



ISRAEL TEODORO MENDES

**EFEITOS ELÉTRICOS DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO SOBRE SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO COM PIVÔ CENTRAL**

**LAVRAS-MG
2018**

ISRAEL TEODORO MENDES

**EFEITOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SOBRE SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO COM PIVÔ CENTRAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Orientador

Prof. Dr. Joaquim Paulo da Silva
Coorientador

**LAVRAS-MG
2018**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Mendes, Israel Teodoro.

Efeitos de linhas de transmissão sobre sistemas de irrigação com pivô central/ Israel Teodoro Mendes. - 2018.

175 p. : il.

Orientador: Giovanni Francisco Rabelo.

Coorientador: Joaquim Paulo da Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Indução. 2. Campo Elétrico. 3. Campo Magnético. I. Rabelo, Giovanni Francisco. II. Silva, Joaquim Paulo da. III. Título.

ISRAEL TEODORO MENDES

**EFEITOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SOBRE SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO COM PIVÔ CENTRAL**

**EFFECTS OF TRANSMISSION LINES ON CENTER PIVOT
IRRIGATION SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 01 de novembro de 2018.

Prof. Dr. Joaquim Paulo da Silva	UFLA
Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Fernandes	CEFET-MG
Profa. Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega	CEFET-MG
Profa. Dra. Cíntia Ribeiro Andrade	CEFET-MG

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Orientador

**LAVRAS-MG
2018**

AGRADECIMENTOS

Ao Criador por me dar a chance de tentar.

À minha família por ser o norte e a inspiração nos momentos de luta.

Aos orientadores prof. Dr. Giovanni e prof. Dr. Joaquim por acreditarem e direcionarem este trabalho.

Aos amigos do CEFET-MG Rodrigo e Ítalo pela ajuda nos testes e ajustes.

RESUMO

Neste trabalho é investigado o efeito de campos elétricos e magnéticos em estruturas metálicas montadas como sistemas de irrigação com pivô central, nas proximidades de linhas de transmissão de energia elétrica. Linhas de transmissão caracterizam-se por intensos campos elétricos e magnéticos, e se tornam cada vez mais presentes nas proximidades de propriedades agrícolas de produção. Em função de atributos das estruturas, posição relativa ou intensidade de corrente na linha, efeitos como eletrização da estrutura, surgimento de correntes indesejáveis com possível risco de queima de equipamentos de controle ou choque elétrico podem ocorrer. Experimentos computacionais têm mostrado que nas proximidades de linhas de 345kV e acima pode ser possível a indução em escalas potencialmente perigosas, em se tratando de estruturas metálicas da ordem de dezenas de metros de comprimento. Este estudo investiga a indução de corrente no pivô nas proximidades de linhas. Testes em escala foram realizados, nos quais verifica-se significativa indução de correntes em pivôs em distâncias de até dezenas de metros das linhas. Também são avaliados neste trabalho o efeito do solo sobre a corrente induzida, e o grau de risco da mesma ao ser humano em função das normas e recomendações.

Palavras-chave: Indução. Campo Elétrico. Campo Magnético. Irrigador.

ABSTRACT

This work investigates the effect of electric and magnetic fields on metallic structures set as center pivot irrigation systems in the vicinity of electric power transmission lines. Transmission lines are characterized by intense electric and magnetic fields, and become more and more present around agricultural production areas. Depending on the attributes of the structures and the relative position or intensity of current in the line, effects such as electrification of the structure, emergence of undesirable currents with possible risk of burning of control equipment, and/or electric shock may occur. Computational experiments have shown that in the vicinity of up to 345 kV lines induction can be potentially dangerous scales in the case of metal structures of the order of tens of meters in length. This study investigates the induction of current in the pivot in the vicinity of lines. Scale tests were performed, in which there was significant induction of pivot chains at distances up to ten meters from the lines. This study also evaluated the effect of soil on the induced current and the degree of risk to human beings in function of legislations and recommendations.

Keywords: Current Induction. Electric Field. Magnetic Field. Irrigator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tipos de sistemas de geração de energia elétrica	24
Figura 2 -	Estrutura de um sistema convencional de geração de energia elétrica.....	25
Figura 3 -	Estruturas de sistemas de geração não-convencionais.	25
Figura 4 -	Sistema de geração turbina-gerador.	26
Figura 5 -	Sistema de geração eólica.	27
Figura 6 -	Sistema Fotovoltaico de geração.....	27
Figura 7 -	Linha de transmissão real.....	28
Figura 8 -	Torre portante típica em sistemas 345kV.....	29
Figura 9 -	Disposição de torre em linha de 500kV.	31
Figura 10 -	Flecha causada pela deformação dos cabos - sistemas 345kV.....	33
Figura 11 -	Sistema de distribuição - Brasil 2017.....	34
Figura 12 -	Curva de consumo de energia x tempo - Brasil	35
Figura 13 -	Panorama de geração de energia elétrica no Brasil.....	36
Figura 14 -	Distribuição das Centrais Geradoras por região.....	36
Figura 15 -	Instalação de novas linhas - histórico ANEEL.....	37
Figura 16 -	Sistema de plantio com diversos pontos de irrigação por pivô central.....	39
Figura 17 -	Estrutura de plantio com irrigação por pivô central.	40
Figura 18 -	Primeiro sistema de Irrigação por Pivô Central.	42
Figura 19 -	Sistema de pivô central com pneus e motor elétrico.	43
Figura 20 -	Vista superior e lateral do sistema de irrigação.....	44
Figura 21 -	Caixa de controle abrigada instalada em torre central.	45
Figura 22 -	Diagrama elétrico da caixa central.	46

Figura 23 - Painel de controle para pivô central.	47
Figura 24 - Anel coletor.	48
Figura 25 - Torre móvel com eixo motor.	49
Figura 26 - Tubulação de distribuição.	50
Figura 27 - Vista superior de um sistema de pivô central.	51
Figura 28 - Região de maior concentração de pivôs no Brasil.	53
Figura 29 - Distribuição nacional de áreas de irrigação.	54
Figura 30 - Panorama 2006 - 2013 do uso de pivôs centrais no Brasil.	55
Figura 31 - Mapa mesclado - linhas de transmissão e áreas de irrigação.	58
Figura 32 - Arranjo de condutores.	60
Figura 33 - Intensidade de campo x Arranjo de condutores.	61
Figura 34 - Estruturas aproximadas para veículos.	62
Figura 35 - Comparativo entre curvas de intensidade de campo.	63
Figura 36 - Corrente em função da altura da estrutura.	64
Figura 37 - Corrente induzida em função da distância ao condutor.	65
Figura 38 - Referência para modelo de acoplamento.	66
Figura 39 - Influência do fator distância na corrente induzida em linha próxima.	68
Figura 40 - Influência de cada fase na corrente induzida em linha próxima.	68
Figura 41 - Distribuição de campo magnético em torno de uma linha de 132kV.	69
Figura 42 - Perfis de campo magnético simulados (ANSI) e real.	70
Figura 43 - Perfil do campo elétrico.	71
Figura 44 - Perfil do campo magnético sob uma torre com linha de 1200kv.	72
Figura 45 - Perfil das tensões induzidas sobre tubulação próximas à L.T.	73

Figura 46 -	Efeitos do arranjo triangular sobre o campo magnético.....	74
Figura 47 -	Efeito do arranjo duplo trifásico sobre o campo.	74
Figura 48 -	Efeito do arranjo compacto sobre o campo magnético.	75
Figura 49 -	Modelo em escala de linha de transmissão.	76
Figura 50 -	Modelo cilíndrico equivalente à uma torre em linha de transmissão.....	77
Figura 51 -	Comparativo entre modelos computacionais e experimento em escala.	78
Figura 52 -	Boxplot da intensidade de campo em função da distância à linha.....	79
Figura 53-	Limites para intensidade de Campo Elétrico x Frequência.	84
Figura 54 -	Limites para a intensidade de Campo Magnético x Frequência.	84
Figura 55 -	Limites para a intensidade de Corrente Induzida no Corpo x Frequência.	85
Figura 56 -	Efeitos de campos magnéticos sobre o corpo humano.....	86
Figura 57 -	Limites toleráveis para Campo Magnético para diferentes públicos.	87
Figura 58 -	Limites para intensidade de Campo Magnético x Frequência da linha.	87
Figura 59 -	Sumarização dos efeitos sobre o corpo humano.	88
Figura 60 -	Limiares Toleráveis para Corrente de Contato.....	88
Figura 61 -	Zonas referenciais para atividades próximas à Linhas de Transmissão.....	94
Figura 62 -	Limites de altura de objetos sob a flecha na linha de transmissão.....	95
Figura 63 -	Superfície envoltória à linha.	102

Figura 64 - Intensidade de campo elétrico nas proximidades de uma linha de transmissão.	103
Figura 65 - Propagação dos campos no entorno de um condutor metálico.	104
Figura 66 - Desequilíbrio eletrostático causado por campo elétrico.	104
Figura 67 - Perfis de campo elétrico em linhas de transmissão.	105
Figura 68 - Pivô referencial em perspectiva.	106
Figura 69 - Distribuição convencional de corrente no pivô.	108
Figura 70 - Regra da mão direita.	109
Figura 71 - Correntes Induzidas nas barras laterais.	111
Figura 72 - Corrente induzida nas estruturas de apoio triangulares.	112
Figura 73 - Linhas de campo na condição paralela à linha.	112
Figura 74 - Indução de corrente no pivô perpendicular à linha.	113
Figura 75 - Local escolhido para a coleta de amostras do campo magnético.	115
Figura 76 - Procedimento de medição em linha real.	116
Figura 77 - Perfil do campo medido no experimento.	117
Figura 78 - Modelo em escala da torre.	119
Figura 79 - Estrutura em escala completa.	121
Figura 80 - Sensor SS49.	122
Figura 81 - Resposta do sensor SS49 utilizado.	122
Figura 82 - Diagrama em blocos - sensor de campo magnético.	123
Figura 83 - Sistema de medição do campo magnético.	123
Figura 84 - Experimento em escala.	125
Figura 85 - Motor utilizado no experimento em escala.	126
Figura 86 - Gráfico perfil do campo magnético medido no modelo em escala.	127

Figura 87 - Procedimento de aquisição da forma de onda da f.e.m. induzida.	129
Figura 88 - Formas de onda para a f.e.m. induzida na lateral do pivô para $d=0, 5, 10$ e 15cm	129
Figura 89 - Perfil da tensão eficaz induzida na lateral do pivô em função da posição.	130
Figura 90 - Diagrama de caixa das f.e.m. induzidas na lateral do pivô em função do ângulo de rotação.	131
Figura 91 - Mesa com chapa simulando solo com baixa resistividade.	132
Figura 92 - Amostras de tensão induzida no apoio do pivô.	133
Figura 93 - Tensão Induzida no Apoio do Pivô monofásico.	133
Figura 94 - Amostras de tensão no apoio do pivô no arranjo trifásico.	134
Figura 95 - Perfil da tensão induzida no apoio do pivô no arranjo trifásico.	134
Figura 96 - Comparativo entre as tensões induzidas no pivô.	135
Figura 97 - Diagrama de Caixa do perfil das tensões induzidas no pivô.	136
Figura 98 - Perfis de tensão induzida em função da condutividade do solo.	137
Figura 99 - Identificação das estruturas em pivô real.	138
Figura 100 - Perfis de tensão induzida na lateral do pivô.	139
Figura 101 - Perfil das tensões induzidas na base do pivô para os dois carregamentos.	139
Figura 102 - Diagrama de Caixas dos perfis das tensões induzidas.	140
Figura 103 - Diagrama de Caixas dos perfis das tensões induzidas na base do pivô.	140
Figura 104 - Filtro passa baixas necessário ao processo de captura.	141
Figura 105 - Tensão induzida no apoio do pivô corrigida.	144
Figura 106 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.	144

Figura 107 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.	145
Figura 108 - Circuito equivalente a um lance do pivô.	147
Figura 109 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.	153
Figura 110 - Tensão induzida na base do pivô corrigida.	154

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Atributos do experimento em escala.....	119
Quadro 2 - Parâmetros de escala do modelo desenvolvido.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões Geométricas e Elétricas - 345kV.....	30
Tabela 2 - Configurações Geométricas e Elétricas - 500kV.....	31
Tabela 3 - Áreas irrigadas por estado.....	53
Tabela 4 - Valores Máximos Toleráveis IRPA.....	81
Tabela 5 - Limites máximos de Exposição - Quadro Geral.....	83
Tabela 6 - Limites Toleráveis - Norma NBR 5422.....	90
Tabela 7 - Limites Toleráveis - resolução ANEEL 398.....	91
Tabela 8 - Limites Toleráveis resolução ANEEL 398 - 0Hz.....	92
Tabela 9 - Sumarização dos limites ANEEL x NBR.....	92
Tabela 10 - Resumo das recomendações NBR5422.....	93
Tabela 11 - Largura de faixa de servidão - CEMIG.....	95
Tabela 12 - Caracterização dos obstáculos.....	96
Tabela 13 - Limites toleráveis para obstáculos - CEMIG.....	99
Tabela 14 - Tensão Máxima Induzida no Pivô.....	146
Tabela 15 - Tensões induzidas no modelo para o carregamento monofásico.....	148
Tabela 16 - Tensões induzidas no modelo para o carregamento trifásico.....	148
Tabela 17 - Tensões induzidas no modelo para múltiplos lances de pivô.....	149
Tabela 18 - Classificação das tensões induzidas no sétimo lance.....	150
Tabela 19 - Ajustes calculados em função da resistividade do solo.....	152
Tabela 20 - Ajuste final da tensão induzida considerando a resistividade do solo.....	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ANA	Agência Nacional de Águas
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
EHF	Extreme High Frequency
ELF	Extreme Low Frequency
EMF	Campo Eletromagnético
EMI	Interferência Eletromagnética
Hz	Hertz (unidade de frequência)
Ip/In	Relação entre corrente de partida e corrente nominal
NOS	Operador Nacional do Sistema
OEM	Onda Eletromagnética
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
3	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	O sistema elétrico de potência	23
3.2	Elementos do Sistema Elétrico de Potência	24
3.3	Sistema de transmissão	28
3.3.1	Linhas de transmissão em 345kV	29
3.3.2	Linhas de transmissão em 500kV	30
3.4	Aspectos do Sistema Elétrico de Potência Brasileiro	33
4	IRRIGAÇÃO POR SISTEMA DE PIVÔ CENTRAL	39
4.1	Aspectos gerais e histórico	39
4.2	Estrutura do irrigador com pivô central	43
4.3	Irrigação com pivô central no Brasil	52
5	CENÁRIO CRÍTICO - PROXIMIDADE ENTRE PIVÔS E LINHAS DE TRANSMISSÃO	57
5.1	Aspecto geográfico - Regiões críticas: Áreas de provável incidência linha/pivô no Brasil	57
5.2	Efeitos de campo elétrico e magnético nas proximidades de linhas de transmissão	59
5.3	Normatização e limites toleráveis	79
5.4	Normatização no Brasil	89
5.4.1	Exposição	89
5.4.2	Ocupação de áreas nas proximidades da linha	93
6	MATERIAIS E MÉTODOS	101
6.1	Efeitos do Campo elétrico sobre pivôs de irrigação	101
6.2	Efeitos do Campo magnético sobre pivôs de irrigação	109
6.3	Levantamento do Perfil do Campo Magnético Sob uma Linha Real	114
6.4	Construção do Experimento em Escala Reduzida	117
6.4.1	Parâmetros Construtivos	118
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	125
7.1	Perfil do Campo Magnético no Modelo em Escala	125
7.1.1	Força Eletromotriz Induzida no Apoio do Pivô	128

7.1.2	Força Eletromotriz Induzida na Lateral do Pivô	137
7.2	Estimativa dos efeitos em pivô real	141
7.3	Análise do potencial de risco.....	145
7.4	Considerações sobre a resistividade do solo.....	150
8	CONCLUSÃO.....	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A - DIAGRAMA CIRCUITAL PARA O PIVÔ DUPLO.....	165
	APÊNDICE B - ROGRAMA DESENVOLVIDO PARA O LEITOR DE CAMPO MAGNÉTICO PARA O EXPERIMENTO EM ESCALA	166
	APÊNDICE C - ROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA PARA O MEDIDOR DE CAMPO NO EXPERIMENTO EM ESCALA	170
	APÊNDICE D - ROGRAMA PARA CÁLCULO DO PERFIL DO CAMPO MAGNÉTICO (LINGUAGEM R).....	171
	APÊNDICE E - ALORES OBTIDOS NO EXPERIMENTO EM ESCALA	173

1 INTRODUÇÃO

Suprir grandes centros urbanos com energia elétrica em um cenário de demanda crescente é o grande desafio da Engenharia Elétrica no âmbito de Sistemas Elétricos de Potência. Pesquisas têm sido realizadas no sentido de tornar mais eficientes todas as etapas do processo de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia elétrica (INKIS, 1978). O aumento constante no número de consumidores tem requerido maior abrangência do sistema de transporte e distribuição de energia, tornando necessário aumentar a malha de distribuição, e ocasionalmente a tensão nas linhas. Estas medidas têm como efeito indireto o aumento da presença dos campos elétricos ou magnéticos em áreas onde anteriormente não existiam linhas, ou o aumento da intensidade de campo presente nas proximidades das linhas já existentes. Outros métodos como mudar a disposição dos condutores nas torres (KHAYAM et al., 2017) e alterar o regime de oscilação da corrente também podem interferir na intensidade ou em características do campo irradiado (NAZARCIK; MUZIK, 2018).

Dentro do contexto rural, o Brasil possui uma das maiores malhas de transmissão e distribuição de energia, em especial na região sudeste (GAMBERALE et al., 1989). Em função deste aspecto, a probabilidade de grandes propriedades agrícolas estarem na rota de tais linhas é alta. Em sistemas de transmissão e distribuição, utiliza-se tensões na ordem de centenas de kiloVolts ou até megaVolts de acordo com a carga, além da circulação de correntes na ordem de kiloAmpéres em condições de curto circuito (RODRIGUES, 2013) (GAMBERALE et al., 1989). Esta ordem de grandeza das tensões e correntes envolvidas em sistemas de transmissão e distribuição as torna potencialmente perigosas, em função de seus efeitos indiretos causados pelos campos elétrico e magnético sobre o corpo humano (AB GHANI et al.,

2014) e sobre estruturas que podem ficar eletrostaticamente carregadas (HAYT JÚNIOR; BUCK, 2013; TENFORDE, 1992). Neste escopo, estudos como Conti (2006) e Penteadó Neto (2005) investigam o comportamento dos campos elétrico e magnético em torno das linhas, a fim de obter um modelo amplo de seu comportamento. Efeitos em longo prazo ainda não foram isolados ou estudados com precisão em estudos científicos atuais.

Sistemas de irrigação por pivô central trouxeram ganho de eficiência em sistemas de plantio (GANZELL, 2006; LIMA; CUSTODIO; GOMES, 2008), porém tais sistemas são baseados em grandes estruturas metálicas (efetivamente grandes espiras). Campos magnéticos podem induzir força eletromotriz (*f.e.m.*), e conseqüentemente corrente elétrica proporcional à intensidade do campo em tais estruturas (HAYT JÚNIOR; BUCK, 2013; RODRIGUES, 2013).

Correntes parasitas em estruturas metálicas podem causar efeitos indesejados distintos, desde aquecimento, centelhamento, danos a controladores centrais presentes em sistemas de irrigação automatizados como o de pivô central e até mesmo risco de choque elétrico a trabalhadores.

Podem ser identificados, finalmente, dois cenários em incipiente disputa de espaço físico. Por um lado maiores e mais intensas redes de distribuição que têm se expandido constantemente, e por outro propriedades rurais maiores e mais densas com pivôs cada vez maiores e mais automatizados.

Neste contexto, o presente trabalho direciona-se a investigar a possível presença e a intensidade das correntes parasitas e tensões induzidas nos pivôs nas proximidades de linhas de transmissão. Esta pesquisa organiza-se em estudo, modelagem, experimentação em escala, ajustes ao modelo em escala real e finalmente a geração de documentação técnica relacionada aos riscos do acoplamento entre sistemas de pivô central e linhas de transmissão.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em investigar o efeito dos campos elétricos e magnéticos causados por linhas de transmissão de alta potência sobre as estruturas metálicas utilizadas em sistemas de irrigação com pivô central.

De forma específica, busca-se:

- a) Desenvolver um modelo computacional para de prever o comportamento das correntes parasitas (causadas pelos campos) sobre a estrutura;
- b) Avaliar o comportamento circuital de tais correntes parasitas, buscando verificar seus efeitos e possíveis riscos a equipamentos ou operadores humanos;
- c) Validar o modelo computacional construído com dados de experimentos reais, realizados em escala reduzida, e sob linha de transmissão real, visando prover produtores e fabricantes de equipamentos agrícolas critérios para projeto e montagem de estruturas de irrigação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O sistema elétrico de potência

Denomina-se Sistema Elétrico de Potência (SEP) um conjunto de equipamentos ou arranjo de subsistemas com a finalidade de suprir consumidores com energia elétrica, sejam estes consumidores residenciais ou industriais (TORTELLI, 2009). Segundo normas nacionais, certos aspectos físicos de tal energia suprida devem estar conformados dentro de parâmetros de qualidade, além de outros parâmetros como confiabilidade, custo e impacto ambiental são considerados na elaboração de normas de distribuição de energia (RODRIGUES, 2013; TORTELLI, 2009).

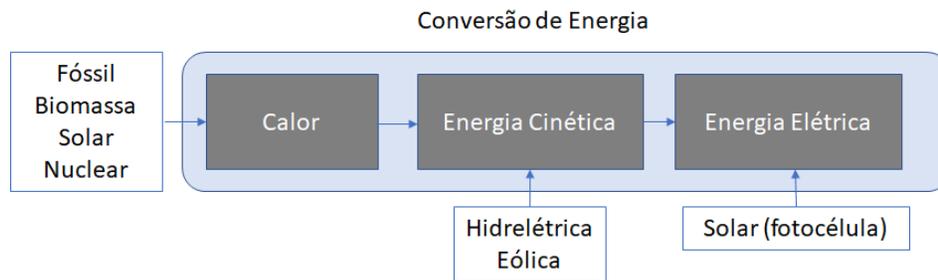
O conceito de distribuição de energia elétrica foi inicialmente empregado no século 19, no qual algumas décadas após descoberta e modelagem do processo de indução magnética por Michael Faraday (1831), do advento do gerador dínamo por Werner Von Siemens (1867) e do transformador por Goullard e Gibbs (1881), foi implantado o primeiro sistema de distribuição de energia em Nova York (EUA). Este sistema operava uma potência total de 540kW em 110Vcc. Posteriormente, em paralelo aos estudos de campo girante de Nikola Tesla (1888), foram implantados os primeiros sistemas de distribuição em corrente alternada em Great Barrington - MA (EUA). Tais tecnologias foram aprimoradas com avanços como o uso de sistemas trifásicos para equipamentos de maiores potências e estudos relacionados à eletricidade básica que levaram a formas mais eficientes de gerar, transportar e conformar a energia elétrica (RODRIGUES, 2013; TORTELLI, 2009). Em Tortelli (2009) ressalta-se que o armazenamento de energia elétrica em SEP a grandes níveis de consumo é inviável, o que faz com que o sistema obrigatoriamente opere adaptando-se à demanda de energia, desde o processo de geração.

3.2 Elementos do Sistema Elétrico de Potência

Sistemas Elétricos de Potência (SEP) atualmente operam em rede interconectada e gerenciada em tempo real. SEP em todo o mundo possuem elementos padronizados, tais elementos são apresentados a seguir:

Sistema de geração: Convertem diferentes formas de energia em energia elétrica. Baseiam-se em sua maioria no princípio da indução modelado por Michael Faraday, onde diferentes métodos são empregados para movimentar o eixo rotor de um gerador (TORTELLI, 2009). A Figura 1 apresenta o diagrama com as estruturas utilizadas nos sistemas de geração atuais.

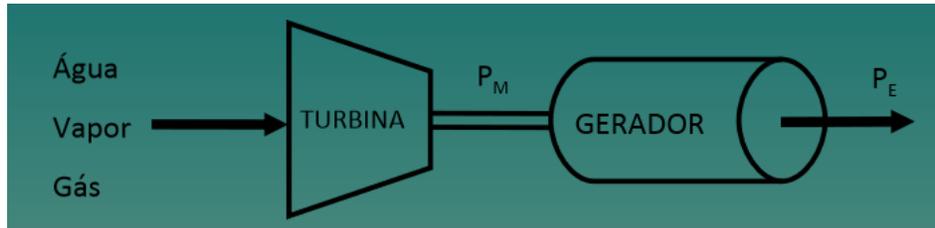
Figura 1 - Tipos de sistemas de geração de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Tortelli (2009).

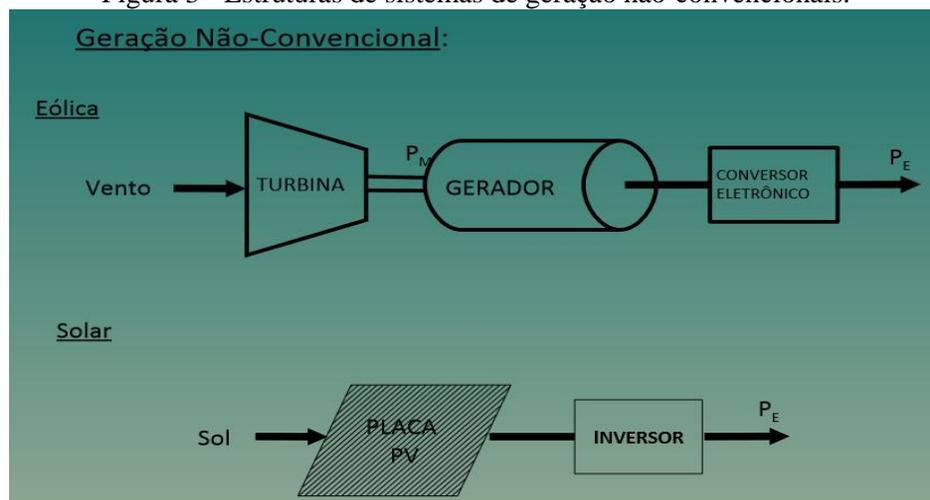
Estruturalmente, os sistemas de geração podem ser divididos em dois tipos. Na Figura 2 apresenta-se um sistema de geração convencional, e na Figura 3, apresenta um sistema não-convencional.

Figura 2 - Estrutura de um sistema convencional de geração de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Tortelli (2009).

Figura 3 - Estruturas de sistemas de geração não-convencionais.



Fonte: Adaptado de Tortelli (2009).

Em sistemas de geração convencional, a energia é gerada por uma turbina cujo eixo é movimentado por energia potencial ou térmica, gerando potência mecânica (PM). O eixo da turbina é mecanicamente acoplado a um gerador que converte a potência mecânica em potência elétrica (PE). A Figura 4 apresenta a ilustração de um sistema convencional real.

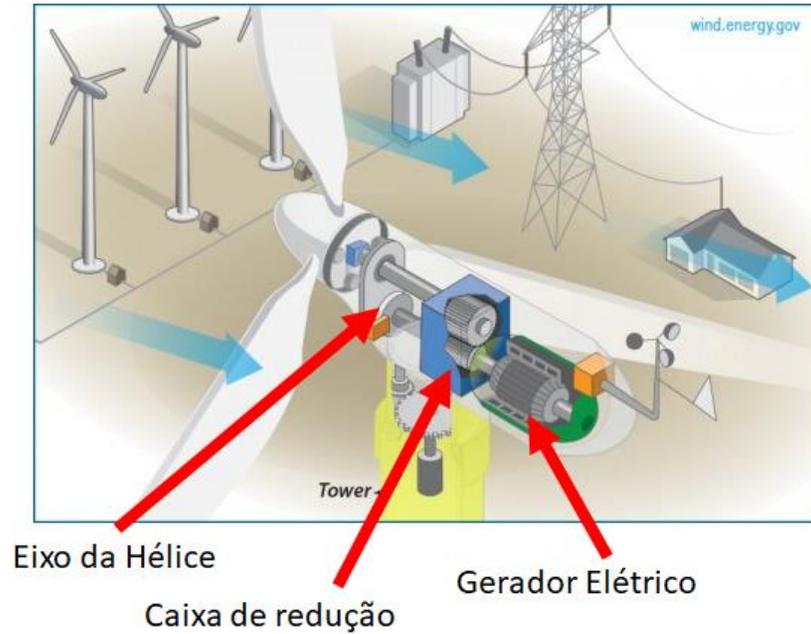
Figura 4 - Sistema de geração turbina-gerador.



Fonte: Adaptado de Equipamento Co.das Energias Hidráulicas de Foshan Xin Yi (2017).

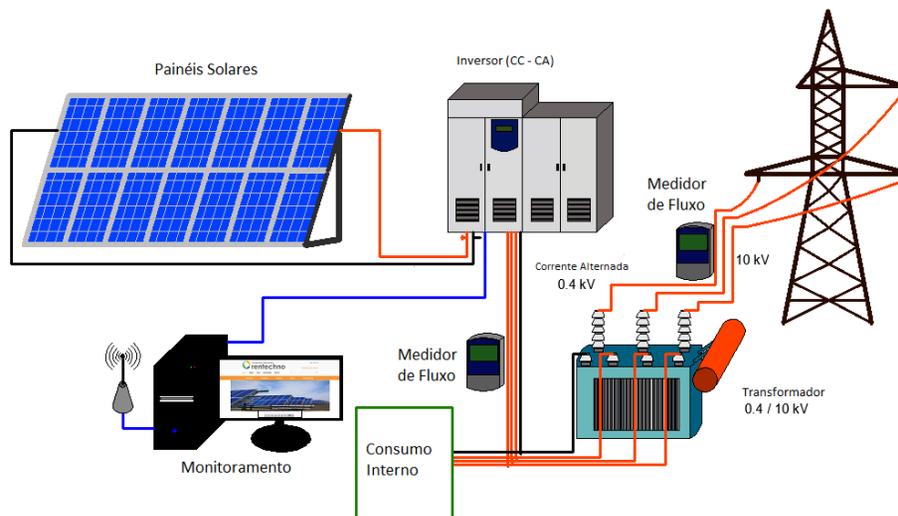
Sistemas de geração por energia eólica e sistemas fotovoltaicos por outro lado são classificados como sistemas não convencionais. A geração em sistemas eólicos depende também de conversores acoplados após o gerador elétrico, em função da velocidade variável na qual a turbina é girada por um eixo acoplado a hélices, as quais são giradas pelo vento. O mesmo ocorre em sistemas fotovoltaicos, onde o elemento gerador não é necessário, porém há necessidade de acumulador de carga e conversor a fim de manter a geração estável. A Figura 5 ilustra um sistema de geração eólico e a Figura 6 ilustra um do tipo fotovoltaico.

Figura 5 - Sistema de geração eólica.



Fonte: Adaptado de Energy Efficiency & Renewable Energy (2018).

Figura 6 - Sistema Fotovoltaico de geração.



Fonte: Adaptado de Grid-On... (2018).

3.3 Sistema de transmissão

Denomina-se linhas de transmissão o conjunto de cabos condutores que realizam a interligação entre estações geradoras e subestações (LAFOREST, 1987). Diferenciam-se linhas de transmissão de linhas de distribuição em função da tensão de trabalho. Linhas de transmissão são linhas que operam com tensão igual ou superior a 69kV. Redes de distribuição operam entre 1kV e 69kV. Tais linhas compõem-se de elementos passivos e ativos. Consideram-se elementos passivos os elementos portantes (torres) metálicos equipados com seus isoladores cerâmicos, e a ferragem adicional para aterramento ou proteção contra descargas atmosféricas. Os cabos condutores são o elemento ativo da linha de transmissão, isto é, são energizados. Estes cabos devem ser uma solução de compromisso entre custo, durabilidade, resistência mecânica e condutividade. Atualmente, ligas de alumínio são utilizadas na construção destes cabos (RODRIGUES, 2013). A Figura 7 apresenta uma imagem de linha de transmissão real.

Figura 7 - Linha de transmissão real.



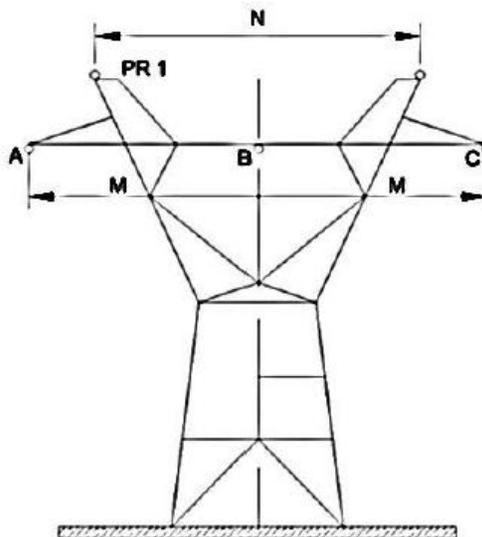
Fonte: Rodrigues (2013).

De acordo com a tensão de trabalho da linha, certas características construtivas devem ser alteradas nos elementos portantes. A seguir são apresentadas características destes elementos para os dois níveis de tensão mais amplamente utilizados nas linhas.

3.3.1 Linhas de transmissão em 345kV

Em função da tensão de operação e do número de circuitos dispõe-se os cabos nas torres de sustentação. O afastamento entre os cabos é fator importante para minimizar o acoplamento entre as fases, além de minimizar possíveis centelhamentos (RODRIGUES, 2013). Para as linhas com tensão de 345kV, a disposição dos cabos nas torres se dá conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Torre portante típica em sistemas 345kV.



Fonte: Rodrigues (2013).

Na figura acima, o posicionamento das três fases A, B e C, além dos espaçamentos $M = 9,50\text{m}$ e $N=13,7\text{m}$. Outras características desta forma de disposição são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões Geométricas e Elétricas - 345kV.

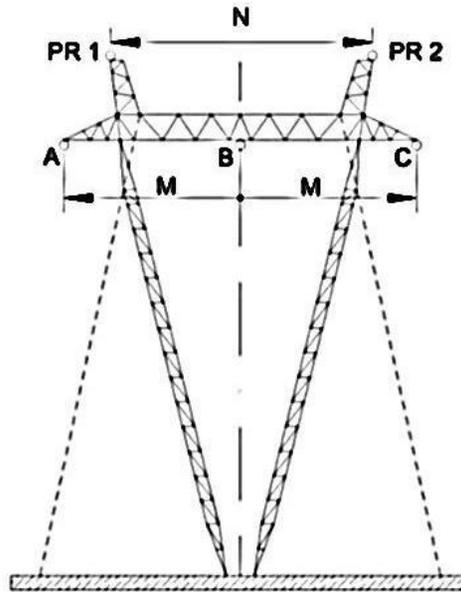
Configurações Geométricas e Elétricas - 345kV	
Tensão de operação	345 kV
Potência máxima transmitida	250 MVA
Corrente de operação média	418,3 A
Comprimento da Linha	231 km
Nº de condutores/fase	2
Tipo de condutores fase	CAA
Código dos condutores fase	<i>Rail</i>
Nº de cabos para-raios (PR)	2
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código dos condutores para-raios	3/8 EHS
Distância entre subcondutores	0,457 m
Altura média fase A	14,00 m
Altura média fase B	14,00 m
Altura média fase C	14,00 m
Altura média cabos para-raios	18,95 m
Diâmetro cabos fase	29,59 mm
Diâmetro cabos para-raios (PR)	9,52 mm
Vão Médio	413 m
M	9,50 m
N	13,70 m

Fonte: Rodrigues (2013).

3.3.2 Linhas de transmissão em 500kV

Em linhas de 500kV alteram-se os espaçamentos entre os condutores, em função da maior tensão entre fases. A Figura 9 apresenta o layout de torres para este tipo de linha.

Figura 9 - Disposição de torre em linha de 500kV.



