

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
ACOPLAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS EM
SUBESTAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO**

por

CRISTINA DE ABREU SILVEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, Dr.

Recife, Agosto de 2004.

© Cristina de Abreu Silveira, 2004



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
TESE DE DOUTORADO

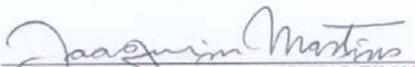
CRISTINA DE ABREU SILVEIRA

TÍTULO

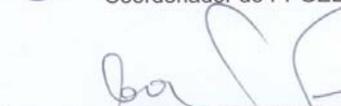
**“UMA CONTRIBUIÇÃO A AVALIAÇÃO DE ACOPLAMENTOS
ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES
DO SISTEMA ELÉTRICO”**

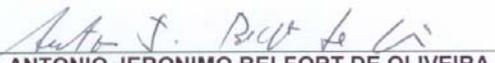
A comissão examinadora composta pelos professores: LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, DEESP/UFPE, ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA, DES/UFPE, FERNANDO MENEZES CAMPELLO DE SOUZA, DES/UFPE, ADROALDO RAIZER, DEE/UFSC e MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR DEE/UFCG, sob a presidência do prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, consideram a candidata **CRISTINA DE ABREU SILVEIRA APROVADA.**

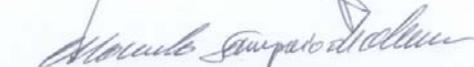
Recife, 30 de agosto de 2004.


JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Coordenador do PGEE


LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS
Orientador e Membro Titular Interno


ADROALDO RAIZER
Membro Titular Externo


ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA
Membro Titular Interno


MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR
Membro Titular Externo


FERNANDO MENEZES CAMPELLO DE SOUZA
Membro Titular Interno

DEDICATÓRIA

Toda Obra necessita de uma estrutura de sustentação que seja uma base sólida e bem plantada, que lhe mantenha firme frente aos bons ventos e às tempestades.

Assim também são os seres humanos em suas jornadas. É preciso ter uma base sólida, um lastro seguro, um abraço amigo e uma palavra de apoio, principalmente quando a estrutura é abalada pelo desânimo, pela descrença ou pela desesperança.

Toda boa base tem, pelo menos, três pilares de sustentação. Eu tenho quatro e é a estes quatro pilares da minha jornada que dedico este trabalho, reconhecendo neles, em cada parágrafo, a força e a presença.

- Aos meus pais, Anderley e Marylene, sempre tão amorosos e tão presentes na minha vida!
- A minha amadíssima tia-mãe Nayde, meu maior exemplo de força, coragem e alegria de viver!
- Ao meu querido mestre e amigo Caiuby, meu referencial do que é ser um Engenheiro ético, íntegro e competente!
- A Luciana, colega, amiga, mestra, parceira de todas as horas, testemunha atuante desta jornada, do dia a dia às exaustivas leituras e revisões deste Trabalho. A você, tão jovem e tão competente, que representa a minha Esperança na Engenharia.

A todos vocês, dedico a minha Gratidão, o meu Amor e este Trabalho.

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas a quem preciso agradecer o apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço a Deus, antes de tudo, por todos estes encontros e despedidas. Levo comigo o jeito pernambucano de ser na simplicidade de Dona Rita, do saudoso Sr. Davi, de Walter, Carmem, do “irmão” Laelson, dos professores, colegas e funcionários da UFPE, sempre tão atenciosos.

Inicialmente agradeço ao CEFET-BA a oportunidade de cumprir este programa de doutorado na UFPE e o apoio e incentivo recebido dos colegas e amigos em Salvador. Agradeço a CAPES e ao CNPq o suporte financeiro dado a esta pesquisa e a oportunidade de desenvolver parte dela na UFSC, sob a coordenação do Dr. Adroaldo Raizer. Agradeço às Empresas ELETROSUL, CELESC, CHESF e, particularmente, a CELPE, na pessoa do Eng. José Mário de Souza Melo.

Agradeço aos ilustres membros desta banca examinadora, pela disponibilidade e pelas contribuições apresentadas no intuito de aprimorar o conteúdo deste Trabalho, ao Prof. Luiz Henrique, pela orientação desta pesquisa, e a George Fonseca, pela eficiente parceria na execução das atividades de campo. Agradeço ainda ao Prof. Manoel Afonso, a possibilidade de desenvolver este trabalho nas dependências do LDSP, e a Valdete, por tornar o ambiente de trabalho sempre tão amigável e acolhedor.

Agradeço aos professores e amigos que se dispuseram a ler este manuscrito em alguma etapa de seu desenvolvimento, e, em particular, a Jayme Sarmiento, Alécio Fernandes, Caiuby Costa e Jony Silveira, por suas sugestões e contribuições. Agradeço ainda, nominalmente, a Ivanildo Ximenes, Rafael Daconti, Herivelto Bronzeado, Sônia Gomes, Dayse Duarte, Daniel Lira, Jefferson Oliveira, João Saad Jr, Felipe Nyland, Mauro Faccioni Filho e Heldemárcio.

Meus agradecimentos especiais ao Prof. Ronaldo Aquino, chefe do DEESP, por seu valioso suporte em momentos difíceis, e a Andréa Tenório, secretária do PPGEE, por ter sido sempre minha “Fada Madrinha” neste doutorado, amiga querida que levo na lembrança e no coração.

Minha eterna gratidão a André Leite e a Diogo, alunos do Prof. Fernando Campello, pelas análises estatísticas, a Magnata, pelo carinho e apoio de sempre, a André Cavalcanti, Roberto, Custódio, Milde e Alexandre, companheiros de jornada, a Richard, Geane, Zeca e Otoni, pela alegria e, principalmente, a Lu, pelas leituras, revisões, correções, discussões, finais de semana e noites debruçadas sobre esta Tese.

A todos vocês, meu sincero Muito Obrigado!

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE ACOPLAMENTOS
ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES DO SISTEMA
ELÉTRICO**

Cristina de Abreu Silveira

Agosto/2004

Orientador: Luiz Henrique Alves de Medeiros, Dr.

Área De Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-Chave: Compatibilidade Eletromagnética, Interferência Eletromagnética, Acoplamentos Eletromagnéticos, Medição de Campos Eletromagnéticos, Subestações.

Número de Páginas: xviii + 191.

RESUMO: O desempenho satisfatório das instalações de um sistema elétrico depende essencialmente da operação adequada de seus equipamentos, dos instrumentos responsáveis pela monitoração de sua operação e dos dispositivos de medição, proteção e controle. Esses dispositivos, tradicionalmente eletromecânicos, vêm sendo substituídos por dispositivos eletrônicos mais eficientes, embora sejam susceptíveis aos campos eletromagnéticos inerentes à operação do sistema elétrico. Estudos de campos eletromagnéticos em subestações vêm sendo desenvolvidos com o intuito de assegurar a compatibilidade eletromagnética (EMC) dos equipamentos eletrônicos sensíveis nas plantas sob condições transitórias, como manobras, ou diante de falhas ocorridas nos sistemas automatizados, que requerem uma investigação específica para o problema observado. Essas soluções costumam ter um custo elevado e são restritivas, muitas vezes, ao problema e à instalação analisada. Este trabalho busca avaliar os acoplamentos eletromagnéticos em subestações sob condição normal de operação por meio da medição dos campos elétricos e magnéticos. A partir deste procedimento é feito um mapeamento da distribuição dos campos elétricos e magnéticos na instalação, em função de seu arranjo físico, por meio do qual é possível verificar como o arranjo influencia o ambiente eletromagnético da subestação. Finalmente, é verificado como os sistemas digitais interagem com esse ambiente, visando minimizar a ocorrência de distúrbios. Esta metodologia de análise, aplicada às instalações do sistema elétrico, pode resultar na redução dos custos de implantação da EMC em subestações, e na conseqüente melhoria dos indicadores de desempenho do sistema.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

A CONTRIBUTION TO EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC COUPLINGS IN POWER SUBSTATIONS

Cristina de Abreu Silveira

August/2004

Supervisor: Luiz Henrique Alves de Medeiros, Dr.

Area of Concentration: Energy Processing.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference, Electromagnetic Couplings, Electromagnetic Fields Metering, Power Substations.

Number of Pages: xviii + 191.

