



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO

ESTUDO E MAPEAMENTO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS, NA FAIXA DE 60
Hz, EM UMA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO E EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE 230 kV

MOSSORÓ

2019

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO

ESTUDO E MAPEAMENTO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS, NA FAIXA DE 60
Hz, EM UMA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO E EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE 230 kV

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr.

Co-orientador: Idalmir de Souza Queiroz Junior, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F475e Figueiredo, Ana Luiza de.
Estudo e mapeamento de campos eletromagnéticos, na faixa de 60 Hz, em um subestação de alta tensão e em linhas de transmissão de 230 kV / Ana Luiza de Figueiredo. - 2019.
158 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

1. Campo elétrico. 2. Campo magnético. 3. Subestações de Energia. 4. Linhas de Transmissão. 5. Exposição Eletromagnética. I. Andrade, Humberto Dionísio de, orient. II. Queiroz Júnior, Idalmir de Souza, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO

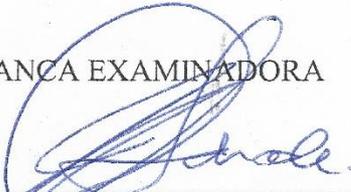
ESTUDO E MAPEAMENTO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS, NA FAIXA DE
60HZ, EM UMA SUBESTAÇÃO DE ALTA TENSÃO E EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE 230KV

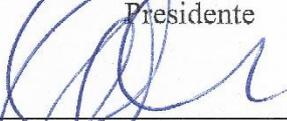
Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

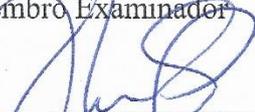
Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

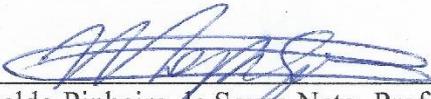
Defendida em: 12 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA


Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente


Idalmir de Souza Queiroz Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


José Lucas da Silva Paiva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto, Prof. Dr. (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas oportunidades com que me presenteou e que me permitiu chegar até esse momento;

Agradeço a minha mãe, Maria Elisabeth, que sempre foi sinônimo de força e garra, na qual me espelho;

Agradeço ao Prof. Humberto, por si arriscar junto comigo nesta empreitada na busca do título de mestre, por todas as orientações e conselhos;

Agradeço ao co-orientador, Prof. Idalmir e aos demais membros da banca examinadora pela disponibilidade e pelas contribuições para melhoria do trabalho;

Agradeço aos profissionais da subsidiária de energia elétrica que operam as Linhas de Transmissão e a Subestação deste estudo, por compartilhar conhecimentos e dados, mesmo que de forma anônima.

Agradeço aos amigos do CITED pelas palavras de estímulo e compartilhamento de conhecimento;

E, por último, agradeço ao meu marido e companheiro de vida, Rene Luz, por suportar a ausência, pelas palavras de conforto e por sempre segurar minha mão, nos momentos de dificuldade.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Para atender à crescente demanda por energia elétrica, os sistemas de transmissão brasileiro têm sido expandidos e, cada vez mais, é comum encontrar linhas de transmissão e subestações em alta tensão junto ao traçado urbano. Paralelamente, há uma preocupação da comunidade científica quanto ao nível de exposição a campos eletromagnéticos e possíveis efeitos na saúde humana, a qual estão sujeitos os indivíduos que transitam, residem ou trabalham em torno destes empreendimentos de energia elétrica. Diante disso, este trabalho tem como objetivo estudar a distribuição de campos eletromagnéticos no interior de uma subestação abaixadora de 230 kV/69 kV, que opera na faixa de frequência extremamente baixa (ELF), em 60 Hz, bem como nas linhas de transmissão em 230 kV que antecedem essa subestação, localizados na cidade de Mossoró-RN. Para tanto, medições, *in loco* da intensidade dos campos elétricos e campo magnéticos, mediante o uso de um medidor de características isotrópica indutiva e de espaço livre, na faixa central de frequência em 60 Hz, foram realizadas próximo aos equipamentos da subestação e na faixa de servidão das linhas de transmissão, em pontos previamente estabelecidos, respeitando a altura, direções e orientações da principais normas e literatura da área, em âmbito nacional e internacional. Os resultados obtidos durante as medições foram, posteriormente, aplicados no *software Golden Surfer*®, com a finalidade de expor a distribuição espacial, através de mapas de contorno, visando facilitar o entendimento e a visualização dos locais de maior intensidade de campos elétricos e magnéticos e o comportamento destes ao redor dos equipamentos e, de forma geral, no interior da subestação em questão e ao longo da linha de transmissão. Estes mapas foram desenvolvidos a partir de técnicas de interpolação e validações estatísticas, que permitiram a obtenção de resultados satisfatórios, mediante o comportamento dos dados. Finalmente, os valores medidos e interpolados foram comparados com os estabelecidos pelas normas regulamentadoras e diretrizes de renome, para averiguar se os níveis máximos de exposição nesta região estão dentro dos limites seguros de campo elétrico e magnético.

Palavras-chave: Campo Elétrico. Campo Magnético. Subestações de Energia. Linhas de Transmissão. Exposição Eletromagnética.

ABSTRACT

To meet the growing demand for electricity, Brazilian transmission systems have been expanded and increasingly it is common to find high voltage transmission lines and substations along the urban layout. At the same time, there is a concern from the scientific community regarding the level of exposure to electromagnetic fields and possible effects on human health, which are subject to individuals who transit, reside or work around these electric power enterprises. Therefore, this work aims to study the distribution of electromagnetic fields within a 230 kV / 69 kV step-down substation, which operates in the extremely low frequency range (ELF), at 60 Hz, as well as in the 230 kV transmission lines that precede this substation, in the city of Mossoró - RN. For this purpose, on-site measurements of the intensity of the electric fields and magnetic fields using an inductive and free space isotropic characteristics meter in the 60 Hz central frequency range, were performed near the substation equipment and in the easement range of the transmission lines, in previously established points, respecting the height, directions and orientations of the main norms and literature of the area, in national and international scope. The results obtained during the measurements were later applied in the Golden Surfer® software, with the purpose of exposing the spatial distribution through contour maps, to facilitate the understanding and visualization of the most intense places of electric and magnetic fields and their behavior around the equipment and generally within the substation in question and along the transmission line. These maps were developed using interpolation techniques and statistical validations, which allowed to obtain satisfactory results, through the data behavior. Finally, the measured and interpolated values were compared with those established by the renowned regulatory standards and guidelines to determine if the maximum exposure levels in this region are within safe limits of the electric and magnetic field.

Keywords: Electric field. Magnetic field. Power Substations. Transmission lines. Electromagnetic exposure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia clássica de um SEP.....	22
Figura 2 - Sistema Interligado Nacional (SIN).....	27
Figura 3 - Fluxo de energia elétrica entre subsistemas.....	28
Figura 4 - Componentes básicos de uma LT.....	30
Figura 5 - Típicas torres treliçadas (a) circuito único horizontal; (b) circuito duplo vertical ..	31
Figura 6 - Configurações de um cabo/condutor ACSR.....	33
Figura 7 - Cabo OPGW para linhas de transmissão.....	34
Figura 8 - Isolador de disco e seus componentes.....	35
Figura 9 - Menor distância condutor ao solo.....	36
Figura 10 - Ilustração da faixa de segurança/passagem transversal ao eixo da LT.....	38
Figura 11 - Subestação externa isolada a ar.....	42
Figura 12 - Esquema barra dupla disjuntor simples.....	43
Figura 13 – (a) Diagrama elétrico barra dupla a quatro chaves; (b) Diagrama elétrico barra dupla a cinco chaves.....	44
Figura 14 - Transformador de potência.....	45
Figura 15 - Transformadores de instrumento (a) TC tipo barra; (b) TPC.....	46
Figura 16 - Disjuntor SF ₆ tipo T.....	47
Figura 17 - Chaves seccionadoras: (a) abertura vertical; (b) abertura central; (c) dupla abertura lateral.....	48
Figura 18 - Para raio em uma SE de 230 kV.....	49
Figura 19 - Espectro eletromagnético.....	51
Figura 20 - Distribuição radial de forças entre cargas resultando em um campo elétrico.....	53
Figura 21 - Intensidade de Campo elétrico para diferentes circuitos de transmissão.....	55
Figura 22 - Ilustração da Lei de Biot-Savart.....	56
Figura 23 - Campo magnético expresso em μT para diferentes circuitos de transmissão.....	58
Figura 24 - Densidade de fluxo elétrico, \vec{D}	60
Figura 25 - Ilustração Lei de Faraday.....	62
Figura 26 - Lei de Ámpere.....	62
Figura 27 - Ilustração campo elétrico elipticamente polarizado.....	64
Figura 28 - Mecanismos de interação entre o corpo humano e (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.....	68
Figura 29 - Ilustração perfis lateral e longitudinal ao redor de uma LT.....	74

Figura 30 - Perfil lateral de campo elétrico em condutores de uma LT	75
Figura 31 - Exemplo Mapa de contorno de \vec{E} em uma SE	79
Figura 32 – Etapas de uma interpolação.....	81
Figura 33 - Tipos de amostragem: (a) Aleatória; (b) Sistemática não-linear; (c) Sistemática linear	81
Figura 34 - Triangulação Delaunay	82
Figura 35 - Diagrama de Voronoi.....	83
Figura 36 - Vizinhos Naturais	84
Figura 37 - Passo-a-passo da Interpolação NN	85
Figura 38 - Parâmetros de ajuste de um semivariograma.....	88
Figura 39 - Modelos teóricos de semivariogramas para um mesmo conjunto de dados:.....	89
Figura 40 - Fluxograma da metodologia	92
Figura 41 - Caracterização do ambiente em torno das LTs e da SE.....	93
Figura 42 - Torres e disposição física dos componentes elétricos: (a) Torre treliçada de circuito duplo vertical; (b) Torre treliçada circuito único horizontal	94
Figura 43 - Torres e Linhas de Transmissão no local das medições	95
Figura 44 - Definição dos perfis laterais de medição em torno das LTs	97
Figura 45 - Pontos amostrais sobre a região das LTS	98
Figura 46 - Pátio da SE e subdivisões: (a) Pátio; (b) Pátio subdividido em áreas de 1 a 10	99
Figura 47 - Mapa dos pontos amostrados sobre o pátio da SE.....	100
Figura 48 - Disposições dos equipamentos e condutores de A1	102
Figura 49 - Pontos amostrados sobre A1	102
Figura 50 - Disposições dos equipamentos e condutores de A2	104
Figura 51 - Pontos amostrados sobre A2.....	104
Figura 52- Disposições dos equipamentos e condutores de A3	105
Figura 53 - Pontos amostrados sobre A3.....	106
Figura 54 - Disposições dos equipamentos e condutores de A4	107
Figura 55 - Pontos amostrados sobre a A4.....	108
Figura 56 - Disposições dos equipamentos e condutores de A5	109
Figura 57 - Pontos amostrados sobre A5.....	110
Figura 58 - Disposição de condutores e equipamentos de A6.....	111
Figura 59 - Pontos amostrados sobre A6.....	111
Figura 60 - Disposição de condutores e equipamentos de A7.....	113
Figura 61 - Pontos amostrados sobre A7.....	113

Figura 62 - Disposição de condutores e equipamentos de A8.....	115
Figura 63 - Pontos amostrados sobre A8.....	116
Figura 64 - Disposição de condutores e equipamentos de A9.....	117
Figura 65 - Pontos amostrados sobre A9.....	118
Figura 66 - Disposição de condutores e equipamentos de A10.....	119
Figura 67 - Pontos amostrados sobre A10.....	119
Figura 68 - Medidor utilizado nas medições: (a) <i>Display</i> do TM-190; (b) Disposição correta do equipamento nas medições.	121
Figura 69 – Conjunto medidor, tripé e fita métrica: (a) Durante medições nas LTs; (b) Durante medições na SE.....	122
Figura 70 – Dispositivo GPSmap 78s da GARMIN®	123
Figura 71 - Histograma da frequência com que picos de corrente ocorrem em determinados horários em equipamentos da SE e LTs	124
Figura 72 - Condições climáticas em diferentes dias de medição: (a) Dia 1; (b) Dia 4; (c) Dia 5; (d) Dia 6; (e) Dia 8.	125
Figura 73 – Medições dos CEM em áreas diversas: (a) Eixo da torre 2 circuito duplo; (b) A2: Barramento 230 kV; (c) Leitura medidor TM-190; (d) A4: em torno de T1	126
Figura 74 - Área de trabalho do <i>software Golden Surfer®</i>	127
Figura 75 – Relatório de validação cruzada obtido no <i>Golden Surfer®</i>	128
Figura 76 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P1)	130
Figura 77 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P1).....	130
Figura 78 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P2)	131
Figura 79 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P2).....	132
Figura 80 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P3)	133
Figura 81 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P3).....	133
Figura 82 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P4)	134
Figura 83 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P4).....	135
Figura 84 - Mapa de contorno de campo elétrico.....	137
Figura 85 - Mapa de contorno de campo magnético	138
Figura 86 - Mapa de contorno de campo elétrico.....	141
Figura 87 - Mapa de contorno de campo magnético	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões usuais do sistema de potência brasileiro	23
Tabela 2 - Novas linhas de transmissão construídas (km) em 2017.....	26
Tabela 3 - Distância básica entre condutores e solos em diversos locais.....	36
Tabela 4 - Valores de faixa de passagem para diferentes níveis de tensão	38
Tabela 5 - Classes de tensões para subestações do sistema de transmissão brasileiro.....	41
Tabela 6 - Níveis de referência adotados pela ICNIRP.....	72
Tabela 7 - Níveis de referência adotados pela IEEE	73
Tabela 8 - Níveis de referência adotados pela ANEEL.....	76
Tabela 9 – Níveis de corrente sobre os condutores das LTs durante as medições	96
Tabela 10 - Perfis de medição em torno das LTs	97
Tabela 11 - Amostras por área da SE	100
Tabela 12 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A1	103
Tabela 13 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A3	106
Tabela 14 - Níveis de corrente nos circuitos da área 3 durante as medições	106
Tabela 15 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A4.....	108
Tabela 16 - Níveis de corrente nos circuitos da área 4 durante as medições	109
Tabela 17 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A5.....	110
Tabela 18 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A6.....	112
Tabela 19 - Níveis de corrente nos circuitos da área 6 durante as medições	112
Tabela 20 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A7.....	114
Tabela 21 - Níveis de corrente nos circuitos da área 7 durante as medições	114
Tabela 22 - Níveis de corrente nos circuitos da área 8 durante as medições	115
Tabela 23 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A8.....	116
Tabela 24 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A10.....	120
Tabela 25 - Níveis de corrente nos circuitos da área 10 durante as medições	120
Tabela 26 – Áreas medidas por dia de medições e condições de temperatura e umidade	124
Tabela 27 - Resultados validação cruzada do ambiente eletromagnético I.....	136
Tabela 28 - Comparação dos níveis de referência e as magnitudes de \vec{E} e \vec{B} no ambiente I.	139
Tabela 29 - Resultados validação cruzada do ambiente eletromagnético II.....	140
Tabela 30 – Valores máximos, mínimos e médios de \vec{E} e \vec{B} , obtidos nas medições da SE ...	144
Tabela 31 - Comparação dos níveis de referência e as magnitudes de \vec{E} e \vec{B} no ambiente II	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAC	<i>All Aluminium Conductor</i>
AAAC	<i>All Aluminium, Alloy Conductor</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ABRICEM	Associação Brasileira de Compatibilidade eletromagnética
ACAR	<i>Aluminium Conductor, Alloy Reinforced</i>
ACSR	<i>Aluminium Conductor, Steel Reinforced</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimator</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEM	Campos Eletromagnéticos
CELG	Companhia Energética de Goiás
CH	Chave seccionadora
CM	Curvatura Mínima
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DJ	Disjuntor
EAT	Extra-Alta Tensão
ELA	Esclerose Lateral Amiotrófica
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ELF	<i>Extreme Low Frequency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPTE	Engenharia e Planejamento em Transmissão de Energia
Fem	Força eletromotriz
IARC	<i>International Agency for Research of Câncer</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IDP	Inverso da Distância Ponderada

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
KO	Krigagem Ordinária
LT	Linha de Transmissão
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MSM	Método de Shepard Modificado
MT	Média Tensão
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NRPB	<i>National Radiological Protection Board</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PAR	Plano de Ampliações e Reforça
PET	Programa de Expansão da Transmissão
PR	Para-raio
REN	Resolução Normativa
RMSE	<i>Root Mean Square</i>
SE	Subestações de Energia Elétrica
SEP	Sistema elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNC	Sistema Nervoso Central
SNP	Sistema Nervoso Periférico
Std	<i>Standart</i>
TC	Transformador de Corrente
TLI	Triangulação com Interpolação Linear
TP	Transformador de Potencial
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VP	Vizinho mais próximo
VN	Vizinho Natural
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivo Específicos	21
2	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	22
2.1	O setor elétrico brasileiro	24
2.1.1	Rede Básica do Sistema Interligado Nacional	25
2.1.1.1	Subsistema de Operação Nordeste	27
2.2	Sistemas de Transmissão	29
2.2.1	Linhas de transmissão	29
2.2.1.1	Torres	30
2.2.1.2	Condutores	31
2.2.1.3	Cabos para-raios	33
2.2.1.4	Isoladores	34
2.2.1.5	Outras características técnicas	36
2.2.2	Subestações de energia elétrica	39
2.2.2.1	Classificação das SEs	39
2.2.2.1.1	Quanto a função	40
2.2.2.1.2	Quanto ao nível de tensão	40
2.2.2.1.3	Quanto a configuração e ao meio de isolamento	41
2.2.2.2	Equipamentos de uma SE.....	42
2.2.2.2.1	Barramentos	42
2.2.2.2.2	Transformadores de Potência	44
2.2.2.2.3	TCs e TPs	45
2.2.2.2.4	Disjuntores	46
2.2.2.2.5	Chave seccionadora.....	47
2.2.2.2.6	Para-raios.....	48
3	CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E SEUS EFEITOS	50
3.1	Campo elétrico.....	52
3.1.1	Potencial elétrico	54
3.2	Campo magnético	55
3.3	Equações de Maxwell	58

3.3.1	Lei de Gauss para campos eletrostáticos e magnetostáticos	60
3.3.2	Lei de Faraday	61
3.3.3	Lei de Ampère e contribuição de Maxwell	62
3.4	Outras características	63
3.5	Histórico de pesquisas sobre a exposição a campos eletromagnéticos	64
3.6	Mecanismos de interação e efeitos biológicos observados	67
3.6.1	Efeitos agudos	69
3.6.2	Efeitos crônicos	69
3.7	Normas e legislações.....	70
3.7.1	Diretrizes internacionais.....	70
3.7.1.1	ICNIRP.....	70
3.7.1.2	IEEE <i>std</i> C95.6/2002.....	72
3.7.1.3	IEEE <i>std</i> 644/1994	73
3.7.2	Legislação nacional	75
3.7.2.1	Lei 11.934/2009	75
3.7.2.2	Resoluções da ANEEL.....	76
3.7.2.3	ABNT NBR 25415/2016.....	77
4	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	79
4.1	Amostragem dos dados	81
4.2	Métodos locais de interpolação espacial.....	82
4.2.1	Triangulação com interpolação linear (TLI)	82
4.2.2	Vizinho mais próximo (VP)	83
4.2.3	Vizinho Natural (VN).....	84
4.2.4	Inverso Ponderado da Distância (IDP).....	85
4.2.5	Método de Shepard Modificado (MSM).....	86
4.2.6	Curvatura Mínima	86
4.3	Métodos geoestatísticos	87
4.3.1	Krigagem Ordinária (KO)	87
4.4	Validação Cruzada.....	89
5	MATERIAIS E MÉTODOS	91
5.1	Caracterização dos ambientes eletromagnéticos e definição dos pontos amostrais..	92
5.1.1	Ambiente eletromagnético 1: Linhas de transmissão.....	94
5.1.1.1	Pontos de medição (LT)	96

5.1.2	Ambiente eletromagnético 2: Pátio da subestação	98
5.1.2.1	Área 1: Circuito de alimentação em 230 kV	101
5.1.2.2	Área 2: Barramento em 230 kV	103
5.1.2.3	Área 3: Circuitos de saída em 230 kV	105
5.1.2.4	Área 4: Transformadores e seu entorno em 230 kV	107
5.1.2.5	Área 5: Reator e seu entorno em 230 kV	109
5.1.2.6	Área 6: Circuitos auxiliares em 13,8 kV	110
5.1.2.7	Área 7: Consumidor particular (69 kV/3,3 kV)	112
5.1.2.8	Área 8: Circuitos em 69 kV pré-barra	114
5.1.2.9	Área 9: Barramento em 69 kV	116
5.1.2.10	Área 10: Circuitos de saída em 69 kV	118
5.2	Descrição dos equipamentos de medição	120
5.3	Procedimentos de medição	123
5.4	Mapas de distribuição espacial	127
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	129
6.1	Ambiente eletromagnético I: Linhas de transmissão.....	129
6.1.1	Perfil 1 (P1)	129
6.1.2	Perfil 2 (P2)	131
6.1.3	Perfil 3 (P3)	132
6.1.4	Perfil 4 (P4)	134
6.1.5	Mapas de contorno	135
6.1.6	Análise quanto a exposição humana	138
6.2	Ambiente Eletromagnético II: Pátio da SE	139
6.2.1	Campo Elétrico.....	140
6.2.2	Campo Magnético	142
6.2.3	Análise quanto a exposição humana	144
7	CONCLUSÕES.....	146
7.1	Trabalhos Futuros.....	148
	REFERÊNCIA.....	149
	APÊNDICE A – PLANTA LAYOUT DO PÁTIO DA SUBESTAÇÃO	157
	ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO	158

1 INTRODUÇÃO

Campos eletromagnéticos (CEM) são capazes de se propagarem em um determinado meio físico, como o espaço livre, em diferentes faixas de frequência, a partir de fontes naturais, como o núcleo da Terra ou Sol, ou de fontes artificiais, como telefones celulares, rádios e até mesmos equipamentos que compõem as redes elétricas de energia, como linhas de transmissão, transformadores etc. Dessa forma, é possível dizer que toda a população humana se encontra constantemente exposta a uma mistura complexa de radiações eletromagnéticas, em diversas faixas de frequências, geradas naturalmente ou devido à crescente evolução tecnológica (WHO, 2002). Entre estas faixas de frequência, há fontes que se propagam em *Extreme Low Frequency* (ELF), como os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) que operam a 60 Hz.

O SEP é constituído de sistemas de geração, transmissão e distribuição, sendo os sistemas de transmissão composto, prioritariamente, por Linhas de Transmissão (LTs) e Subestações de Energia (SEs) (STEVENSON JR, 1955).

Em geral, estruturas como subestações em alta tensão, bem como as linhas de potência, podem ser definidas como estruturas complexas, que independentemente do tipo ou condições de trabalho (se são de transmissão, distribuição, etc.) são constituídas de uma ampla gama de componentes elétricos, como, transformadores, disjuntores, chaves, barramentos etc., que atuam, por sua vez, como concentradores de campo eletromagnético (PURCAR et al, 2016), uma vez que cada equipamento possui um funcionamento próprio, cuja constituição se baseia em princípios eletromagnéticos.

Neste contexto, desde que um estudo epidemiológico pioneiro, relacionou a intensidade de campos eletromagnéticos oriundos de linhas de transmissão, a possíveis casos de leucemia em crianças (WEITHEMER; LEEPER, 1979), a comunidade científica tem sido alarmada quanto a necessidade de conduzir estudos sobre o comportamento dos CEM e as possíveis interações do mesmo com o ambiente ao seu redor, principalmente, com organismos vivos, como o corpo humano.

Surge assim diversos grupos de estudos com foco em entender estes mecanismos de interação, como também definir níveis seguros de exposição eletromagnética, tendo respaldo internacional, os grupos conduzidos por membros dos órgãos como a *International Agency for Research of Cancer* (IARC), o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e a Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP).

A diretriz da ICNIRP (2010) estipula os limites de intensidade máxima de campo elétrico (kV/m) e campo magnético (μT) para campos em ELF, a qual os indivíduos podem

estar expostos sem comprometimento de nenhuma função do organismo, são os denominados níveis de referência. Tais parâmetros foram determinados com bases em restrições básicas adotadas após resultados dos inúmeros estudos conduzidos ao redor do mundo, e, atualmente, reconhecida e indicada como diretriz básica pela IARC e pelo órgão máximo de saúde, a Organização Mundial de Saúde (OMS).

Porém, tais restrições básicas, e conseqüentemente, níveis de referência, são determinados apenas em relação a uma exposição de curto prazo, uma vez que, para comunidade científica, os resultados, principalmente, os atrelados a câncer e a efeitos a longo prazo são dados como inconsistentes, trazendo mais complexidade ao assunto e, portanto, constatando a importância de prosseguimento no debate público (SAFIGIANNI; TSOMPANIDOU, 2009).

Diante disso, entende-se que os campos eletromagnéticos provenientes de uma subestação de energia e de uma linha de transmissão, integrante do SEP, afetam a população circunvizinha ou que transite em seus arredores, como também, e de maneira mais intensa, a população que exerce atividades profissionais no seu interior, tida como população ocupacional, visto que a mesma, está mais próxima e em constante contato, até mesmo, físico, com os equipamentos em questão, durante as rotinas operacionais e de manutenções.

Em solo brasileiro, a Lei nº 11.934/2009, torna a responsabilidade de fiscalização de todas as unidades geradores, transmissoras e/ou distribuidoras de energia, competência da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2009). De modo, que essa entidade através da REN nº 318 (2010) e a REN nº 616 (2014) determina que todas essas unidades verifiquem os níveis de exposição a qual estão submetidas a população que circula no seu interior e nas proximidades, conforme o estabelecido pela a OMS e pela ICNIRP.

Todavia, os valores de intensidade de campo elétrico (kV/m) e campo magnético (μT), nas proximidades dos principais equipamentos que compõem a subestação de energia elétrica e sob uma linha de transmissão, são determinados com base em cálculos ou medições.

No caso de medições *in loco*, as orientações da ABNT NBR 25415/2016 devem ser observadas, como também diretrizes internacionais de maior reconhecimento, como a IEEE Std 644/1994 que discorre sobre técnicas de medições, exclusivamente, para CEM sob linhas de transmissão em corrente alternada, além das indicações dos estudos e pesquisas da área.

Um medidor isotrópico em espaço livre, com uma faixa de banda estreita e que opere em 60 Hz, como o TM-190 da TENMARS, em conjunto com um dispositivo georreferenciador, como o GPSmap 78s da GARMÍN, permite que pontos amostrais, previamente escolhidos, sob

a região da subestação e da linha de transmissão, sejam geograficamente posicionados e registrados quanto aos níveis de campo elétrico e campo magnético.

A partir deste levantamento e o uso de um *software* geoestatístico, como o *Golden Surfer*®, que fornece gráficos, curvas e mapas de distribuição espacial com base em técnicas de interpolação, é possível obter valores de campo elétrico e magnético em pontos que não foram amostrados, permitindo uma investigação completa sobre o comportamento de cada campo em relação a sua distribuição geográfica na região, isto é, permite a análise dos perfis de campos em razão da distância do equipamento ou conjuntos de equipamentos, segundo o arranjo da subestação e alocação da LT, por toda a área/região em que estes equipamentos estão contidos, mesmo em locais em que a medição não tenha sido realizada, desde que os pontos amostrados estejam próximos e contidos na região.

Há diversas técnicas de interpolação voltada a estatística espacial, a escolha da melhor técnica será feita com base na técnica de validação cruzada e obtenção de menor erro quadrático médio (*Root-mean-square (RMSE)*) e erro absoluto médio (*Mean Absolute Error (MAE)*). Entre os métodos, há os determinísticos, como Vizinho Natural, Triangulação etc. e os geoestatísticos, como a Krigagem.

Tendo em vista, que no Brasil, os sistemas de transmissão e seus componentes, operam em tensões de 230 kV a 800 kV, classificadas como alta tensão e são continuamente expandidos em função da crescente demanda por energia elétrica no país (BRASIL, 2018), tornando comum vivenciar LTs e SE, nestas classes de tensão, próximo a áreas densamente povoadas, como centros urbanos. Este trabalho busca a determinação dos níveis de CEM e sua distribuição espacial no ambiente interior de uma subestação abaixadora de 230 kV/69 kV, composta por inúmeros equipamentos elétricos (barramentos, para raios, transformadores etc) que agem como fontes eletromagnéticas, bem como ao redor das linhas de transmissão em 230 kV que a alimenta, localizada na zona urbana da cidade de Mossoró – RN, visando a análise tanto dos níveis de exposição da população em geral que vive e circula próxima a esta LT, quanto da população ocupacional que possuem habilitação para exercer suas atividades profissionais no interior da subestação em questão, permitindo a averiguação se estes níveis, tanto para população geral, quanto ocupacional, estão em concordância com as regulamentações adotadas no Brasil e no mundo, e se, neste panorama, ambas as populações estão com seu direito de proteção à saúde e ao meio ambiente garantidos, conforme o estabelecido na Lei 11.934/2009.

Para tanto, o capítulo 2 deste trabalho realiza uma revisão bibliográfica da hierarquia de funcionamento do setor elétrico brasileiro, bem como dos principais componentes elétricos que

constituem uma linha de transmissão e uma subestação de energia elétrica, e, por conseguinte, atuam como fontes eletromagnéticas nestes ambientes.

Já o capítulo 3, esclarece a propagação dos campos eletromagnéticos advindos dessas fontes e seu comportamento na região, como também uma breve explanação sobre o estado atual do debate sobre a exposição a campos eletromagnéticos e possíveis efeitos sob à saúde humana, explicando os mecanismos de interação destes com o corpo humano, os efeitos reconhecidos e não-reconhecidos, as normas e diretrizes nacionais e internacionais vigentes.

No capítulo 4 são apresentados os métodos de interpolação aplicados neste trabalho para a obtenção dos mapas de distribuição espacial de campo elétrico e magnético nas regiões de estudo. Além disso, nesse capítulo, a abordagem de validação cruzada e os parâmetros estatísticos que auxiliaram na escolha do melhor método de interpolação para os dados amostrados será, brevemente, demonstrada.

O capítulo 5 caracteriza as regiões de estudo em ambientes eletromagnéticos, esclarecendo, detalhadamente, cada tipo de fonte que os constituem, além de estabelecer o método de coleta de dados e o software computacional que permitirá a obtenção dos mapas.

No capítulo 6, os resultados obtidos após as medições e interpolação foram discutidos e analisados em termos de limites de exposição segura a campos eletromagnéticos e comportamento dos campos ao redor das fontes, bem como a consistência dos dados obtidos.

E, por último, o capítulo 7 apresenta as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar, por meio de medições *in loco* e técnicas de interpolação numérica, a intensidade dos campos elétricos (kV/m) e magnéticos (μT) ao qual estão expostos a população ocupacional que atuam no interior da subestação de 230 kV/69 kV e próximo à linha de transmissão em 230 kV, bem como a população geral que circule nos perímetros ou arredores da subestação e desta mesma linha de transmissão, com o objetivo de averiguar se estão em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais vigentes e analisar o comportamento dos perfis de campos eletromagnéticos e sua distribuição espacial ao redor das fontes eletromagnéticas que compõem o ambiente.

1.1.2 Objetivo Específicos

Para atender o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Compreender os componentes básicos de uma SE e de uma LT, bem como a propagação e comportamento dos campos elétrico e magnético ao redor de cada componente;
- Delimitar os efeitos reconhecidos de radiações não ionizantes sobre o corpo humano, com base na literatura da área;
- Definir os níveis de tolerância determinados nas normas vigentes nacionais e internacionais;
- Realizar medições no interior da SE, em lugares previamente escolhidos, de acordo, com a forma de alocação dos equipamentos;
- Realizar medições em pontos igualmente espaçados, ao longo da faixa de servidão da LT;
- Efetuar estudos de modelos de interpolação espacial;
- Confeccionar um mapa de contorno em torno das fontes eletromagnéticas;
- Verificar a compatibilidade dos valores obtidos com a medição e os indicados nas normas e literatura da área;
- Analisar o comportamento dos CEM no ambiente, tendo em vista, a proximidade e características de operação de cada equipamento.

2 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

De maneira geral, a definição de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) abrange instalações e equipamentos elétricos que constituem os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (GONËN, 2008). Cujas funções principais são prover formas de conversão e transporte de energia (STEVENSON Jr., 1955).

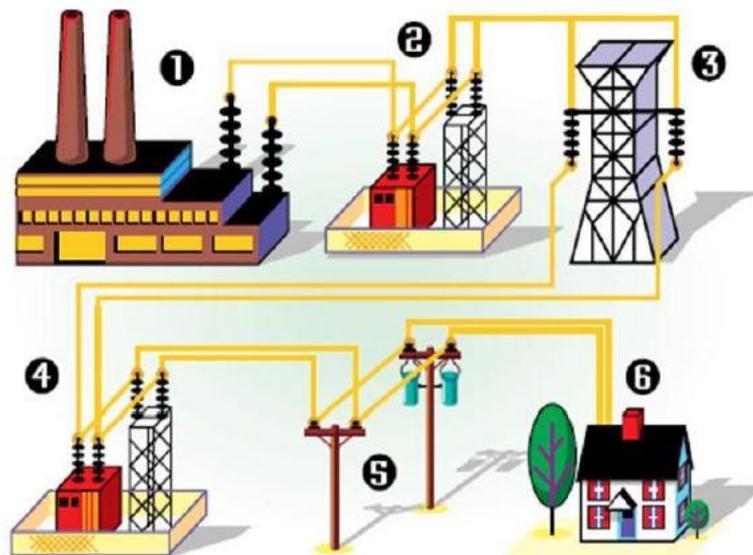
Devido a uma multiplicidade de razões, sejam elas econômicas, ambientais ou de confiabilidade, comumente, a energia elétrica não é produzida próxima ao consumidor final (SKVARENINA; DEWITT, 2004).

Com os centros de produção distante dos centros de consumo, há a necessidade de elementos capazes de transportar esta energia, que, entre outras características, é inviável através das tensões de geração (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

No percurso normal que a energia elétrica percorre até o seu uso final, diz-se que a eletricidade é gerada, em seguida, tem seu nível de tensão elevado por uma subestação transformadora, sendo posteriormente transmitida e depois rebaixada pelo sistema de distribuição, a um valor muito próximo do utilizado pelo consumidor comum (SKVARENINA; DEWITT, 2004).

A Figura 1 apresenta a topologia clássica de um SEP com seus componentes básicos e, ilustra o caminho comum que a energia elétrica percorre até o seu uso final.

Figura 1 - Topologia clássica de um SEP



Fonte: Adaptado de Krieg (2014).

- Onde: 1 – Usina geradora;
 2 – Subestação transmissão/elevadora (MT/AT);
 3 – Rede de transmissão;
 4 – Subestação distribuição/abaixadora (AT/MT);
 5 – Rede de distribuição;
 6 – Consumidor comum (BT).

As usinas geradoras, são grandes instalações, também denominadas de centrais de geração, que por meio de subestações transformadoras têm seus geradores conectados à rede elétrica (MCDONALD, 2012). As subestações responsáveis por esta conexão entre geradores e cargas, juntamente com as Linhas de Transmissão (LTs) constituem os sistemas de transmissão, que em sua grande maioria é em Corrente Alternada (CA) e trifásico (GRIGSBY, 2012). Enquanto que o sistema de distribuição refere-se a parte que transforma a energia elétrica da malha de alta tensão, advinda pelos circuitos de transmissão em tensões, geralmente entre 35 kV e 230 kV, e entrega aos cliente, em níveis que podem variar entre 600 V a 35 kV, sendo ainda rebaixada, através da rede de distribuição para um circuito secundário de baixa tensão, geralmente entre 120 V e 240 V, que se conecta, aos consumidores finais na entrada de serviço (SHORT, 2004).

A elevação e redução dos níveis de tensão se dão nas denominadas classes de tensão. No Brasil, as classes de tensão padronizadas para o sistema elétrico de potência e seus respectivos níveis de tensão nominal, podem ser observadas na Tabela 1, bem como a área de operação no SEP, isto é, sua classificação nos sistemas.

Tabela 1 - Tensões usuais do sistema de potência brasileiro

Tensões padronizada (kV)	Campo de aplicação/ classe de tensão	Classes de operação
0,220/0,127	Distribuição Secundária (BT)	Distribuição
0,338/0,220		
13,8	Distribuição Primária (MT)	
34,5		
34,5	Subtransmissão (AT)	
69		
138		
138	Transmissão (AT/EAT)	
230		
345		
500		

Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2005).

Diante disso, surge a indispensabilidade do uso de redes elétricas e de estações transformadoras de tensão, denominadas subestações de energia elétrica, que juntos formam os equipamentos básicos de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), uma vez que, são estes os componentes elétricos que estão entre todas as classes de tensão, interligando todo o sistema. Pela Tabela 1, entende-se que a tensão de 230 kV, classe de tensão do objeto deste estudo, integra os sistemas de transmissão.

Visando facilitar a posterior caracterização do objeto deste estudo, as subseções seguintes introduzirão a estrutura de comando e operação do setor elétrico brasileiro, bem como os equipamentos elétricos que constituem as subestações de energia elétrica em alta tensão e linhas de transmissão que formam o sistema de transmissão, de modo, que se possa compreender as funções e a importância de cada equipamento para o sistema e suas respectivas alocações no setor elétrico brasileiro.

2.1 O setor elétrico brasileiro

O setor elétrico brasileiro pode ser caracterizado, atualmente, como um sistema de grande porte e de múltiplos proprietários, abastecido, principalmente, por fontes hidrelétricas, térmicas e eólicas, sendo a maior contribuição vinda do primeiro tipo (ONS, 2018).

Desde a década de 90, o setor passou por mudanças institucionais que culminaram em um modelo estrutural mais libertário e competitivo, como a privatização das companhias elétricas, mas que mantém o estado como responsável pelo planejamento estratégico do setor, tendo em vista aspectos como garantia de suprimento, com qualidade e confiabilidade e inserção social através de modalidades tarifárias (ANEEL, 2008).

Entre outros aspectos, de 2002 a 2005, as modificações proveram um novo formato de compra e venda, a entrada de blocos de grandes consumidores, a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e outras iniciativas do Ministério de Minas e Energia (MME), que fortaleceram tanto o mercado de energia elétrica, quanto o governo (SILVA, 2012).

Neste panorama, o novo modelo institucional atribuiu a elaboração de políticas para o setor, ao Poder Executivo, através do MME e do Conselho Nacional de Política Energético (CNPE) que o assessoria (ANEEL, 2008).

A EPE que é vinculada ao MME, possui a função de desenvolver estudos e pesquisas que embasam o planejamento do setor energético, seja para produção de energia elétrica, seja os setores de petróleo e gás, como também no que tange a energia renovável, eficiência energética etc. Um Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) também foi criado

pelo MME, visando supervisionar constantemente e sugerir ações que promovam a confiabilidade do suprimento eletro-energético a nível nacional (SILVA, 2012).

Este modelo gerou ainda o desmembramento das companhias elétricas em geradoras, transmissoras e distribuidoras, sendo que a primeira pode ser comercializada no mercado livre, enquanto que as duas últimas são totalmente regulamentadas por agências vinculadas diretamente ao MME, como é o caso da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cujo objetivo é regular e fiscalizar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, isto é, todos os agentes do setor elétrico, de forma que haja equilíbrio para obtenção de resultados físico-financeiros sólidos por parte das companhias, ao mesmo tempo em que determina as tarifas de consumo; E do Operador Nacional do Sistema (ONS) que por meio de estudos e projeções de oferta de energia elétrica, coordena a operação de usinas e redes de transmissão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) (ANEEL, 2008).

Buscando viabilizar a comercialização das atividades de geração, criou-se a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que administra as operações do mercado de energia, como contratos, liquidações e leilões, sob a regulamentação e fiscalização da ANEEL (SILVA, 2012).

Diante disso, entende-se que os sistemas de transmissão brasileiro estão sob a regulamentação e fiscalização da ANEEL, ao mesmo tempo que são controlados e coordenados pelo ONS através de um sistema, o SIN, que integra todos estes equipamentos, em uma única rede compartilhada por todo o país. Para tanto, a ANEEL estabeleceu a Rede Básica de Transmissão do SIN como todo equipamento de transmissão, seja linhas de transmissão, transformadores, barramentos de subestações que operem em tensão igual ou superior a 230 kV, bem como seus acessórios de conexão (ANEEL, 2004).

Neste contexto, para compreender o sistema de transmissão brasileiro, deve-se compreender a funcionalidade, o objetivo e a extensão da rede básica do SIN e de seus subsistemas.

2.1.1 Rede Básica do Sistema Interligado Nacional

A Rede Básica do SIN encontra-se, atualmente, compreendida entre os empreendimentos de 230 kV a 800 kV com a finalidade de transmitir a energia elétrica gerada das usinas aos grandes centros de carga, como é inerente de qualquer sistema de transmissão, entretanto, como o Brasil têm sua geração predominantemente hidrelétrica, é função primordial do SIN interligar as diversas bacia hidrográficas que percorrem o território brasileiro às regiões

do mesmo, de modo a aproveitar de melhor maneira o potencial hídrico, garantindo confiabilidade e estabilidade da rede, além de garantir interconexões elétricas com os países vizinhos (BRASIL, 2018).

O SIN é composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-oeste, Nordeste e parte do Norte, abrangendo, praticamente todos os estados brasileiros, com exceção de pequenos sistemas isolados localizados na região Amazônica (SILVA, 2012). Estes subsistemas são então integrados a partir de uma extensa malha de transmissão, que disponibilizam um potencial energético maior do que se fossem ofertados isoladamente, acrescentando confiabilidade e economicidade ao setor elétrico brasileiro (ONS, 2018).

Logo, o grande benefício do SIN reside na possibilidade de transferência de energia elétrica entre regiões, característica de grande importância para o potencial energético brasileiro, tendo em vista, que as regiões apresentam regime hidrológicos distintos, além de possibilitar a complementariedade entre diferentes fontes (ANEEL, 2008).

O SIN é mantido continuamente em expansão, através de iniciativas como o Programa de Expansão da Transmissão (PET) e o Plano Decenal da EPE, que identificam as necessidades da rede básica, bem como o Plano de Ampliações e Reforços (PAR) da ONS.

Até 2017, o SIN era composto por mais de 141.000 km de linhas de transmissão (ONS, 2017). Segundo a ONS (2018) há previsão de acréscimo de 6.800 km de novas linhas de transmissão e expansão da capacidade de transformação de subestações novas e existentes em cerca de 42.000 MVA até 2023, isto é, um crescimento de 4% em LTs e até 11% em capacidade instalada na rede básica, sem contar os mais de 37.359 km e 67.944 MVA já licitados.

A Tabela 2 apresenta os acréscimos em km construídos na extensão de redes de transmissão que compõem o SIN no ano de 2017, para corrente alternada, de acordo com as classes de tensão, onde destaca-se que as LTs de 230 kV são as que apresentaram maior crescimento ao ano.

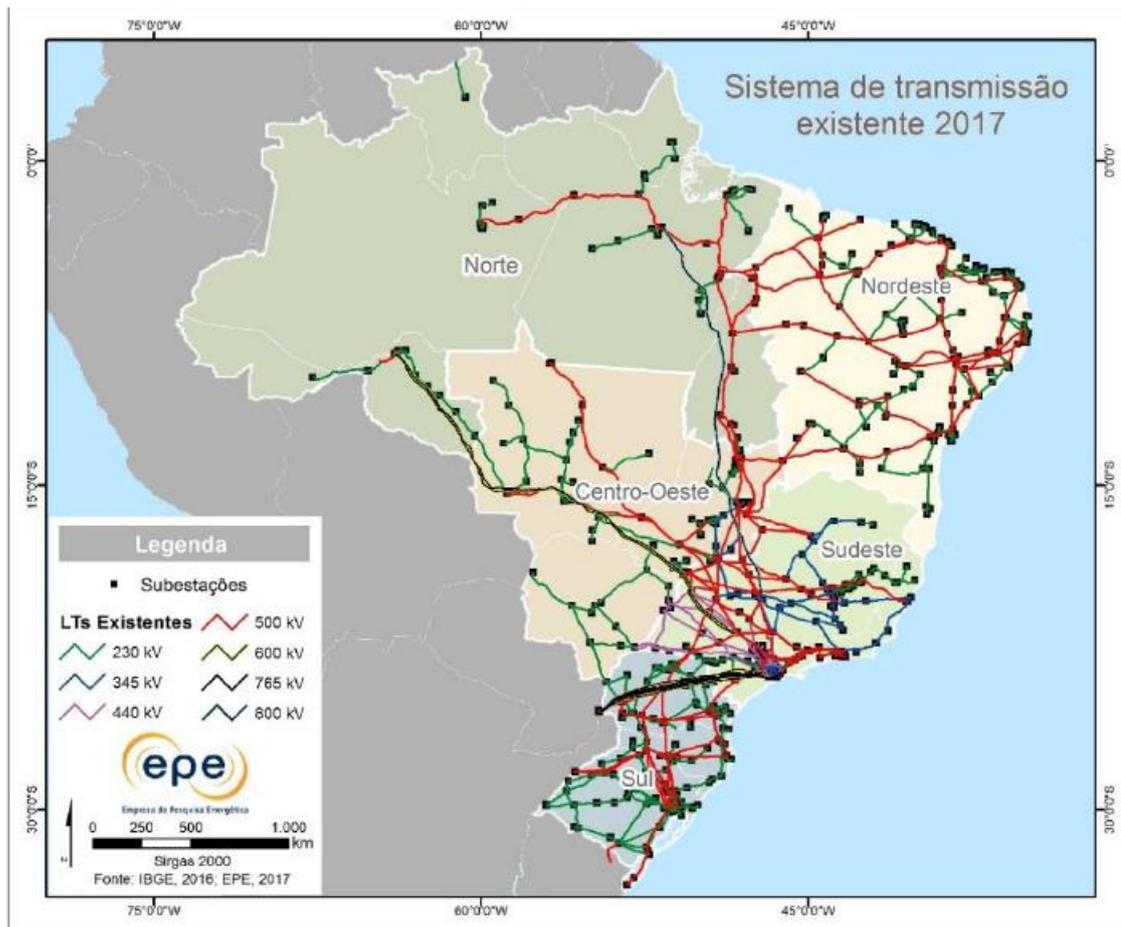
Tabela 2 - Novas linhas de transmissão construídas (km) em 2017

Classe de tensão	km construídos
750 kV	2.683
500 kV	47.750
440 kV	6.748
345 kV	10.320
230 kV	56.471

Fonte: Adaptada de ONS (2017)

A rede básica de transmissão no SIN de 2017 (último ano censitário) pode ser observada através da Figura 2, onde pode-se visualizar a grande extensão das LTs em 230 kV que percorrem praticamente todas as regiões do país, justificando a escolha da análise sob este nível de tensão e as inúmeras subestações que conectam as LTs provendo estabilidade, confiabilidade e funcionalidade ao sistemas elétrico brasileiro, como será compreendido nas próximas secções.