Fonte: Rodrigues (2013).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros técnicos para estas linhas.

Tabela 2 - Configurações Geométricas e Elétricas - 500kV.

(Continua)

Características Geométricas e Elétricas - Sistema 500kV	
Tensão de operação	500 kV
Capacidade de transmissão	725 MVA
Corrente de operação média	837,15 A
Comprimento da linha	120,31 km
Nº de condutores/fase	3
Tipo dos condutores fase	CAA
Código dos condutores fase	Ruddy
Nº de cabos para-raios (PR)	2
Tipo de cabos para-raios	Aço Galvanizado
Código dos condutores para-raios	7/16 EHS
Distância entre subcondutores	0,457 m

Tabela 2 - Configurações Geométricas e Elétricas - 500kV.

(Conclusão)

Características Geométricas e Elétricas - Sistema 500kV	
Altura média fase A	16,53 m
Altura média fase B	16,53 m
Altura média fase C	16,53 m
Altura média cabos para-raios	30,71 m
Diâmetro cabos Fase	28,74 mm
Diâmetro cabos para-raios	11,11 mm
Vão médio	468,13 m
M	10,25 m
N	14,50 m

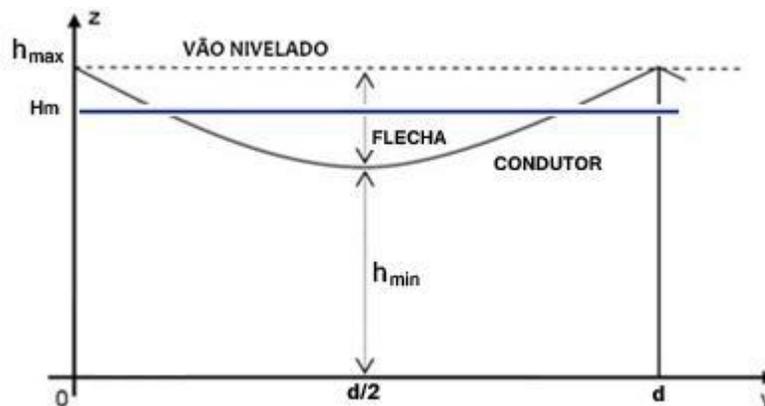
Fonte: Rodrigues (2013).

Outra característica de linhas de transmissão relevante a este estudo abordada em Rodrigues (2013) é o cálculo da flecha formada pelos condutores entre as torres de sustentação. O cálculo da flecha criada abaixo da projeção da altura máxima da torre é dada por:

$$F = \frac{pA_e^2}{8T_0} [m] \quad (1)$$

onde, p é o peso próprio do cabo (kgf/m), A_e é o vão entre as duas torres denotado na Figura 10 pela distância d . T_0 é a força de tração realizada no cabo condutor pelos esticadores da torre (em kgf).

Figura 10 - Flecha causada pela deformação dos cabos - sistemas 345kV.



Fonte: Rodrigues (2013).

As características apresentadas nesta sessão são fatores relevantes sobre a intensidade do campo magnético presente nas proximidades das linhas. Destaca-se que normas técnicas regulamentam a altura da flecha em função de riscos de descargas em objetos no solo, entretanto atualmente tais normas são comumente negligenciadas (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG, 2005).

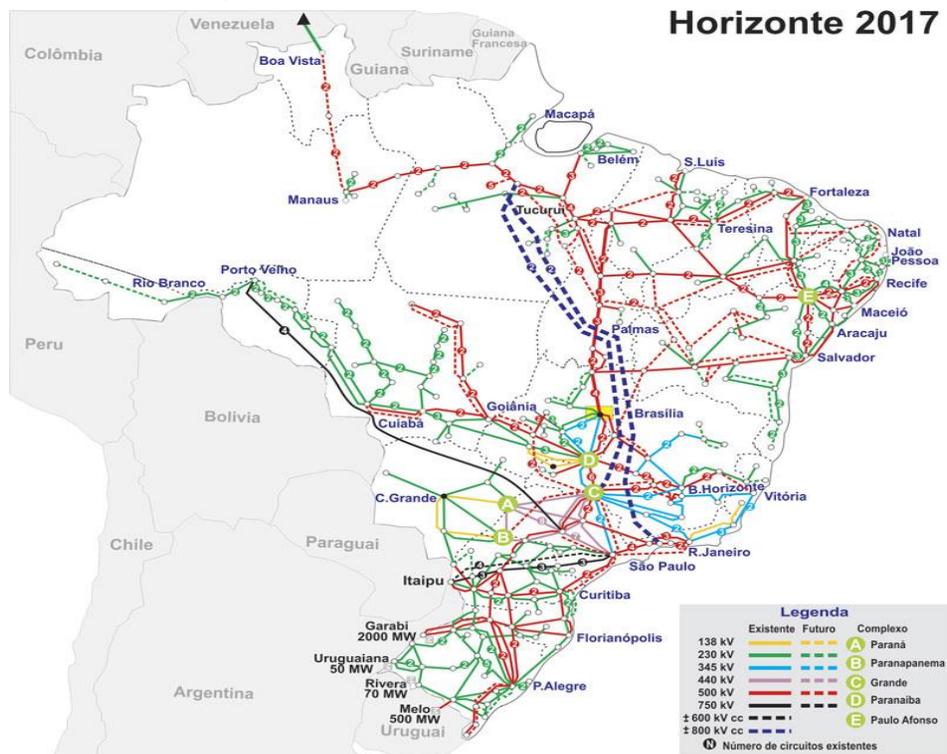
3.4 Aspectos do Sistema Elétrico de Potência Brasileiro

Segundo o senso 2018, no Brasil, 97,8% das residências possui energia elétrica, sendo sua maioria em zonas urbanas. Uma intensa matriz descentralizada de geração e distribuição abastece este mercado composto por 61,5 milhões de unidades consumidoras. O sistema de distribuição instalado no Brasil é denominado Sistema Interligado Nacional (SIN), este abastece as regiões sul, sudeste, centro-oeste e parte do nordeste e norte. Em paralelo a este sistema existem outros de menor porte, isolados, mas também gerenciados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No aspecto técnico, o sistema brasileiro

opera com tensões de 750KV, 500kV, 230kV, 88kV e 138kV, além de 600kV e 800KV em corrente contínua na matriz principal (SIN), e 2,3kV, 25kV e 44kV também nos sistemas isolados. A Figura11 apresenta a malha de distribuição atualizada em 2017.

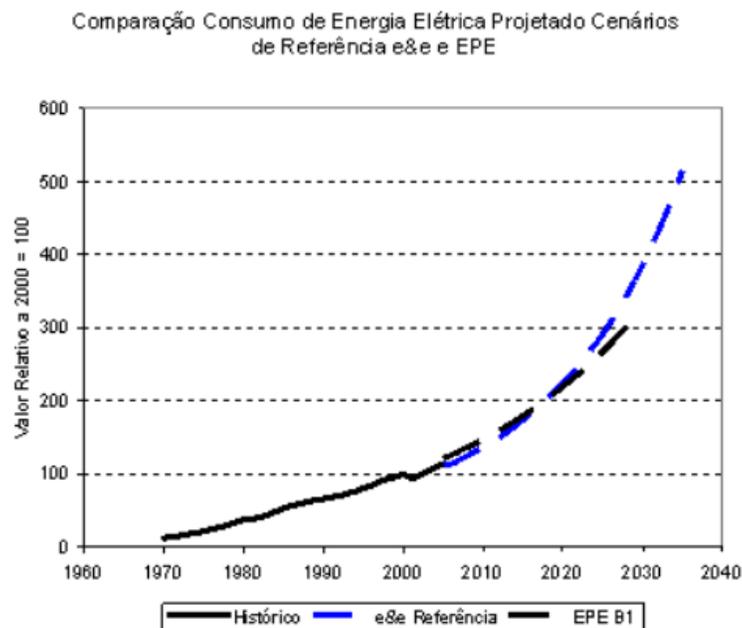
Em termos de consumo, segundo Matick (2000) a curva de kiloWatts consumidos no país tem crescido de forma exponencial. A Figura12 apresenta esta curva.

Figura 11 - Sistema de distribuição - Brasil 2017.



Fonte: Maruvada (2000).

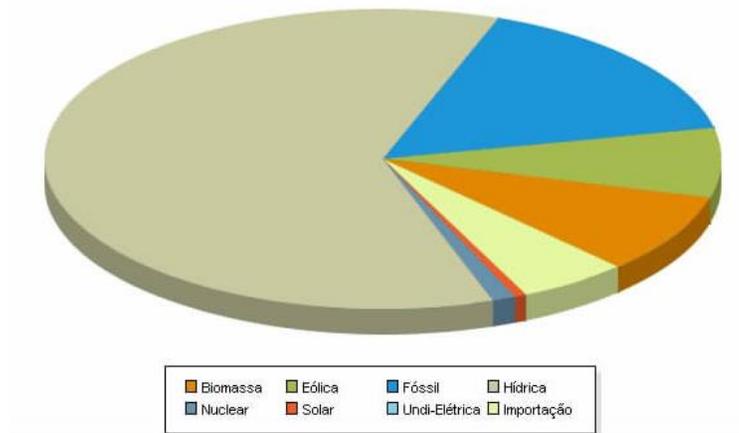
Figura 12 - Curva de consumo de energia x tempo – Brasil.



Fonte: Matick (2000).

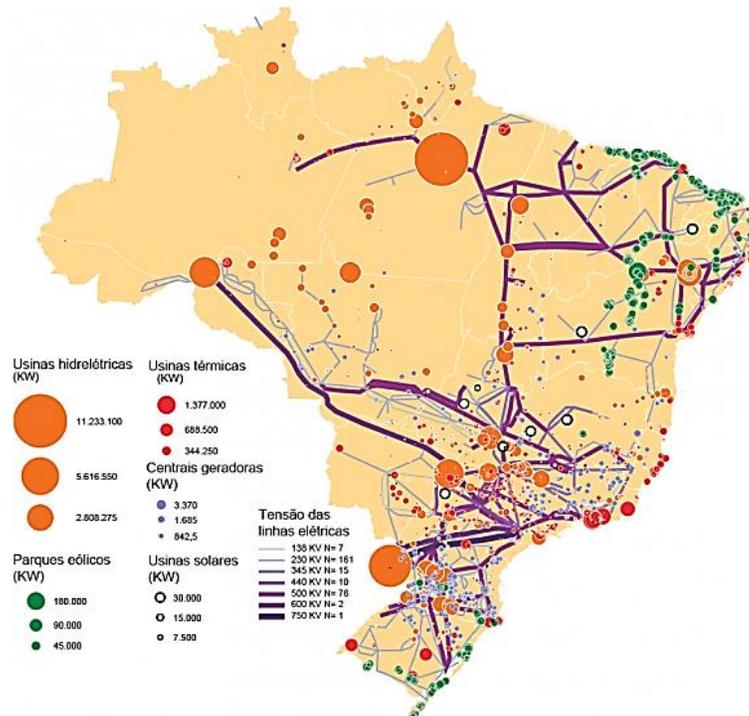
Segundo Rodrigues (2013) o Brasil atualmente conta com uma capacidade total de geração de 124.334.241 kW. Esta capacidade de geração é composta por diferentes tipos de usinas. Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2017), atualmente 60% da energia elétrica gerada no país é oriunda de usinas hidrelétricas, 7,5% gerada através de energia eólica, 7,8% através da queima de gás natural, e outras fontes menores. A Figura 13 apresenta o panorama de geração no Brasil, e a Figura 14 apresenta a distribuição geográfica destas usinas.

Figura 13 - Panorama de geração de energia elétrica no Brasil.



Fonte: ANEEL (2017).

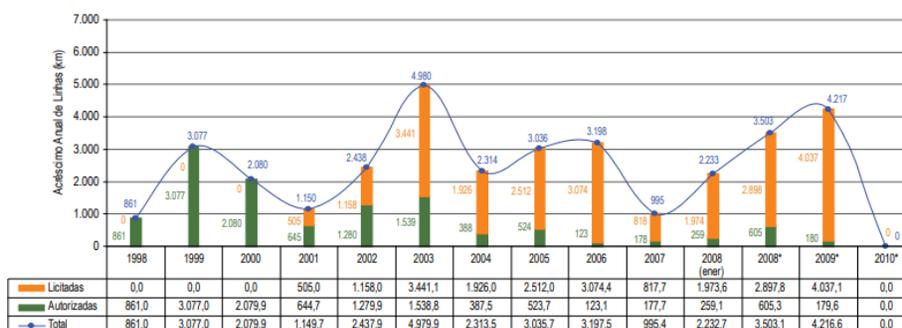
Figura 14 - Distribuição das Centrais Geradoras por região.



Fonte ANEEL (2017).

Enfatiza-se que as usinas hidrelétricas são atualmente o principal sistema de geração de energia no país, entretanto, segundo ANEEL (2017) o cenário está em movimento com a implantação de outras usinas (principalmente eólicas). Observa-se também nas figuras que grandes centros de geração encontram-se distantes de grandes capitais, que são prováveis grandes consumidores. Esta capacidade de geração está associada a um sistema de transmissão distribuído em 950 linhas compondo um total de 100 000km de linhas com tensão igual ou acima de 230kV (RODRIGUES, 2013). Este sistema encontra-se em expansão, a cada ano são acrescentadas unidades geradoras e milhares de quilômetros de linhas (MATICK, 2000). A Figura 15 ilustra este crescimento, apresentando a taxa anual de crescimento da rede segundo o último atlas da ANEEL em 2009 (MATICK, 2000; MENEZES, 2015).

Figura 15 - Instalação de novas linhas - histórico ANEEL.



Fonte: Matick (2000).

Enfatiza-se na figura que, apesar das sazonalidades e oscilações econômicas do país, o sistema se manteve em saldo positivo nas últimas décadas, i.e, novas linhas são instaladas continuamente.

4 IRRIGAÇÃO POR SISTEMA DE PIVÔ CENTRAL

4.1 Aspectos gerais e histórico

Sistemas de irrigação por pivô central tornaram-se o método mais eficiente de irrigação atualmente utilizado. As Figuras 16 e 17 ilustram a eficiência destes sistemas na irrigação de grandes áreas.

Figura 16 - Sistema de plantio com diversos pontos de irrigação por pivô central.



Fonte: Fórum Agricultura Irrigada (2018).

Figura 17 - Estrutura de plantio com irrigação por pivô central.



Fonte: Winberley Valley Watershed (2015).

Irrigação por pivô central pode ser considerada solução de compromisso entre uniformidade de aspersão, durabilidade e área de cobertura (MEDEIROS, 2010; ZYBACH, 1961). Em Schons (2006) afirma-se que a eficiência na aplicação de água de pivô central chega a 90%, e em função disto e de sua simplicidade de operação, estes se tornaram populares e mais utilizados. De acordo com Testezlaf (2014), sistemas de irrigação por pivô central apresentam diversas vantagens em relação aos demais sistemas, como:

- a) Não necessitam da construção de canais ou sulcos de distribuição de água no solo, reduzindo a perda de área;
- b) Adequam-se à maioria das culturas e tipos de solos, em função do controle do volume e pulverização dos aspersores;
- c) Apresentam flexibilidade em relação à aplicação de tipos diferentes de lâminas d'água em função da intercambialidade de aspersores;

- d) Possibilitam redução da erosão em condições bem ajustadas de trabalhos;
- e) Perda por evaporação mínima, em função do transporte da água por tubulações;
- f) Possibilitam uniformidade de distribuição de água pelo terreno em função dos sistemas de controle;
- g) Permitem a utilização para fins de controle de microclima e também aplicação de agroquímicos e componentes de fertirrigação de forma rápida.

O sistema de irrigação por pivô central foi proposto por Frank Zibarch em 1949, e patenteado no final da década de 60 (ZYBACH, 1961). De acordo com a patente (ZYBACH, 1961) inicialmente o sistema consistia em um sistema hidráulico simplificado, constituído por uma estrutura tubular treliçada (para prover resistência mecânica) sustentada por bolsas de borracha que deslizavam sobre o solo. Posteriormente o sistema de deslize foi substituído por rodas com pneus. A Figura 18 apresenta uma ilustração deste primeiro sistema de irrigação descrito, na qual observa-se treliças e as bases deslizantes de borracha.

Figura 18 - Primeiro sistema de Irrigação por Pivô Central.



Fonte: Zybach (1961).

Segundo Schons (2006) e Vilela (2002), nos primeiros sistemas de irrigação por pivô central o movimento da estrutura era realizado por turbinas hidráulicas, e a uniformidade da irrigação era dependente de fatores como o relevo, e afetada pela extensão do pivô. Posteriormente o deslocamento da estrutura passou a se dar por motores elétricos instalados ao longo da mesma. A Figura 19 apresenta o sistema equipado com motores e pneus.

Figura 19 - Sistema de pivô central com pneus e motor elétrico.

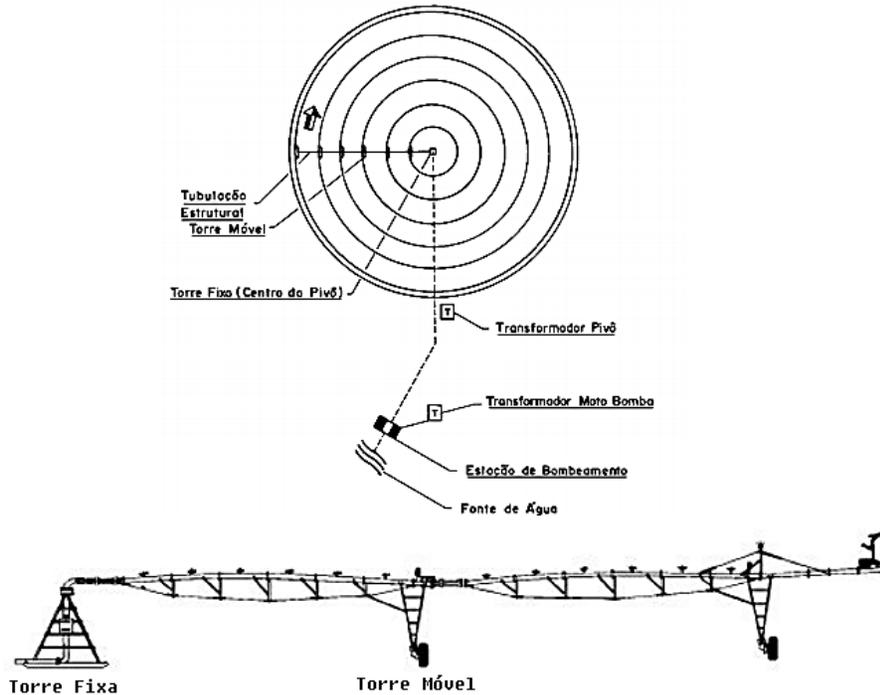


Fonte Schons (2006).

4.2 Estrutura do irrigador com pivô central

De acordo com Medeiros (2010) o sistema de pivô central moderno consiste em uma barra móvel com diversos bocais aspersores de água. Esta barra desloca-se girando em torno de uma das extremidades fixas. Para a sustentação, torres são instaladas a cada base móvel (equipada com motor e roda), e a estas torres hastes metálicas flexíveis são fixadas na extensão da estrutura. O deslocamento da estrutura (momento angular) é majoritariamente realizado pela torre móvel mais externa, que aplica torque puxando a ponta da estrutura (MEDEIROS, 2010). A Figura 20 apresenta vista superior e lateral da estrutura de irrigação, cujos componentes serão apresentados a seguir.

Figura 20 - Vista superior e lateral do sistema de irrigação.



Fonte: Adaptado de Testezlaf (2014).

Torre Central (ou torre fixa): É o ponto fixo no solo no qual o sistema permanece ancorado e aterrado. A partir deste ponto, a estrutura gira. Em Testezlaf (2014) afirma-se que em função das forças de tração e torção envolvidas no movimento de giro, esta torre possui forma piramidal de base quadrada, construída em aço zincado. Na torre central encontra-se instalado o sistema de controle, em geral, abrigado em caixa metálica. A figura 21 apresenta a estrutura de uma torre central.

Caixa de Controle: Constitui-se de sistema eletrônico composto por chave geral de proteção, sistema de aterramento e central eletrônica equipada com microcontrolador ou microprocessador projetada para controlar a

movimentação (sentido e velocidade por torre móvel) e volume de aspersão, que varia ao longo do pivô.

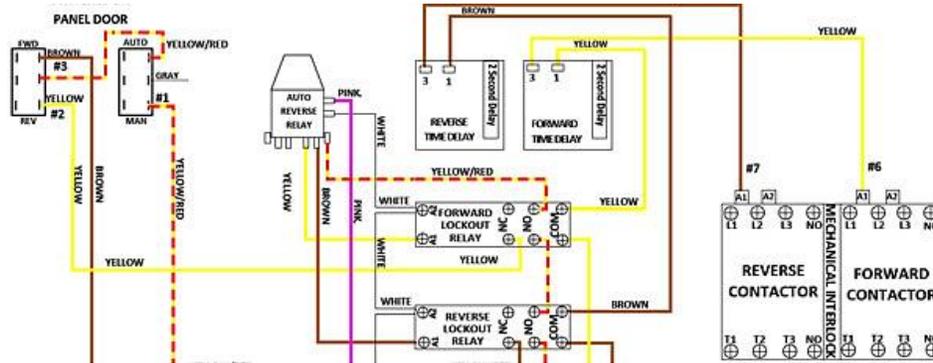
Figura 21 - Caixa de controle abrigada instalada em torre central.



Fonte: Testezlaf (2014).

A Figura 22 apresenta o diagrama elétrico do circuito no interior da caixa de controle.

Figura 22 - Diagrama elétrico da caixa central.

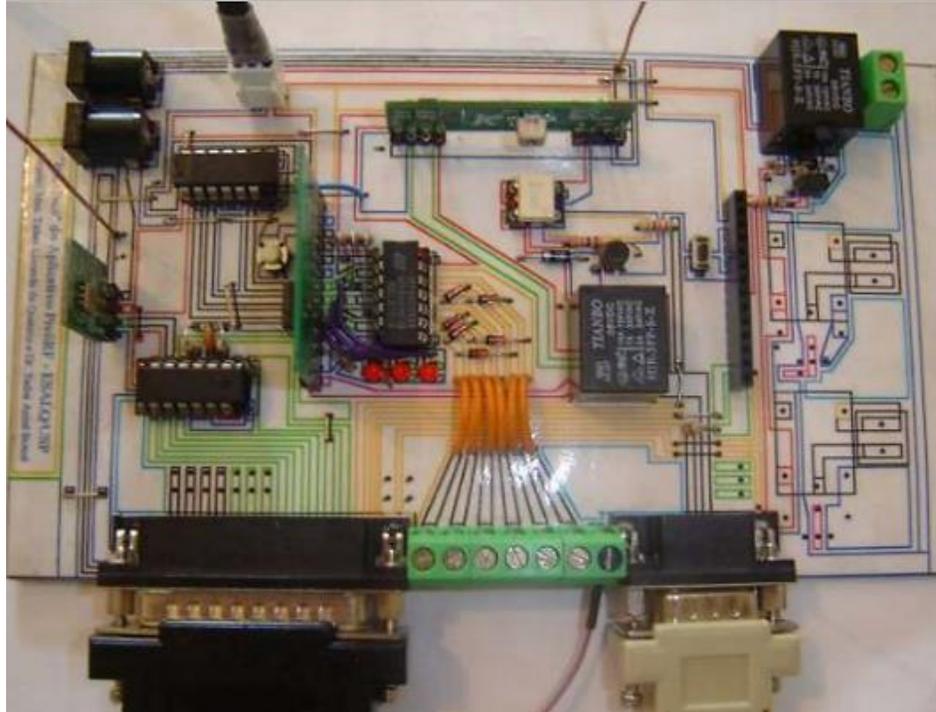


Fonte: Testezlaf (2014).

Enfatiza-se na figura os contatores para reversão e controle temporizado dos motores.

Pesquisadores como Queiroz (2007) apresentam detalhes técnicos relacionados ao sistema eletrônico de controle de velocidade. Naquela pesquisa, utiliza-se o termo ciclo de trabalho dos motores, i.e. o tempo em que cada motor elétrico da estrutura fica ligado durante uma volta em função da sua posição. Este acionamento temporizado é realizado por painéis eletrônicos associados a relés e contatores que realizam o acionamento dos motores. A Figura 23 apresenta o painel de controle proposto em Queiroz (2007).

Figura 23 - Painel de controle para pivô central.



Fonte: Queiroz (2007).

Eletricamente conectados ao circuito de comando, e também instalados na torre central existem os anéis coletores. Estes anéis mantêm a conexão elétrica entre a torre central estática e a estrutura girante. Os anéis devem ser capazes de conduzir correntes elevadas (ordem das dezenas de Ampères) para alimentar os motores propulsores das demais torres (TESTEZLAF, 2014). A Figura 24 apresenta a estrutura de um anel coletor, e o mesmo instalado em torre central.

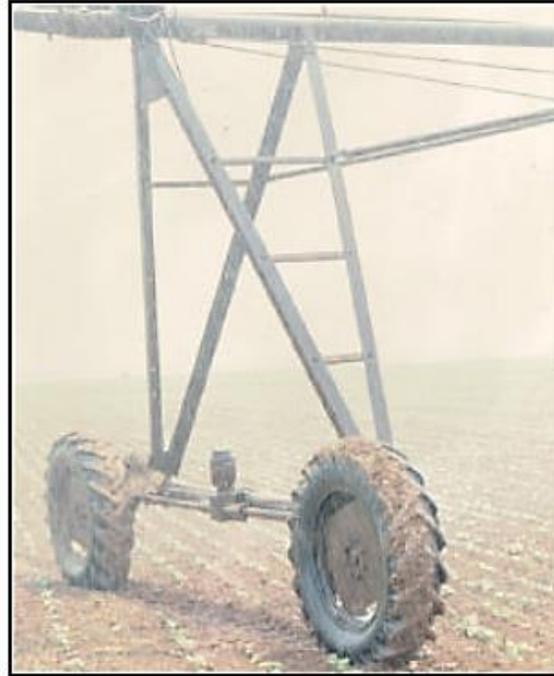
Figura 24 - Anel coletor.



Fonte: Testezlaf (2014).

Torres móveis ou unidades propulsoras: De acordo com Testezlaf (2014) sustentam a tubulação de água em vãos de 24 a 72,2m. Torres móveis devem ser equipadas com pneus de larga banda de rodagem, para minimizar a pressão sobre o solo nas faixas de passagem. A figura 25 apresenta a torre móvel. Destaca-se nesta figura o sistema de distribuição de movimento por cardã entre as duas rodas.

Figura 25 - Torre móvel com eixo motor.



Fonte: Testezlaf (2014).

Tubulação de Distribuição: Em sistemas de pivô central, esta tubulação é montada com tubos de aço zincado, e possui diâmetros e.g. de 6,5”, 6” ou 8” de acordo com a posição de instalação no sistema. Para minimizar contato com a cultura, tais tubos são suspensos em até 3,7m por torres móveis. Enfatiza-se também que há necessidade de conexão móvel na torre central, na parte girante da estrutura. Sobre esta tubulação são instalados os aspersores, com espaçamento e vazão ajustáveis de acordo com a cultura (TESTEZLAF, 2014). A Figura 26 apresenta imagens da tubulação de distribuição. Ressalta-se que de acordo com a estrutura pode ser necessário a instalação de conexões de borracha (mangotes) para dar flexibilidade à estrutura.

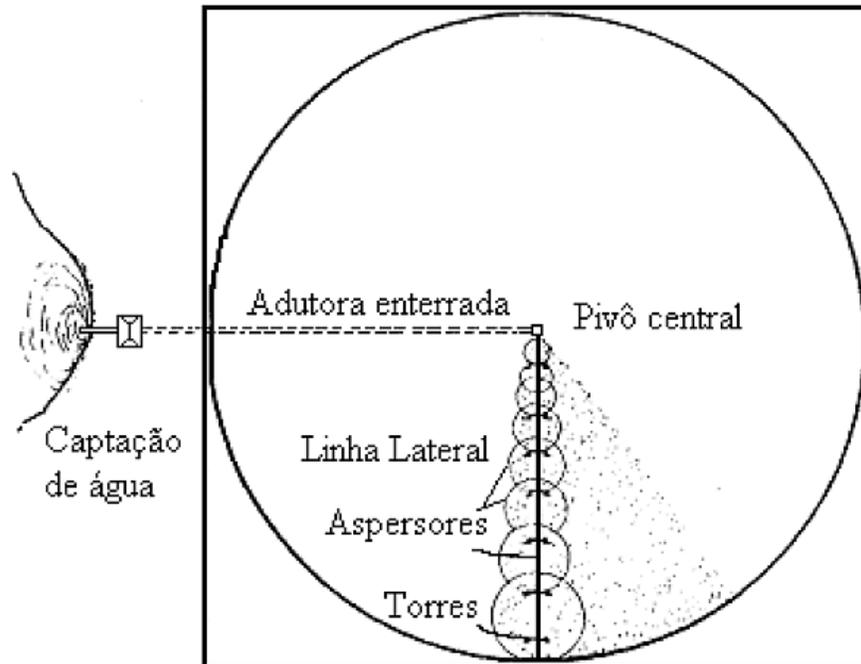
Figura 26 - Tubulação de distribuição.



Fonte: Testezlaf (2014).

Em função do movimento angular tornar o deslocamento linear diferente entre as torres, torna-se necessário controlar o volume de água aplicado para que a área central não seja sobre irrigada. Desta forma, inicialmente utilizava-se variação nos diâmetros dos tubos. Posteriormente, com o advento de sistemas automatizados, utilizam-se controladores para dosar a quantidade de água (através de eletroválvulas) e a velocidade de deslocamento dos motores instalados nas torres. A Figura 27 apresenta o diagrama de giro de um sistema de irrigação de pivô central.

Figura 27 - Vista superior de um sistema de pivô central.



Fonte Medeiros (2010).

Na Figura 27 observa-se a diferença entre o volume irrigado entre a extremidade e a parte central. Para a operação do pivô, torna-se necessária adutora de água enterrada no solo para prover o volume de água a ser distribuído no centro, isto é, no pivô (MEDEIROS, 2010; ZYBACH, 1961).

Em Schons (2006) afirma-se que além do custo de instalação, o custo total em termos de energia elétrica torna estes sistemas mais eficientes em grandes áreas, em função dos custos energéticos de movimentação, bombeamento e gerenciamento. A Figura 28 apresenta sistemas de plantio que utilizam estruturas de pivô central.

Em outra perspectiva, em Testezlaf (2014) são apresentados aspectos negativos da utilização destes sistemas sob certas condições. A seguir são sumarizados estes aspectos:

- a) Afetação na uniformidade na presença de ventos acima de 4ms^{-1} ;
- b) Possibilidade de evaporação quando o sistema opera em altas temperaturas e baixa umidade do ar;
- c) Custo inicial para implantação superior aos sistemas de irrigação por superfície;
- d) Custo operacional superior aos sistemas de superfície em função dos tubos operarem pressurizados;
- e) Não recomendado em culturas sensíveis ao molhamento total da planta;
- f) Possibilidade de ser obstruído por culturas altas;
- g) Gotas com energia cinética elevada, podendo causar selamento do solo;
- h) Componentes sensíveis a qualidade da água;

4.3 Irrigação com pivô central no Brasil

Em função do perfil historicamente extrativista inicialmente voltado para a extração e exportação de matéria-prima, sistemas complexos de agricultura como pivô central são relativamente recentes no Brasil. As primeiras propriedades a utilizar-se de pivô central no país datam da década de 70. Na década de 80 popularizaram-se principalmente no interior do estado de São Paulo (TESTEZLAF, 2014). Segundo estudo apresentado em Lacerda (2015) atualmente no Brasil estão em operação 18 mil pivôs, cobrindo uma área de 1,17 milhões de hectares. Afirma-se que estes sistemas são o modo de irrigação mais crescente no país, em função do crescimento de 32% na última década. No Brasil, os municípios que possuem maior número de pivôs são Unaí e Paracatu em MG, Cristalina em Goiás (ANA, 2013; LACERDA, 2015), a Figura 29 apresenta imagem via satélite da região onde estão presentes estes municípios.

De acordo com ANA (2013) Minas Gerais é atualmente o estado com maior área irrigada por pivô central. A Tabela 3 apresenta o panorama nacional em área irrigada. Apresenta-se na Tabela os seis estados com maior área irrigada. De forma complementar a esta informação, em ANA (2013) é apresentado o mapa com a distribuição espacial destas áreas irrigadas. Este mapa é apresentado abaixo na Figura 29.

Tabela 3 - Áreas irrigadas por estado.

Estado	Área Irrigada (hectares)
MG	366.428
GO	210.724
BA	192.223
SP	168.674
RS	76.081
MT	67.071

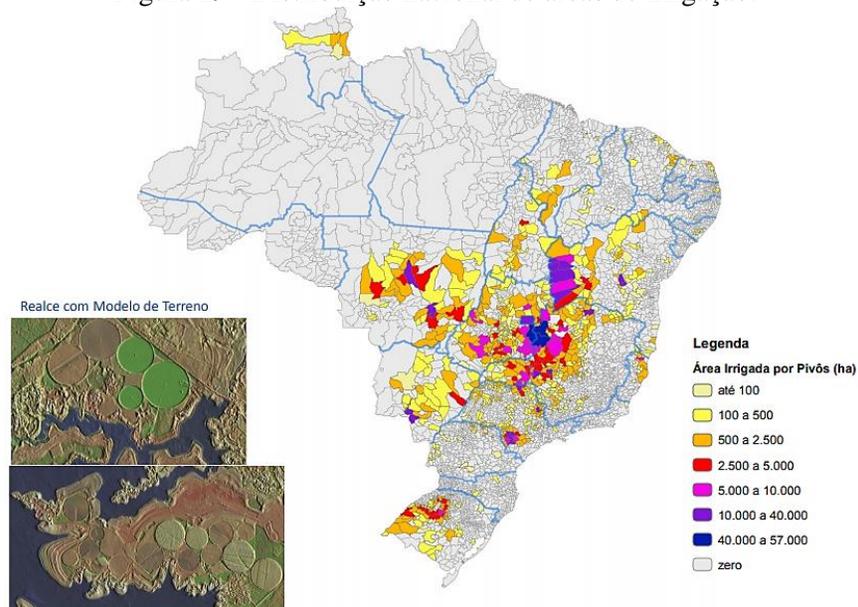
Fonte: ANA (2013).

Figura 28 - Região de maior concentração de pivôs no Brasil.



Fonte: ANA (2013).

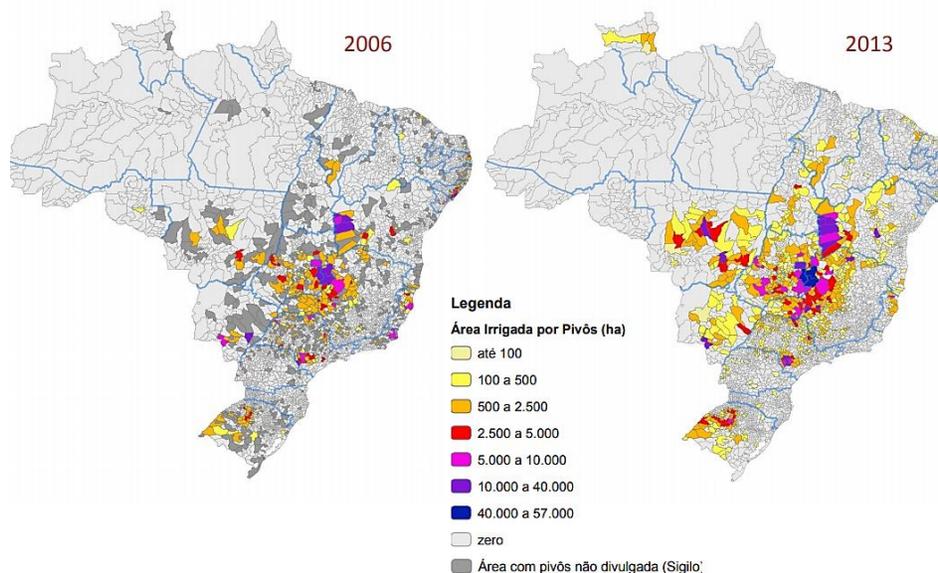
Figura 29 - Distribuição nacional de áreas de irrigação.