ABSTRACT: The adequate performance of power system facilities depends essentially on the correct operation of its equipments, monitoring instruments and measurement, protection and control devices. These devices, traditionally electromechanical, have been substituted by more efficient electronic devices, although they are susceptible to the electromagnetic fields inherent to the operation of the electric system. Studies of electromagnetic fields in substations have been developed with the purpose of assuring the electromagnetic compatibility (EMC) of the sensitive electronic equipments in the plants under transient conditions, such as switching, or under fault at the automated systems, that require a specific investigation for the observed problem. These solutions have a high cost and are restrictive, most of the time, to the problem and the plant under analysis. This research presents a new evaluation method to identify electromagnetic couplings in substations under normal operation condition through the measurement of the electric and magnetic fields. Starting from this procedure it is possible to map the electric and magnetic fields distribution in the installation, as a function of its physical arrangement, through which it is possible to verify how the arrangement influences the electromagnetic environment of the substation. Finally, it is verified how the digital systems operate in such environment, seeking to minimize the occurrence of disturbances. This analysis methodology, applied to electric system facilities, can result in the reduction of costs of EMC deployment in substations, and the consequent improvement on the performance indicators of the system.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
-------------------------------	------------

LISTA DE FIGURAS	xiii
-------------------------------	-------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
-------------------------	----------

1.1. O PROBLEMA.....	1
----------------------	---

1.2. CONTRIBUIÇÃO.....	2
------------------------	---

1.3. ESTRUTURA GERAL DA TESE.....	3
-----------------------------------	---

CAPÍTULO 2

COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	6
---	----------

2.1. BREVE HISTÓRICO	6
----------------------------	---

2.2. APLICAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS	8
---	---

2.3. ESTUDOS DE EMC EM SUBESTAÇÕES.....	12
---	----

2.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
---------------------------------	----

2.5. ACOPLAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS.....	15
---	----

2.5.1. Acoplamento por Impedância Comum.....	17
--	----

2.5.2. Acoplamento Indutivo ou Magnético	18
--	----

2.5.3. Acoplamento Capacitivo ou Elétrico	20
---	----

2.5.4. Acoplamento Radiado ou Eletromagnético	21
---	----

2.6. NORMAS TÉCNICAS EM EMC	23
-----------------------------------	----

2.7. CONCLUSÕES.....	24
----------------------	----

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES	25
---	-----------

3.1. INTRODUÇÃO.....	25
----------------------	----

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS MEDIDORES DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS.....	25
--	----

3.2.1. O Medidor Unidirecional.....	26
-------------------------------------	----

3.2.2. O Medidor Isotrópico.....	27
----------------------------------	----

3.3. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MEDIDORES.....	29
---	----

3.3.1. Considerações Quanto às Medidas de Campo Magnético	32
3.3.2. Considerações Quanto às Medidas de Campo Elétrico	34
3.3.3. Conclusões	35
3.4. ASPECTOS QUE INTERFEREM NAS MEDIÇÕES	36
3.4.1. Características Físicas da Subestação	37
3.4.2. A Carga da Subestação	37
3.4.3. Instrumentos de Medição	39
3.4.4. Outros Fatores	40
3.5. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	41
3.5.1. Critérios de Medição	41
3.5.2. As Subestações Avaliadas	42
3.6. CONCLUSÕES	42

CAPÍTULO 4

MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS NA SUBESTAÇÃO ALFA 43

4.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO	43
4.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO	44
4.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	47
4.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO	48
4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.5.1. Equipamentos instalados na Entrada de Linha 138kV	52
4.5.2. Pára-Raios 138kV e Transformadores de Potência	53
4.5.3. Barramento e Saídas de Linha em 13,8kV	53
4.6. CONCLUSÕES	54

CAPÍTULO 5

MEDIÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DA SUBESTAÇÃO BETA.. 55

5.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO	55
5.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO	56
5.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	57
5.4. REPRESENTAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS	59
5.4.1. Representação Linear	59
5.4.2. Representação Tridimensional	60
5.4.3. Projeções	63

5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
5.5.1. Relação entre os Campos Eletromagnéticos e as Grandezas Elétricas medidas na Subestação.....	68
5.5.2. Representação Linear.....	73
5.5.3. Representação Tridimensional.....	75
5.5.4. Projeções.....	77
5.5.5. Cuidados com Relação aos Equipamentos Eletrônicos Sensíveis Instalados na SE Beta.....	78
5.6. CONCLUSÕES.....	80

CAPÍTULO 6

MAPEAMENTO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DA SUBESTAÇÃO GAMA	81
6.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO	81
6.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO.....	82
6.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	84
6.4. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS	84
6.4.1. Representação Linear.....	85
6.4.2. Representação Tridimensional.....	87
6.4.3. Projeções.....	89
6.4.4. Avaliando os Campos Eletromagnéticos por Setores.....	91
6.5. CONCLUSÕES.....	99

CAPÍTULO 7

UMA PROPOSTA PARA A AVALIAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES	100
7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	100
7.2. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS VALORES MEDIDOS	104
7.3. TÉCNICAS PARA A REDUÇÃO DOS EFEITOS DOS ACOPLAMENTOS.....	106
7.3.1. Acoplamento Indutivo	106
7.3.2. Acoplamento Capacitivo.....	107
7.3.3. Acoplamento Condutivo	108
7.3.4. Os Acoplamentos Eletromagnéticos em Instalações do Sistema Elétrico	109
7.4. METODOLOGIA PROPOSTA PARA A MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES	110
7.4.1. Procedimentos de Medição.....	110

7.4.2. Procedimentos de Análise.....	113
7.4.3. Diagnóstico da Instalação	115
7.4.4. Diagnóstico da SE Beta	116
7.5. CONCLUSÕES.....	119
CAPÍTULO 8	
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	120
8.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	120
8.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	121
8.3. RELEVÂNCIA DA PESQUISA	123
APÊNDICE A	
TERMINOLOGIA	124
APÊNDICE B	
TEORIA ELETROMAGNÉTICA	136
B.1. FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA	136
B.2. A INFLUÊNCIA DO MEIO	138
B.3. CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS	139
APÊNDICE C	
NORMAS TÉCNICAS.....	143
C.1. NORMAS IEC 61.000	143
C.2. NORMAS IEEE EM EMC E QUALIDADE DA ENERGIA.....	145
C.3. OUTRAS NORMAS EM EMC E QUALIDADE DA ENERGIA	147
APÊNDICE D	
CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS MEDIDOS NAS SUBESTAÇÕES.....	148
D.1. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS DURANTE A ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS MEDIDORES UNIDIRECIONAL E ISOTRÓPICO.....	148
D.2. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO ALFA.....	151
D.3. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO BETA.....	154
D.4. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO GAMA	157
D.5. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS EM NOVA SÉRIE DE MEDIÇÕES NA SUBESTAÇÃO BETA.....	162

APÊNDICE E

GRÁFICOS LINEARES – MEDIÇÕES NAS SUBESTAÇÕES BETA E GAMA .. 165

E.1. GRÁFICOS LINEARES PARA A SE BETA	165
E.2. GRÁFICOS LINEARES PARA A SE GAMA	171

APÊNDICE F

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO NA SE BETA 175

F.1. MEDIÇÕES ADICIONAIS REALIZADAS NA SE BETA	175
F.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES MEDIDOS	178
F.2.1. Análise de Correlação dos Perfis L_1 e L_2	179
F.3. CONCLUSÕES	183

