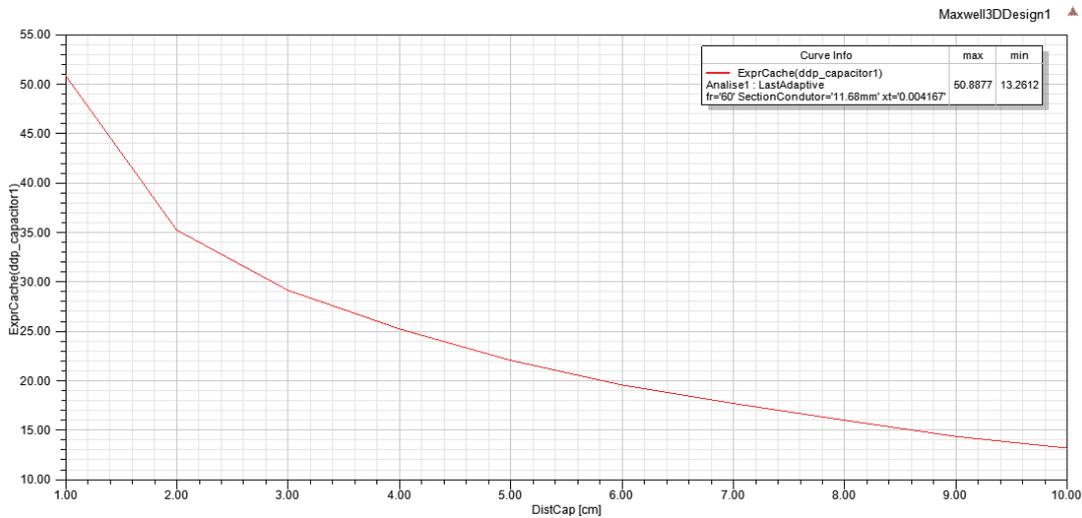
Fonte: Autor, 2016.

Observa-se na tabela 3 que o tipo de condutor utilizado no circuito de distribuição de energia elétrica influencia diretamente no campo elétrico que sendo assim, induz uma *ddp* gerada entre as placas do capacitor.

A simulação deste tipo de sistema requer configurações de parâmetros similares ao do sistema monofásico, porém, a complexidade necessária para o processamento resulta em um maior tempo para obtenção do resultado almejado.

Analisando os resultados e comparando ao sistema monofásico apresentado no primeiro método, é possível identificar alterações nos valores da *ddp* relacionado à distância deste capacitor do condutor eletricamente energizado. Desta forma, observa-se na figura 27 que a curva de diminuição deste valor se comporta diferente do sistema trifásico para o monofásico, ilustrado anteriormente na figura 17. Isso ocorre em função, principalmente, da interação dos campos elétricos gerados pelas fases adjacentes à *Fase B* (central).

Figura 27 – Variação da  $ddp$  do capacitor em relação à distância dos condutores (sistema trifásico).



Fonte: Autor (2016).

Observa-se nesta variação que os valores convergem para zero a medida em que o capacitor se distancia dos condutores, onde a relação não é diretamente proporcional entre  $ddp$  e a distância que este capacitor se encontra em relação ao condutor eletricamente energizado. Este fato se deve, principalmente, em função da interferência eletromagnética dos demais condutores de energia elétrica, no caso a *Fase A* e *Fase C*, próximos à este central, *Fase B*.

As variações também são identificadas no sistema monofásico, porém de forma menos abrupta.

Para que se possa ter a comparação das topologias, a tabela 4 demonstra o resultado obtido e analisado, em frequência de 60 Hz, para a variação da distância do capacitor de 1 cm a 10 cm em relação ao condutor da *Fase B*. Os parâmetros dos valores entre as distâncias da tabela 4 são ilustrados também, na figura 27, conforme gerado através do software de simulação.

Tabela 4 –  $ddp$  x distância do capacitor em relação ao condutor.

Distância do Capacitor (cm)	Valor Máximo (V)	Valor Mínimo (V)
	Sist. Monofásico	Sist. Trifásico
01	74,15	50,89
10	19,78	13,26