Figura 2 - Sistema Interligado Nacional (SIN)



Fonte: BRASIL (2018).

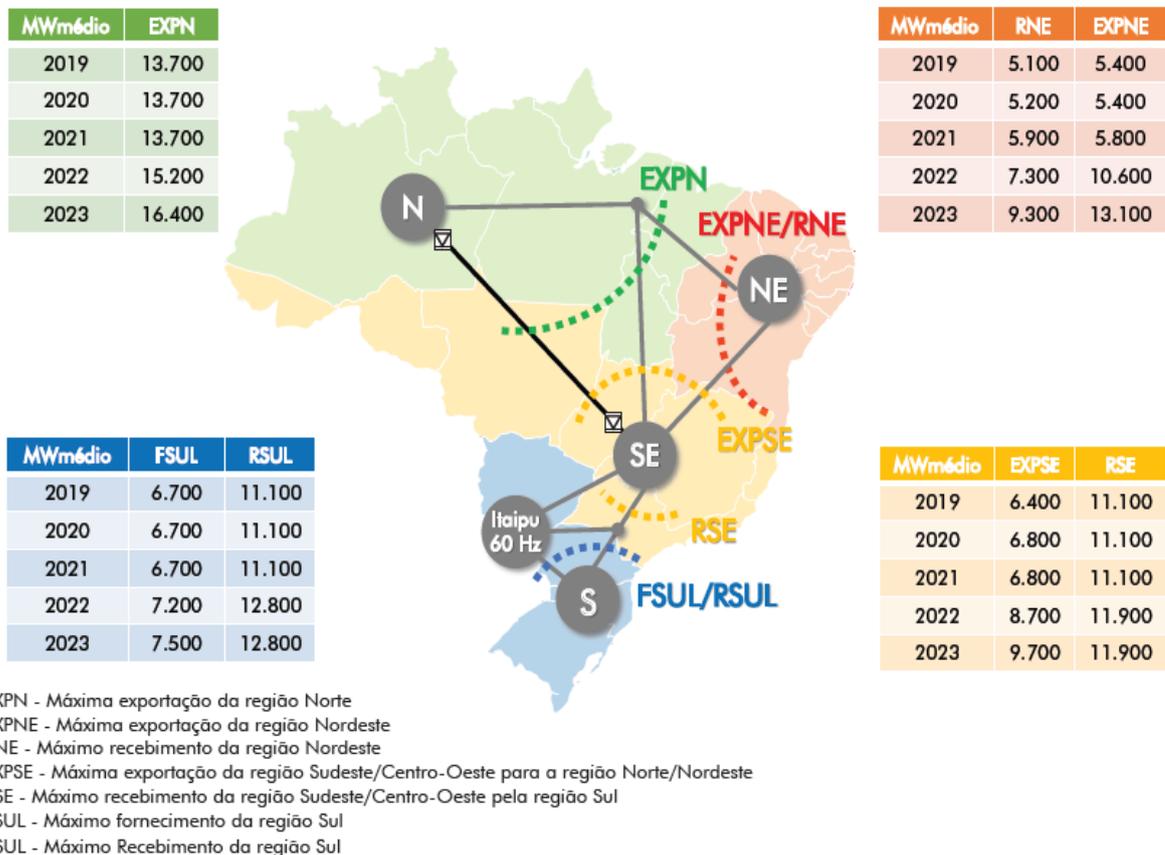
2.1.1.1 Subsistema de Operação Nordeste

Como entendido, para que o sistema opere com otimização de energia através da transferência de blocos entre as regiões, faz-se necessária o uso de interligações regionais, isto é, interligações entre os subsistemas, onde cada subsistema tem papel importante na demanda tanto do SIN como um todo, quanto da região.

No caso da região Nordeste, o sistema de transmissão é formado por 8 estados (Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Pernambuco, Bahia, Alagoas e Sergipe), sendo abastecido em parte pela própria geração da região mais os excedentes das regiões centro-oeste/sudeste e norte, através das interligações regionais Nordeste-Sudeste/Centro-Oeste e Norte-Nordeste. No estado do Rio Grande do Norte, a rede básica é predominantemente composta por empreendimentos (LTs e SEs) em 230 kV, porém, vale salientar que há uma forte tendência, atualmente, em empreendimentos eólicos no estado que requerem a implantação de um sistema robusto em 500 kV para escoamento elétrico (BRASIL, 2018).

A Figura 3 ilustra o fluxo de transferência de potência entre os subsistemas, com ênfase no subsistema do Nordeste que exporta (EXPNE) e recebe (RNE) energia, em quantidades parecidas em 2019 e com previsão para aumentar a exportação para outros estados em 2023. Os acrônimos EXPN e EXPSE refere-se à exportação da região Norte e região Sudeste, respectivamente, enquanto RSE é o recebimento da região sudeste e RSUL da região sul. E, por último, FSUL é o fornecimento da região Sul, principalmente, devido a Itaipu Binacional S.A.

Figura 3 - Fluxo de energia elétrica entre subsistemas



Fonte: ONS (2018).

2.2 Sistemas de Transmissão

Os sistemas de transmissão, podem ser definidos, como a integração de um conjunto de linhas de transmissão e equipamentos associados, que podem incluir, por exemplo, disjuntores, transformadores, para-raios etc., com a finalidade de transferir uma determinada quantidade de energia elétrica requerida com confiabilidade e eficiência (LAFOREST, 1982).

As próximas subsecções descreverão os equipamentos e pontos importantes sobre LTs, bem como os demais itens associados que formam as subestações de energia elétrica, visando embasar a caracterização do objeto deste estudo quanto ao funcionamento de todos os equipamentos envolvidos e de sua utilidade no sistema elétrico.

2.2.1 Linhas de transmissão

Com o progresso da sociedade moderna, os mais diversos tipos de tecnologia, que em sua grande maioria envolve uso de energia elétrica, tornou-se acessível a maior parte da população mundial, de forma que os padrões de demanda de energia requerem um sistema elétrico de maior capacidade, porém mantendo as boas características de funcionamento e desempenho, que, de forma resumida, refletem numa necessidade de maior transferência de potência (SILVEIRA, 2004).

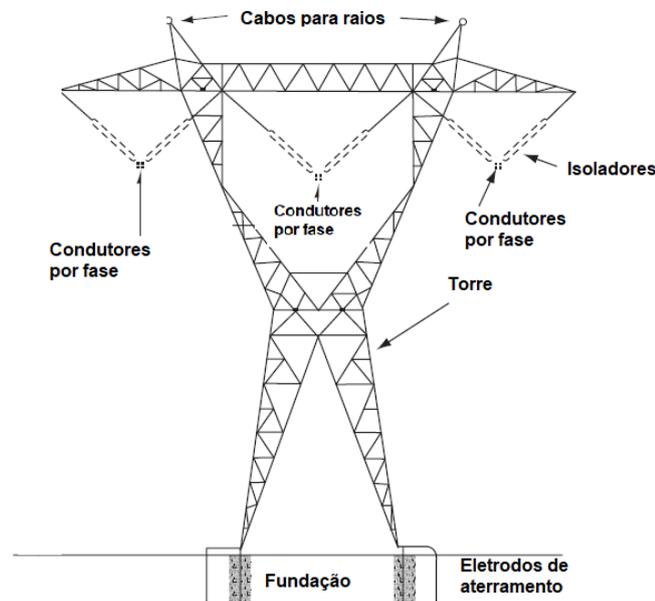
Neste contexto, surgem as linhas de transmissão que se caracterizam como os componentes destinados ao transporte de elevados blocos de energia elétrica entre grandes distâncias (SILVA, 2012). Pois os níveis de tensão mais elevados, geralmente, igual ou superior a 230 kV, diminuem as perdas de energia a longas distâncias, fornecendo assim, um caminho eficiente para energia elétrica que vai do gerador até os barramentos das subestações de alta tensão (GRIGSBY, 2012).

Uma LT é composta por diversos componentes físicos que apresentam diferentes arranjos a depender do local de instalação, da necessidade do SEP e dos custos financeiros, que podem ser visualizados na Figura 4 que ilustra um modelo típico de LT a 230 kV.

Vale salientar, que a geometria dos componentes, como, por exemplo, altura dos condutores e disposição das fases, influenciam diretamente na propagação e comportamento de campos elétricos e magnéticos no ambiente (KUSTER, 2011).

Nesse sentido, as próximas subsecções se reservam a explicar os componentes básicos de uma LT e suas geometrias e configurações mais usuais, principalmente, na classe de tensão deste estudo.

Figura 4 - Componentes básicos de uma LT



Fonte: Adaptado de Grigsby (2012).

2.2.1.1 Torres

Linhas de transmissão podem ser visualizadas tanto quanto um sistema elétrico complexo, quanto mecânico, principalmente, no que tange a elementos estruturais de suporte, responsáveis pelo transporte dos cabos condutores e cabos para-raios de forma segura e confiável, mantendo uma distância adequada entre estas partes energizadas, como também entre estas e o solo, ao mesmo tempo que estão sujeitos e devem suportar a forças mecânicas advindas do ambiente, como vento, chuva etc. (GRIGSBY, 2012).

Diante disso, pode-se dizer que a estrutura de uma LT deve prover um dimensionamento elétrico responsável, com base nas dimensões mínimas de segurança, que refletem nas dimensões básicas do suporte, como também, um dimensionamento mecânico com base nos esforços que determina, por sua vez, as dimensões de cada elemento de suporte (FUCHS, 2015).

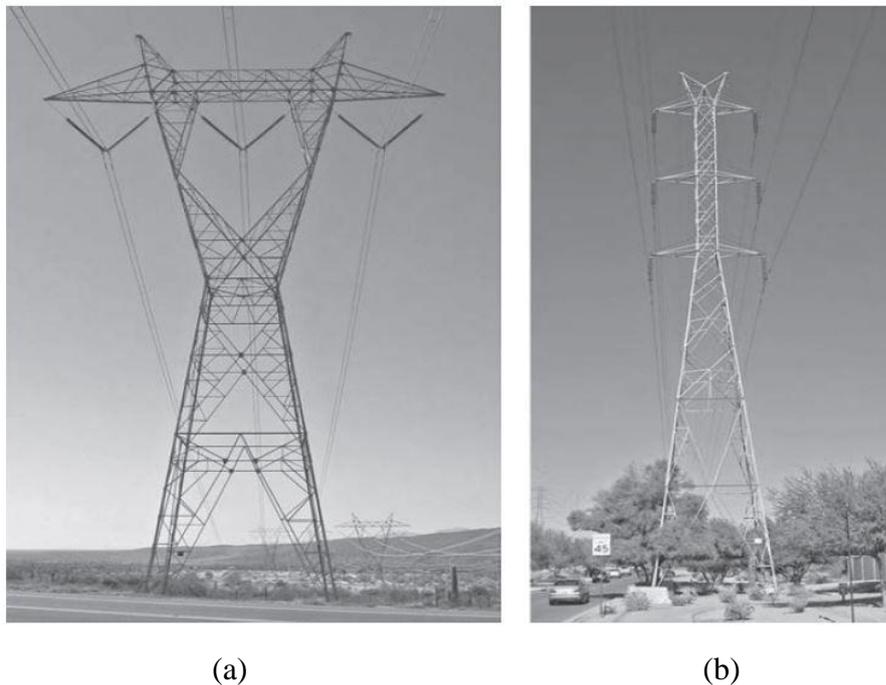
As torres, como também são denominadas as estruturas de suporte de uma LT, possuem vários tipos de arranjos geométricos fabricados em diferentes tipos de materiais, entre eles destacam-se as torres treliçadas e tubulares em aço e alumínio, postes de eixo único em aço, alumínio, madeira ou concreto, estruturas autoportantes tubulares e estruturas estaiadas que podem ser fabricadas em concreto ou assumirem formatos tubulares ou treliçadas quando fabricadas em aço, a depender, entre outros fatores além das dimensões seguras, do custo da

instalação, das rotinas de manutenção e operação, vida útil, qualidade do terreno etc. (GRIGSBY, 2012).

Outro aspecto que influencia no tipo de torre, é a forma como os condutores são dispostos sobre a mesma, segundo FUCHS (2015) há três tipos de arranjos possíveis, considerando condutores de fase de um mesmo circuito: há aqueles que estão dispostos horizontalmente, exigindo uma altura menor da torre; verticalmente, reservada a área com limitação da faixa de servidão, geralmente, adotam circuitos duplos e possuem uma maior altura; ou em disposição triangular, com alturas intermediárias entre os dois tipos anteriores e com condutores possuindo mesma distância entre si, formando, portanto, um triângulo isósceles.

A Figura 5 ilustra exemplos típicos de torres treliçadas em aço, sendo a Figura 5a um circuito simples com disposição horizontal dos condutores e a Figura 5b um circuito duplo com disposição vertical.

Figura 5 - Típicas torres treliçadas (a) circuito único horizontal; (b) circuito duplo vertical



Fonte: Grigsby (2012).

2.2.1.2 Condutores

A característica fundamental de uma LT é prover a capacidade de transferência de potência de maneira segura e econômica, para tanto, pode-se destacar os condutores como item

de maior interesse para a manutenção desta característica elétrica (LAFORREST, 1982). Pois um condutor pode ser entendido como um fio ou conjunto de fios entrelaçados por longos comprimentos e responsáveis diretamente pela condução de energia elétrica (SHORT, 2004).

Desde o início do uso da eletricidade, condutores aéreos e nus são os mais empregados em sistemas de transmissão, tendo o uso do cobre se destacado pela sua boa condutividade elétrica, porém sido gradativamente substituído pela aplicação de alumínio e suas ligas, devido ao baixo custo do mesmo e leveza, que superam as perdas com a condutividade (GRIGSBY, 2012).

De maneira mais detalhada, os condutores que formam uma LT são denominados cabos e são obtidos de encordoamentos em espiral de vários fios metálicos, ao redor de um fio sólido circular, com diâmetro que podem ser iguais ou diferentes (FUCHS, 2015). Em condutores nus, aéreos e em alumínio, configuração mais comum nas LTs, o fio sólido circular é substituído por uma alma de aço que pode ser constituída de um único fio em aço ou conjunto de fios em aço, que é, posteriormente, circundado pelos fios em alumínio, chamado coroa (MAMEDE FILHO, 2013).

Segundo SHORT (2004) há quatro tipos de condutores em liga de alumínio que merecem destaque nos sistemas elétricos de potência, sendo os compostos por liga 1350 com 99,5% de pureza e 61% de condutividade, denominado *All-Aluminum Conductor* (AAC), o tipo padrão mais simples, que quando reforçado com alma de aço, apresenta melhoras nas características mecânicas do condutor, e é então denominado de *Aluminum Conductor, Steel Reinforced* (ACSR), acrescentando maior resistência a intempéries em relação ao AAC; Um outro tipo é o *All Aluminium Alloy Conductor* (AAAC) que é fabricado na liga 6201-T81, com condutividade similar ao AAC ou ACSR, porém com alta resistência mecânica, configurando uma alternativa ao uso de ACSR em zonas costeiras, uma vez que este apresenta baixo desempenho nessas áreas devido a corrosão; E, por último, o *Aluminum conductor, alloy reinforced* (ACAR) que incorpora a liga 6201-T81 com a liga padrão de 1350, agregando maior força ao condutor.

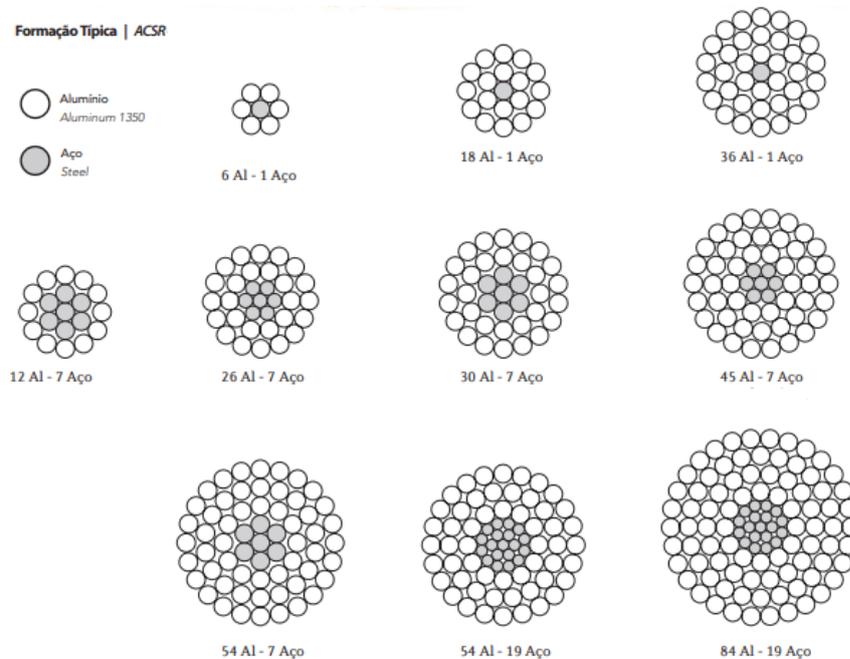
O condutor ACSR é hoje o mais utilizado e mais vantajoso dos condutores (GRIGSBY, 2012), pode apresentar configurações com 1, 7 ou 19 fios de aço sobrepostos com vários fios de alumínio (SHORT, 2004).

A Figura 6 apresenta um condutor ACSR onde observa-se as várias configurações alma de aço cercado pelas coroas de alumínio.

Vale salientar, que em tensões muito elevadas, uma única fase pode possuir múltiplos condutores em paralelo, visando a redução do efeito corona ao redor dos mesmos em relação

ao uso de um único condutor, são os denominados condutores em feixe (SKVARENINA; DEWITT, 2004).

Figura 6 - Configurações de um cabo/condutor ACSR



Fonte: Alubar Alumínio (2015).

2.2.1.3 Cabos para-raios

Em uma LT é comum encontrar cabos para-raios dispostos sobre a sua estrutura de suporte, visando a proteção dos condutores de fase contra raios (GRIGSBY, 2012).

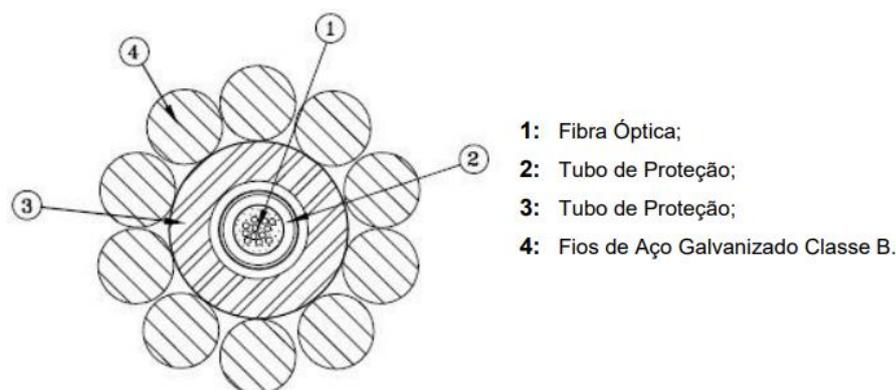
Estes cabos interceptam a descarga atmosférica e a drenam para a terra através de eletrodos de aterramento conectados a torre, que devem permitir a dispersão total da corrente no solo sem que o potencial do solo aumente demasiadamente, a ponto de retornar pelas fases (SHORT, 2004).

Os cabos para-raios podem ser do tipo cordoalha de fio em aço zincado, cabos ACSR extrafortes ou ainda o ACSR comum que entre outras características permite a aplicação de sistemas de telemedicação por onda portadora (FUCHS, 2015).

Para ONS (2011a) o número mínimo em LTs de 230 kV é de dois cabos para raios que devem suportar a circulação da corrente de curto circuito franco, pelo menos durante o tempo de atuação da proteção de retaguarda e sendo, ao menos um, do tipo *Optical Ground Wire* (OPGW).

Os cabos OPGW são cabos para raios que além da funcionalidade convencional são capazes de transportar informações a longas distâncias, por intermédio de uma alma em fibra óptica, devidamente revestida por fios metálicos trançados, como mostrado na Figura 7 (OLIVEIRA, 2017).

Figura 7 - Cabo OPGW para linhas de transmissão



Fonte: Enel (2018).

2.2.1.4 Isoladores

O isolamento elétrico é parte primordial de um sistema elétrico, no momento de uma falta, por exemplo, a integridade do isolador afeta diretamente a capacidade da LT manter-se fornecendo, continuamente, tensão e corrente para determinadas áreas, de modo que, pode-se dizer que o desempenho de uma LT depende da integridade dos seus isoladores (GRIGSBY, 2012).

Isoladores são materiais dielétricos responsáveis por isolar os condutores do suporte da torre, bem como do solo, estando, contudo, submetidos a solicitações elétricas (externas e internas) da LT, que se resumem a sobretensões geradas por descargas atmosféricas, por manobras ou da própria rede de frequência industrial (FUCHS, 2015).

O colapso ou deterioração dos isoladores está relacionado tanto com a intensidade do estresse mecânico e térmico a qual estão submetidos, quanto a duração no tempo deste estresse, oriundos destes fenômenos de sobretensões (LAFOREST, 1982).

Em LT, os isoladores são do tipo externo, e, portanto, estão sujeitos tanto a estresse elétricos, como citados anteriormente, quanto mecânicos, gerados pelo peso do condutor e força do vento, e/ou ambientais, oriundos do clima ou da vizinhança, como poeira, ar, oceanos etc. (GRIGSBY, 2012). A maioria dos isoladores externos são designados como autorregenerativos,

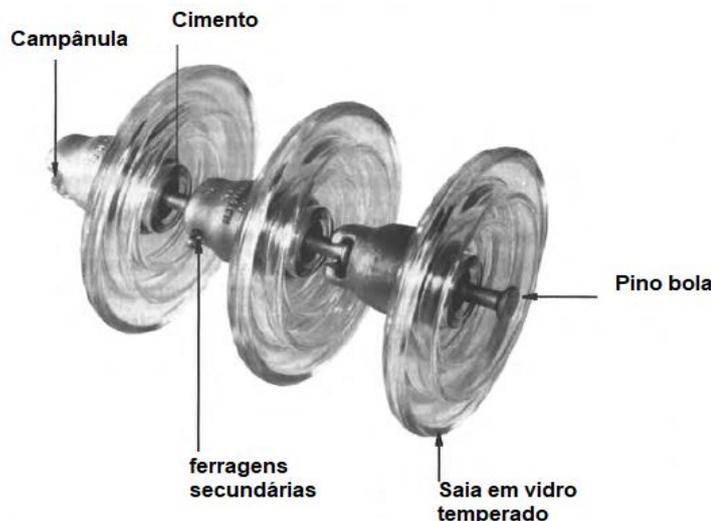
isto quer dizer são capazes de recuperar suas características de isolamento após sofrer alguma sobretensão (LAFOREST, 1982).

Destaca-se como o mais empregado em sistema de transmissão, os isoladores do tipo suspensão em disco, que podem ser aplicados a todas as classes de tensões, desde que conectados em série no formato de uma cadeia de suspensão em concordância com o nível de tensão aplicado (MAMEDE FILHO, 2013).

Os isoladores tipo suspensão em disco são geralmente fabricados em porcelana ou vidro temperado, possuem uma saia dielétrica que isola a parte superior em ferro, chamada campânula, e o pino bola de aço em seu centro, ao mesmo tempo que sua superfície externa lisa permite um bom fluxo para a água de chuvas, permitindo sua própria autolimpeza, e a superfície interna corrugada evita a umidade e promove um maior caminho de fuga para as descargas (GRIGSBY, 2012). As ferragens permitem que isoladores de discos individuais sejam conectados entre si através de engates do tipo concha-bola ou garfo-olhal, formando as cadeias, além de proverem maior liberdade de balanço entre as unidades, que podem ser ocasionados pela ação de forças nos condutores e torres (FUCHS, 2015). As saias e as ferragens são integradas por meio da aplicação de cimento jateado, conferindo maior resistência mecânica ao isolador, que num momento de falha deve então ter suas partes metálicas rompidas antes da porcelana ou vidro, agindo como um fusível mecânico para proteção da estrutura da torre (GRIGSBY, 2012).

A Figura 8 ilustra as partes que compõe um isolador de disco em vidro temperado, formado por uma cadeia de três disco.

Figura 8 - Isolador de disco e seus componentes



Fonte: Mamede Filho (2013).

2.2.1.5 Outras características técnicas

O projeto de uma linha de transmissão é regido no Brasil pela ABNT (1985) que estipula as referências básicas para um projeto de LT entre 38 kV e 800 kV, visando a segurança das pessoas e equipamentos próximos as LTs, através da definição de níveis mínimos de segurança.

Esses níveis mínimos de segurança são estabelecidos em termos de distância mínima entre condutores e demais partes energizadas que incluem tanto as partes da própria LT, como os itens que podem ser energizados no terreno abaixo ou nas proximidades, buscando evitar a indução de curto-circuito por aproximação (SILVA, 2012).

Algumas das distâncias mínimas básicas entre solo e condutores, por exemplo, podem ser observadas na Tabela 3.

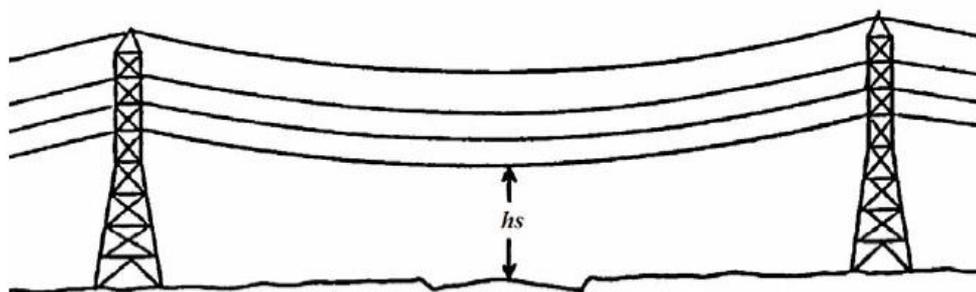
Como os condutores de uma LT quando dispostos sobre a torre, assumem um formato de catenária (PEREIRA, 2017) e a geografia do terreno local também pode influenciar sobre a distância dos cabos ao solo (SILVA, 2012), os valores da Tabela 3 são para a situação de h_s da Figura 9 em que os condutores estão mais próximos ao solo, seja por atuação da catenária ou do nível do terreno.

Tabela 3 - Distância básica entre condutores e solos em diversos locais

Região ou obstáculo atravessado pela linha ou que ela se aproxime	Distância básica (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5
Rodovias, ruas e avenidas	8
Ferrovias não eletrificadas	9

Fonte: ABNT (1985).

Figura 9 - Menor distância condutor ao solo



Fonte: ABNT (1985).

Como a maior parte do sistema elétrico brasileiro é suprido pelas hidrelétricas, assim como esperado, os centros de geração hidráulica são localizados longe dos centros de consumo, o que leva a construção de longos trechos de linhas de transmissão (PEREIRA, 2017). A construção desses trechos, tendo vista os obstáculos naturais e a busca por percursos menores e, com isso, reduções nos custos da obra, tem conduzido os projetistas a preterirem traçados que atravessam as áreas de concentração humana (SILVA, 2012).

Diante deste panorama, a ABNT (1985) determina uma faixa de segurança, que em outras palavras é uma área de terra reservada a passagem das LTs, calculada com base em parâmetros mecânicos do balanço dos condutores a partir da força de ventos sob estes, efeitos elétricos e posicionamento dos componentes das estruturas de suporte como fundações, ferragens e estais.

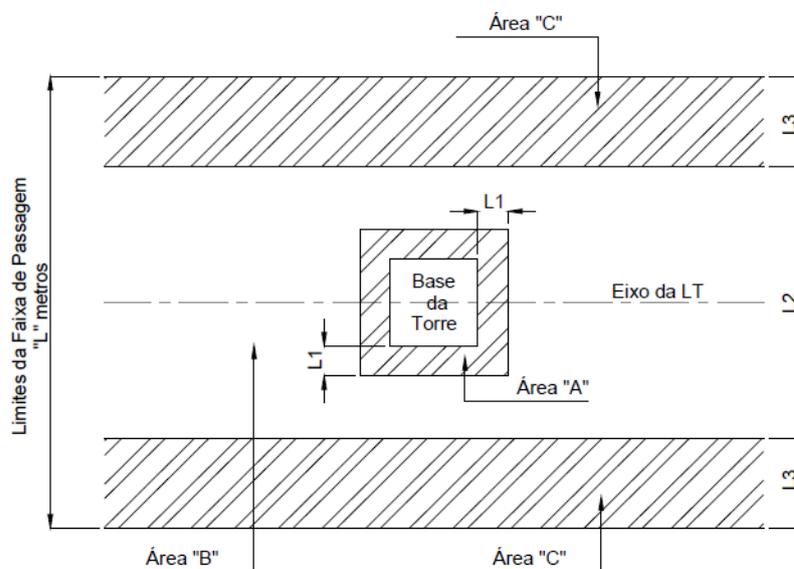
A faixa de segurança pode ser de domínio ou servidão, no primeiro tipo a área que atravessa o eixo da LT pertence ao proprietário da LT, são o caso de LTs cuja tensões são menores ou iguais a 138 kV, enquanto que é dita de servidão quando a posse do terreno transversal a LT é de terceiro, porém este possui restrições quanto a utilização do terreno, muito comum em LTs com níveis de tensão igual ou superior a 230 kV conectadas ao SIN (SOUZA, 2012).

Ainda, segundo SOUZA (2012), as concessionárias adotam faixas de segurança em função das tensões de operação, sendo que, no Brasil, para as diferentes concessionárias de energia há diferentes larguras de faixa de segurança adotadas, inclusive, há casos em que para uma mesma companhia há variedades na largura de faixa para uma mesma tensão, como é o caso da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP).

A Companhia Energética do Goiás (CELG), atualmente, Enel Distribuidora, por exemplo, optou por determinar larguras de faixas de passagem, que, por sua vez, são faixas com limites maiores que a faixa de segurança, subdividida em zonas, visando o bom desempenho das instalações elétrica, a segurança durante inspeções e manutenções, bem como de terceiros que venham a transitar abaixo das LTs, independente do ambiente seja urbano ou rural (CelgPar, 2010).

A Figura 10 ilustra a zonas que compõem a faixa de passagem da CELG, ao passo que a Tabela 4 apresenta a extensão em metros das larguras adotadas pela concessionária em questão, para cada área da faixa de passagem, de acordo, com os diferentes níveis de tensão.

Figura 10 - Ilustração da faixa de segurança/passagem transversal ao eixo da LT



Fonte: CelgPar (2010).

Onde: Área A é reservada à equipe de manutenção com seus veículos e equipamentos;
 Área B possibilita maior segurança para a operação da linha e à terceiros;
 Área C é a parte da faixa de segurança que previne contra acidentes devido ao balanço dos cabos e deve garantir os limites de campo elétrico e magnético;
 L1, L2, L3 tem dimensões designadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de faixa de passagem para diferentes níveis de tensão

Largura	69 kV	138 kV	230 kV
L1 (m)	2	2	2
L2 (m)	12	16	35
L3 (m)	6	6	6

Fonte: CelgPar (2010).

Pela Tabela 4, entende-se que uma LT de 230 kV da CELG deve possuir uma faixa de segurança/passagem entre 35 e 47 metros. Entretanto, em ambientes urbanos, iniciativas técnicas mais elaboradas, como a compactação de fase e circuitos podem ser adotadas para que a obtenção de faixas mais estreitas, porém as restrições quanto ao uso e ocupação da faixa de segurança são ainda mais rígidos para estes casos, de modo que toda a utilização deve passar

por análise técnica, tendo em vista que a maior densidade populacional nas cidades potencializa a exposição dos indivíduos a condições de risco (CelgPar, 2010).

Neste contexto, vale frisar, que a média de faixa para uma LT de 230 kV, no município de São Paulo, por exemplo, não ultrapassa 29 metros (EPTE, [2012]). Indicando assim, que a extensão da faixa reservada a LT pode apresentar tamanhos diversos em questão dos valores especificados pela concessionária da região de instalação e das características da própria região, que podem ocasionar a adoção de uma largura diferente até mesmo do padrão da concessionária, sem deixar de impor limites de segurança aos transeuntes da região e trabalhadores responsáveis pela manutenção e operação da LT.

2.2.2 Subestações de energia elétrica

O aumento de demanda do sistema elétrico, repercute também na necessidade de novas subestações ou, como é mais comum, na ampliação das SEs existentes, tornando o ambiente eletromagnético, cada vez mais, denso e complexo (SILVEIRA, 2004).

Em um SEP, uma subestação de energia elétrica desempenha a função de interligar os circuitos de transmissão, provendo, em algumas situações, uma conexão entre sistemas com diferentes níveis de tensão, por meio de transformadores (SCHÜTTE et al, 2000).

Dessa forma, as linhas que chegam à subestação, podem ter a sua tensão aumentada ou diminuída, ocasionando uma corrente resultante que é entregue às outras linhas de transmissão ou distribuição (GÓMEZ-EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2011). Possibilitando assim o seccionamento para atendimento de diversas localidades e tipos de consumidores, além da conexão de geradores, assegurando estabilidade, confiabilidade e funcionalidade ao SEP (ALBURGUETTI, 2013).

2.2.2.1 Classificação das SEs

Há variados tipos de subestações que auxiliam o sistema de transmissão a transportar energia elétrica dos centros de geração às cargas finais, entre eles, destacam-se as subestações transmissoras que conectam as usinas geradoras ao sistema, subestações de manobra e subestações transformadoras (SCHÜTTE et al, 2000).

Diz-se então que as subestações de energia elétrica podem ser classificadas com base na sua aplicação no SEP, isto é, quanto a sua função no sistema. Outros tipos de classificação

também são possíveis, de acordo, por exemplo, com os níveis de tensão, como também podem ser caracterizadas quanto a sua instalação e o meio de isolamento.

2.2.2.1.1 Quanto a função

Nas centrais geradoras, a energia oriunda de fontes como gás, óleo, carvão, água, entre outras, são convertidas em energia elétrica, e, posteriormente, conectadas ao sistema de transmissão, por intermédio das subestações transmissoras, que devem prover, através de variados equipamentos, a operação segura do sistema (GRIGSBY, 2012). Por diversas razões, como características construtivas e limitações de materiais, os geradores operam em tensões entre 15 e 25 kV, o que torna necessário a elevação de tensão para a transmissão (SKVARENINA; DEWITT, 2004). Logo, estas subestações transmissoras são elevadoras de tensão.

Já as SEs de manobra, que são aquelas que não possuem transformadores de potência, bem como as transformadoras, responsáveis pela conversão entre níveis de tensão, são SEs estratégicas, responsáveis pela transmissão de grandes blocos de energia, atuando como um ponto intermediário entre o caminho final das LTs que vem das centrais geradoras e o início das linhas que forneceram energia elétrica aos demais circuitos alimentadores, formado por novas subestações transformadoras, como as SEs de distribuição ou SEs do cliente, garantido estabilidade e integridade ao sistema elétrico (MCDONALD, 2012).

As SEs de distribuição, por sua vez, são aquelas que alimentam diretamente os clientes da ponta final do sistema, num nível de tensão inferior ao fornecido pelo sistema de transmissão, e, logo, mais adequado para esse tipo de consumidor, sendo composto, principalmente, por centenas de transformadores que conectam centenas de clientes (SHORT, 2004).

Enquanto, as subestações do cliente, são aquelas próprias para um consumidor específico, geralmente, do tipo comercial, que é atendido em níveis de tensão variados, de acordo, com a sua necessidade e requisitos das instalações elétricas (MCDONALD, 2012).

2.2.2.1.2 Quanto ao nível de tensão

Assim como o sistema elétrico, as subestações de energia elétrica podem ser caracterizadas, de acordo, com os níveis de tensão.

Para tanto, são considerados os níveis de tensão a qual estão submetidos seus componentes elétricos.

Para o caso de subestações que formam os sistemas de transmissão, quando em corrente alternada, são classificados em termos de Extra Alta Tensão (EAT), Alta Tensão (AT) e, há, ainda, as subestações em corrente contínua (RAO, 1999).

Na Tabela 5 é possível observar a magnitude dos níveis de tensão nominal para circuitos trifásicos, conforme as classes de tensão, encontrada nos diferentes tipos de subestação que integram o sistema de transmissão brasileiro.

Tabela 5 - Classes de tensões para subestações do sistema de transmissão brasileiro

Tensões Nominais (kV)	Tensões Máximas (kV)	Classe de tensão
34,5	38	AT
69	72,5	
138	145	
230	242	
345	362	EAT
500	550	
750	800	

Fonte: Fuchs (2015).

2.2.2.1.3 Quanto a configuração e ao meio de isolamento

Ainda, a depender do tipo de equipamento elétrico utilizado e do local de instalação, as subestações podem ser do tipo externo isolado a ar ou a gás SF₆, do tipo interno isolado a ar ou SF₆, de tecnologia mista ou subestações móveis (MCDONALD, 2012).

Subestações externas são aquelas que os equipamentos são dispostos ao tempo, enquanto nas internas são abrigados de intempéries (RAO, 1999).

Quanto ao meio de isolamento, as subestações convencionais são isoladas a ar, porém entre 1968 e 1970, surgiu as subestações isoladas a gás SF₆, um gás inerte, inodoro, incolor, não tóxico, que possui entre 2 ou 3 vezes a capacidade de isolamento do ar atmosférico, que é encapsulado, a uma pressão adequada, ao redor dos equipamentos padrões de uma subestação, formando gabinetes metálicos e reduzindo assim a necessidade de espaços maiores para a isolamento entre equipamentos de uma subestação, tornando-se uma alternativa em regiões com pouco terreno/espço disponível ou com disponibilidade à custo exorbitantes (MCDONALD, 2012).

As subestações mistas ou compactas são formadas por um equipamento híbridos que possuem os barramentos isolados a ar, enquanto os demais equipamentos estão nos invólucros

metálicos isolados a SF₆, sendo utilizados em novas subestações ou na substituição de equipamentos danificados ou ultrapassados (FRONTIN, 2013).

A Figura 11 apresenta uma subestação externa (ao tempo), isolada a ar, configuração mais comum em tensões de 230 kV, em solo brasileiro.

Figura 11 - Subestação externa isolada a ar



Fonte: FRONTIN, 2013.

2.2.2.2 Equipamentos de uma SE

Uma SE típica é formada por diversos equipamentos, são eles: transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, barramentos, reatores, transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP), para raios, entre outros instrumentos (GONËN, 2008).

2.2.2.2.1 Barramentos

Tendo em vista que a razão principal do uso de subestações é trazer confiabilidade ao sistema, como já discorrido anteriormente. Buscando reduzir o risco de desconexão de consumidores e geradores, o mais comum é que as subestações possuam um circuito duplo de transferência de energia (SCHÜTTE et al, 2000). Neste sentido, o mais comum, é que as várias linhas de alta tensão, ao adentrarem nas subestações se conectem a barras grossas, através de circuitos que permitem a conexão e a desconexão quando for conveniente, assegurando que mudanças no percurso ou isolamento das linhas possam ser feitas, quando na presença de faltas ou outras ocorrências (GÓMEZ-EXPÓSITO, CONEJO; CAÑIZARES, 2011).

Estes circuitos de conexão e desconexão, juntamente com as barras, formam os arranjos da subestação, que pode assumir variadas configurações, como barra simples, barra dupla com disjuntor simples, barra principal e de transferência, entre outros tipos (GONËN, 2008).

Na escolha do arranjo, por outro lado, deve-se levar em consideração, além de confiabilidade ao sistema, outros aspectos como flexibilidade de operação, proteção dos relés e custos (MCDONALD, 2012).

Diante disso, a ONS (2011b) determina que para subestações até 230 kV isoladas a ar que compõem a rede básica, o uso de no mínimo barramentos de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves.

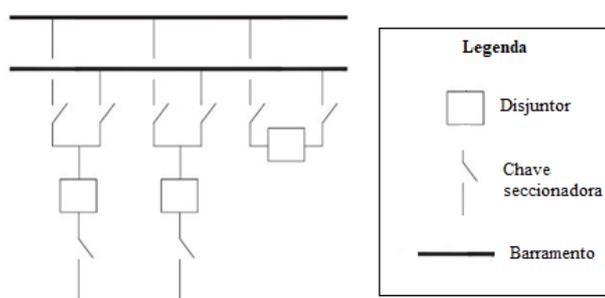
Na configuração mais simples da barra dupla com disjuntor simples, cada circuito estar conectado aos dois barramentos e um *by-pass* que permite o suprimento pelas duas barras (MCDONALD, 2012).

A Figura 12 apresenta o diagrama elétrico desta configuração, onde observa-se um disjuntor simples e três chaves.

Entretanto, em um arranjo a 4 chaves, há dois *by-pass*, possibilitando que a segunda barra atue como de transferência, isto é, no caso de manutenção ou defeito, não há interrupção de nenhum circuito que é, prontamente, transferido para a outra barra (ALBURGUETTI, 2013).

Uma outra variação deste esquema é a configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, esta barra difere da barra de 4 chaves, no incremento de mais um *by-pass*, que possibilita que ambas as barras recebam os circuitos de transferência, sem, portanto, a necessidade que uma das barras seja apenas para transferência, otimizando a operação (FRONTIN, 2013).

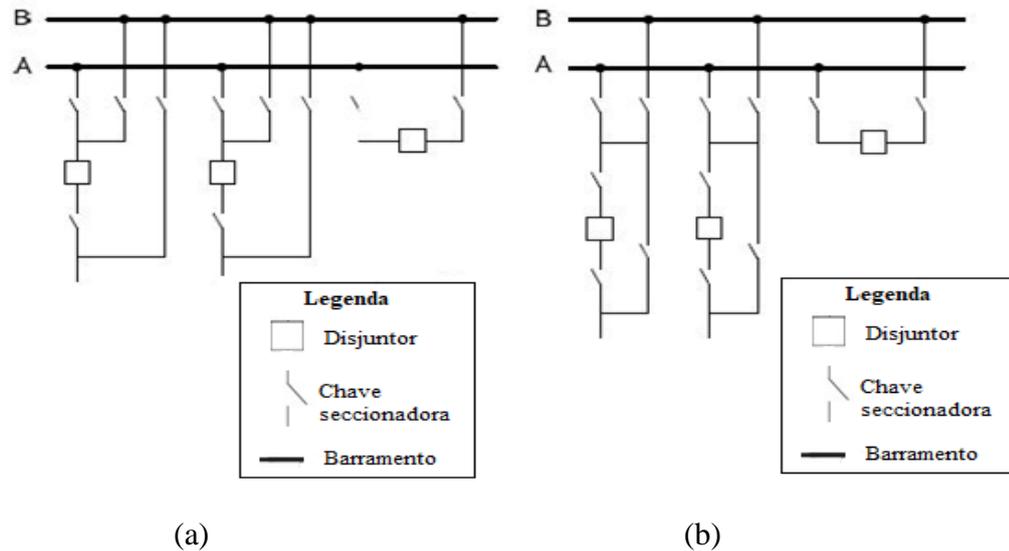
Figura 12 - Esquema barra dupla disjuntor simples



Fonte: Adaptado de Mcdonald (2012).

A Figura 13 apresenta os diagramas elétricos dos arranjos de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves e barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.

Figura 13 – (a) Diagrama elétrico barra dupla a quatro chaves; (b) Diagrama elétrico barra dupla a cinco chaves



Fonte: Adaptado de Alburgueti (2013).

2.2.2.2.2 Transformadores de Potência

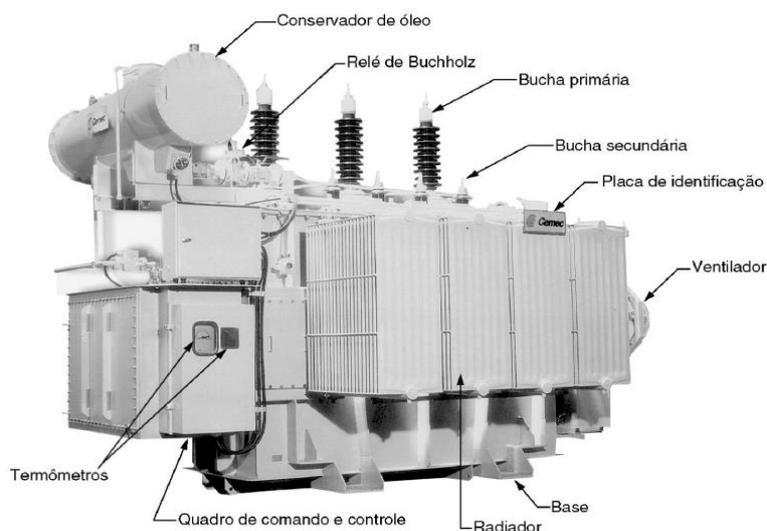
Diante do que já foi discorrido, pode se dizer que transformador de potência é o principal equipamento de uma subestação, pois é o responsável por possibilitar a transformação entre os níveis de tensão de operação, tornando hábil a ligação entre as subestações e as linhas do sistema elétrico de potência.

Em alta tensão, são equipamentos robustos, e, portanto, de operação estática, como pode ser observada na Figura 14, que através da indução eletromagnética entrega a energia de um circuito, denominado, primário, a um outro circuito, denominado, secundário, com níveis de tensão e corrente alteradas, porém na mesma frequência de operação (MAMEDE FILHO, 2013).

No seu interior, um núcleo de aço laminado e grãos orientados, de alta permeabilidade, é o responsável por gerar um forte campo magnético nas bobinas, possibilitando a conversão entre níveis de tensão (SHORT, 2004).

Na classe de tensão dos sistemas de transmissão são trifásicos e, geralmente, imersos em um tanque metálico preenchido por óleo mineral, que atua como isolante entre as partes energizadas do núcleo e bobinas, bem como entre estes e a carcaça (tanque) (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 14 - Transformador de potência



Fonte: Mamede Filho (2013).