APÊNDICE G

PUBLICAÇÕES 184

APÊNDICE H

BIOGRAFIA 185

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 186

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1: Dados gerais das medições de campo nas subestações Alfa, Beta e Gama....	101
Tabela 7.2: Dados das subestações Alfa, Beta e Gama.	101
Tabela 7.3: Matriz de Correlação das Medidas M1-M8 x M1-M8.	105
Tabela 7.4: Acoplamentos em Sistemas Elétricos.....	109
Tabela B.1: Símbolos e unidades de grandezas eletromagnéticas.....	136
Tabela C.1: Normas IEC 61.000.	143
Tabela C.2: Normas ANSI/IEEE em EMC e Qualidade da Energia.....	145
Tabela C.3: Outras Normas em EMC e Qualidade da Energia.	147
Tabela D.1: Valores de campo elétrico medidos pelo instrumento isotrópico.....	148
Tabela D.2: Valores de campo magnético medidos na direção x pelo HI-3604.	149
Tabela D.3: Valores de campo magnético medidos na direção y pelo HI-3604.	150
Tabela D.4: Campo elétrico medido pelo instrumento isotrópico EFA-300.....	151
Tabela D.5: Densidade de fluxo magnético medido pelo instrumento isotrópico EFA-300.	151
Tabela D.6: Valores de campo elétrico e magnético medidos e calculado na SE Alfa.....	152
Tabela D.7: Valores de densidade de fluxo magnético medidos na SE Beta nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 12; (c) 13 a 16, banco de capacitores e malha de terra; (d) 17 a 21.....	154
Tabela D.8: Valores de campo elétrico medidos na SE Beta nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 12; (c) 13 a 16, banco de capacitores e malha de terra; (d) 17 a 21.....	155
Tabela D.9: Valores de campo magnético medidos na SE Gama nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 13; (c) 14 a 20; (d) 21 a 27; (e) 28 a 33; (f) 34 a 38.....	157
Tabela D.10: Valores de campo elétrico medidos na SE Gama nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 13; (c) 14 a 20; (d) 21 a 27; (e) 28 a 33; (f) 34 a 38.....	159
Tabela D.11: Valores de campo elétrico medidos em pontos da malha de terra.....	162
Tabela D.12: Densidade de fluxo magnético na vizinhança do disjuntor 13,8kV.	162
Tabela D.13: Medidas de campo elétrico nos perfis L1 e L2.....	162
Tabela D.14: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L ₁	163
Tabela D.15: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L ₂	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Variação da densidade de fluxo magnético ao nível do solo com a distância horizontal considerando três fontes distintas. As faixas referem-se às variações de características individuais dos sistemas representados em cada grupo [20].	10
Figura 2.2: Variação da intensidade de campo elétrico ao nível do solo com a distância horizontal considerando três fontes distintas. As faixas referem-se às variações de características individuais dos sistemas representados em cada grupo [20].	10
Figura 2.3: Acoplamento entre fonte e receptor de sinais eletromagnéticos.	14
Figura 2.4: Modelo de circuito de acoplamento entre a fonte de distúrbio (Emissor) e o circuito vítima (Receptor).	16
Figura 2.5: Acoplamento por impedância comum.	17
Figura 2.6: Acoplamento indutivo.	19
Figura 2.7: (a) Acoplamento capacitivo; (b) Blindagem capacitiva.	21
Figura 2.8: Impedância de onda como função da distância e do tipo de fonte – regiões de campo próximo e campo distante (componentes radiais desprezadas).	22
Figura 3.1: Medidor HI-3604 da <i>Holaday Industries</i> .	26
Figura 3.2: Resposta em frequência típica do filtro do medidor HI-3604 para medição de: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	27
Figura 3.3: Medidor EFA-300 da <i>Narda Measurements</i> .	28
Figura 3.4: Respostas em frequência típicas dos filtros disponíveis no medidor EFA-300 para medição de campos elétrico e magnético: (a) Faixa-larga; (b) Passa-faixa; (c) Rejeita-faixa.	28
Figura 3.5: Corte transversal da subestação 230/138kV onde foram realizadas as medições de campos eletromagnéticos com os medidores unidirecional e isotrópico.	30
Figura 3.6: Croqui de referência para as medições.	30
Figura 3.7: Valores de densidade de fluxo magnético medidos com os instrumentos unidirecional e isotrópico.	31
Figura 3.8: Valores de campo elétrico medidos com os instrumentos unidirecional e isotrópico.	31
Figura 3.9: Horário das medições realizadas com o medidor EFA-300.	31
Figura 3.10: Componentes x e y da densidade de fluxo magnético medidas com os instrumentos unidirecional e isotrópico.	32
Figura 3.11: Densidade de fluxo magnético isotrópica: valores medido e calculado.	33
Figura 3.12: Campo elétrico: componentes y e valor isotrópico.	34

Figura 3.13: Campo elétrico isotrópico: valores medido e calculado.	35
Figura 3.14: Perfil diário de tensão em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.....	38
Figura 3.15: Perfil diário da corrente em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.....	38
Figura 3.16: Perfil diário da carga em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.	38
Figura 4.1: Diagrama unifilar simplificado da subestação Alfa.....	43
Figura 4.2: Croqui da SE Alfa.....	44
Figura 4.3: Perfil diário de tensão no setor 138kV da subestação Alfa.	45
Figura 4.4: Perfil diário da corrente no setor 138kV da subestação Alfa.....	45
Figura 4.5: Perfil de potência ativa (MW) e potência reativa (MVA _r) na subestação Alfa.	45
Figura 4.6: Curvas de tensão nos secundários dos transformadores T1 e T2.....	46
Figura 4.7: Curvas de corrente nos secundários dos transformadores T1 e T2.....	46
Figura 4.8: Curvas de corrente nos alimentadores em 13,8kV: LD-1 a LD-4.	46
Figura 4.9: Curvas de corrente nos alimentadores em 13,8kV: LD-5 a LD-8.	47
Figura 4.10: Eixos de Coordenadas x , y e z	48
Figura 4.11: Croqui de medição nas proximidades do pára-raios, dos TCs e das chaves seccionadoras do setor 138kV.	48
Figura 4.12: Croqui de medição no barramento 138kV.	49
Figura 4.13: Croqui de medição nas proximidades do pára-raios do lado primário (AT) dos transformadores: (a) T1; (b) T2.	49
Figura 4.14: Croqui de medição nas proximidades dos transformadores T1 e T2.....	49
Figura 4.15: Distribuição das saídas de linha em 13,8kV: LD-1 a LD-8 e bancos de capacitores BC1 e BC2.....	50
Figura 4.16: Valores de campo magnético medidos no setor 138kV da SE Alfa.	51
Figura 4.17: Valores de campo elétrico medidos no setor 138kV da SE Alfa.....	51
Figura 4.18: Valores de campo magnético medidos no setor 13,8kV da SE Alfa.	51
Figura 4.19: Valores de campo elétrico medidos no setor 13,8kV da SE Alfa.....	52
Figura 5.1: Diagrama unifilar simplificado da SE Beta.	55
Figura 5.2: Croqui da SE Beta.....	56
Figura 5.3: Perfil de tensão da subestação Beta, medido no 69kV.	56
Figura 5.4: Perfil de corrente da subestação Beta, medido no 69kV.....	57
Figura 5.5: Curva de carga da subestação Beta.	57
Figura 5.6: Croqui do Setor 69kV da SE Beta – Régua de Medição 1 a 15.....	58
Figura 5.7: Croqui do Setor 13,8kV da SE Beta – Régua de Medição 16 a 21.....	58
Figura 5.8: Distribuição da densidade de fluxo magnético sobre as régua de medição 12, 13 e 14.	60