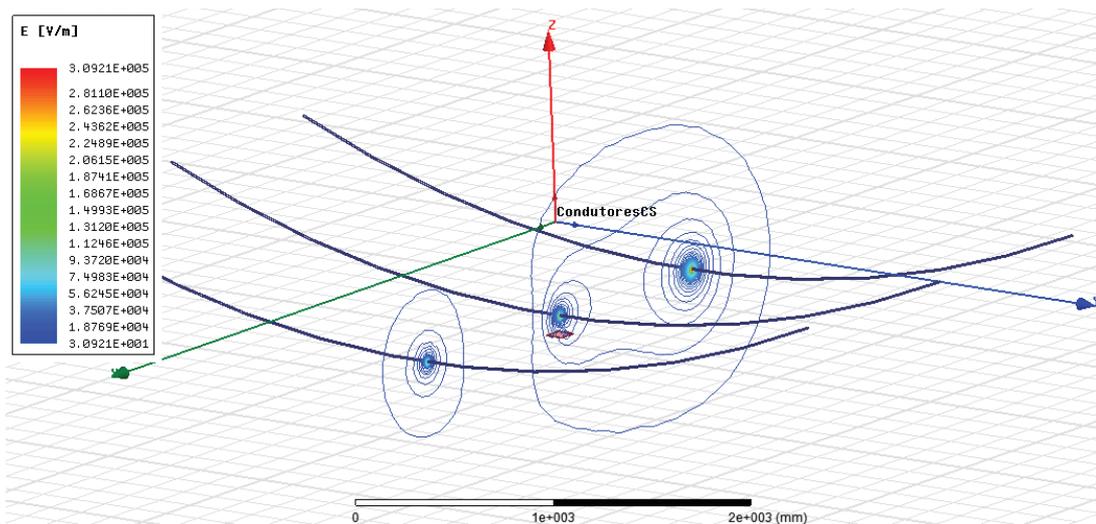
Fonte: Autor, 2016.

Comparando o resultado descrito na tabela 4 em relação aos dois sistemas, os valores de tensão máxima para o trifásico é inferior ao monofásico. Este é um dos fatores

que faz com que haja uma necessidade de realizar a análise da influência dos campos elétricos das demais *Fase A* e *Fase C* que incidem nas placas do capacitor, gerando como resultado a *ddp* entre estas. Na análise do campo elétrico para esta topologia de distribuição de energia elétrica, o resultado da *ddp* sofre interferências das demais fases do sistema. De modo similar ao sistema monofásico ilustrado na figura 22, a figura 28 representa este campo com defasagem do sistema, descrito no capítulo anterior.

As linhas de campo elétrico demonstradas na figura 28 dadas por metro  $V/m$  demonstram grande influência, principalmente da *Fase A* do sistema, situada mais próxima ao eixo  $y$  e demarcado em azul. Este fenômeno é observado e descrito nas informações anteriores do presente trabalho. Na figura 29, são demonstrados os campos elétricos em torno dos condutores em todos os eixos da geométrica elaborada para o estudo do presente trabalho.

Figura 28 – Campo eletrostático (sistema trifásico, eixo  $x$ ).

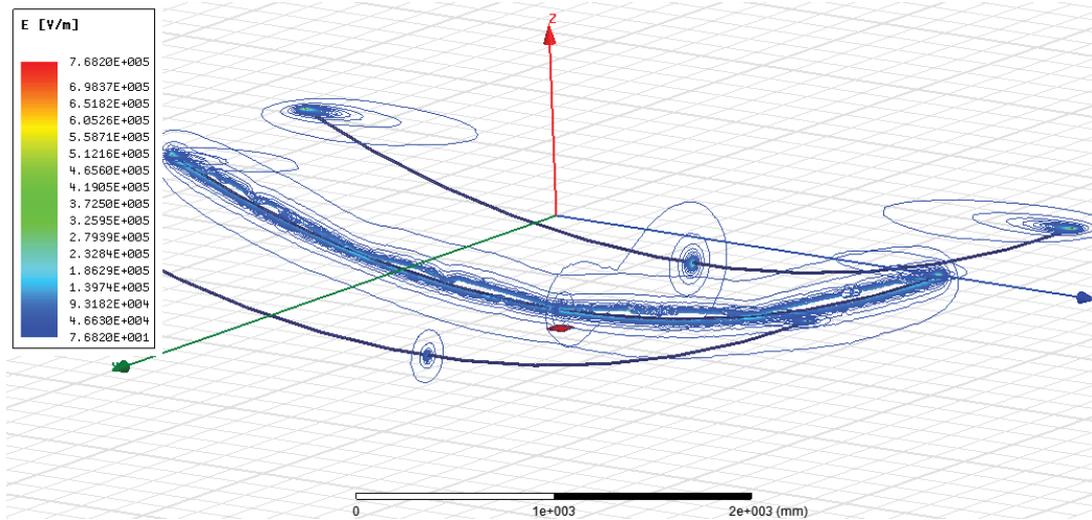


Fonte: Autor (2016).