2.2.2.2.3 TCs e TPs

Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs) são da classe dos transformadores de instrumento, pois sua função na subestação é reduzir a corrente e a tensão, respectivamente, dos altos níveis do circuito primário para os níveis adequados dos dispositivos de medição, proteção, relé entre outros (SCHÜTTE et al, 2000).

Para alta tensão, o TC tipo barra é o mais aplicado, sendo constituído em que o enrolamento primário é na realidade uma barra fixa que atravessa o núcleo, enquanto o secundário é um fio esmaltado isolado em algodão (MAMEDE FILHO, 2013).

Já o TP pode ser do tipo capacitivo ou indutivo, o do tipo capacitivo (TPC) é para medições simples e proteção trifásica, porém quando se deseja um nível de precisão mais altas nas medições, indica-se o uso do tipo indutivo (TPI) (SCHÜTTE et al, 2000). Sendo assim, o tipo capacitivo é mais aplicado.

O TPC, é composto, essencialmente, por dois conjuntos paralelos de células capacitivas em série, imersas em um invólucro de porcelana, formando um divisor de tensão e, em seguida, conectado ao um TPI que fornece as tensões secundárias, permitindo entre outras características, comunicação através do sistema *carrier* (MAMEDE FILHO, 2013).

Tanto o TC quanto o TP podem ser isolados internamente, através de óleo, SF₆ ou resina e apresentam como sua maior vantagem, a isolamento do circuito primário enquanto o secundário é acessível aos instrumentos de medição (SCHÜTTE et al, 2000).

A Figura 15a ilustra um TC tipo barra, enquanto a Figura 15b apresenta um TP do tipo capacitivo, instalados em uma SE.

Figura 15 - Transformadores de instrumento (a) TC tipo barra; (b) TPC



(a)

(b)

Fonte: A autoria própria (2019).

2.2.2.2.4 Disjuntores

Disjuntores são chaves mecânicas que devem ser capazes tanto de transportar quanto interromper correntes em condições normais de operação ou ainda correntes anormais, como correntes de curtos-circuitos, por um período determinado (SCHÜTTE et al, 2000).

Para a ONS (2011b), os disjuntores conectados a rede básica devem permitir a abertura de linhas em vazio com sobretensão de pré-manobra, a abertura de bancos capacitores, quando houver defeitos trifásicos, correntes de curto-circuito, pequenas correntes indutivas e até mesmo defeitos quilométricos. Para seu perfeito funcionamento, deve ainda ser acoplado a relés de proteção que detectam as correntes e quando sensibilizado ordena a abertura dos contatos (MAMEDE FILHO, 2013).

Para abertura dos contatos, há três tipos de mecanismo em altas tensões: o pneumático que utiliza um compressor ou um sistema de ar comprimido comum a toda a SE; o hidráulico que fornece uma alta pressão a um vaso de óleo em conjunto com uma mola; e o por mola, que utiliza uma mola acionada por motor elétrico como atuador (SCHÜTTE et al, 2000).

Como as tensões de operações e, conseqüentemente, as correntes de curto-circuito dos sistemas de energia foram aumentando com o passar do tempo, devido à expansão dos sistemas elétrico, os disjuntores de alta tensão também evoluíram para acompanhar este crescimento

(GARZON, 2002). Geralmente, são classificados com base no meio de interrupção utilizado para extinção do arco elétrico, que podem ser do tipo sopro magnético, vácuo, ar, pequeno ou grande volume de óleo ou ainda a gás SF₆ (MCDONALD, 2012). Entretanto, atualmente, em sistemas de transmissão há uma predileção por disjuntores a gás SF₆ (SCHÜTTE *et al*, 2000).

Nos disjuntores a gás SF₆, em um dos tipos de mecanismo de atuação o contato é projetado para que enquanto abre o circuito pressione o compressor que libera a passagem do SF₆ que, por sua vez, resfria e alonga o arco elétrico até sua extinção, já em outro tipo de mecanismo o ar aquece o SF₆ e a pressão gerada no invólucro alonga o arco até sua extinção (MCDONALD, 2012).

Para tensões de 230 kV ou superior, os disjuntores a SF₆, possuem duas câmaras de extinção por fase, equipados por duas hastes de contato que assumem geometria em V ou T e que liberam o SF₆ a partir da sua compressão (MAMEDE FILHO, 2013).

Na Figura 16, um disjuntor a gás SF₆ do tipo T com duas câmaras de extinção, comum em SE de 230 kV, pode ser observado.

Figura 16 - Disjuntor SF₆ tipo T



Fonte: Krieg (2014).

2.2.2.2.5 Chave seccionadora

Para que o sistema opere de maneira segura faz-se necessário que os condutores possam ser seccionados quando a operação dele exigir, nesta perspectiva, as chaves seccionadoras

permitem a isolação de circuitos e manutenção dos disjuntores, desde que o circuito esteja sem carga (GRIGSBY, 2012).

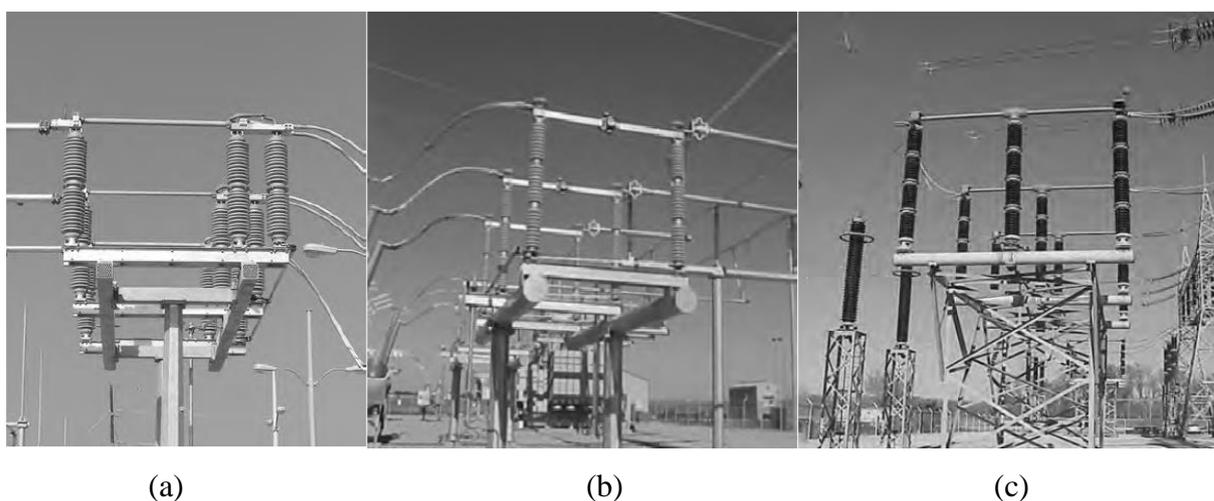
Dessa forma, uma chave seccionadora deve possibilitar a abertura e fechamento do circuito quando nenhum tipo de corrente ou tensão significativa ocorrer em suas fases, deve suportar as correntes de carga de operação normal, bem como as correntes de falta até o momento que abertura seja solicitada (SCHÜTTE et al, 2000).

Há várias configurações possíveis de chaves seccionadoras, com recursos específicos e aplicações distintas, entre elas estão: as chaves de abertura vertical, de abertura lateral dupla, de abertura lateral única, de abertura central ou de alcance vertical como as pantográficas, sendo as de abertura vertical o tipo mais utilizado e versátil (MCDONALD, 2012).

Sua operação pode ser manual ou motorizada, sendo que para circuitos de transmissão são predominantemente motorizadas, exceto as que permitem conexão com a terra (SCHÜTTE et al, 2000).

Na Figura 17a, pode-se observar uma chave seccionadora de abertura vertical, na Figura 17b, uma chave seccionadora de abertura central é ilustrada, enquanto na Figura 17c, uma chave seccionadora de dupla abertura lateral.

Figura 17 - Chaves seccionadoras: (a) abertura vertical; (b) abertura central; (c) dupla abertura lateral



Fonte: Mcdonald (2012).

2.2.2.2.6 Para-raios

Para raios são equipamentos utilizados como proteção contra descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra (GRIGSBY, 2012).

Há dois tipos principais de para raios: o de carboneto de silício com centelhador e o de óxido de zinco sem centelhador (SCHÜTTE et al, 2000). Entretanto, quando conectados à rede básica brasileira, os para raios devem ser do tipo estação em óxido metálico, sem centelhador e devem ser instalados próximo a transformadores, banco de capacitores, reatores e na entrada da LT (ONS, 2011b).

Para raios de óxido de zinco são resistores altamente não lineares, que submetido a níveis de tensões normais de operação atua, praticamente, como um circuito aberto, já em situações de sobretensões, sua impedância cai rapidamente conduzindo a corrente a terra (SHORT, 2004).

A Figura 18 apresenta um para raio de óxido de zinco em uma subestação de 230 kV.

Figura 18 - Para raio em uma SE de 230 kV



Fonte: Autoria própria (2019).

3 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E SEUS EFEITOS

Em 1873, os fundamentos contemporâneos de campos eletromagnéticos e as considerações matemáticas que o expressam foram formulados pelo físico James Clerk Maxwell, que sugeriu, hipoteticamente, a luz como uma forma de propagação de energia eletromagnética, denominada de onda eletromagnética, teoria esta validada experimentalmente em 1891, por Heinrich Hertz (POZAR, 2012). Nesta perspectiva, as ondas eletromagnéticas foram compreendidas como campos elétricos e magnéticos interdependentes que transportam energia enquanto se propagam no espaço vazio ou em meios materiais (SILVA, 2012).

A Equação 1 apresenta a postulação matemática de Maxwell para a propagação de ondas eletromagnéticas como a luz.

$$c = \lambda f \quad (1)$$

Onde: c é a velocidade de propagação, referente ao meio em que a onda se propaga, em m/s, assumindo valores de 3×10^8 m/s para o vácuo;

λ é o comprimento de onda, em m;

f é a frequência de propagação, em Hz.

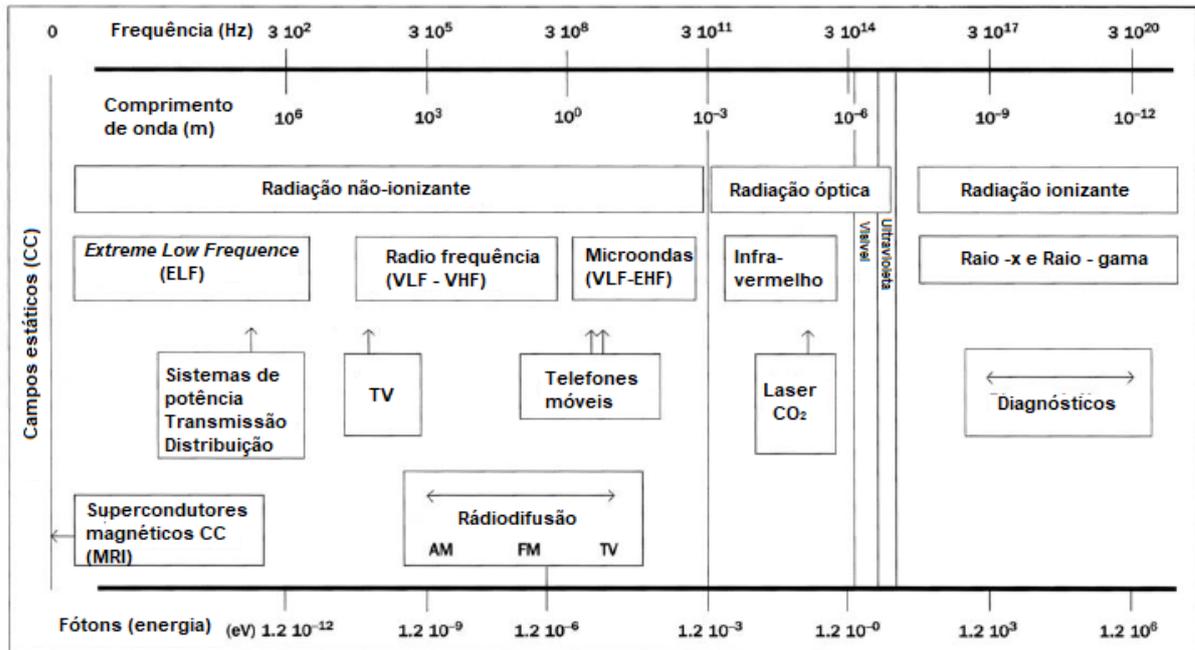
Observa-se que para um mesmo meio, as ondas podem ser determinadas em termos de comprimento de onda e/ou frequência. Nesse sentido, a luz visível, o raio-x, as ondas de rádio, a título de exemplos, fazem parte de um agrupamento de ondas eletromagnéticas, categorizadas, de acordo, com a faixa de frequência ou comprimento de onda ao longo de um espectro contínuo de radiação eletromagnética (ULABY; RAVAIOLI, 2015).

Sendo assim, campos elétricos e magnéticos podem ser gerados em diferentes faixas de frequência e esta distinção leva-o a interagir de diferentes maneiras com objetos e pessoas, isto quer dizer que, para os raios-x e raios-gamas, por exemplos, os fótons carregam energia suficiente para ionizar moléculas ou átomos de uma matéria viva, o que pode ocasionar danos nos organismos, e são, portanto, classificados como radiações ionizantes, já para a luz visível e demais faixas de frequência inferiores a esta, esse processo não ocorre, surge assim o termo radiação não-ionizantes, para essas faixas de frequências mais baixas (CIGRÉ, 2000).

A Figura 19 apresenta o espectro eletromagnético com suas faixas de frequência, respectivos comprimentos de ondas, aplicações e tipos de radiações eletromagnéticas, onde observa-se que os componentes elétricos de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), sejam em

tensões de transmissão ou distribuição, operam nas bandas em ELF, com comprimento de ondas elevados, superiores a 1000 km, porém sem energia suficiente para interagir, de maneira perigosa com moléculas e átomos do corpo humano, já que se encontram na faixa do espectro cuja a radiação é denominada não-ionizante.

Figura 19 - Espectro eletromagnético



Fonte: National Radiological Protection Board (NRPB) (2001).

Apesar de não serem capazes de danificar células, devido ao seu caráter não-ionizante, a partir de certos níveis de intensidade, campos eletromagnéticos em ELF, são capazes de perturbar processos fisiológicos do ser humano (MENDES, 2010).

Segundo a IARC (2002), a maioria das fontes artificiais encontra-se nas faixas de ELF, onde, como já foi visto, destaca-se a geração, transmissão, distribuição e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica por equipamentos elétricos comuns, o que justifica o interesse e a preocupação pelos riscos potenciais oriundos desta exposição.

De maneira geral, os fenômenos elétricos e magnéticos incorporados em uma onda eletromagnética são descritos por um conjunto de leis básicas, formuladas por cientistas, como Faraday, Ampère, Gauss, Coulomb, entre outros, que culminaram nas equações vetoriais de Maxwell (BALANIS, 2012).

Em alta frequência, os campos elétricos e magnéticos são fortemente acoplados, isto quer dizer que o campo elétrico pode ser determinado se o campo magnético for conhecido e

vice-versa, porém em ELF, os campos elétricos e magnéticos são independentes e podem ser analisados separadamente, como se fossem produzidos por fontes distintas, e, portanto, são habitualmente analisados com base em uma aproximação dita como quase-estática (IARC, 2002).

Diante do explanado, este capítulo reserva-se a abordar, inicialmente, as quatro equações de Maxwell que regem os campos eletromagnéticos, bem como as leis e postulações de campos estáticos, conveniente ao estudo de campos elétricos e magnéticos em ELF, com o intuito de facilitar o entendimento sobre o fenômeno que rege a propagação dos CEM nesta faixa de frequência, e assim permitir, nos capítulos seguintes, a análise do seu comportamento no meio, através da compreensão das suas propriedades físicas e formulações matemáticas apropriadas. Em seguida, as subsecções deste capítulo abordarão uma revisão bibliográfica sobre a problemática da exposição humana aos CEM, o início da preocupação com o tema, os efeitos biológicos reconhecidos pelas entidades da área, as normas e diretrizes produzidas pela comunidade mundial, com intuito de construir a base legal que respalda as abordagens metodológicas que serão adotadas posteriormente, neste trabalho, e estabelecendo os níveis de intensidade de campo elétrico e magnético que devem ser respeitados pelos sistemas de energia elétrica em 60 Hz, como é o caso do objeto deste estudo.

3.1 Campo elétrico

Se uma carga elétrica, Q_1 , é fixada em um ponto localizado em r' , entende-se que uma carga, Q , localizada em r , apresentará uma força atuante sobre ela, em resposta ao campo vetorial de força gerado por Q_1 (NEFF, 1991). Este campo de força é inversamente proporcional ao quadrado da distância e se distribui de forma radial, como ilustrado na Figura 21, se Q_1 for positivo, conforme estabelecido por Coulomb e Cavendish (STRATTON, 2007).

Diz-se, portanto, que, se em uma região particular, uma carga individual exerce uma força sobre outra carga, também imersa nesta região, um campo elétrico é gerado e a razão entre essa força por unidade de carga é definido como intensidade de campo elétrico (BAKSHI; BAKSHI, 2009).

A Equação 2 apresenta a formulação matemática da intensidade de campo elétrico para cargas pontuais.

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 (r - r')^2} \vec{a}_R \quad (2)$$

Onde: ϵ_0 é a permissividade do meio circundante, que para o vácuo, assume o valor de $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m.

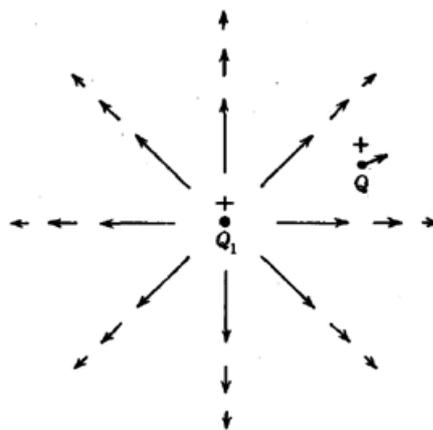
Q é a carga elétrica sob atuação da força do campo, em C;

r e r' são os pontos geométricos onde estão posicionadas as cargas Q_1 e Q , respectivamente, em m.

\vec{E} é o vetor intensidade de campo elétrico, V/m.

\vec{a}_R é o vetor direção da distância entre cargas elétricas Q e Q_1 .

Figura 20 - Distribuição radial de forças entre cargas resultando em um campo elétrico



Fonte: Krauss e Carver (1973).

Como a relação entre força e carga pontual é linear, pelo princípio de superposição, quando em um mesmo meio/região há várias cargas pontuais, a força devido a esse conjunto de cargas, é equivalente a soma das forças agindo em Q , devido a cada uma das cargas pontuais atuando sozinha (KRAUSS; CARVER, 1973).

Logo, o campo elétrico é um conjunto de forças radiais, produzidas a partir da presença de cargas elétricas em um mesmo meio, cuja intensidade no ponto da carga Q é proporcional a esta carga e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre cada carga fonte e Q .

Uma carga pontual é uma carga cuja dimensões são relativamente insignificantes em relação a seu ponto r no espaço, sendo assim não há razões para acreditar que tal particularidade ocorre na natureza (STRATTON, 2007). Diante disso, o campo elétrico, ao invés, de ser

definido em função de um conjunto de cargas pontuais discretas, dQ , deve ser distribuído continuamente em uma região, no formato de uma linha, de uma superfície ou de um volume e, portanto, expresso como a soma de uma integral (GRIFFITHS; COLLEGE, 1999).

Numa linha de transmissão, por exemplo, as cargas pontuais se assemelham a distribuições lineares de carga de um condutor retilíneo uniforme, desta maneira, os valores de carga Q são determinados em termos de densidade linear de carga, ρ_L , em C/m, isto é, cargas pontuais distribuídas ao longo de um comprimento L (PEREIRA, 2017). A configuração de carga mais comum é a volumétrica, ρ_v , em C/m³, em que dQ é definido pela integral da Equação 3, já, quando o objeto é uma folha de cobre, as cargas formam uma área sem profundidade, expressa em densidade superficial de carga, ρ_s , em C/m² (NEFF, 1991).

$$Q = \int \rho_v dv \quad (3)$$

3.1.1 Potencial elétrico

O campo elétrico, para cargas estáticas, pode ser definido em termos de potencial escalar, V , devido à natureza conservativa de \vec{E} para esta configuração de carga, que estabelece que em um caminho fechado a intensidade de campo elétrico é nula (STRATTON, 2007).

A Equação 4 apresenta a relação entre potencial escalar e campo elétrico por um caminho fechado.

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

Pela Equação 4, constata-se que o surgimento de um campo elétrico é possível através apenas da aplicação de um potencial entre dois pontos, de forma, que quanto maior a diferença de potencial, maior o campo elétrico. Logo, quanto maior a tensão aplicada nos terminais de um equipamento elétrico, maior o campo elétrico gerado ao seu redor. Para um objeto na vizinhança deste equipamento, a presença do gradiente indica que o potencial é uma força entre dois pontos, que aumenta conforme um objeto (uma carga) estiver mais próximo da fonte, e, portanto, maior será a intensidade de campo elétrico sentida por este.

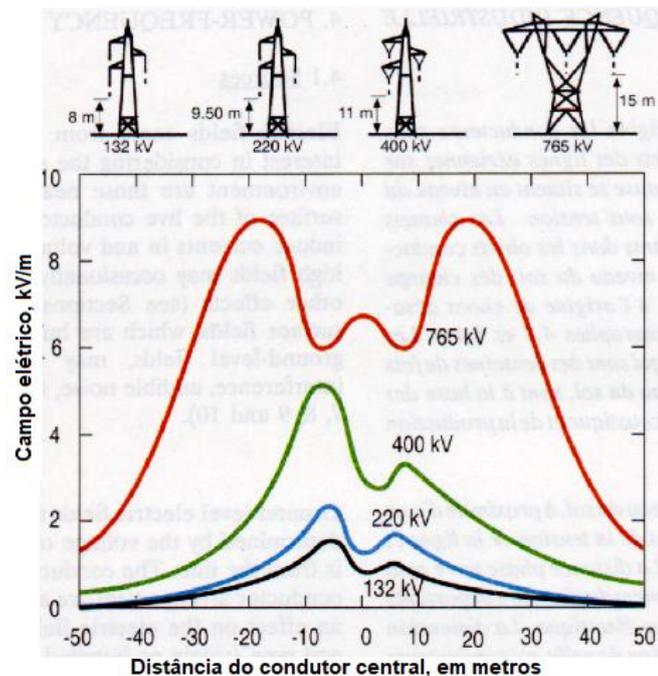
Em resumo, para componentes elétricos como LTs, o campo elétrico é uma função da tensão, da disposição dos seus condutores e da presença ou não de objetos e estruturas próximas, porém independente da circulação de correntes (KUSTER, 2011). A intensidade de campo

elétrico após se distanciar dos condutores, são maiores em LTs com configuração vertical do que às horizontais, já em relação à altura, quanto maior a altura dos cabos, menor os níveis de \vec{E} próximo ao solo (LAFOREST, 1982).

Ainda segundo LAFOREST (1982), para subestações os mesmos parâmetros como altura e geometria das fontes afetam o nível de campo elétrico próximo ao solo.

A Figura 21 apresenta valores de campo elétrico, em kV/m, para diferentes níveis de tensão em linhas de transmissão trifásicas de configurações distintas, na qual observa-se que os valores mais altos estão em uma pequena área abaixo dos condutores mais externos que decrescem rapidamente conforme vão se distanciando da torre e mais rapidamente conforme se aproximam do condutor central, sendo afetados diretamente pela disposição de um condutor acima do outro, nos exemplos de configuração vertical.

Figura 21 - Intensidade de Campo elétrico para diferentes circuitos de transmissão



Fonte: Cigré (2000).

3.2 Campo magnético

Enquanto cargas elétricas estacionárias geram campos elétricos, uma corrente elétrica produz um outro fenômeno, o magnetismo, e pode ser definida como um fluxo contínuo de carga no tempo (KRAUSS; CARVER, 1973). Porém em termos práticos esta situação não existe, assim como não existem cargas estacionárias, todavia representam uma aproximação

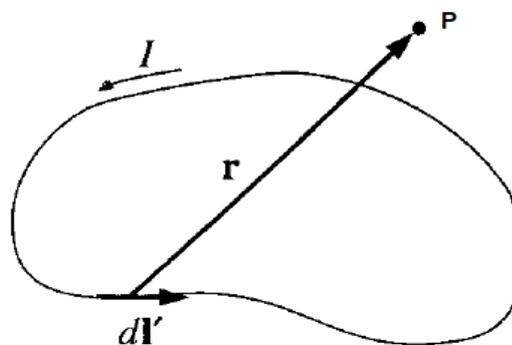
adequada para propagação em regimes relativamente lentos como em 60Hz (GRIFFITHS; COLLEGE, 1999). Dessa forma, a corrente elétrica pode ser mais bem definida como conjunto de cargas livres em movimento, a uma velocidade constante e, portanto, uma observação importante, é que não são tratadas como cargas pontuais isoladas, mas sim como elementos diferenciais de corrente, $I d\vec{L}$.

Em 1820, Biot-Savart estabeleceu que cada elemento linear de corrente contribuía para o campo magnético total, \vec{H} (STRATTON, 2007). Pela Lei de Biot-Savart, o diferencial de um campo magnético, $d\vec{H}$, é, vetorialmente, proporcional ao produto do vetor diferencial do elemento de corrente, $I d\vec{L}$, e o vetor de direção unitária, \vec{a}_R , entre este elemento e o ponto de atuação do campo, e ao mesmo tempo, é inversamente proporcional ao quadrado da distância, \vec{r} , entre a fonte e o ponto próximo em que o campo magnético é sentido (NEFF, 1991).

A Equação 5 apresenta a forma matemática da Lei de Biot-Savart, enquanto a Figura 22 ilustra uma corrente elétrica, I , que percorre um fio, gerando um campo magnético, \vec{H} , em um ponto próximo, P , distante do elemento $d\vec{L}$, em \vec{r} metros. Estes elementos diferenciais de corrente são, portanto, a discretização da fonte que gera um campo magnético em ponto do espaço numa região próxima, cuja distância \vec{r} é conhecida.

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I d\vec{L} \times \vec{a}_R}{r^2} \quad (5)$$

Figura 22 - Ilustração da Lei de Biot-Savart



Fonte: Griffiths e College (1999).

É muito comum, no que tange os estudos sobre campo magnético, expressar os resultados em termos de densidade de fluxo magnético, \vec{B} , na unidade de T (Tesla) (PEREIRA, 2017). No qual \vec{B} é uma força atuante sob o elemento diferencial de corrente, com direção normal a este (STRATTON, 2007).

Numa propagação no espaço livre, o campo magnético está relacionado com a densidade de fluxo magnético pela Equação 6, onde μ_0 é a permeabilidade do ar, que assume valores $4\pi \times 10^{-7}$ H/m para o espaço livre. (POZAR, 2012).

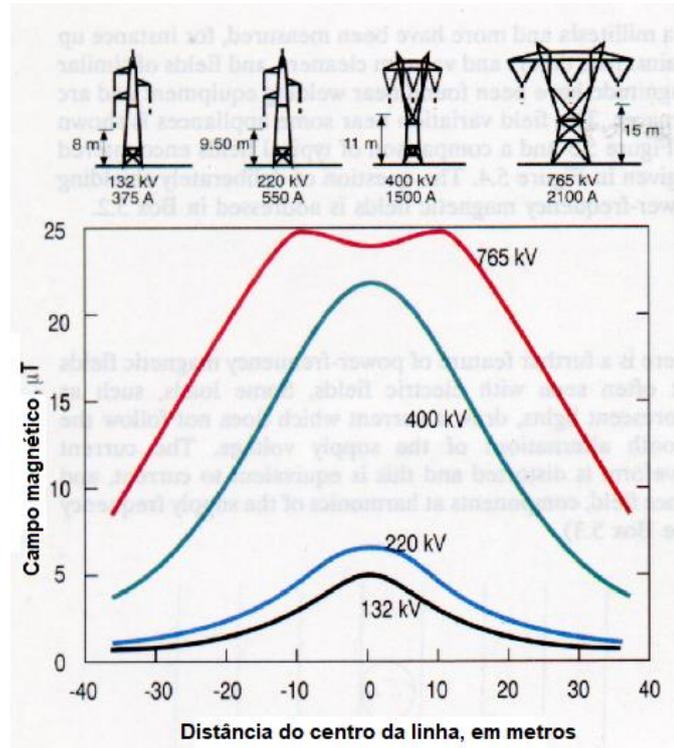
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (6)$$

Diante do exposto, entende-se que um campo magnético resulta da presença de uma corrente que flui por um filamento qualquer, isto quer dizer, que condutores de uma linha de transmissão ou de um barramento, uma espira de um transformador, por exemplo, geram um campo magnético, \vec{H} , ao seu redor, de modo, que quanto maior a intensidade de corrente que o percorre, maior a intensidade de \vec{H} , entretanto, esta intensidade diminui, conforme um ponto imerso neste meio é distanciado desses filamentos, numa taxa de decaimento de r^2 . Como \vec{B} é proporcional a \vec{H} , as mesmas afirmações podem se estender aos níveis de densidade de fluxo magnético, \vec{B} .

Dessa forma, os valores de \vec{H} ou \vec{B} em um ponto próximo do solo na vizinhança de uma LT, depende da distância da fonte, da corrente nos condutores, como também o número de fases do circuito, da altura e da configuração dos condutores (CIGRÉ, 2000).

Tendo em vista a similaridade das grandezas e as indicações da literatura da área, é importante frisar, que no escopo deste trabalho, para a caracterização de campo magnético, a densidade de fluxo magnético \vec{B} pode ser compreendida como a magnitude de campo magnético. Neste contexto, a Figura 23, apresenta valores campo magnético em termos de \vec{B} gerado pela passagem de diferentes níveis de corrente em linhas de transmissão trifásicas distintas, conforme o ponto de medição vai se distanciando do condutor central da linha, no qual observa-se o aumento dos níveis de \vec{B} , ao se referir a circuitos mais carregados e seu decréscimo ao se distanciar do condutores, isto é, dos elementos de corrente que agem como fonte magnética. Outra observação importante, é que configurações mais compactas, como torres verticais, geram valores de pico por distância menores do centro delas.

Figura 23 - Campo magnético expresso em μT para diferentes circuitos de transmissão



Fonte: Cigré (2000).

Como a magnitude de corrente em equipamentos elétricos de uma subestação e de uma LT, variam no tempo, em decorrência das variações de carga, o campo magnético deve também variar conforme o instante e as condições de carregamento.

3.3 Equações de Maxwell

As Equações de Maxwell são comumente aplicadas na sua forma diferencial, devido a facilidade de tratar problemas de fronteira nos fenômenos eletromagnéticos (BALANIS, 2012).

A Equação 7 a 10 apresenta as formas diferenciais das equações de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (10)$$

Onde: \vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico, em C/m²;

\vec{B} é o vetor densidade de campo magnético, em T;

\vec{E} é o vetor intensidade de campo elétrico, em V/m;

\vec{H} é o vetor intensidade de campo magnético, em A/m;

\vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica, em A/m²;

ρ_v é a densidade de carga elétrica volumétrica, em C/m³.

Dado que campos eletromagnéticos são gerados por uma distribuição contínua no espaço e no tempo de fontes eletromagnéticas, a partir de uma análise macroscópica, as cargas e correntes que atuam como fontes podem ser descritas, respectivamente, em termos de ρ_v e \vec{J} (STRATTON, 2007). No qual, \vec{J} define a quantidade de corrente por unidade de área que percorre um condutor na presença de um campo elétrico \vec{E} , sendo relacionado com este através da Lei de Ohm (KRAUSS, CARVER, 1973). A Equação 11 apresenta a Lei de Ohm.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (11)$$

Onde: σ é a condutividade elétrica do meio, em S/m, e caracteriza a capacidade de um material de conduzir correntes elétricas (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Como relatado anteriormente, as quatro equações de Maxwell são um compilado de fenômenos descritos por outros físicos, são eles: Gauss, Faraday e Ampère. As subsecções seguintes resguardam-se a contribuição de cada um desses físicos e finaliza com a contribuição própria de Maxwell, possibilitando assim o entendimento das equações matemáticas que regem os fenômenos eletromagnéticos como todo. A partir daqui são adotadas as formas integrais das equações, visando facilitar o entendimento dos conceitos abordados por estes físicos.

Vale aqui ressaltar que tais equações são dependentes uma da outra, de forma que as soluções para campos eletromagnéticos só são encontradas quando todas estas equações são simultaneamente satisfeitas (POZAR, 2012).

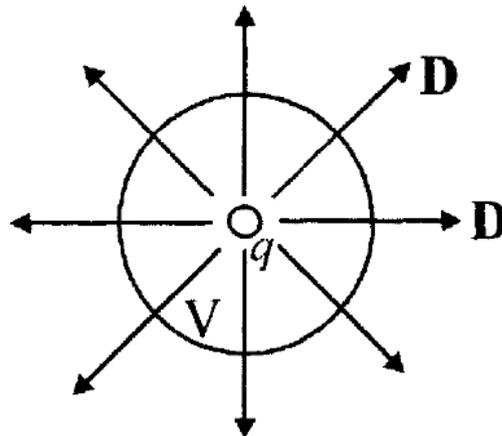
3.3.1 Lei de Gauss para campos eletrostáticos e magnetostáticos

As duas primeiras equações de Maxwell, em sua forma integral, são referentes e a Lei de Gauss para campos eletrostáticos e para campos magnetostáticos.

A Lei de Gauss para campos eletrostáticos estabelece o fluxo elétrico, \vec{D} , que atravessa uma superfície fechada é equivalente ao valor da carga confinada nesta superfície, sendo expressa pela Equação 12 (BALANIS, 2012). A Figura 24 ilustra as linhas de fluxo elétrico que atravessa uma superfície cuja carga elétrica encontra-se encerrada em seu interior.

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint \rho_v \, dv \quad (12)$$

Figura 24 - Densidade de fluxo elétrico, \vec{D}



Fonte: Bastos e Sadowski (2003).

A densidade de fluxo elétrico, \vec{D} , também pode ser definida em termos de campo elétrico \vec{E} , conforme Equação 13 (NEFF, 1991).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (13)$$

Já a Lei de Gauss para campos magnetostáticos, referente a segunda Equação de Maxwell, define que para qualquer ponto do campo \vec{B} , o seu divergente é constante (STRATTON, 2007). Sendo assim, similarmente a densidade de campo elétrico, \vec{D} , o fluxo magnético resultante, \vec{B} , refere-se ao fluxo magnético que atravessa uma superfície fechada,

sendo seu resultado nulo, uma vez que todo fluxo que entra em uma superfície, sai, igualmente, por ela (KRAUSS, CARVER, 1973). A Equação 14 demonstra a forma integral da Lei de Gauss para campos magnetostáticos.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (14)$$

3.3.2 Lei de Faraday

Em 1831, Faraday conseguiu provar que uma carga magnética variando no tempo era capaz de produzir uma corrente elétrica (NEFF, 1991). Para Faraday, uma força eletromotriz (*fem*) surge nos terminais de um circuito aberto equivalente a taxa de variação do fluxo magnético no tempo (BALANIS, 2012).

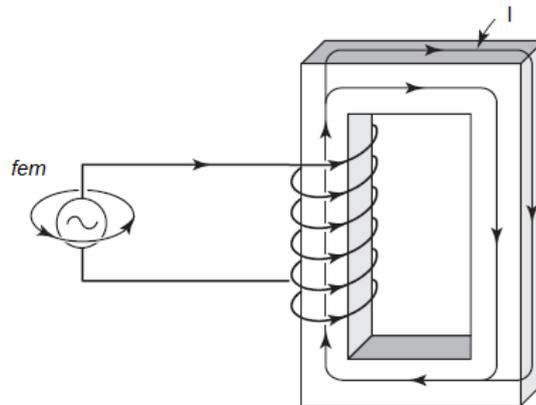
Dado que a força eletromotriz, *fem*, pode ser também definida como uma tensão que surge devido a uma energia que não é essencialmente elétrica (NEFF, 1991) e que o fluxo magnético estar relacionado com \vec{B} , a Equação 15 apresenta a Lei de Faraday na forma integral.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (15)$$

Pela Equação 15, um campo \vec{B} que varia no tempo produzirá um campo \vec{E} que circula ao redor da superfície e vice-versa, de forma, que a variação de fluxo magnético pode ser originada de uma variação no tempo ou de uma deformação da superfície de contorno no tempo (STRATTON, 2007). Um exemplo real destas aplicações nos sistemas elétrico de potência, é que o princípio de funcionamento do transformador CA é baseado na geração de *fem* por um campo magnético variante no tempo, enquanto geradores convertem movimento mecânico de uma fonte CA através da movimentação da superfície de contorno.

A Figura 25 exemplifica a Lei de Faraday, na qual uma *fem* produz uma carga magnética variando no tempo, que por sua vez induz uma corrente elétrica em um núcleo magnético de alta permeabilidade, processo similar ao que ocorre em um transformador CA.

Figura 25 - Ilustração Lei de Faraday



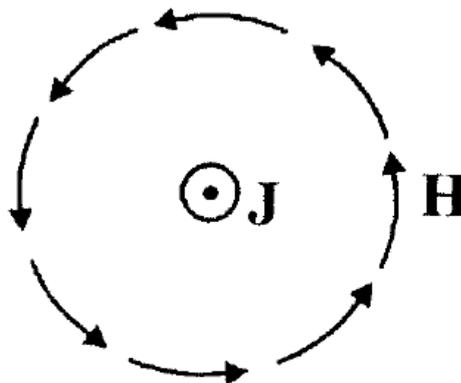
Fonte: Adaptado de Balanis (2012).

3.3.3 Lei de Ampère e contribuição de Maxwell

A Lei de Ampère, afirma que o campo magnético ao redor de um caminho \vec{L} fechado qualquer, definido por uma integral de linha, é igual a corrente líquida, I , que passa por este caminho, entretanto, I pode ser definida em termos de integral normal de \vec{J} que atravessa uma superfície, \vec{S} , como demonstrado na Equação 16 (KRAUS; CARVER, 1973). A Figura 26 ilustra a relação campo magnético, \vec{H} , com a densidade de corrente elétrica, \vec{J} , onde observa-se que o fluxo de corrente elétrica que atravessa o condutor gera uma circulação de \vec{H} .

$$\oint \vec{H} d\vec{L} = \iint \vec{J} d\vec{S} = I \quad (16)$$

Figura 26 - Lei de Ámpere



Fonte: Bastos e Sadowski (2003).

Para campos variáveis no tempo, Maxwell acrescentou a Equação 16, uma parcela de variação de densidade de fluxo elétrico, \vec{D} , no tempo capaz de produzir um campo magnético adicional, denominada corrente de deslocamento \vec{J}' e apresentada na Equação 17, resultando na Equação 10 (STRATTON, 2007).

$$\vec{J}' = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (17)$$

Neste contexto, para casos estáticos esse termo é nulo, para baixas frequências, devido a esta parcela ser insignificante em relação a densidade de corrente de condução, \vec{J} , o mais comum, é que este termo seja negligenciado (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Logo a Equação 10 para campos quase-estáticos deve ser recorrigida para a apresentada na Equação 18.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (18)$$

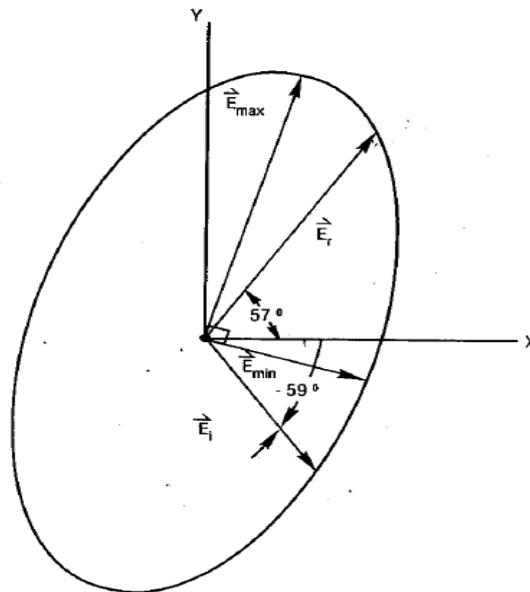
3.4 Outras características

Em LTs e SEs a três condutores, campos elétricos e campos magnéticos são, normalmente, descritos em termos de vetores e fasores, no qual os vetores descrevem a magnitude e posição (ângulo) no espaço, enquanto fasores indicam estas características em relação a uma variação senoidal no tempo (LAFORST, 1982).

Em correntes alternadas trifásicas, tais campos em um ponto no espaço próximo ao solo, são descritos por um vetor rotativo de amplitudes similar a uma elipse, com partes reais e imaginárias, cuja magnitudes resultantes são obtidas a partir de valores eficazes do semieixo maior e semieixo menor da elipse (DENO, 1976). Portanto, os vetores \vec{B} e \vec{E} são definidos em termos de vetores rms (LAFORST, 1982). Segundo Deno (1976) esta é a forma mais comum de se obter uma medição de campo elétrico, \vec{E} , e campo magnético, \vec{H} ou \vec{B} , em um ponto próximo ao solo.

A Figura 27 ilustra um campo elétrico elipticamente polarizado, onde a parte real, \vec{E}_r , e parte imaginária, \vec{E}_i , possuem direções e amplitudes variadas, descrevendo geometricamente uma elipse em torno dos eixos x e y, e no qual pode observar-se também pontos em que os valores máximos e mínimos de \vec{E} são atingidos, $\vec{E}_{máx}$ e $\vec{E}_{mín}$, respectivamente.

Figura 27 - Ilustração campo elétrico elipticamente polarizado



Fonte: Laforest (1982).

3.5 Histórico de pesquisas sobre a exposição a campos eletromagnéticos

Com o avanço da civilização, principalmente com a evolução tecnológica vivenciada a partir do século XX, fontes artificiais criadas pelo homem, como a energia elétrica e tecnologias sem-fio modificaram padrões sociais e profissionais da sociedade, e, sobretudo, acarretaram um significativo aumento no que tange a exposição humana à CEM (WHO, 2002).

A primeira referência sobre efeitos nocivos ao ser humano e exposição à CEM, data da II Guerra Mundial, quando acidentes com soldados que trabalhavam em torno de campos em *Ultra High Frequency* (UHF), foram associados a uma possível atuação de campos eletromagnéticos (MARTINS, 2012).

Mas apesar das bastantes especulações que se seguiram sobre o tema, foi com o incremento nos níveis de tensão de transmissão, destaque para as EAT, em 1950, que a pressão sobre órgãos governamentais se intensificou (FUCHS, 2015). Diante disso, a partir da década de 60, dados referentes a associação entre CEM e riscos à saúde humana passaram a ser coletados, por meio de estudos sob a exposição ocupacional em ELF (IARC, 2002).

Neste contexto, destaca-se os estudos de Deno (1976) que desenvolveu métodos de cálculo para campo elétrico e magnéticos em LTs trifásicas de 765 kV e 345 kV, por meio da determinação das componentes de semieixo máximo e mínima de uma elipse, possibilitando

assim a obtenção de valores próximos aos apurados durante medições *in loco*; e Braken (1976) que contribuiu com os estudos sobre equipamentos de medição de campos elétricos em ELF.

Os estudos de Deno, junto a outros especialistas como Zafanella, que compunham um projeto com foco em EAT, pela *Electric Power Research Institute* (EPRI), culminaram no desenvolvimento de um livro, editorado por LAFOREST (1982), que estabeleceu um avanço significativo em termos de cálculo, medição e análise de campos elétricos e magnéticos para LTs em EAT, bem como alguns tópicos sobre SEs, sobre a ótica das aferição dos níveis, indução de correntes e tensões e efeitos biológicos observados, sendo, principalmente, direcionado aos profissionais da área elétrica e as posições comuns adotadas nas rotinas de trabalho.

Observa-se que de início, o foco dos principais estudos eram as análises ocupacionais, devido a exposição diária e proximidade maior dos trabalhadores do setor elétrico com os CEM, ao qual estavam submetidos em razão da natureza das suas atividades profissionais, porém, como os hábitos da sociedade moderna incluíam o aumento de CEM ao redor dos mais variados ambientes, passou-se a se questionar os possíveis efeitos sob o público comum (LIPP, 2010).

Um dos principais precursores de análises dirigidas à população em geral, é o estudo epidemiológico de Wertheimer e Leeper (1979), realizado na cidade de Denver, nos Estados Unidos, que correlacionou o desenvolvimento de câncer em menores de 19 anos a residir próximo a linhas de distribuição altamente carregadas, com destaque para as que moram próximo aos transformadores, indicando assim, uma possível relação entre os níveis de corrente e, conseqüentemente, campo magnético e leucemia infantil.

Diante deste panorama, durante a década de 80, o interesse por efeitos nocivos advindo da exposição a campos magnéticos se sobressaiu aos estudos de campo elétrico e o foco em ensaios em laboratório foram adotados (CIGRÉ, 2000). Tais estudos experimentais concentraram-se na busca por técnicas que determinassem os efeitos biológicos oriundos da exposição a campos em ELF para ambos os públicos, com ênfase em possíveis riscos cancerígenos (IARC, 2002).

Entre os estudos realizados, há bastante controvérsias, devido a questões metodológicas, de modo, que enquanto alguns refutam a existência de efeitos negativos advindo da exposição, outras presumem possíveis danos à saúde causados pela mesma (MARTINS, 2012). Para Polk (1991), após uma extensa revisão de literatura de resultados experimentais para campos em ELF, não é possível estabelecer se estes campos constituem perigo à saúde, apesar de que efeitos adversos a saúde em criança, como câncer, não podem ser descartados, sendo necessário mais pesquisas na área e haja forte evidência de efeitos biológicos momentâneos como efeitos sob a melatonina (hormônio do sono), que, entretanto, são observados apenas durante a

presença do campo e revertido após a remoção do mesmo; Para o autor, todavia, a exposição prolongada (longo prazo) à CEM em ELF é desaconselhada.

Tendo em vista, as inúmeras suposições levantadas por estes estudos sobre uma possível ligação entre campos elétricos e magnéticos em ELF e possíveis efeitos biológicos, por vezes, perigosos à saúde humana, as entidades governamentais e instituições internacionais que regem a saúde pública, num esforço conjunto com outras organizações científicas, de respaldo mundial, têm alertado as populações sobre os riscos de exposição a CEM e buscado determinar níveis seguros a qual podem estar submetidos seres humanos e organismos vivos em um ambiente cercado de CEM (MENDES, 2010).