Figura 5.9: Distribuição do campo elétrico sobre as régua de medição 12, 13 e 14.....	60
Figura 5.10: Distribuição da densidade de fluxo magnético no Setor 69kV da SE Beta. ...	60
Figura 5.11: Distribuição da densidade de fluxo magnético no Setor 13,8kV da SE Beta.	61
Figura 5.12: Distribuição da densidade de fluxo magnético no pátio 69/13,8kV da SE Beta.....	61
Figura 5.13: Distribuição do campo elétrico no setor 69kV da SE Beta.....	62
Figura 5.14: Distribuição do campo elétrico no setor 13,8kV da SE Beta.....	62
Figura 5.15: Distribuição do campo elétrico no pátio 69/13,8kV da SE Beta.	63
Figura 5.16: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o setor 69kV da SE Beta...	63
Figura 5.17: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o setor 13,8kV da SE Beta.....	64
Figura 5.18: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o pátio 69-13,8kV da SE Beta.....	64
Figura 5.19: Projeção da distribuição do campo elétrico no setor 69kV da SE Beta.....	65
Figura 5.20: Projeção da distribuição do campo elétrico no setor 13,8kV da SE Beta.	65
Figura 5.21: Projeção da distribuição do campo elétrico no pátio 69-13,8kV da SE Beta.	66
Figura 5.22: Curva de carga da SE Beta no horário das medições.....	67
Figura 5.23: Diagrama representativo dos pontos considerados na análise da relação entre a corrente e a densidade de fluxo magnético no setor 69kV, para as fases <i>a</i> e <i>c</i>	68
Figura 5.24: Corrente da fase <i>a</i> e densidade de fluxo magnético medida sob a fase <i>a</i>	69
Figura 5.25: Corrente da fase <i>a</i> e densidade de fluxo magnético medida sob a fase <i>a</i> , considerando a seqüência dos horários das medições.	69
Figura 5.26: Corrente da fase <i>c</i> e densidade de fluxo magnético medida sob a fase <i>c</i>	70
Figura 5.27: Corrente da fase <i>c</i> e densidade de fluxo magnético medida sob a fase <i>c</i> , considerando a seqüência dos horários das medições.	70
Figura 5.28: Tensão da fase <i>a</i> e campo elétrico medido sob a fase <i>a</i>	71
Figura 5.29: Tensão da fase <i>a</i> e campo elétrico medido sob a fase <i>a</i> , considerando a seqüência dos horários das medições.	72
Figura 5.30: Tensão da fase <i>c</i> e campo elétrico medido sob a fase <i>c</i>	72
Figura 5.31: Tensão da fase <i>c</i> e campo elétrico medido sob a fase <i>c</i> , considerando a seqüência dos horários das medições.	73
Figura 5.32: Croqui de localização da régua de medição 8 – corte transversal.	74
Figura 5.33: Régua de medição 8 – Densidade de fluxo magnético.	74
Figura 5.34: Régua de medição 8 – Campo elétrico.....	74
Figura 5.35: Vista geral do pátio 69/13,8kV com as UTRs.	78
Figura 6.1: Diagrama unifilar simplificado da subestação Gama.	81

Figura 6.2: Croqui da SE Gama.	82
Figura 6.3: Perfil de tensão da subestação Gama, medido no 69kV.	83
Figura 6.4: Perfil de corrente da subestação Gama, medido no 69kV.	83
Figura 6.5: Curva de carga da subestação Gama.	83
Figura 6.6: Croqui de medição da SE Gama considerando 38 réguas paralelas.	84
Figura 6.7: Croqui relativo às réguas 15 e 18 na vizinhança do transformador T1.	85
Figura 6.8: Densidade de fluxo magnético nas réguas 15 e 18.	85
Figura 6.9: Campo elétrico nas réguas 15 e 18.	86
Figura 6.10: Corte longitudinal na SE Gama, transversal às 38 réguas de medição.	86
Figura 6.11: Perfil da densidade de fluxo magnético da instalação na posição do corte longitudinal.	86
Figura 6.12: Perfil do campo elétrico da instalação na posição do corte longitudinal.	87
Figura 6.13: Distribuição da densidade de fluxo magnético na SE Gama.	88
Figura 6.14: Distribuição do campo elétrico na SE Gama.	89
Figura 6.15: Projeção da distribuição da densidade de fluxo magnético sobre o pátio 69/13,8kV da SE Gama.	90
Figura 6.16: Projeção da distribuição de campo elétrico sobre o pátio 69/13,8kV da SE Gama.	90
Figura 6.17: Croqui da SE Gama distribuído em três setores de medição.	91
Figura 6.18: Densidade de fluxo magnético medida no setor 1 – Réguas 1 a 13: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	92
Figura 6.19: Densidade de fluxo magnético medida no setor 2 – Réguas 14 a 24: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	93
Figura 6.20: Densidade de fluxo magnético medida no setor 3 – Réguas 15 a 38: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	94
Figura 6.21: Campo elétrico medido no setor 1 – Réguas 1 a 13: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	95
Figura 6.22: Campo elétrico medido no setor 2 – Réguas 14 a 24: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	96
Figura 6.23: Campo elétrico medido no setor 2 – Réguas 25 a 38: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy	97
Figura 7.1: Curvas de carga da SE Beta – dia da semana: quarta-feira.	103
Figura 7.2: Curvas de carga da SE Beta – dia da semana: segunda-feira.	103
Figura 7.3: Mapeamento Eletromagnético de Subestações.	113
Figura 7.4: Diagrama de procedimentos para a análise dos acoplamentos.	114
Figura 7.5: Detalhe do barramento duplo em 13,8kV da SE Beta.	116

Figura B.1: Linhas de força do campo magnético gerado pela passagem de corrente em um condutor.....	140
Figura B.2: Linhas de força de campo elétrico gerado: (a) por uma carga puntiforme; (b) por um dipolo.....	141
Figura B.3: Linhas de força de campo elétrico entre as placas de um capacitor plano.....	142
Figura E.1: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 1.....	165
Figura E.2: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 2.....	166
Figura E.3: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 3.....	166
Figura E.4: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 4.....	166
Figura E.5: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 5.....	166
Figura E.6: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 6.....	167
Figura E.8: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 8.....	167
Figura E.9: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 9.....	167
Figura E.10: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 10.....	168
Figura E.11: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 11.....	168
Figura E.12: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 12.....	168
Figura E.13: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 13.....	168
Figura E.14: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 14.....	169
Figura E.15: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 15.....	169
Figura E.16: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 16.....	169
Figura E.17: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 17.....	169
Figura E.18: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 18.....	170
Figura E.19: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 19.....	170
Figura E.20: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 20.....	170
Figura E.21: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 21.....	170
Figura E.22: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 1 a 4.	171
Figura E.23: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 5 a 8.	171
Figura E.24: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 9 a 11. ...	172
Figura E.25: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 12 a 15 ..	172
Figura E.26: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 16 e 17. .	172
Figura E.27: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 18 a 20. .	172
Figura E.28: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 21 e 22. .	173
Figura E.29: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 23 a 25....	173
Figura E.30: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 26 a 29. .	173
Figura E.31: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 30 a 33. .	173

Figura E.32: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 34 a 36. .	174
Figura E.33: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Réguas 37 e 38. .	174
Figura E.34: Campo elétrico medido em pontos avulsos da malha de terra.	174
Figura F.1: Croqui de Medição – Perfis L_1 (■) e L_2 (■).	175
Figura F.2: Medidas de campo elétrico no perfil L_1	177
Figura F.3: Medidas de campo elétrico no perfil L_2	177
Figura F.4: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L_1	177
Figura F.5: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L_2	178
Figura F.6: Correlação de M1 com as séries M2-M8.....	180
Figura F.7: Correlação de M2 com as séries M1 e M3-M8.	180
Figura F.8: Correlação de M3 com as séries M1-M2 e M4-M8.	181
Figura F.9: Correlação de M4 com as séries M1-M3 e M5-M8.	181
Figura F.10: Correlação de M5 com as séries M1-M4 e M6-M8.	181
Figura F.11: Correlação de M6 com as séries M1-M5 e M7-M8.	182
Figura F.12: Correlação de M7 com as séries M1-M6 e M8.	182
Figura F.13: Correlação de M8 com as séries M1-M7.....	182
Figura F.14: Valores máximos e mínimos da densidade de fluxo magnético no perfil L_1 .	183

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. O PROBLEMA

Os estudos desenvolvidos pelas empresas de energia elétrica quanto à ocorrência de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de potência costumam restringir-se à análise do comportamento dos dispositivos de manobra frente aos transitórios de chaveamento, ou ainda à avaliação de variações de tensão de curta duração (VTCD), que comprometem o desempenho do sistema e os seus indicadores [1], [2].

O primeiro caso refere-se a uma análise do comportamento dinâmico do sistema frente aos transitórios de manobra, enquanto que, no segundo, são consideradas condições de operação críticas, indesejáveis e inadequadas ao sistema, que podem resultar ou não na perda de continuidade de serviço e que são exaustivamente investigadas pelos profissionais da Qualidade da Energia Elétrica. Entretanto, nenhum desses dois casos reflete uma avaliação do ambiente eletromagnético “natural” inerente a uma instalação do sistema elétrico, que é determinado pela estrutura da instalação e pela natureza dos acoplamentos eletromagnéticos dela decorrentes e da magnitude das tensões e correntes envolvidas.