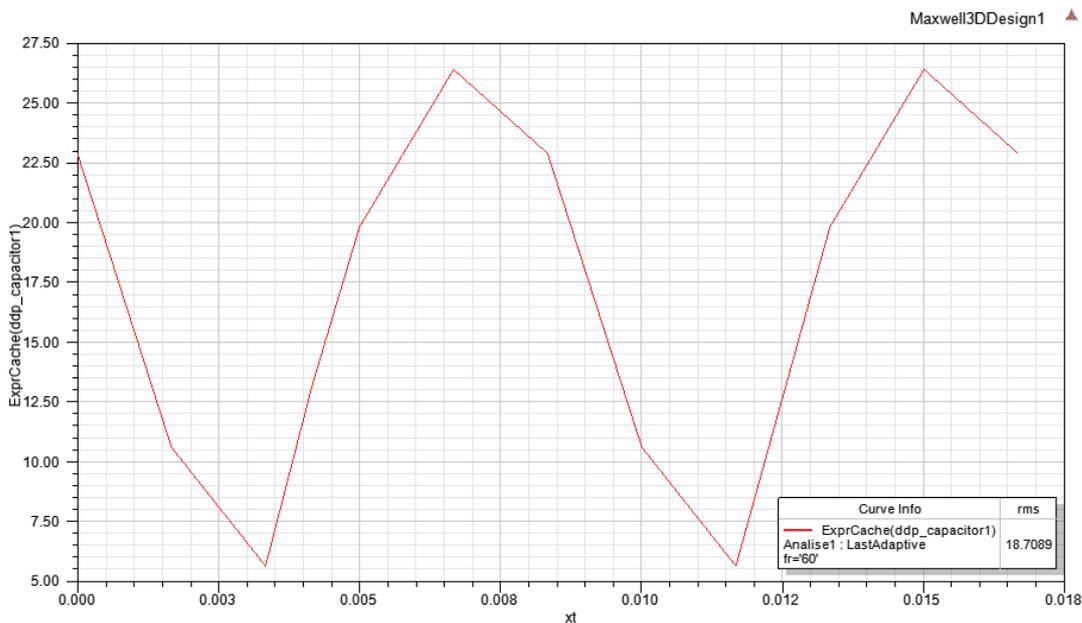
O resultado ilustrado no gráfico da figura 30, descreve em *rms* o valor *ddp*, em  $V$ , obtido para o sistema trifásico com esta frequência em um ciclo de operação. Para o sistema trifásico, os valores da *ddp* são maiores em relação à topologia monofásica. Este fator ocorre devido à influência e defasagem da tensão dos demais condutores de energia elétrica, *Fase A* e *Fase C* do sistema.

Conforme ilustrado na figura 30, a *ddp* no capacitor, dada em  $V$  no eixo vertical, varia no decorrer do tempo  $xt$ , dado em segundos, durante um ciclo do sistema da 60 Hz. Desta forma, o resultado em *rms* é demonstrado na legenda situada no lado inferior direito desta figura. Este processo é definido também, em similaridade ao sistema monofásico, pela quantidade parametrizada de passos para que o sistema possa convergir. A figura 31 ilustra o sinal de tensão das fases do sistema.

Figura 29 – Campo eletrostático (sistema trifásico 3D).



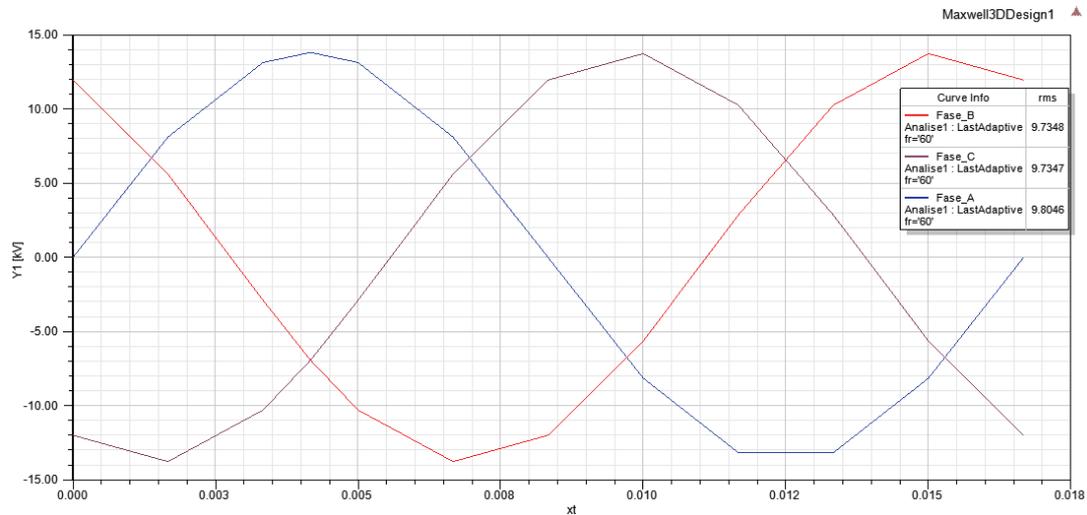
Fonte: Autor (2016).