Neste contexto, tratando-se de pesquisas sobre os riscos cancerígenos associados a CEM em ELF e outros efeitos biológicos, evidencia-se instituições como a entidade máxima de saúde, WHO/OMS e iniciativas conjuntas como da *International Agency for Research of Câncer* (IARC) e da ICNIRP.

A ICNIRP, contudo, é uma instituição que entre seus objetivos estar tanto a investigação sobre perigos associados à exposição a toda faixa de radiação não-ionizante do espectro eletromagnético (até 300 GHz), com base em revisões de relatórios técnicos e avaliações científicas, quanto a recomendações de limites seguros para exposição aos CEM, através de diretrizes e normas, sendo todos estes passos em colaboração com a OMS (SILVA, 2010).

No Brasil, merece destaque a Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética (ABRICEM), que em conjunto com ANEEL e outras instituições e pesquisadores do estado de São Paulo, lideraram um estudo epidemiológico sobre os efeitos da exposição a CEM em subestações e LTs em 60Hz, com foco em leucemia em crianças, câncer cerebral em adultos, ligação com acidentes de trabalho, bem como análise da percepção dos riscos e determinação dos níveis de CEM, na região metropolitana da cidade de São Paulo – SP, Brasil, que culminou na elaboração das normas e regulamentações brasileiras (LIPP, 2010).

Sendo assim, em termos de se estabelecerem limites adequados para exposição aos CEM, existem, nesse sentido, diretrizes de âmbito internacionais e nacionais, como também, as que orientam sobre procedimentos para obtenção dos valores de campos elétricos e magnéticos, sejam através de cálculos ou medições (MARTINS, 2012).

A nível internacional, no presente momento, as diretrizes de maior destaque em ELF, tendo em vista o escopo deste trabalho, são a ICNIRP (2010) e os padrões IEEE (2002) e IEEE (1994), enquanto a nível nacional merecem destaque a Lei 11.934/2009 em Brasil (2009), as resoluções normativas da ANEEL (2010) e ANEEL (2014) e ABNT (2016).

Em consonância com o proposto nesta dissertação, vale ressaltar os trabalhos conduzidos por Grbic et al (2017), que busca o diagnóstico de níveis de CEM no interior de SEs em 110 kV; Li, Yang e Peng (2013) e Safigianni e Tsompanidou (2009) que além da aferição dos níveis propõem a confecção de mapas de contorno por todo pátio de SEs em 1000kV e 150 kV, respectivamente. Para LTs, destacam-se os trabalhos de Qabazard (2007), Okrainskaya, Sidorov e Gladyshev (2012), Vujevic, Lovric e Modric (2011) que também determinam níveis de CEM em LTs de diferentes níveis de tensão e corrente, com base no estipulado nas diretrizes sobre o tema, e o trabalho clássico de Olsen e Wong (1992) com foco nas análises matemáticas dos CEM próximos a LTs. Outros trabalhos como de Tanaka, Mizuno e Naito (2011) que padronizam métodos de medição, tanto no ambiente de uma SE, quanto de LTs, de diferentes níveis em diferentes localidades no mundo, e de Farag et al (1999) que desenvolveu uma extensa análise de CEM, para exposição ocupacional ao redor de LT e SE de 132 kV, auxiliaram nas abordagens teórica e prática do desenvolvimento deste trabalho.

3.6 Mecanismos de interação e efeitos biológicos observados

A posição científica sobre efeitos biológicos da exposição em ELF, é definida como complexa, dado as polêmicas que envolvem o tema, todavia, esta situação está mais relacionada com a dificuldade entre se investigar todos os fatores que podem influenciar o diagnóstico de alguns efeitos e causarem uma associação indevida, ou até mesmo isolá-los durante as pesquisas, do que entender os mecanismos de interação dos CEM, para esta faixa de frequência, com um organismo vivo, como o ser humano (CIGRE, 2000).

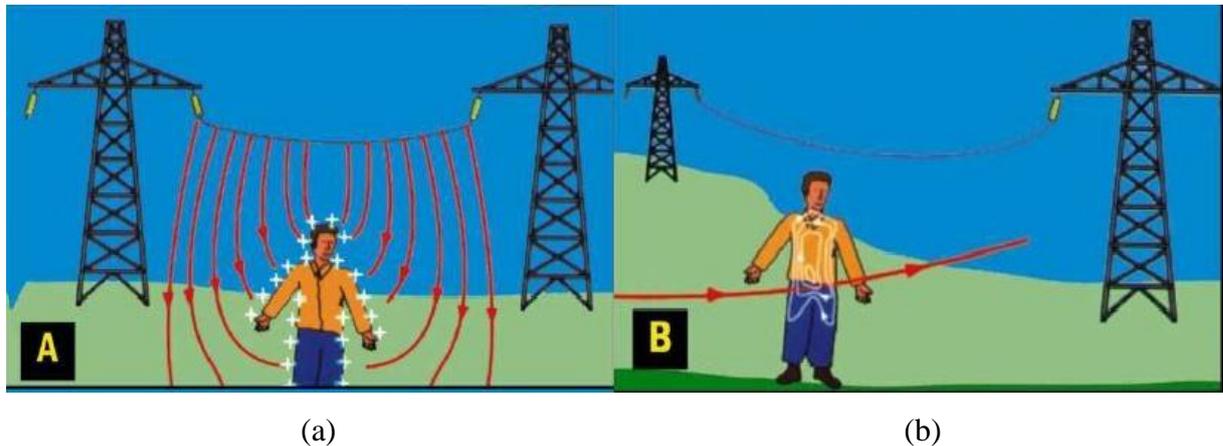
Os mecanismos básicos de interação em ELF são bem conhecidos e estabelecidos, entre eles destaca-se, a indução por densidade de corrente, \vec{j} , no corpo, que interagem de maneira diferente sob a atuação de campos elétricos ou campos magnéticos, de acordo, com a magnitude de \vec{j} e das dimensões do tecido humano (IARC, (2002).

Na presença de campos elétricos, cargas são induzidas na superfície do corpo humano, que, em consequente, causam um fluxo elétrico de corrente para o tecido, mas, não penetram no corpo, como ilustrado na Figura 28a; Campos magnéticos, por sua vez, induzem correntes que formam laços no interior deste corpo, como ilustrado na Figura 28b (WHO, 2002).

Um outro tipo de mecanismo, de efeito indireto, resultante de um contato entre o corpo e outro objeto nas proximidades que são eletricamente carregados, devido à atuação de CEM (ICNIRP, 2010) e, portanto, induzem correntes que atravessam o corpo humano ao se

estabelecer algum tipo de contato direto entre o indivíduo e este objeto, no formato de um choque elétrico (KUSTER, 2011).

Figura 28 - Mecanismos de interação entre o corpo humano e (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético



Fonte: WHO (2002).

Em relação a efeitos biológicos relatados ao longo dos anos, as posições mais relevantes, são de grupos de pesquisas, em âmbito mundial, designados a estabelecer opiniões mais consistente sobre o tema, com base em revisões de literatura, como a análise de estudos, pesquisas e relatórios técnicos de destaque (BECKER, 2008).

As posições atuais da entidade máxima de saúde, da WHO/OMS (2002) e da IARC (2002), é que, em termos de exposição a longo prazo é ainda necessário o aprofundamento de pesquisas, sendo recomendado a utilização de providências preventivas e em relação aos estudos de leucemia infantil, estas instituições entendem que campos ELF são classificados como possivelmente carcinogênicos para humanos, isto quer dizer que há uma evidência limitada de carcinogenicidade em humanos e menos que suficiente para animais em laboratório, de forma, que é possível que haja outras explicações para as associações observadas nesses estudos.

Posições estas, endossadas por outros grupos de estudos como o CIGRE *Expert Group*, formado em 1991, por médicos e biólogos (CIGRE, 2000) e, pela *National Radiological Protection Board* (NRPB) que assume uma possível relação entre leucemia infantil e campos magnéticos de pequena intensidade, porém sem evidência científicas concretas, mas que, por outro lado, não podem ser descartadas por completa, ao mesmo tempo, em que refuta qualquer ligação biológica plausível entre campos magnéticos e câncer em adultos (NRPB, 2001).

A ICNIRP (2010) apresenta um compilado de observações para estes e outros tipos de efeitos observados, para população ocupacional e público comum, em exposição a curto prazo, a partir das opiniões destas instituições e outros pesquisadores, com base em estudos epidemiológicos e biológicos em humanos, animais e células, categorizados em efeitos agudos ou crônicos. No qual efeitos agudos são efeitos sob processos fisiológicos e crônicos são o desenvolvimento de patologias. Diante disso, tais efeitos são apresentados nas subseções seguintes, como base no estabelecido pela ICNIRP.

3.6.1 Efeitos agudos

Há forte evidência de que a exposição a ELF afeta o Sistema Nervoso Central (SNC), através de estimulações temporárias em nervos e tecidos musculares, podendo vim a alterar, momentaneamente, a coordenação motora de indivíduos.

A indução de fosfenos na retina, que causam a sensação de luminosidade na periferia do campo visual é bem estabelecida, com a aplicação de campo magnético.

O fluxo de corrente na superfície do corpo, originado da ação do campo elétrico, pode ser sentida, chegando a níveis dolorosos, em 7% dos voluntários, para intensidade até 5 kV/m, e em até 50% dos voluntários, para níveis até 10 kV/m.

No entanto, outros efeitos neurológicos, como suicídio e depressão, não apresentam estudos confiáveis, até o momento.

Para distúrbios cardiovasculares devido a exposição a CEM em ELF, com exceção daqueles originados de choque elétrico, a conclusão é que são improváveis de acontecer.

Em relação ao sistema endócrino e na melatonina do sono, não há consenso entre os estudos, pois enquanto uns sugerem a influência outros refutam que exista relação em CEM e tais sintomas.

3.6.2 Efeitos crônicos

A ICNIRP (2010) destaca que em relação a patologias neurodegenerativas, como doença de Parkinson e esclerose múltipla, poucos estudos forma desenvolvidos e não há associação, até agora, entre CEM e o desencadeamento destas doenças. Em relação ao mal de Alzheimer e Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA), há possibilidade de risco, porém sem associação biológica definida até o momento, tornando os resultados inconclusivos, inclusive

com polêmicas em relação a estudos clínicos com seleção de amostras, possivelmente, tendenciosas.

Em relação a reprodução e desenvolvimento humano, as pesquisas não demonstram associação entre a exposição paterna e algum distúrbio reprodutivo, as associações entre a exposição materna e aborto são tidas como fracas e não há evidências de malformações fetais advindas desta exposição.

Já em relação ao câncer e leucemia infantil, considera que extensa investigação epidemiológicas, que envolve resultados inconsistentes, cuja associação entre campo magnético e tais patologias podem ser casuais. Aqui a ICNIRP endossa a opinião da WHO e da IARC campos elétricos e magnéticos em ELF podem ser possivelmente cancerígenos.

3.7 Normas e legislações

Como explanado anteriormente, algumas normas e diretrizes sobre a exposição a campos elétricos e magnéticos são tidas como mais relevantes no cenário mundial e nacional. Nesse sentido, esta secção abordará de forma particular, cada uma dessas elementos regulatórios, que compreendam a faixa de frequência em 60Hz, do objeto deste estudo.

3.7.1 Diretrizes internacionais

Esta subsecção reservar-se a abordar as legislações e orientações internacionais de maior destaque, bem como aquelas que influenciaram na determinação da legislação brasileira, tratada na subsecção seguinte.

3.7.1.1 ICNIRP

A ICNIRP é talvez a diretriz que merece mais destaque, uma vez que é recomendada internacionalmente, por instituições como a WHO e a IARC, para adoção de limites seguros de CEM em empreendimentos de energia elétrica e rádio frequência, por todos os países do globo.

Em termos ELF, a ICNIRP publicou em 2010 a “*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 kHz)*”, esta é a mais recente publicação da ICNIRP em baixas frequências, cujo objetivo é estabelecer as orientações para proteção de seres humanos expostos a CEM nesta faixa de frequência, de modo a proteger, seja a população ocupacional ou não-ocupacional, contra efeitos adverso a saúde, com exceção, dos indivíduos

com próteses metálicas e marca-passos cardíacos. Tais limites foram estipulados com base em exposição a curto prazo e os efeitos fisiológicos estabelecidos anteriormente, uma vez que os dados e estudos sobre condições crônicas não são considerados convincentes.

De maneira geral, buscando evitar os estímulos fisiológicos discutidos na secção 3.6.1 e 3.6.2, com o uso de fatores de redução ou segurança, níveis de restrições básicas e níveis de referência são propostos para a população ocupacional, aquela formada por adultos, cuja a exposição é oriunda de suas atividades profissionais, e para a população geral, formado por indivíduos de todas as idades e condições de saúde.

Como a população em geral apresenta uma suscetibilidade maior que a população ocupacional, tendo em vista que no público em geral, pode se encontrar organismos mais vulneráveis, ao mesmo tempo, que a ocupacional é mais ciente dos perigos e, por vezes, encontra-se protegidas por trajes e outros métodos de mitigação, são adotados valores mais rigorosos para exposição pública do que para a ocupacional.

Em sua versão anterior, a ICNIRP (1998), definia as restrições básicas, como a grandeza elétrica que interage com o corpo humano, que para baixas frequências, até então era a densidade de corrente, \vec{J} . Quando \vec{J} é maior que 100 mA/m², os estudos comprovavam que há alterações drásticas no SNC, e, portanto, com o uso de fatores de redução, estabeleceu-se que para população ocupacional o limite de densidade de corrente, \vec{J} , seria 10 mA/m² e de 5 mA/m² para a população geral.

Entretanto, em sua nova versão, a ICNIRP (2010) adota como restrição básica a intensidade interna de campo elétrico, E_i , que atua sob as células eletricamente sensíveis, como as que formam o SNC e o sistema nervoso periférico (SNP), assumindo valores de 120 kV/m e 24 kV/m para população ocupacional e população geral, respectivamente.

Mesmo diante da alteração do método de definição de restrições básicas e níveis de referência, os mecanismos de interação entre corpo humano e CEM são os mesmos, a análise de intensidade de campo elétrico no interior da célula, ao invés da indução por corrente, possibilita apenas uma análise microscópica da interação entre os CEM e efeitos biofísicos, sem descartar as proposições dos mecanismos definidos anteriormente.

Como a intensidade interna de campo elétrico, E_i , é uma grandeza difícil de se determinar, a ICNIRP estipulou níveis de referências, com base em modelagem matemáticas, visando relacionar grandezas mais simples de se obter, seja por cálculo ou medições, do que as restrições básicas. Neste contexto, para determinação dos níveis de referência adotou-se parâmetros como intensidade de campo elétrico, \vec{E} , e intensidade de campo magnético, \vec{H} , ou

ainda, densidade de fluxo magnético, \vec{B} , tendo como base os limites de campo elétrico interno para o pior caso de acoplamento do campo com indivíduo, àquele que o indivíduo está em pleno contato com o solo.

A Tabela 6 apresenta os níveis de referência, \vec{E} , \vec{H} e \vec{B} , para várias faixas de frequência e tipos de ambiente, isto é, população exposta.

Tabela 6 - Níveis de referência adotados pela ICNIRP

Tipo de ambiente	Faixas de Frequência	Intensidade de Campo \vec{E} (kV/m)	Intensidade de Campo \vec{H} (A/m)	Campo \vec{B} (T)
Ocupacional	1 Hz – 8 Hz	20	163.000/f ²	0,2/f ²
	8 Hz – 25 Hz	20	20.000/f ²	0,025/f ²
	25 Hz – 300 Hz	500/f	800	0,001
	300 Hz – 3 kHz	500/f	240.000/f	0,3/f
	3 kHz – 10 MHz	0,17	80	0,0001
Não-Ocupacional	1 Hz – 8 Hz	5	32.000/f ²	0,04/f ²
	8 Hz – 25 Hz	5	4.000/f	0,005/f
	25 Hz – 50 Hz	5	160	0,0002
	50 Hz – 400 Hz	250/f	160	0,0002
	400 Hz – 3 kHz	250/f	64.000/f	0,08/f
	3 kHz – 10 MHz	0,083	21	0,000027

Fonte: Adaptada de ICNIRP (2010).

3.7.1.2 IEEE *std* C95.6/2002

Em 2002, nos EUA, o IEEE, publicou a norma C95.6, intitulada “*IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz*”, que estabelece limites para os campos eletromagnéticos, em baixa frequência, para públicos ocupacionais e públicos em geral, também baseada em efeitos a curto prazo, uma vez que, assim como a ICNIRP, esta norma desacredita estudos em relação a doenças crônicas, como o câncer, e as associações a efeitos de longo prazo.

Para esta norma, o mecanismo de interação é a eletroestimulação da membrana celular em repouso, gerando polarizações e potenciais nesta, a partir da aplicação de campo elétrico em células, similarmente ao que é adotado, recentemente, pela ICNIRP. Apesar disso, os valores estabelecidos pela a IEEE *std* C95.6 (2002) para restrições básicas e níveis de referências, são diferentes dos estabelecidos pela ICNIRP.

Todavia, também busca evitar o desencadeamento de efeitos biológicos como a estimulação dolorosas após exposição a campo elétrico, excitação muscular que pode afetar as funções motoras, semelhante aos processos fisiológicos reconhecidos pela ICNIRP, e a excitação cardíaca ou alterações do fluxo sanguíneo.

A Tabela 7 apresenta os níveis de referências da IEEE *std* C95.6/2002 para 60 Hz.

Tabela 7 - Níveis de referência adotados pela IEEE

Tipo de público	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (A/m)	Densidade de Fluxo Magnético (μT)
Público em Geral	5,00	719	904
População Ocupacional	20,00	2160	2710

Fonte: Adaptada IEEE (2002).

3.7.1.3 IEEE *std* 644/1994

Como dito anteriormente, os primeiros esforços para caracterizar níveis de exposição a CEM eram direcionadas as linhas de transmissão e distribuição, principalmente as de tensões elevadas.

Neste contexto, em 1994, o IEEE, publicou a norma 644, intitulada “*IEEE Standard procedures for measurement of power frequency Electric and magnetic fields from AC power lines*”, que define procedimentos para medições de campo elétrico e magnético na vizinhança de linhas de transmissão e distribuição em corrente alternada, mais especificamente para 50/60 Hz, fornecendo as principais características dos instrumentos de medição e as formas de caracterizar o ambiente eletromagnético ao redor destes objetos.

Entre as contribuições desta norma estar a construção de perfis laterais e longitudinais de medições, que devem ser obtidos a 1m do solo, para ambos os tipos de campo, porém, vale ressaltar, que para o caso de medição de campos elétricos, a componente vertical deve ser privilegiada e o operador deve estar a aproximadamente um 2,5m de distância da sonda do medidor, para evitar perturbação do campo elétrico.

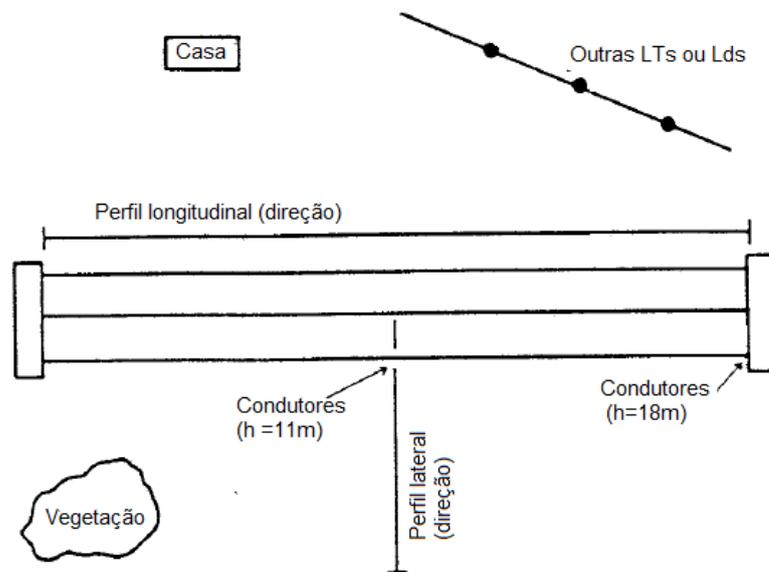
Os perfis laterais devem iniciar no condutor central e se estender a pelo menos 30m após os condutores externos, em um vão que corta, transversalmente, o eixo da linha em intervalos regularmente espaçados, em, pelo menos, incrementos de 5, no ponto de menor altura do condutor em relação ao solo, porém para uma análise completa indica-se a adoção de mais

perfis, também igualmente espaçados. Já os perfis longitudinais, devem ser obtidos ao longo da linha, paralelamente aos pontos de maior intensidade observados nos perfis laterais, também em intervalos de pelo menos 5 incrementos de distância.

Os tipos de medidores são os mesmos adotados, em solo brasileiro, pela ABNT NBR 25415/2016, sendo apresentados, aqueles que importam ao escopo deste trabalho, na subsecção 3.7.2.3. De resto, a presença de vegetação, condições climáticas e de carregamento e tensões na linha devem ser observadas.

Com a finalidade de facilitar o entendimento, a Figura 29 ilustra as direções dos perfis longitudinal e lateral em um ambiente eletromagnético ao redor de uma LT, composto por residências, vegetações e, até mesmo, outras linhas de potência. Pode-se observar que em uma região deste espaço, a distância entre os condutores e o solo é menor, e, é neste vão que deve ser traçado ao menos um perfil lateral.

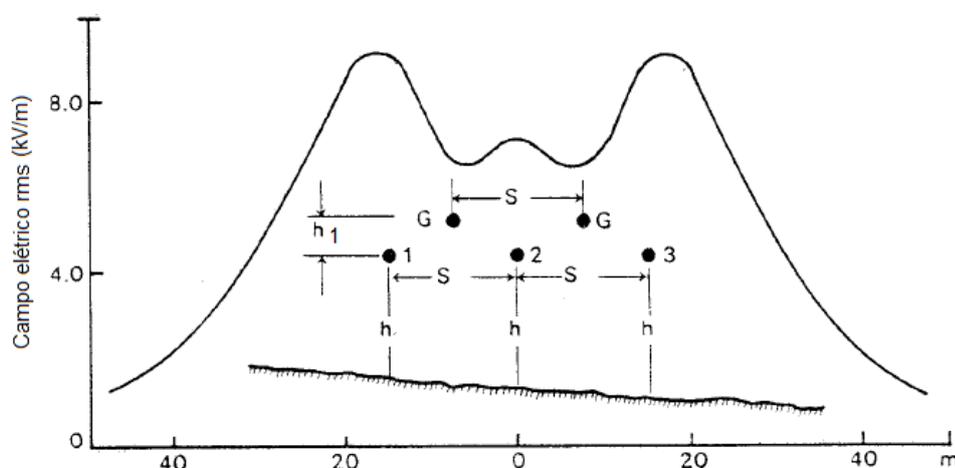
Figura 29 - Ilustração perfis lateral e longitudinal ao redor de uma LT



Fonte: IEEE (1994).

A Figura 30, por sua vez, exemplifica um perfil lateral de campo elétrico em uma LT, onde G refere-se aos condutores para-raios e 1, 2 e 3 são os condutores de fase, separados a uma distância vertical h_1 entre eles, a uma distância horizontal, S, entre si, e a uma distância, h, entre os condutores de fase e o solo. Observa-se ainda que o solo, durante as medições *in loco*, pode apresentar-se de maneira irregular.

Figura 30 - Perfil lateral de campo elétrico em condutores de uma LT



Fonte: IEEE (1994).

3.7.2 Legislação nacional

Em relação à preocupação global, o Brasil apresentou, tardiamente, um ambiente regulatório específico ao tema. Pressionado por instituições, como a ABRICEM, e disputas judiciais entre a população e as concessionárias de energia, as primeiras legislações surgiram, apenas, em 2009 (SILVA, 2012). As subsecções seguintes apresentam tais legislações em suas versões mais atuais.

3.7.2.1 Lei 11.934/2009

Em 5 de maio de 2009, foi decretada a lei 11.934, estabelecendo limites de exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnético, para estações radiotransmissoras e sistemas de energia elétrica operando em até 300 GHz, respondendo a esta lei, portanto, todas as prestadoras de serviço de radiocomunicação, as concessionárias e permissionárias de energia elétrica, de modo, a garantir os direitos dos indivíduos à saúde e meio ambiente.

Para tanto, esta lei designou que, em solo brasileiro, até que a OMS adote uma outra postura, serão adotados os limites indicados na ICNIRP, na forma de níveis de referência e que todos que a quem se dirigem esta lei, deverão atender estes limites, sendo de responsabilidade dos órgãos reguladores federal na área de serviço de energia elétrica e de telecomunicações, a fiscalização deste pressuposto.

Ficando, portanto, a cargo do órgão regulador de energia elétrica estipular os métodos de avaliação e procedimento para verificação dos níveis de campo elétrico e magnético, como também solicitar a medição ou cálculos de um novo sistema de transmissão que venha a ser ligado na Rede Básica Nacional ou quando houver alteração na configuração da instalação.

3.7.2.2 Resoluções da ANEEL

Diante do exposto, o órgão regulador de energia elétrica, a ANEEL, publicou a REN nº 318 em 23 de março de 2010, posteriormente, atualizada pela REN nº 616 de 1º de Julho de 2014, na qual reconhecia os valores limites de exposição a campo eletromagnéticos, recomendados pela OMS, na forma de níveis de referência indicado na norma da ICNIRP, para sistemas operando em corrente alternada, enquanto, que os limites indicados pela IEEE, devem ser adotados por sistemas operando em corrente contínua, de modo, que ambos atendam as referidas restrições básicas de cada norma.

Nesse sentido, a Tabela 8 apresenta os níveis de referência em termos de campo elétrico em kV/m e campo magnético em μT , para instalações de 50/60 Hz, em concordância com o estabelecido pela ICNIRP.

Tabela 8 - Níveis de referência adotados pela ANEEL

Tipo de público	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	5,00	200,00	4,17	200,00
População Ocupacional	10,00	1000,00	8,33	1000,00

Fonte: ANEEL (2014).

A ANEEL estipulou ainda que todo novo sistema de energia com tensões igual ou acima de 138 kV ou para o caso de alterações nas características da instalação de unidades já existentes, nos níveis de tensão mencionado, deve-se apresentar relatório de conformidade ou plano de adequação.

Tanto o relatório de conformidade, quanto o plano de adequação, devem conter os níveis de campo elétrico e campo magnético, medidos ou calculados, em 1,5m acima do solo, no interior das subestações de energia como também no seu perímetro e na faixa de servidão das linhas de transmissão ou distribuição, de acordo com o pré-estabelecido na ABNT NBR

25415/2016. Além disso, deve indicar a tensão nominal de operação, a temperatura máxima admissível de projeto, o carregamento máximo dos condutores, seja em operação normal, seja em emergência, a distância mínima entre condutores e solo e layout típico dos circuitos e respectivas sequências de fases.

3.7.2.3 ABNT NBR 25415/2016

A ABNT NBR 25415/2016 é a norma, a nível nacional, que atribui o mecanismo de interação entre campos e as células do ser humano, à indução de uma corrente elétrica, como as versões antigas da ICNIRP, sendo sua funcionalidade, principal, indicar os métodos adequados e aceitáveis para medição dos níveis de referência de campos elétricos e magnéticos, com base em diversas literaturas, entre elas a IEEE *std* 644 /1994.

Esta norma abrange todas as instalações de geração, transmissão e distribuição de energia que operem em 50 e 60 Hz e com níveis de tensão acima de 1 kV, desta maneira, sua aplicabilidade envolve: usinas geradoras de energia, subestações de energia, linhas de transmissão e circuitos de distribuição acima de 1 kV.

Seu objetivo é auxiliar na medição dos valores eficazes (rms) de campos elétricos e magnéticos quase-estáticos que sejam formados por componentes de frequência na faixa de 50 e 60 Hz, cuja magnitudes de campo elétrico e magnético não ultrapassem 50 kV/m e 100 mT, nesta ordem.

Os instrumentos de medição devem apresentar informações quanto a incerteza, escala, banda passante, de modo, a assegurar que suas condições de operação são adequadas à aplicação, conforme o especificado na norma de que se trata esta subsecção.

Os medidores de campo magnético são formados por um elemento sensor de campo e o detector que transforma o sinal em um valor de campo magnético que pode ser lido pelo usuário em um display. Como o campo magnético não é perturbado pela presença do observador, durante o mapeamento dos campos, o medidor de campo magnético pode ser segurado manualmente. Os efeitos de dielétricos próximos também podem ser desprezados, porém grandes estruturas de metais não-ferrosos e objetos ferrosos podem perturbá-lo.

Para medições de densidade de fluxo magnético, \vec{B} , o elemento sensor de campo magnético deve ser de três eixos e quando formado por três bobinas que detectam o valor rms de \vec{B} nas três direções ortogonais, indicando no display o valor de campo resultante é denominado, como do tipo sonda indutiva.

Os medidores de campo elétrico, por sua vez, são análogos, em relação a sua constituição, ao campo magnético, ou seja, são formados por um elemento sensor e um detector, cuja funcionalidades foram ditas anteriormente. Entre os tipos de medidores existentes, destaca-se o medidor de espaço livre, que é um aparelho portátil que permite medições acima do plano de terra, suspenso no espaço e, portanto, sem necessidade de um terra de referência.

Os medidores de espaço livre atuam detectando a corrente induzida em uma sonda, isolada eletricamente, após ser introduzido na presença de campo elétrico. Através da corrente induzida o detector indica o nível de intensidade de campo elétrico, \vec{E} , em kV/m. Podem ser de um ou três eixos.

O campo elétrico, diferentemente do campo magnético, é perturbado pela presença de pessoas, animais e objetos estranhos, logo, deve-se isolar o local, o observador deve ficar a um braço de distância, no mínimo, do sensor e todos os demais eletroportáteis devem ser desligados.

Além disso, tanto medidores elétricos, quanto magnético, devem estar adequados quanto a banda passante, sendo preferível um com banda estreita e centralizada na frequência industrial. Outros parâmetros, como incerteza menor que 10% do valor da leitura, calibração, escala de magnitude e legibilidade de escala a pelo menos um braço de distância, devem ser checados.

Ademais, as medições devem ser realizadas, no mínimo, no limite da faixa de segurança de uma linha de transmissão e no perímetro da subestação, de preferência, nos instantes de tempo em que a instalação elétrica esteja na sua situação de carga máxima.

Diferentemente do estabelecido pelos padrões IEEE (1994) de medições, a altura de medição, indicada por esta norma, deve ser de 1,5 m de distância do solo, para configurar medições na região do tronco e cabeça do indivíduo, pois tais regiões são as comprovadamente mais vulneráveis.

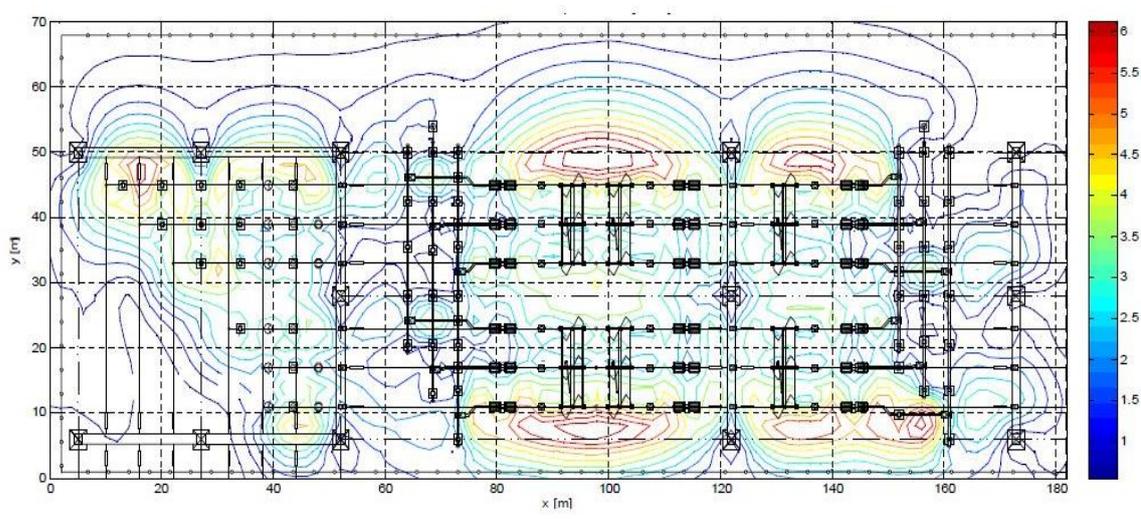
Durante as medições devem ser anotadas informações, como identificação do instrumento, valores instantâneos de tensão e corrente, a data e hora das medições, a localização dos pontos em relação aos equipamentos (fontes) com auxílio de desenho nítido do layout da subestação ou LT, a temperatura ambiente e umidade do ar, indicação das grandezas a serem medidas e, se for de interesse, a descrição sumária das atividades humanas no meio em questão.

4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Diante do exposto, a determinação de valores de campos magnéticos, \vec{H} ou \vec{B} , e campos elétricos, \vec{E} , em torno de subestações e linhas de energia em AT, seja por cálculo ou por medições, são de extrema importância para assegurar que os organismos vivos em torno deste ambiente não estão sob a atuação de níveis de CEM acima dos indicados.

Neste contexto, as medições realizadas possibilitam uma análise da variação espacial dos CEM, isto é, possibilita o registro dos componentes do CEM em relação a sua posição física no espaço (MARTINS, 2012). Em subestações, por exemplo, LAFOREST (1982) indica que a caracterização de \vec{E} é comumente referida a valores próximos ao solo e, uma boa forma de visualiza-la é através de mapas de contorno, compostos por linhas equipotenciais sob o *layout* da SE, conforme é apresentado na Figura 31, na qual é demonstrado as curvas de nível de valores de \vec{E} sob o mapa característicos de uma SE.

Figura 31 - Exemplo Mapa de contorno de \vec{E} em uma SE



Fonte: Albuquertti (2013).

Entretanto, medições amostrais de campo elétrico e magnético, representam a exposição humana apenas para aquela porção da anatomia humana que coincide com o local de medição (ABNT, 2016).

Logo, nas medições, as interpretações da intensidade de exposição humana são restritivas a altura de 1,5m e apenas aos pontos amostrais medidos e, portanto, a obtenção dos mapas de contorno é, geralmente, feita por intermédio de cálculos matemáticos dos CEM, modelados computacionalmente, como em Ellithy, Shafai e Assiry (2009) e Purcar et al (2016),

e não a partir de medições. Porém, este trabalho propõe que, dado os valores obtidos durante as medições, através da aplicação de métodos de interpolação espacial, um mapa de superfície 2D seja gerado, com as respectivas, curvas de nível. Para tanto, baseia-se, no uso satisfatório destas técnicas em estudos recentes para análise de exposição à CEM em rádio frequência, como observados em Rufo et al (2018), Santana et al (2017), Azpurua e Ramos (2010) e Donker et al (2006). Ademais, tais métodos já são bastante concretizados em aplicações geográficas como elevações, densidade populacional, propriedades de solos, a partir da dados medidos distribuídos no espaço (MITAS; MITASOVA, 2005).

A interpolação espacial, pode ser então definida, como uma estimativa de pontos desconhecidos, através da ponderação de pontos amostrados em uma região, de modo, que a partir dos locais conhecidos possa-se aferir o valor de pontos próximos não-observados desta região (GRAAF, 2016). Logo, a interpolação espacial, trata-se de encontrar uma função que representa toda uma superfície, capaz de prever valores em pontos não-amostrados desta, desde que se tenha em posse, um conjunto de dados espaciais que a descreva (LAM, 1983).

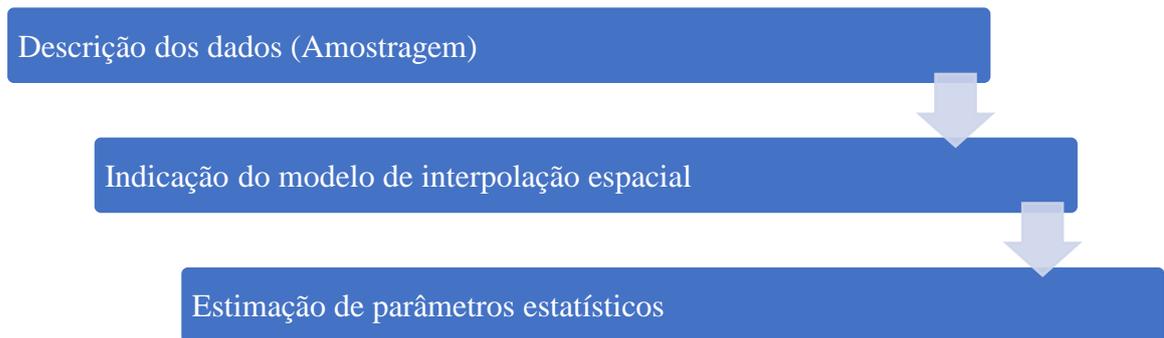
Estas estimativas podem ser obtidas através de infinitas funções, sendo assim, há diversos métodos de interpolação espacial, classificados com base em condições adicionais que definem o modelo, em geoestatísticos e locais, cuja escolha depende da aplicação e o comportamento inicial dos pontos observados (MITAS; MITASOVA, 2005). Todavia, apresentam como formulação genérica, uma função de ponderação, apresentada na Equação 19, onde $Z(x_j)$ é o ponto estimado, localizado em x_j , $z(x_i)$ é o ponto amostrado em x_i e λ_i são os pesos atribuídos aos pontos amostrados e n é a quantidade de amostras (LI; HEAP, 2008).

$$Z(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (19)$$

Resumidamente, segundo Cressie (1991), as etapas de uma interpolação pode ser observado na Figura 32, na qual a primeira etapa é a descrição sumária dos dados coletados, em seguida, um método de interpolação deve ser escolhido e aplicado, e, por último, uma análise estatística da distribuição deve ser realizada, como o uso de mecanismos de detectar tendências e variância, para determinar a precisão do método utilizado.

As subsecções 4.1 a 4.4 fazem uma abordagem particular sobre cada uma dessas etapas, tendo em vistas, assuntos importantes ao escopo desta dissertação, sendo as subsecções 4.2 e 4.3 reservadas aos estudos dos métodos locais e geoestatísticos, respectivamente.

Figura 32 – Etapas de uma interpolação



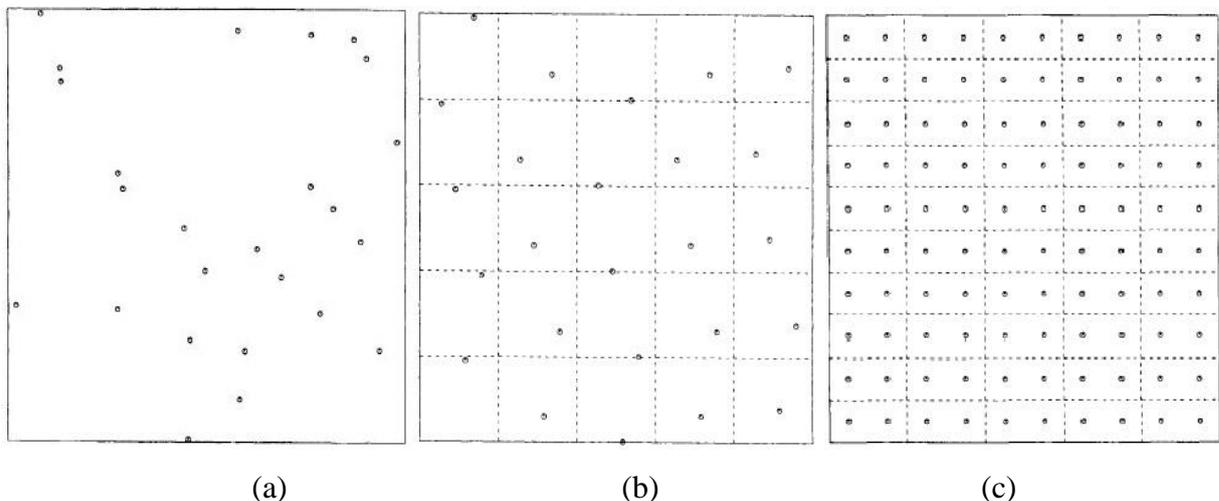
Fonte: Adaptada de Cressie (1991).

4.1 Amostragem dos dados

A descrição sumária dos dados coletados pode assumir diferentes formatos, de acordo com o tipo de amostragem adotada. Para Ripley (2004) a amostragem pode ser aleatória, quando a escolha de cada ponto dentro de uma região, ocorre de forma independente, ou sistemática quando cada elemento da amostra estar em função de um espaçamento regular entre amostras, sendo estes últimos os indicados para obtenção de uma interpolação mais precisa.

A Figura 33 ilustra os tipos de amostragem, sendo a amostragem aleatória apresentada na Figura 33a e a amostragem sistemática em uma estratificação quadrada, pode ser observadas nas Figura 33b e Figura 33c, em formatos não-linearmente espaçados e linearmente espaçados, respectivamente.

Figura 33 - Tipos de amostragem: (a) Aleatória; (b) Sistemática não-linear; (c) Sistemática linear



Fonte: Adaptada de Ripley (2004).

4.2 Métodos locais de interpolação espacial

Os métodos locais de interpolação baseiam-se na ideia que cada ponto conhecido exerce influência nos pontos não-observados da superfície apenas até uma certa distância finita entre estes pontos, de modo, que cada método apresenta uma ponderação diferente, com base em condições de contorno particulares (MITAS; MITASOVA, 2005).

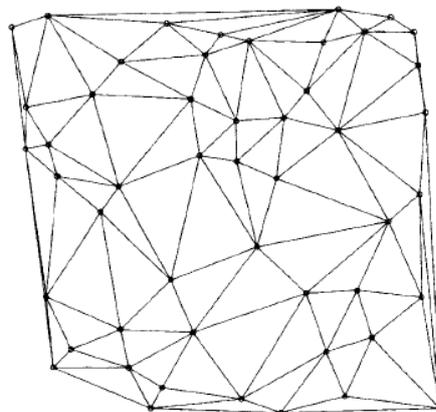
Os tipos de métodos locais adotados neste trabalho e abordados a seguir, quanto a natureza de suas ponderações, são:

- Triangulação com Interpolação Linear (*TLI*);
- Vizinho Mais Próximo (*VP*);
- Vizinho Natural (*VN*);
- Inverso Ponderado da Distância (*IDP*);
- Método de Shepard Modificado (*MSM*);
- Curvatura Mínima (*CM*).

4.2.1 Triangulação com interpolação linear (TLI)

Na interpolação por triangulação, os pontos amostrados são unidos, de modo, que seus vértices formem uma série de triângulos (triangulação de Delaunay) cujo interior não existe nenhum ponto observado, mas pontos não-amostrados podem ser estimados, com base em interpoladores lineares (LI; HEAP, 2008). A Figura 34 apresenta o mosaico que caracteriza a triangulação de Delaunay, isto é, a superfície de contorno que define a função peso da TLI.

Figura 34 - Triangulação Delaunay



Fonte: Ripley (2004).

4.2.2 Vizinho mais próximo (VP)

O método dos vizinhos mais próximos é uma técnica de interpolação que consiste em agrupar pontos mais próximos de um ponto de interpolação qualquer, com base em um polígono geométrico, denominada Diagrama de Voronoi (LI; HEAP, 2008).

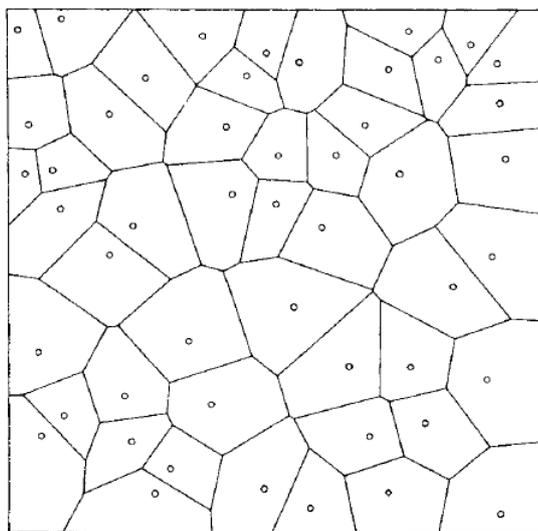
O Diagrama de Voronoi, por sua vez, pode ser definido como uma região de pontos que apresentam a menor distância euclidiana entre si, isto é, os pontos mais próximos (GRAAF, 2016). Sendo assim, cada amostra x_i deve estar no centro deste diagrama, de forma que todos os outros pontos devam estar a uma mesma distância desta amostra e sejam os pontos mais próximos dela.

Para um ponto estimado em x_j , no interior de um diagrama de Voronoi de um ponto amostrado x_i , seu valor é equivalente, unicamente, ao do ponto amostrado x_i , de forma que, como x_i pertence ao diagrama, o peso λ_i assume o valor 1 na Equação 19, e para os demais casos, é nulo (LI; HEAP, 2008). Logo, todos os pontos inseridos em um mesmo polígono, terão o mesmo valor (RIPLEY, 2004).

É indicado para o uso quando deseja-se manter os valores nos limites da grade de amostragem, pois este interpolador não é capaz de gerar valores novos intermediários (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004).

A Figura 35 ilustra um agrupamento de Diagramas de Voronoi, onde os círculos são pontos estimados cercados pelos lados do polígono de Voronoi de um ponto amostrado.

Figura 35 - Diagrama de Voronoi

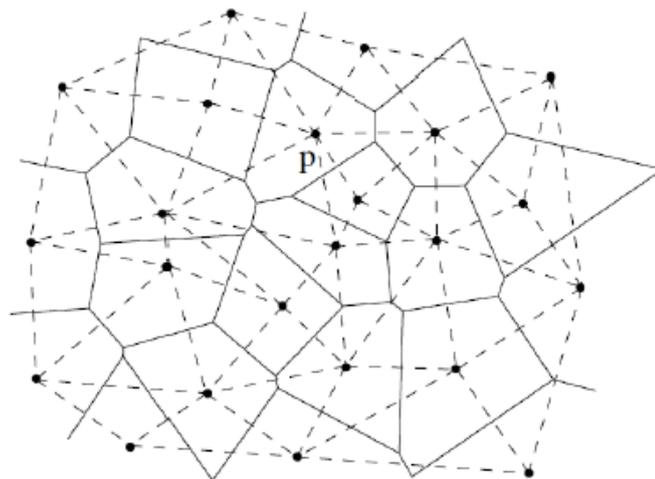


Fonte: Ripley (2004).