Relatórios de desempenho de sistemas elétricos costumam acusar falhas em sistemas de supervisão e monitoração digital de suas instalações que podem ser atribuídas às características do ambiente eletromagnético no qual esses sistemas digitais estão inseridos, independentemente da ocorrência de um distúrbio, uma manobra ou uma VTCD. Falhas nos equipamentos eletrônicos sensíveis de uma subestação, por sua vez, podem causar interrupções no fornecimento de energia e ainda provocar falhas em outras instalações, comprometendo o desempenho e a confiabilidade do sistema.

Logo, conhecer o perfil eletromagnético de uma subestação pode ser essencial na adequação desse ambiente eletromagnético aos equipamentos eletrônicos sensíveis instalados na planta.

A mudança do perfil eletromagnético de uma subestação devido às ampliações que, usualmente, aumentam a potência instalada, seja pela instalação de novos transformadores de potência, seja pela substituição de unidades existentes por outras de maior potência nominal, pode

estabelecer uma elevação na magnitude dos campos elétrico e magnético existentes na instalação, além de definir novos acoplamentos, resultantes das modificações no arranjo físico da subestação. Esses acoplamentos podem vir a comprometer a operação de dispositivos eletrônicos instalados na planta que empregam tecnologia digital, como relés de proteção, medidores, sistemas de automação e monitoramento.

Geralmente, as análises em compatibilidade eletromagnética (EMC) para as instalações do sistema elétrico referem-se, principalmente, a fenômenos transitórios em linhas de transmissão [3] ou à busca de soluções para problemas de interferência eletromagnética específicos ocorridos em subestações envolvendo falhas de operação, acidentes ou queima de equipamentos instalados [4]-[7], sem que tenham sido realizadas investigações acerca dos acoplamentos eletromagnéticos existentes em suas instalações sob condição de regime permanente.

Diante desses dados, é factível considerar relevante e necessário desenvolver uma metodologia de investigação do comportamento dos campos elétricos e magnéticos presentes em subestações em condição de operação normal, regime permanente. Este processo deve contemplar a avaliação dos acoplamentos eletromagnéticos e seus efeitos sobre a instalação e sobre os equipamentos eletrônicos sensíveis (EES) instalados.

1.2. CONTRIBUIÇÃO

Com a utilização de equipamentos eletrônicos sensíveis em subestações os acoplamentos eletromagnéticos inerentes à operação normal da instalação, em condição de regime permanente, precisam ser considerados, de forma a minimizar o risco de ocorrências que possam vir a comprometer o desempenho desses dispositivos. Conhecendo a natureza desses campos, é possível minimizar seus efeitos e salvaguardar os equipamentos eletrônicos sensíveis e também definir um arranjo mais adequado do sistema digitalizado em um ambiente eletromagneticamente mais favorável. Esse procedimento reduz a probabilidade de falhas desses dispositivos e com a ocorrência de menos falhas nos sistemas automatizados, pode-se obter um melhor desempenho da instalação.

Logo, a proposta dessa pesquisa é comprovar a existência de acoplamentos eletromagnéticos significativos em subestações do sistema elétrico em condição de regime permanente, que não podem ser desconsiderados nas análises de compatibilidade eletromagnética da instalação. Esses acoplamentos podem comprometer o desempenho da instalação, resultando em mau funcionamento e falhas na operação de dispositivos, acarretando em perda de qualidade de serviço e em prejuízos financeiros para as empresas e para os seus consumidores.

A principal motivação desta pesquisa está diretamente relacionada à integração da análise dos campos eletromagnéticos em regime permanente, aos procedimentos de análise aplicados à compatibilidade eletromagnética em subestações automatizadas do sistema elétrico. Logo, esta pesquisa tem como objetivo apresentar uma metodologia para a avaliação do ambiente eletromagnético de uma subestação em regime permanente evidenciando a existência e a relevância dos acoplamentos eletromagnéticos existentes na instalação, a partir da medição de valores de campos elétrico e magnético na subestação.

A principal contribuição deste trabalho está na formulação de uma metodologia de análise do ambiente eletromagnético de subestações do sistema elétrico, na qual estão evidenciados aspectos como:

- Metodologia para a medição dos campos elétricos e magnéticos;
- Representação gráfica da distribuição dos campos e dos acoplamentos eletromagnéticos na instalação;
- Análise do ambiente eletromagnético da subestação incluindo metodologia de análise para a mitigação dos acoplamentos existentes;
- Diagnóstico eletromagnético da subestação em condição de operação de regime permanente.

A sistematização dos procedimentos propostos nesta metodologia de avaliação do ambiente eletromagnético de subestações em regime permanente pode vir a constituir uma ferramenta de análise relevante de subestações existentes, ou ainda, vir a justificar modificações nas diretrizes e/ou nos projetos de futuras subestações.

1.3. ESTRUTURA GERAL DA TESE

O escopo desta tese está distribuído em oito capítulos e sete apêndices com o intuito de facilitar a compreensão global do tema, nos quais pretende-se abordar aspectos relevantes que resultem na compreensão dos acoplamentos eletromagnéticos em subestações de energia elétrica.

A natureza desta investigação está embasada, principalmente, nas medições realizadas em campo e na análise e interpretação desses dados. A teoria é vista de forma direta, simples e objetiva, fornecendo os subsídios necessários à interpretação e compreensão dos resultados obtidos.

Um breve resumo do que está exposto em cada capítulo é apresentado:

- No Capítulo 2, **Compatibilidade Eletromagnética em Sistemas de Potência**, são apresentados os conceitos fundamentais da compatibilidade eletromagnética aplicada a sistemas elétricos. O capítulo traz uma breve revisão do estado da arte, um breve histórico da compatibilidade eletromagnética, no qual são relatados os primeiros passos desse campo de investigação. São abordadas as características dos acoplamentos e do ambiente eletromagnético em subestações. Finalizando esse capítulo, são apresentados aspectos relativos às normas técnicas em compatibilidade eletromagnética;
- No Capítulo 3, **Avaliação do Ambiente Eletromagnético em Subestações**, são introduzidos os dois instrumentos utilizados nas medições de campos eletromagnéticos. Foram realizadas medidas de campo elétrico e magnético utilizando os dois instrumentos em subestação 230/138kV e seus resultados analisados. Neste capítulo também são discutidos aspectos relativos aos critérios de medição de campos eletromagnéticos em subestações energizadas e apresentados os critérios e procedimentos utilizados durante a realização das medições;
- No Capítulo 4, **Medição de Campos Eletromagnéticos na Subestação Alfa**, são apresentados os procedimentos adotados e o resultado das medições de campos elétricos e magnéticos realizados na subestação Alfa;
- No Capítulo 5, **Medição do Ambiente Eletromagnético da Subestação Beta**, são apresentadas as medições de campos eletromagnéticos no pátio 69/13,8kV da subestação Beta, enfatizados os procedimentos adotados e as formas de representação dos campos medidos, culminando na análise dos acoplamentos e no diagnóstico da instalação quanto às características de seu ambiente eletromagnético;
- No Capítulo 6, **Medição do Ambiente Eletromagnético da Subestação Gama**, é apresentado o mapeamento eletromagnético do pátio de manobras de uma subestação 69/13,8kV, enfatizando os procedimentos adotados nas medições realizadas, bem como a análise do ambiente eletromagnético da instalação;
- O Capítulo 7, **Uma Proposta para a Avaliação do Ambiente Eletromagnético em Subestações**, contempla as considerações finais sobre os resultados mais relevantes obtidos durante as medições de campos eletromagnéticos realizadas nas três subestações, Alfa, Beta e Gama. A consistência dos dados é avaliada e as técnicas de mitigação dos acoplamentos eletromagnéticos são apresentadas, com o foco em subestações do sistema elétrico. Finalizando o capítulo, é apresentada a metodologia proposta para a análise dos acoplamentos eletromagnéticos em condição de regime permanente;
- O Capítulo 8, **Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras**, apresenta as principais conclusões, enfatizando o caráter original da contribuição técnica e a relevância da pesquisa.

Além desses aspectos, são identificadas as futuras etapas de investigação no tema que podem ser desenvolvidas a partir desta pesquisa e de suas conclusões, traçando um perfil atual do amplo espectro de estudos em compatibilidade eletromagnética aplicada a sistemas elétricos e afins.