Figura 30 –  $ddp$  em  $rms$  do sistema trifásico, em 60 Hz.

Fonte: Autor (2016).

A defasagem pode ser observada nas diferentes cores de linhas informadas na figura 31, descrevendo as fases do sistema trifásico. Um ponto importante refere-se aos valores eficazes ou em  $rms$  da tensão: conforme informado anteriormente na tabela 1, os valores nominais para um sistema trifásico de 13,8 kV seria de 13,8 kV; no entanto, com o objetivo de realizar comparações, foram utilizados os mesmos valores para cada condutor, considerado no sistema monofásico, ou seja, valor de pico de 13,8 kV.

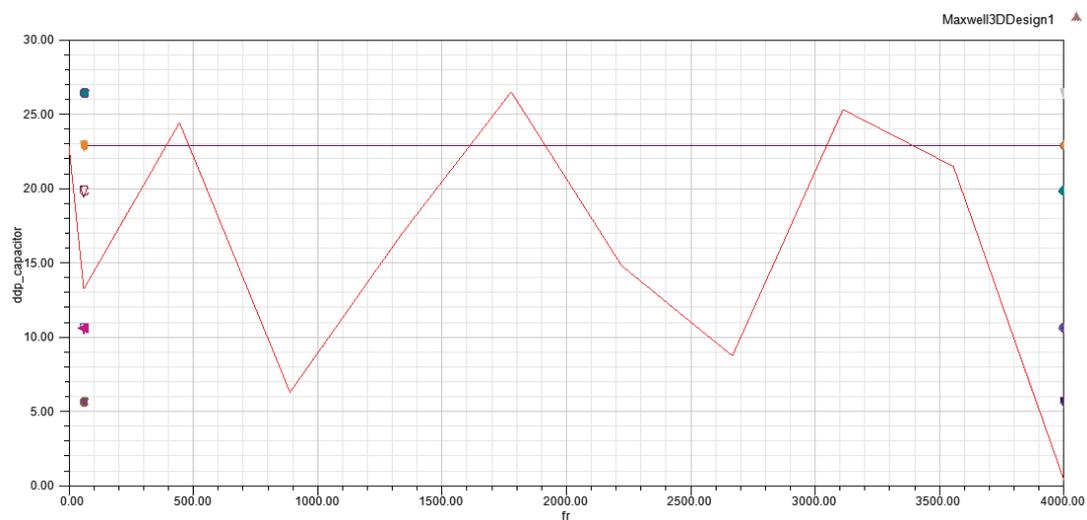
Figura 31 – Sinal de tensão no sistema trifásico, em 60 Hz.



Fonte: Autor (2016).

De forma similar ao método utilizado no gráfico da figura 30, os valores da  $ddp$  são ilustrados no eixo vertical através da parametrização no software, em  $V$ , definido como  $ExprCache(ddp\_capacitor1)$ . No eixo horizontal, o tempo  $xt$ , dado em segundos, de um ciclo de operação do sistema.

No gráfico da figura 32, e conforme mencionado no sistema monofásico, os valores na linha em vermelho da  $ddp$  informados no eixo vertical como  $ddp\_capacitor$  estão relacionados às frequências descritas de 0 a 4 kHz, no eixo horizontal  $fr$ .

Figura 32 – Valores da  $ddp$  em relação à frequência: sistema Trifásico.

Fonte: Autor (2016).

A presença de harmônicas no sistema de potência é descrita como indesejável, propiciando gastos financeiros elevados para concessionárias de energia elétrica e para os

clientes. Desta forma, o estudo detalhado da presença de frequências superiores aos 60 Hz são ilustrados na simulação e influenciam na intensidade dos campos elétricos, e por sua vez, na  $ddp$  entre as placas do capacitor. Assim, no gráfico da figura 32 este fenômeno ocorre, tendo como resultado variações que devem ser analisadas no processamento digital destes sinais.

## 5 Considerações Finais

O objetivo geral desta dissertação foi estudar um sistema que possibilitasse a medição do sinal de tensão nominal da rede de energia elétrica, limitado na média tensão de 13,8 kV e 23,1 kV. Neste sentido, o método estudado objetivou a não necessidade do contato elétrico com o condutor e ainda, sem a necessidade de um ponto de aterramento. Também, que possibilite avaliar a qualidade de energia do sistema elétrico neste ponto de medida.