4.2.3 Vizinho Natural (VN)

A técnica de vizinho natural estar relacionada com as duas técnicas anteriores, através da triangulação de Delaunay e do diagrama de Voronoi, uma vez que, as vértices do diagrama de Voronoi são as faces dos triângulos de Delaunay, e, portanto, dado um ponto p , os vizinhos naturais deste ponto são definidos como àqueles cujo vértice do triângulo de Delaunay passa por p ou aqueles cujas células de Voronoi é adjacente a célula de Voronoi gerado por p (GRAAF, 2016). A Figura 36 ilustra essa situação, onde p apresenta 7 vizinhos naturais, de acordo, com o Diagrama de Voronoi (linha contínua) e o triângulo de Delaunay (linha tracejada).

Figura 36 - Vizinhos Naturais

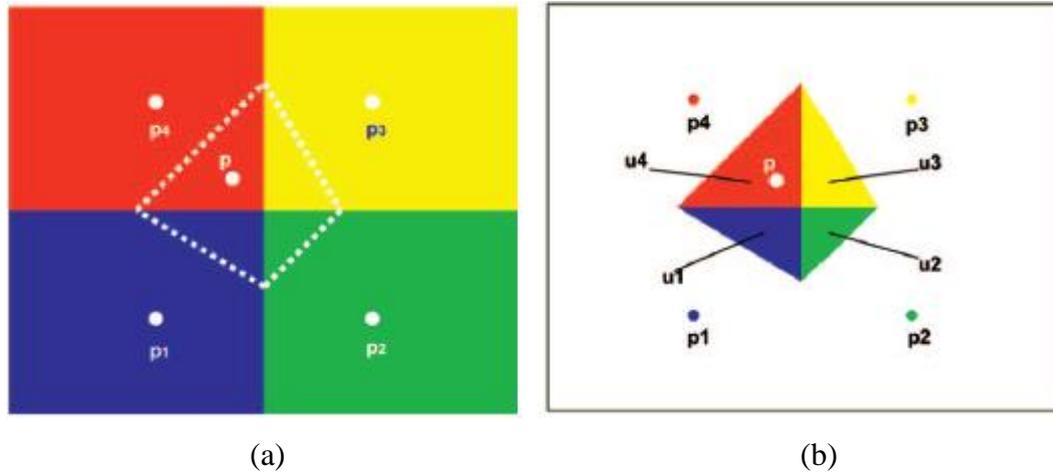


Fonte: Graaf (2016).

Em termos de interpolação, as células de Voronoi geradas pelos pontos amostrados p_i são reproduzidas, porém, no momento de inserção de um ponto não-amostrado p , uma nova célula é gerada e a interseção entre estas duas células, produz um volume resultante de locais conhecidos, cuja a ponderação com base na fração do volume “roubada” de cada ponto amostrado p_i resulta no ponto interpolado/estimado p (PARK et al, 2006).

A Figura 37 ilustra esta situação, sendo que na Figura 37a observa-se a célula de Voronoi gerada por p em uma zona formada pelas células de Voronoi de p_1, p_2, p_3, p_4 e na Figura 37b a célula volumétrica resultante da interseção das anteriores.

Figura 37 - Passo-a-passo da Interpolação NN



Fonte: Adaptada de Park et al (2006).

4.2.4 Inverso Ponderado da Distância (IDP)

É um dos interpoladores mais simples e baseia-se na suposição que o valor estimado pode ser obtido através de ponderações sob valores amostrados em uma distância de corte ou uma quantidade específica de pontos próximos (MITAS; MITASOVA, 2005). De modo, que o valor interpolado é inversamente proporcional à distância deste ao ponto interpolado e, portanto, valores mais próximos do ponto interpolado apresentam maior influência sobre o seu valor do que os mais afastados (AZPURUA; RAMOS, 2010).

Vale ressaltar que a distância aqui referida é a distância euclidiana entre ponto amostrado e ponto interpolado, sendo, durante a ponderação elevada a uma potência $-p$ qualquer (XAVIER; CECÍLIO; LIMA, 2010). Tal potência é, usualmente, igual a 2 (MITAS; MITASOVA, 2005). A Equação 20 apresenta a função peso do método IDP onde tais afirmativas podem ser observadas.

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}} \quad (20)$$

Para uma região de raio $d_{m\acute{a}x}$, pontos fora desta zona recebem peso zero, enquanto valores abaixo de $d_{m\acute{i}n}$, são ponderados para a distância $d_{m\acute{i}n}$ (CARUSO; QUARTA, 1998). Dessa maneira, o IDP produz uma estimativa de valores médios que nunca ultrapassa os limites inferiores ou superiores dos pontos amostrados (RUFO et al, 2018).

4.2.5 Método de Shepard Modificado (MSM)

O método de Shepard modificado, surgiu de limitações do método IDP, superadas através adoção da série de Taylor nos pontos amostrados e em alterações da função peso para uma abordagem local (BOBACH, 2008). Desta forma, o interpolador é determinado com base em uma função nodal Q obtida pelo método de mínimos quadrados sobre os pontos amostrados em x_i , e uma função peso também diferenciada do método IDP (SILVA, 2015). Nesse sentido, a Equação 19 é transformada na Equação 21.

$$Z(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Q(x_i) \quad (21)$$

Logo, o MSM também é um método que relaciona, de maneira inversa, a distância entre pontos observados e não-observados, dado um determinado local de consulta onde encontra-se o ponto não-observado que se deseja determinar (BOBACH, 2008), porém, devido a adoção dos mínimos quadrados elimina o efeito mira presente no método IDP (GUMUS; SEN, 2013).

O efeito mira ou Bulls-eye são fenômenos no qual pequenas áreas surgem ao redor dos pontos amostrados, incoerentes com os contornos estimados (FIALHO et al, 2019). Geralmente possuem forma circular concêntrica ao redor dos pontos amostrados (BAKKALI; AMRANI, 2008 apud SILVA, 2015).

4.2.6 Curvatura Mínima

O Método de Curvatura Mínima (CM), mais conhecido como *spline* é definido como uma técnica de interpolação unidimensional em que uma curva que passa por determinados pontos amostrados é selecionada e seu ajuste permite uma continuidade nas derivadas de cada ponto dos dados (RIPLEY, 2004).

Essas curvas são funções polinomiais obtidas após sucessivas regressões múltiplas entre o ponto não-amostrado e sua coordenada geográfica na superfície (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004). Os polinômios podem assumir grau 1, 2 ou 3, quando então, o *spline* é classificado em linear, quadrático ou cúbico, respectivamente (LI; HEAP, 2008).

O *spline* pode suavizar ou tencionar uma superfície através de ajustes na função peso e no número de pontos (RUFO et al, 2018). De forma, que quanto mais pontos amostrados forem

incluídos, mais suave é a superfície obtida, entretanto, este método é bastante sensível a mudanças abruptas de valores e produz máximos e mínimos diferentes do conjunto de dados originais (AZPURUA; RAMOS, 2010).

4.3 Métodos geoestatísticos

A geoestatística surgiu no início da década de 80, como uma mesclagem de estatística e matemática aplicada, principalmente, nas áreas de geologia e engenharia de minas, sendo sua maior contribuição, o desenvolvimento do método da Krigagem (CRESSIE, 1991). Dessa forma, a subsecção 4.3.1, reserva-se a explorar o método da Krigagem.

4.3.1 Krigagem Ordinária (KO)

Segundo Lam (1983) a Krigagem foi introduzida por Krige e Mathéron e consiste em um método de interpolação que apresenta características bem diferentes dos métodos citados anteriormente. A Krigagem Ordinária (KO) é uma técnica de média ponderada, dado que estima um ponto em um local desconhecido a partir de uma função peso aplicada aos pontos conhecidos, entretanto, diferencia-se pela aplicação de uma função que analisa a variabilidade espacial das amostras no momento de definição da função ponderação (GRAAF, 2016).

Logo, pode ser definida como uma técnica de estimação de valores de variáveis distribuídos no espaço, a partir dos valores próximos a estas, de forma, que uma determinada função seja capaz de descrever suas interdependências no espaço e, com base nisso, determine a função peso λ_i .

A Krigagem Ordinária consiste em atribuir um valor a uma variável z , em pontos não amostrados x_j , a partir de uma função combinatória linear dos valores vizinhos conhecidos, $z(x_i)$, denominada semivariograma, para um conjunto de dados, n (CONCEIÇÃO, 2013). Neste contexto, a função ponderação, λ_i , da Equação 19 é definida pela função semivariograma, $\gamma(h)$.

Os semivariogramas são modelos matemáticos que descrevem a essência da função correlação espacial dos dados, isto é, são padrões que indicam o grau de dependência espacial das amostras, determinando a semelhança entre amostras vizinhas, de acordo com a distância entre elas, de modo que quanto, geograficamente, mais próximas as amostras de uma região, maior a semelhança entre os valores obtidos e vice-versa (VILELA, 2004). A Equação 22

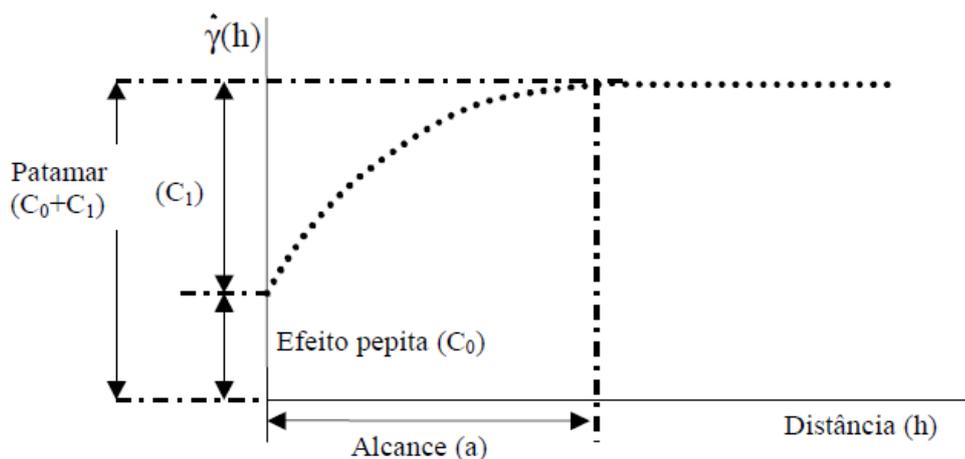
apresenta a modelagem matemática básica de um semivariograma a uma distância máxima h entre pontos estimados e amostrados $\hat{\gamma}(h)$, para $N(h)$ pares de pontos nesta distância de corte.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (22)$$

O primeiro passo na determinação do semivariograma é encontrar o semivariograma experimental, $\hat{\gamma}$, da Equação 22 para uma distância limitada h , e, em seguida, compará-lo com funções matemáticas teóricas, que se ajustem ao comportamento discreto dos dados experimentais, através da alteração de parâmetros conhecidos, como efeito pepita, alcance e patamar (GRAAF, 2016).

O efeito pepita é uma zona em que um valor positivo de $\hat{\gamma}(h)$ é obtido mesmo que a distância se aproxime de zero, sendo um resíduo oriundo de erros de amostragem para uma distância menor que h e o alcance, por sua vez, é a distância h em que o patamar é alcançado (LI; HEAP, 2008). Nesse sentido, o patamar é a zona em que a variância dos pontos amostrais se torna praticamente constantes (CONCEIÇÃO, 2013). A Figura 38 ilustra os parâmetros alcance (a), efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$) definido como a soma do efeito pepita mais a zona de crescimento (C_1) da função semivariograma $\hat{\gamma}(h)$.

Figura 38 - Parâmetros de ajuste de um semivariograma



Fonte: Vilela (2004).

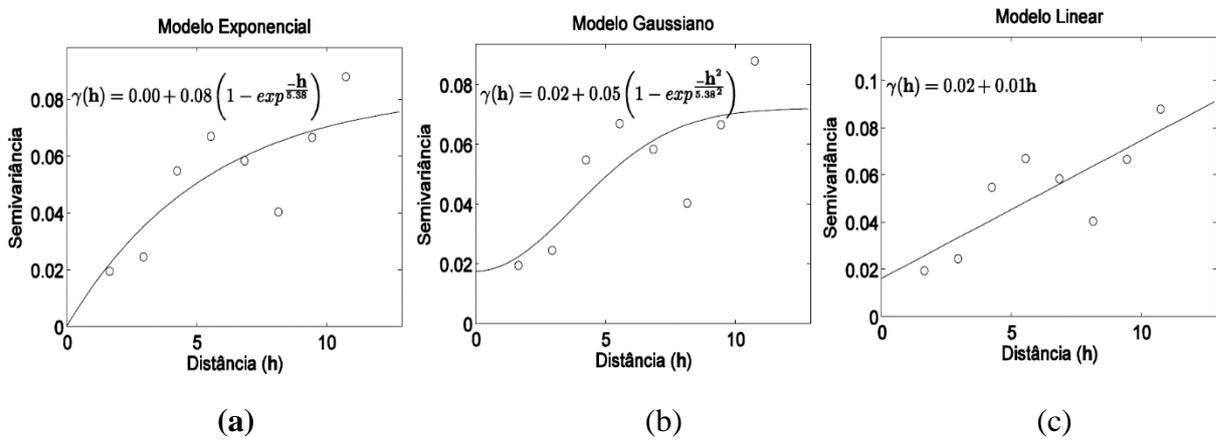
Os modelos de semivariogramas teóricos são divididos em modelos com patamar, quando a partir de um ponto a função se estabiliza, são os casos dos modelos teóricos esféricos,

exponenciais, gaussiano etc., e sem patamar, quando a dispersão é infinita, como, por exemplo, o modelo de potência e o modelo linear (RIGHETTO, 2013).

A Figura 39 ilustra as curvas de semivariograma dos modelos teóricos exponencial, gaussiano e linear, amplamente utilizados no método KO, para um mesmo conjunto de amostra, onde observa-se os patamares na Figura 39a e Figura 39b e a não existência para a Figura 39c.

Figura 39 - Modelos teóricos de semivariogramas para um mesmo conjunto de dados:

(a) Modelo Exponencial; (b) Modelo Gaussiano; (c) Modelo Linear.



Fonte: Xavier, Cecílio e Lima (2010).

Entre as características da KO, evidencia-se que o erro da interpolação, isto é, o erro entre o valor estimado pela ponderação e os pontos amostrados, deve ser nulo e sua variância deve ser mínima possível, caracterizando, dessa forma, o método como o melhor interpolador não-enviesado (*Best Linear Unbiased Estimator* – BLUE) (LAM, 1983).

4.4 Validação Cruzada

Como observados nas secções 4.2 e 4.3, há diversos tipos métodos de interpolação, cuja funções de ponderações produzem resultados e mapas de contorno com características diferentes. Nesse sentido, faz-se necessário uma abordagem da qualidade e precisão dos métodos utilizados, com a finalidade de selecionar o método que mais se adequa a situação.

Para medir a qualidade de um método de interpolação, utiliza-se uma técnica definida como validação cruzada (GRAAF, 2016). A validação cruzada consiste na supressão de amostras do conjunto de dados e sua, posterior, estimação por intermédio da interpolação, que é, então, comparada com o valor real das amostras, de forma, que um erro de previsão possa

ser deduzido, quando o processo é repetido inúmeras vezes para outras amostras do mesmo conjunto de dados (CRESSIE, 1991). Nesse sentido, a melhor interpolação é aquela em que o erro de previsão é menor (CARUSO; QUARTA, 1998).

Alguns parâmetros estatísticos são adotados para refletir este erro de previsão. Neste contexto, para Cressie (1991), o parâmetro padrão de previsão é a raiz quadrática média (*root-mean-square* (RMSE)), e, portanto, quanto menor seu valor mais preciso é o método.

Outros parâmetros adicionais, podem ser aplicados como indicados em Rufo et al (2018), Santana et al (2017), Fialho et al (2019), Caruso e Quarta (1998), Azpurua e Ramos (2010), Graaf (2016) e Li e Heap (2008). De forma, que entre estes trabalhos, a maioria adota o erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* (MAE)) como um segundo indicador.

Nas equações 23 e 24 pode ser observada as fórmulas para determinação do MAE e RMSE, respectivamente, $Z'_{(x_i)}$ são os valores estimados pelo interpolador para a amostra x_i .

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z'_{(x_i)} - Z_{(x_i)}] \quad (23)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z'_{(x_i)} - Z_{(x_i)}]^2} \quad (24)$$

SE o RMSE detecta a precisão do método, o MAE detecta viés (tendência), de modo, que em previsões idealmente imparciais seu valor deve ser nulo (RUFO et al, 2018).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo, trata-se de uma pesquisa de cunho prático e exploratório, que visa quantificar os níveis de campo elétrico e campo magnético no interior de uma subestação e por toda a faixa de servidão das linhas de transmissão em 230 kV que a alimentam, através de medições *in loco* e técnicas de interpolação.

Isto posto, nesta secção os instrumentos que foram empregados nas campanhas de medição, bem como os protocolos de medição desenvolvidos e a metodologia escolhida para a amostragem dos dados, serão descritos, após uma breve caracterização dos ambientes eletromagnéticos, formado pelos componentes elétricos das LTs e da SE e sua vizinhança, sejam exploradas, uma vez que, como abordado em outras secções, tanto a geometria e o layout dos equipamentos, quanto outros itens físicos, como a proximidade de vegetação e residências, influenciam no comportamentos dos CEM gerados por essas fontes eletromagnéticas, justificando assim a necessidade de compreendê-las.

É importante salientar, que após a coleta de dados, a aplicação de técnicas de interpolação visa a obtenção de mapas de contorno que caracterizem o comportamento dos CEM por uma região delimitada de forma contínua em torno das LTs e dos equipamentos da SE. Entretanto, como observado no capítulo 4, há diversos métodos que podem ser adotados, que resultam em dados e comportamentos diferentes, sendo, portanto, impreterível uma, posterior, análise estatística dos dados obtidos, para que seja possível validar e qualificar o melhor método para estas aplicações. Todavia, tanto a implementação dos métodos de interpolação, quanto sua validação necessitam de um amplo aprimoramento computacional e matemático, realizado neste trabalho, através do *software Golden Surfer*®.

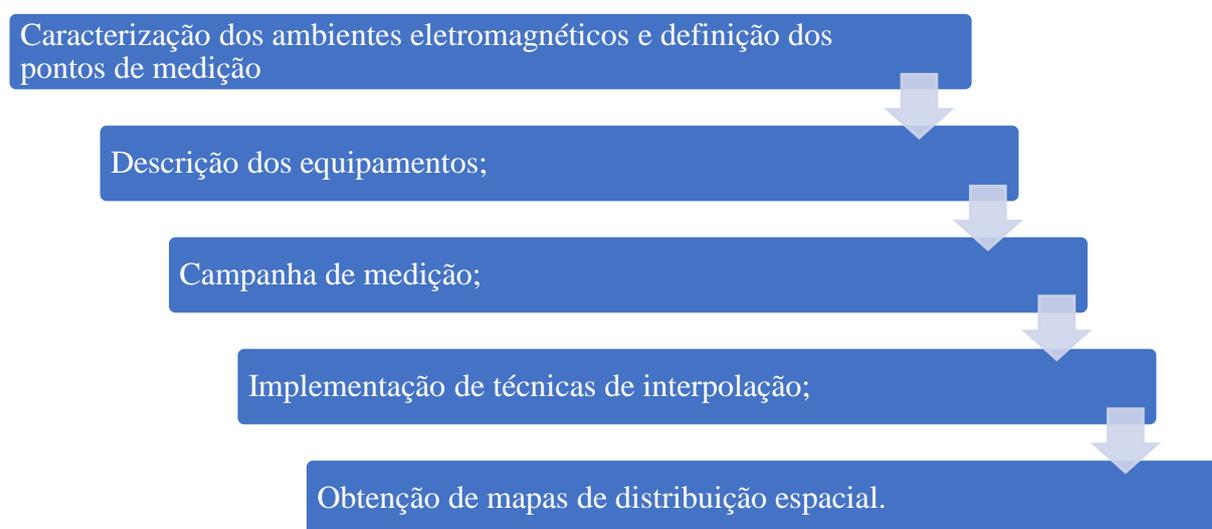
Neste contexto, a metodologia deste trabalho pode ser resumida no fluxograma da Figura 40, por meio do qual, entende-se que o primeiro passo é definir o ambiente eletromagnético no qual as medições serão feitas, reconhecendo os limites da área física, os equipamentos elétricos que a constituem e outros elementos importantes que compõem as regiões próximas a LTs e SE, respectivamente. Em seguida, é possível estabelecer os pontos estratégicos em que devem ser realizados as medições, de modo, que haja uma amostra de dados, suficientemente, representativos em termos de contribuição eletromagnética das fontes que constituem o ambiente.

Após reconhecer o ambiente e com os pontos amostrais definidos, o próximo passo é a identificação das instrumentações indicadas na ABNT NBR 25415/2016 e a definição do melhor medidor que se adequa a situação, como também outros itens que se fizeram

necessários. Além disso, deve-se atentar a alguns cuidados e protocolos indicados nas normas vigentes e no manual do equipamento, de forma, a desenvolver a campanha de medição.

Por fim, após as medições, com resultados obtidos é possível gerar mapas de distribuição espacial que facilitarão o entendimento dos comportamentos dos campos eletromagnéticos, através do *Golden Surfer*® e suas técnicas de interpolação e validação cruzada.

Figura 40 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria (2019).

5.1 Caracterização dos ambientes eletromagnéticos e definição dos pontos amostrais

As linhas de transmissão e a subestação de interesse deste estudo, são parte do subsistema de operação Nordeste, que compõe o SIN nacional. Este subsistema é formado massivamente por componentes elétricos em 230 kV que interligam as regiões norte, sudeste e centro-oeste, com a região nordeste, como relatado na subsecção 2.1.1.1.

Neste panorama, os ambientes eletromagnéticos que se busca representar em termos de fontes e intensidade de campo elétrico e magnético, são:

- Ambiente eletromagnético 1: composto por 3 LTs trifásicas em 230 kV, denominadas como LT1, LT2 e LT3, dispostas sobre 2 conjuntos de torres paralelas, um de circuito duplo que carregam LT1 e LT2 e outro de circuito único que transporta LT3;

- Ambiente eletromagnético 2: formado pelo pátio de uma subestação AT abaixadora de 230 kV/ 69 kV, ao tempo e isolada a ar, com diversos equipamentos elétricos para manobra, proteção e conversão de tensão.

Ambos os ambientes, operam a 60 Hz de frequência e estão localizados na cidade de Mossoró-RN.

Na Figura 41 é possível observar os ambientes eletromagnéticos 1 e 2. Na qual, nos pontos A e B encontra-se as duas torres que transportam a LT1 e a LT2, enquanto nos pontos C e D localiza-se as torres que carregam a LT3. Em seguida, é possível observar, que estas LTs adentram a SE do ponto E, energizando-a.

Figura 41 - Caracterização do ambiente em torno das LTs e da SE



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Ainda de acordo com a Figura 41, observa-se, que tanto a subestação quanto as linhas de transmissão estão localizadas em áreas densamente povoadas, cuja vizinhança é marcada pela presença de casas residenciais, indústrias, rodovias, o que enfatiza a necessidade da determinação dos níveis de exposição eletromagnética a qual estão expostas as pessoas que vivem, trabalham ou transitam por esta região. Além disso a LT, em situação normal, é cercada por vegetações limítrofes a sua faixa de servidão.

Vale salientar, que no interior da subestação, geralmente, a entrada de pessoas é restrita a funcionários, que configuram a população ocupacional, uma vez que, por questões de

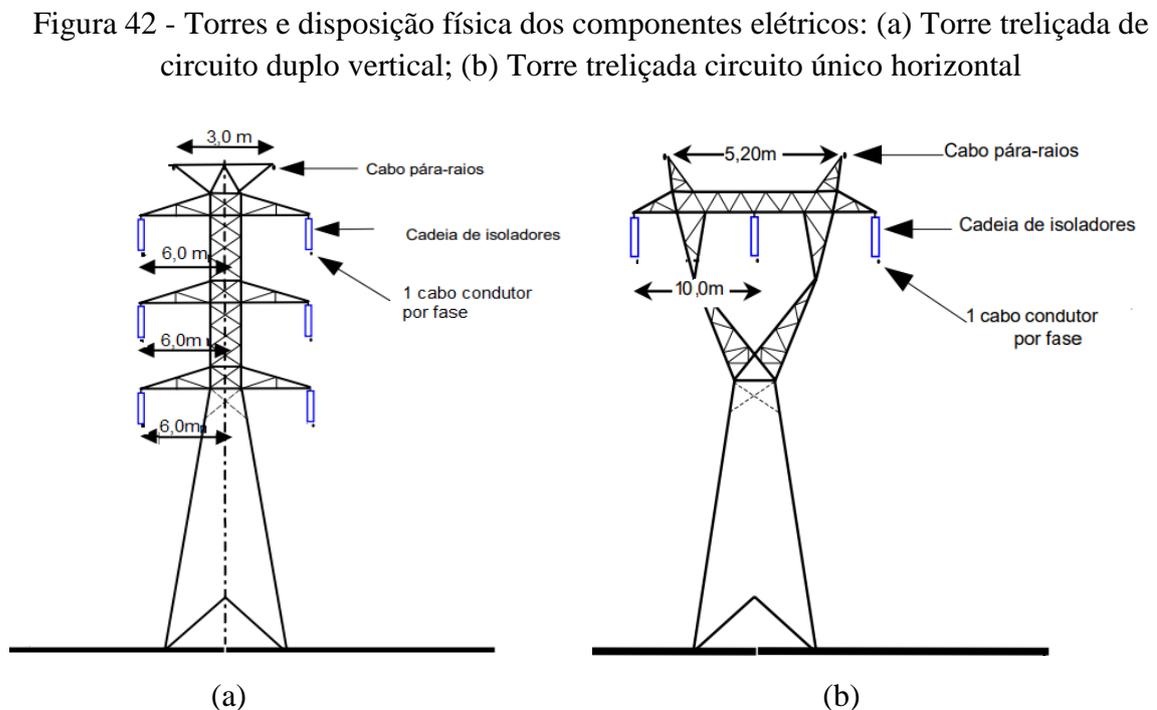
segurança, o público em geral não pode circular próximo aos componentes elétricos de uma subestação. Sob as linhas de transmissão, tanto técnicos de manutenção quanto pessoas comuns podem circular livremente, mesmo que tal atitude seja desaconselhada, porém não há, na prática, obstáculos físicos que impeçam o acesso.

As subsecções 5.1.1 e 5.1.2, descreverão cada ambiente eletromagnético detalhadamente, bem como o tipo de amostragem adotada, de modo que os pontos medidos tanto representem estatisticamente o ambiente e permitam uma boa interpolação, quanto atenda as exigências das normas e diretrizes mundiais citadas neste trabalho.

5.1.1 Ambiente eletromagnético 1: Linhas de transmissão

Entre os aspectos físicos das LTs que devem ser observados, em termos de identificação das fontes que caracterizam o ambiente eletromagnético, estão à disposição dos condutores e cabos para-raios e o distanciamento entre eles etc.

Neste sentido, a Figura 42a apresenta as características das torres de circuito duplo, cuja configuração dos condutores de fase é vertical e a Figura 42b ilustra as características das torres de circuito único de configuração horizontal.



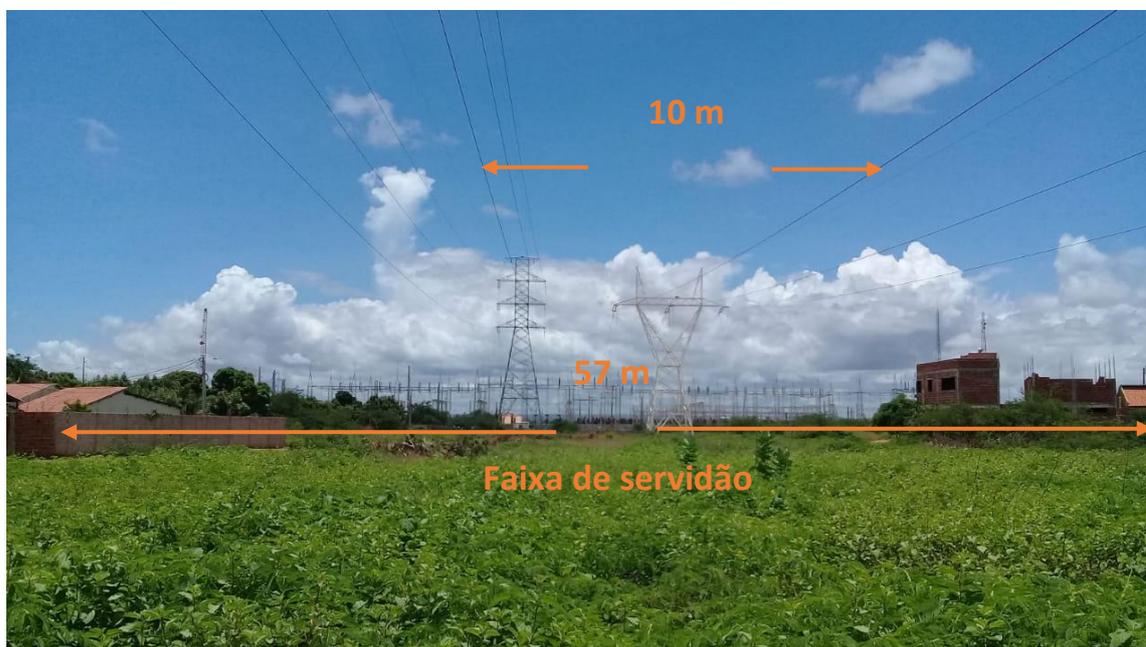
Fonte: Adaptada de Silva (2010).

Ambas as torres são treliçadas em aço galvanizado, com 3 condutores de fase do tipo Grosbeak ACSR 636 MCM por LT e 2 cabos para-raios em EAR 3/8'' por torre.

A Figura 43, por sua vez, apresenta os dois tipos de torre, lado-a-lado no momento das medições, na qual observa-se o crescimento da vegetação dentro da faixa de servidão e a diferença de alturas entre torres, com a torre vertical apresentando maior elevação do que a horizontal, fatores estes que influenciam diretamente nos níveis de campo elétrico e magnético observados nas medições.

Além disso, como discorrido anteriormente a faixa de servidão de uma LT em 230 kV pode ser de 35 m, porém, como o ambiente é formado por LTs em paralelo e a dimensão da faixa de servidão pode variar entre concessionárias, tipo de torres e de terreno, foi observado uma faixa de servidão variante, com uma média de 57 m de distância entre muros de edificações. Outro ponto importante, é que entre os condutores mais externos das torres, há um espaçamento médio de 10 m e entre a primeira torre dupla e a primeira torre de circuito único há um distanciamento físico de 110 m.

Figura 43 - Torres e Linhas de Transmissão no local das medições



Fonte: Autoria própria (2019).

Os condutores (L1, L2 e L3) das LT1, LT2 e LT3, segundo dados da subsidiária de energia elétrica que opera estas LTs, cujo nome não há permissão para divulgação, conduzem correntes defasadas em 120° como é comum de circuitos trifásicos, sendo os carregamentos das fases A, B e C de cada LT apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Níveis de corrente sobre os condutores das LTs durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)
L1 - A	90,0	L2 - A	91,7	L3 - A	419,6
L1 - B	87,5	L2 - B	90,5	L3 - B	438,0
L1 - C	92,5	L2 - C	93,0	L3 - C	394,0

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

5.1.1.1 Pontos de medição (LT)

Conforme estabelecido na IEEE *std* 644/1994, para linhas de transmissão, o ideal é traçar perfis laterais, transversais ao eixo da LT, pelo menos no ponto de menor distância entre os condutores e o solo (h_s) e, se possível, em alguns vãos intermediários.

Como visto, a distância entre condutores e solo é afetada pela catenária e o nível do terreno. Neste estudo, observou-se que entre as torres de um mesmo circuito há uma distância média de 300 m e, portanto, adotou-se que as catenárias das LTs estão próximo ao centro do vão (150 m) entre estas torres. Porém, devido a obstáculos, como muro e cercas, no local de medição, para o circuito duplo, h_s foi considerada em 190 m de distância da primeira torre (T1-LT1/LT2).

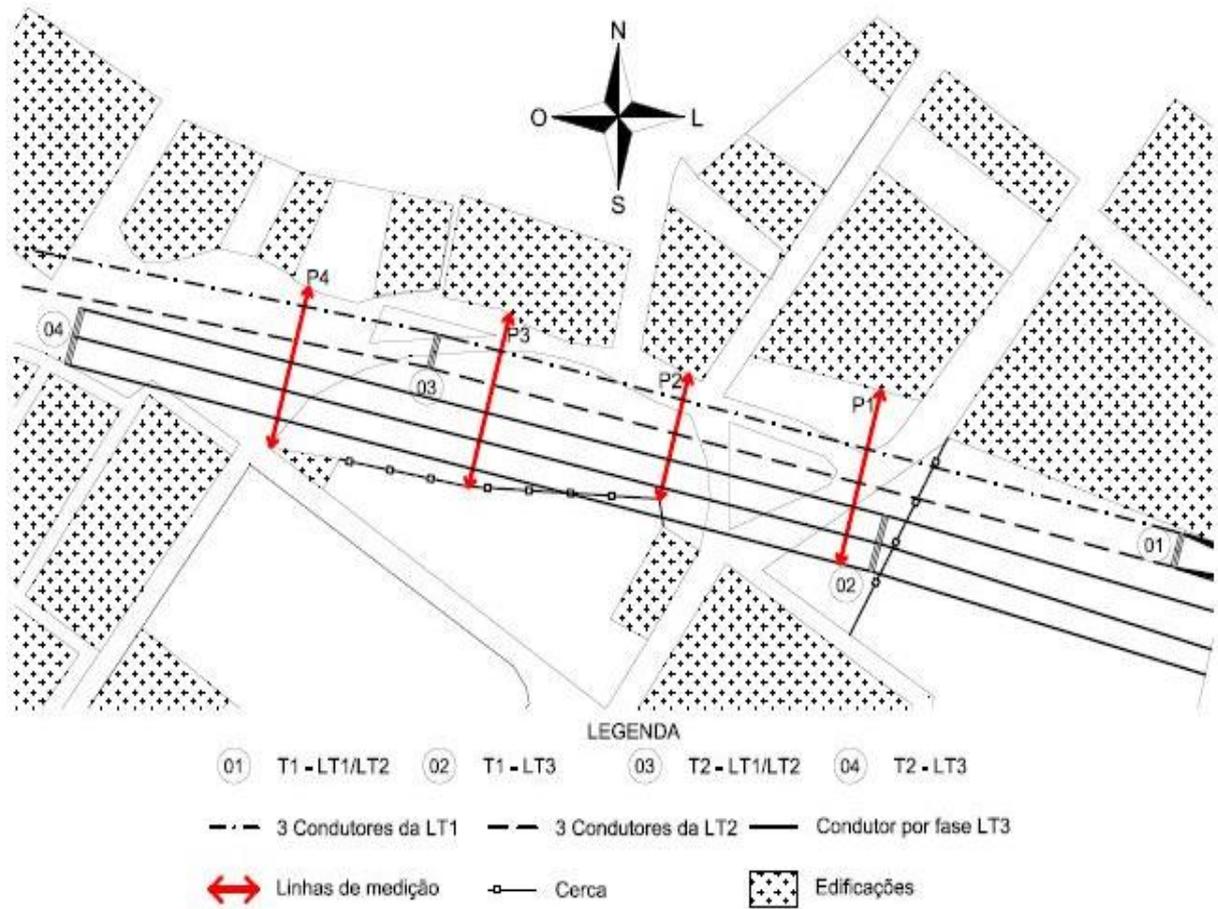
Na Figura 44, o perfil lateral traçado sob a catenária do circuito duplo é ilustrado por P2 e o referente ao circuito único é representado por P3. Perfis intermediários, P1 e P4, distanciados de P2 e P3, respectivamente, em 70 m, também foram estabelecidos. Outros perfis, porém, foram impossíveis de serem traçados, principalmente, os próximos a T1-LT1/LT2, pois a área da faixa de servidão, encontrava-se tomada por terceiros que cercaram o terreno.

Neste contexto, os pontos dos perfis de medição, estão todos, latitudinalmente (direção Oeste – Leste), espaçados em aproximadamente 70 m, enquanto, longitudinalmente (direção Norte – Sul), optou-se por espaçá-los em 2 m, em concordância com o orientado nas normas.

Segundo a ABNT (2016), os perfis devem se estender por toda a faixa de servidão, porém observou-se que para uma faixa de servidão média de 57 m, em alguns momentos, novamente, cercas impediam o acesso aos pontos geográficos definidos. Dessa maneira, cada perfil se estendeu o máximo possível, isto é, até ir de encontro a obstáculos físicos, e, portanto, apresentam extensões diferentes e são compostos por uma quantidade particular de pontos de medição, apresentados na Tabela 10, que em conjunto, totalizaram 111 amostras pela região.

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

Figura 44 - Definição dos perfis laterais de medição em torno das LTs



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 10 - Perfis de medição em torno das LTs

Perfil de medição	Quantidade de pontos	Extensão (m)
P1	29 (1 – 29)	56
P2	22 (30 – 51)	42
P3	31 (52 – 82)	60
P4	29 (83 – 111)	56
Total = 111 amostras		

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 45 apresenta a região onde estão localizadas as LTs e os pontos amostrais de cada perfil, onde observa-se uma amostragem do tipo sistemática linear, visando uma interpolação mais eficiente.

Figura 45 - Pontos amostrais sobre a região das LTS



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

5.1.2 Ambiente eletromagnético 2: Pátio da subestação

A subestação de interesse deste estudo, por sua vez, opera em 60 Hz, possui uma área de 107.550 m² e perímetro de 1.341 m, sendo 34.650 m² deste espaço reservado ao pátio, com 1.010 m de perímetro, onde encontra-se a maioria dos equipamentos elétricos que constituem este ambiente eletromagnético.

O Anexo A apresenta o diagrama unifilar do pátio desta subestação cedido pela subsidiária de energia elétrica que opera esta SE, cuja denominação não pode ser divulgada. No Anexo A podem ser observados que a SE é alimentada por 3 circuitos em 230 kV (oriundos das 3 LTs citadas anteriormente) ancorados em uma configuração de barra dupla com disjuntores simples a 5 chaves, e, em seguidas conectadas a 4 transformadores de 100 MVA, que reduz a tensão para 69 kV, sendo 2, capazes de abaixarem para uma tensão menor de 13,8 kV, que provêm energia a alguns serviços auxiliares da própria SE. Dos secundários dos transformadores, em 69 kV, a energia é entregue novamente a um barramento, agora na configuração de barra dupla com disjuntor simples e, segue, em linhas de transmissão em 69 kV, para a alimentação de consumidores nesta faixa de tensão ou de outros sistemas de distribuição. É notório ainda, a presença de componentes de manobra e proteção, como chaves seccionadoras, disjuntores de alta tensão, para-raios e instrumentos de medição e controle, tipo

TC e TP, por todo o pátio. Além disso, observa-se a presença de reatores, transformadores de aterramento, banco capacitores etc., bem como de um transformador de 20 MVA que converte a tensão de 69 kV em 3,3 kV, para atendimento de um consumidor em particular.

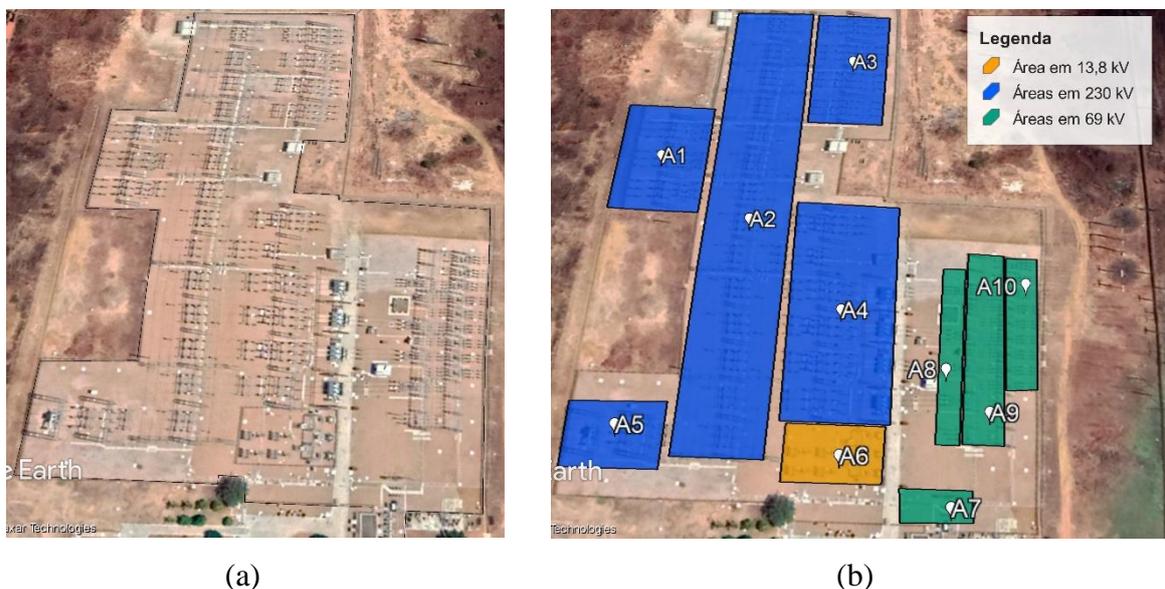
As informações acima citadas podem também ser visualizadas no Apêndice A que ilustra graficamente a disposição dos equipamentos sobre o pátio, através da elaboração de uma planta baixa da SE, com base no diagrama unifilar do Anexo A e de características físicas observadas pela autora durante a medição.

No Apêndice A, por sua vez, observa-se que no pátio da SE existem equipamentos em três classes de tensões distintas: 230 kV, 69 kV e 13,8 kV, representados nas cores azul, verde e laranja, respectivamente, sendo os equipamentos na classe de 230 kV referente a maior parte do pátio, isso ocorre devido a sua maior tensão de operação requerer que os equipamentos estejam mais espaçados e a alturas maiores. Nesse sentido, os equipamentos em 230 kV têm seu topo em uma altura média de 3,8 m, enquanto em 69 kV e 13,8 kV estão a 1,9 m.

Devido à grande extensão do terreno e buscando manter os pontos de medição próximo as fontes, a amostragem dos dados foi determinada subdividindo, de maneira estratégica, a região do pátio em 10 áreas distintas de estudo.

Neste contexto, a Figura 46a apresenta o mapa do pátio da SE e a Figura 46b apresenta o particionamento nas 10 áreas de estudo, onde as áreas em azul representam equipamentos que operam em 230 kV, as em verde representam os de 69 kV e a área em laranja representa os equipamentos em 13,8 kV, de forma análoga ao Apêndice A.

Figura 46 - Pátio da SE e subdivisões: (a) Pátio; (b) Pátio subdividido em áreas de 1 a 10



Fonte: Exportado de Google Earth (2019).

Diante disso, os pontos foram regularmente espaçados, preferivelmente, em uma grade 5 m x 5 m, com exceção das regiões dos barramentos e de locais onde os equipamentos coincidiam com este espaçamento. A Figura 47 ilustra os pontos amostrados sobre a região de todo o pátio, no total de 741 pontos amostrais. Enquanto a Tabela 11 apresenta o resumo de amostras por área.

Figura 47 - Mapa dos pontos amostrados sobre o pátio da SE



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Tabela 11 - Amostras por área da SE

Área	Descrição	Quantidade de pontos	Classe de Tensão (kV)
A1	Circuitos de alimentação	74 (1 – 74)	230
A2	Barramento	135 (75 – 209)	
A3	Circuitos de saída	75 (210 – 284)	
A4	Transformadores	132 (285 – 416)	
A5	Reator	63 (417 – 479)	
A6	Circuitos auxiliares da SE	40 (480 – 519)	13,8
A7	Consumidor particular	24 (520 – 543)	69
A8	Circuitos pré-barra	51 (544 – 594)	
A9	Barramento	105 (595 – 699)	
A10	Circuitos de saída	42 (700 – 741)	

Fonte: Autoria própria (2019).

Outras características a serem destacadas são que assim como as LTs apresentam carregamento diferentes, os níveis de corrente percorrendo os circuitos da SE também o são. Neste contexto, vale salientar que todas as correntes e tensões expostas nesta secção, foram fornecidas pelos responsáveis pela operação da SE e das LTs, durante os horários das medições, sendo a divulgação da fonte não permitida.

Além disso, a entrada no pátio é restrita aos profissionais previamente liberados pela gerência, em horários e localização bem definidas, o solo é completamente terraplanado e protegido por malha de aterramento e camada de brita, e, por último, não há vegetação no interior do pátio.

As subsecções deste tópico apresentarão cada área de estudo de maneira mais detalhada, de forma, que seja possível traçar um paralelo entre as tensões e correntes nos circuitos, já que, como relatado, os equipamentos de cada área apresentam diferentes tensões e carregamento durante a operação normal da SE, bem como distanciamento e altura distintos.

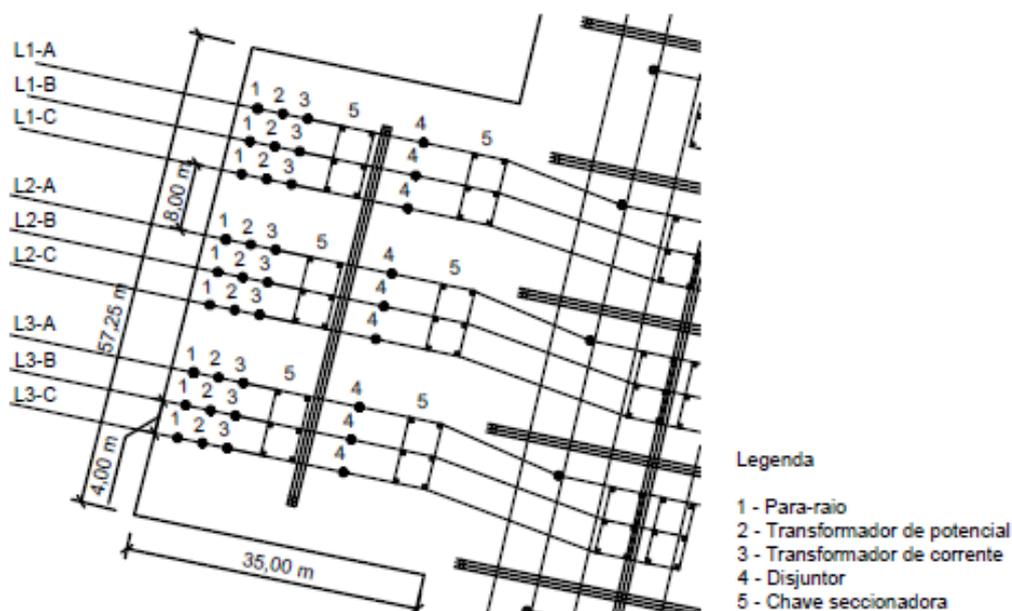
5.1.2.1 Área 1: Circuito de alimentação em 230 kV

A área 1 é composta pelos condutores das LTs em 230 kV do ambiente eletromagnético I, que adentram a subestação, fornecendo a alimentação necessária a operação da SE. Logo, cada LT corresponde a um circuito trifásico (L1, L2 e L3) que conduz corrente elétricas distintas igualmente ao observadas na Tabela 9 para cada uma de suas fases.