Fonte: ANA (2013).

Enfatiza-se na figura a concentração das áreas na região central do país, com maior incidência nas fronteiras entre os estados de MG e GO. Pode ser observado que mesmo em menor densidade, a região sudeste, central e centro-oeste possuem boa parte de seu território irrigado. No panorama histórico, apresenta-se em ANA (2013) e Lacerda (2015) a evolução da utilização dos pivôs. A Figura 30 apresenta imagens de 2006 e 2013 que possibilitam comparação visual.

Figura 30 - Panorama 2006 - 2013 do uso de pivôs centrais no Brasil.



Fonte: ANA (2013).

Observa-se na Figura 29 o avanço das áreas irrigadas, o que corrobora com o apresentado em Lacerda (2015) onde cita-se o crescimento em 32%. Em ANA (2013), Lacerda (2015) e Testezlaf (2014), aborda-se o efeito deste avanço sobre os recursos hídricos de cada região, tais estudos fogem ao escopo deste trabalho, porém são o paradigma atual para a implantação de sistemas de pivô central. Em Lacerda (2015) afirma-se que até 70% do consumo de água destes estados é comprometido com irrigação.

5 CENÁRIO CRÍTICO - PROXIMIDADE ENTRE PIVÔS E LINHAS DE TRANSMISSÃO

5.1 Aspecto geográfico - Regiões críticas: Áreas de provável incidência linha/pivô no Brasil

Com base nas informações de ANA (2013), Lacerda (2015) e Testezlaf (2014), pode se considerar as regiões sudeste, centro e centro-oeste do Brasil como regiões com áreas significativas de seus territórios irrigadas. Em paralelo a este cenário, conforme já apresentado em sessões anteriores, o Brasil possui grande densidade de linhas de transmissão nas mesmas regiões irrigadas com pivô central. Em função destes fatores, pode ser inferido que há grande probabilidade de os dois elementos (linhas e irrigadores) estarem em distâncias na ordem de dezenas de metros, ou até mesmo em sobreposição. Este panorama pode ser verificado considerando os mapas apresentados nas seções 3.3 e 4.3.

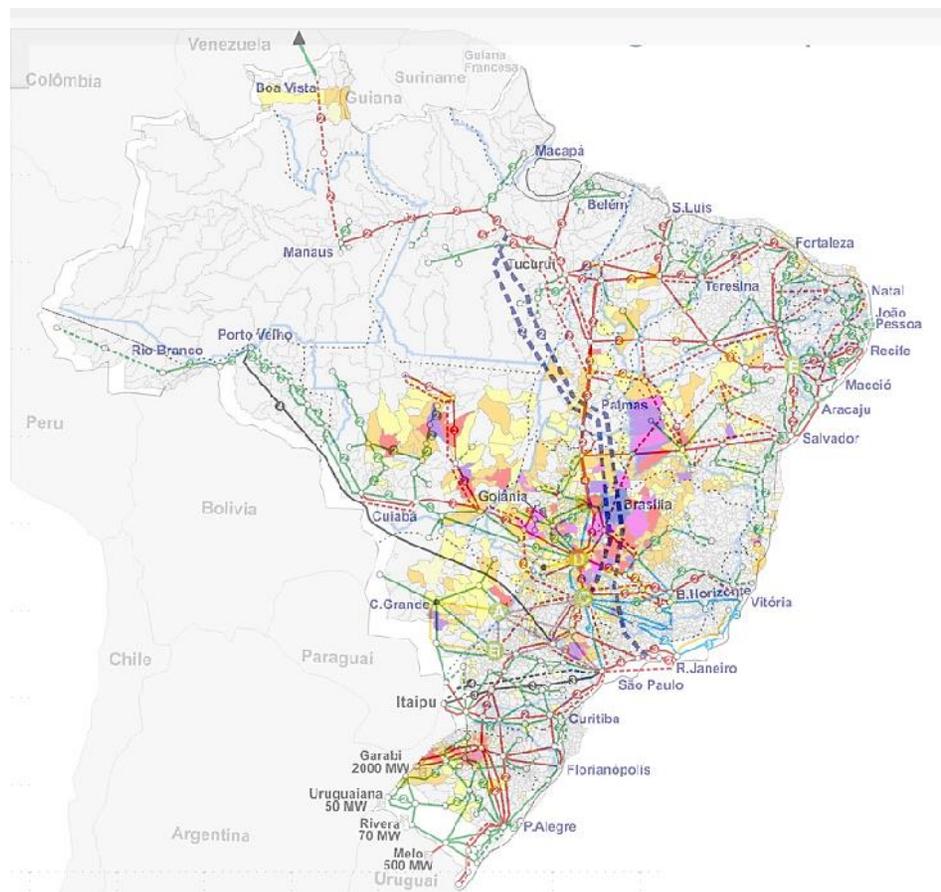
Com base nos mapas combinados, as áreas críticas poderiam ser apontadas como regiões de coincidência entre grande volume de irrigação e incidência de linhas. Destaca-se também que outras áreas críticas contém também sistemas de distribuição com tensões menores, mas ainda na ordem das dezenas de kiloVolts. Para tornar este cenário ainda mais claro, adaptou-se um mapa mesclado dos dois cenários. Este mapa com a sobreposição das linhas e áreas é apresentado na Figura 31. Destaca-se na figura a incidência de cinco áreas de grande concentração de linhas de transmissão sobre áreas de irrigação com pivô central supracitadas. Nestas áreas existe a ocorrência de linhas até de 720kV. Estas regiões são:

- a) Fronteira entre Minas Gerais e Goiás;
- b) Extremo oeste da Bahia;

- c) Fronteira entre São Paulo e Paraná;
- d) Área central do Mato Grosso;
- e) Norte do Rio Grande do Sul.

A partir das informações apresentadas nesta sessão, pode se considerar que a probabilidade de uma linha de alta tensão estar sobre ou muito próxima a um pivô é significativa. O risco em potencial (ainda pouco investigado) considerando a ordem de grandeza das estruturas envolvidas é real.

Figura 31 - Mapa mesclado - linhas de transmissão e áreas de irrigação.



Fonte: Do autor (2018).

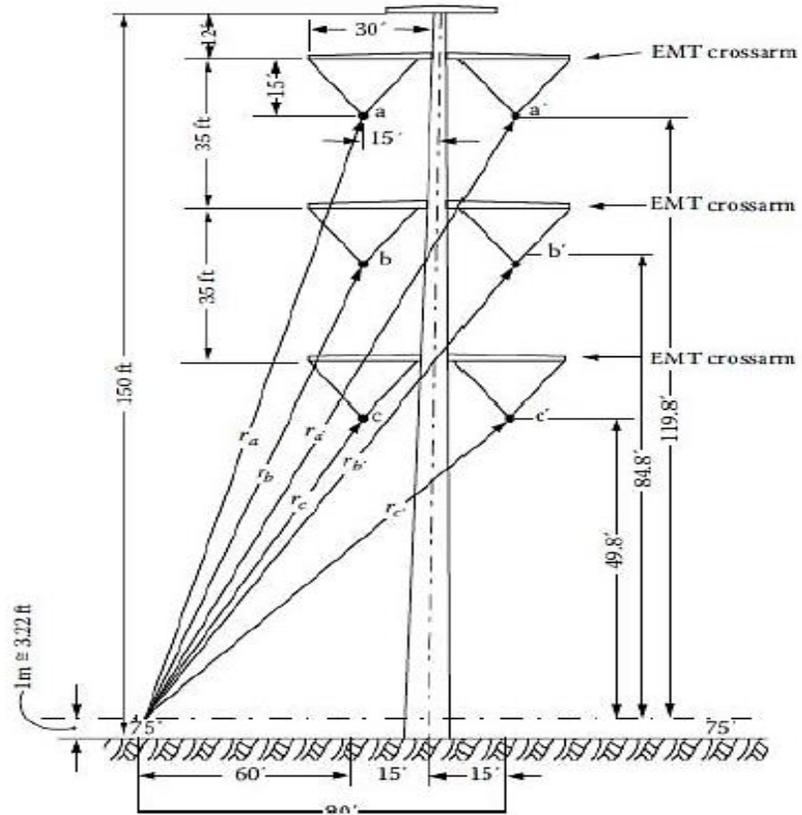
5.2 Efeitos de campo elétrico e magnético nas proximidades de linhas de transmissão

Campos elétricos e magnéticos são capazes de induzir efeitos sobre estruturas em função de sua forma, material de composição ou posição em relação à fonte. Sistemas de geração, conversão e transmissão de energia baseiam-se nestes efeitos (HAYT, 2013). Considerando o transporte de grandes quantidades de energia elétrica entre o sistema de geração e o grande centro consumidor, linhas de transmissão carregadas com altos níveis de energia são fontes de campo elétrico e magnéticos intensos, e neste caso podem gerar efeitos indesejados em sua vizinhança (AB GHANI et al., 2014; ANDERSON; HAGENGUTH, 1958; BAENA et al. 2005; HAYT JÚNIOR; BUCK, 2013). Neste contexto, diversos pesquisadores têm investigado os efeitos dos campos de alta intensidade no entorno de linhas de transmissão.

Pesquisadores como Ab Ghani et al. (2014), Amoura e Abu-Elhaija (2011), Engstrom (2004) e Mccauley (1975); investigaram estes efeitos numa abordagem teórica, com base em modelos matemáticos. Em Khayam et al. (2017) realiza-se um estudo do perfil do campo magnético considerando as três fases da linha em 150kV. No estudo são avaliados diversos arranjos de condutores, e observou-se que a estrutura compacta pode reduzir o efeito do campo nas proximidades da linha. O estudo foi baseado em linha de transmissão real, arranjada com os condutores na vertical, conforme apresentado na Figura 32.

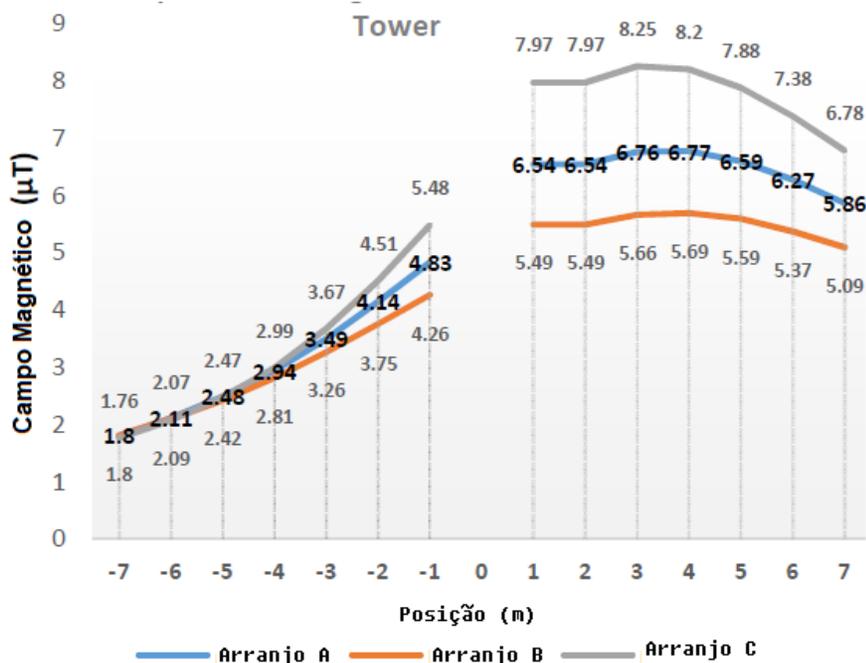
Resultados foram apresentados no formato de perfil, no qual o campo é medido e plotado ao longo do sentido perpendicular à linha, considerando o condutor central como ponto 0. A Figura 33 apresenta este perfil.

Figura 32 - Arranjo de condutores.



Fonte: Khayam et al. (2017).

Figura 33 - Intensidade de campo x Arranjo de condutores.



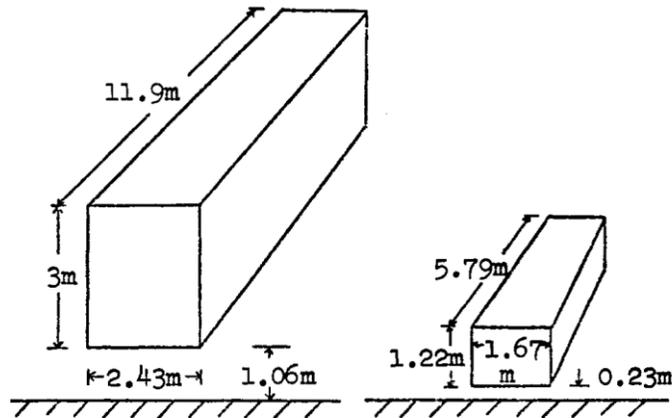
Fonte: Adaptado de Khayam et al. (2017).

O arranjo compacto (B) apresentou-se melhor que o arranjo mais utilizado em linhas de transmissão atuais. Enfatiza-se que o arranjo combinado (C) apresentou-se ainda mais eficiente.

Em Mccauley (1975) são investigados os efeitos capacitivos da linha para com um objeto metálico próximo. Naquela abordagem investiga-se o surgimento das correntes parasitas em carros de passeio e grandes caminhões através da abordagem da capacitância do ar considerando a linha e o objeto. Faz-se no artigo uma aproximação da estrutura metálica próxima à linha de transmissão em estrutura cúbica. Desta forma, através da modelagem dos efeitos capacitivos, é proposto um corolário de fórmulas para calcular a corrente nas

arestas das estrutura. A Figura 34 apresenta a estrutura proposta para um caminhão e um carro.

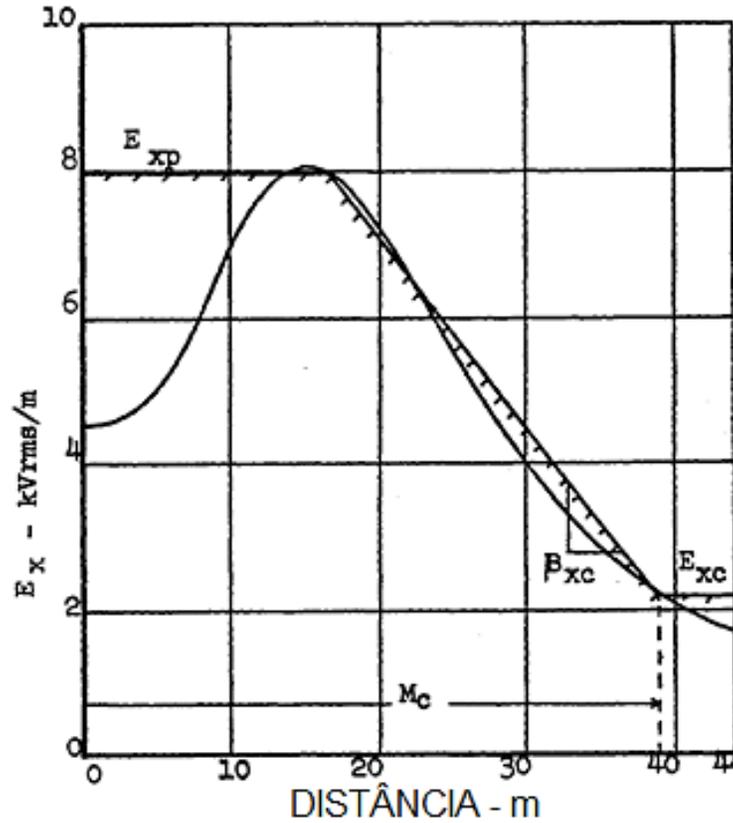
Figura 34 - Estruturas aproximadas para veículos.



Fonte: Adaptado de Mccauley (1975).

Para validação inicial da abordagem, o autor compara resultados da intensidade de campo elétrico gerado por modelo computacional baseado na modelagem clássica (GAMBERALE et al., 1989), comparando-a com o obtido pelo corolário proposto. A Figura 35 apresenta este comparativo.

Figura 35 - Comparativo entre curvas de intensidade de campo.



Fonte: Gamberale et al. (1989).

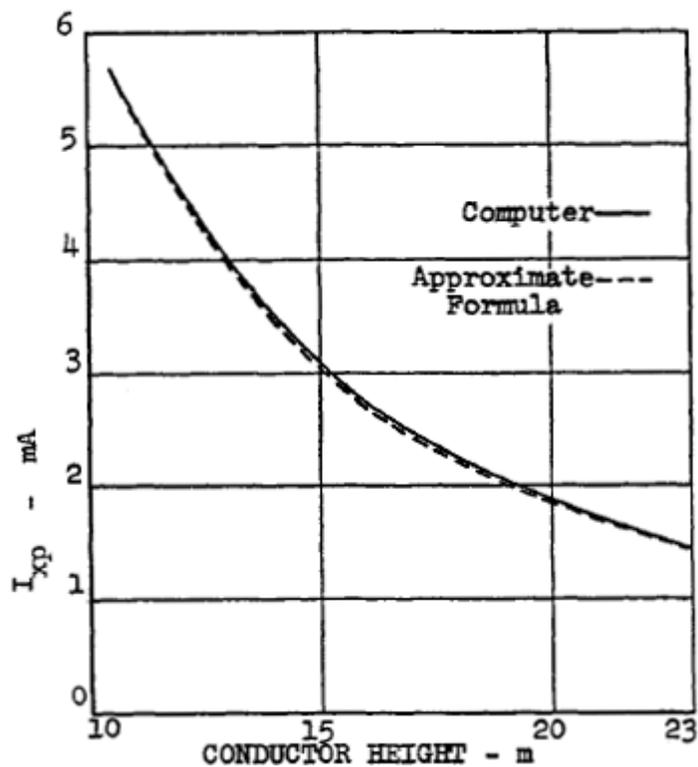
Para o cálculo da corrente induzida nas arestas da estrutura, utilizou-se a equação apresentada a seguir:

$$I_{xp} = a(kV) \times V_{p.u.} \times \sqrt{S} \times H^{-b} (mA) \quad (2)$$

Onde a e b são constantes (tabeladas), $V_{p.u.}$ é o valor da tensão da linha (por unidade), S é a separação entre os condutores das três fases da linha em metros e H é a altura da linha em metros. Através desta abordagem previamente

validada, foram apresentados perfis de corrente induzida em função de fatores variados. Esta metodologia parcialmente validada é importante ferramenta para compreensão e modelagem do acoplamento. A Figura 36 apresenta o perfil de corrente induzida em função da altura do condutor.

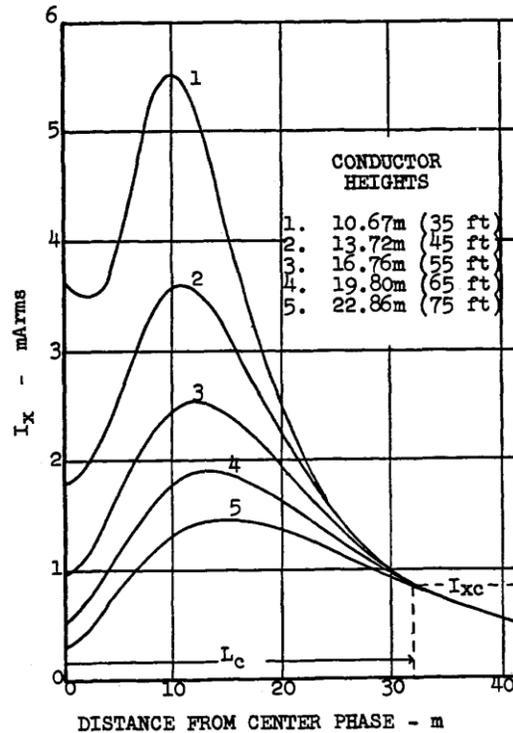
Figura 36 - Corrente em função da altura da estrutura.



Fonte: Adaptado de Mccauley (1975).

Enfatiza-se na figura o decaimento que ocorre de forma logarítmica com o aumento da altura do condutor. Outro perfil relevante é o da corrente em função da distância da linha, que é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Corrente induzida em função da distância ao condutor.



Fonte: Adaptado de Mccauley (1975).

Outras avaliações são realizadas em Mccauley (1975), como o perfil da corrente induzida em função da bitola dos condutores, e considerações a respeito da semelhança entre o modelo computacional e a versão simplificada.

Em Tortelli (2009), assim como em Mccauley (1975) considera-se a condutância e capacitância para modelar o acoplamento entre linhas de transmissão de alta potência e linhas de transmissão de menor porte em Corrente Contínua (CC) e seus conversores associados. Na abordagem proposta, considera-se as impedâncias complexas dos condutores da linha AC (Z_s) e da linha CC (Z_m), apresentadas na Equação 3:

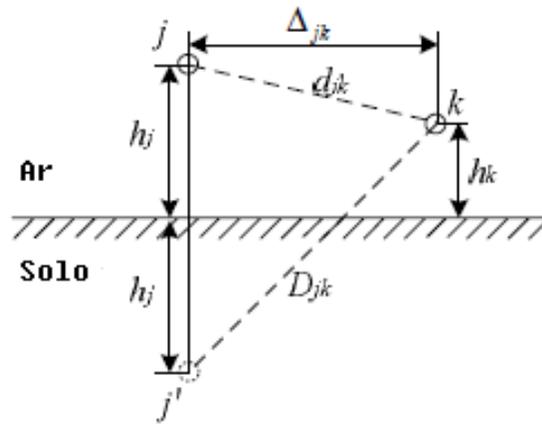
$$Z_s = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h+p)}{r},$$

$$Z_m = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_j + h_k + 2p)^2 + \Delta_{jk}^2}}{\sqrt{(h_j - h_k)^2 + \Delta_{jk}^2}}, \quad (3)$$

onde, ω_s é a frequência angular de oscilação da corrente, μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, h é a altura do condutor em relação ao solo, r é o raio (bitola) do condutor, h_j, h_k e Δ_{jk} são apresentados na Figura 38, e p é um operador complexo apresentado na Equação 4.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}}, \quad (4)$$

Figura 38 - Referência para modelo de acoplamento.



Fonte: Tortelli (2009).

Em Tortelli (2009) investiga-se o efeito da corrente induzida pela linha AC na linha DC, que é apresentada na Equação 5, sobre os equipamentos

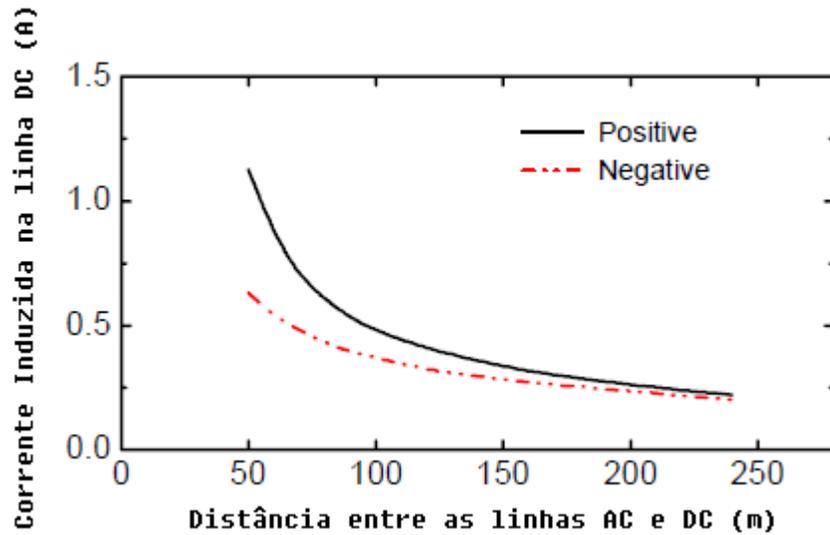
inversores da linha DC. Esta corrente oscilante deforma a corrente alternada gerada, criando sobre ela o componente fundamental apresentado na Equação 6:

$$i_a' = i_a + \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{ind} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{ind} \left[\cos(2\theta t + \varphi) - \frac{1}{5} \cos(4\theta t - \varphi) - \dots \right]. \quad (5)$$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{ind} \cos \varphi. \quad (6)$$

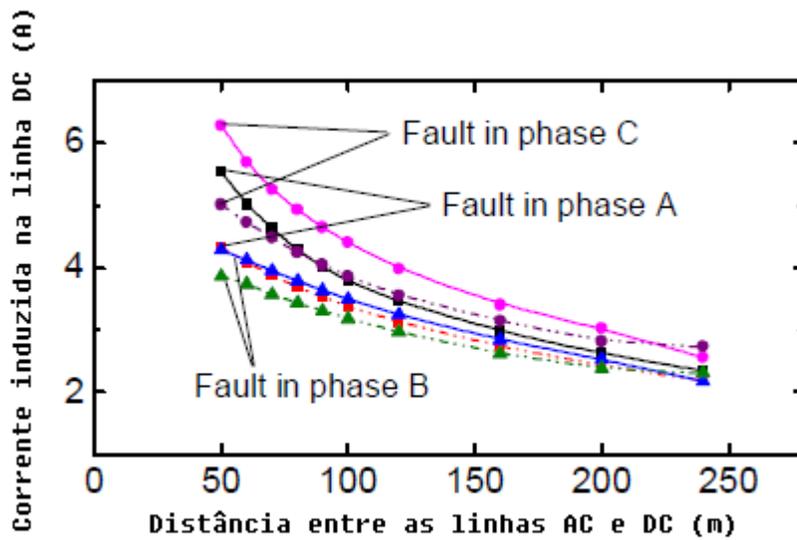
Onde θ é o ângulo de defasamento entre as componentes e φ o ângulo instantâneo na rede AC. Finalmente, simulações computacionais são realizadas para avaliar o alcance do efeito em função da distância até a linha. Este resultado é apresentado na Figura 39. Outro resultado relevante apresentado em Tortelli (2009), é o efeito desta corrente induzida em função de falhas nas fases A, B e C. Falhas em fases podem ser causadas por rompimentos na linha em outros pontos ou problemas ou desligamento nas unidades de geração. Observa-se na Figura 40 que quando a fase C entra em falha, potencializa-se o efeito da indução, o que aumenta a corrente induzida.

Figura 39 - Influência do fator distância na corrente induzida em linha próxima.



Fonte: Adaptado de Tortelli (2009).

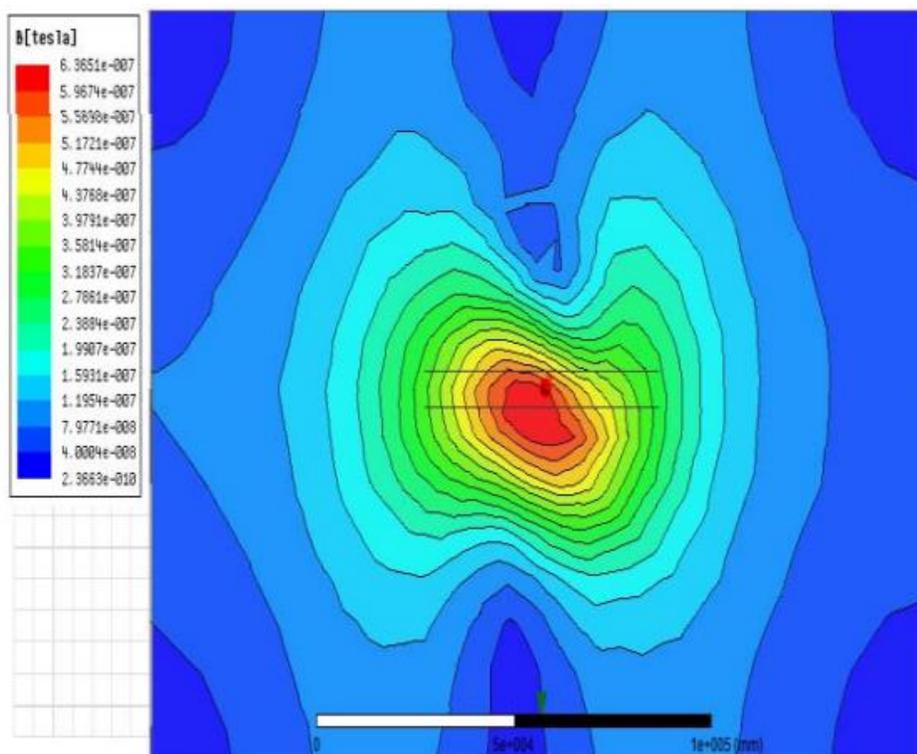
Figura 40 - Influência de cada fase na corrente induzida em linha próxima.



Fonte: Adaptado de Tortelli (2009).

Em Ab Ghani et al. (2014) a abordagem teórica baseia-se no método de elementos finitos para calcular a intensidade de campo magnético nas vizinhanças de linhas de transmissão. São considerados também efeitos sobre seres humanos após longo regime de exposição. A Figura 41 apresenta a distribuição de campo simulada sob uma linha de 132kV.

Figura 41 - Distribuição de campo magnético em torno de uma linha de 132kV.

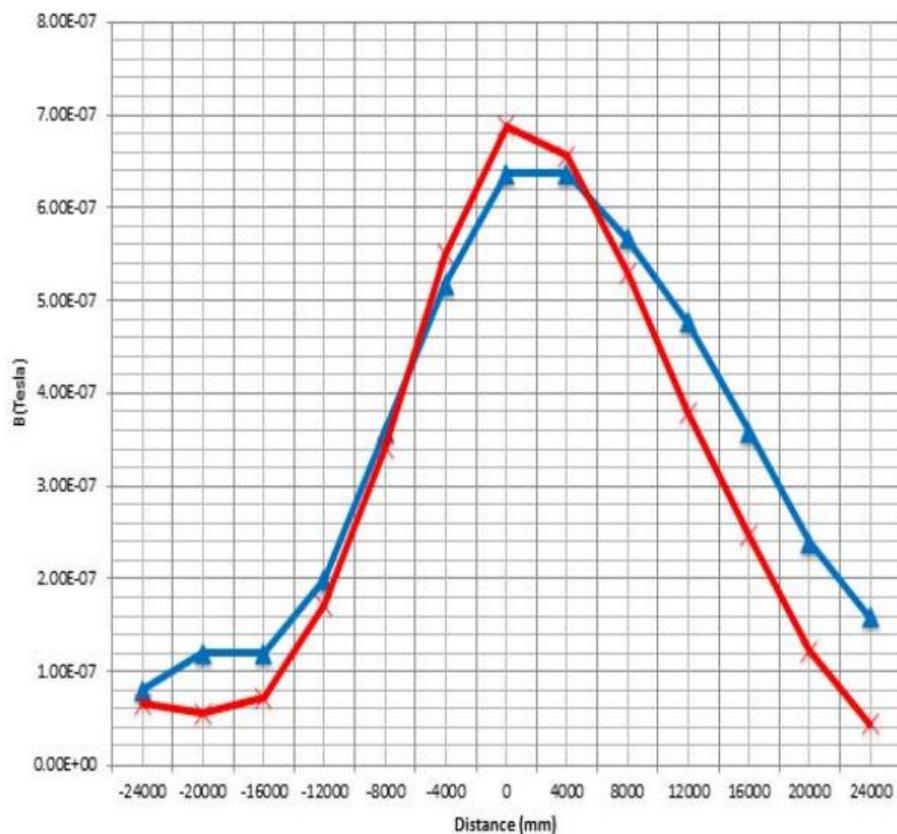


Fonte: Ab Ghani et al. (2014).

Emprega-se no artigo o uso de software específico, e é apresentada validação com base em dados reais do perfil do campo magnético sob uma linha real presente na UTeM - Malásia.

A Figura 42 apresenta os perfis simulados (em azul e real em vermelho). Cita-se no artigo uma correlação de 97,8% entre as duas curvas.

Figura 42 - Perfis de campo magnético simulados (ANSI) e real.

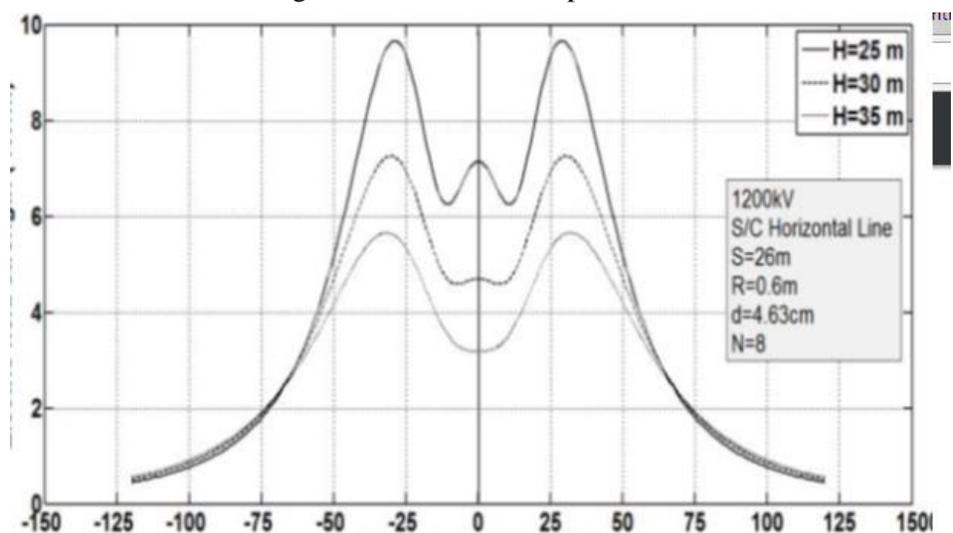


Fonte: Ab Ghani et al. (2014).

Estudos avaliando o perfil de campos são eficazes pois possibilitam validar modelos computacionais de forma completa, apresentando amostras da intensidade em diversos pontos do espaço. Outro estudo com esta característica é apresentado em (UNDE; KUSHARE, 2013), onde se estuda o perfil dos campos elétricos e magnéticos no entorno de uma linha com tensão peculiarmente alta de

1200kV. Outra característica do estudo são comparações entre a intensidade do campo elétrico em diferentes alturas em relação ao solo. A Figura 43 apresenta este comparativo.

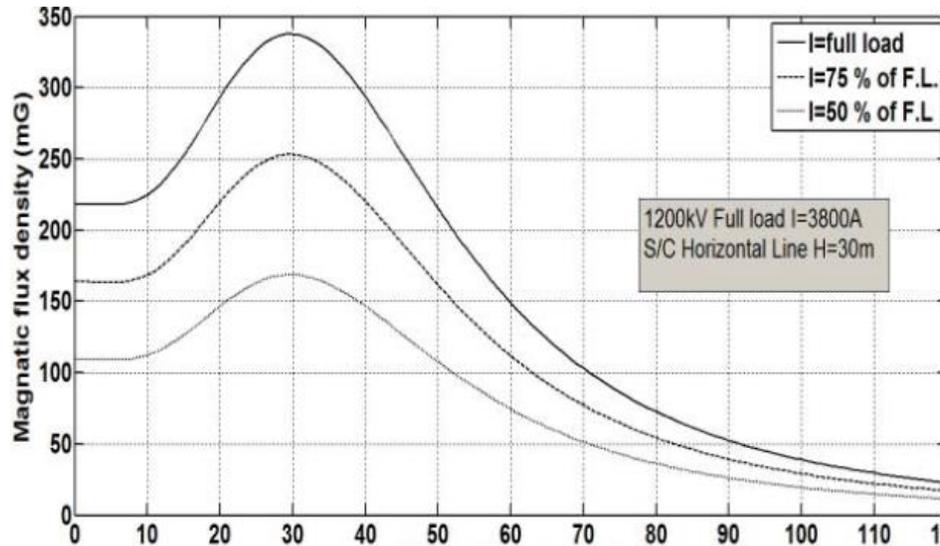
Figura 43 – Perfil do campo elétrico.