Para tanto, são listados os objetivos específicos almejando o objetivo principal:

- a) identificar e analisar os equipamentos atuais para medição de média tensão de energia elétrica;
- b) identificar e analisar sensores e componentes eletrônicos que não possuem interferência direta com os efeitos eletromagnéticos os quais serão submetidos;
- c) estudar os efeitos do campo elétrico gerado pelo(s) condutor(es) de energia elétrica de média tensão;
- d) estudar componentes eletrônicos capazes de, através do campo elétrico gerado pela rede de distribuição de energia elétrica, obter um nível de tensão para correlacionar à forma de onda da média tensão desta rede;
- e) identificar e analisar materiais específicos que podem fazer o papel (se necessário) de aterramento do sistema, capaz de atingir uma diferença de potencial;
- f) estudar um sistema capaz de enviar informações suficientes para análise de processamento digital de sinais, através de conexão sem fio;
- g) analisar os resultados obtidos e as alternativas presentes para atingir o objetivo principal deste trabalho.

Relacionado aos itens supracitados, salienta-se que os objetivos foram atingidos, porém alguns de maneira mais superficial. Os itens *a*, *b*, *e* e *f* basearam-se em estudos de trabalhos e/ou artigos tidos como referências para a proposta deste trabalho os quais foram compreendidos de forma satisfatória. Os itens *c*, *d* e *g* são observados na metodologia e demonstrados nos resultados das simulações computacionais; estes foram considerados os objetivos primordiais para alcançar o principal objetivo deste trabalho: sem a necessidade de contato elétrico com o condutor de energia elétrica, extrair de um componente não

aterrado uma  $ddp$  gerada através de um campo elétrico e por sua vez, inferir a tensão desta rede que gerou o campo elétrico.

Desta forma, o presente trabalho evidencia o estudo e o método utilizado para a medição do sinal da forma de onda de tensão através do campo elétrico gerado pelo condutor de energia elétrica carregado, utilizando a simulação computacional em software específico, no caso o Maxwell 3D da ANSYS.

Em avaliação aos métodos descritos no capítulo 3 e nos resultados obtidos no capítulo 4, uma rede de energia elétrica com topologia monofásica não possui interferência eletromagnética de campos elétricos adjacentes gerados pelos demais condutores que possam inferir na  $ddp$  entre as placas do capacitor. Este fator faz com que haja a necessidade de processar digitalmente a exclusão dos valores referentes à  $ddp$  no componente capacitor para circuitos de média tensão tipo bifásicos e/ou trifásicos devido à esta interferência. Em comparação às topologias apresentadas, há similaridade nos valores de  $ddp$  que possam ser correlacionados ao sinal de tensão da média tensão, porém, divergências observadas nestes resultados com mais condutores, demonstram a necessidade de avaliação criteriosa não contida no presente trabalho.

Os resultados encontrados na simulação computacional demonstram que é possível inferir um campo elétrico em um capacitor sem a necessidade de contato elétrico com este e, por sua vez, obter um diferencial de potencial entre as placas deste componente. Quanto às harmônicas, observa-se que também tem-se a incidência do campo elétrico que gera uma variação nos níveis de  $ddp$  no capacitor.

Portanto, para trabalhos futuros, são necessários estudos específicos para análise da influência do campo elétrico gerado pelas frequências superiores aos 60 Hz da rede de média tensão de distribuição energia elétrica. Também, é necessário realizar uma análise analítica dos resultados da simulação para sistemas com topologia bifásica ou trifásica, afim de obter valores de  $ddp$  para correlacionar com a tensão que gerou estes campos elétricos deste tipo de rede.

# Referências

ABRADEE. *A Distribuição de Energia*. 2015. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br>>. Citado na página 40.

AES Sul. *Norma Técnica de Distribuição (NTD) 002*. 2016. Disponível em: <<https://www.aessul.com.br>>. Citado 5 vezes nas páginas 52, 53, 54, 57 e 58.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de circuitos elétricos*. 5ª edição. ed. Porto Alegre: Porto Alegre AMGH 2013, 2013. 8 - 9 p. ISBN 9788580551730. Citado na página 34.

ANEEL. Seção II Do Programa LUZ PARA TODOS. 2010. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/061/contrituicao/abradee{\\\_}ap061{\\\_}20](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/061/contrituicao/abradee{\_}ap061{\_}20)>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 53.

ANEEL. *PRODIST\_Módulo 5\_Revisão\_3*. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Citado na página 42.