Nesta área, encontra-se também equipamentos de manobra e proteção em 230 kV, conectados aos condutores dos referidos circuitos. Neste contexto, são 9 para-raios (PR), sendo 1 para cada condutor/fase; 18 transformadores de instrumento, no qual 9 são TPs e 9 são TCs, todos monofásicos; 9 conjuntos de chaves seccionadoras tripolares (CH), sendo 6 conjuntos instalados no solo e 3 sobre uma estrutura metálica; e, por último, 9 disjuntores unipolares (DJ).

Para facilitar a visualização, a Figura 48 apresenta a porção de 2.003 m² do *layout* do Apêndice A, que corresponde a área 1 supracitada, ilustrando graficamente os condutores dos circuitos e equipamentos que compõem esta área, na qual observa-se também, que há um espaçamento de 8 m entre circuitos, enquanto os condutores de um mesmo circuito estão espaçados entre si em 4 m.

Figura 48 - Disposições dos equipamentos e condutores de A1



Fonte: Autoria própria (2019).

Como já exposto, as amostras foram colhidas em um distanciamento de 5 m por 5 m, com exceção de pontos que coincidiram com as bases da estrutura metálica, perfazendo uma grade de 55 m x 30 m e 74 pontos amostrais apresentados na Figura 49.

Figura 49 - Pontos amostrados sobre A1



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Para facilitar o entendimento, a Tabela 12 aponta os equipamentos elétricos mais próximos de cada ponto medido e que, portanto, agem como fontes eletromagnéticas principais para estes pontos.

Tabela 12 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A1

Pontos	Equipamentos de referência
1 - 12	Ancoragem dos condutores
13 - 24	Para-raios
25 - 36	Entre TPs e TCs
37 - 48	Entre TCs e chaves seccionadoras
49 - 50	Próximo as bases da torre metálica
51 - 62	Entre chaves seccionadoras e disjuntores
63 - 74	Entre disjuntores e chaves seccionadoras

Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.2 Área 2: Barramento em 230 kV

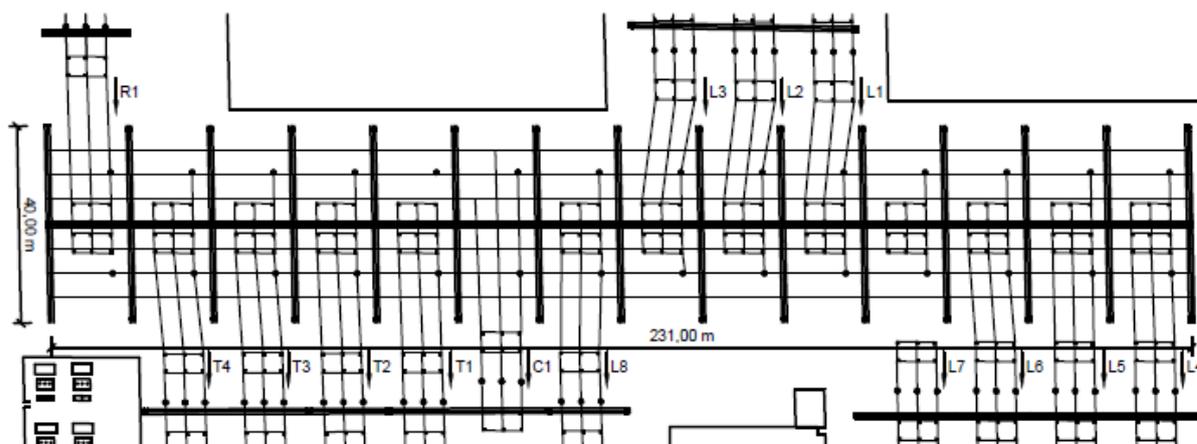
Os circuitos da área 1, são ancorados na área 2, em um barramento em 230 kV, caracterizado como do tipo barra dupla flexível, sendo uma barra principal (B1) e outra de transferência (B2), à 5 chaves. Isto significa dizer, que esta zona é formada pelas barras e mais 5 conjuntos de chaves seccionadoras e 3 disjuntores monofásicos por circuito, de maneira, que seja possível a manobra segura de carga entre as barras.

Todavia, 3 das CHs e os DJs, referentes aos circuitos L1, L2 e L3, estão localizados na área 1, logo, em termos geográficos, esta área é restringida aos condutores que formam as barras B1 e B2 e 2 conjuntos de chaves seccionadoras tripolares instaladas no solo por circuito.

Além dos circuitos de alimentação, há outros circuitos em 230 kV conectados a este barramento (L4 a L8), inclusive um que permite a conexão com o reator (R1) de 22,14 MVar e os transformadores (T1 a T4). Um circuito C1 realiza a conexão entre barras, porém em relação a seus equipamentos e dos demais circuitos citados, de maneira análoga ao que ocorre com os dispositivos da área 1, parte dos equipamentos do arranjo do barramento estão geograficamente localizados em outras áreas, mantendo apenas 2 das CHs por circuito na área 2.

Semelhante à Figura 48, a Figura 50 exhibe as fontes que compõem a área 2 do Apêndice A, em torno dos seus 9.240 m², conectadas aos circuitos de alimentação, aos circuitos de saída em 230 kV, aos circuitos dos transformadores em 100 MVA e do reator R1.

Figura 50 - Disposições dos equipamentos e condutores de A2



Fonte: Autoria própria (2019).

Por apresentar uma dimensão bastante abrangente com 231 m, optou-se por adotar um maior espaçamento entre pontos na direção longitudinal, de maneira que a grade escolhida apresenta intervalos de 5 m x 16 m de distância, resultando em 135 amostras, enumeradas de 75 a 209, como ilustrado na Figura 51. Dessa maneira, cada ponto medido está próximo a pelo menos 2 CHs que compõem esta área e alinhados com os circuitos adjacentes.

Figura 51 - Pontos amostrados sobre A2



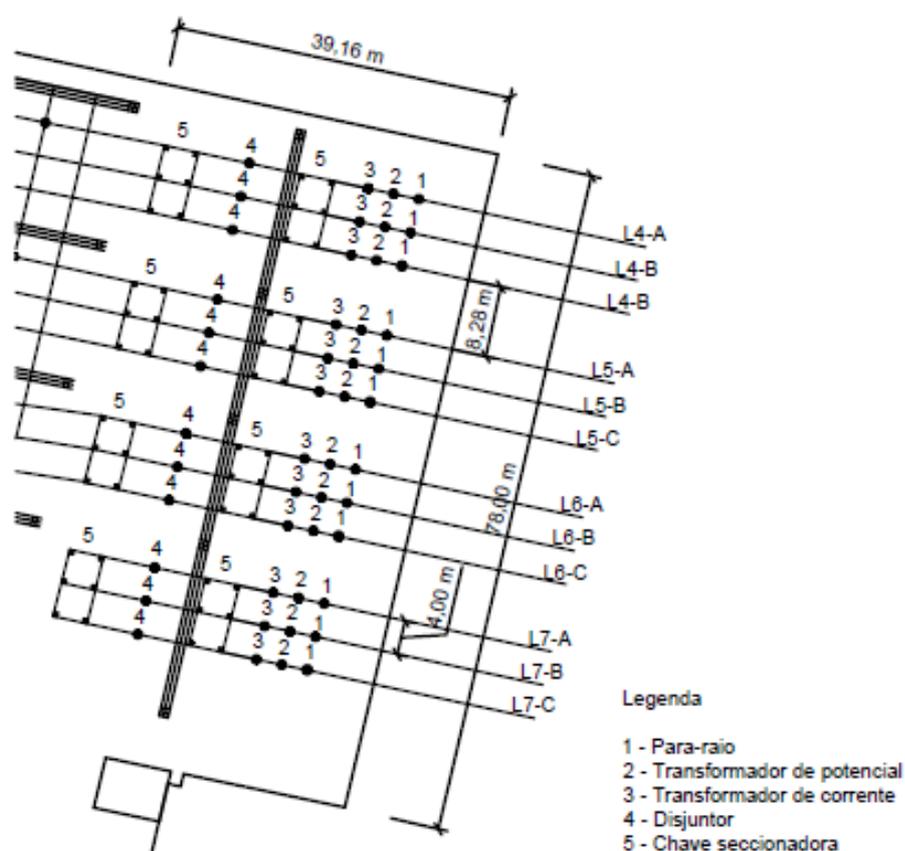
Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Vale ressaltar que durante as medições apenas a barra B1 estava em funcionamento com tensões em 230 kV e correntes de 600 A, conforme informações fornecidas pelos operadores.

5.1.2.3 Área 3: Circuitos de saída em 230 kV

Como relatado, há no pátio da SE, circuitos conectados ao barramento em 230 kV da área 2, que fornecem uma conexão para outras SEs que operam em 230 kV no estado do RN. Estes circuitos trifásicos (L4, L5, L6 e L7) que apresentam um *design* semelhante ao da área 1, com para raios, TPs, TCs, chaves seccionadoras e disjuntores de mesmo tipo e com mesmas dimensões, constituem, por sua vez, a área 3 do Apêndice A, apresentada na Figura 52.

Figura 52- Disposições dos equipamentos e condutores de A3



Fonte: Autoria própria (2019).

Com seus 3.120 m², a área 3 apresenta 75 pontos, enumerados de 210 a 284 na Figura 53, espaçados em 5 m x 5 m, excetuando-se os pontos que coincidiram com a estrutura metálica. Enquanto a Tabela 13, por sua vez, faz referência entre os conjuntos de amostra com as fontes mais próximas.

Figura 53 - Pontos amostrados sobre A3



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Tabela 13 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A3

Pontos	Equipamentos de referência
210-224	Para-raios
225 - 239	Para-raios
240 - 254	Entre TPs e TCs
255 - 269	Entre TCs e chaves seccionadoras
270 - 284	Entre disjuntores e chaves seccionadoras

Fonte: Autoria própria (2019).

Já a Tabela 14 indica o carregamento destes circuitos por fase, no qual observa-se que o circuito L4 está desconectado e, portanto, não apresenta condução de corrente e nem tensão.

Tabela 14 - Níveis de corrente nos circuitos da área 3 durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)
L4-A	29,48	L5-A	68,7	L6-A	13,27	L7-A	0
L4-B	29,84	L5-B	68,6	L6-B	13,38	L7-B	0
L4-C	29,66	L5-C	67,6	L6-C	12,80	L7-C	0

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

5.1.2.4 Área 4: Transformadores e seu entorno em 230 kV

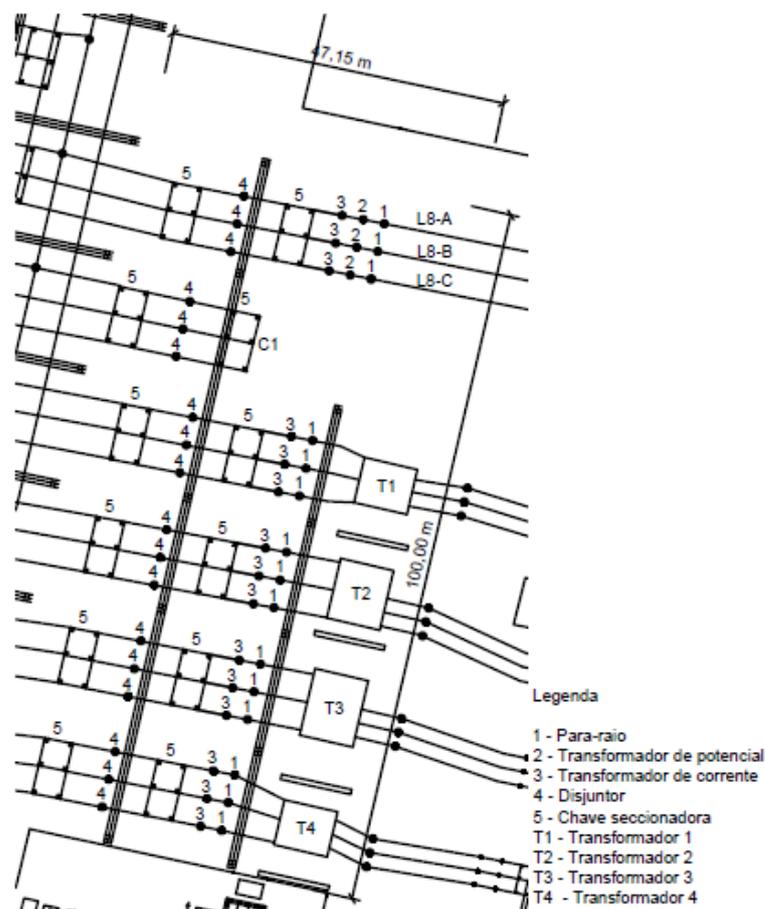
Entre os dispositivos mais importantes da área 4 estão os 4 transformadores trifásicos de 100 MVA (T1, T2, T3 e T4) que convertem a tensão de 230 kV em 69 kV, caracterizando a SE como abaixadora.

Antes da conexão nos transformadores, equipamentos em 230 kV são instalados para agregar confiabilidade ao sistema. Neste contexto, 12 conjuntos de chaves tripolares, 12 disjuntores monofásicos, 12 TCs e 12 para-raios, também monofásicos, são instalados entre transformadores e barramento em 230 kV.

Além disso, um circuito de saída L8 com 3 dispositivos de cada tipo (PR, TP, TC, CH, DJ) também fazem parte desta região, bem como 3 disjuntores unipolares de abertura simultânea e 2 conjuntos de CH tripolares (Circuito C1) que interligam as barras B1 e B2.

Na Figura 54 é possível constatar tais observações a partir da disposição destes equipamentos na referida área 4 do Apêndice A que possui 4.715 m².

Figura 54 - Disposições dos equipamentos e condutores de A4



Fonte: Autoria própria (2019).

Na área 4, o espaçamento entre medidas é de 5 m x 5 m, resultando em 100 pontos no entorno dos equipamentos de manobra e proteção em 230 kV e outros 32 pontos obtidos próximos aos transformadores, nos vértices e centro das faces, como apresentado na Figura 55 e na Tabela 15.

Figura 55 - Pontos amostrados sobre a A4



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Tabela 15 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A4

Pontos	Equipamentos de referência
286 - 304	Transformadores e Para-raios
305 - 324	Para-raios e TCs
325 - 344	Entre TCs e chaves seccionadoras
345 - 364	Entre chaves seccionadoras e disjuntores
365 - 384	Entre disjuntores e chaves seccionadoras
385 - 392	Vértices e centro de T1
393- 400	Vértices e centro de T2
401 - 408	Vértices e centro de T3
409 - 416	Vértices e centro de T4

Fonte: Autoria própria (2019).

Já a Tabela 16 apresenta o carregamento dos circuitos desta área, na qual observa-se que como apenas B1 estava em funcionamento, não há transferência entre as barras e o disjuntores

e chaves de C1 estavam abertos, sem apresentar tensão ou corrente, enquanto os transformadores estão aparentemente balanceados e o circuito L8 apresenta níveis de corrente abaixo do que os demais.

Tabela 16 - Níveis de corrente nos circuitos da área 4 durante as medições

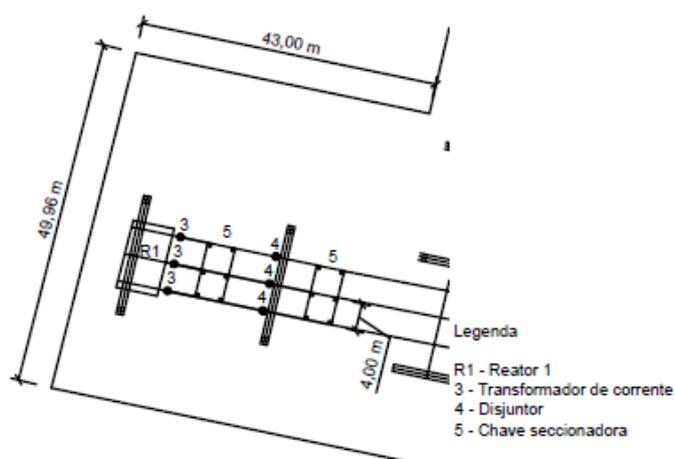
	Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)
L8 - A	23,7	T1 - A	108,2	T3 - A	111,0
L8 - B	21,7	T1 - B	109,2	T3 - B	111,5
L8 - C	21,2	T1 - C	106,4	T3 - C	109,4
C1-A	0,0	T2 - A	110,8	T4 - A	113,8
C1-B	0,0	T2 - B	111,3	T4 - B	113,8
C1-C	0,0	T2 - C	109,0	T4 - C	110,9

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

5.1.2.5 Área 5: Reator e seu entorno em 230 kV

A área 5 do Apêndice A é formada por um reator trifásico de 22,14 Mvar e os equipamentos em seu entorno. Nesse sentido, a Figura 56 ilustra o reator com TCs tipo bucha e disjuntores que constituem esta área, sendo cada tipo de dispositivo conectado um por fase, todos instalados na altura do solo. Há também 3 chaves seccionadoras tripolares, sendo 2 instaladas no solo e uma sobre a estrutura metálica.

Figura 56 - Disposições dos equipamentos e condutores de A5



Fonte: Autoria própria (2019).

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

A área 5 possui 2.148 m² e foi amostrada por meio de uma grade de 35 m x 40 m, espaçadas a cada 5 m em todas as direções, resultando em 63 pontos, enumerados de 417 a 479, apresentados na Figura 57.

Figura 57 - Pontos amostrados sobre A5



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

A Tabela 17 aponta as fontes eletromagnéticas próximas dos pontos medidos e vale ressaltar que no momento das medições o reator não estava em funcionamento, apresentando, portanto, tensões e correntes nulas.

Tabela 17 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A5

Pontos	Equipamentos de referência
417 - 430	Reator
431 - 444	Chaves seccionadora e reator
445 - 458	Entre chave seccionadora e disjuntores
459 - 465	Entre disjuntores e chave seccionadora
466 - 479	Chave seccionadora e barramentos

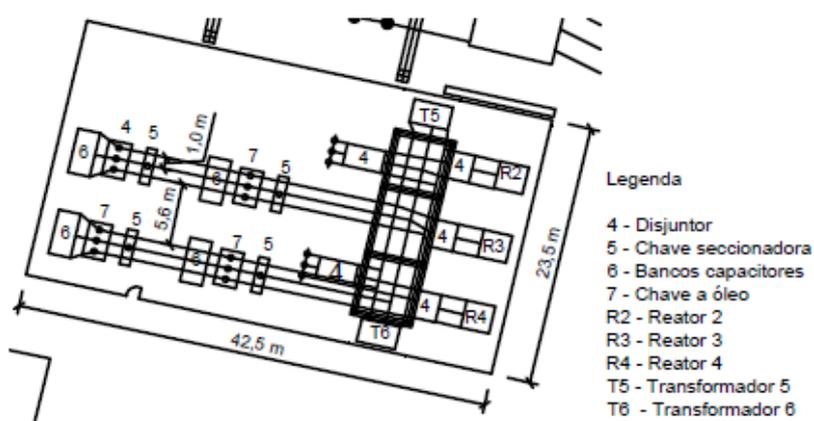
Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.6 Área 6: Circuitos auxiliares em 13,8 kV

Os transformadores T2 e T3 desta SE possuem a opção de conversão da tensão de 230 kV em uma tensão de 13,8 kV que alimenta os circuitos auxiliares de comando e compensação

da SE. Estes circuitos auxiliares encontram-se reservado em uma área cercada a parte do pátio da SE, a área 6 do Apêndice A, com 998,75 m², composta por equipamentos como bancos capacitores de 3,6 Mvar, chaves à óleo, disjuntores, transformadores de potência de 300 kVA (T5 e T6), transformadores de potencial (TP), reatores de 5 Mvar (R2, R3 e R4) e um barramento simples, cuja disposição é ilustrada na Figura 58.

Figura 58 - Disposição de condutores e equipamentos de A6



Fonte: Autoria própria (2019).

Nesta área foram traçados 40 pontos entre os equipamentos, equivalentes as amostra 417 a 479, espaçados em 5 m x 5 m, conforme apresentado na Figura 59, cuja fontes mais próximas são apontadas na Tabela 18.

Figura 59 - Pontos amostrados sobre A6



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Tabela 18 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A6

Pontos	Equipamentos de referência
480 - 484	Banco Capacitores
485 - 489	Chaves seccionadoras e chaves à oléo/disjuntores
490 - 494	Entre chaves seccionadoras e banco capacitores
495 - 499	Entre banco capacitores e chaves à oléo
500 - 504	Chaves seccionadoras
505 - 509	Disjuntores e mufla de entrada
510 - 514	Transformadores, barramentos e disjuntores
515 - 519	Entre reatores e disjuntores

Fonte: Autoria própria (2019).

Apesar de ambos os transformadores apresentarem tensões, apenas T5 conduzia correntes no momento das medições e, em relação aos reatores, apenas R3 estava em funcionamento, apresentando os níveis de corrente da Tabela 19.

Tabela 19 - Níveis de corrente nos circuitos da área 6 durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)
T5 - A	209,6	R2 - A	206
T5 - B	212,5	R2 - B	207,9
T5 - C	210,4	R2 - C	207,3

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

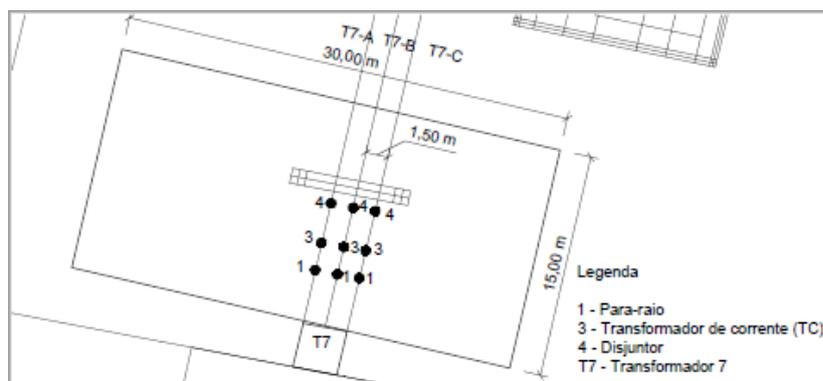
5.1.2.7 Área 7: Consumidor particular (69 kV/3,3 kV)

Após a conversão nos transformadores de 100 MVA (T1 à T4), uma tensão em 69 kV é obtida, sendo uma parte da carga conduzida a um circuito trifásico específico para atendimento a um cliente particular, que possui um transformador próprio de 20 MVA (T7), que converte uma tensão em 69 kV para 3,3 kV, instalado dentro da SE, na zona aqui denominada de A7.

Neste contexto, a área 7 é composta por 3 DJs monofásicos, 3 TCs, 3 para-raios e o transformador T7 de 20 MVA, com espaçamento médio de 1,5 m entre condutores e refere-se a uma porção delimitada em 450 m² do Apêndice A, conforme observado na Figura 60.

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

Figura 60 - Disposição de condutores e equipamentos de A7



Fonte: Autoria própria (2019).

Os pontos amostrados pela região foram um total de 21 ao redor dos DJs, PRs e TCs, espaçados em 5 m x 5 m e enumerados de 520 a 540, conforme apresentado na Figura 61. Observa-se ainda que mais 3 amostras (541 a 543) foram colhidas no ponto médio de cada face de T7.

Figura 61 - Pontos amostrados sobre A7



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Com auxílio da Tabela 20 é possível traçar um paralelo entre a localização dos pontos colhidos em relação aos equipamentos mais próximos.

Tabela 20 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A7

Pontos	Equipamentos de referência
520 - 526	Disjuntores
527 - 533	Entre TCs e disjuntores
534 - 540	Entre T6 e para raios
541 - 534	Ao redor de T7

Fonte: Autoria própria (2019).

Já as correntes de carregamento nas fases deste circuito podem ser observadas na Tabela 21, enquanto os níveis de tensão permanecem em 69 kV.

Tabela 21 - Níveis de corrente nos circuitos da área 7 durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)
T7 - A	52,2	T7 - B	52,4	T7 - C	51,9

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

5.1.2.8 Área 8: Circuitos em 69 kV pré-barra

Na área 8 do Apêndice A, 4 circuitos em 69 kV oriundos dos transformadores (T1 a T4) antecedem a conexão do sistema a uma barra de 69 kV. Estes circuitos são compostos por TPs, TCs, disjuntores, todos monofásicos, separados em 2 m entre si, quando pertencem a um mesmo circuito e separados em cerca de 10 m, quando pertencem a circuitos diferentes.

Há ainda três chaves seccionadoras tripolares por circuito, sendo duas instaladas ao solo e umas sob a estrutura metálica, espaçadas em 10 m na direção longitudinal, isto é, entre circuitos.

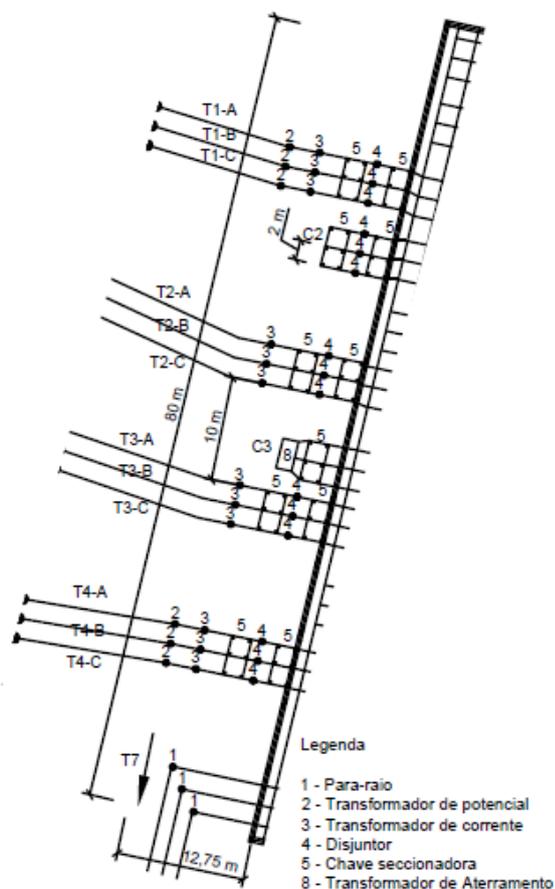
Nesta zona estar também localizada a derivação para o transformador T7 da área 7, o circuito de transferência (C2) entre as barras de 69 kV, formado por disjuntores e chaves seccionadoras, além de um circuito C3 com um transformador de aterramento de 20 Ω por fase.

As informações supracitadas podem ser observadas com auxílio da Figura 62 que ilustra a área 8 do Apêndice A, limitada a uma área de 1.020 m².

Como esperado, as tensões no condutores e equipamentos desta área é em média de 69 kV, com exceção de C2 que se encontrava em posição aberta, sem apresentar tensão ou corrente.

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

Figura 62 - Disposição de condutores e equipamentos de A8



Fonte: Autoria própria (2019).

Já os níveis de corrente, por sua vez, para a derivação referente a T7 já foram apresentados na Tabela 21, enquanto a Tabela 22 exhibe os demais valores desta grandeza.

Tabela 22 - Níveis de corrente nos circuitos da área 8 durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)
T1 - A	340,1	T3 - A	340,6
T1 - B	347,4	T3 - B	348,1
T1 - C	344,9	T3 - C	345,3
T2 - A	347,2	T4 - A	352,7
T2 - B	354,3	T4 - B	360,8
T2 - C	351,8	T4 - C	356,5

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

A Figura 63 exibe as 52 amostras colhidas nesta zona, espaçadas em uma grade 5 m x 5 m, totalizando 51 pontos, enumerados de 544 até 594.

Figura 63 - Pontos amostrados sobre A8



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Já a Tabela 23 apresenta os pontos de medição e os respectivos equipamentos de referência, cuja ação como fontes eletromagnéticas se sobressaem sob estes.

Tabela 23 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A8

Pontos	Equipamentos de referência
544 - 560	TPs ou TCs
561 - 577	Chaves seccionadora e TCs
578 - 594	Entre chave seccionadora e disjuntores

Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.9 Área 9: Barramento em 69 kV

Os circuitos da área 8 (T1, T2, T3, T4) desembocam em um barramento flexível tipo barra dupla (B3 e B4) a 3 chaves, com dimensões de 13 m x 83,5 m que equivale a 1085,5 m². Circuitos de saída em 69 kV (L9 a L17) e T7 são derivados desta barra. Porém, abaixo dos condutores de B3 e B4 há apenas isoladores de pedestal para cada condutor dos circuitos

adjacentes e 2 TPs localizados conforme é apresentado na Figura 64 que ilustra a área 9 do Apêndice A.

Figura 64 - Disposição de condutores e equipamentos de A9



Fonte: Autoria própria (2019).

Segundo os operadores da SE, no momento da medição, apenas a barra B3 conduzia corrente, enquanto a barra B4 estava sendo inutilizada e, portanto, apresentava tensão e corrente nulas nos polos dos seus condutores.

A amostragem dos dados foi obtida através de uma malha em 2 m x 5 m, devido a área 9 apresentar uma dimensão pequena de 13 m e os condutores das barras estarem espaçados em 2 m entre si.

Os pontos resultantes desta grade são apresentados na Figura 65, enumerados de 595 a 699 e, portanto, correspondendo a um total de 105 amostras.

Figura 65 - Pontos amostrados sobre A9



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

Vale salientar que na periferia do barramento há uma proximidade considerável das chaves seccionadoras dos circuitos adjacentes e os TPs estão localizados próximos aos pontos 620 e 648.

5.1.2.10 Área 10: Circuitos de saída em 69 kV

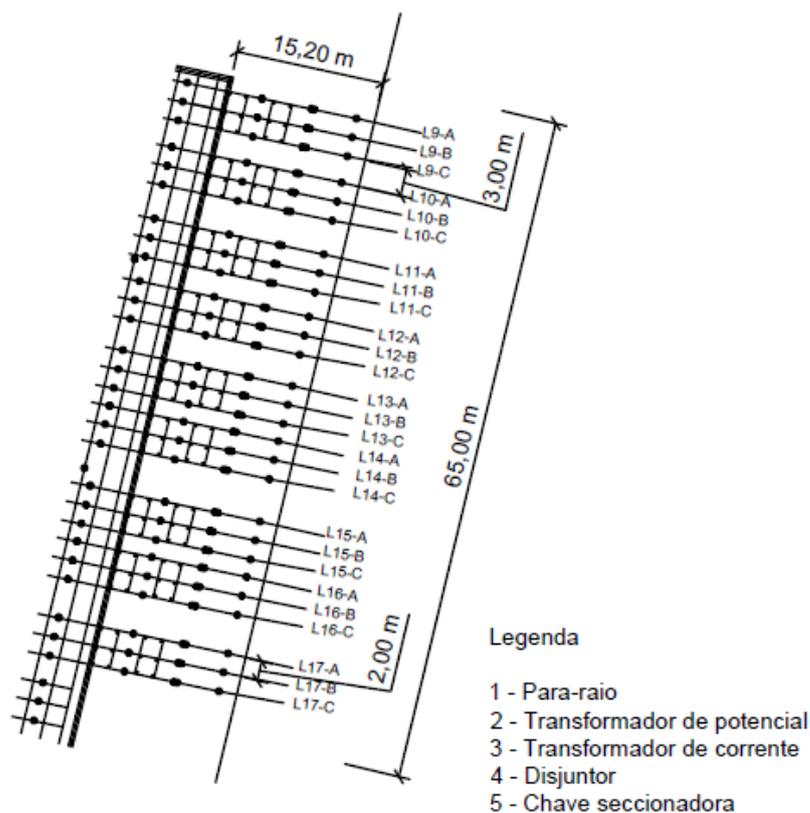
Esta SE fornece 9 circuitos de saída na tensão de 69 kV que alimentam outras SEs, neste nível de tensão, no estado do RN, ou ainda clientes também atendidos neste nível de tensão.

Estes 9 circuitos, são circuitos trifásicos, cujo condutores são separados entre si em 2 m, caso pertençam a um mesmo circuito e 3 m, caso pertençam a circuitos diferentes.

Cada circuito é protegido e manobrado por disjuntores, para raios, instalados no total de um por fase, três chaves seccionadora tripolar por circuito e dois transformadores de correntes (TCs) por fase, com exceção do circuito L11, que possui apenas um TC por fase.

Portanto, são um total de 27 CHs, 27 Djs, 53 TCs e 27 PRs dispostos sobre a área A10 do Apêndice A que corresponde a 988 m² do pátio da SE e cuja disposição dos equipamentos e condutores podem ser observada na Figura 66.

Figura 66 - Disposição de condutores e equipamentos de A10



Fonte: Autoria própria (2019).

Uma malha 5 m x 5 m foi traçada resultando em 42 pontos, equivalentes as amostras de número 700 a 742 ilustradas na Figura 67.

Figura 67 - Pontos amostrados sobre A10



Fonte: Exportado do Google Earth (2019).

A Tabela 24, por sua vez, apresenta uma relação entre os pontos medidos e os equipamentos mais próximos destes.

Tabela 24 – Localização das amostras e equipamentos mais próximos em A10

Pontos	Equipamentos de referência
700 - 713	Para-raios
714 - 727	Entre TCs e para-raios
728 - 741	Entre chave seccionadora e disjuntores

Fonte: Autoria própria (2019).

Durante as medições, segundo a subsidiária de energia elétrica, os circuitos correspondentes de L9 a L17 apresentaram as correntes da Tabela 25.

Tabela 25 - Níveis de corrente nos circuitos da área 10 durante as medições

	Corrente (A)		Corrente (A)		Corrente (A)
L9 - A	121,3	L12 - A	70,1	L15 - A	178,5
L9 - B	120,7	L12 - B	72,0	L15 - B	176,6
L9 - C	119,3	L12 - C	70,9	L15 - C	178,6
L10 - A	146,2	L13 - A	114,2	L16 - A	345,4
L10 - B	151,0	L13 - B	156,7	L16 - B	348,5
L10 - C	151,4	L13 - C	112,7	L16 - C	337,6
L11 - A	14,6	L14 - A	244,2	L17 - A	154,6
L11 - B	23,3	L14 - B	254,1	L17 - B	161,3
L11 - C	24,5	L14 - C	253,3	L17 - C	164,9

Fonte: Informação sigilosa (2019).¹

5.2 Descrição dos equipamentos de medição

Após definidos a localização de cada ponto no qual serão aferidos os níveis de campo elétrico e campo magnético em torno das LTs e dos equipamentos da SE, a coleta de dados em 60 Hz pode ser feita, conforme relatado na seção 3.7.2.3, através de medidores de espaço livre

¹ Dados cedidos pelos operadores da subsidiária de energia, cuja privacidade será mantida.

para obtenção dos níveis de \vec{E} e de medidores indutivos de três eixos, quando a caracterização do campo magnético ocorre em termos de densidade de fluxo magnético, \vec{B} .

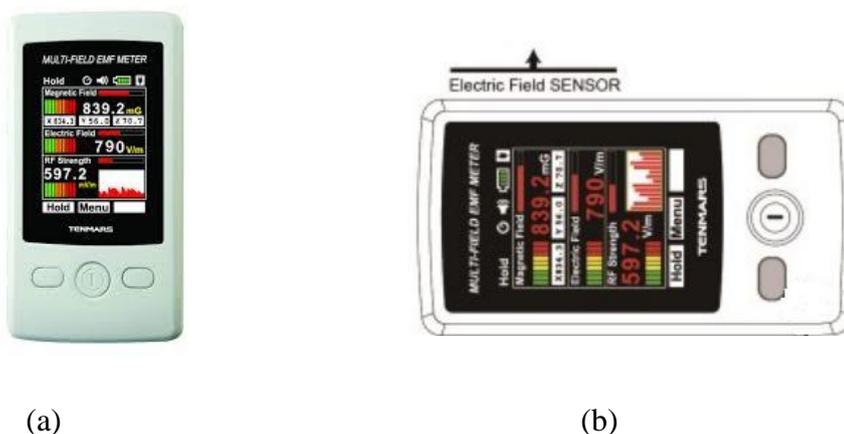
Nesse sentido, o medidor de campos eletromagnéticos TM-190 da Tenmars foi desenvolvido para medições isotrópicas de campos elétricos e densidade de fluxo magnético, na frequência central de 50/60 Hz, com possibilidade de escalas em V/m e μT , isto quer dizer, que um sensor no interior do aparelho realiza medições simultâneas nos três eixos (x,y,z), enquanto um detector transforma o sinal em um valor resultante de campo elétrico e magnético, que pode ser visualizado no seu *display* digital, em termos de V/m e μT , através das Equações 25 e 26, respectivamente, onde \vec{E}_x , \vec{E}_y , \vec{E}_z e \vec{B}_x , \vec{B}_y , \vec{B}_z são os aos três eixos ortogonais de cada campo e E_R e B_R são as resultantes em rms. Além disso, este equipamento possui autonomia média de 8 horas de medição, com precisão de $\pm 15\%$ para campo magnético e $\pm 7\%$ para campos elétricos (TENMARS, 2010).

$$E_R = \sqrt{\vec{E}_x^2 + \vec{E}_y^2 + \vec{E}_z^2} \quad (25)$$

$$B_R = \sqrt{\vec{B}_x^2 + \vec{B}_y^2 + \vec{B}_z^2} \quad (26)$$

O visor do equipamento TM-190 pode ser visualizado na Figura 68a, onde observa-se diferentes escalas de magnitude, em cores distintas, para facilitar a leitura do operador. Já a Figura 68b ilustra a posição indicada para medições em 60 Hz, devido à disposição geométrica do sensor de campo elétrico, segundo o manual da Tenmars (2010).

Figura 68 - Medidor utilizado nas medições: (a) *Display* do TM-190; (b) Disposição correta do equipamento nas medições.



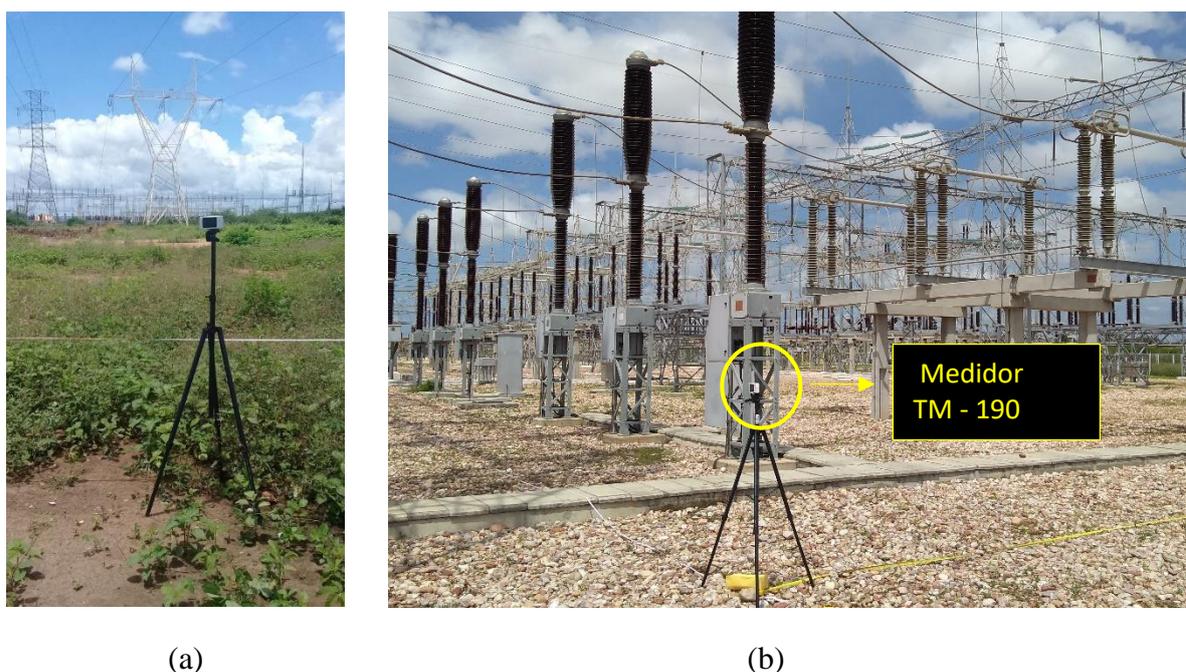
Fonte: TENMARS (2010).

Por se tratar de um medidor de espaço livre, o dispositivo deverá ser isolado eletricamente da terra durante as medições, dessa forma, o equipamento cumpre seu objetivo de medir os níveis de CEM em um ponto acima do solo. Para tanto, foi construído um tripé em Policloreto de Vinila (PVC), tendo em vista as propriedades dielétricas deste material.

Dado que os espaçamentos entre pontos de medição foram previamente definidos, visando auxiliar o observador nestes distanciamentos, fitas métricas de 50 m e 10 m, também foram utilizadas.

A Figura 69 mostra o TM-190 acoplado transversalmente ao tripé em PVC durante as medições em torno da LT e equipamentos da SE, no qual observa-se a presença e uso da fita métrica de 50 m e 10 m.

Figura 69 – Conjunto medidor, tripé e fita métrica: (a) Durante medições nas LTs; (b) Durante medições na SE.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para que os mapas de distribuição espacial sejam confeccionados, é preciso que as variáveis espaciais de latitude e longitude sejam registradas nos devidos pontos amostrais, permitindo assim, posteriormente, uma correlação entre cada ponto no espaço e os níveis de CEM. Para isso, foi utilizado um georreferenciador GPS do tipo GPSmap 78s da GARMÍN®, apresentado na Figura 70.

Figura 70 – Dispositivo GPSmap 78s da GARMIN®



Fonte: GARMIN (2013).

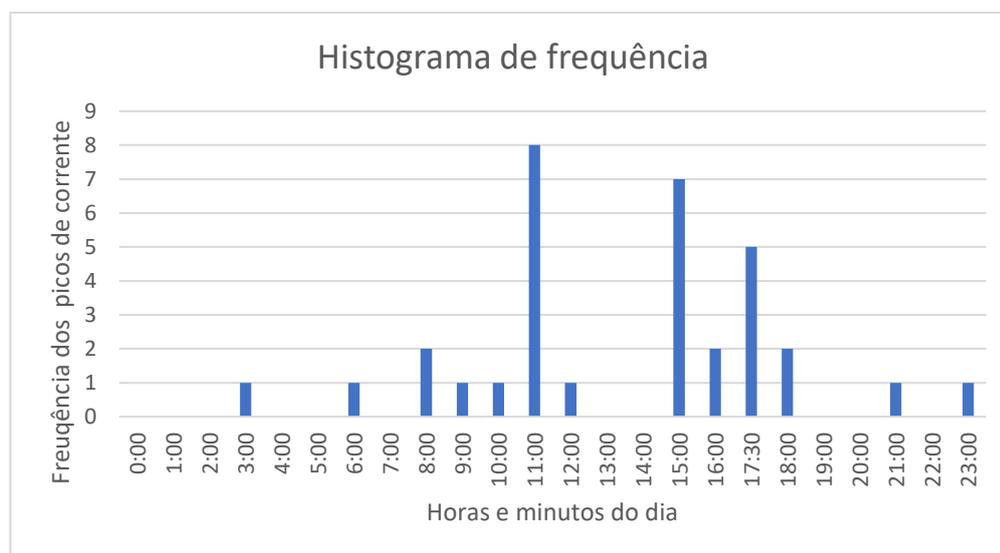
5.3 Procedimentos de medição

Para que a coleta de dados dentro da faixa de servidão da LT e no interior do pátio da SE, conforme os pontos estabelecidos em 5.1, ocorra dentro dos padrões e protocolos das normas de referência mundial, alguns procedimentos foram adotados, como, por exemplo, buscando evitar a perturbação do campo elétrico pela presença do operador no meio, neste trabalho a distância entre o observador e o sensor foi de aproximadamente 2,5 m, uma vez que, segundo a ABNT (2016) o observador deverá estar no mínimo a um braço de distância do medidor e já para a IEEE (1994) um distanciamento mais rigoroso de, no mínimo, 2,5 m deve ser estabelecido. Logo, o valor adotado está em concordância com ambas as normas.

Para uma boa caracterização dos ambientes eletromagnéticos das LTs e SE em termos de exposição a campos elétricos e magnéticos, é preferível que as medições ocorram quando os equipamentos estejam sob a rotina normal de operação, porém em horários com o máximo de cargas em atuação, uma vez que, níveis mais altos de CEM são gerados nestes momentos, devido a maior condução de corrente. Nesse sentido, com base em um banco de dados de máximas correntes de operação, um histograma com a quantidade de vezes em que os picos de corrente nos equipamentos da SE e das LTs ocorrem em um determinado horário do mês de

janeiro de 2019 pode ser visualizado na Figura 71, na qual observa-se que os pontos de pico para este empreendimento em energia elétrica ocorrem com mais frequência às 11:00 horas.

Figura 71 - Histograma da frequência com que picos de corrente ocorrem em determinados horários em equipamentos da SE e LTs



Fonte: Autoria própria (2019).

Diante destas observações as medições ocorreram das 08:00 às 12:00 horas, durante 9 dias, sendo o 1º dia reservado a exploração de dados ao redor das LTs e o restante na SE.

A Tabela 26 faz associações entre os dias das medições com as áreas definidas em 5.1, bem como registra as condições de temperatura e umidade observados durante as medições.