Complementando e finalizando esta tese, é apresentada a lista de referências bibliográficas que serviu de suporte ao desenvolvimento desta pesquisa. Uma terminologia para a compatibilidade eletromagnética é apresentada no Apêndice A. Fundamentos da teoria eletromagnética são resumidos no Apêndice B e as normas técnicas relacionadas à compatibilidade eletromagnética são apresentadas no Apêndice C. Os valores de campos elétricos e magnéticos medidos nas quatro subestações estão apresentados no apêndice D e as representações lineares das medidas de campos efetuadas nas subestações Beta e Gama, apresentadas no Apêndice E. O Apêndice F resume a análise de correlação de valores de campo medidos na SE Beta. O Apêndice G lista as publicações da autora durante o desenvolvimento desta pesquisa e o Apêndice H sua biografia.

CAPÍTULO 2

COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1. BREVE HISTÓRICO

Data do início do século XX, após a 1ª Guerra Mundial, as primeiras investigações voltadas para o efeito das interferências eletromagnéticas (ruídos) causadas pelas transmissões de rádio. Associações e fabricantes buscaram definir técnicas de controle na emissão dos ruídos por meio de normas e procedimentos que favorecessem sua redução e uma operação mais adequada do sistema. Em meados dos anos 30 já se identificam problemas de radiointerferência entre aparelhos elétricos, como motores, trens elétricos e dispositivos de sinalização [8], [9].

Nas duas décadas seguintes as investigações na área resultaram em publicações de artigos técnicos e no desenvolvimento de técnicas de medição de campos e de interferências eletromagnéticas e no desenvolvimento de equipamentos capazes de medir a intensidade desses campos tanto nos Estados Unidos quanto na Europa, onde se destacaram as investigações no âmbito da radiofrequência.

Em 1933 é criado a CISPR (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*), sob recomendação da IEC (*International Electrotechnical Commission*), que promove o primeiro encontro técnico da área em 1934. Até a 2ª guerra mundial as contribuições tecnológicas no âmbito da radiofrequência foram bastante significativas.

Durante a 2ª Guerra, o uso de dispositivos eletrônicos em radiocomunicação e em sistemas de navegação e o desenvolvimento do radar aceleraram as investigações nas frequências mais altas, na faixa de até 20MHz nos anos 40 e chegando a 30MHz nos anos 50. Problemas de interferências entre esses dispositivos são contornados por meio de ajustes nas faixas de frequências, resolvidos caso a caso.

A partir dos anos 50 surgem os transistores bipolares, que revolucionam a indústria eletro-eletrônica. Nos anos 60 surgem os circuitos integrados e na década de 70, os microprocessadores, que vão revolucionar mais ainda a eletrônica com a tecnologia digital.

Na indústria química surgem os plásticos e os polímeros, que revolucionam a tecnologia dos materiais utilizados nos equipamentos de controle e que, associados à tecnologia digital, resultaram em equipamentos de menores dimensões, mais leves, mais rápidos, mais eficientes e de menor custo, mas, por outro lado, altamente susceptíveis a campos eletromagnéticos.

A evolução tecnológica no setor das comunicações, desde o rádio até o satélite, do microondas à Internet, deixaram de ser de controle exclusivamente militar e tornaram-se acessíveis às populações dos países detentores dessas tecnologias, popularizando-se e tornando a sociedade altamente dependente da energia elétrica, o que aumentou significativamente o consumo e a demanda por uma energia elétrica de melhor qualidade, traduzida aqui como continuidade de serviço, estabilidade de tensão e de frequência.

Por outro lado, o crescimento da demanda de energia associado ao perfil dessas novas cargas exige do sistema elétrico maior capacidade, associada a um melhor desempenho, que sempre resulta em uma maior transferência de potência e em campos elétricos e magnéticos ainda mais intensos.

Centros urbanos desenvolvidos possuem um ambiente eletromagnético onde se superpõem inúmeras fontes de radiação eletromagnética, que devem coexistir, na medida do possível, sem interferências mútuas e sem comprometimento no desempenho de cada uma delas. É a partir da necessidade de regulamentar, adequar e fiscalizar os efeitos desses campos que se estabelecem os princípios regulatórios da compatibilidade eletromagnética.

A crescente aplicação da microeletrônica e da informática em diversos setores da vida moderna têm tornado a Compatibilidade Eletromagnética uma área de investigação multidisciplinar, que engloba questões técnicas, ambientais, jurídicas e de saúde.

Normas técnicas internacionais limitam os níveis de exposição humana a campos elétricos e magnéticos em função de fatores ocupacionais [10] e para o público em geral; outras normas definem procedimentos e padrões em EMC para produtos e equipamentos, que devem ser observados para que esses produtos possam ser comercializados livremente.

Problemas mais recentes em EMC enfocam aspectos ambientais, supostamente epidemiológicos, em que se associam riscos à saúde humana e ao meio ambiente pela ação de campos eletromagnéticos [11], [12]. Por vezes instalações de subestações e linhas de sistemas de transmissão, bem como sistemas de comunicações e estações radiobase são objeto de ações populares que causam sérios prejuízos às concessionárias prestadoras desses serviços, seja pelo embargo ou retardo da obra, seja pelos custos envolvidos nessas ações [13]. O tema é polêmico e cercado de controvérsias na comunidade científica mundial.

Os equipamentos utilizados na produção, transmissão e distribuição de energia são dispositivos eletromecânicos, pouco susceptíveis aos efeitos de sinais eletromagnéticos interferentes de alta frequência.

Os dispositivos de controle, operação, medição e proteção do sistema também eram eletromecânicos. Portanto, não eram susceptíveis aos efeitos eletromagnéticos de alta frequência, tornando desnecessário investigar o desempenho desses dispositivos sob a ótica da EMC, voltada principalmente para os eventos eletromagnéticos de alta frequência.

Com a digitalização do processo elétrico tornaram-se relevantes as características de alta frequência dos fenômenos transitórios, assim como a localização e as características dos equipamentos, a forma de conexão dos dispositivos, o aterramento e, mais recentemente, as características do ambiente eletromagnético da subestação.

2.2. APLICAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS

A avaliação eletromagnética em instalações do setor elétrico restringia-se à análise de eventos como os efeitos de radiofrequência por efeito corona nas linhas, harmônicos, transitórios de manobra, curtos-circuitos e descargas atmosféricas.

De forma geral, o controle dos harmônicos de 3ª ordem é feito considerando o uso de conexões delta dos transformadores e equipamentos, ou ainda, pelo emprego de filtros específicos. Os curtos-circuitos têm seus efeitos limitados pelo emprego de relés de proteção e as descargas atmosféricas, controladas por procedimentos de coordenação de isolamento. Os efeitos desses distúrbios sobre a instalação eram absorvidos pela malha de terra da subestação, usualmente projetada para fenômenos a 60Hz e para descargas, sem que se considerassem, no projeto do sistema de aterramento, os sinais de alta frequência.

Em regime permanente, os efeitos transitórios interferentes mais comuns envolviam os sistemas de radiocomunicação entre o Centro de Despacho de Carga da concessionária e suas subestações. Além desses eventos, transitórios de manobras envolvendo o chaveamento de bancos de capacitores e outros dispositivos eram avaliados para verificar a adequação dos dispositivos de manobra quanto à tensão de restabelecimento transitória.

A evolução tecnológica trouxe a mudança no perfil das cargas ligadas ao sistema elétrico, que passaram a exigir do sistema um desempenho mais eficiente, associado a uma menor taxa de falhas e de interrupções. Além disto, o emprego de dispositivos eletrônicos modificou substancialmente o espectro de frequências envolvido no processo elétrico, tornando a operação do

sistema susceptível a distúrbios eletromagnéticos aos quais o sistema elétrico poderia ser considerado insensível.

Logo, pode-se afirmar que, recentemente, os estudos em compatibilidade eletromagnética vêm se tornando bem mais relevantes para o setor elétrico, em função de aspectos como:

- A natureza dos distúrbios: os distúrbios eletromagnéticos são mais severos, em função das amplitudes mais elevadas de tensões e correntes no sistema;
- A digitalização do setor: a crescente automação da operação do sistema elétrico e a necessidade de assegurar um ambiente eletromagnético adequado à operação dos dispositivos eletrônicos sensíveis submetidos aos campos eletromagnéticos presentes em uma subestação [14]-[18];
- Distâncias elétricas reduzidas: a falta de espaço nos centros urbanos para a implantação de novas subestações implica na necessidade de ampliação da capacidade instalada de subestações existentes; a recapitação de linhas e de subestações, resultam em campos eletromagnéticos mais intensos.