ANEEL. *PRODIST\_Módulo 8\_Revisão\_7*. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 56.

ANSYS. *ANSYS HFSS*. 2016. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>>. Citado na página 52.

ANSYS. *ANSYS Maxwell*. 2016. Disponível em: <<http://www.ansys.com/products/Electronics/ANSYS-Maxwell>>. Citado na página 52.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. 2ª edição. ed. Christchurch, New Zealand: [s.n.], 2003. ISBN 0-470-85129-5. Disponível em: <[http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470871218{\\\_}sample{\\\_}3877](http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470871218{\_}sample{\_}3877)>. Citado na página 44.

BALSAMO, D. et al. A New Non-invasive Voltage Measurement Method for Wireless Analysis of Electrical Parameters and Power Quality. *SENSORS IEEE*, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6688560/>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

BARROS, B. F. d. et al. *NR - 10: Guia Prático De Análise E Aplicação*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2014. 202 p. ISBN 9788536502748. Citado na página 26.

BARTKOWIAK, R. A. *Circuitos Elétricos*. 2ª edição. ed. São Paulo: São Paulo : Makron, 1994., 1998. 133 a 151 e 292 a 299 p. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.

BELTANI, J. M. Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas. 2007. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/>>. Citado na página 45.

CANESIN, C. Qualidade de Energia Elétrica, Eficiência e Racionalização de Desperdício versus desconhecimento. 2004. Disponível em: <[www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/ArtigoCanesin.pdf](http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/ArtigoCanesin.pdf)>. Citado na página 25.

- CAPELLI, A. Aterramento\_Elétrico. *Saber Eletrônica*, 2000. Disponível em: <[www.lissandro.com.br/eletrica/Aterramento{\\\_}capelli](http://www.lissandro.com.br/eletrica/Aterramento{\_}capelli)>. Citado na página 45.
- CARDOSO, J. R. *Engenharia Eletromagnética*. 1º edição. ed. Rio de Janeiro/RS: [s.n.], 2011. 142 a 143; 365 a 436 p. ISBN 978-85-352-3225-8. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- CLAYTON, R. P. *Eletromagnetismo para engenheiros : com aplicações a sistemas digitais e interferência eletromagnética*. 1st ed.. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. 11; 83 a 86 p. ISBN 9788521614173. Citado 4 vezes nas páginas 31, 35, 36 e 38.
- CUNHA, J. G. *NR 10 - Comentada 1ª Edição*. 2008. 96 p. Disponível em: <[http://energyexpert.com.br/media/nr10{\\\_}Comentada\(1\)](http://energyexpert.com.br/media/nr10{\_}Comentada(1))>. Citado na página 26.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica. *UNICAMP/FEEC/DSE*, 2016. Citado na página 41.
- DINIZ, R. A. *Compensação Distribuída Série na Mitigação Harmônica em Instalações Comerciais*. Belo Horizonte/MG, 2014. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1017M.PDF>>. Citado na página 44.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. *Introdução aos Circuitos Elétricos*. 8ª edição. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 243 a 250 p. ISBN 9788521621164. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- ESSS. *ESSS - Engineering Simulation and Scientific Software*. 1995. Disponível em: <<http://www.esss.com.br>>. Citado na página 52.
- FERNANDEZ, R. L. Capacitância e Capacitores. 2010. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br>>. Citado na página 37.
- GRAÇA, C. d. O. *Eletromagnetismo*. 2012. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/cograca/eletro12>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 38 e 39.
- HAYT, W. H.; BUCK, J. A. Eletromagnetismo. In: AMGH Editora Ltda. (Ed.). 8ª edição. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2013. cap. 6, p. 143 a 144. ISBN 0073380660 / 9780073380667. Citado na página 35.
- ITAIPÚ. *Integração ao Sistema Brasileiro*. 2015. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 44.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. d.; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 2º edição. ed. São Paulo: São Paulo : E. Blücher, 2005., 2005. 13; 279 a 289 p. ISBN 85-212-0355-1. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- MCKENZIE, G.; RECORD, P. Non-contact voltage measurement using electronically varying capacitance. *Electronics Letters*, 2010. Disponível em: <[ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/5410641/05410661.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/5410641/05410661.pdf)>. Citado na página 49.
- MEHL, E. L. M. Qualidade da Energia Elétrica. *Curso de Pós-Graduação em Energia Elétrica da UFPR*, 1996. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>>. Citado na página 25.
- NORAS, M. A. Non-contact surface charge/voltage measurements Capacitive probe -principle of operation. *Trek Application Note*, 2002. Disponível em: <<http://www.scientific-devices.com.au/>>. Citado na página 49.