Fonte: Adaptado de Unde e Kushare (2013).

Apresenta-se também no artigo (UNDE; KUSHARE, 2013) o perfil do campo magnético considerando diferentes intensidades de corrente. A Figura 44 apresenta o perfil obtido para o campo magnético.

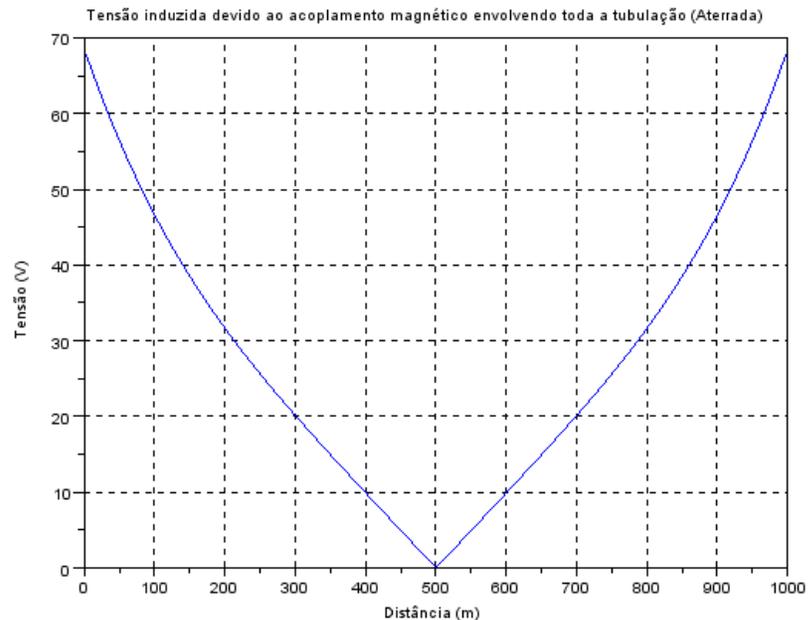
Figura 44 – Perfil do campo magnético sob uma torre com linha de 1200kv.



Fonte: Adaptado de Unde e Kushare (2013).

Outro estudo realizado em Oliveira, Medeiros Júnior e Pires (2012) apresenta também uma abordagem diferente da modelagem clássica apresentada em Hayt Júnior e Buck (2013) e Sadiku (2004). Neste artigo, modela-se a tensão induzida sobre tubulações de gás próximas à linhas subterrâneas de 69kV considerando o potencial elétrico e as impedâncias complexas do solo entre as duas estruturas. Nesta abordagem, o modelo torna-se circuitual, e é utilizado para gerar gráficos de distribuição de tensão induzida ao longo da tubulação. Variações de resultado são obtidas quando o aterramento é posicionado em diferentes pontos da tubulação, entretanto nenhuma delas torna o efeito nulo. A Figura 45 apresenta o perfil de tensão induzida considerando as duas extremidades da tubulação aterradas.

Figura 45 – Perfil das tensões induzidas sobre tubulação próximas às L.T.



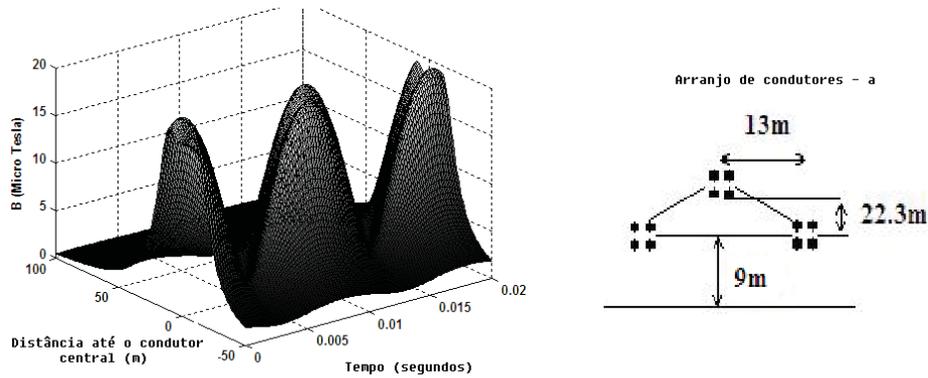
Fonte: Oliveira, Medeiros Júnior e Pires (2012).

Ressalta-se na figura que as tensões induzidas apresentam-se altas mesmo com as extremidades da tubulação aterrada. Ainda em Oliveira, Medeiros Júnior e Pires (2012), outras simulações com a tubulação aterrada de forma mais precária (aterrada à esquerda e isolada à direita) podem apresentar tensão induzida de até 400V sobre uma tubulação de 1000m.

Em Amoura e Abu-Elhajja (2011) uma abordagem diferenciada considera os efeitos gerados pela variação senoidal da tensão nas três fases de forma combinada, i.e., propõe-se que a interação entre as três fases gera fluxo variante no tempo, o que possivelmente potencializa a indução de corrente. No artigo, simulações são realizadas para diversos arranjos de condutores na estrutura, e o perfil é plotado também considerando o fator Tempo. Para um

arranjo de circuito único associado de forma triangular, tem-se o padrão apresentado na Figura 46.

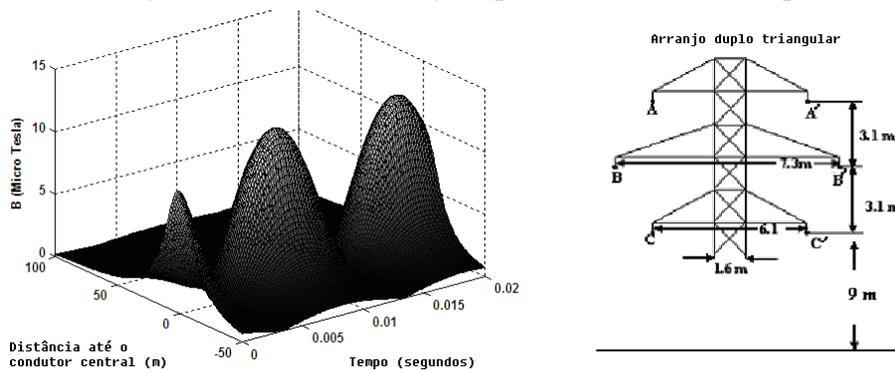
Figura 46 – Efeitos do arranjo triangular sobre o campo magnético.



Fonte: Adaptado de Amoura e Abu-Elhaja (2011).

Outro arranjo investigado é o com circuito duplo trifásico, cujo padrão é apresentado na Figura 47.

Figura 47 – Efeito do arranjo duplo trifásico sobre o campo.

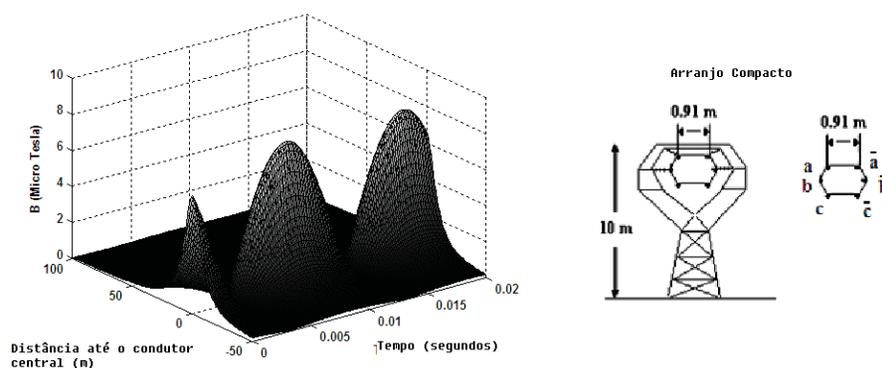


Fonte: Adaptado de Amoura e Abu-Elhaja (2011).

Observa-se na figura a menor incidência de picos de campo ao longo do tempo e espaço simulado, se comparado à simulação com a distribuição simples. Enfatiza-se que a intensidade dos picos ocorridos é menor.

Finalmente simulou-se o efeito da distribuição do campo magnético no arranjo compacto, onde os condutores localizam-se mais próximos. A Figura 48 apresenta os resultados.

Figura 48 – Efeito do arranjo compacto sobre o campo magnético.



Fonte: Adaptado de Amoura e Abu-Elhajja (2011).

Ressalta-se maior suavidade na ocorrência dos picos em relação aos perfis anteriores. Neste caso, o arranjo compacto é possivelmente superior aos demais em condições contendo múltiplos circuitos polifásicos (NAZARCIK; MUZIK, 2018). Outro aspecto apresentado em Amoura e Abu-Elhajja (2011) e Nazarcik e Muzik (2018) é que o arranjo dos condutores é fator relevante na intensidade e distribuição dos campos magnéticos nas proximidades da linha. Outras pesquisas como Khayam et al. (2017) e Nazarcik e Muzik (2018) investigam perdas de energia relacionadas à proximidade entre linhas defasadas de forma não convencional.

O cálculo do mecanismo de acoplamento magnético é computacionalmente oneroso quando se considera estruturas complexas nas

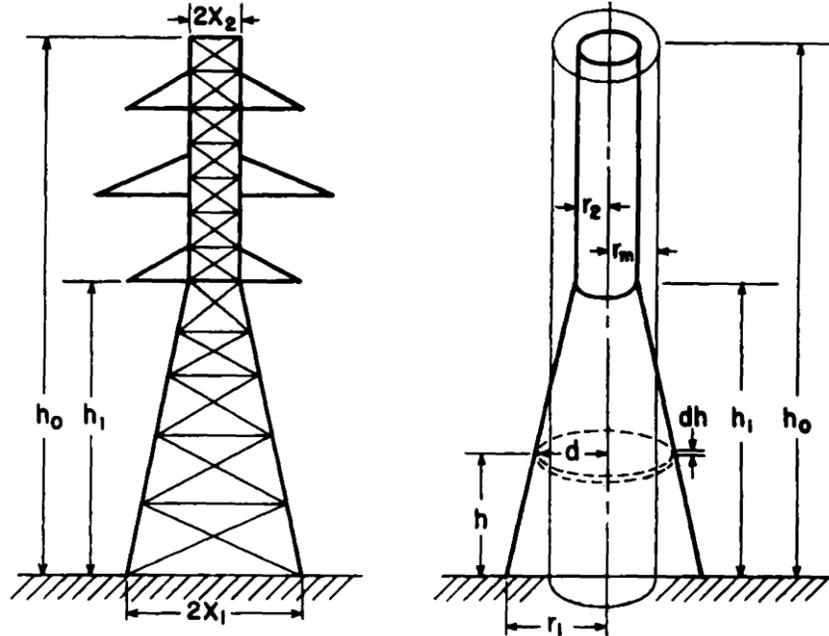
proximidades de campos elétricos e magnéticos intensos Amoura e Abu-Elhaija (2011), Anderson e Hagenguth (1958) e Salam (2006). Nesta condição, pesquisadores como Anderson e Hagenguth (1958) e Baena et al. (2005) têm optado por realizar experimentos em escala, a fim de mensurar valores de grandezas elétricas sobre estruturas, simplificando o processo de modelagem do acoplamento. Em Anderson e Hagenguth (1958) o efeito de correntes de surto nas linhas (possivelmente provenientes de descargas atmosféricas) é investigado utilizando um modelo em escala da torre. A Figura 49 apresenta o modelo desenvolvido. Propõe-se também no artigo o desenvolvido de um medidor de campo baseado em espiras, de forma a baixar o custo. Outra proposta relevante apresentada em Anderson e Hagenguth (1958) é a modelagem simplificada dos parâmetros elétricos da linha de transmissão através da simplificação da mesma como um cilindro isolante. A Figura 50 apresenta a modelagem cilíndrica proposta.

Figura 49 – Modelo em escala de linha de transmissão.



Fonte: Anderson e Hagenguth (1958).

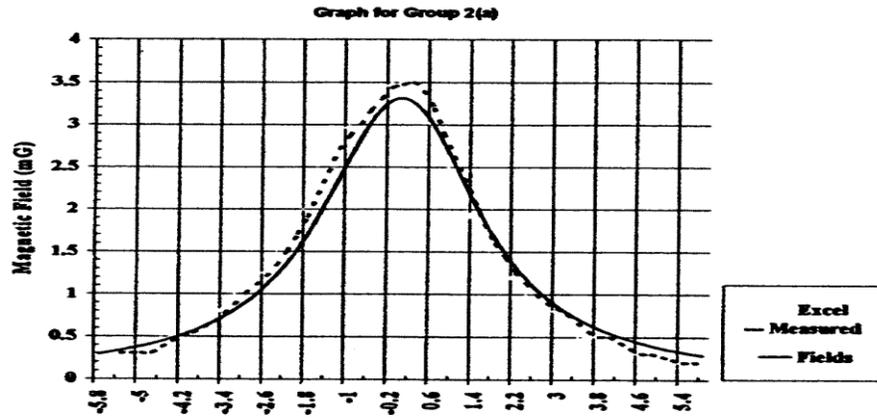
Figura 50 – Modelo cilíndrico equivalente à uma torre em linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de Anderson e Hagenguth (1958).

Outra abordagem de modelos em escala é apresentada em Baena et al. (2005), onde se compara dois modelos matemáticos com os dados colhidos na versão real em escala, e obtêm-se resultados que corroboram com a proposta. A Figura 51 apresenta o comparativo entre os três modelos, proposto em Baena et al. (2005).

Figura 51 - Comparativo entre modelos computacionais e experimento em escala.

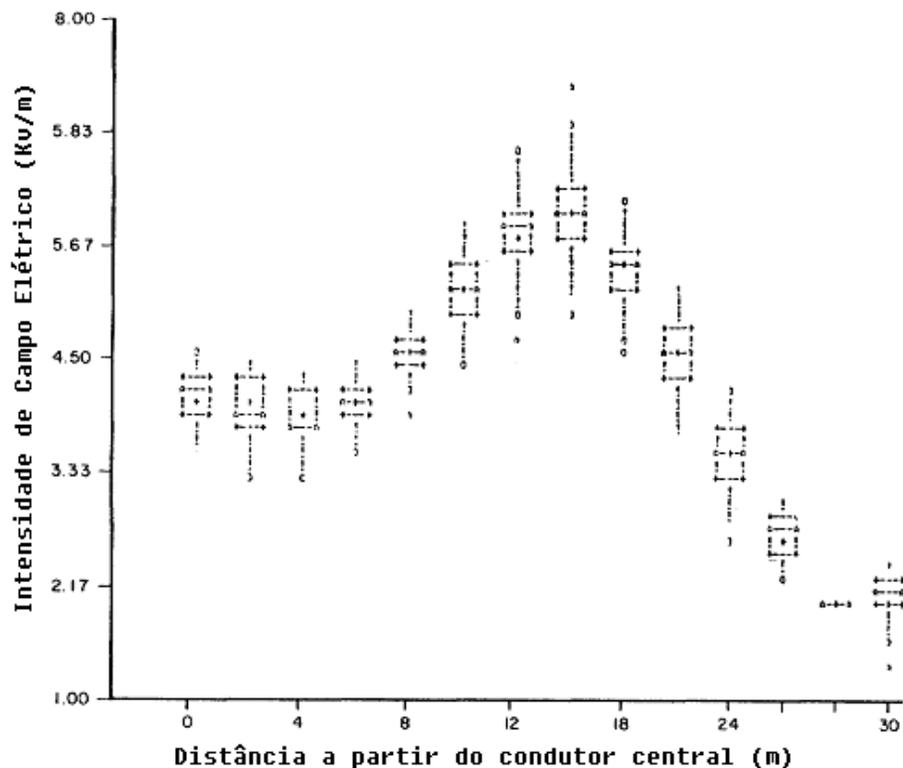


Fonte: Baena et al. (2005).

Enfatiza-se na figura que os modelos possuem resultados similares, e é possível que haja semelhança estatística entre os mesmos.

Em uma abordagem diferenciada, Sendaula et al. (1984) apresenta o uso de métodos estatísticos para avaliar o efeito dos campos nas proximidades das linhas, e como fatores como relevo e disposição dos condutores podem ser influentes. Enfatiza-se que no artigo o autor conta com uma grande base de dados, da qual conclusões estatísticas podem ser tiradas através de ferramentas como cálculo de desvio padrão, teste de hipótese e regressão. A Figura 52 apresenta o diagrama de caixas para a distribuição do campo elétrico nas proximidades de uma linha de transmissão.

Figura 52 – Boxplot da intensidade de campo em função da distância à linha.



Fonte: Adaptado de Sendaula et al. (1984).

Neste escopo a construção de modelos em escala pode ser considerada ferramenta eficiente, em função da simplificação do modelo final do acoplamento, eliminando o custo computacional associado à interação dos campos.

5.3 Normatização e limites toleráveis

Em função da intensidade dos campos envolvidos, a proximidade de linhas de transmissão pode ser potencialmente perigosa para seres humanos. Pesquisas como de Engstrom (2004) afirmam que a influência das linhas sobre

seres humanos pode ser factível e prejudicial quando ocorre exposição diária de algumas horas (caso comum em trabalhadores rurais). Sistemas biológicos são estruturalmente dependentes de reações químicas, sensíveis à concentração ou carga elétrica de certos tipos de moléculas (ENGSTROM, 2004). De forma mais específica, Amoura e Abu-Elhaija (2011) e Salam (2006) detalham efeitos dos campos de alta intensidade em função da frequência de trabalho da linha. A seguir apresenta-se a sumarização dos efeitos:

Faixa de 0Hz a 300Hz (ELF): Alinhamento de dipolos magnéticos (campo maior que 1Tesla) em moléculas associadas ao metabolismo celular, alterações na molaridade celular ou ionização de células. Pode influenciar na transmissão de impulsos elétricos no cérebro, em função do provável surgimento de recombinações de radicais livres causadas pelo dipolo. Influência na comunicação neuronal.

Faixa de 300Mhz a 300Ghz (VHF, UHF, SHF e EHF): Acoplamento direto com moléculas de cadeia longa, provocando aquecimento proporcional à intensidade. Acoplamento com parte estrutural da cadeia de DNA, causando mutações ou alterações no DNA a nível celular, efeito que pode ocasionar tumores.

Na literatura há pesquisas favoráveis (grande maioria), e contrárias (INKIS, 1978) à nocividade dos efeitos dos campos gerados por ELF (*Extreme Low Frequency*), por outro lado os efeitos de aquecimento causados pela absorção de sinais de frequências altas EHF (*Extreme High Frequency*) são fato científico comprovado. Ainda em Salam (2006) são apresentadas normas para valores máximos de campo suportáveis para linhas e transformadores de alta potência próximos a áreas residenciais. Um experimento realizado na Universidade do Cairo comprovou que as medições naquele local estão dentro de parâmetros aceitáveis. Outro aspecto importante do estudo realizado em Salam (2006) é a apresentação de valores máximos toleráveis para intensidade

de campo elétrico e magnético no interior de residências por região, recomendados pela *International Radiation Protection Association (IRPA)*. A Tabela 4 apresenta uma síntese dos dados, além das fontes que embasaram o uso do valor referencial.

Tabela 4 – Valores Máximos Toleráveis IRPA.

Valores máximos toleráveis			
Campo Elétrico [kV/m] (rms)			
	Zona Residencial	Áreas Públicas	Base da norma
Rep. Checa	15		P,H
Alemanha	20,7	20,7	J
Polônia	20,15	10,1	P,H
Reino Unido	12,3	12,3	I
Rússia	25		J
Europa (leste)	30	10,5	P,H
Campo Magnético [mT] (rms)			
Alemanha	5	5	J
Reino Unido	2	2	I
Rússia	7,5		W
Europa (leste)	25,5	1,01	J

Fonte: Salam (2006).

Nota: G: Norma técnica. H: Experimental – efeitos sobre humanos. I: Experimental – indução de correntes nocivas. J: Experimental – indução de correntes nocivas. P: Experimental – Limite para ocorrência de centelhamento. W: Normas técnicas – blindagem de equipamentos.

Enfatiza-se na tabela as grandes variações para os diferentes países ou regiões. Tais variações (mesmo em valores baseados em normas ou experimentos) são dependentes de normas governamentais de cada região. Ressalta-se que normas distintas entre si dificultam o desenvolvimento e padronização de equipamentos ou estruturas relacionadas a SEP ou outros que produzem campo elétrico / magnético em suas proximidades, pois cada região possui seus critérios específicos. Por exemplo, certos tipos de blindagem para

equipamentos podem ser aceitáveis em certos países e não recomendadas em outros.

Os campos eletromagnéticos interagem com o corpo humano de diversos modos. Em baixas frequências há efeitos sobre nervos e músculos, e em altas frequências o aquecimento através do acoplamento com moléculas de água pode causar efeitos desestabilizados ou até mesmo cancerígenos (GABRIEL et al., 1999). Em sua pesquisa Salam (2006) apresentou um dos primeiros estudos aprofundados sobre normas relacionadas aos limites máximos aceitáveis para exposição a estes campos. Neste artigo são comparadas valores limiares entre normas de diferentes países relacionadas ao tema. No artigo foram comparados valores máximos de campo elétrico e magnético aceitáveis para *European Comitee for Electrotechincal Standardization (CENELEC)*, *International Radiation Protection Association (IRPA)*, *Comission of the European Union (CEU)*. Faz-se naquele artigo uma comparação entre as normas com objetivo de avaliar falhas nas mesmas. A Tabela 5 apresenta valores máximos permissíveis por norma para trabalhadores nas proximidades de linhas de transmissão. Na tabela são apresentados diversos parâmetros indiretos relacionados à intensidade de campo.

Tabela 5 – Limites máximos de Exposição – Quadro Geral.

Limites máximos de exposição			
	Norma / Padrão		
Parâmetro – Frequências de 50 e 60Hz	CENELEC	IRPA	CEU
Corrente induzida máxima – cabeça e tronco [mA/m^2]	10	10	10
Intensidade de campo elétrico máxima suportada [kV/m]	10	10	19,6; 12,3; 6,1
Densidade máxima de fluxo magnético suportada [mT]	1,6	0,5	0,64; 0,4; 0,2
Corrente de contato máxima [mA]	3,5		1,5
Parâmetro – Altas frequências	CENELEC	IRPA	CEU
	$1.0 \times 10^4 - 3,0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^7 - 3,0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^5 - 3.0 \times 10^{11}$
Faixa de frequência [Hz]			
Taxa máxima de absorção específica (SAR – 6 min)	0,4	0,4	0,4
Corpo inteiro,	20	20	20
Braços e Pernas	10	10	10
Absorção máxima frequência (pico) [mJ/Kg]	10		10
Corrente de contato máxima [mA]	35	50	50

Fonte: Salam (2006).

Nota: CENELEC – Comitê Europeu de Normalização Electrotécnica, CEN – Comitê Europeu de Normalização.

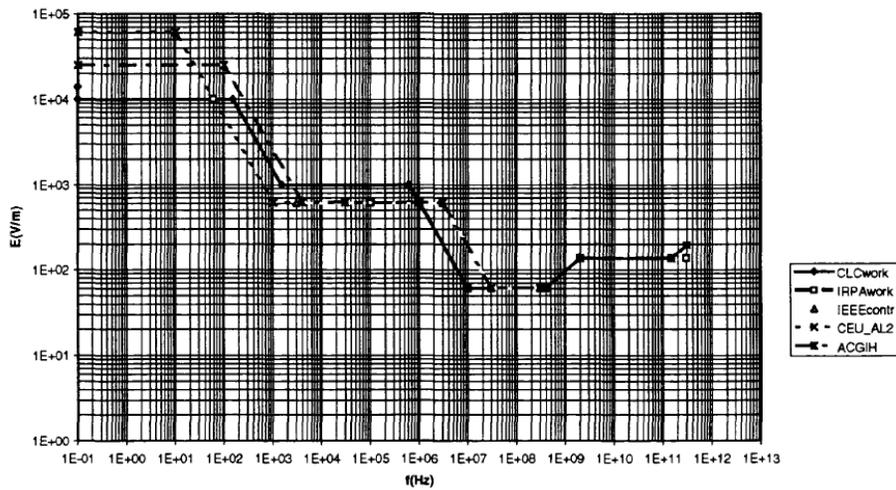
Na Tabela 5, há diferenças entre as recomendações. Tais diferenças podem estar associadas à dificuldade de parametrizar os experimentos relacionados ao levantamento destes limiares.

Finalmente, em Salam (2006) são citados os limites propostos nas normas IEEE644 (GRID-ON..., 2018), onde os valores limiares para exposição de trabalhadores nas proximidades na linha são $15\mu T$ para campo magnético e $1kV/m$ para campo elétrico.

Outro comparativo relevante apresentado em Kunsch (1996) relaciona as normas Europeias com a faixa de frequência da radiação. Este comparativo torna-se importante considerando que diferentes frequências interferem de formas diferentes no corpo humano. A Figura 53 apresenta a síntese para

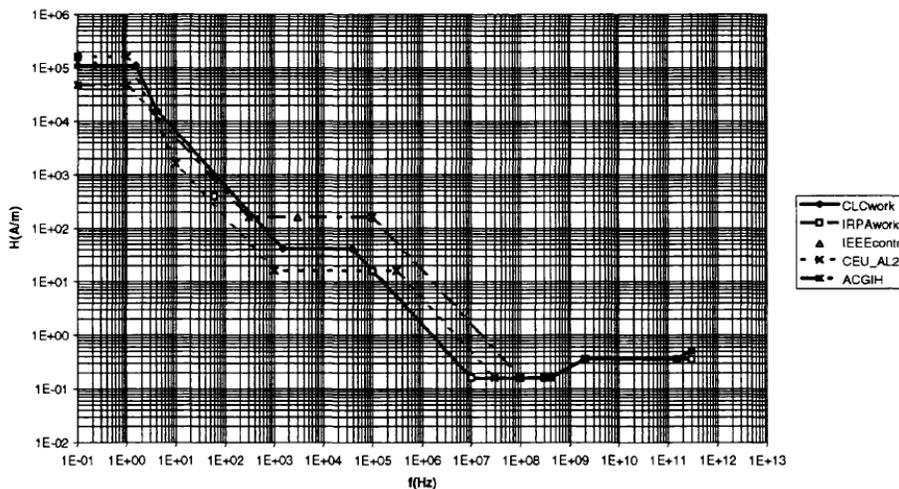
intensidade de campo elétrico, a Figura 54 para campo magnético e a Figura 55 para corrente induzida no corpo humano, considerando sua resistência característica.

Figura 53- Limites para intensidade de Campo Elétrico x Frequência.



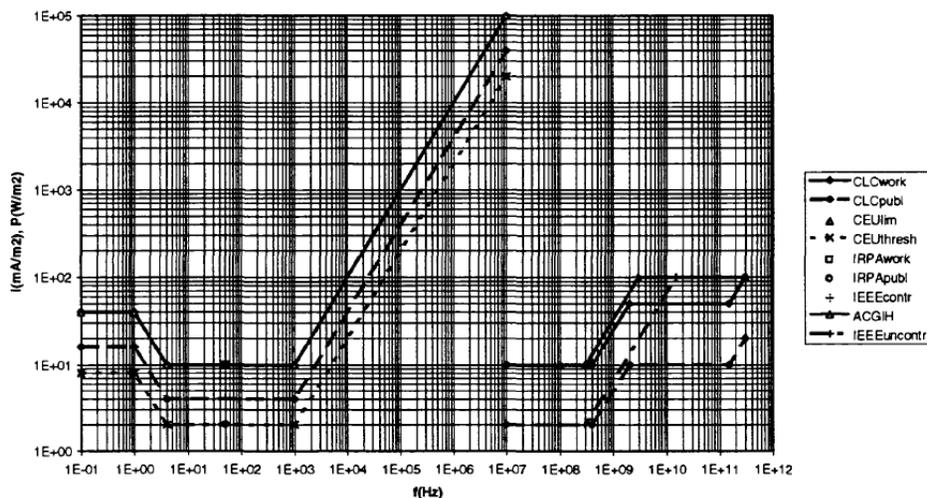
Fonte: Adaptado de Kunsch (1996).

Figura 54 – Limites para a intensidade de Campo Magnético x Frequência.



Fonte: Adaptado de Kunsch (1996).

Figura 55 - Limites para a intensidade de Corrente Induzida no Corpo x Frequência.

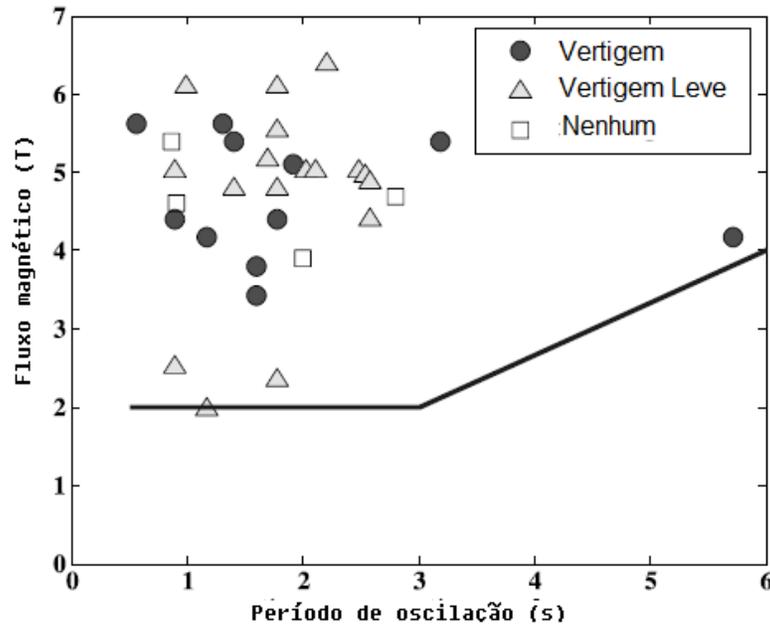


Fonte: Adaptado de Kunsch (1996).

Apresentou-se nesta seção as principais sínteses das Normas Europeias, tais normas são a referência mundial em termos de radiação em ELF, sendo empregadas em diversos países até mesmo fora da Europa (KUNSCH, 1996). Outros países como os Estados Unidos, utilizam-se referências normativas próprias. Com base nas normas e procedimentos americanos, em Equipamento Co. das Energias Hidráulicas de Foshan Xin Yi (2017) foi apresentado um referencial para efeitos de campos elétricos e magnéticos para radiações com oscilação na ordem de 1Hz. O autor cita que na presença de campos intensos, oscilantes no tempo ou não, pode surgir outro fator de risco além dos efeitos sobre o corpo humano ou estruturas estáticas. Cita-se que a movimentação de estruturas metálicas contendo formas fechadas na presença de campos de grande intensidade pode potencializar o surgimento de correntes induzidas, uma vez que se varia o fluxo na espira alterando-se a posição da estrutura. Em função disto, a norma propõe restrições à exposição de trabalhadores, mesmo em condições de fluxo magnético contínuo. As informações coletadas no estudo são sintetizadas

em um gráfico, que também contém os efeitos no caso de exposição a valores que infrinjam esta norma. Este gráfico é apresentado na Figura 56.

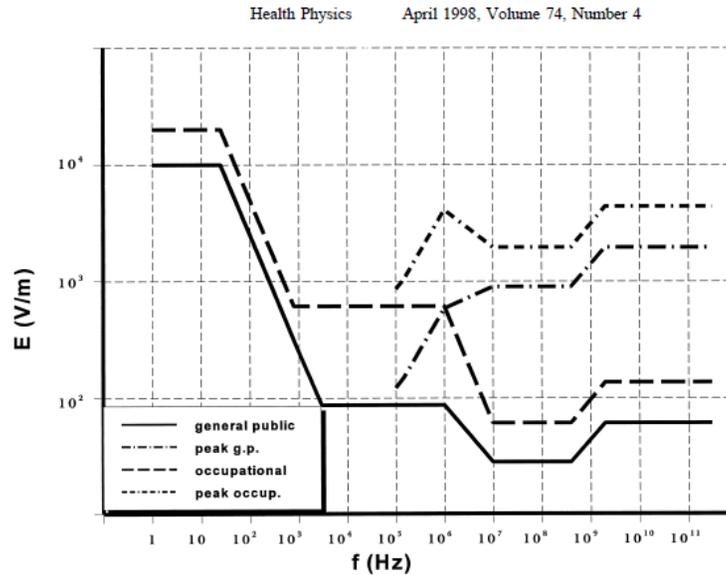
Figura 56 – Efeitos de campos magnéticos sobre o corpo humano.



Fonte: Equipamento Co. das Energias Hidráulicas de Foshan Xin Yi (2017).

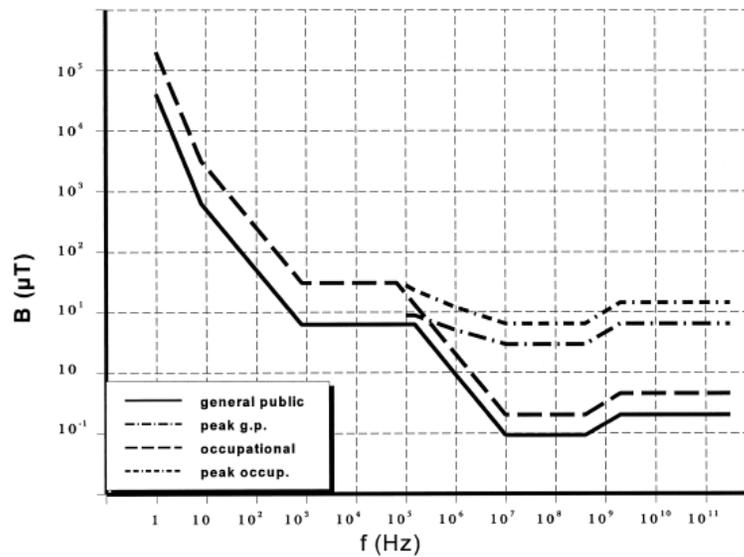
Outro trabalho similar é apresentado em Energy Efficiency & Renewable Energy (2018), de mesma autoria de Equipamento Co. das Energias Hidráulicas de Foshan Xin Yi (2017), onde o autor apresenta normas mais amplas em termos de frequência de oscilação. A norma é sintetizada para intensidade de campo elétrico (FIGURA 57), intensidade de campo magnético (FIGURA 58) e efeitos de corrente induzida no corpo humano (FIGURA 59).

Figura 57 – Limites toleráveis para Campo Magnético para diferentes públicos.



Fonte: Adaptado de Energy Efficiency & Renewable Energy (2018).

Figura 58 – Limites para intensidade de Campo Magnético x Frequência da linha.



Fonte: Adaptado de Energy Efficiency & Renewable Energy (2018).

Figura 59 – Sumarização dos efeitos sobre o corpo humano.

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4	—
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	—
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

^aNote:

1. f as indicated in the frequency range column.
2. Provided that basic restrictions are met and adverse indirect effects can be excluded, field strength values can be exceeded.
3. For frequencies between 100 kHz and 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , and B^2 are to be averaged over any 6-min period.
4. For peak values at frequencies up to 100 kHz see Table 4, note 3.
5. For peak values at frequencies exceeding 100 kHz see Figs. 1 and 2. Between 100 kHz and 10 MHz, peak values for the field strengths are obtained by interpolation from the 1.5-fold peak at 100 kHz to the 32-fold peak at 10 MHz. For frequencies exceeding 10 MHz it is suggested that the peak equivalent plane wave power density, as averaged over the pulse width does not exceed 1,000 times the S_{eq} restrictions, or that the field strength does not exceed 32 times the field strength exposure levels given in the table.
6. For frequencies exceeding 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , and B^2 are to be averaged over any $68/f^{1.05}$ -min period (f in GHz).
7. No E-field value is provided for frequencies <1 Hz, which are effectively static electric fields. perception of surface electric charges will not occur at field strengths less than 25 kV m^{-1} . Spark discharges causing stress or annoyance should be avoided.