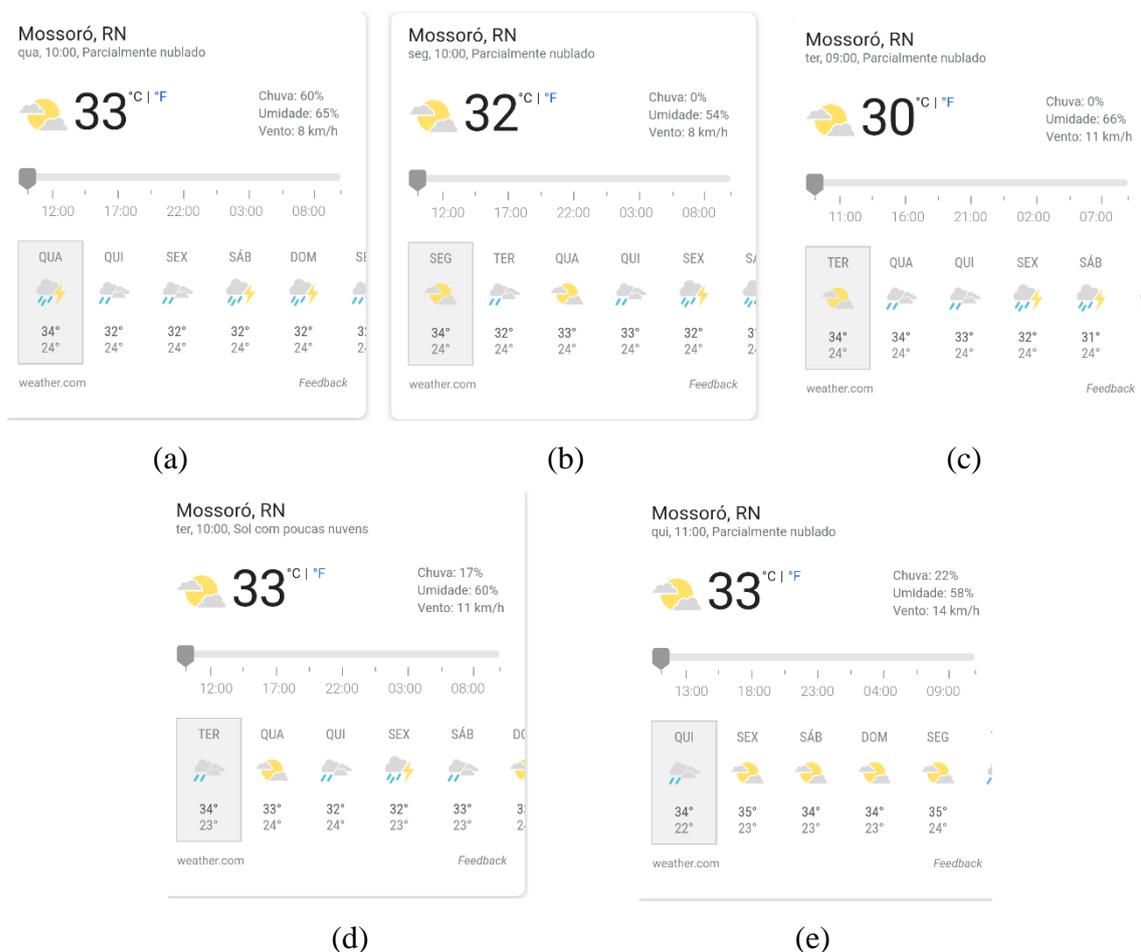
Tabela 26 – Áreas medidas por dia de medições e condições de temperatura e umidade

Dia	Data	Áreas medidas	Temperatura	Umidade
1º	20/03/2019	LTs	28°C à 33°C	65%
2º	09/04/2019	A1	30°C à 33°C	64%
3º	10/04/2019	A2	27°C a 32°C	62%
4º	15/04/2019	A2	27°C a 32°C	54%
5º	16/04/2019	A3	28°C a 30°C	66%
6º	23/04/2019	A4 e A5	28°C à 33°C	60%
7º	30/04/2019	A6 e A8	27°C a 32°C	68%
8º	02/05/2019	A10	28°C a 33°C	58%
9º	09/05/2019	A9 e A7	28°C a 33°C	70%

Fonte: Autoria própria (2019).

Já na Figura 72 é possível visualizar os registros de algumas das condições climáticas da Tabela 26.

Figura 72 - Condições climáticas em diferentes dias de medição: (a) Dia 1; (b) Dia 4; (c) Dia 5; (d) Dia 6; (e) Dia 8.



Fonte: Climatempo (2019).

Vale salientar, que, durante as medições, pessoas ou animais foram impedidos de circular próximos as zonas de medição e evitou-se que os instantes de medida de cada dia coincidisse com a ocorrência de manobras, como abertura ou fechamento de cargas, pois tais situações elevam, momentaneamente, os valores de correntes e, portanto, de campo magnético, que não refletem os níveis de exposição à CEM do dia-a-dia.

Ademais, a altura das medições, tanto pras LTs quanto no interior da SE, foram a 1,5m do solo (alcançada com o uso do tripé), quaisquer equipamentos eletroeletrônicos portáteis foram desligados ou mantido longe dos pontos de medição, com exceção das instrumentação

da secção 5.2 e visando obter valores mais exatos, cada ponto de medição foi medido por 5 minutos até ser obtido um valor de \vec{E} e \vec{B} estável.

A Figura 73 apresenta um conjunto de imagens obtidas durante as medições em áreas variadas da SE e sobre o eixo das LTs, inclusive em algumas delas é possível observar o distanciamento entre operador e medidor, como também o visor de leitura do medidor a esta distância.

Figura 73 – Medições dos CEM em áreas diversas: (a) Eixo da torre 2 circuito duplo; (b) A2: Barramento 230 kV; (c) Leitura medidor TM-190; (d) A4: em torno de T1



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria (2019).

5.4 Mapas de distribuição espacial

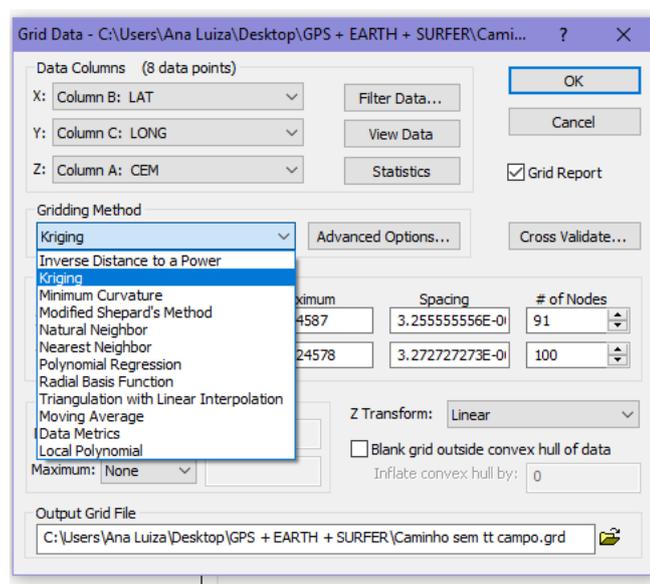
De posse dos resultados das medições para campo elétrico e campo magnético, em função das suas coordenadas geográficas, de latitude e longitude, é possível produzir mapas de superfície que possibilitem a interpretação espacial dos valores de exposição obtidas, de forma, que seja possível determinar quais pontos e próximo a que componente elétrico, os valores máximos de exposição aos CEM ultrapassam ou não os limites estabelecidos em normas.

Contudo, para que esses mapas sejam obtidos a partir dos dados amostrais de \vec{E} e \vec{B} é necessário a adoção de técnicas de interpolação, que irão, através de modelagem computacional e estatística, estimar valores de campos em pontos não-amostrais, referenciando, assim, todos os pontos possíveis na área da SE ou das LTs, desde que os dados medidos sejam representativos.

Neste trabalho, a confecção dos mapas, a partir das técnicas de interpolação, serão obtidas através do *software Golden Surfer®* versão 13.0 que é uma ferramenta computacional para visualização de dados geograficamente espaçados, através de ajustes de parâmetros e variogramas de interpoladores (Golden Software, 2019).

O *Surfer®* possibilita ao usuário a aplicação de uma variedade de interpoladores, a partir de um arquivo *.grid* gerado das descrições do conjunto de dados amostrados. A Figura 74 mostra a tela de trabalho deste *software* no momento da escolha dos métodos.

Figura 74 - Área de trabalho do *software Golden Surfer®*



Fonte: Autoria própria (2019).

Pela Figura 74, observa-se que o *Surfer*®, permite a aplicação de todos métodos citados no capítulo 4, como IDP, Krigagem, Método da Mínima Curvatura, entre outros. Para o método de Krigagem, este *software*, ainda possibilita a obtenção do gráfico do semivariograma, de modo que o usuário, incorpore ao processo de Krigagem várias opções de semivariogramas, visando um processo de Krigagem mais eficiente.

Ao final de cada interpolação o *Surfer*® gera mapas de contorno, que podem, inclusive, ser sobrepostos ao *layout* da subestação ou das LTs.

Além disso, este *software* proporciona a aplicação do método de validação cruzada para cada interpolador, emitindo um relatório estatísticos onde podem ser obtidos os valores de índices RMSE e MAE.

A Figura 75 exibe um exemplo deste relatório estatístico com ênfase na obtenção dos índices estatísticos.

Figura 75 – Relatório de validação cruzada obtido no *Golden Surfer*®

	Estimated Z	Residual Z	Data Used
Count:	111	111	111
1%-tile:	32.3603347848	-323.371144034	111
5%-tile:	73.052890539	-276.406840214	111
10%-tile:	188.404908407	-170.087776107	111
25%-tile:	315.01892949	-57.6928374139	111
50%-tile:	576.875052882	22.7747150964	111
75%-tile:	704.72039302	66.9910202804	111
90%-tile:	807.672945477	121.052671612	111
95%-tile:	877.803531559	151.726437093	111
99%-tile:	1026.49100819	440.280753248	111
Minimum:	27.3428393352	-392.196468441	111
Maximum:	1083.8963089	535.389051945	111
Mean:	526.118835838	3.53325025209	111
Median:	576.875052882	22.7747150964	111
Geometric Mean:	436.227355578	N/A	111
Harmonic Mean:	285.350319266	N/A	111
Root Mean Square:	581.714268434	146.013194312	111
Trim Mean (10%):	522.013255552	-1.09996989457	111

Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa forma, esta ferramenta possibilita a obtenção dos mapas de distribuição espacial que mais se adequaram ao comportamento das amostras na região.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta uma análise dos resultados obtidos para níveis de campo elétrico em V/m e campo magnético em μT , em termos de exposição eletromagnética e de comportamento em relações as fontes eletromagnéticas, para os dois ambientes (LTs e pátio da SE) definidos neste trabalho.

6.1 Ambiente eletromagnético I: Linhas de transmissão

Como discorrido, os 74 pontos amostrais foram obtidos a partir de 4 perfis laterais traçados conforme indicação da IEEE *std* 644/1994, a ABNT NBR 25415/2016 e o manual do equipamento.

Destaca-se que nem uma torre ou circuito pode ser observado sozinhos, pois devido à proximidade entre os condutores das LTs, há sobreposição de CEM gerados por estes.

6.1.1 Perfil 1 (P1)

A Figura 76 e a Figura 77 ilustram o comportamento dos campos elétrico e magnético respectivamente, em relação a localização dos condutores de fase das torres para a posição de P1 espaçada, latitudinalmente, em 120 m de T1/LT1-LT2 e a 10m de T1-LT3 e cuja extensão entre muros de edificações foi de 56 m, resultando em 29 pontos.

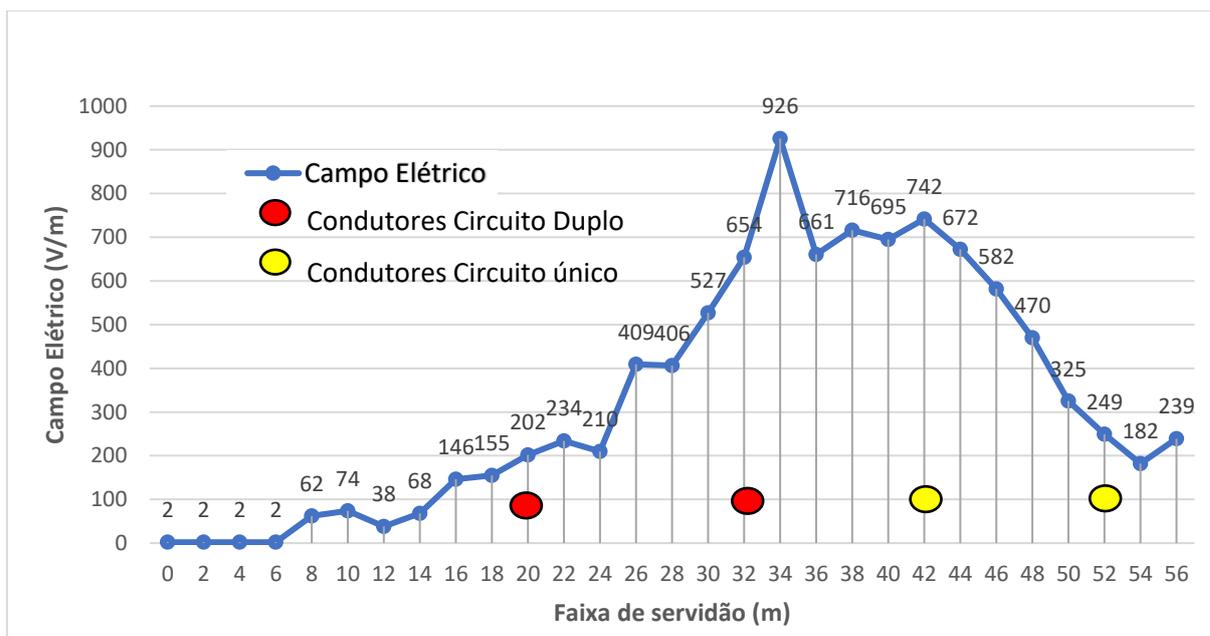
Na Figura 76 observa-se que, como esperado, o campo elétrico decai rapidamente à medida que se distancia dos condutores periféricos, de um nível de 234 V/m a 2 V/m próximo as edificações e vegetações limítrofes.

Tendo em vista que todos os condutores estão carregados a uma média de 230 kV, destaca-se que os valores máximos de campo elétrico neste perfil (926 V/m a 672V/m) e estão localizados entre os condutores de fase de LT2 e LT3, tal comportamento deduz-se que estar relacionado com o fato de os condutores da torre de circuito único estarem mais próximos do solo e, portanto, do ponto medido, cuja contribuição é sentida sob os condutores, dispostos verticalmente, um sobre o outro, da LT2, gerando assim um valor de pico em 926 V/m constatado em proximidade com os condutores desta LT.

Comportamento semelhante é observado na Figura 77, em termos de campo magnético, uma vez que os valores decaem rapidamente em relação a zona entre condutores periféricos e edificações, sendo os maiores valores de \vec{B} obtido próximo ao condutor central da LT3, com o

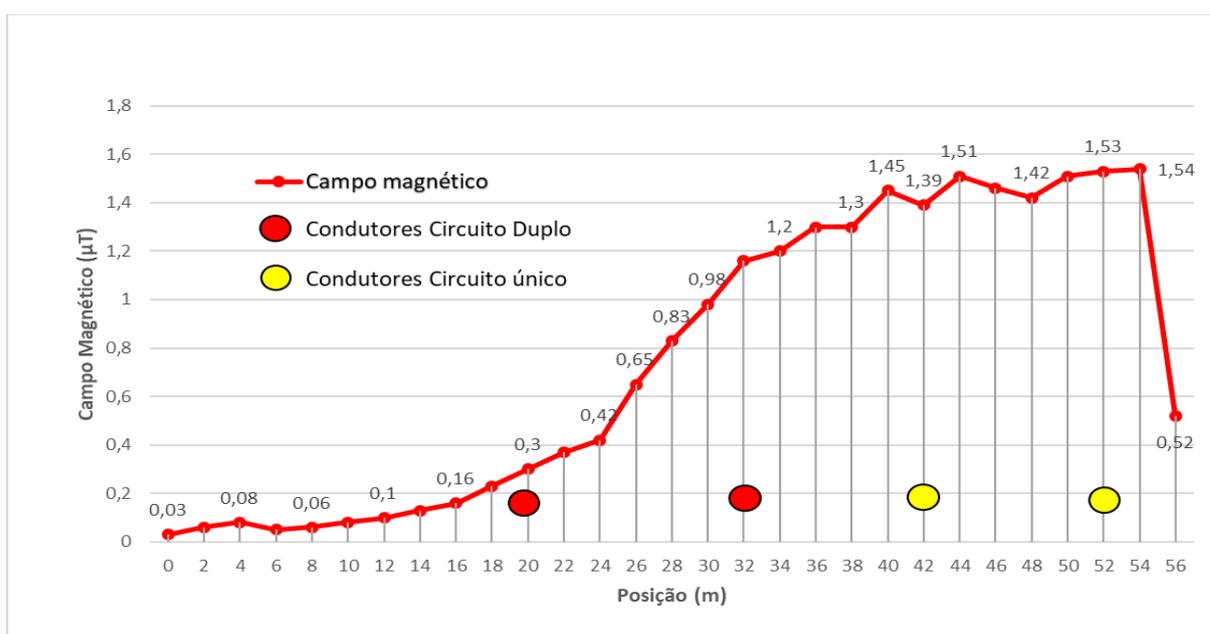
valor de pico de $1,54 \mu\text{T}$. Vale salientar que a LT3 é o circuito mais carregado, com valor médio de corrente em 417,2 A, bem como o de menor distância entre condutores e solo e, portanto, apresentam maior influência sobre os resultados que crescem a medida que se aproximam dos condutores da LT citada.

Figura 76 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P1)



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 77 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P1)



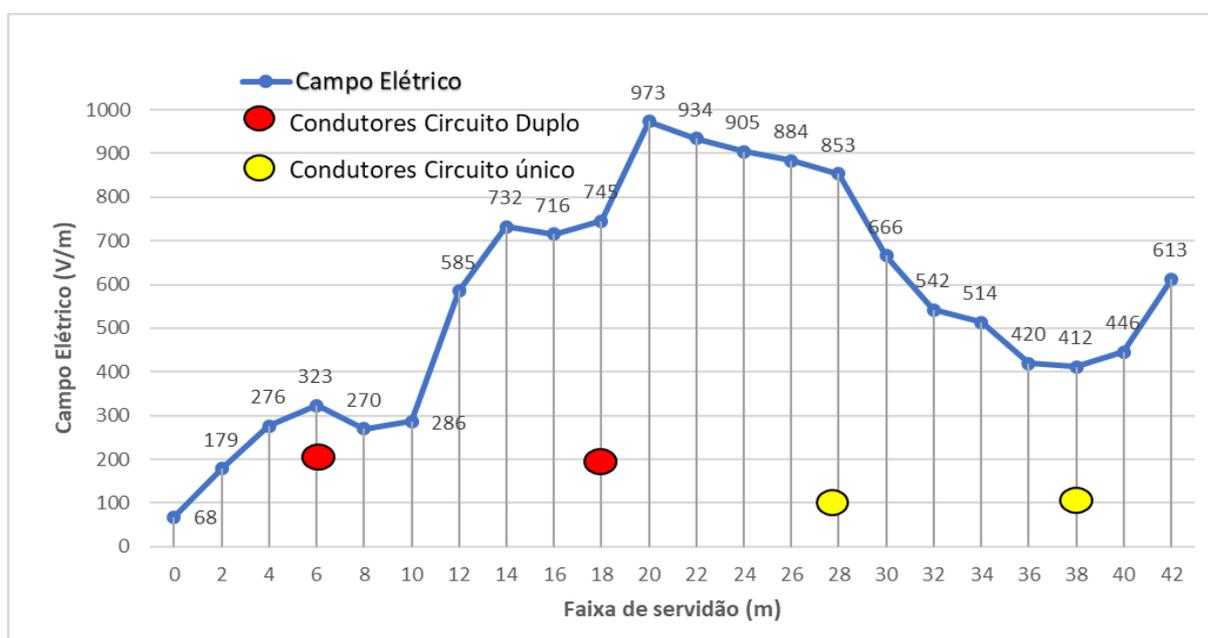
Fonte: Autoria própria (2019).

6.1.2 Perfil 2 (P2)

O perfil 2 (P2) foi traçado a uma distância latitudinal de 190 m de T1-LT1/LT2, 80 m de T1-LT3 e, conseqüentemente, 70 m de P1, enquanto os 22 pontos medidos foram espaçados, longitudinalmente, em 2 m, sobre uma faixa de servidão de 42 m.

A Figura 78 exibe o perfil de campo elétrico em P2, onde constata-se que semelhante a P1, o valor máximo de campo elétrico foi encontrado entre os condutores de fase da LT2 e LT3, sendo mais precisamente a 2 m de distância dos condutores da LT2, num valor de 973 V/m.

Figura 78 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P2)

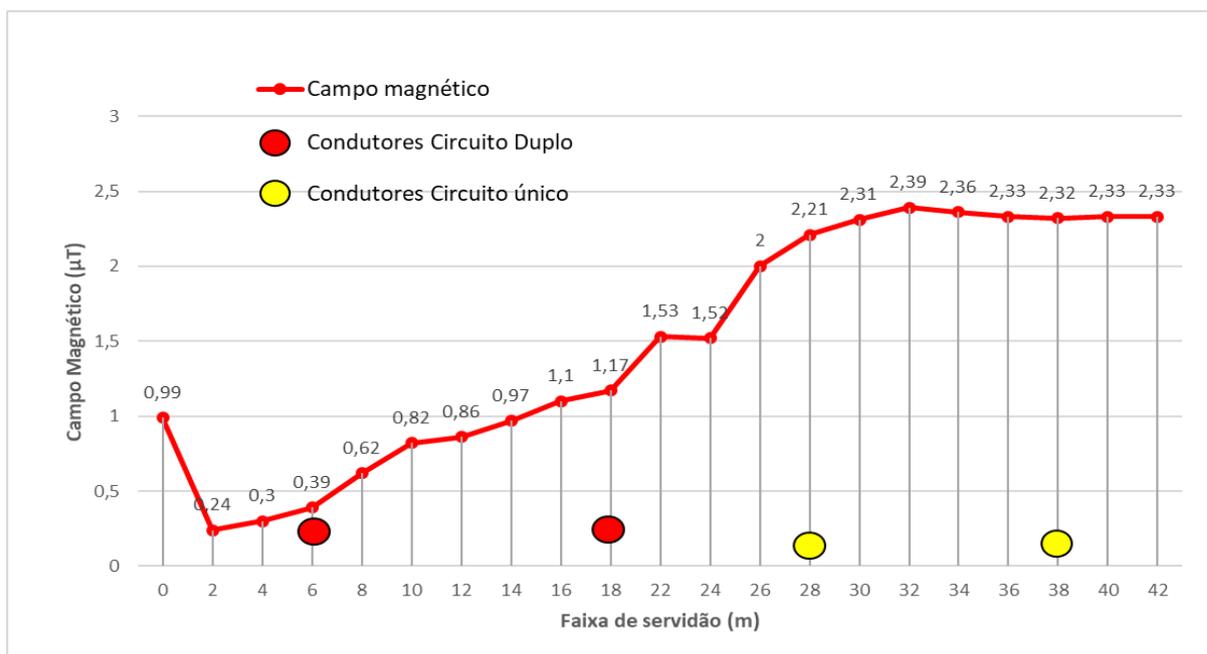


Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se ainda que, como esperado, a disposição vertical da torre de circuito único possibilita um desvanecimento do nível de campo elétrico próximo ao condutor central (412 V/m), que logo retorna a valores mais altos à medida que se aproxima dos condutores externos deste mesmo circuito (853 V/m à esquerda e 613 V/m à direita). Enquanto, na região central do circuito duplo, os valores tendem a cair, assumindo 286 V/m, porém são afetados pela LT3, que influencia o valor de \vec{E} a crescer.

A Figura 79 ilustra o campo magnético em P2, assume valores maiores sob os condutores da LT mais carregada, a LT3, cujo valor de pico máximo apresentado foi de 2,39 μ T.

Figura 79 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P2)



Fonte: Autoria própria (2019).

6.1.3 Perfil 3 (P3)

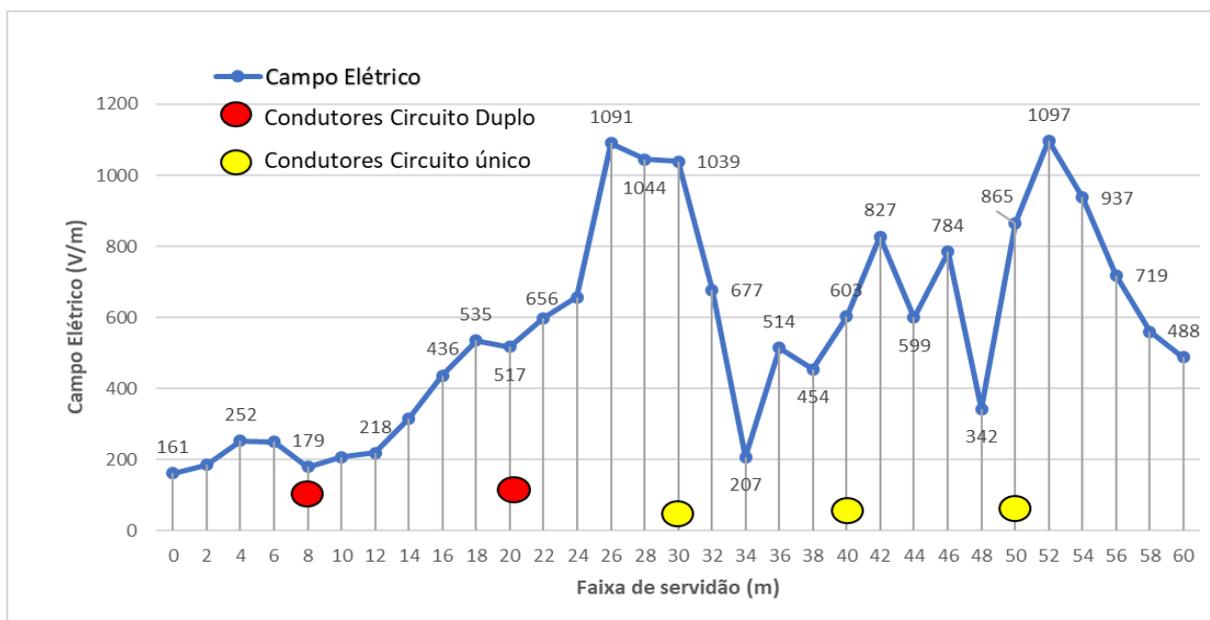
O perfil 3 (P3) localizado, latitudinalmente, a 260 m da T1-LT1/LT2 e a 150 m da T1-LT3 e, portanto, corresponde ao perfil traçado logo abaixo da catenária da LT3, cuja distância entre muros das edificações de ruas paralelas foi a maior obtida, num total de 60 m que resultaram em 31 pontos, intercalados em 2 m, na direção longitudinal.

A Figura 80 apresenta o perfil de campo elétrico na posição P3, na qual foram obtidas o valor máximo de pico de 1097 V/m, maior que os valores obtidos nos perfis anteriores.

Para entender este comportamento, basta visualizar que os condutores da LT3 são, naturalmente, mais baixos, em relação ao solo, do que os demais, como no momento da medição, a flecha deste circuito estava nesta posição, a distância (hs) é ainda menor, acarretando intensidades de \vec{E} maiores ao redor desta LT e nesta posição P3.

Observa-se ainda que a magnitude de \vec{E} diminui à medida que se distancia dos condutores periféricos, que os 1097 V/m estar próximo ao condutor mais externo da LT3, porém níveis igualmente altos são aferidos na zona onde tanto há influência do circuito LT2 quanto de LT3.

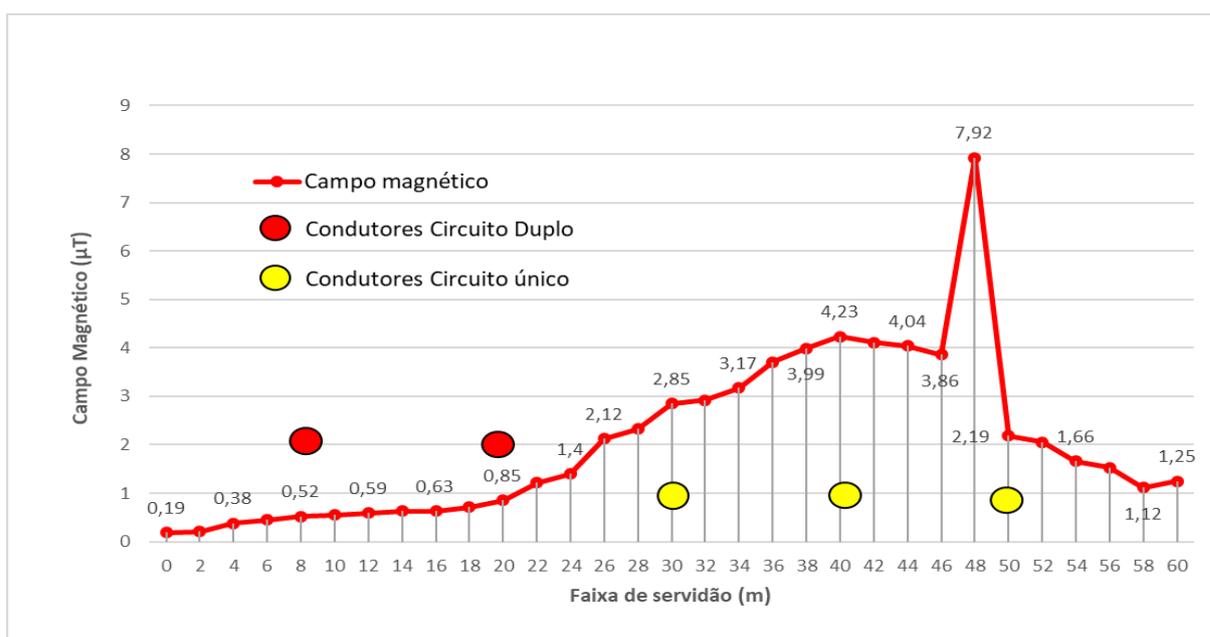
Figura 80 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P3)



Fonte: Autoria própria (2019).

Já Figura 81 ilustra o campo magnético em P3, que como os demais perfis, apresenta valores mais elevados à medida que se aproxima dos condutores da LT3, sendo o valor de pico de $7,92 \mu\text{T}$ obtido próximo ao condutor periférico, que corresponde também ao valor máximo observado em toda a região, pelas mesmas razões citadas para o caso de \vec{E} .

Figura 81 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P3)



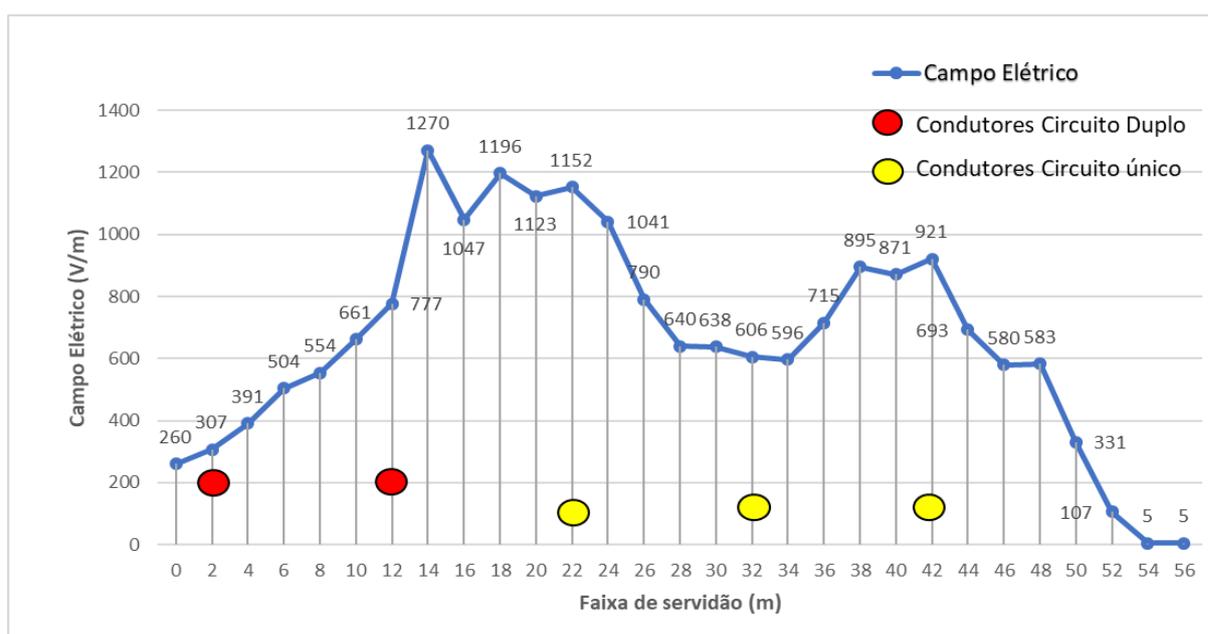
Fonte: Autoria própria (2019).

6.1.4 Perfil 4 (P4)

Já o perfil 4 (P4) foi traçado a 340 m da T1-LT1/LT2, 230 m da T1-LT3, e, portanto, a 70m de P3, com uma faixa de servidão de 56 m e 29 pontos.

Na Figura 82 observa-se o perfil de campo elétrico em P4, que apresenta valor máximo de 1270 V/m entre os condutores da LT2 e LT3, a 2 m da LT2, que é o nível máximo observado pra este ambiente eletromagnético, em relação aos pontos medidos, assim como os valores a cada 2 m deste perfil são, relativamente, mais altos do que seus correspondentes nos perfis de 1 a 3. Isto acontece, pois, por se tratar, entre os perfis traçados neste trabalho, do perfil mais distante da SE, entende-se que as pequenas quedas de tensões que ocorre em LTs devido a sua extensão quilométrica, é menor nesta posição, gerando, portanto, campos elétricos de magnitude mais elevada.

Figura 82 - Perfil Lateral de Campo Elétrico (P4)



Fonte: Autoria própria (2019).

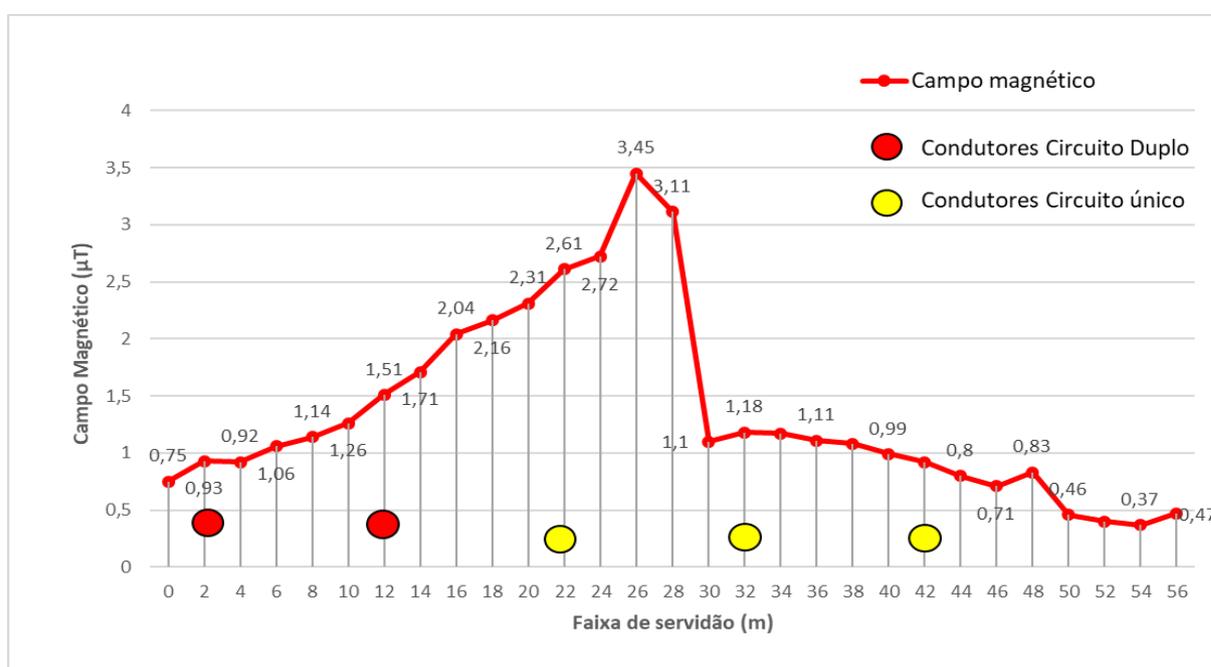
Percebe-se também que os valores permanecem decaindo ao ultrapassarem os condutores mais periféricos, bem como para a disposição de circuito simples horizontal, os valores de \vec{E} formam uma vala em torno do condutor central, enquanto para o circuito duplo vertical, no meio da torre, os valores crescem, devido a influência do campo elétrico gerado pelo circuito único que se aproxima nesta direção.

E por último, a Figura 83 demonstra o comportamento do campo magnético em P4, no qual verifica-se que, ao contrário dos demais, os valores de campo magnético são mais baixos próximo ao condutor central e periférico da LT3.

Tal ocorrência se deu, devido à proximidade da torre 2 que transporta a LT3 com uma forte zona de vegetação, que atenuaram a intensidade de \vec{B} .

Dessa forma, o valor de máximo obtido neste perfil foi de 3,45 μT em 6 m à esquerda do condutor central da LT3, limite este de zona de influência da vegetação.

Figura 83 - Perfil Lateral de Campo Magnético (P4)



Fonte: Autoria própria (2019).

6.1.5 Mapas de contorno

Com o georreferenciamento dos 74 pontos amostrais, por intermédio do dispositivo GPS 78s da Garmín, os perfis laterais obtidos podem gerar mapas geoespaciais, que descrevem tanto a trajetória lateral dos campos elétrico e magnético ao redor das LTs, quanto seu comportamento na direção longitudinal, que é também uma das exigências da IEEE *std* 644/1994.

Como descrito na secção 5.4, para obtenção dos mapas de distribuição espacial, vários métodos de interpolação podem ser aplicados e a através da técnica de validação cruzada, que

dispõe parâmetros estatísticos que espelham a correlação espacial entre os dados, se obter o que melhor se adequa aos dados amostrais.

Neste contexto, a Tabela 27 apresenta os resultados da validação cruzada, por meio dos parâmetros RMSE e MAE, encontrado para cada método do capítulo 4, através do uso do *Golden Surfer* v.13. Na qual, percebe-se, que para Krigagem Ordinária (KO), diversos tipos de semivariograma foram testados, na busca por uma melhor interpolação, são eles: o linear (KG-L), o gaussiano (KG-G), o esférico (KG-Es), o exponencial (KG-Ex), o cúbico (KG-C), razão quadrática (KG-RQ) e o de potência (KG-P).

Tabela 27 - Resultados validação cruzada do ambiente eletromagnético I

Método	Campo Elétrico		Campo Magnético	
	RMSE (V/m)	MAE (V/m)	RMSE (μ T)	MAE (μ T)
IDP	128,1783	4,2292	0,5762	0,0116
MSM	118,3524	-4,7319	0,5839	-0,0027
VN	128,1763	-10,3748	0,6833	-0,0129
VP	171,9176	10,8339	0,6161	-0,0109
TLI	126,2253	-15,9605	0,6508	-0,0224
CM	119,9011	-4,6561	0,6038	-0,025
KO-L	112,4205	0,01776	0,6077	0,0044
KO-G	124,2232	0,6673	0,5653	0,026
KO-Es	115,6875	1,5446	0,5619	0,0036
KO-Ex	113,6152	1,2134	0,6061	0,0058
KO-C	116,4183	0,8171	0,5606	0,0035
KO-RQ	205,6543	4,9563	0,5726	0,003
KO-P	128,3374	1,6947	0,5736	0,0050

Fonte: Autoria própria (2019).

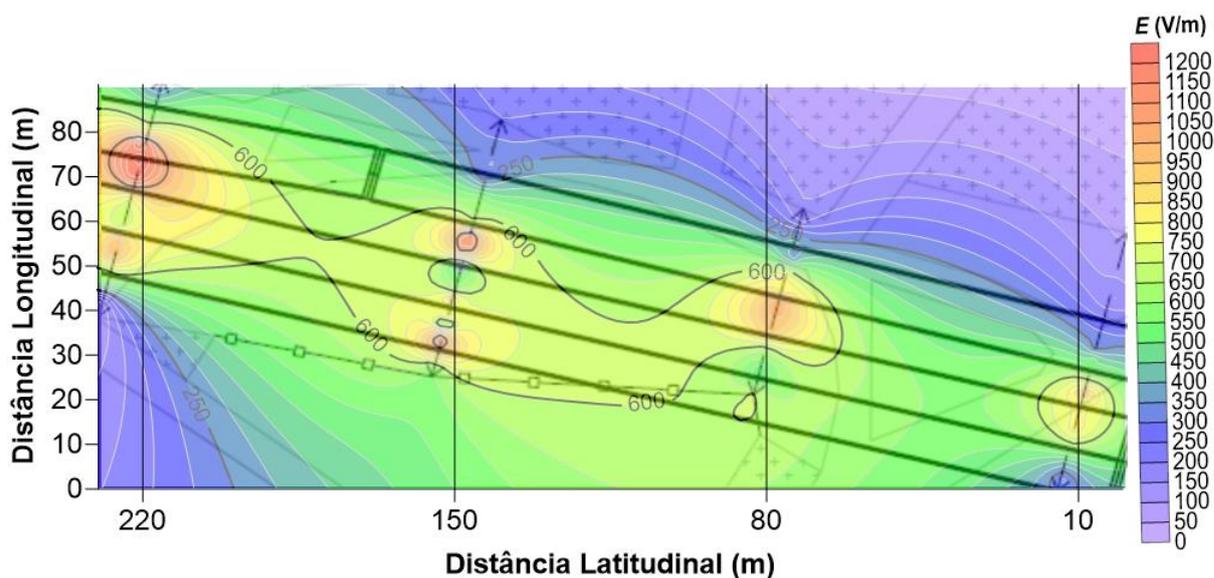
Tendo em vista que o parâmetro RMSE, que traduz a variância dos dados, isto é, quanto os valores estimados se aproximam dos valores medidos, quanto menor seu valor, mais próximo é esta correlação, enquanto o MAE indica se há tendência ou não entre as amostras, de maneira que quanto mais próximo de zero melhor é seu resultado. Entende-se, portanto, que em termos

de campo elétrico o método de Krigagem acoplado ao semivariograma linear foi o que melhor se adequou ao comportamento dos dados amostrais apresentando um MAE de 0,01776 V/m e o menor RMSE de 112,4205 V/m. Enquanto, para o campo magnético, o menor valor de RMSE foi de 0,5606 μT para o método de Krigagem Ordinária para o semivariograma cúbico e o MAE mais próximo de zero foi de -0,0027 μT para o Método de Shepard Modificado (MSM). Todavia, a melhor relação entre RMSE e MAE foi constatada através da KO-C.

A Figura 84 apresenta o mapa de distribuição espacial de campo elétrico \vec{E} em V/m, ao redor das LTs, através da interpolação por krigagem ordinária, na qual observa-se que os valores máximos, em torno de 1200 V/m, representados na coloração vermelha, se encontram nas regiões entre os condutores verticais da LT2 e o primeiro condutor horizontal da LT3.

O decaimento após os condutores periféricos também está caracterizado no mapa de contorno de maneira satisfatória. Entretanto, verifica-se que este interpolador é capaz de gerar mais curvas de níveis apenas em pontos mais próximos aos perfis traçados, isto quer dizer, que apenas próximo aos pontos amostrados, o método foi capaz de estimar pontos mais elevados, e, conseqüentemente, nas áreas intermediárias dos perfis, há menos variações de campo elétrico, resultando em uma curva máxima de 600 V/m, bem distante dos 1200 V/m de pico.

Figura 84 - Mapa de contorno de campo elétrico



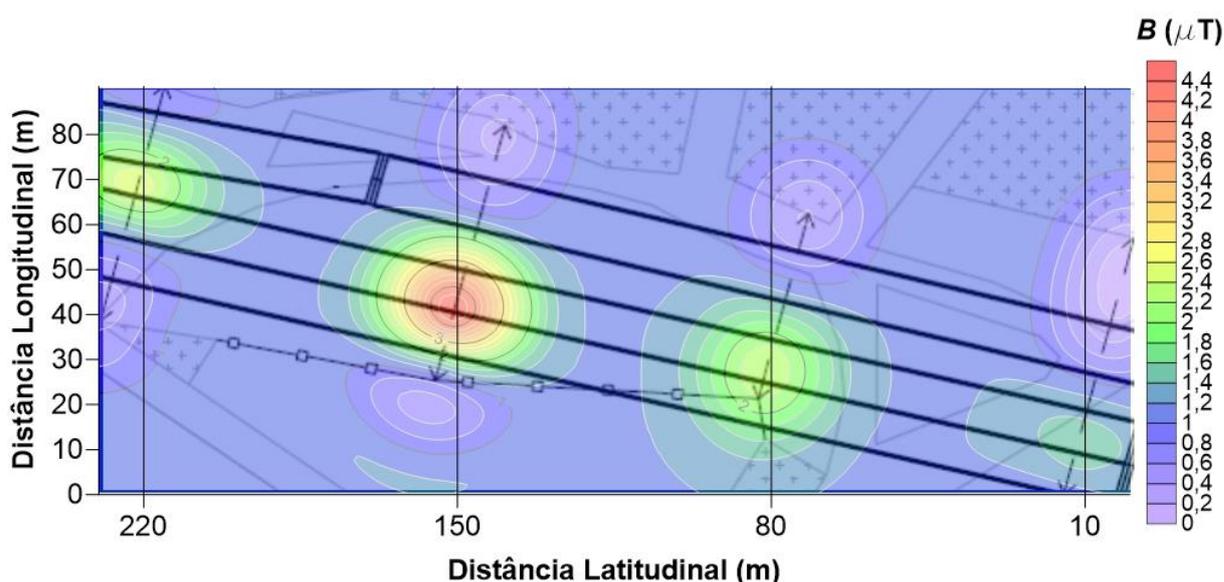
Fonte: Autoria própria (2019).

De maneira análoga, a Figura 85 apresenta o mapa de distribuição espacial de campo elétrico \vec{B} em μT , ao redor das LTs, através da interpolação por Krigagem Ordinária, na qual observa-se que os valores máximos, segundo este interpolador é de 4,4 μT , representados na

coloração vermelha, isto quer dizer, que o valor $7,92 \mu\text{T}$ obtido no perfil 3 foi uma incongruência no momento da medição.