- NORAS, M. A. Electric field detection using solid state variable capacitance. *ESA Annual Meeting on Electrostatics 2014*, 2014. Disponível em: <[http://www.electrostatics.org/images/ESA{\\\\_}2014{\\\\_}D{\\\\_}](http://www.electrostatics.org/images/ESA{\\_}2014{\\_}D{\\_})>. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- PORCARELLI, D. et al. Perpetual and low-cost power meter for monitoring residential and industrial appliances. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6513687/>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 48.
- ROQUE, A. Aplicações da Lei de Gauss. n. 5, 2010. Disponível em: <<http://sisne.org/Disciplinas/Grad/FisicaBasica2IBM/aula5.pdf>>. Citado na página 33.
- SADIKU, M. N. O. *Elementos do Eletromagnetismo*. 5ª edição. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2012. 91 a 145 p. ISBN 978-85-407-0150-2. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.
- SILVA, L. C. E. d. Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa. 2008. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br>>. Citado na página 25.
- TURANO, S. d. S. *FÍSICA (Eletromagnetismo)*. 2016. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/pt/pesquisador/99302/sergio-turano-de-souza/>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- ULABY, F. T. *Eletromagnetismo para Engenheiros*. Porto Alegre: Porto Alegre : Bookman, 2007, 2007. 109 a 110 p. ISBN 9788577800858. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.
- VELASCO, L. N. *Análise Experimental*. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br>>. Citado na página 44.
- WENTWORTH, S. M. Eletromagnetismo aplicado : abordagem antecipada das linhas de transmissão. In: . Porto Alegre: Porto Alegre : Bookman, 2009, 2009. cap. 9, p. 515 e 537. ISBN 9788577804269. Citado na página 39.
- WIJEWEERA, G.; SHAFAI, C.; RAJAPAKSE, A. Measuring power system voltage remotely using micromachined electric field sensor. In: *Microsystems and Nanoelectronics Research Conference*. IEEE, 2008. ISBN 9781424429219. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4683415/>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 48 e 49.



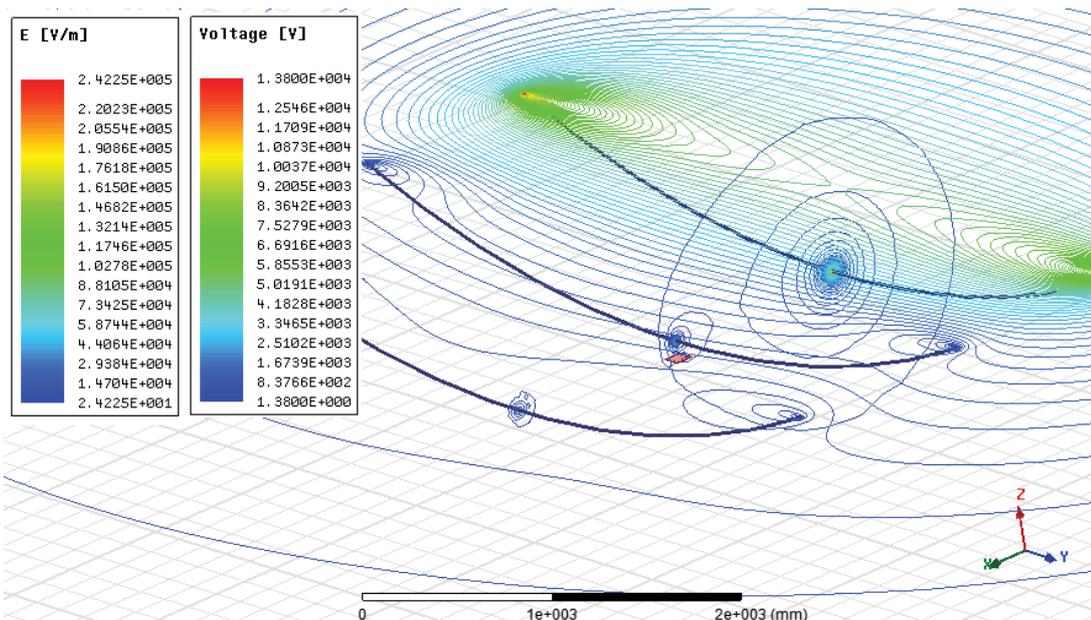
# Apêndices



# APÊNDICE A – Campo elétrico e tensão dos condutores: sistema trifásico com a Fase A energizada.

- Circuito trifásico, porém somente a *Fase A* com tensão;
- Resultado do campo elétrico gerado pelos condutores (eixo X em verde e azul);
- Resultado do nível de tensão dos condutores (eixo Y em verde e azul).