Fonte: Adaptado de Energy Efficiency & Renewable Energy (2018).

Figura 60 – Limiares Toleráveis para Corrente de Contato.

Exposure characteristics	Frequency range	Maximum contact current (mA)
Occupational exposure	up to 2.5 kHz	1.0
	2.5–100 kHz	$0.4f$
	100 kHz–110 MHz	40
General public exposure	up to 2.5 kHz	0.5
	2.5–100 kHz	$0.2f$
	100 kHz–110 MHz	20

^a f is the frequency in kHz.

Fonte: Adaptado de Energy Efficiency & Renewable Energy (2018).

5.4 Normatização no Brasil

5.4.1 Exposição

No Brasil, existem duas principais fontes de normatização referenciais, a norma NBR 5422 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1985), e a resolução ANEEL N°398 de 23 de março de 2010 (SALAM, 2006). Existem certas diferenças entre as duas, e estas serão apresentadas nesta sessão. Primeiramente será abordada a NBR 5422 (ABNT, 1985). Nesta norma são apresentados os valores máximos toleráveis para exposição divididos por grupos, apresentados a seguir:

População Ocupacional: São trabalhadores adultos que ocasionalmente trabalhem nas proximidades da linha. As populações ocupacionais expostas a condições conhecidas e preestabelecidas, devem ser treinadas convenientemente para exercer de forma adequada as suas atividades. O valor de referência para exposição ocupacional corresponde a campos que gerem densidades de corrente inferiores a **10 mA/m²**, adotando-se um fator de segurança igual a 10 .

Público em Geral: O público em geral é constituído por pessoas de todas as faixas etárias e principalmente em condições distintas de saúde. Na maioria dos casos, este público não tem consciência de sua exposição aos campos elétricos e magnéticos. Assim, adota-se valores de referência mais conservadores em relação à população ocupacional. O valor de referência para o público em geral corresponde a campos com densidades de corrente inferiores a **2 mA/m²**, adotando-se um fator de segurança igual a 50. Observa-se similaridade à norma europeia em relação ao parâmetro de intensidade de corrente por área.

Além deste critério distinto por público, são apresentados os limites para a intensidade de campo elétrico e magnético para as duas frequências de operação da rede de transmissão. A Tabela 6 apresenta os valores referenciais.

Tabela 6 – Limites Toleráveis – Norma NBR 5422.

Frequência	50 Hz		60 Hz	
	Elétrico (kV/m)	Magnético (μ T)	Elétrico (kV/m)	Magnético (μ T)
População	10	500	8,3	416,5
Ocupacional				
Público em Geral	5	100	4,16	83,3

Fonte: ABNT (1985).

Ressalta-se que segundo a norma, os valores acima são considerados em caso de exposição contínua aos campos, diferentemente das normas europeias. Na norma também são apresentados procedimentos e protocolos de medição com o objetivo de limitar a exposição de profissionais que operam nas proximidades da linha.

Outros aspectos técnicos apresentados na norma dizem respeito ao procedimento de medição, bem como a calibração dos instrumentos. Quanto ao procedimento de medição ou realização de atividades nas proximidades de linhas ou outras fontes de campo, os itens abaixo devem ser checados a fim de evitar riscos:

- a) Verificar as fontes elétricas existentes no ambiente de medição;
- b) Verificar os tipos e locais dos transformadores a serem medidos;
- c) Conhecer a localização de cabos principais e disjuntores;
- d) Conhecer a magnitude da voltagem de suprimento dos equipamentos envolvidos, e períodos máximos de uso;
- e) Conhecer as frequências de trabalho (incluindo 0 Hz), da alimentação da potência e dispositivos elétricos;

- f) Checar a localização de pessoas relacionadas às fontes de campo conhecidas;
- g) Checar a localização da medição relacionada ao corpo humano, como cabeça, tronco, região pélvica;
- h) Verificar se há presença de qualquer motor ou gerador;
- i) Verificar se há presença de pequenos aquecedores.

Além das recomendações gerais, a norma também apresenta um conjunto de instruções relacionadas à diferentes tipos de medições de campo elétrico e magnético. Cada método de medição é associado à natureza da variável medida.

De forma complementar à norma NBR apresentada em (ABNT, 1985), existe outro referencial no Brasil que é a resolução ANEEL N°398 de 23 de março de 2010 (ANEEL, 2010). Esta resolução refere-se exclusivamente aos limites de exposição humana a campos elétricos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, além de outras instruções. A Tabela 7 apresenta os valores dispostos nesta resolução.

Tabela 7 – Limites Toleráveis – resolução ANEEL 398.

	Instalações em 50 Hz		Instalações em 60 Hz	
	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)
Público em Geral	5	200	4,17	200,00
População Ocupacional	10	1000,00	8,33	1000,00

Fonte: ABNT (1985).

Também são apresentados os limites de exposição para campos invariantes no tempo, isto é, frequência de 0Hz, geradas por ímãs permanentes,

eletroímãs ou circuitos em corrente contínua. Estas informações são sintetizadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites Toleráveis resolução ANEEL 398 – 0Hz.

	Campo Magnético (μT)		Campo
	Cabeça e tronco	Braços e pernas	Elétrico (kV/m)
Público em Geral	353.000,00	118.000,00	5,00
População Ocupacional	353.000,00	353.000,00	20,00

Fonte: ABNT (1985).

Em termos de normatização nacional, enfatiza-se que há diferenças sutis entre a normatização ABNT (ABNT, 1985) e a resolução ANEEL (SALAM, 2006). Há maior tolerância na resolução ANEEL para a intensidade de campo magnético, para os dois públicos. A Tabela 9 apresenta os valores considerando somente transmissão em 60Hz.

Tabela 9 – Sumarização dos limites ANEEL x NBR.

	Intensidade de Campo Magnético (μT)	Intensidade de Campo Elétrico (kV/m)
Público em Geral (ANEEL)	200	4,17
População Ocupacional (ANEEL)	1000	8,33
Público em Geral (ABNT)	83,3	4,16
População Ocupacional (ABNT)	416,5	8,3

Fonte: ABNT (1985).

Enfatiza-se a maior tolerância na resolução ANEEL para a intensidade de campo magnético, para os dois públicos. Finalmente, além dos limiares apresentados, a resolução ANEEL também apresenta a normatização para diferentes tipos de medições. Nesta normatização, são indicados os tipos de equipamento de medição, sensor utilizado, forma de captura dos dados. A sumarização da recomendação é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo das recomendações NBR5422.

Meta	Recomendação – Norma NBR 5422					
	Medidor		Sensor		Datalogger Interno	Software de aquisição
	Eixo único	Três Eixos	Bobina	Hall		
A	Caracterização pontual de níveis de campo magnético	X	X	X	X	NÃO NÃO
B	Levantamento da distribuição espacial do campo magnético	X		X		NÃO SIM
C	Caracterização da variação temporal	X	X	X		SIM NÃO
D	Caracterização da exposição a campo magnético ponderado no tempo	X	X		X	SIM NÃO
E	Caracterização da intermitência dos campos magnéticos	X			X	SIM NÃO
F	Detecção de valores excedentes ao limite recomendado	X		X		SIM NÃO
G	Caracterização da disposição espectral do campo magnético	X		X		NÃO SIM(*)
H	Caracterização da polarização do campo magnético	X	X	X		SIM SIM
I	Caracterização da exposição em partes específicas do corpo humano		X		X	SIM NÃO

Fonte: ABNT (1985).

5.4.2 Ocupação de áreas nas proximidades da linha

Em CEMIG (2005) é apresentado um material normativo específico para uso do solo ou posicionamento de estruturas em áreas próximas à linha de transmissão. Neste material, são definidos os critérios e formas de ocupação segura em áreas próximas às linhas de transmissão. Na norma, são apresentados conceitos preliminares ao entendimento das recomendações. Tais conceitos são apresentados a seguir.

Faixa de passagem: É a faixa de terra ao longo do eixo da linha, ou seja, abaixo dos condutores no sentido da linha. Em termos de propriedade, a

faixa de passagem pode ser de posse do órgão ou entidade proprietária da linha (faixa de domínio), ou ainda de posse do proprietário original da terra, porém com restrições em seu uso (faixa de servidão). Independentemente do proprietário, ao longo da linha deve ser mantida a faixa de segurança, que garante livre acesso à manutenção e garante margem de segurança.

Faixa paralela: É uma faixa imaginária aérea que projeta-se ao solo na qual não devem haver árvores (ou galhos) de grande porte ou outros objetos que possam alcançar a linha em caso de tombamento ou movimento.

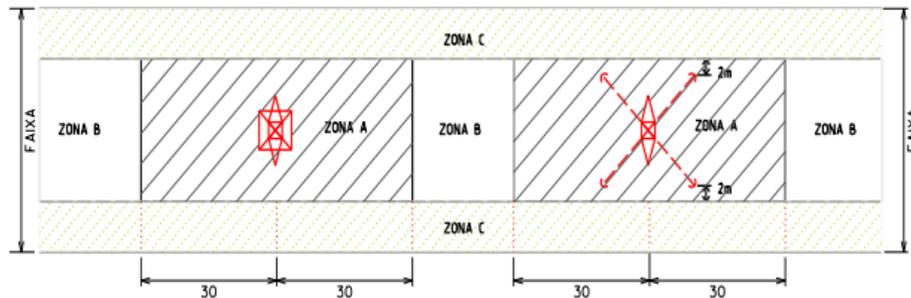
Outra definição relevante em CEMIG (2005) são as estratificações dentro da faixa de segurança.

Zona A: É a área retangular na qual nenhuma edificação ou benfeitoria é permitida. Esta se localiza entorno dos suportes das torres de sustentação, tal distância visa segurança e garantir acesso à torre em caso de manutenção. Esta área sobrepõe-se à faixa de passagem na ocorrência de obstáculos próximos.

Zona B e C: Área terrestre próxima à faixa de segurança na qual a CEMIG deve ser consultada em caso de benfeitoria.

A Figura 61 apresenta as áreas e zonas supracitadas.

Figura 61 - Zonas referenciais para atividades próximas à Linhas de Transmissão.



Fonte: Adaptado de CEMIG (2005).

As larguras das faixas apresentadas na figura são apresentadas na Tabela 11.

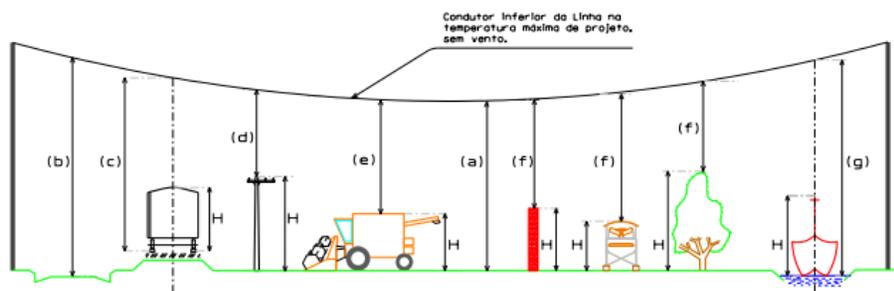
Tabela 11 – Largura de faixa de servidão – CEMIG.

Largura da faixa de servidão em metros (L)							
ZONA	L = 16	L = 20	L = 23	L = 28	L = 38	L = 50	L = 60
A	10	12	14	18	23	30	40
B	10	12	14	18	23	30	40
C	3	4	4,5	5	7	10	15

Fonte: CEMIG (2005).

Em caso de ocorrência de estrutura dentro da faixa de passagem, em CEMIG (2005) também são apresentados os limites de segurança vertical para diferentes tipos de objetos. A Figura 62 e a Tabela 12 apresentam estes valores.

Figura 62 – Limites de altura de objetos sob a flecha na linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de CEMIG (2005).

Tabela 12 – Caracterização dos obstáculos.

96

(continua)

Índice de distância	Natureza do obstáculo	Tensão nominal (kV)						
		34,5	69	138	161	230	345	500
	Locais acessíveis apenas a pedestres	6,00	6,00	6,34	6,48	6,89	7,59	8,53
(a)	Locais onde circulam máquinas agrícolas com altura inferior a 3,5 metros	6,50	6,50	6,84	6,98	7,39	8,09	9,03
	Cultura de café (solo) – máquinas agrícolas com altura inferior a 5 metros	8,00	8,00	8,34	8,48	8,89	9,59	10,53
(b)	Rodovias, ruas e avenidas	8,00	8,00	8,34	8,48	8,89	9,59	10,53
	Ferrovias não eletrificadas ou não eletrificáveis	9,00	9,00	9,34	9,48	9,89	10,59	11,53
®	Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,00	12,00	12,34	12,48	12,89	13,59	14,53
	Linhas de energia elétrica – Para-raios e RDs até 34,5 kV	H+1,20	H+1,20	H+1,54	H+1,68	H+2,09	H+2,79	H+3,73
(d)	Linhas de telecomunicações	H+1,80	H+1,80	H+2,14	H+2,28	H+2,69	H+3,39	H+4,33
	Suporte de linhas pertencentes à ferrovia	H+4,00	H+4,00	H+4,34	H+4,48	H+4,89	H+5,59	H+6,53
®	Veículos rodoviários, ferroviários e máquinas com altura superior a 5 metros	H+3,00	H+3,00	H+3,34	H+3,48	H+3,89	H+4,59	H+5,53

Tabela 12 – Caracterização dos obstáculos.

(conclusão)

Índice de distância	Natureza do obstáculo	Tensão nominal (kV)						
		34,5	69	138	161	230	345	500
	Muros	H+6,00	H+6,00	H+6,34	H+6,48	H+6,89	H+7,59	H+8,53
(f)	Instalações transportadoras	H+3,00	H+3,00	H+3,34	H+3,48	H+3,89	H+4,59	H+5,53
	Mata de preservação permanente e pomares (cultura adulta – topo da vegetação)	H+4,00	H+4,00	H+4,34	H+4,48	H+4,89	H+5,59	H+6,53
(g)	Águas navegáveis	H+2,00	H+2,00	H+2,34	H+2,48	H+2,89	H+3,59	H+4,53
	Águas não navegáveis	6,00	6,00	6,34	6,48	6,89	7,59	8,53

Fonte: Adaptado de CEMIG (2005).

No contexto agrícola, cita-se em CEMIG (2005) que as seguintes culturas são proibidas na faixa de servidão:

- a) Qualquer cultura sujeita a queimadas, intencionais ou não. Exemplo: cana-de-açúcar;
- b) Plantações que utilizam espaldeiras ou outros tipos de suporte metálico para o seu crescimento;
- c) Plantações que impeçam a inspeção e manutenção das linhas de distribuição e de Transmissão;
- d) Árvore de grande porte e rápido crescimento. Exemplo: pinus, eucalipto, etc.
- e) Irrigação com jato de água que possa atingir os componentes da linha ou aproximar-se de cabos e isoladores além das distâncias mínimas de segurança:
 - Pivô de irrigação;
 - Não será permitido o trânsito ou a utilização de maquinário de grande porte dentro da faixa de segurança das Linhas, tais como colheitadeiras de café, cana-de-açúcar, etc., exceto em travessias e se atendidas as condições da Tabela 12.

Também cita-se que são proibidas também suportes ou estruturas metálicas. Para culturas diferentes das enquadradas no item a, de acordo com CEMIG (2005) devem ser seguidas as normas a seguir:

- a) Não serão permitidas queimadas nas proximidades da linha;
- b) Cultivos de pomares devem restringir-se a culturas com até 3,5m;
- c) Máquinas de cultivo, colheita ou circulação não devem extrapolar as alturas apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Limites toleráveis para obstáculos – CEMIG.

Índice de distância	Natureza do obstáculo na condição de cabo rompido	Distância
(i)	Locais acessíveis apenas a pedestres	2,80
(j)	Locais onde circulam máquinas agrícolas	4,30
(k)	Linhas de telecomunicações	H+0,60
(l)	Linhas de energia elétrica até 187 kV	H+1,20
(m)	Linhas de energia elétrica superior a 230 kV	H+1,61
(n)	Muros	H+2,80
(o)	Rodovias, ruas e avenidas	4,30
(p)	Ferrovias não eletrificadas (4)	6,70
(q)	Águas navegáveis	H + 0,80
®	Águas não navegáveis	4,30

Fonte: CEMIG (2005).

Na Tabela, o parâmetro **H** é a altura máxima referencial, que neste contexto é 3,5m.

A intensidade de campos elétricos e magnéticos nas proximidades da linha de transmissão pode causar efeitos adversos em pessoas ou estruturas. Observa-se na literatura que ainda não existe um senso comum em relação aos efeitos destes campos. Como apresentado neste capítulo, boa parte dos artigos e normas considera a nocividade dos efeitos, mesmo não havendo estudos precisos, e em contrapartida, outros como (INKIS, 1978) negam a nocividade destas linhas e enfatizam que nenhuma pesquisa que comprove a nocividade em longo prazo foi executada. Enfatiza-se que a inexistência de pesquisas isolando diversos fatores seriam a ferramenta mais eficiente para verificar tais efeitos, entretanto, questões de custo e logística impediram a execução de experimentos deste tipo.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

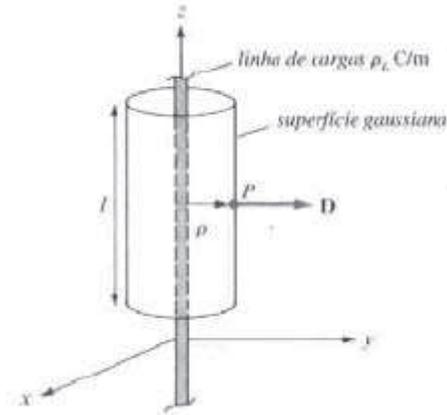
6.1 Efeitos do Campo elétrico sobre pivôs de irrigação

Em Sadiku (2004) apresenta-se múltiplas abordagens para modelagem do campo elétrico. A seguir são apresentados aspectos relevantes a esta pesquisa. Linhas de transmissão são compostas essencialmente por condutores elétricos, desta forma, considera-se um condutor como uma linha de carga infinita, no qual o campo elétrico \mathbf{E} a uma distância ρ da linha pode ser calculado por:

$$E = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} \quad (7)$$

Onde o campo elétrico é dado em Volt/m, ρ_L é a distribuição de carga da linha, e ϵ_0 é a constante dielétrica do vácuo. De forma alternativa, através da lei de Gauss (SADIKU, 2004) a intensidade de campo elétrico em um ponto também pode ser calculada. A lei de Gauss parte da premissa que a carga total distribuída no trecho da linha ρ_L pode ser calculada através da integral do campo sobre uma superfície que envolve a linha (EQUAÇÃO 8), isto é, a integral da superfície envoltória apresentada na Figura 63.

Figura 63 – Superfície envoltória à linha.



Fonte Sadiku (2004).

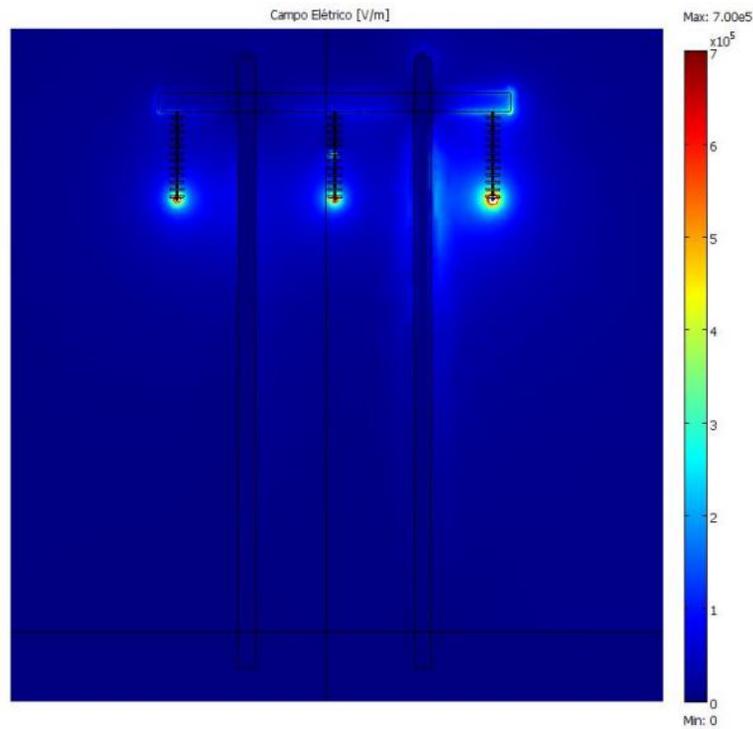
$$\rho_L l = Q = \oint D \cdot dS = D_\rho \oint dS = D_\rho 2\pi\rho l \quad (8)$$

Calculando-se a integral de superfície de forma algébrica, obtém-se:

$$D = \frac{\rho_L}{2\pi\rho} a_\rho \quad (9)$$

onde a densidade de fluxo elétrico é denominada D. Partindo-se da consideração que $E = D/\epsilon_0$ pode-se chegar à intensidade de campo elétrico no ponto com distância ρ da linha. As Equações 7 e 9 expressam a relação linear entre a intensidade de campo e a distância até a linha. Em Ab Ghani et al. (2014) realiza-se simulação da intensidade de campo em torno de uma linha de transmissão, o resultado desta simulação é plotado na Figura 64.

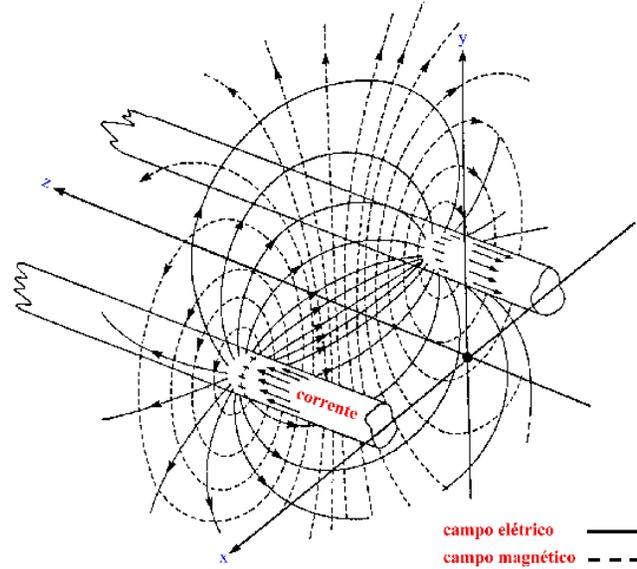
Figura 64 – Intensidade de campo elétrico nas proximidades de uma linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de Ab Ghani et al. (2014).

Em Sadiku (2004) enfatiza-se que as linhas de campo elétrico surgem com orientação axial em relação à linha condutora, conforme apresentado na Figura 65. Na figura também são apresentadas as linhas de campo magnético, estas serão apresentadas na sessão seguinte.

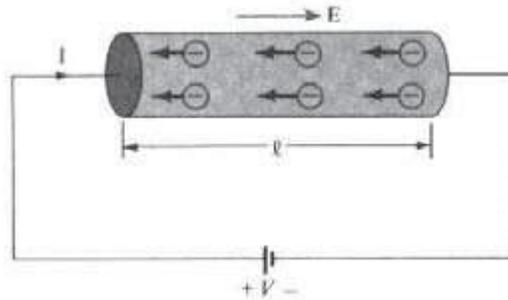
Figura 65 – Propagação dos campos no entorno de um condutor metálico.



Fonte: Adaptado de CEMIG (2005).

A incidência de campo elétrico em meio material altera o equilíbrio eletrostático. Em tubos condutores ocorre a criação de gradiente de potenciais ou mesmo a polarização em função do posicionamento e arranjo com outros tubos condutores (HAYT JÚNIOR; BUCK, 2013). A Figura 66 ilustra o desequilíbrio eletrostático causado por campo elétrico incidente sobre a estrutura.

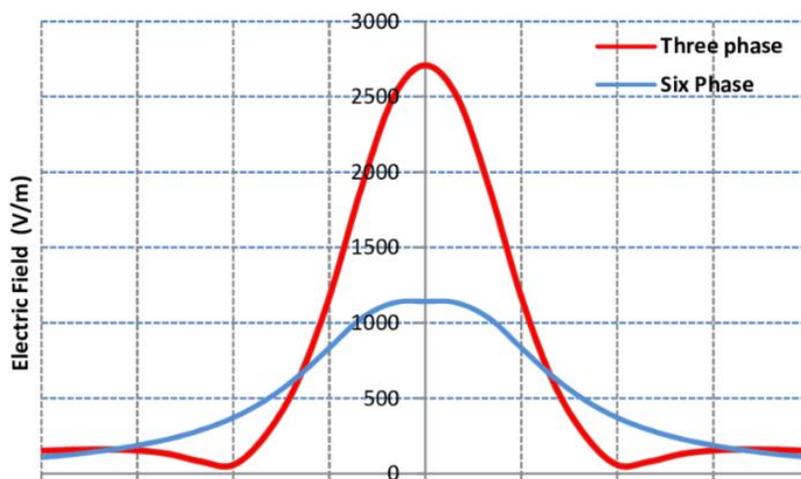
Figura 66 – Desequilíbrio eletrostático causado por campo elétrico.



Fonte: Adaptado de Sadiku (2004).

Em linhas de transmissão reais, o perfil de intensidade de campo elétrico varia no sentido perpendicular à linha, alternando sua intensidade em sincronismo com as oscilações senoidais da corrente que circula na mesma. Por outro lado, mesmo considerando o perfil paralelo à linha, mesmo contendo pontos equidistantes à mesma, podem ser lidas diferentes intensidades de campo elétrico em função do efeito oscilatório da corrente que a percorre (MCCAULEY, 1975). A Figura 67 apresenta o perfil transversal do campo elétrico nas proximidades de linhas de transmissão trifásica e hexafásica.

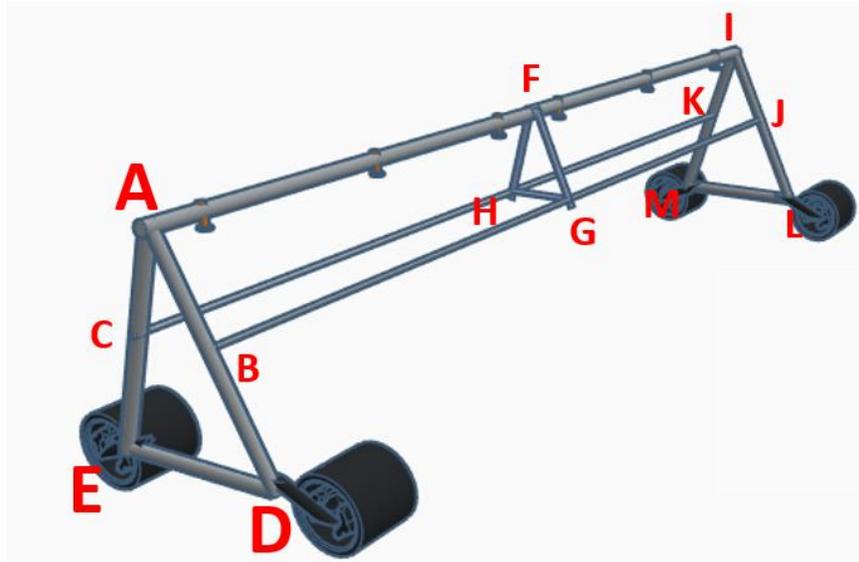
Figura 67 – Perfis de campo elétrico em linhas de transmissão.



Fonte: Adaptado de Radwn e Samy (2016).

No caso de pivôs de irrigação em particular, que possuem movimento giratório, modelar o perfil dos campos envolvidos para cada passo do movimento angular pode ser computacionalmente oneroso. Para a obtenção de uma perspectiva inicial do acoplamento foi desenvolvido um modelo computacional do pivô em 3D, o qual será referencial nas sessões seguintes. Na Figura 68, é apresentada uma versão computacional do pivô, contendo três torres e dois lances de tubulação, na qual os vértices são identificados.

Figura 68 – Pivô referencial em perspectiva.



Fonte: Do autor (2018).

Tomando-se as linhas de campo saindo de forma axial da linha, e incidindo sobre o pivô, podem ser delineadas duas condições de contorno.

Caso 1: Pivô Perpendicular à linha:

Nesta condição, as barras laterais da estrutura (ADG, BEH e CFI) enfatizadas em vermelho estão alinhadas com as linhas de campo. Sobre as mesmas cria-se um gradiente de potenciais eletrostáticos ΔV que decai no sentido da seta. Sendo assim, a diferença de potencial nas barras pode ser calculada através da diferença entre os potenciais das extremidades:

Sendo V_{E1} o potencial elétrico na extremidade E1 dado por:

$$V_{E1} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R_{E1}} \quad (10)$$

e, sendo V_{E2} o potencial na extremidade E2 dado por:

$$V_{E1} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R_{E1}} \quad (11)$$

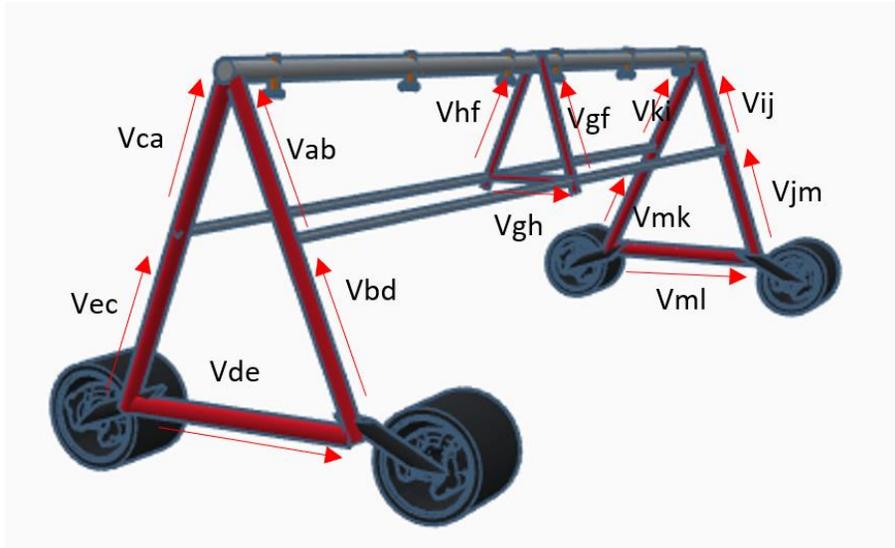
onde r é o diâmetro do condutor da linha, λ é a distribuição de carga considerada na linha e R_{E1} e R_{E2} são as distâncias até as extremidades da barra. Finalmente, a diferença de potencial elétrico ao longo da barra pode ser calculada por:

$$VBARRA = VE1 - VE2 \quad (12)$$

Caso 2: Pivô paralelo à linha:

Nesta condição, todos os pontos das barras laterais estão equidistantes à linha, porém as sobre barras que compõem as estruturas de sustentação será criado gradiente de potencial elétrico. Neste caso, a diferença de potencial em cada barra deve ser calculada separadamente considerando os pontos de conexão. A Figura 69 apresenta os pontos em detalhe.

Figura 69 – Distribuição convencional de corrente no pivô.



Fonte: Do autor (2018).

A partir desta convenção, as diferenças de potencial podem ser calculados por barra através de:

$$V_{Ea} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{R_{Ea}}\right) \quad (13)$$

$$V_{Eb} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{R_{Eb}}\right) \quad (14)$$

$$V_{Ec} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{R_{Ec}}\right) \quad (15)$$

E a partir das tensões nos pontos pode-se calcular a diferença de potencial na barra 1:

$$V_{Ab} = V_{Ea} - V_{Eb} \quad (16)$$

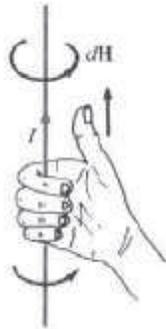
$$V_{Cb} = V_{Ec} - V_{Eb} \quad (17)$$

$$V_{Ca} = V_{Ec} - V_{Ea} \quad (18)$$

6.2 Efeitos do Campo magnético sobre pivôs de irrigação

De acordo com Hayt Júnior e Buck (2013) e Sadiku (2004), o campo magnético surge no entorno de um condutor quando este conduz corrente elétrica. As linhas de campo magnético ocorrem de forma circular, como pode ser verificado pela regra da mão direita na Figura 70. Em Sadiku (2004) apresenta-se a regra da mão direita para inferir o sentido de giro da linha de campo magnético H em função de um condutor com corrente I e sentido conhecido.

Figura 70 – Regra da mão direita.



Fonte: Sadiku (2004).

Desta forma, conhecendo-se a corrente que circula pelo condutor, a lei de Biot-Savat (SADIKU, 2004) pode ser ferramenta para calcular a intensidade de corrente:

$$H = \int_l \frac{Idl \cdot a_g}{4\pi r^2} \quad (19)$$

Nesta equação calcula-se a intensidade de campo H no ponto distante R da linha, onde I é a corrente conduzida pelo condutor de comprimento diferencial dL . Resolvendo-se a integral e tomando a distribuição de corrente como em um condutor retilíneo infinito, tem-se:

$$H = \frac{L}{2\pi\rho} a_{\varphi} \quad (20)$$

onde ρ é a distância do condutor ao ponto onde deseja-se conhecer a intensidade de campo e a_{φ} é a orientação do vetor.

Campos magnéticos possuem mecanismos de acoplamento distintos dos campos elétricos em estruturas por serem de natureza distinta. De forma diferente do desequilíbrio eletrostático causado pelo campo elétrico, campo magnético pode induzir o surgimento força eletromotriz (*f.e.m.*) em parte da estrutura organizada no formato de espira (SADIKU, 2004). Demonstra-se este efeito através da lei de Lenz (HAYT JÚNIOR; BUCK, 2013; SADIKU, 2004), onde considerando-se uma espira (que é um caminho condutor fechado enrolado sobre um ponto central) a força eletromotriz induzida pode ser calculada por:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (21)$$

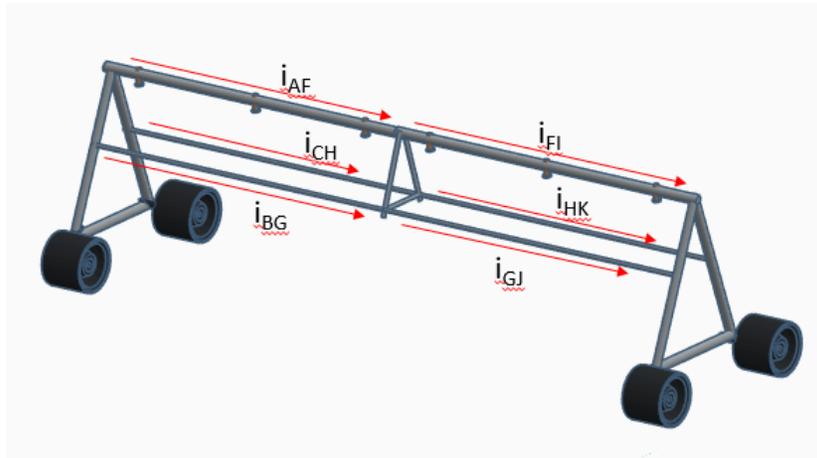
onde Φ_B é o fluxo magnético sobre a área da espira. Enfatiza-se que na ocorrência de múltiplas espiras, a força multiplica-se pela quantidade das mesmas. Neste tipo de acoplamento, o posicionamento da espira em relação às linhas de campo magnético influencia no fluxo total que atravessa a área efetiva da mesma. O fluxo efetivo através de uma espira de área A que pode ser calculado por:

$$\varphi_B = B A \text{sen}(x) \quad (22)$$

onde x é o ângulo entre a linha e o plano da espira. Sendo assim, tomando como referência o modelo de pivô apresentado na Figura 71, fazem-se as seguintes considerações:

As torres de apoio podem ser consideradas, espiras ABC, DEF e GHI de áreas A1, A2 e A3 respectivamente. De mesmo modo, as faces laterais também podem ser consideradas espiras ADEB, DGHE, ADFC e DGIF de áreas AL1, AL2, AL3, AL4 e as faces na base da estrutura CFEB e FIHE de áreas AB1 e AB2. A *f.e.m.* causada pela interação do campo com estas espiras formadas na estrutura induz a circulação de correntes na mesma, sendo essas correntes o objetivo deste estudo. A Figura 72 apresenta a distribuição de correntes na estrutura cujo sentido será convencionado.