Ademais, esta interpolação ilustra que os maiores valores de campo magnético são obtidos ao redor do condutor central da LT3, que como já discorrido, apesar de estar menos carregada, estar a uma distância menor do solo. Entretanto, apresenta o mesmo diagnóstico problemático do campo elétrico \vec{E} , para as zonas entre perfis.

Figura 85 - Mapa de contorno de campo magnético



Fonte: Autoria própria (2019).

Todavia, fica caracterizado nos mapas de contorno, que tanto na direção latitudinal, quanto na longitudinal, os valores de \vec{E} e \vec{B} , tendem a diminuir em torno de um ponto máximo, se comportando como isolinhas circulares, no formato de gradientes de tensão e corrente.

6.1.6 Análise quanto a exposição humana

Ambas as populações ocupacionais e público em geral, são sujeitas a valores máximos de campo elétrico e magnético de 1270 V/m e $4,4 \mu\text{T}$. Entretanto, na maior parte deste ambiente os níveis de campo elétrico e magnético são reduzidos para os valores médios de 528 V/m e $1,41 \mu\text{T}$.

A Tabela 28 apresenta uma comparação entre os níveis estabelecidos pela diretriz da ICNIRP, vigente no Brasil, com os valores de \vec{E} e \vec{B} diagnosticados ao redor das LTs pelos métodos de interpolação e medições, para cada uma das populações.

Tabela 28 - Comparação dos níveis de referência e as magnitudes de \vec{E} e \vec{B} no ambiente I

		Medido		ICNIRP	Porcentagem (%)	
		Valor máximo	Valor médio	Nível máximo	Valor máximo	Valor médio
Campo Elétrico (V/m)	População não-ocupacional	1270	528	4170	30,45%	12,66%
	População ocupacional	1270	528	8330	15,25%	6,34%
Campo Magnético (μT)	População não-ocupacional	4,4	1,41	200	2,2%	0,71%
	População ocupacional	4,4	1,41	1000	0,44%	0,14%

Fonte: Autoria própria (2019).

Conclui-se a população em geral está submetida a campos elétricos que equivalem 30,45% em seu ápice e a 12,66% na maior parte da região, do limite estabelecido pelas normas vigentes no país. Enquanto a população ocupacional apresenta uma exposição ainda menor de 15,25% e 6,34% dos limites considerados seguros para o ser humano.

Já para campo magnético, em termos de população geral, as magnitudes encontradas atingem 2,2%, do limite estabelecido, em seu ponto máximo, e, 0,71%, na maior parte deste ambiente. A população ocupacional, está ainda mais protegida, uma vez, que os valores de \vec{B} equivalem apenas a 0,44% e 0,14%, nos seus pontos máximo e médio, respectivamente.

Dessa forma, constata-se que os níveis de \vec{E} e \vec{B} para o ambiente eletromagnético I ao redor das LTs estão abaixo do estabelecido na ICNIRP, diretriz, cujo órgãos nacionais seguem suas orientações. Indicando assim, que tanto a população ocupacional quanto o público em geral estão submetidos a níveis seguros nesta região.

6.2 Ambiente Eletromagnético II: Pátio da SE

O pátio da SE é o local onde são instalados os equipamentos de manobra, proteção e transformação da SE, que serão caracterizados em termos de campo elétrico e campo magnético, com base nos 741 pontos amostrais subdivididos e alocados nas áreas de 1 a 10, conforme descrito na secção 5.1.2.

De posse dos dados georreferenciamento e de maneira similar ao ambiente I, a Tabela 29, apresenta os resultados da validação cruzada, considerando diversos interpoladores, para o ambiente eletromagnético II, isto é, o pátio da SE.

Tabela 29 - Resultados validação cruzada do ambiente eletromagnético II

Método	Campo Elétrico		Campo Magnético	
	RMSE (V/m)	MAE (V/m)	RMSE (μ T)	MAE (μ T)
IDP	406,6809	-1,2138	2,1834	0,1054
CM	381,7896	0,4291	1,7218	0,00028
MSM	404,1507	14,9529	2,2583	0,1941
VN	360,7801	-11,9486	1,5851	-0,01651
VP	485,265	3,7083	2,1551	-0,0107
TLI	376,6288	-6,764	1,675	-0,0235
KO-L	357,3292	-0,6681	1,6687	0,0072
KO-G	366,2395	2,5901	2,0764	0,0133
KO-Es	369,4377	0,8416	1,6677	0,009
KO-Ex	355,2718	0,4437	1,715	0,0255
KO-C	362,8564	2,7718	1,6049	4,4086
KO-RQ	369,655	1,2557	1,6168	0,0057
KO-P	391,1157	-0,135	2,5431	-0,0505

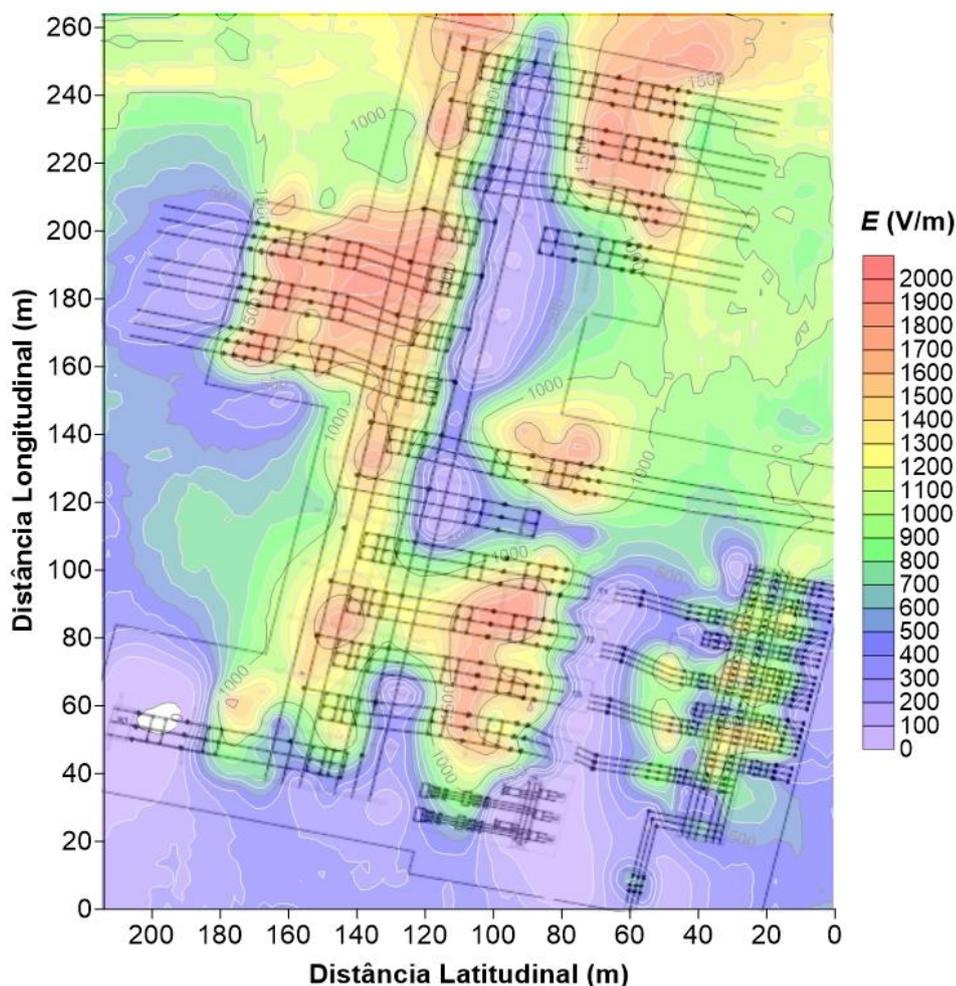
Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se que para campo elétrico o método de krigagem com semivariograma exponencial, se destacou em termos de RMSE com 355,2718 V/m e apresentou um MAE de 0,4437 V/m, consagrando-se como resultado mais satisfatório. Já para campo magnético, a interpolação por vizinho natural (VN) apresentou um RMSE de 1,5851 μ T e um MAE de -0,01651 μ T, sendo escolhido como método mais adequado.

6.2.1 Campo Elétrico

A Figura 86 apresenta o mapa de contorno de campo elétrico em V/m, confeccionado a partir do método de Krigagem com semivariograma exponencial.

Figura 86 - Mapa de contorno de campo elétrico



Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se que os valores máximos de campo elétrico, coloração vermelha e amarela, cuja magnitude são cerca de 1300 a 2000 V/m, são obtidos em torno das áreas de maior tensão, isto é, em 230 kV.

Nas áreas A1 e A3 são observados máximos em torno dos TCs, disjuntores e chaves, com exceção do circuito L7, que se encontrava desativado e, portanto, não apresentava tensões nos polos dos condutores, com ênfase em aproximadamente 2000 V/m ao redor dos disjuntores e chaves do circuito L5.

Valores mais altos também são vistos em torno da barra principal (B1) do barramento em 230 kV, que decaem para níveis abaixo de 400 V/m quando os pontos são próximos a barra de transferência (B2), que no momento da medição, não estava sendo utilizada.

Em A4, valores de 1800 V/m a 100 V/m são observados no lado dos circuitos em 230 kV dos transformadores, atenuando quando se aproxima destes, principalmente, quando caminham para o lado de 69 kV.

Já A5, a área do reator de 22,14 MVar (R1), apesar de ter sua operação em 230 kV, no momento da medição não estava em funcionamento, e com exceção dos equipamentos que se aproximam do barramento em 230 kV, sofrendo influência do campo \vec{E} gerado por este, a maior parte da região encontra-se em níveis de 2 a 200 V/m.

Em seguida, merece destaque as áreas em 69 kV, que apresentam um valor máximo de 1400 V/m abaixo do barramento de A9. Observa-se que apesar da alta na redução de tensão, os valores de campo elétrico não são muito abaixo do que encontrado nas áreas de 230 kV, essa compensação ocorre, devido à redução de altura dos equipamentos, que foram de 3,8 m de altura de topo para 1,9 m.

Em A10, os valores máximos são entre chaves e disjuntores, à medida que se aproximam de A9, enquanto em A8, os valores máximos são dados na forma de isolinhas circulares próximas aos TCs e chaves, com grande redução de valor ao se aproximar do transformador de aterramento (T8).

Para a área A7, do consumidor particular, o circuito T7 em 69 kV, apresenta valores mais altos em torno de 800 V/m.

Já para a área A6 em 13,8 kV valores de 1000 V/m são obtidos, devido a influência dos circuitos em 230 kV próximos, sendo boa parte da área coberta por um nível de \vec{E} menor que 400 V/m.

6.2.2 Campo Magnético

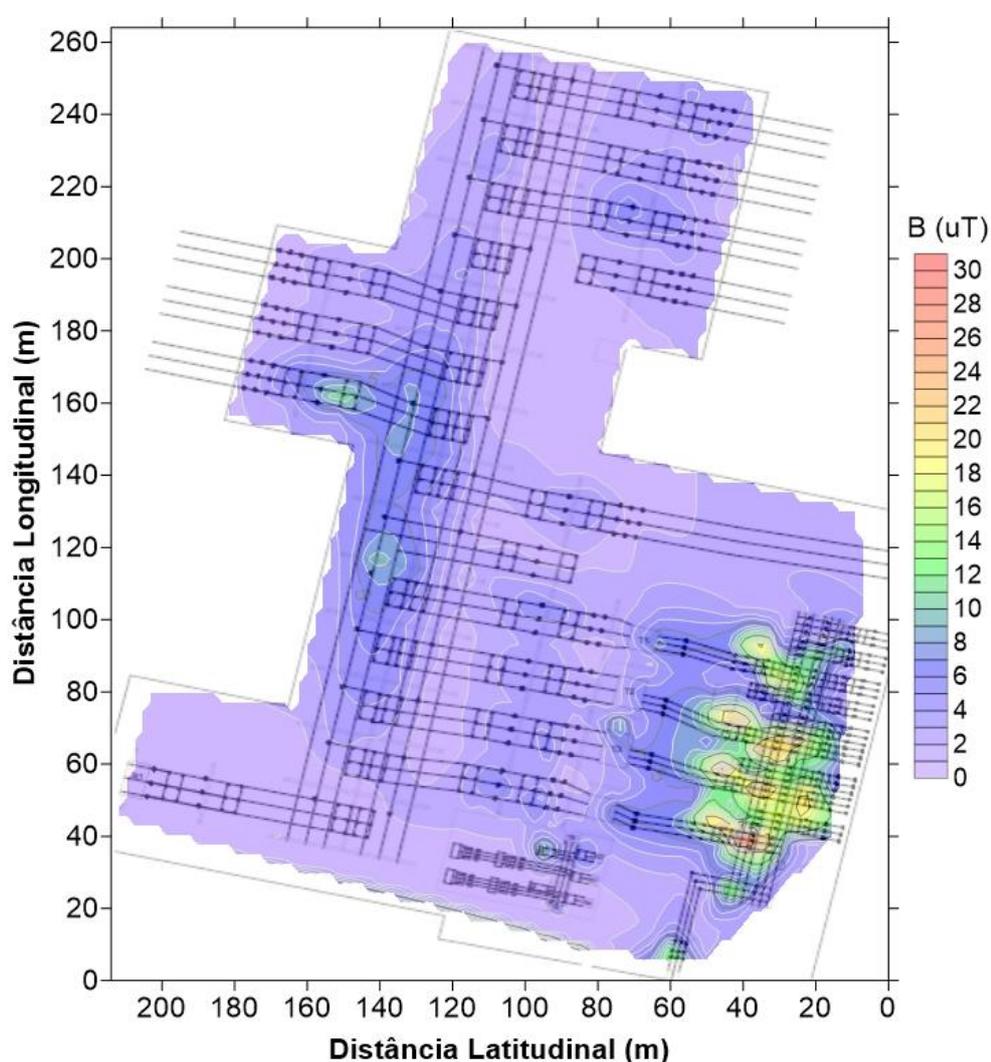
Em termos de campo magnético, a Figura 87 apresenta o mapa de distribuição espacial desta grandeza sobre o pátio da SE, obtido a partir da interpolação por vizinho natural (VN), na qual observa-se que esta interpolação atua apenas no interior dos triângulos de Delaunay e, portanto, apresenta valores restritos a área do pátio, pela grade de medição, isto é, não apresenta valores extrapolados além da cerca do pátio, como no caso do método da Krigagem.

Na secção 5.1 é possível perceber que os valores de corrente são mais elevados para as tensões em 69 kV e 13,8 kV, com exceção do circuito de alimentação L3 em 230 kV que apresenta a maior média de todo o pátio, no valor de 417,2 A.

Entretanto, na área de circuitos auxiliares em 13,8 kV, (A6), apenas os transformados T5 e o reator R2 estavam a conduzir correntes e, portanto, apenas em torno destes equipamentos valores de $14 \mu\text{T}$ são atingidos, decaindo para valores menores do que $4 \mu\text{T}$.

Dessa forma, na Figura 87, os valores máximos de campo magnético \vec{B} são, predominantes, em torno das áreas A8, A9 e A10 em 69 kV, com valores de cerca de $30 \mu\text{T}$ a $16 \mu\text{T}$, representado nas colorações vermelha, amarela e verde e pequenos picos de $16 \mu\text{T}$ junto aos equipamentos de A7 e ao disjuntor do circuito L3 na área A1.

Figura 87 - Mapa de contorno de campo magnético



Fonte: Autoria própria (2019).

Tendo em vista a área A8, no circuito advindo do secundário do transformador T4, que corresponde ao ponto de máxima condução de corrente em 69 kV, no valor de 360,8 A para o condutor central (T4-B), ao mesmo tempo que se configura como o segundo circuito mais

carregado do pátio, conduzindo correntes menores apenas do que o circuito L3, observa-se o pico máximo de campo magnético de $30 \mu\text{T}$. Isto ocorre, porque, assim como no caso de campo elétrico, a distância dos equipamentos e condutores em 69 kV em relação ao ponto de medição e ao solo é menor do que para os circuitos de 230 kV, e, portanto, a intensidade de campo magnético tende a ser maior nos circuitos em 69 kV do que nos de 230 kV, mesmo que este último apresente correntes maiores do que o outro.

Para as áreas em 230 kV, em A5, como o reator não apresentava nem tensões e nem correntes em seus polos, os valores de \vec{B} são, predominantemente, de $2 \mu\text{T}$. Enquanto em A3 e na maior parte de A1, as maiores magnitudes não ultrapassam $8 \mu\text{T}$ e são obtidas junto aos disjuntores e chaves.

Ademais, na zona A2 dos barramentos de 230 kV valores entre $12 \mu\text{T}$ e $4 \mu\text{T}$ são observados, com ênfase na barra principal (B1), única barra energizada, durante a operação, na zona próxima ao circuito LT3 de A1.

6.2.3 Análise quanto a exposição humana

Os valores máximos, mínimos e médios de \vec{E} e \vec{B} são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Valores máximos, mínimos e médios de \vec{E} e \vec{B} , obtidos nas medições da SE

	Máximo	Mínimo	Médio
Campo Elétrico (V/m)	1996	2	797
Campo Magnético (μT)	30	0,02	3,56

Fonte: Autoria própria (2019).

Enquanto, a Tabela 31, faz o comparativo entre os valores de grandezas encontradas e os níveis de referência da ICNIRP, para os dois tipos de população.

No interior da SE, como relatado, apenas pessoas previamente permitidas podem adentrar e circular no ambiente, restringindo o público geral ao contato com os equipamentos. Diante disso, a população mais afetada é, hegemonicamente, a população ocupacional.

Pela Tabela 31, a população ocupacional está submetida a 23,96% e 3% do limite estabelecido como seguro pela ICNIRP, nos pontos de máximo campo elétrico \vec{E} e campo magnético \vec{B} , respectivamente, ou seja, nas áreas em 69 kV e 9,56% e 0,36% na maior parte do pátio, também para campo elétrico \vec{E} e campo magnético \vec{B} , nesta ordem.

Tabela 31 - Comparação dos níveis de referência e as magnitudes de \vec{E} e \vec{B} no ambiente II

		Medido		ICNIRP	Porcentagem (%)	
		Valor máximo	Valor médio	Nível máximo	Valor máximo	Valor médio
Campo Elétrico (V/m)	População não-ocupacional	1996	797	4170	47,86%	19,11%
	População ocupacional	1996	797	8330	23,96%	9,56%
Campo Magnético (μT)	População não-ocupacional	30	3,56	200	15%	1,78%
	População ocupacional	30	3,56	1000	3%	0,36%

Fonte: Autoria própria (2019).

Em termos deste trabalho, vale salientar, que os valores de \vec{E} e \vec{B} assumem valores equivalentes a 47,86% e 15% do limite para público em geral, nos pontos máximos, e de 19,11% e 1,78% para pontos médios.

Dessa forma, a população ocupacional que exerce suas atividades no pátio da SE está submetida a valores abaixo dos limites de segurança da ICNIRP, não ultrapassando sequer os níveis de referência para a população não-ocupacional. Portanto, os trabalhadores desta SE estão seguros em termos de exposição a campos elétrico e magnéticos.

7 CONCLUSÕES

Ao longo dos anos, entidades governamentais e a comunidade científica em geral, desenvolveram normas e diretrizes que estabelecem níveis máximos aceitáveis de exposição à campos eletromagnéticos, com base em estudos e pesquisas desenvolvidos em várias partes do mundo, tendo em vista a crescente preocupação global com os possíveis riscos à saúde que esta exposição pode causar ao corpo humano, devido ao formato de interação dos CEM, que em função de sua frequência, uma quantidade de energia na forma de tensão superficial ou corrente é capaz de induzir em organismos vivos.

Entre estes estudos, há pesquisas com viés epidemiológico, laboratoriais, que passam pela aferição de níveis de exposição sob uma região delimitada, na tentativa de aumentar o acervo de pesquisas na área e garantir que os indivíduos que transitam por esta região, estejam protegidos contra danos à saúde e efeitos biológicos, oriundos da interação desses campos com o seu organismo.

No Brasil, a determinação dos níveis de radiação dos campos eletromagnéticos gerados por componentes elétricos em ELF, isto é, aqueles presentes em subestações de energia e em linhas de transmissão é obrigatoriedade de toda empresa de energia durante a construção e operação dessas. Já a fiscalização, fica a cargo dos órgãos reguladores federais, como a ANEEL, de modo, que se assegure o atendimento aos níveis estabelecidos internacionalmente pela diretriz de maior reconhecimento mundial, a ICNIRP.

Os níveis de referências da ICNIRP estabelecem que 4170 V/m e 200 μ T sejam os valores máximos à qual estejam submetidas a população comum que circulem em torno de componentes elétrico em 60 Hz, como linhas de transmissão e subestações de energia. Enquanto, que a população ocupacional, cuja atividades profissionais são relativas a estes empreendimentos elétricos, pode ser submetida a valores máximos de 8330 V/m e 1000 μ T, para campo elétrico e magnético, nesta ordem.

Diante disso, por meio de medições *in loco* e técnicas computacionais numéricas de interpolação, observou-se que na região delimitada pela LT em 230 kV, tanto para campo elétrico com campo magnético, a técnica de interpolação que apresentou melhor precisão nos dados foi a de Krigagem Ordinária, obtendo um valor máximo de campo elétrico de 1270 V/m, valores estes 69,55% abaixo do limite para público em geral e 84,75% abaixo para público ocupacional e de 4,4 μ T para o campo magnético, que corresponde a 2,2% e 0,44% dos limites para público comum e ocupacional, respectivamente.

Para o ambiente eletromagnético II, composto pelo pátio da SE, para campo elétrico, a interpolação por Krigagem também apresentou o resultado mais satisfatório, enquanto para campo magnético a interpolação por vizinho natural foi a selecionada.

Esta região tem entrada restrita a funcionários, que compõem a população ocupacional e apresenta valores máximos de campo elétrico nas regiões de maior tensão, com pico de 1996 V/m na zona dos disjuntores de A3, enquanto isso, apresenta um pico de 30 μ T para campo magnético, obtida junto ao circuito mais carregado em 69 kV, com correntes de até 360,8 A no condutor central.

Isto posto, os níveis de campo elétrico e magnético determinados nas proximidades dos equipamentos do pátio, equivalem a 23,96% e 3% do limite de exposição ocupacional, respectivamente, ao mesmo tempo que atinge apenas 47,86% e 15% dos limites para público em geral, mesmo que este seja impedido de circular em torno do pátio.

Os resultados obtidos no *software Golden Surfer*®, para ambos os ambientes, por sua vez, demonstram que há uma tendência dos CEM a formarem curvas de gradiente em torno das fontes, isto se deve ao fato que ambos os campos diminuem em todas as direções com o distanciamento. Outro fato observado é que a adição de fontes, em situações muito próximas, para um mesmo ambiente, sejam torres e linhas de transmissão em paralelo ou componentes elétricos diversos, como no caso do pátio da SE, eleva os valores de campo elétrico e campo magnético, pois há zonas em que a contribuição de cada circuito influencia as demais, numa espécie de superposição da contribuição das fontes.

Ainda assim, os valores obtidos para ambos os ambientes eletromagnéticos não atingem nem mesmo 50% do valor limite estabelecido pela ICNIRP para todo tipo de população e indivíduo.

Dessa maneira, conclui-se que para a região densamente povoada do ambiente eletromagnético I, composto pelas LTs em 230 kV e do ambiente eletromagnético II, formado pelos equipamentos do pátio da SE, tanto o público em geral, quanto os trabalhadores da área elétrica têm seu direito à saúde e meio ambiente assegurado, estando livres de possíveis danos biológicos advindos da interação dos campos eletromagnéticos gerados por estas fontes em 60 Hz com seu organismo, no entendimento das normas e estudos atuais.

7.1 Trabalhos Futuros

No escopo deste trabalho algumas recomendações podem ser realizadas visando trabalhos futuros, entre elas estão:

- Averiguar os níveis de campo elétrico e magnético em diferentes alturas, uma vez que, nem sempre a população ocupacional encontra-se com o tronco a 1,5m do solo;
- Para o caso da LT, traçar novos perfis laterais, visando obter um melhor comportamento nas zonas intermediárias dos perfis de 1 a 4;
- Observar o comportamento das interpolações ao aumentar as dimensões da grade de amostragem, buscando determinar uma amostragem mínima em que os interpoladores mantenham os resultados satisfatórios, diminuindo assim o número de amostras e, conseqüentemente, o tempo de coleta e análise dos dados;
- Desenvolvimento de um simulador de campos eletromagnéticos validados a partir dos dados coletados neste trabalho.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

_____. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 67**: Estabelece critérios para a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, e dá outras providências. Brasília: Aneel, 2004.

_____. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 398**: 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. 8 p

_____. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 616**: Altera a Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010, que 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, na frequência de 60 Hz. Brasília: Aneel, 2014. 4 p

ALBURGUETTI, Livia Maria. **Influência dos campos elétricos e magnéticos no projeto eletromecânico de subestações de energia elétrica**. 2013. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

ALUBAR ALUMÍNIO. Catálogo técnico condutores elétricos de alumínio. 2015. Disponível em: <https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

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

_____. **ABNT NBR 25415**: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 e 60 Hz. 1 ed. Rio de Janeiro, Rj: ABNT, 2016. 55 p.

AZPURUA, M.; RAMOS, K. dos. A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. **Progress In Electromagnetics Research M**. Venezuela, p. 135-145. set. 2010

BAKSHI, U. A.; BAKSHI, A. V.. **Electromagnetic waves and transmission lines**. 2. ed. India: Technical Publications Pune, 2009. 193 p.

BALANIS, Constatine A.. **Advanced engineering electromagnetics**. 2. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2012. 1046 p.

BASTOS, João Pedro A.; SADOWSKI, Nelson. **Electromagnetic modeling by finite element methods**. Florianópolis: Marcel Dekker, 2003.

BECKER, William Domingos. **Estudo de técnicas para redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão de potência**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

BOBACH, Tom Axel. **Natural neighbor interpolation: critical assessment and new contributions**. 2008. 203 p. Dissertation (Doktor der Naturwissenschaften,) – Fachbereich Informatik, Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2008.

BRAKEN, T. D.. Field measurements and calculation of electrostatic effects of overhead transmission lines. **Ieee Transactions On Power Apparatus And Systems**, v.95, n.2, mar/abril 1976. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

BRASIL. Decreto de Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. **Diário Oficial da União:Brasília**, DF, 6 mai. 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia: 2027**. Brasília: MME/EPE, 2018. 2v. 345 p.

CAMARGO, E. C., FUCKS, S. D., CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: S. DRUCK et al (Org.). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2004.

CARUSO, C.; QUARTA, F.. Interpolation Methods Comparison. **Computers & Mathematics With Applications**. Great Britain, p. 109-126. set. 1998.

CIGRÉ. **Electric power transmission an the environment: fields, noise and interference**. Paris: Cigré, 2000. 64 p.

CLIMATEMPO. **Tempo agora em Mossoró**. 2019. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

COMPANHIA CELG DE PARTICIPAÇÕES. **ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA LTP-AA1.039/00: Especificação técnica para limitação do uso de faixa de linhas de subtransmissão e transmissão da CelgPar - 69 kV, 138 kV E 230 kV**. 1 ed. Goiânia: CelgPar, 2010. 21 p.

CONCEIÇÃO, Silvânia Ferreira. **Discussão sobre a obtenção de funções semivariograma a partir de distribuições de probabilidade**. 2013. 63 p. Dissertação (Mestrado em Estatística) – Departamento de Estatística, Instituto de Ciências Exatas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CRESSIE, Noel A. C.. **Statistics for spatial data**. United States Of America: John Wiley & Sons, 1991. 900 p. (Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics section).

DENO, D.W.. Transmission line fields. **Ieee Transactions On Power Apparatus And Systems**, [s.l.], v. 95, n. 5, p.1600-1611, set. 1976. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

DONCKER, Ph. de et al. **Electromagnetic Fields Estimation Using Spatial Statistics**. Electromagnetics, UK, v. 26, p.111-122, abr. 2006.

ELLITHY, Khaled; SHAFAI, Abdulaziz Al; ASSIRY, Fahad Al. Measurement of magnetic fields in an outdoor high voltage power substation. **41st North American Power Symposium**, [s.l.], p.1-6, out. 2009. IEEE.

ENEL. **ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NO. 264**: Cabo para-raios com fibra óptica OPGW. 1 ed. [s.i.]: Enel, 2018. 10 p.

ENGENHARIA E PLANEJAMENTO EM TRANSMISSÃO DE ENERGIA. **Faixas de Linhas de Transmissão de Energia**. [2012]. Disponível em: <<http://www.epte.com.br/faixa.html>>. Acesso em: 17 set. 2019.

FARAG, A.s. et al. Occupational exposure assessment for power frequency electromagnetic fields. **Electric Power Systems Research**. p. 151-175. abr. 1999

FIALHO, B. R. et al. Variographic analysis to evaluate the coverage area of a wireless system at 5.8 GHz band in a region of oil fields. **Electronics Letters**. v.50, n.11, p. 652-654. maio 2019.

FROTIN, Sergio O. (Org.). **Equipamentos de Alta tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília: Teixeira, 2013.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica**. 3. ed. Uberlândia: Edefu, 2015.

GARMIN INTERNATIONAL Inc. **Manual do Utilizador. Série GPSMAP®**. United States, 2013.

GARZON, Ruben D.. **High voltage circuit breakers: Design and applications**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2002. 473 p.

GOLDENSOFTWARE. **Surfer: Explore the depths of you data**. 2019. Disponível em: <<https://www.goldensoftware.com/products/surfer>>. Acesso em: 22 set. 2019.

GÓMEZ-EXPÓSITO, Antonio; CONEJO, Antonio J.; CAÑIZARES, Cláudio (Ed.). **Sistema de energia elétrica: análise e operação**. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.

GÖNEN, Turan. **Electric power distribution system engineering**. 2. ed. Sacramento: CRC Press, 2008. 834 p.

GRBIC, Maja et al. Levels of electric and magnetic fields inside 110/X kV substations. **Cired Open Access Proceedings Journal**. S, p. 747-751. out. 2017. Institution of Engineering and Technology (IET).

GRIFFITHS, David J. **Introduction to electrodynamics**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 580 p.

GRIGSBY, Leonard L. (Ed.). **Electric power generation, transmission, and distribution**. 3. ed. London: CRC Press, 2012. (The electric power engineering handbook).

GUMUS, K.; SEN, A. Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. **Geodetski vestnik**, v. 57, p. 1-3, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE std 644 - IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac power lines** New York: IEEE. 1994. 25 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE std C95.6 - IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0–3 khz.** New York: IEEE. 2002. 43 p.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (France). World Health Organization. **Non-ionizing radiation, Part 1, Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields.** Lyon: IARC Press, 2002. 429 p. (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans).

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (Germany). **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz).** Germany: Health Physics, 1998. 34 p.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (Germany). **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz).** Germany: Health Physics, 2010. 20 p.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBRA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** São Paulo: Blucher, 2005. 328 p.

KRAUS, John D.; CARVER, Keith R.. **Electromagnetics.** 2. ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973. 388 p.

KRIEG, Terry. **Substations:** Bangalore: 11th International Exhibition Of Electrical And Industrial Eletronics Industry - Elecrama, 2014. 80 slides, color.

KUSTER, Álvaro Claudino. **Avaliação de campo eletromagnético em regiões densamente povoadas.** 2011. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2011

LAFORREST, J. J. (Ed.). **Transmission line reference book: 345 kV and above.** 2. ed. Palo Alto: EPRI, 1982. 625 p.

LAM, N. S. Spatial Interpolation Methods: A Review, **The American Cartographer**, v.10, n. 2, p. 129-150

LI, Jin; HEAP, Andrew D.. **A review of spatial interpolation methods for environmental scientists.** Canberra: Geoscience Australia, 2008. 137 p.

LI, Naiyi; YANG, Xi; PENG, Zongren. Measurement of Electric Fields Around a 1000-kV UHV Substation. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.2356-2362, out. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

LIPP, Marilda Emmanuel Novaes (Org). **Exposição a campos eletromagnéticos e saúde: Um estudo brasileiro**. Campinas, Sp: Papirus, 2010.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

MARTINS, Alin do Amaral. **Mapeamento do campo elétrico de uma subestação usando a técnica dos elementos finitos**. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

MCDONALD, John D. (Ed.). **Electric power substations engineering**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. (The electric power engineering handbook).

MENDES, Pedro Gonzaga Paulino. **As linhas de alta tensão e a saúde pública**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

MITAS, L.; MITASOVA, H.. Spatial interpolation. In: LONGLEY, P. A. et al (Ed.). **Geographic Information Systems: Principles, techniques, management and applications**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2005. Cap. 34. p. 481-492

NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD (England). **ELF Electromagnetic fields and the risk of cancer**. Oxfordshire: NRPB, 2001. 179p. (Documents of the NRPB).

NEFF JUNIOR, Herbert P.. **Introductory electromagnetics**. Singapore: John Wiley & Sons, 1991. 414 p.

OLIVEIRA, Renato Vale de. **A influência exercida pelos tipos de cabos pararraios sobre a intensidade de corrente de curto-circuito e sua distribuição na rede elétrica**. 2017. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2017.

OLSEN, R.G.; WONG, P.S.K.. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 7, n. 4, p.2046-2055, 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

OKRAINSKAYA, I.s.; SIDOROV, A.i.; GLADYSHEV, S.p.. Electromagnetic environment under over head power transmission lines 110–500 kV. **International Symposium On Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation And Motion**, [s.l.], p.796-801, jun. 2012. IEEE.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **SUBMÓDULO 2.4: Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas**. 2 ed. Rio de Janeiro: ONS, 2011a. 12 p.

_____. **SUBMÓDULO 2.3: Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: ONS, 2011b. 18 p.

_____. **Extensão da Rede de Transmissão**. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

_____. (Brasil). **Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN: PAR Executivo 2019-2023**. Rio de Janeiro: ONS, 2018. 36 p.

PARK, S. W. et al. Discrete Sibson Interpolation. **Ieee Transactions On Visualization And Computer Graphics**. p. 243-253. abr. 2006.

PEREIRA, Arthur Melo. **Cálculo de campos elétricos e magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão**: uma abordagem analítica e numérica. 2017. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

POLK, C.. Biological effects of low-level low-frequency electric and magnetic fields. **Ieee Transactions On Education**, [s.l.], v. 34, n. 3, p.243-249, 1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

POZAR, David M.. **Microwave engineering**. 4. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2012. 732 p.

PURCAR, Marius et al. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv substations and investigation of the human exposure. **2016 International Conference On Applied And Theoretical Electricity (ICATE)**, România, p.1-5, out. 2016. IEEE.

QABAZARD, A. M.. Survey of Electromagnetic Field Radiation Associated with Power Transmission Lines in the State of Kuwait. **2007 International Conference On Electromagnetics In Advanced Applications**, [s.l.], p.795-797, set. 2007. IEEE.

RAO, S. **Electrical Substation Engineering & Practice: EHV-AC, HVDC & SF6 GIS**. 3. Ed. Delhi: Khanna Publishers, 1999.

RIGHETTO, Ana Julia. **Avaliação de modelos estatísticos multivariados**. 2012. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

RIPLEY, Brian D.. **Spatial Statistics**. United States Of America: John Wiley & Sons, 2004. 252 p.

RUFO, M. et al. Optimization and comparison of three spatial interpolation methods for electromagnetic levels in the AM band within an urban area. **Environmental Research**. p. 219-225. jan. 2018.

SAFIGIANNI, A.s.; TSOMPANIDOU, C.g.. Electric- and Magnetic-Field Measurements in an Outdoor Electric Power Substation. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.38-42, jan. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

SANTANA, T.a.a. et al. Comparison of spatial interpolation methods to determine exposure ratio to electric fields in urban environments. **Electronics Letters**. London, p. 1250-1252. ago. 2017.

SHORT, T. A. (Ed.). **Electric power distribution: Handbook**. Washington, D.C: CRC Press, 2004. (The electric power engineering series).

SHÜTTE, H. G. et al. **General guidelines for design of outdoor A.C. substations**. Paris: Cigré, 2000. 25 p.

SILVA, Antonio Samuel Alves da. **Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional**. 2015. 107 p. Tese (Doutorado em Biometria) – Programa de Pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, Hugo Manoel Oliveira da. **Linhas de transmissão de energia elétrica: estudo sobre compatibilidade eletromagnética**. 2012. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SILVA, Rogério Marcos da. **Método numérico-analítico generalizado para estimação do campo eletromagnético de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando a teoria dos elementos finitos**. 2010. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2010.

SILVEIRA, Cristina de Abreu. **Uma contribuição à avaliação de acoplamentos eletromagnéticos em subestações do sistema elétrico**. 2004. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SKVARENINA, Timothy L.; DEWITT, Willian E.. **Electric power and controls**. 2. ed. [new Jersey]: Pearson, 2004.

SOUZA, Claudenir Janderlino. **Determinação da largura de faixa de segurança de linhas de transmissão: um estudo paramétrico**. 2012. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

STEVENSON JUNIOR, William D.. **Elements of power system analysis**. London: McGraw-Hill Publishing Company, 1955. 370 p. (McGraw-Hill electrical and electronic engineering series).

STRATTON, Julius Adams. **Electromagnetic theory**. United States Of America: IEEE Press, 2007. 608 p.

TANAKA, K.; MIZUNO, Y.; NAITO, K.. Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields Near Power Facilities in Several Countries. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.1508-1513, jul. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

TENMARS ELECTRONICS. **Multi-field emf meter tm-190: User's Manual**. 2010.

ULABY, Fawwaz T.; RAVAIOLI, Umberto. **Fundamentals of applied electromagnetics**. 7. ed. Boston: Pearson, 2015. 503 p.

GRAAF, S.c. van Der. **Natural neighbour kriging**: and its potential for quality mapping and grid design. 2016. 118 p. (Master Of Science) – Delft University Of Technology, Delft, 2016.

VILELA, Letícia Colares. **Comparação entre as redes neurais artificiais e o método de interpolação krigagem aplicados à pesquisa agrônômica**. 2004. 124 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

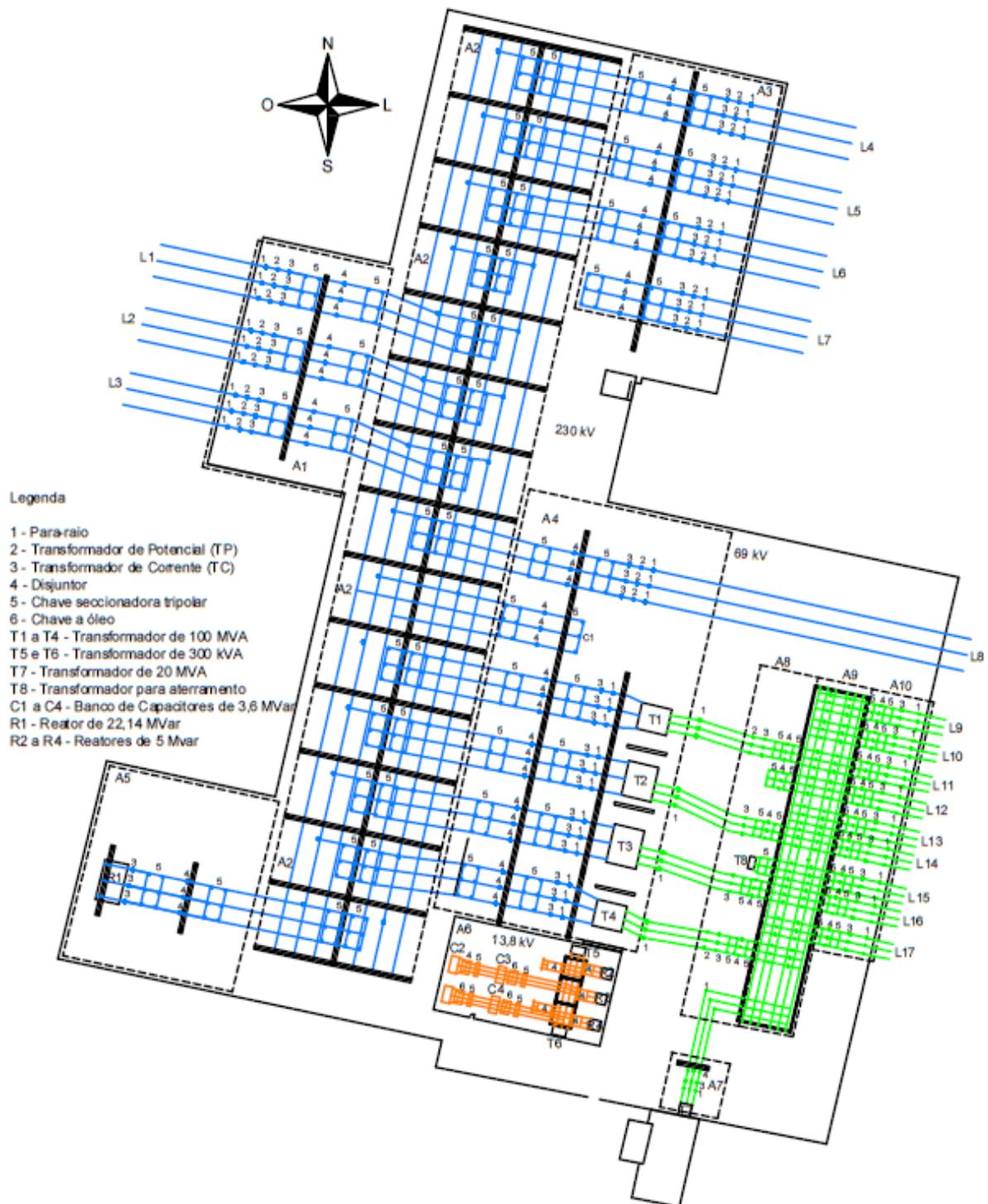
VUJEVIC, Slavko; LOVRIC, Dino; MODRIC, Tonci. 2D computation and measurement of electric and magnetic fields of overhead electric power lines. **Proceedings Of The Joint Inds'11 & Istet'11**, [s.l.], p.1-6, jul. 2011.

WERTHEIMER, Nancy; LEEPER, Ed. Electrical wiring configurations and childhood cancer. **American Journal of Epidemiology**, [s.l.], v. 109, n. 3, p. 273-284. 1979. Johns Hopkins University School of Hygiene and Public Health.

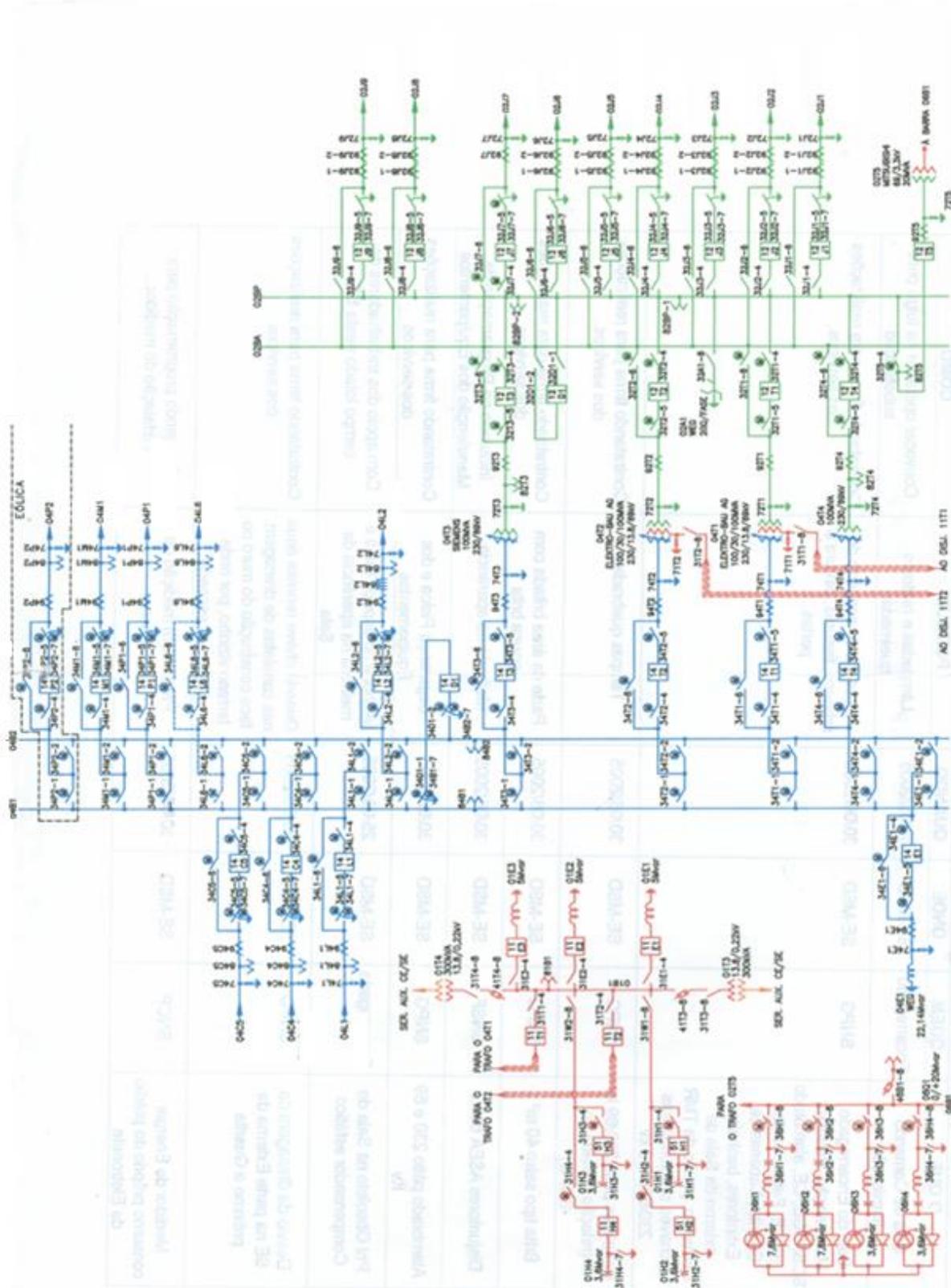
WORLD HEALTH ORGANIZATION (Switzerland). **Establishing a dialogue on risks from electromagnetic fields**. Geneva: WHO, 2002. 66 p.

XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; LIMA, J. S. de S.. Módulos em matlab para interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, p.67-76, 2010.

APÊNDICE A – PLANTA LAYOUT DO PÁTIO DA SUBESTAÇÃO



ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO



Fonte: Informação sigilosa (2019).