Figura 33 – Campo Elétrico e Tensão.



Fonte: Autor (2016).

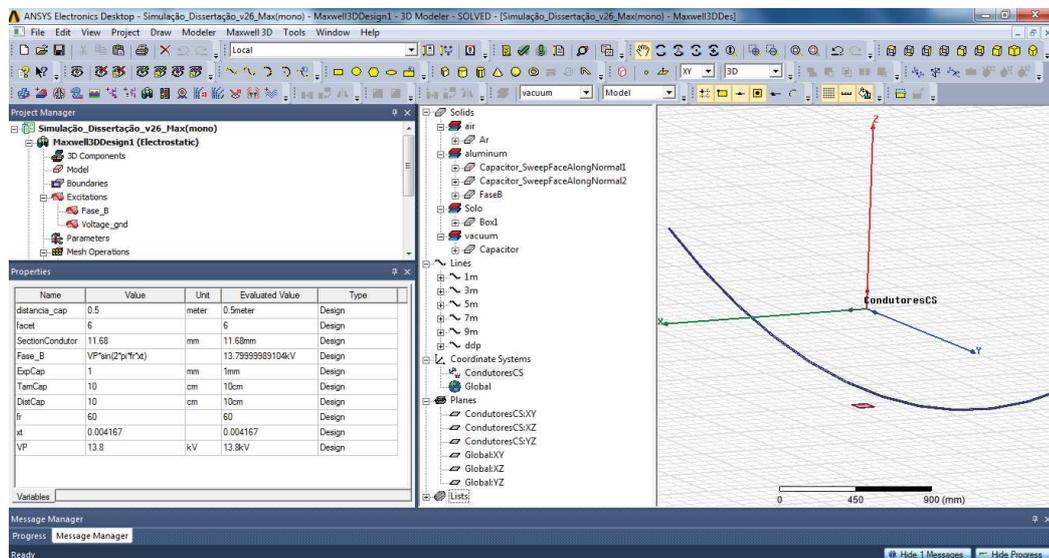
Na figura 33, analisando o sistema com as fases *B* e *C* desenergizadas, observa-se interferências de campo elétrico nas proximidades do capacitor.



## APÊNDICE B – Parametrização básica: sistema monofásico e trifásico

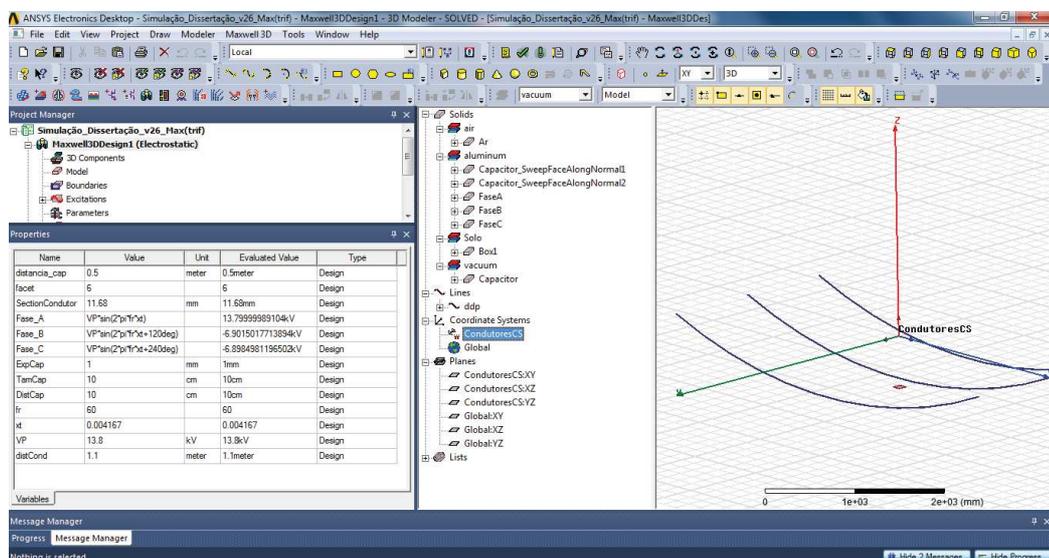
Nas ilustrações das figuras 34 e 35 são demonstradas as parametrizações básicas da simulação computacional realizada no software.

Figura 34 – Parametrização básica da topologia monofásica: simulação Maxwell 3D.



Fonte: Autor (2016).

Figura 35 – Parametrização básica da topologia trifásica: simulação Maxwell 3D.



Fonte: Autor (2016).