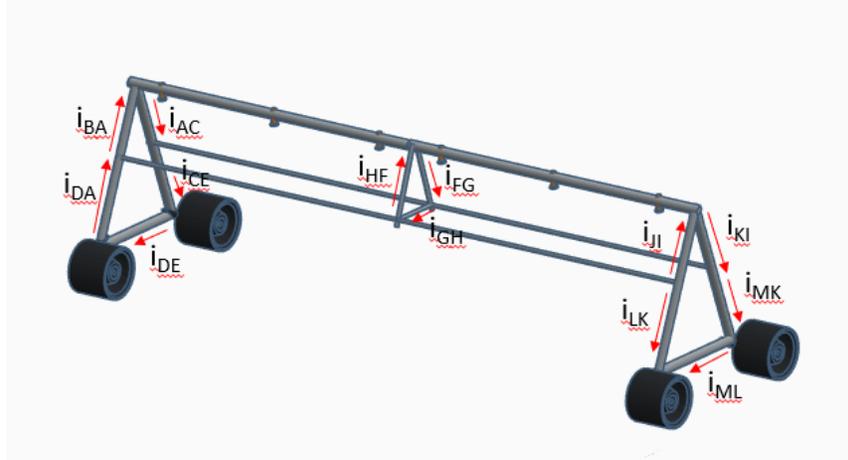
Figura 71 – Correntes Induzidas nas barras laterais.



Fonte: Do autor (2018).

São consideradas as correntes que circulam em todos os ramos da estrutura.

Figura 72 – Corrente induzida nas estruturas de apoio triangulares.

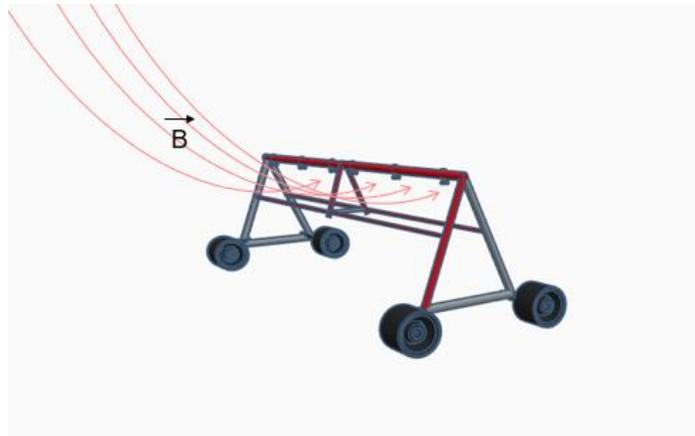


Fonte: Do autor (2018).

Considerando a incidência dos campos e o giro da estrutura, duas condições de contorno em relação ao posicionamento da estrutura podem ser consideradas:

Caso 1: Pivô paralelo à linha

Figura 73 – Linhas de campo na condição paralela à linha.



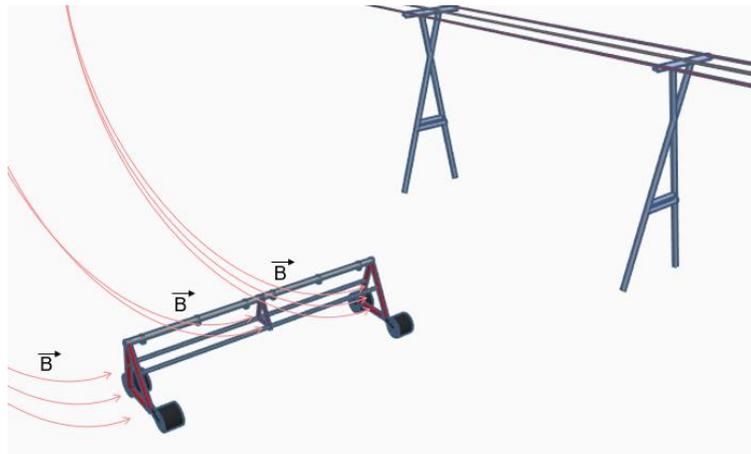
Fonte: Do autor (2018).

Nesta condição de contorno, tem-se que as linhas de campo encontram-se cruzando as áreas laterais AL1, AL2, AL3, AL4 com ângulo de 90° , maximizando o fluxo que atravessa as espiras laterais à estrutura. A Figura 74 ilustra este efeito. Nesta situação, ocorrerá indução máxima de corrente nos tubos que compõem áreas laterais do pivô. Por outro lado as áreas A1, A2 e A3 formam ângulo nulo com as linhas, e sobre as mesmas não há fluxo significativo. Nesta condição, possivelmente as correntes i_a , i_b , i_c , i_d , i_e e i_f serão máximas, e as correntes na espira lateral serão minimizadas.

Caso 2: Pivô perpendicular à linha

Nesta condição, tem-se considerável fluxo magnético cruzando as áreas laterais A1, A2 e A3 com as linhas de campo incidindo de forma perpendicular às mesmas. A Figura 74 apresenta este efeito em detalhe.

Figura 74 – Indução de corrente no pivô perpendicular à linha.



Fonte: Do autor (2018).

Enfatiza-se que haverá fluxo magnético cruzando de forma menos significativa, i.e. com ângulo, raso as espiras formadas pelas estruturas na base.

Através da Equação 21 podem ser calculadas as correntes em cada espira. Em função do maior fluxo, as correntes (**i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7, i8, i9**) que percorrem as espiras laterais serão maiores.

As considerações supracitadas nas condições de contorno foram feitas a partir do princípio que a corrente que circula no condutor é contínua, e o fluxo por consequência também. Deve se considerar o efeito oscilatório (60Hz) que gera alterações no fluxo e interfere também na *f.e.m.* induzida, de acordo com a Equação 22. Em função da complexidade do modelo e de sua dinâmica, torna-se necessário a investigação de métodos alternativos para representar o comportamento do processo.

6.3 Levantamento do Perfil do Campo Magnético Sob uma Linha Real

Inicialmente, observações em campo, sobre linha de transmissão real foram realizadas no trecho próximo ao município de Nepomuceno-MG sob a linha em 345kV com arranjo trifásico que conecta Furnas a Itutinga-MG. No trecho selecionado existe uma estrada local em posição perpendicular à linha. Neste experimento foram realizadas observações em intervalos de 1 metro, totalizando 80 pontos, sendo que estas foram divididas em 40 metros à esquerda e 40 metros à direita. A Figura 75 apresenta a orientação da estrada utilizada como espaço de coleta com a linha com base em imagens em satélite.

Figura 75 – Local escolhido para a coleta de amostras do campo magnético.



Fonte: Google Earth (2018).

A Figura 75 apresenta imagens do procedimento de coleta realizado no local.

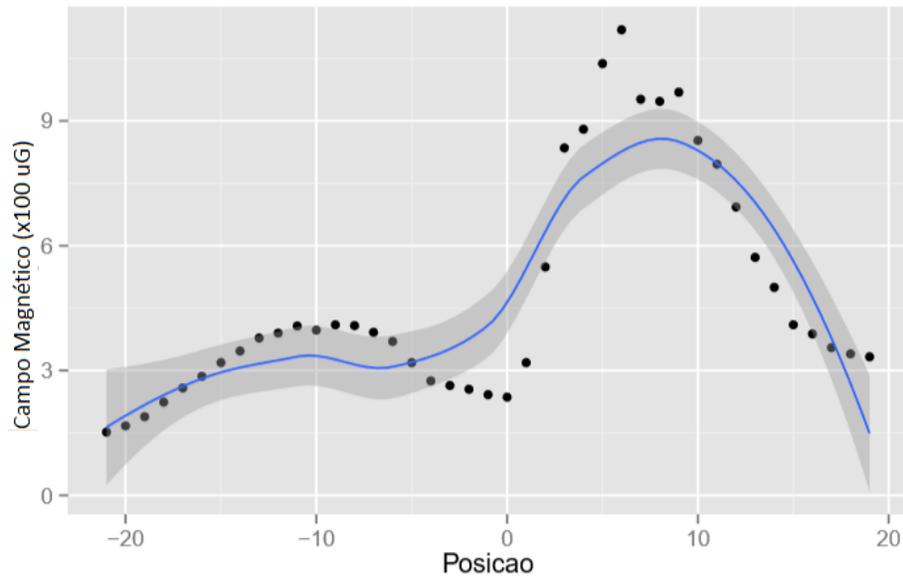
Figura 76 – Procedimento de medição em linha real.



Fonte: Do autor (2018).

Neste experimento, o medidor EM8000 foi utilizado para realizar as medições em campo. Este instrumento possui sensibilidade de até $0,01\mu\text{Tesla}$, e capacidade de medir campos variantes na frequência de 30 a 300Hz. A Figura 76 apresenta o perfil do campo magnético medido no experimento plotado em a partir dos dados capturados, com os valores de intensidade de campo em pontilhado e a curva de tendência em azul. Trata-se de um resultado intermediário para pra validar o experimento em escala.

Figura 77 – Perfil do campo medido no experimento.



Fonte: Do autor (2018).

Observa-se na figura o efeito do desbalanceamento instantâneo da corrente nas três fases na intensidade do campo medido, mesmo com o filtro de média, além do decaimento em função da distância à linha – já esperado.

6.4 Construção do Experimento em Escala Reduzida

Sistemas de pivô central são estruturas de grande porte (na ordem de centenas de metros), e necessitam de logística de montagem e transporte que dificulta seu uso parcial ou completo na realização de experimentos em escala real. Com base nos bons resultados obtidos em Rahman et al. (2005), onde trabalhou-se com modelagem da linha em escala, optou-se por realizar um experimento reduzido, com o objetivo de gerar amostras de treinamento para o modelo das correntes sobre a estrutura. Experimentos em escala podem produzir

resultados satisfatórios desde que as proporções estruturais sejam mantidas, i.e., as correntes induzidas em um modelo em escala do pivô são proporcionais às do pivô real (BAENA et al., 2005). Em Baena et al. (2005) também ressalta-se a necessidade de um sistema de aquisição satisfatório, a fim de capturar com boa precisão e baixo erro as grandezas físicas associadas ao sistema em menor escala. Neste experimento, as amostras obtidas serão posteriormente analisadas para ajuste de escala, e posteriormente ajuste do algoritmo baseado em I.C. Busca-se realizar observações com base nos seguintes parâmetros:

- a) Tensão Nominal da Linha;
- b) Corrente na Linha;
- c) Distância até a linha;
- d) Ângulo de giro do pivô em relação à posição paralela à linha.

Com base nos parâmetros acima, busca-se coletar amostras de corrente induzida na estrutura do pivô, para fins análise de correlação.

6.4.1 Parâmetros Construtivos

Experimentos em escala devem manter-se em proporção paramétrica com o sistema real em referência (BAENA et al., 2005). Para realização do experimento utilizou-se a estrutura do laboratório de máquinas elétricas do CEFET-MG Unidade Nepomuceno, equipado com sistema de proteção de sobrecorrente, ajuste gradual de tensão na linha, estrutura de bancada isolada e sistema de cabeamento robusto. As escalas por parâmetro são apresentados no quadro a seguir:

Quadro 1 – Atributos do experimento em escala.

PARÂMETRO	ESCALA	VALOR NO MODELO
ALTURA DA TORRE	1:100	14cm
TENSÃO DE TRABALHO	1:1568	240Volts
VÃO ENTRE TORRES	1:100	3m
CORRENTE POR FASE	1:1000	9,89 ^a 8,72 ^a 9,75 ^a – rms ^(a)
DIMENSÕES DO PIVÔ	1:100	3cm x 3cm x 94cm (LxAxC)

Fonte: Do autor (2018).

(a) Foram consideradas as correntes de regime permanente no motor utilizado como carga.

Modelo em escala das Torres: As torres de sustentação das linhas de transmissão foram construídas de aço utilizando vergalhões com 4mm de diâmetro. Cada linha foi equipada com três isoladores em borracha por questões de segurança, a fim de evitar contato com os condutores. A Figura 78 apresenta imagem da torre em escala.

Figura 78 - Modelo em escala da torre.



Fonte: Do autor (2018).

Modelo da Linha em Escala: Para simular as linhas de transmissão trifásicas de forma mais similar possível, utilizou-se cabo de aço desencapado, de bitola 2,5mm, cuja resistividade ($0,096 \text{ ohms.mm}^2.\text{m}$) pode ser considerada próxima à do alumínio ($0,029 \text{ ohms.mm}^2.\text{m}$) utilizado em linhas reais, para o trecho de 2m utilizado na maquete. Realizando os cálculos, obtém-se as seguintes resistências elétricas para o trecho de 2m:

$$\text{Aço} = 0,096 \times 2,5 \times 2 = 0,48 \text{ Ohms}$$

$$\text{Alumínio} = 0,029 \times 2,5 \times 2 = 0,14 \text{ Ohms}$$

Considerando a ordem de grandeza das tensões e correntes envolvidas no experimento, a diferença entre as resistividades não será significativa.

Foram montados três condutores entre duas torres, totalizando um vão de 2 metros. Cada condutor foi apoiado sobre isoladores nas torres.

Modelo do Pivô em Escala: Para manter a maior similaridade possível com o sistema de pivô real, uma estrutura em escala foi produzida a partir das proporções reais. A estrutura do pivô apresenta as seguintes características:

Composição: Cobre (Resistividade $0,17 \text{ Ohms.m.mm}^2$)

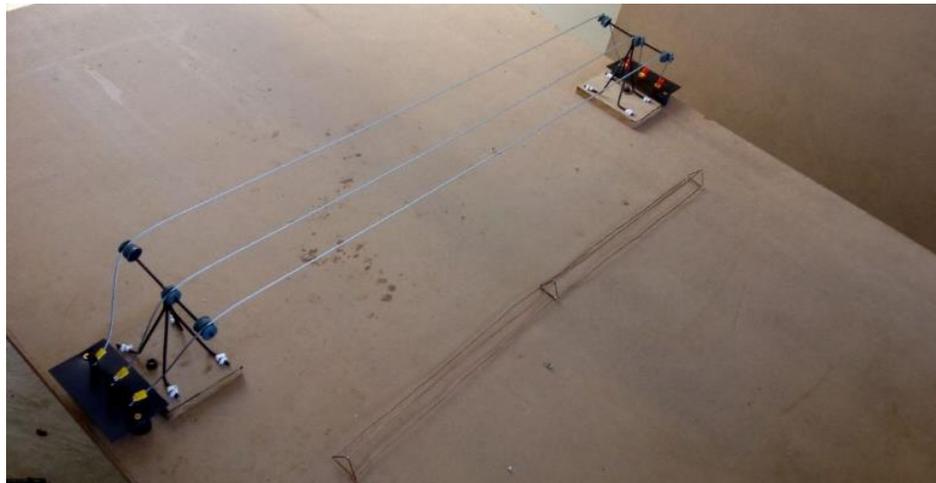
Diâmetro (bitola): 1,5mm

Elemento de junção: Solda em estanho

Elemento rolante: Rodas em borracha

A partir das especificações apresentadas, foi construída uma estrutura com três lances tubos e quatro torres de sustentação, com o objetivo mensurar o efeito ao longo de um estrutura longa. A Figura 78 ilustra a estrutura em escala utilizada no experimento.

Figura 79 - Estrutura em escala completa.



Fonte: Do autor (2018).

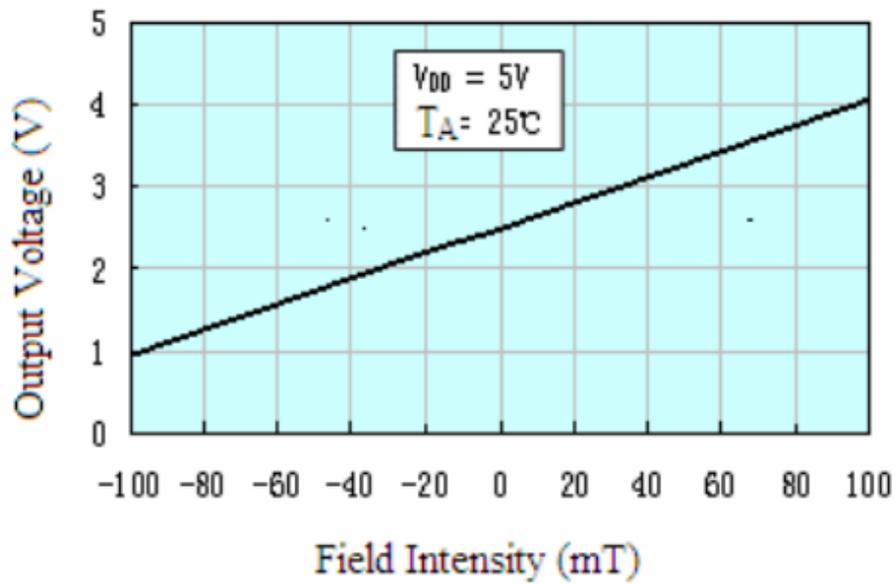
Sistema de Instrumentação Utilizado: Em função da pequena escala, necessitando de precisão, um instrumento de medição do campo magnético foi construído para este experimento. Tal sistema é baseado no microcontrolador PIC18F4553. Microcontroladores são robustos e consomem baixa energia, tornando-os boas alternativas em medição em campo. O microcontrolador utilizado possui conversor analógico-digital de 12 bits de resolução, i.e., é capaz de digitalizar de forma precisa amostras de tensão com resolução de 1,207mV. Tal resolução é compatível com a precisão do sensor de campo utilizado. Utilizou-se como sensor de campo magnético o circuito integrado SS39E. Trata-se de um sensor linear de campo magnético capaz de capturar campos estáticos e variantes no tempo, cujo tempo de resposta é de 3 μ s, e resolução de 2mV/Gauss. A Figura 80 apresenta a imagem, e a Figura 80 apresenta o gráfico de resposta deste sensor.

Figura 80 - Sensor SS49.



Fonte: Installation... (2004).

Figura 81 - Resposta do sensor SS49 utilizado.



Fonte: Adaptado de Installation... (2004).

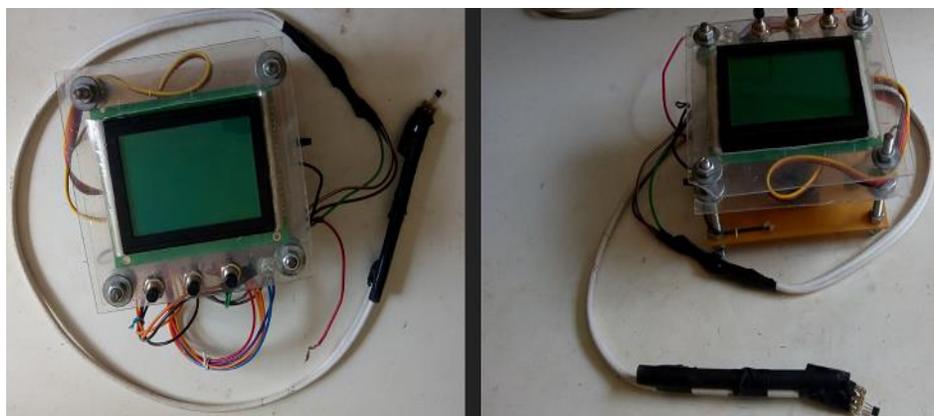
As leituras de intensidade de campo são digitalizadas pelo microcontrolador, processadas e apresentadas em miliTesla (mT), que é a unidade de medida recomendada para a intensidade considerada neste experimento. Optou-se também (como trata-se de um sistema trifásico de onda senoidal oscilando em 60Hz) processar 16 amostras com intervalo de 1milissegundo a fim de capturar o valor de pico e calcular o valor eficaz do campo para este arranjo. Finalmente, com o objetivo de apresentar os valores medidos ao usuário de forma satisfatória, um display LCD gráfico foi utilizado como IHM. A Figura 81 apresenta o diagrama em blocos do sistema de aquisição, e a Figura 82 a imagem do sistema completo em funcionamento.

Figura 82 - Diagrama em blocos - sensor de campo magnético.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 83 - Sistema de medição do campo magnético.



Fonte: Do autor (2018).

Com o objetivo de capturar o comportamento dos campos elétrico e magnético, e da corrente induzida com maior resolução possível, optou-se por um design experimental com o maior número possível de níveis em um maior número possível de fatores. A seguir são apresentados os fatores considerados.

Fator posição do pivô (distancia à torre): 31 níveis, sendo 30 níveis com intervalos de 1cm (mantendo a escala 1:100) e uma medição central abaixo da linha.

Fator Posição Angular do Pivô: 8 níveis, com passo de 45° a partir da posição paralela à linha.

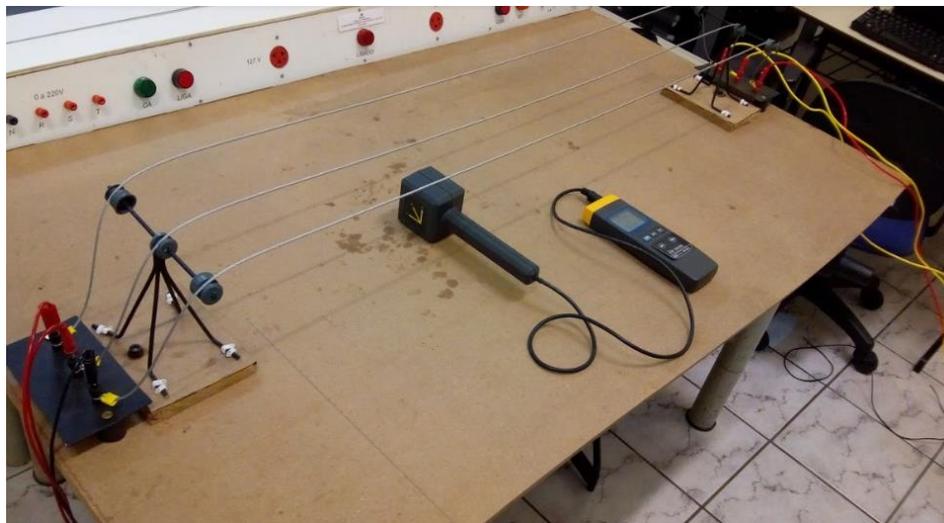
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no modelo em escala reduzida e adaptados à escala real.

7.1 Perfil do Campo Magnético no Modelo em Escala

O procedimento de coleta foi realizado no modelo em escala, tal procedimento é ilustrado nas Figuras 84 e 85. Nas figuras, ressalta-se a utilização do motor como carga, e do soft-starter como elemento para partida suave da carga, evitando surtos indesejados.

Figura 84 - Experimento em escala.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 85 um ventilador / exaustor foi utilizado como carga, cujo motor apresenta as seguintes características construtivas:

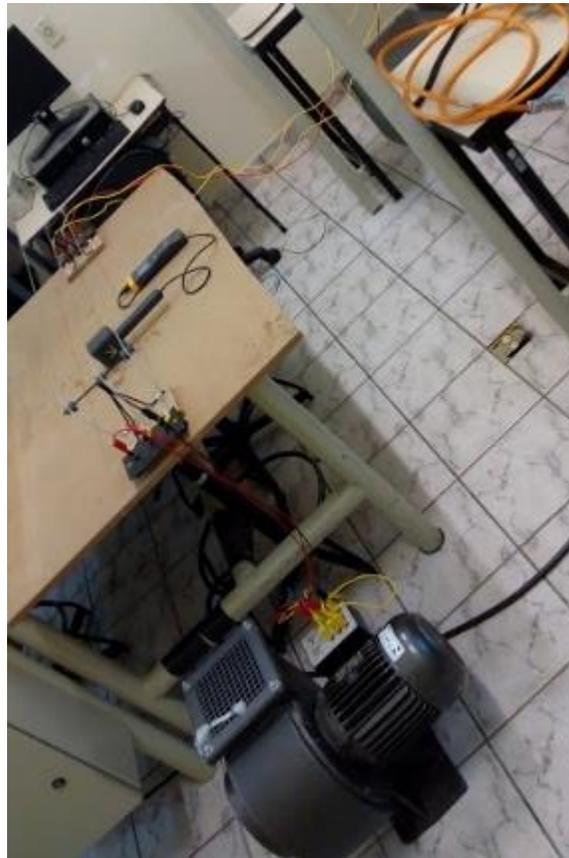
Tensão nominal: 220Volts

Corrente Nominal: 10,5A - No experimento $I_{méd} = 8,5A$

Potência Nominal: 3kWatts

Relação $I_{partida} / I_{nominal}$: 8

Figura 85 - Motor utilizado no experimento em escala.

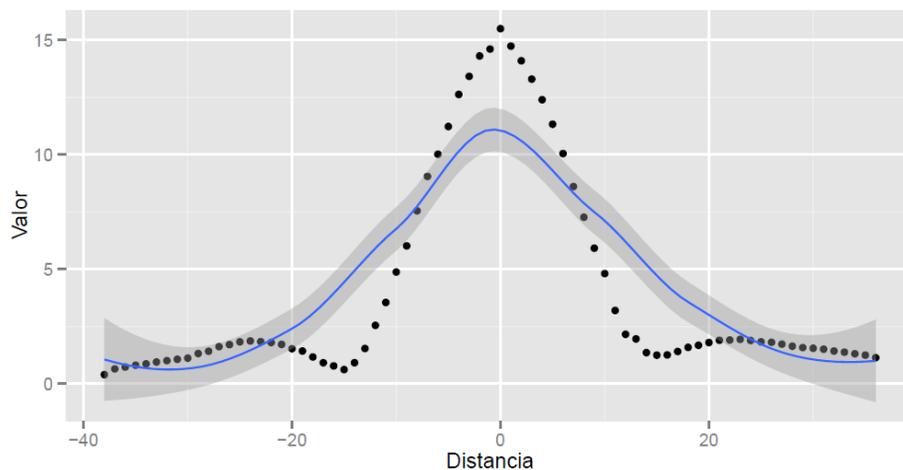


Fonte: Do autor (2018).

Em sua partida, utilizando *soft-starter*, optou-se por rampa de aceleração de 10 segundos, e de desaceleração de 5 segundos, para evitar surtos de tensão induzida no pivô, além de danos ao próprio motor. Dados foram coletados e o

perfil do campo magnético foi plotado a partir das amostras utilizando plataforma RStudio/GGPlot2. A Figura 86 apresenta o perfil do modelo em escala.

Figura 86 - Gráfico perfil do campo magnético medido no modelo em escala.



Fonte: Do autor (2018).

Na figura, a curva em pontos pretos é composta pelos valores de campo. Também foi plotada a curva de tendência em azul.

Observa-se a partir dos resultados apresentados, a semelhança entre os perfis de campo magnético para o modelo em escala e na linha de transmissão real. A partir desta validação, constata-se que pode ser possível investigar os efeitos como indução de corrente, surtos e diferentes tipos de acoplamento em escala reduzida. Ressalta-se que desta forma, será possível realizar os experimentos de forma segura e com baixo custo, bastando reverter as proporções para induzir seus equivalentes em escala real.

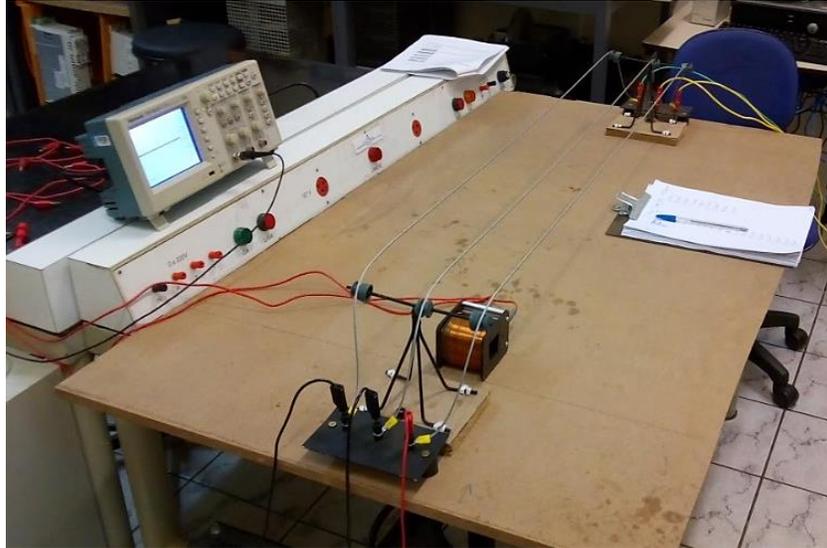
7.1.1 Força Eletromotriz Induzida no Apoio do Pivô

Em função da média entre as correntes eficazes nas três fases ser 9,453A, e o campo magnético máximo coletado no perfil estar na ordem de 15uT, pode-se inferir através da Equação 21 que a corrente nas laterais (triangulares) estaria na ordem de micro Ampères. Para aumentar a ordem de grandeza da corrente induzida, com base na Equação 22, serão utilizadas múltiplas espiras na estrutura. Posteriormente, para fins de obtenção do valor real induzido no pivô original, divide-se os valores obtidos pelo número de espiras utilizado. Os detalhes do experimento serão apresentados a seguir:

a) Solo de alta resistividade

Neste experimento, simulou-se a estrutura lateral de apoio das torres do pivô com 900 espiras enroladas em forma triangular proporcional ao pivô real. Este arranjo, com múltiplas espiras apresenta maior simplicidade, menor custo e maior facilidade de conversão dos resultados em relação ao uso de amplificadores de instrumentação. Foram realizadas observações de acordo com o design experimental apresentado na seção 6.4, com passo de 1cm capturando 15 amostras em direção perpendicular a partir da fase central. A Figura 87 apresenta o procedimento de captura das amostras, utilizando osciloscópio digital.

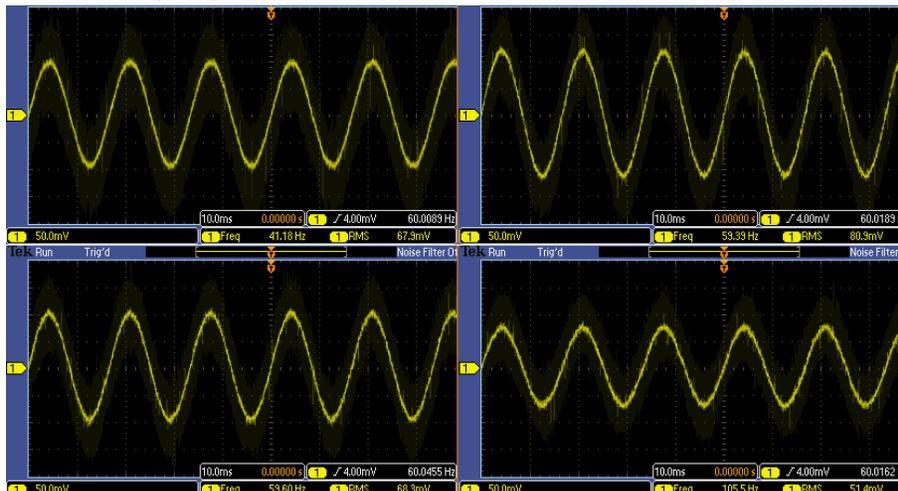
Figura 87 - Procedimento de aquisição da forma de onda da f.e.m. induzida.



Fonte: Do autor (2018).

A Figura 88 apresenta formas de onda da tensão induzida na área lateral do pivô, obtidas abaixo da fase central ($d=0\text{cm}$), em $d=5\text{cm}$, $d=10\text{cm}$ e $d=15\text{cm}$.

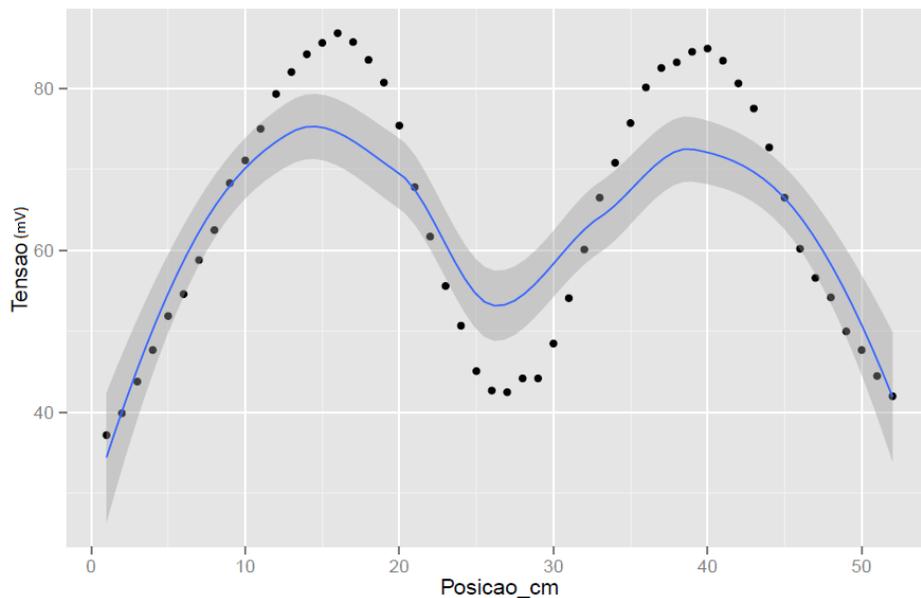
Figura 88 - Formas de onda para a *f.e.m.* induzida na lateral do pivô para $d=0$, 5, 10 e 15cm.



Fonte: Do autor (2018).

Na figura, destaca-se o decaimento da *f.e.m.* induzida (parte inferior direita) em função da distância ao pivô, além da frequência de aproximadamente 60Hz e forma senoidal em todos os casos. Foi plotado o perfil de corrente induzida para a área lateral do pivô (FIGURA 89).

Figura 89 - Perfil da tensão eficaz induzida na lateral do pivô em função da posição.



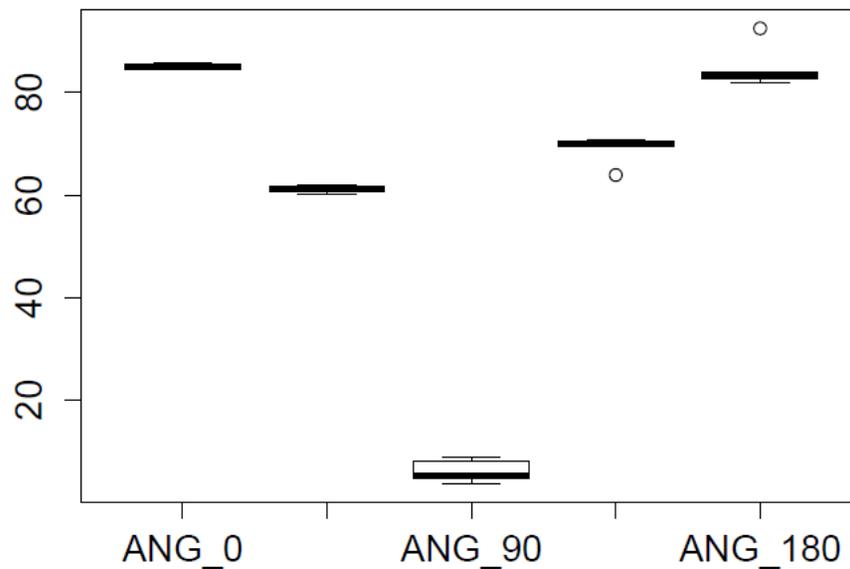
Fonte: Do autor (2018).

Para investigar o efeito da indução em função da posição angular do pivô, foi realizado o experimento considerando o giro da estrutura. Neste experimento, foram tomadas 4 amostras (cada uma contendo 5 observações) de *f.e.m.* induzida no pivô, à distância de 10cm da linha.