Além desses aspectos, as empresas do setor elétrico devem estar atentas às recentes exigências dos poderes públicos e às pressões exercidas pelas organizações ambientalistas diante da ameaça representada pelos “campos eletromagnéticos” e seus possíveis efeitos sobre os seres humanos e o meio ambiente. Em 2002, foi instituído pela FUNASA (Fundação Nacional de Saúde) um Grupo de Trabalho com o objetivo de propor normas e procedimentos referentes aos limites de exposição a campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão em alta tensão [13]. Uma vez definidos esses limites, as empresas precisarão investir na implantação de medidas em EMC que possam assegurar o seu cumprimento.

Nesse processo, portanto, assume fundamental importância conhecer as características do ambiente eletromagnético no qual estão inseridos os EES, de forma a assegurar-lhes a operação adequada, mantendo os níveis de radiação eletromagnética dentro de limites adequados para os sistemas e aceitáveis para o ser humano.

Outro aspecto a considerar é que os problemas decorrentes da falta de compatibilidade eletromagnética não são exclusivos do setor elétrico ou dos sistemas das telecomunicações. A EMC é uma questão epidemiológica e multidisciplinar, que envolve diversos setores de atividades, fora do âmbito da Engenharia Eletro-eletrônica [19].

Linhas de transmissão energizadas definem campos elétricos e magnéticos em sua vizinhança, que são mais intensos sob a linha e se atenuam à medida que o ponto de medição se distancia transversalmente dela, como ilustrado nas Figuras 2.1 e 2.2.

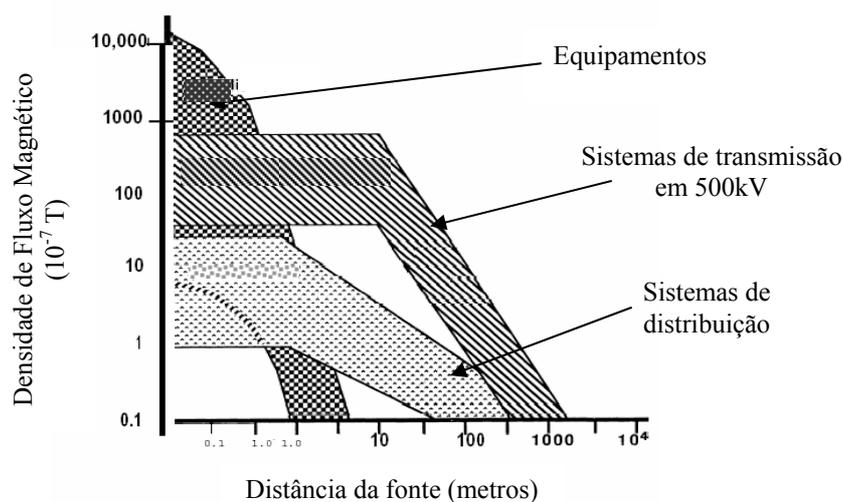


Figura 2.1: Variação da densidade de fluxo magnético ao nível do solo com a distância horizontal considerando três fontes distintas. As faixas referem-se às variações de características individuais dos sistemas representados em cada grupo [20].

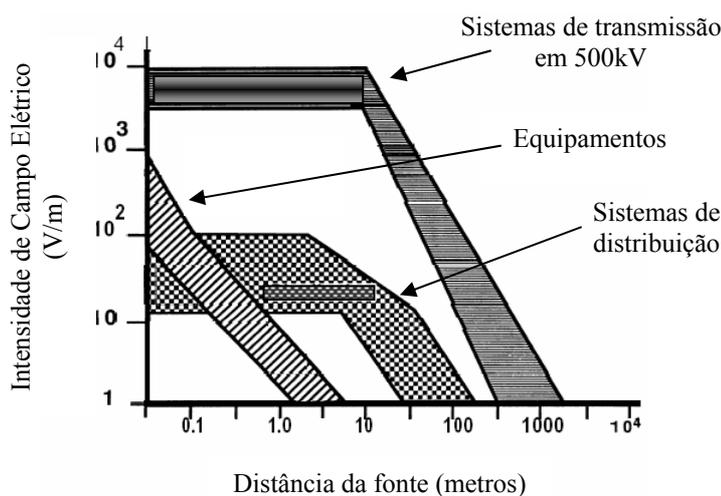


Figura 2.2: Variação da intensidade de campo elétrico ao nível do solo com a distância horizontal considerando três fontes distintas. As faixas referem-se às variações de características individuais dos sistemas representados em cada grupo [20].

Os primeiros estudos em linhas de transmissão relativos a fenômenos eletromagnéticos eram voltados para a análise de ondas trafegantes na linha, decorrentes de descargas atmosféricas incidentes [9], de perdas, decorrentes do efeito corona e, eventualmente, para os efeitos da ocorrência de distúrbios mais severos, como os curtos-circuitos.

Esses estudos não pretendiam avaliar o comportamento eletromagnético das linhas de transmissão energizadas sob condição normal de operação, nem os efeitos dos campos

eletromagnéticos gerados pelos circuitos na vizinhança da linha, fosse na sua faixa de passagem (ou faixa de servidão), fosse em instalações existentes à sua volta.

Nos anos 30-40 do século 20, com o crescente interesse da comunidade científica nos efeitos de campos gerados por sinais de radiofrequência, surgiram as primeiras especulações acerca dos prováveis efeitos “nocivos” dos campos elétricos e magnéticos gerados pelas linhas de transmissão. Mesmo assim, as primeiras regulamentações nesse sentido só foram publicadas na década de 60.

Na medida em que o sistema elétrico se expandia e se tornava mais complexo, cresciam os problemas envolvendo campos eletromagnéticos, principalmente com relação a fenômenos que deveriam ser conhecidos, controlados ou minimizados, na impossibilidade de serem eliminados, de forma a assegurar a operação adequada do sistema. Esses problemas, analisados para condição de regime permanente, consideravam basicamente as variações de tensão em função das características da carga, do desempenho do sistema elétrico, das perdas elétricas e da injeção de reativos nas linhas de transmissão. Esses estudos eram desenvolvidos por profissionais das empresas do setor elétrico, que os classificavam em grupos, dentre os quais pode-se destacar os seguintes:

- Indução eletromagnética: entre linhas de transmissão paralelas ou em cruzamento, entre linhas de transmissão e distribuição, entre linhas de transmissão/distribuição e sistemas de comunicações, dutos ou edificações [4], [5], [21]-[24];
- Correção de fator de potência: uso de bancos de capacitores e reatores;
- Compensação de reativos: tradicionalmente pelo emprego de capacitores e reatores simples e, em alguns casos, por compensadores estáticos e por compensadores e reatores série;
- Regulação de Tensão: controle da variação acentuada de tensão entre as condições de carga máxima e carga mínima em um ponto do sistema;
- Harmônicos: gerados por cargas especiais, como fornos a arco, motores, lâmpadas frias e pelos próprios dispositivos não-lineares utilizados na regulação do sistema elétrico, etc.

Estudos de EMC em linhas de transmissão estão normalmente relacionados à avaliação da compatibilidade dos valores de campos elétricos e magnéticos obtidos, às normas e aos procedimentos vigentes no país onde esses estudos são realizados.

A literatura disponível pesquisada indica que existem vários métodos [8], [14], [25]-[29] para a obtenção desses valores de campos eletromagnéticos, que se diferenciam principalmente quanto à complexidade computacional do algoritmo implementado ou quanto à necessidade de

informações que permita a correta identificação, ou modelagem, dos condutores e do sistema de aterramento no local.

As questões atuais envolvendo EMC em linhas de transmissão estão focadas na melhoria da rede existente, na ampliação do sistema e nas questões ambientais, cada vez mais relevantes. A falta de um projeto adequado em EMC pode resultar em custos elevados e perdas significativas para as concessionárias de energia e, conseqüentemente, para o sistema elétrico e seus usuários.