As 4 amostras foram tomadas com o pivô perpendicular à linha (0°), e cada intervalo de 45° ($45,90,135,180$). A Figura 90 apresenta o diagrama de caixas (*boxplot*) do experimento. Na figura, enfatiza-se que o efeito de indução

para o ângulo de 90° , isto é, pivô perpendicular à linha é praticamente nulo. O resultado apresentado na Figura 90 justifica-se na Equação 22, em função do fato da área relativa atravessada pelas linhas diminuir à medida em que a estrutura vai se alinhando ao sentido das linhas e aumentar quando a estrutura fica perpendicular.

Figura 90 - Diagrama de caixa das f.e.m. induzidas na lateral do pivô em função do ângulo de rotação.



Fonte: Do autor (2018).

b) Solo de baixa resistividade

A resistividade elétrica em boa parte dos tipos de solo é baixa, estando em valores próximos a $10\Omega.m$, e em casos excepcionais, chega a ser na ordem de $1000\Omega.m$. Em função disto, optou-se por simular a baixa resistividade revestindo a base de estrutura em chapa de aço com 2mm de espessura. Para avaliar possíveis arranjos ou defeitos na linha, simulou-se também o efeito do

carregamento das fases neste arranjo (dois níveis: monofásico e trifásico). A Figura 91 apresenta o processo de captura com a lateral do pivô em escala contendo 900 espiras, para o arranjo monofásico.

Figura 91 - Mesa com chapa simulando solo com baixa resistividade.

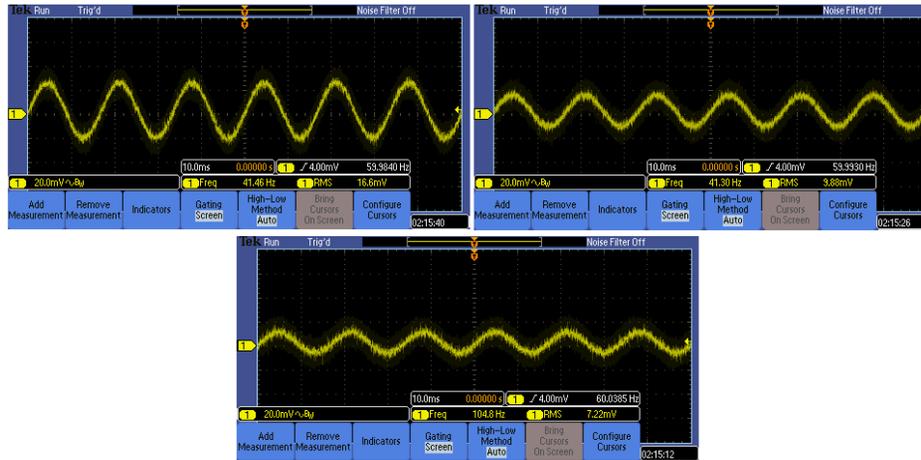


Fonte: Do autor (2018).

Após carregamento, amostras foram capturadas com osciloscópio digital (Tektronix). A Figura 92 apresenta as formas de onda capturadas em carregamento monofásico para o apoio do pivô para as distâncias de 0, 15cm e 30cm da linha.

A partir das amostras de tensão eficaz, foi plotado o perfil para este arranjo. Este perfil é apresentado na Figura 93. Observa-se no perfil o decaimento com comportamento próximo da linearidade da *f.e.m.* induzida em função da distância, sem a ocorrência de picos. Posteriormente, foram realizados os testes com as três fases carregadas. A Figura 93 apresenta as formas de onda capturadas para distância de 0; 15 e 30cm da linha.

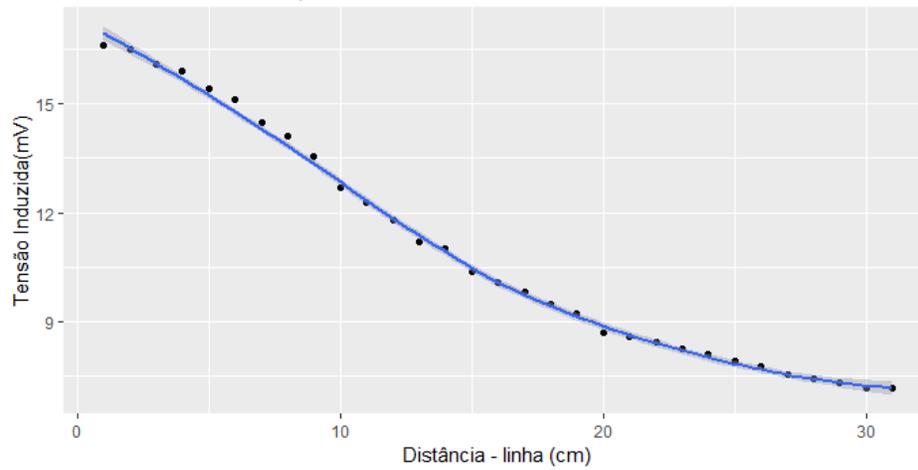
Figura 92 - Amostras de tensão induzida no apoio do pivô.



Fonte: Do autor (2018).

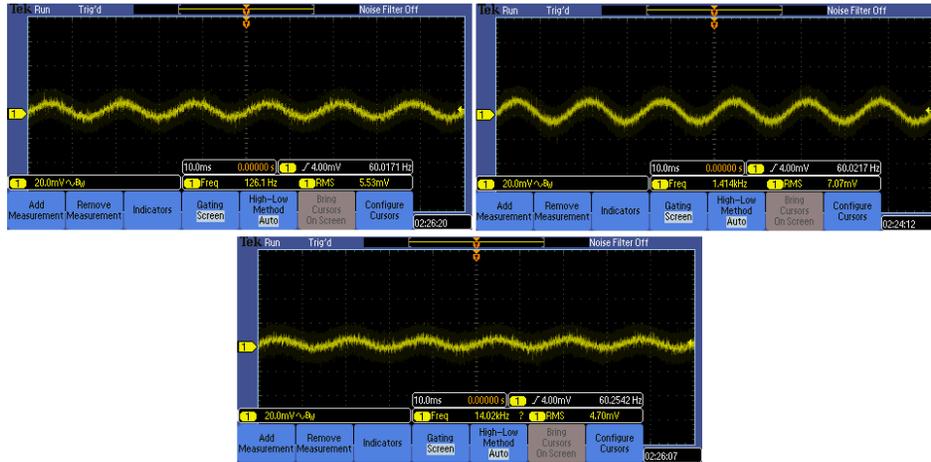
Figura 93 - Tensão Induzida no Apoio do Pivô monofásico.

Tensão Induzida no Apoio do Pivô: 1 Fase



Fonte: Do autor (2018).

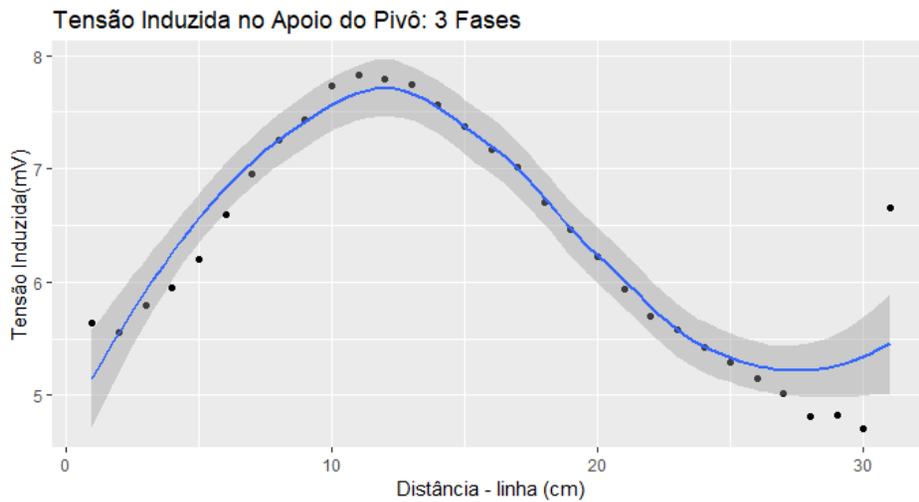
Figura 94 - Amostras de tensão no apoio do pivô no arranjo trifásico.



Fonte: Do autor (2018).

Observa-se nesta figura que os valores induzidos são menores para o arranjo trifásico. Para esta condição, também foi plotado o perfil (apresentado na FIGURA 95) das tensões induzidas a partir das amostras obtidas no pivô.

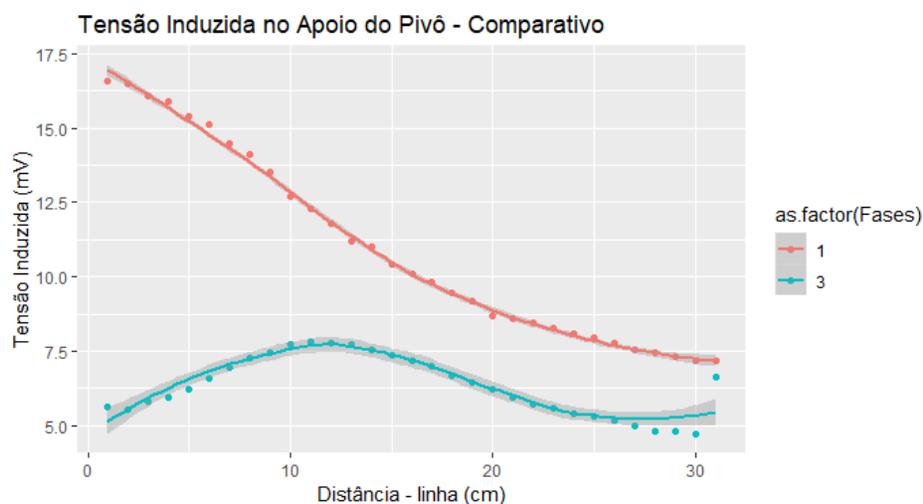
Figura 95 - Perfil da tensão induzida no apoio do pivô no arranjo trifásico.



Fonte: Do autor (2018).

Diferentemente do perfil para o arranjo monofásico, ocorre um pico a aproximadamente 12cm da linha, entretanto com valores inferiores ao arranjo monofásico. Para fins de comparação, a Figura 96 apresenta os perfis de tensão induzida no pivô para os dois arranjos em mesma escala.

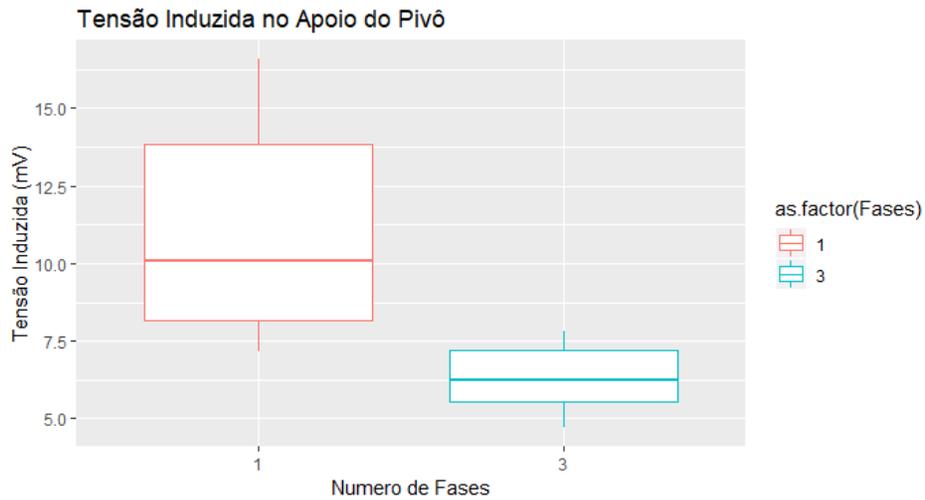
Figura 96 - Comparativo entre as tensões induzidas no pivô.



Fonte: Do autor (2018).

Observa-se na figura a diferença entre o perfil e a intensidade das tensões induzidas para os diferentes arranjos. No sistema trifásico o efeito sobre o pivô é consideravelmente menor, o que o torna potencialmente mais seguro em função dos efeitos nos arredores. Para tornar mais clara a diferença entre os dois carregamentos, optou-se por plotar o diagrama de caixas (*Boxplot*) das amostras obtidas nos dois perfis. A Figura 97 apresenta o diagrama.

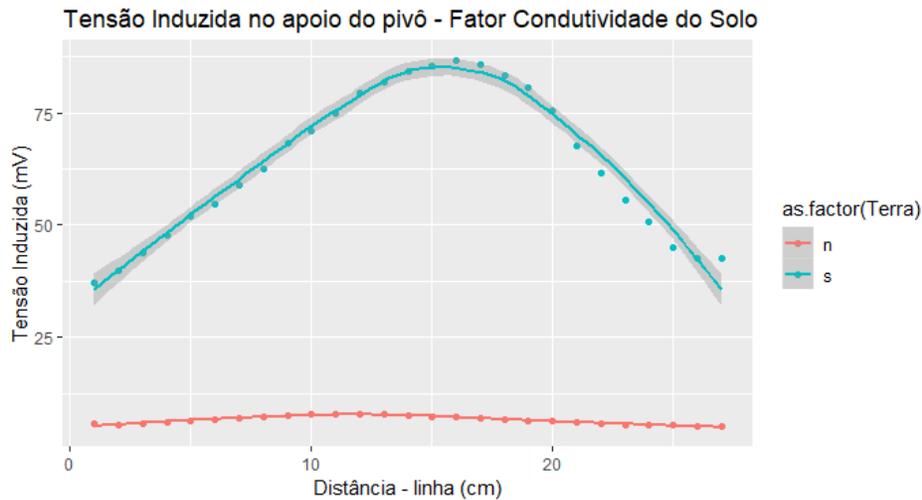
Figura 97 - Diagrama de Caixa do perfil das tensões induzidas no pivô.



Fonte: Do autor (2018).

Ainda sobre a *f.e.m.* no apoio do pivô, para avaliar o efeito da resistividade (indiretamente a resistência) do solo foram plotados em escala as amostras nas duas condições investigadas. A Figura 98 apresenta os perfis.

Figura 98 - Perfis de tensão induzida em função da condutividade do solo.

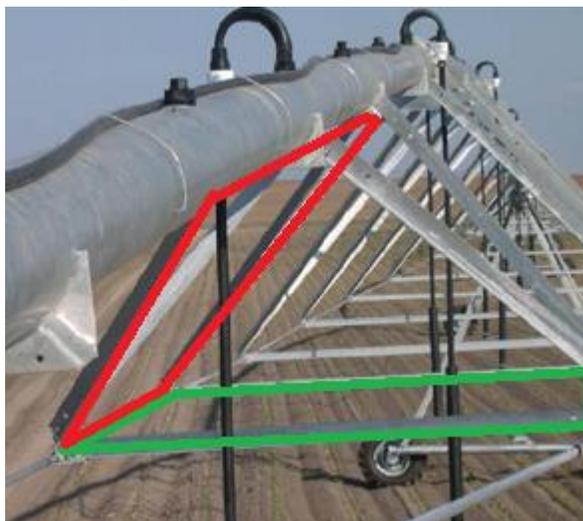


Observa-se na figura que as tensões induzidas na estrutura são menores com solo condutor (com menor resistividade), condição mais comum. Nesta condição, é possível que boa parte das linhas de campo tenham maior dispersão quando atravessam solo condutor.

7.1.2 Força Eletromotriz Induzida na Lateral do Pivô

A *f.e.m.* induzida na área lateral do pivô também foi amostrada. Neste experimento também foram consideradas as duas condições de carregamento, com uma e três fases. Para cada uma das duas condições de carregamento mediu-se a indução na área lateral inclinada em 45° (simulando a lateral do pivô - em vermelho na FIGURA 99) e paralela ao solo (simulando a base do pivô - em verde na FIGURA 100).

Figura 99 - Identificação das estruturas em pivô real.



Fonte: La Corrosión... (2011).

Por questões de similaridade com solo real, será seguida a premissa de que o solo tem alta condutividade (chapa em aço presente). Na Figura 100 são apresentados os perfis de tensão induzida em função do afastamento do pivô em relação à linha. Observa-se na figura a maior intensidade inicial da linha monofásica, entretanto esta intensidade decai fortemente em função da distância. Por outro lado, no carregamento trifásico, a aproximadamente 20cm da linha ocorre um pico em função de uma provável interferência construtiva entre os campos das três fases naquele ponto.

Para o pivô paralelo ao solo, diferenças significativas ocorreram, conforme observa-se na Figura 101. Neste arranjo nota-se que para o carregamento monofásico a maior intensidade ocorre a 15cm da linha, posição na qual provavelmente mais linhas de campo cruzam a estrutura. Após esta posição, ocorre o decaimento gradativo em função da distância a linha. Por outro lado, em função do afastamento lateral entre as fases, no carregamento trifásico

ocorre grande intensidade de campo abaixo da linha (proveniente da influência das outras duas fases), e conseqüentemente maior tensão induzida.

Figura 100 - Perfis de tensão induzida na lateral do pivô.

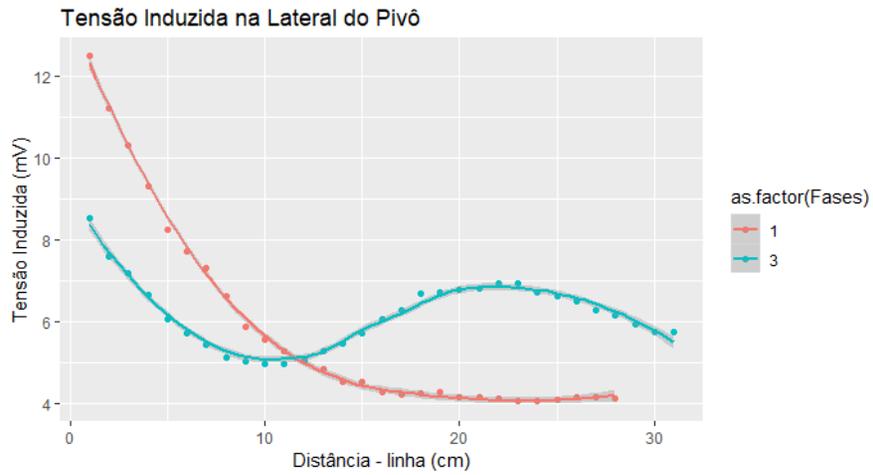
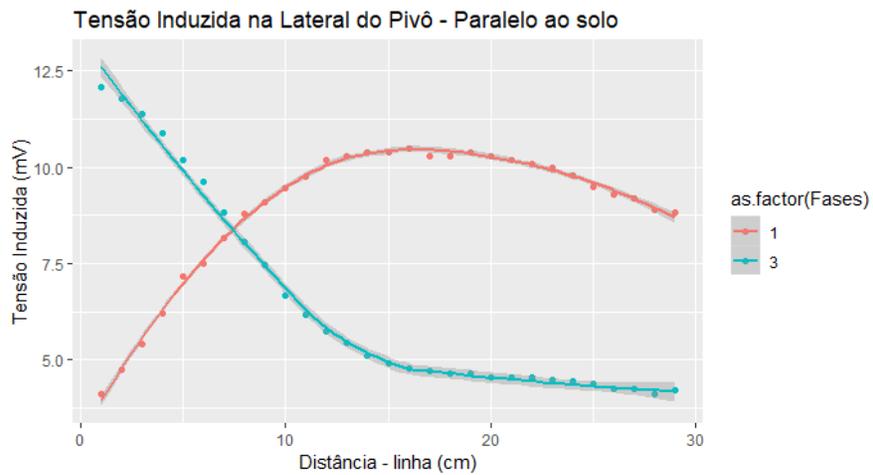
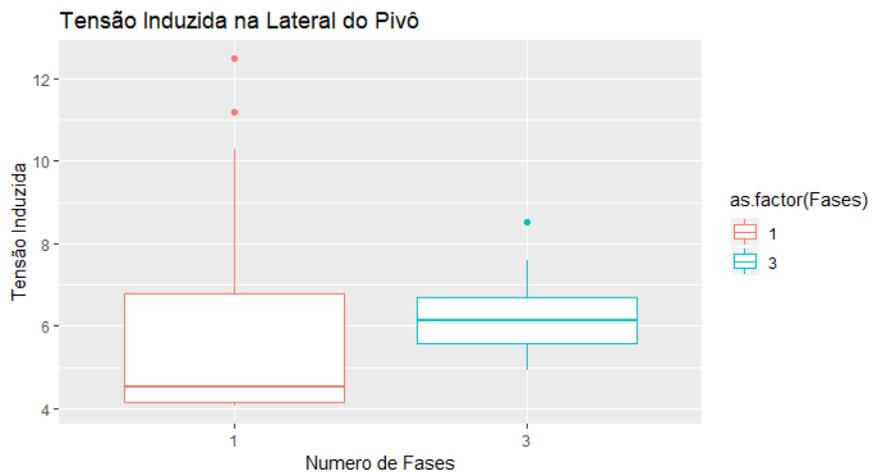


Figura 101 - Perfil das tensões induzidas na base do pivô para os dois carregamentos.



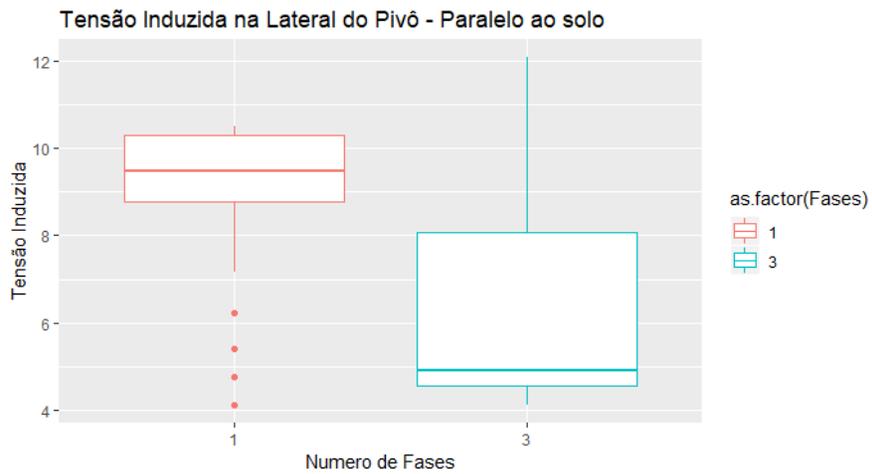
Para fins de comparação estatística, na Figura 102 e Figura 103 a seguir são apresentados os diagramas de caixa para as duas amostras apresentadas acima.

Figura 102 - Diagrama de Caixas dos perfis das tensões induzidas.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 103 - Diagrama de Caixas dos perfis das tensões induzidas na base do pivô.

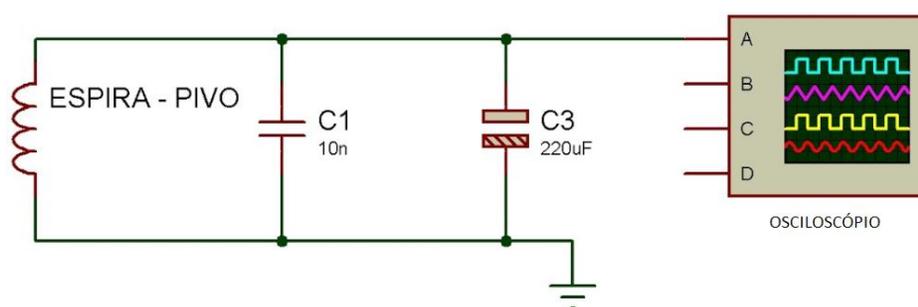


Fonte: Do autor (2018).

Com base nos diagramas de caixa, pode se inferir que para a lateral do pivô as amostras relativas a uma ou três fases são estatisticamente semelhantes. Por outro lado, tomando a área da base do pivô, pode se considerar que o carregamento monofásico induz maior tensão.

Finalmente, ressalta-se que para a obtenção das amostras de corrente induzida, fez-se necessária a aplicação de filtros passa-baixa para eliminar ruídos de chaveamento, reatores de lâmpadas ou outros componentes de alta frequência que possam vir na rede. O diagrama do filtro passa-baixas projetado é apresentado na Figura 104.

Figura 104 - Filtro passa baixas necessário ao processo de captura.



Fonte: Do autor (2018).

7.2 Estimativa dos efeitos em pivô real

Com base nos resultados obtidos em escala, propõe-se nesta sessão um método de inferência das tensões induzidas no pivô em escala real. Provou-se nos modelos do pivô no experimento em escala que é factível que haja a indução de *f.e.m.*, e a partir destes resultados parciais justifica-se investigar os efeitos em maior escala. A seguir serão apresentados ajustes de escala baseados em convenções matemáticas para avaliar a correspondência de tais efeitos na estrutura em maior escala, também sujeita a campos de maior intensidade. A

partir disto será possível investigar prováveis efeitos das correntes induzidas por estas *f.e.m.* sobre seres humanos e equipamentos eletrônicos.

Com base nos parâmetros construtivos do experimento em escala apresentados novamente a seguir (já discutidas no capítulo anterior) podem ser realizados ajustes matemáticos com precisão satisfatória.

Quadro 2 - Parâmetros de escala do modelo desenvolvido.

PARÂMETRO	ESCALA	VALOR NO MODELO
ALTURA DA TORRE	1:100	14cm
TENSÃO DE TRABALHO	1:1568	240Volts
VÃO ENTRE TORRES	1:100	3m
CORRENTE POR FASE	1:1000	9,89A 8,72A 9,75A - rms ^(a)
DIMENSÕES DO PIVÔ	1:100	3cm x 3cm x 94cm (LxAxC)

Fonte: Do autor (2018).

Tomando as escalas apresentadas, as Equações (20), (21) e (22) podem ser ajustadas para compensar matematicamente o efeito da redução, obtendo assim os valores prováveis para a linha real.

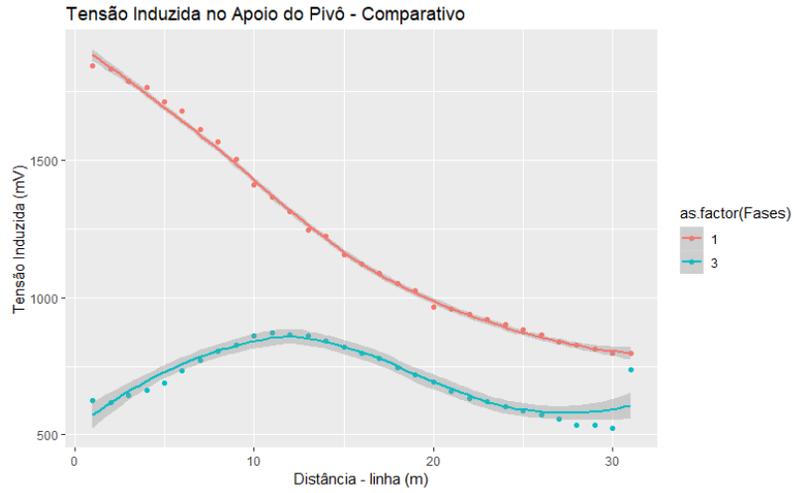
- a) Inicialmente, na Equação 20, para compensar a redução, a corrente da linha deve ser multiplicada em fator de 1000 - partindo do princípio que valor médio aproximado em uma linha real é na ordem de 8kA. Compensa-se também a redução do raio (ρ) multiplicando por um fator de 100 vezes. Tal ajuste leva a multiplicação de 10 vezes na intensidade de campo magnético.
- b) Na Equação 22, considerando linearidade na magnetização do ar, pode se aproximar que $B = \mu_0 H$, é, conseqüentemente é

multiplicado por 10. Adicionalmente, como as dimensões lineares da escala foram multiplicadas por 10, a área das espiras cresce na proporcionalmente, e neste caso é multiplicada por 10000. Finalmente, ajustando a equação obtêm-se o fator de 100000, isto é, o fluxo magnético seria 100000 vezes maior.

- c) Consequentemente, na Equação 21, a força eletromotriz proporcional ao fluxo é multiplicada por 100000. Para ajustes de escala, no apoio do pivô, a força eletromotriz é dividida pelo número de espiras (900), e na lateral do mesmo dividida por 100. Neste caso, a *f.e.m.* induzida no apoio do pivô deve ser multiplicada por um fator de 111,11. Similarmente, a força eletromotriz ajustada para a lateral do pivô (100 espiras) deve ser multiplicada por um fator de 1000.

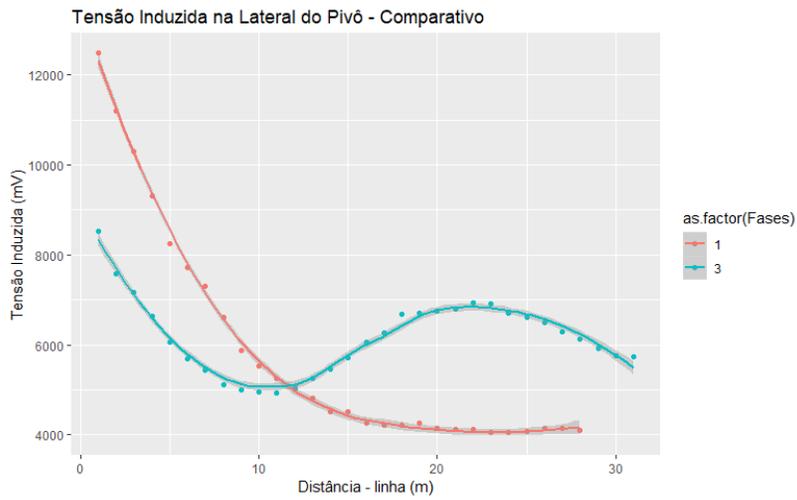
A partir dos ajustes apresentados, os valores podem ser corrigidos. A seguir, nas Figuras 105, 106 e 107 são apresentados os gráficos de *f.e.m.* corrigidos para a escala ampliada.

Figura 105 - Tensão induzida no apoio do pivô corrigida.



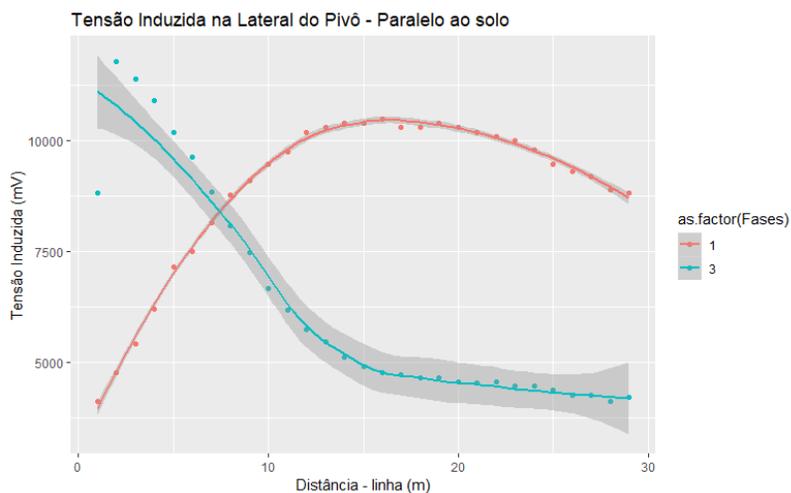
Fonte: Do autor (2018).

Figura 106 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 107 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.



Fonte: Do autor (2018).

7.3 Análise do potencial de risco

Para avaliar o risco potencial do contexto apresentado, será investigada nesta sessão a *f.e.m.* induzida no pivô para o melhor caso (maior tensão induzida) obtido em cada experimento realizado na sessão anterior. A partir destes valores, e considerando outros aspectos da estrutura podem ser estimados os riscos reais a seres humanos. A Tabela 14 apresenta os valores máximos obtidos nos ensaios já ajustados para a escala real, utilizando o ajuste apresentado na sessão anterior.

Tabela 14 - Tensão Máxima Induzida no Pivô.

Valores máximos de <i>f.e.m.</i> induzida na estrutura do pivô (rms)				
	Arranjo Monofásico		Arranjo Trifásico	
Local	Escala	Real (ajustada)	Escala	Real (ajustada)
Apoio	16,6mV	1,844V	7,83mV	0,870V
Base	10,5mV	10,5V	12,1mV	12,1V
Laterais	12,5mV	12,5V	8,52mV	8,52V

Fonte: Do autor (2018).

Observa-se na tabela que a ordem de grandeza dos valores convertidos é significativa, ocorrendo com maior intensidade nas laterais. No apoio tem-se o maior valor na condição de somente uma linha carregada. Todos os potenciais são em referência ao ponto de aterramento no apoio lateral do pivô.

Em ANA (2013) afirma-se que pivôs podem ser montados com até 7 lances de 94 metros. Ainda conforme ANA (2013), a estrutura compõe-se em tubos de 8 polegadas de diâmetro compostos de Aço Zincado com resistividade ($\rho = 20 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$). A partir destes parâmetros, podem ser calculadas as resistências elétricas equivalentes às estruturas laterais e para os apoios.

a) Resistência das Barras Laterais: R_{AI} , R_{BJ} , R_{CK}

$$\begin{aligned} \text{Resistência da barra Lateral} &= (\rho_{aço} \times (\text{Comp. Lateral})) / \text{Área}_{\text{tubo}} \\ \text{Resistência da barra Lateral} &= (20 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \times 94m) / 0,0324 \\ &= 0,058 \Omega \end{aligned}$$

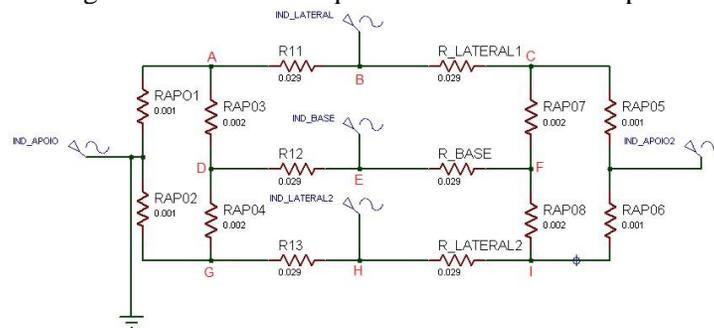
b) Resistência das Barras do Apoio: R_{AED} , R_{IML} , R_{FHG} (*)

$$\begin{aligned} \text{Rapoio} &= (\rho_{aço} \times (\text{Comp. Apoio})) / \text{Área}_{\text{tubo}} \\ \text{Rapoio} &= (20 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \times 9m) / 0,0324 = 0,006 \Omega \end{aligned}$$

(*) FHG será considerado de dimensões similares a R_{AED} , R_{IML} para fins de simplicidade no modelo.

Finalmente, para a construção do modelo, as duas condições de contorno (pivô perpendicular e à linha à linha) devem ser tomadas. A seguir, a Figura 108 apresenta o modelo circuintal do pivô. O modelo foi construído com base no arranjo estrutural e nas resistências elétricas de cada seção do pivô. Os pontos de inserção de tensão representam as *f.e.m.* induzidas.

Figura 108 - Circuito equivalente a um lance do pivô.



Fonte: Do autor (2018).

Como apresentado nesta sessão, estando o pivô perpendicular à linha, a indução de *f.e.m.* na lateral do pivô será mínima, isto é, as fontes de tensão IND_APOIO e IND_APOIO2 serão máximas. Conseqüentemente, com o pivô em alinhamento paralelo à linha, a *f.e.m.* no apoio do pivô será nula e as fontes representando a indução lateral no pivô IND_LATERAL, IND_BASE e IND_LATERAL2 agora terão valor máximo. Com base nos pontos de medição posicionados em diversos locais da estrutura do pivô (FIGURA 108), utilizando simulação computacional (*Software Proteus Professional Versão 7.7*) foram obtidas tensões em relação ao ponto referencial (aterrado em uma das extremidades do pivô). A Tabela 15 apresenta os valores de tensão média eficaz (**rms**) obtidos na simulação para o carregamento monofásico.

Tabela 15 -Tensões induzidas no modelo para o carregamento monofásico.

Indução na Lateral - Pivô em paralelo a linha									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tensão	0,41	8,83	0,41	0,64	7,42	0,64	0,41	8,83	0,41

Indução no Apoio - Pivô perpendicular à linha									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tensão	0	0	0,97	0	0	0,94	0	0	0,97

Fonte: Do autor (2018).

Para o carregamento trifásico, os valores obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Tensões induzidas no modelo para o carregamento trifásico.

Indução na Lateral - Pivô em paralelo a linha									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tensão	0,18	0,61	0,18	0,52	8,55	0,52	0,31	6,02	0,31

Indução no Apoio - Pivô perpendicular à linha									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tensão	0	0	0,58	0	0	0,57	0	0	0,58

Fonte: Do autor (2018).

Pode se observar nos resultados que os valores obtidos para o pivô na posição perpendicular (indução máxima no apoio) são inferiores aos obtidos para o pivô em alinhamento paralelo com a linha de transmissão. Também fica evidente que, com o sistema operando em três fases as tensões induzidas são em menores. No carregamento monofásico, induz-se maior tensão nos pontos B e H (8,83mV). Já no carregamento trifásico, o ponto crítico com maior indução é o ponto E (8,55mV). Cabe ressaltar que como todos os resultados apresentados são em valor eficaz (rms), os valores de pico são ainda maiores. Os resultados da

simulação apresentados são baseados em apenas um lance do pivô. Conforme apresentou-se no Capítulo 4, em função da área irrigada, um ou mais lances podem ser acoplados, chegando a 7 lances em caso extremo. Nesta condição, simulou-se o pivô com múltiplos lances, abaixo da linha, e por convenção tomando agora somente os valores obtidos no ponto central e no mais extremo ao aterramento. Optou-se por não simular a condição perpendicular à mesma pois os valores induzidos no extremo mais distante do ponto aterrado do pivô (agora com maior comprimento) tendem a ser nulos. No Apêndice A é representado o modelo circuital do pivô com múltiplos lances. Para fins de referência, os pontos extremos dos *n-ésimos* lances do pivô foram assinalados com o índice *n* após a letra E. A Tabela 17 apresenta os valores obtidos em simulação para o carregamento monofásico, e trifásico.

Tabela 17 - Tensões induzidas no modelo para múltiplos lances de pivô.

Ponto	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Tensão monofásico	17,66V	26,49V	35,32V	44,15V	52,98V	61,81V
Tensão trifásico	17,1V	26,65V	34,2V	42,75V	51,3V	59,85V

Fonte: Do autor (2018).

Na tabela, os valores obtidos aumentam de forma linear em função da quantidade de lances. Isto ocorre porque há mais área susceptível à indução de *f.e.m.*

Com base nestes resultados, observa-se tensões induzidas em grandezas consideráveis. Tomando-se a norma NR-10, que trata de segurança no contexto elétrico, as tensões induzidas ao longo do pivô podem ser classificadas conforme apresentado na Tabela 18:

Tabela 18 - Classificação das tensões induzidas no sétimo lance.

Classificação dos Pontos NR-10		
Ponto	Tensão Extra Baixa (segura)	Tensão Baixa (não segura)
E1	X	
E2	X	
E3	X	
E4	X	
E5		X
E6		X

Fonte: Do autor (2018).

Deve ser considerado que mesmo no limiar de tensões seguras, fatores como umidade do ar, da pele humana ou da vestimenta podem aumentar o grau de risco. Além desse fator, a corrente instantânea que circula na linha pode alcançar valores maiores do que os convencionados neste experimento, aumentando o grau de risco.

7.4 Considerações sobre a resistividade do solo

Nos experimentos em escala foram simuladas duas condições de solo: resistividade baixa e alta. Os testes foram direcionados principalmente ao solo com baixa resistividade, isto é, baixa resistência elétrica. Esta condição se aproxima dos valores obtidos em solos cultivados (na ordem das dezenas de Ohms·m). A Tabela 19 apresenta os valores típicos.

Em sistemas de cultivo, solos normalmente são preparados com implementos agrícolas, adição de minerais e outros fatores que diminuem ainda mais sua resistividade, além da umidade provocada pela própria irrigação. Estimar e simular com precisão a resistividade de um solo real no experimento em escala é tarefa difícil e pouco explorada na literatura, o que torna modelos de aproximação a solução de compromisso. Partindo-se dos resultados apresentados nas sessões anteriores, os quais apresentam tendência a maior indução de corrente no pivô em solo de maior resistividade, e menor em baixa resistividade,

nesta sessão serão utilizados os valores intermediários de resistividade do solo apresentadas na literatura para ajustar os valores obtidos. O objetivo final do ajuste linear proposto é obter valores de tensão induzida mais precisos para os solos presentes na região.

Para realizar o ajuste, os valores de *f.e.m.* obtidos no experimento com a bancada em madeira a princípio, e, posteriormente com aço serão tomados como pontos extremos para traçar uma reta de ajuste. Parte-se do princípio que a madeira utilizada na mesa no primeiro experimento possui resistividade na ordem de $1,49\text{M}\Omega\cdot\text{m}$, (VISACRO FILHO, 2002). O maior valor induzido na mesa em madeira foi $86,8\text{mV}$ com carregamento trifásico. De forma complementar, com a mesa em aço (resistividade $1\times 10^{-7}\Omega\cdot\text{m}$), na mesma condição de carregamento foi obtido o valor máximo de $7,73\text{mV}$. Realizando-se o ajuste linear, obtém-se a seguinte equação de correção sobre os valores de tensão induzida:

$$V_{ajust} = 5,6037 \times 10^8 \cdot \rho_{solo} + 7,73 \cdot 10^{-3} \quad (23)$$

A partir da equação acima, é possível calcular o percentual de aumento nas tensões induzidas para cada tipo de solo.

$$Ajuste_{perc.} = \frac{(V_{ajust} - 7,73 \cdot 10^{-3})}{100} \quad (24)$$

A Tabela 19 apresenta tais valores de tensão induzida no apoio lateral (que foi utilizado com referencial até este ponto) e os respectivos fatores de correção relativos ao valor induzido na mesa em aço.

Tabela 19 - Ajustes calculados em função da resistividade do solo.

Tipo de Solo	Resistividade (máx) $\Omega.m$	Tensão Máxima Induzida Ajustada(V)	Aumento Percentual
Lama	100	7,73531E-03	0,06%
Terra de Jardim (50% umidade).	140	7,73743E-03	0,09%
Terra de Jardim (20% umidade).	480	7,75547E-03	0,33%
Argila Seca	5000	7,99534E-03	3,43%
Argila (40% umidade)	80	7,73425E-03	0,05%
Argila (20% umidade)	330	7,74751E-03	0,22%
Areia Molhada	1300	7,79899E-03	0,89%
Areia Seca	8000	8,15454E-03	5,49%
Calcário compacto	5000	7,99534E-03	3,43%
Granito	10000	8,26067E-03	6,86%

Fonte: Do autor (2018).

A partir dos fatores de correção apresentados na tabela, é possível corrigir os valores inferidos no pivô real. A Tabela 20 apresenta os valores corrigidos.

Tabela 20 - Ajuste final da tensão induzida considerando a resistividade do solo.

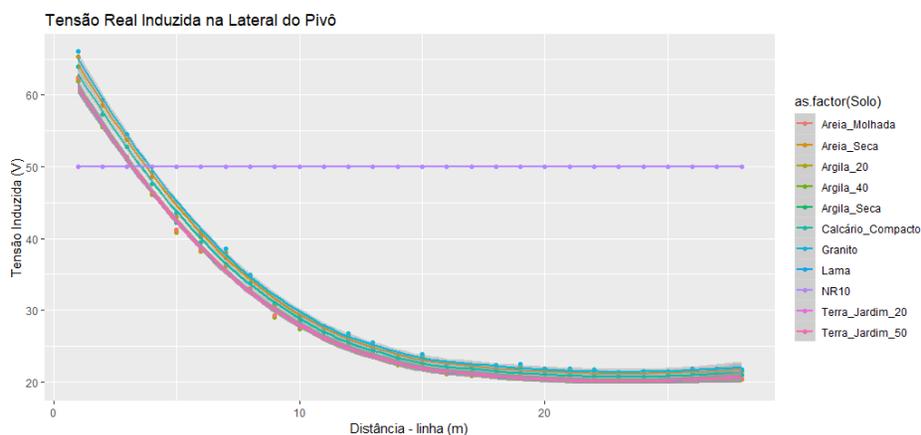
Tipo de Solo	Resistividade (máx) $\Omega.m$	Aumento Percentual	Valor Induzido: 7° lance (V)
Lama	100	0,06%	61,852
Terra de Jardim (50% umidade).	140	0,09%	61,870
Terra de Jardim (20% umidade).	480	0,33%	62,014
Argila Seca	5000	3,43%	63,931
Argila (40% umidade)	80	0,05%	61,844
Argila (20% umidade)	330	0,22%	61,950
Areia Molhada	1300	0,89%	62,361
Areia Seca	8000	5,49%	65,204
Calcário compacto	5000	3,43%	63,931
Granito	10000	6,86%	66,053

Fonte: Do autor (2018).

Nota-se na tabela que o valor induzido no sétimo lance do pivô não é considerado seguro de acordo com a NR-10 (50V) para todas as condições de solo. O grau de risco aumenta com certos tipos de solo, principalmente em função do fator umidade. Tal resultado poderia ser evidenciado ainda mais considerando fatores não investigados no presente estudo como, surtos de corrente na rede, curto-circuito, descargas atmosféricas na rede em pontos próximos ou remotos, além de fatores humanos como umidade do corpo ou roupas do operador.

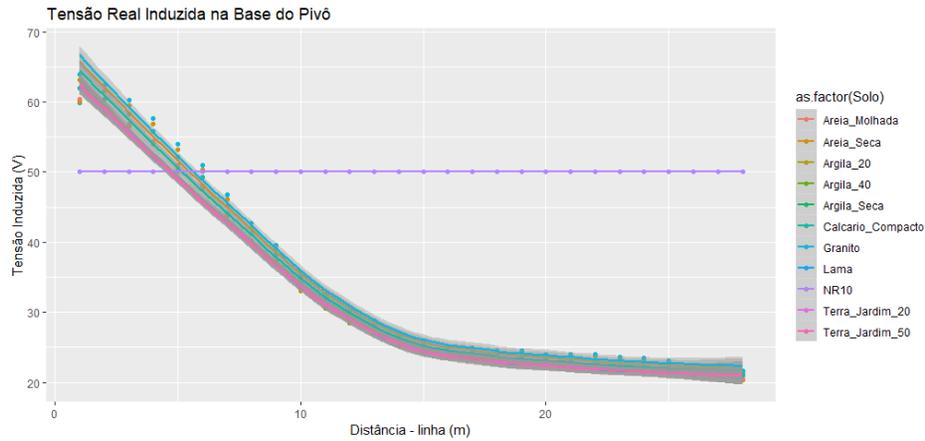
Para apresentar um panorama final dos efeitos da indução, as Figuras 109 e 110 apresentam os valores para a tensão induzida no sétimo lance do pivô ajustadas e simuladas em função do fator distância à linha, como um perfil. Nas figuras pode se observar o nível de risco presente (para o carregamento monofásico) para até aproximadamente 5 metros da linha para a lateral do pivô, e para até 7 metros da linha para a base do pivô.

Figura 109 - Tensão induzida na lateral do pivô corrigida.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 110 - Tensão induzida na base do pivô corrigida.



Fonte: Do autor (2018).

Com base nos resultados apresentados, pode se considerar que as tensões induzidas no pivô extrapolam as recomendações de segurança na NR-10. No ponto mais extremo do pivô, ainda a alguns metros afastado da linha há risco. No experimento em escala provou-se que o solo é fator influente na tensão induzida.

8 CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou efeitos de linhas de transmissão em pivôs de irrigação. Os experimentos em escala apresentaram-se como opção segura e de baixo custo para melhor compreensão dos aspectos físicos do fenômeno de indução. Os resultados obtidos no modelo em escala foram compatíveis com o esperado na teoria e nas simulações computacionais iniciais, aspecto que valida sua construção. Confirmou-se por meio de aproximações e ajustes matemáticos aliados a simulação do modelo circuital que podem haver riscos a humanos e equipamentos em contato com o pivô. Confirmou-se que a posição do pivô, tipo de solo e o ponto de contato também são fatores que interferem no grau de risco. Em suma, estes resultados podem ser utilizados como referencial para normatização técnica de segurança com aceitável margem de erro.

Os valores obtidos, na ordem das dezenas de volts, estão na margem dos valores de segurança apresentados na norma padrão para as condições simuladas. É importante ressaltar que simulou-se a linha carregada em 345kV, porém em outras condições (mais remotas) podem ocorrer linhas de maior tensão (500kV, 750kV ou acima) e/ou com correntes de surto em situações de maior demanda. Recomenda-se a partir desta pesquisa cautela em proximidade da linha de transmissão. Condições como suor, chuva podem alterar a resistência elétrica do corpo humano e diminuir a margem de segurança. Com segurança, desta pesquisa pode se emitir parecer favorável ao risco para pessoas nas proximidades das linhas quando utilizando pivôs de irrigação. Nesta condição, considerando todos os aspectos agravantes que em geral são fatores incontroláveis, recomenda-se manter pivôs afastados de no mínimo 50 metros de linhas de transmissão com as alturas convencionais investigadas. Os efeitos poderiam ser atenuados a partir de torres portantes de maior altura. Trabalhos futuros poderiam ser desenvolvidos de forma complementar a esta pesquisa no

sentido de investigar os efeitos de anormalidades na linha como surtos e descargas atmosféricas sobre os pivôs, e conseqüentemente sobre pessoas ou equipamentos próximos.

REFERÊNCIAS

AB GHANI, S. et al. Study of magnetic fields produced by transmission line tower using finite element method (FEM). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INFORMATICS, MANAGEMENT, ENGINEERING & ENVIRONMENT, 2., Indonésia. **Proceedings...** Indonésia: IEEE, 2014. p. 64-68.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Projetos pivôs Brasil**. Brasília: ANA, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Capacidade de geração e distribuição no Brasil**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

_____. **Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010**. Regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2010. 10 p.

AMOURA, F. K.; ABU-ELHAIJA, W. S. Time varying magnetic fields under power transmission lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 11., 2011, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: IEEE, 2011. p. 1-5.

ANDERSON, J. G.; HAGENGUTH, J. H. Magnetic fields around a transmission line tower. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III. Power Apparatus and Systems**, New York, v. 77, n. 3, p. 1644-1649, Apr. 1958.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5422**: projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 58 p.

BAENA, J. D. et al. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, New York, v. 53, n. 4, p. 1451-1461, Apr. 2005.

BORGES, C. L. T. **Análise de sistemas de potência**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2005.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Critérios de interferências com faixas de linhas de distribuição e transmissão**. Belo Horizonte: Cemig, 2005. Nota técnica.

CONTI, A. R. **Modelos para definição de ondas de corrente e tensão representativas das solicitações de sistemas de distribuição por descargas atmosféricas**. 2006. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlos: EDUSP, 2007. 378 p.

DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Segurança em trabalhos com eletricidade. **O Setor Elétrico**, São Paulo, n. 65, jun. 2011. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/seguranca-em-trabalhos-com-eletricidade/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **The inside of a wind turbine**. Washington: EERE, 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ENGSTROM, S. Physical mechanisms of non-thermal extremely-low-frequency magnetic-field effects. **URSI Radio Science Bulletin**, Canadá, v. 2004, n. 311, p. 95-106, Dec. 2004.

EQUIPAMENTO CO. DAS ENERGIAS HIDRÁULICAS DE FOSHAN XIN YI. **Turbina de Pelton Jato**. China: Foshan Xin Yi Hydropower Equipment, 2017. Disponível em: <<http://portuguese.smallhydroturbines.com/sale-4351331-single-jet-pelton-water-turbine-small-hydroelectric-generator-for-power-station.html>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

FÓRUM AGRICULTURA IRRIGADA. 7 melhores imagens. **Pinterest**, São Paulo, 2018. Disponível em <<https://br.pinterest.com/forumagirrigada/f%C3%B3rum-agricultura-irrigada/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

GABRIEL, C. et al. The European pre-standard ENV 50166 human exposure to electromagnetic fields in context. In: BERSANI, F. (Ed.). **Electricity and magnetism in biology and medicine**. Boston: Springer, 1999. p. 73-76.

GAMBERALE, F. et al. Acute effects of ELF electromagnetic fields: a field study of linesmen working with 400 kV power lines. **Occupational and Environmental Medicine**, London, v. 46, n. 10, p. 729-737, Oct. 1989.

GANZELL, B. **Central pivots take over**. Nebraska: Wessels Living History Farm, 2006.

GOOGLE EARTH. **Dados do mapa**. Neponuceno, 2018. Disponível em: <maps.google.com>. Acesso em: 17 maio 2018.

GRID-ON PV power plants. **Rentechno**, Ukraine, 2018. Disponível em: <<https://rentechno.ua/en/solar/utility-scale.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

HAYT JÚNIOR, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Bookman, 2013. 574 p.

INKIS, W. V. Demonstrations to public of EHV transmission line effects. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-97, n. 2, p. 438-443, Mar./Apr. 1978.

INSTALLATION instructions for the SS49/SS19 series analog position sensors. **Honeywell**, Canadá, n. 4, p. 1-4, 2004.

KALA, R.; SHULKLA, Anupam; TIWARI, Ritu. Fuzzy neuro systems for machine learning for large data sets. In: INTERNATIONAL ADVANCE COMPUTING CONFERENCE, 2009, Índia. **Proceedings...** Índia: IEEE, 2009. p. 541-545.

KHAYAM, U. et al. Magnetic field analysis of 150 kV compact transmission line. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND POWER SYSTEMS, 2017, Bali. **Proceedings...** Bali: IEEE, 2017. p. 528-531.

KREBSFER INDUSTRIAL. **Manual técnico do pivô Krebsfer**. Valinhos: Krebsfer Industrial, 2014. 65 p.

KUNSCH, B. **The European pre-standard ENV 50166" human exposure to electromagnetic fields" in perspective.** Áustria: Austrian Research Centre Seibersdorf, 1996. 14 p.

LA CORROSIÓN y su efecto en los Pivots centrales. **Traxco**, Zaragoza, Mayo 2011. Disponível em: <<https://www.traxco.es/blog/pivotes-de-riego/corrosion>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

LACERDA, M. Área irrigada com pivô central cresce 32% no Brasil. **Canal Rural**, Cristalina, 2015. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/alerta-do-campo/area-irrigada-com-pivo-central-cresce-brasil-55309>>. Acesso em: 15 out. 2017.

LAFOREST, J. J. (Ed.). **Transmission line reference book - 345 kV and above.** 2. ed. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1987. 625 p.

LIMA, L. A.; CUSTODIO, A. A. de P.; GOMES, N. M. Produtividade e rendimento do cafeeiro nas cinco primeiras safras irrigado por pivô central em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1832-1842, nov./dez. 2008.

MARUVADA, P. S. **Corona performance of high-voltage transmission lines.** Baldock, UK: Research Studies Press, 2000. 310 p.

MATICK, R. E. **Transmission lines and communication networks: an introduction to transmission lines, high-frequency and high-speed pulse characteristics and applications.** New York: Wiley-IEEE Press, 2000. 388 p.

MCCAULEY, T. M. EHV and UHV electrostatic effects: simplified design calculations and preventive measures. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 94, n. 6, p. 2057-2073, Nov. 1975.

MEDEIROS, A. C. de M. **Otimização de sistema de irrigação por aspersão pivô central.** 2010. 131 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

MENEZES, V. P. de. **Linhas de transmissão de energia elétrica: aspectos técnicos, orçamentários e construtivos.** 2015. 77 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MURPHEY, Y. et al. A fuzzy system for fault diagnostics in power electronics based brake-by-wire system. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE NORTH AMERICAN FUZZY INFORMATION PROCESSING SOCIETY, 2005, Detroit. **Proceedings...** Detroit: IEEE, 2005. p. 326-331.

NASCIMENTO, C. et al. Técnica de mitigação de campo magnético originado por linhas de transmissão aéreas. **Interação: revista de ensino, pesquisa e extensão**, Varginha, v. 19, n. 1, p. 175-192, 2013.

NAZARCIK, T.; MUZIK, V. Modelling of the mutual influence of the parallel AC/DC circuits on the hybrid power transmission line. In: IEEE CONFERENCE OF RUSSIAN YOUNG RESEARCHERS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2018, Moscow. **Proceedings...** Moscow: IEEE, 2018. p. 731-736.

OLIVEIRA, T. de; MEDEIROS JÚNIOR, F. de; PIRES, A. A. da S. Modelo matemático para cálculo do acoplamento magnético entre os sistemas de distribuição em 69kV da COSERN e Redes de Distribuição Urbana de Água e Gás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBSE, 1012.

PENTEADO NETO, R. de A. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2005. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

QUEIROZ, T. M. de. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

RADWN, R. M.; SAMY, M. M. Calculation of electric fields underneath six phase transmission lines. **Journal of Electrical Systems**, New York, v. 12, n. 4, p. 839-851, Dec. 2016.

RAHMAN, N. A. et al. Magnetic fields from a scaled down model transmission line-simulation and comparison to measurements. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON APPLIED ELECTROMAGNETICS, 2005, Melaka. **Proceedings...** Melaka: IEEE, 2005. p. 1-5.

ROBERTS IRRIGATION. **Standard center pivot system operator's manual**. Deshler: Reink, 2018. 55 p.

RODRIGUES, H. V. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 2013. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2004. 683 p.

SALAM, G. A. Measurements of magnetic fields due to the operation of distribution transformers and transmission lines. In: IEEE PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006. **Proceedings...** Atlanta: IEEE, 2006. p. 246-251.

SCHONS, R. L. **Avaliação de parâmetros de desempenho de sistemas de irrigação por pivô central visando sua otimização operacional**. 2006. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SENDAULA, M. et al. Analysis of electric and magnetic fields measured near TVA'S 500-kV transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-103, n. 2, p. 328-336, Feb. 1984.

SHAH, J. Z.; BT SALIM, N. A fuzzy kohonen SOM Implementation and clustering of bio-active compound structures for drug discovery. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND BIOINFORMATICS AND COMPUTATIONAL BIOLOGY, 2006, Toronto. **Proceedings...** Toronto: IEEE, 2006. p. 1-6.

TENFORDE, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. **Annual Review of Public Health**, Palo Alto, v. 13, p. 173-196, 1992.

TESTEZLAF, R. **Irrigação por pivô central: versão 1**. Goiânia: UFG, 2014. 99 p. Notas de aula.

TORTELLI, O. L. **Mini-curso em sistemas elétricos de potência**. Curitiba, 2009.

UNDE, M. G.; KUSHARE, B. E. Analysis of electromagnetic fields of 1200kV UHV-AC transmission lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND COMMUNICATION NETWORKS, 5., 2013, Mathura. **Proceedings...** Mathura: IEEE, 2013. p. 580-584.

VILELA, L. A. A. **Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central**. 2002. 127 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

VISACRO FILFO, S. **Aterramentos elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002. 161 p.

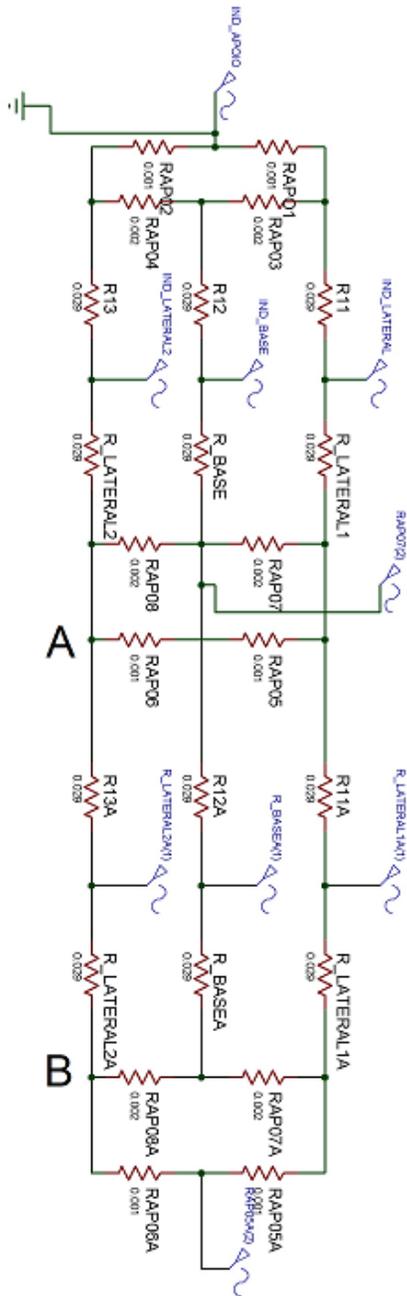
WINBERLEY VALLEY WATERSHED. If you think the water crisis can't get worse, wait until the aquifers are drained. **Winberley Valley**, [S.l.], May 2015. Disponível em: <<http://wimberleywatershednews.blogspot.com/2015/05/if-you-think-water-crisis-cant-get.html>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

YANN ARTHUS-BERTRAND. Disponível em: <www.yannarthusbertrand.org>. Acesso em: 23 ABR. 2018.

ZEPKA, G. dos S. **Estudo para o desenvolvimento de um previsor descargas elétricas atmosféricas aplicado à região costeira do estado do Rio de Janeiro**. 2005. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.

ZYBACH, F. L. **Self-propelled sprinkling irrigation apparatus**. Patente nº 3001821, 24 jun. , 26 set. 1961.

APÊNDICE A - DIAGRAMA CIRCUITAL PARA O PIVÔ DUPLO



APÊNDICE B - ROGRAMA DESENVOLVIDO PARA O LEITOR DE CAMPO MAGNÉTICO PARA O EXPERIMENTO EM ESCALA

```

#include <18f4553.h>
#device adc=10
#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES HS              //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES PUT             //Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT      //Code not protected from reading
#FUSES NODEBUG        //No Debug mode for ICD
#FUSES BROWNOUT       //Brownout reset
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used
for I/O
#FUSES NOCPD          //No EE protection
##FUSES WRT_50%       //Lower half of Program Memory is Write Protected
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#use delay(clock=1000000)
#use rs232(baud=9600,xmit=PIN_D1,rcv=PIN_C7, BITS = 8,PARITY = N)

float lambda;
long i;
float p;
float pmax;

float graph(float l)
{
float y;
l=l*66.7;

```

```
l=1/1000;
l=1-166.7;

y=l;

return y;
}

long converte(unsigned int canal)
{
long v;
set_adc_channel(canal);
delay_us(10);
v=read_adc();
delay_us(10);
v=v*5;
delay_us(10);
return v;
}

void main()
{
setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_psp(PSP_DISABLED);
setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
setup_timer_1(T1_DISABLED);
setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
setup_vref(FALSE);
```

168

```
output_high(PIN_B4);
delay_ms(2000);
putc(13); //Move o cursor para a primeira posição da próxima linha e reconhece a
velocidade que você está trabalhando
putc(12); //Apaga a tela e move o cursor para a primeira posição da tela
putc(14); //Liga o backlight
putc(27); //Espera comando gráfico
putc('V'); //Ajusta contraste
putc(45); //Contraste
putc(3); //Texto normal, texto preto em fundo branco
printf("Leitor de campo Mag.");
putc(16); //Recebe mais 2 bytes definindo a coluna e a linha para posicionar o cursor.
O valor da coluna pode variar de 0 a 127 e o da linha de 0 a 7
putc(0);
putc(7);
printf("Doc. Israel T. 2018");
delay_ms(2000);
output_low(PIN_B4);
putc(12);

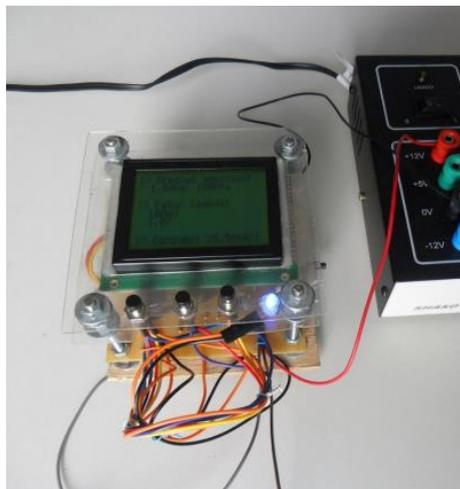
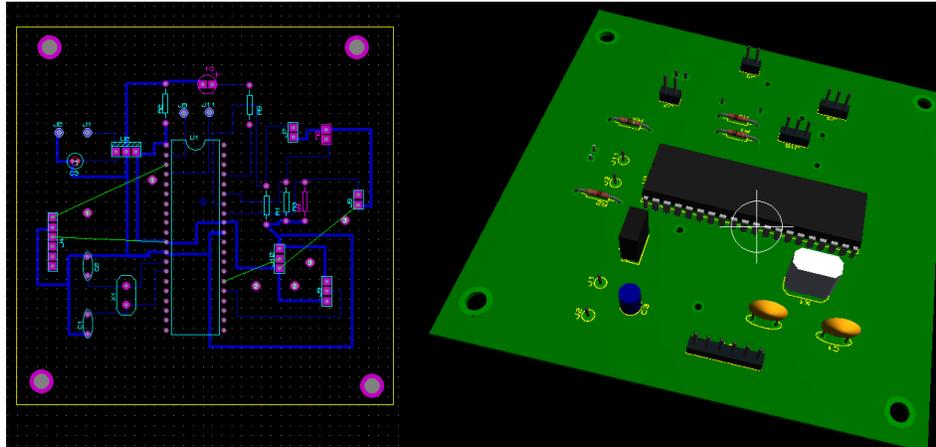
for(;;)
{
putc(12);

putc(27);
putc('L');
putc(0);
putc(45);
putc(127);
putc(45);
```

```
putc(27);
putc('L');
putc(0);
putc(15);
putc(127);
putc(15);

for(i=0; i<128; i++)
{
pmax = 0;
for(i=0; i<17; i++)
{
lambda=converte(0);
if(lambda>4000) lambda=4000;
if(lambda<1000) lambda=1000;
p=graph(lambda);
p=p-7.05;
if (p >= pmax)
pmax = p;
delay_ms(1);
}
pmax = pmax * 0.840;
printf("Lido: %f" , pmax);
printf("mT rms");
putc(13);
delay_ms(700);
putc(12);
}
}
}
```

**APÊNDICE C - ROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO
DESENVOLVIDA PARA O MEDIDOR DE CAMPO NO
EXPERIMENTO EM ESCALA**



**APÊNDICE D - ROGRAMA PARA CÁLCULO DO PERFIL DO CAMPO
MAGNÉTICO (LINGUAGEM R)**

```

zc <- 0
yc <- 0
xcperfil <- vector(length = 101)
xcperfil <- c(-50:50)
Baperfil <- vector(length = 101)

Bcperfil <- vector(length = 101)
Btperfil <- vector(length = 101)

#fiT<-vector(length=360)
altura<-21 #altura da torre
u0<-1.26e-6
Corr<-100000
#altura_triang<-2
#largura_base<-3
#areasessao= (altura_triang * largura_base)/2
teta <- 90

for (index in 1:101)
{
Ias<-Corr*sin(teta/57.2958)
Ibs<-Corr*sin((teta-120)/57.2958)
Ics<-Corr*sin((teta-240)/57.2958)
#Calculando a força eletromotriz na espira formada pela sessão
triangular
#da estrutura (primeira da extremidade)
#Calculando as intensidades de campo magnético no centro da espira
(xp,zp)
Baperfil[index]=(u0*Ias)/(2*pi*sqrt((xcperfil[index]+7)^2+(zc-
altura)^2))
Bbperfil[index]=(u0*Ibs)/(2*pi*sqrt((xcperfil[index])^2+(zc-altura)^2))
Bcperfil[index]=(u0*Ics)/(2*pi*sqrt((xcperfil[index]-7)^2+(zc-
altura)^2))
Btperfil[index]= Baperfil[index] + Bbperfil[index] + Bcperfil[index]

```

172

}

plot((Baperfil))
plot((Bbperfil))
plot((Bcperfil))
plot((Btperfil))

APÊNDICE E - ALORES OBTIDOS NO EXPERIMENTO EM ESCALA

Lateral do Pivô		
Indice	Valor (mV)	Fases
1	4,12	1
2	4,75	1
3	5,4	1
4	6,21	1
5	7,16	1
6	7,5	1
7	8,16	1
8	8,78	1
9	9,1	1
10	9,47	1
11	9,75	1
12	10,2	1
13	10,3	1
14	10,4	1
15	10,4	1
16	10,5	1
17	10,3	1
18	10,3	1
19	10,4	1
20	10,3	1
21	10,2	1
22	10,1	1
23	10	1
24	9,8	1
25	9,48	1
26	9,3	1
27	9,19	1
28	8,9	1

29	8,83	1
1	11,8	3
2	11,8	3
3	11,4	3
4	10,9	3
5	10,2	3
6	9,63	3
7	8,84	3
8	8,07	3
9	7,48	3
10	6,67	3
11	6,17	3
12	5,74	3
13	5,45	3
14	5,11	3
15	4,91	3
16	4,77	3
17	4,71	3
18	4,65	3
19	4,65	3
20	4,55	3
21	4,54	3
22	4,55	3
23	4,47	3
24	4,45	3
25	4,37	3
26	4,24	3
27	4,25	3
28	4,1	3
29	4,2	3

Lateral do Pivô		
Indice	Valor (mV)	Fases
1	12,5	1
2	11,2	1
3	10,3	1
4	9,3	1
5	8,24	1
6	7,71	1
7	7,3	1
8	6,61	1
9	5,87	1
10	5,54	1
11	5,26	1
12	5,06	1
13	4,82	1
14	4,52	1
15	4,52	1
16	4,26	1
17	4,21	1
18	4,22	1
19	4,26	1
20	4,14	1
21	4,13	1
22	4,12	1
23	4,05	1
24	4,06	1
25	4,07	1
26	4,14	1
27	4,14	1
28	4,11	1
1	8,52	3

2	7,58	3
3	7,17	3
4	6,64	3
5	6,05	3
6	5,7	3
7	5,43	3
8	5,12	3
9	5,01	3
10	4,95	3
11	4,94	3
12	5,03	3
13	5,26	3
14	5,45	3
15	5,72	3
16	6,05	3
17	6,27	3
18	6,68	3
19	6,71	3
20	6,76	3
21	6,8	3
22	6,94	3
23	6,92	3
24	6,7	3
25	6,61	3
26	6,5	3
27	6,28	3
28	6,14	3
29	5,91	3
30	5,75	3
31	5,73	3

Apoio		
Indice	Valor (mV)	Fases
1	16,6	1
2	16,5	1
3	16,1	1
4	15,9	1
5	15,4	1
6	15,1	1
7	14,5	1
8	14,1	1
9	13,54	1
10	12,7	1
11	12,3	1
12	11,8	1
13	11,2	1
14	11	1
15	10,4	1
16	10,1	1
17	9,81	1
18	9,47	1
19	9,21	1
20	8,7	1
21	8,61	1
22	8,44	1
23	8,27	1
24	8,1	1
25	7,94	1
26	7,77	1
27	7,55	1
28	7,44	1
29	7,31	1
30	7,17	1
31	7,18	1

1	5,64	3
2	5,55	3
3	5,79	3
4	5,95	3
5	6,2	3
6	6,59	3
7	6,95	3
8	7,25	3
9	7,44	3
10	7,73	3
11	7,83	3
12	7,79	3
13	7,74	3
14	7,56	3
15	7,37	3
16	7,17	3
17	7,02	3
18	6,7	3
19	6,47	3
20	6,23	3
21	5,94	3
22	5,7	3
23	5,58	3
24	5,42	3
25	5,29	3
26	5,15	3
27	5,01	3
28	4,81	3
29	4,82	3
30	4,7	3
31	6,65	3