2.3. ESTUDOS DE EMC EM SUBESTAÇÕES

Tradicionalmente os estudos de EMC em linhas de transmissão são bem mais freqüentes do que em subestações. Um dos motivos para isto é a dificuldade para a realização de simulações e medições de campos elétricos e magnéticos nessas instalações. A medição de campos em linhas de transmissão é bem mais simples e requer uma quantidade bem menor de pontos para caracterizar o ambiente eletromagnético em sua vizinhança.

Em subestações eletromecânicas não automatizadas a avaliação de fenômenos eletromagnéticos restringia-se à análise de fenômenos de radiointerferência, principalmente quando o divisor capacitivo de potencial (DCP) era utilizado como meio de comunicação entre a subestação e o Centro de Operações, com o sistema *carrier*. O nível de ruído eletromagnético decorrente desse sistema originou vários trabalhos e investigações na área, com contribuições relevantes para a análise de fenômenos eletromagnéticos em instalações do sistema elétrico.

Estudos relativos à resposta dinâmica das subestações frente à ocorrência de transitórios de manobra e curtos-circuitos visavam identificar a adequação dos sistemas disruptivos, como centelhadores e pára-raios instalados nas subestações, que deviam drenar a corrente de curtos-circuitos para a malha de terra. Todos esses eventos eram analisados apenas com relação à magnitude das correntes e tensões envolvidas.

Como no caso das linhas de transmissão, a análise de campos eletromagnéticos em subestações enfocava, tradicionalmente, a análise transitória do sistema, para avaliar a suportabilidade eletromecânica dos equipamentos e a coordenação de isolamento da instalação. Esses estudos, que não visavam analisar os efeitos dos campos eletromagnéticos em regime permanente, também eram desenvolvidos pelas empresas concessionárias de energia em casos como:

- Novas instalações ou ampliação de instalações existentes: estudos dinâmicos de fenômenos transitórios visando verificar os ajustes de relés de proteção;

- Ocorrência de faltas: estudos para identificação do tipo de defeito e sua causa mais provável;
- Queima de equipamentos: identificação das causas mais prováveis;
- Estudos de confiabilidade: análise de ocorrências de desligamentos no sistema, sua duração e sua frequência.

Com a digitalização do processo elétrico e a utilização dos EES em subestações, começaram a ocorrer falhas na operação de dispositivos. Um dos exemplos mais comuns, segundo as informações dos técnicos do setor, é o bloqueio da operação dos *modems* responsáveis pela transferência de dados entre a subestação e o Centro de Operações. O restabelecimento da comunicação entre a subestação e o Centro só se dá após a reinicialização do *modem* por um operador de subestação, que precisará se deslocar até ela caso a subestação seja não assistida.

Observe-se que o *modem* é um dispositivo eletromagneticamente compatível, fabricado de acordo com as normas de EMC, e que, sob o efeito de um sinal interferente, bloqueia sua operação sem se danificar. Mas, se for considerado o sistema no qual ele está inserido, o bloqueio do *modem* será percebido como uma falha de operação.

A literatura enfocando a análise de eventos transitórios em subestações é vasta e diversificada, estando disponível principalmente em anais de eventos como o SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), considerado o evento mais importante de divulgação científica e tecnológica do setor elétrico brasileiro.

Nas últimas edições do SNPTEE, a qualidade da energia elétrica (QEE) e a compatibilidade eletromagnética vêm galgando um espaço cada vez maior, ainda que as comissões técnicas priorizem os estudos de VTCDs, em QEE, e as linhas de transmissão, em EMC. De acordo com o acervo desse evento [30], pode-se constatar a pouca ênfase que ainda é dada à análise de EMC em subestações, principalmente se não houver histórico de ocorrências de falhas na instalação.

Recentemente as empresas concessionárias de energia elétrica têm investido em pesquisas e desenvolvimento no intuito de buscar soluções para minimizar a susceptibilidade dos EES instalados no sistema [15], [31], [32]. Como essas análises costumam ter soluções individualizadas, que não podem ser generalizadas nem sistematizadas como procedimentos a serem adotados em outras instalações, essas empresas têm buscado parcerias com Centros de Pesquisa e Universidades, no intuito de desenvolver métodos de análise que possibilitem a definição de procedimentos e critérios para o controle das interferências eletromagnéticas em suas instalações.

Por essa razão, a natureza dos acoplamentos eletromagnéticos que caracteriza o ambiente eletromagnético em subestações é o tema principal no qual se baseia esta pesquisa.

2.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Compatibilidade Eletromagnética (CEM, do inglês, *Electromagnetic Compatibility*, EMC) é a aptidão de um dispositivo, de um aparelho ou de um sistema, de funcionar em seu ambiente eletromagnético de modo satisfatório e sem produzir ele próprio, perturbações eletromagnéticas que possam criar problemas graves no funcionamento dos aparelhos ou dos sistemas situados em seu ambiente [33]-[36].

A EMC está relacionada com o controle da capacidade de um dispositivo-fonte (circuito agressor) ser emissor de um sinal eletromagnético transmitido a outro dispositivo-receptor (circuito vítima) por meio de um mecanismo de acoplamento, que pode modificar o comportamento deste dispositivo-vítima. Quando o sinal captado pelo receptor resulta em um sinal que leva a um funcionamento indesejável, pode-se afirmar que ocorreu uma interferência eletromagnética (IEM, do inglês, *Electromagnetic Interference*, EMI).

A Figura 2.3 ilustra esse mecanismo de transferência de energia.



Figura 2.3: Acoplamento entre fonte e receptor de sinais eletromagnéticos.

Outras definições fundamentais em EMC estão apresentadas no Apêndice A.

Existem três formas de prevenir a ocorrência da EMI [8], [25]:

- Suprimir a emissão desses sinais na fonte;
- Tornar o meio de acoplamento o mais ineficiente possível;
- Reduzir a susceptibilidade do receptor aos sinais interferentes.

Logo, um dispositivo é eletromagneticamente compatível, se [8]: (a) não interferir em outros sistemas; (b) não for susceptível a emissões eletromagnéticas de outros sistemas; (c) não for capaz de interferir nele próprio.

Assegurar o desempenho satisfatório de um dispositivo eletrônico sensível submetido a campos eletromagnéticos intensos de um ambiente como subestações do sistema elétrico é, pois, um compromisso que se estabelece entre a melhor solução técnica e o custo de implantação da solução em EMC.

Os campos elétricos e magnéticos presentes nas instalações do sistema elétrico podem ser gerados por diversas fontes distintas, que interagem entre si e se superpõem, definindo assim, por meio de acoplamentos eletromagnéticos, as características eletromagnéticas do ambiente que as contém. O grau de severidade dos eventos de EMI na instalação depende da magnitude dessas fontes e das características dos acoplamentos envolvidos [37]. A adoção de medidas corretivas em EMC, quando necessário, geralmente se constitui em soluções onerosas e particulares do problema analisado.

Soluções mais adequadas e menos onerosas podem ser obtidas na medida em que a instalação já é projetada levando em conta os requisitos estabelecidos pelas normas de EMC aplicáveis a sistemas elétricos. Para tanto, é preciso um bom conhecimento das características da instalação e do sistema elétrico, bem como da natureza e do comportamento eletromagnético dos eventos que atuam na instalação.

Logo, uma adequada avaliação do ambiente eletromagnético de uma subestação subentende o conhecimento prévio da engenharia de sistemas elétricos e dos fundamentos da teoria eletromagnética aplicada a campos eletromagnéticos variáveis no tempo. A partir desses elementos torna-se possível identificar e analisar a natureza dos acoplamentos eletromagnéticos existentes na instalação, bem como realizar a mitigação de seus efeitos, de forma a assegurar o desempenho satisfatório dos equipamentos eletrônicos sensíveis e da instalação, coerentemente com os procedimentos e princípios estabelecidos em norma.

2.5. ACOPLAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS

Os modelos que descrevem o acoplamento de um campo eletromagnético com qualquer estrutura podem ser desenvolvidos a partir das equações de Maxwell e baseiam-se no princípio fundamental de que cada corrente é a fonte de um campo (problema de emissão) e que cada campo pode ser a fonte de uma corrente (problema de recepção), o que é, novamente, a fonte de um campo

disperso. As soluções algébricas desses campos resultam de equações integrais complexas que costumam não ter solução analítica e precisam ser resolvidas por métodos numéricos [36].

Outra teoria empregada na análise dos mecanismos de acoplamento é a teoria das linhas de Transmissão (TLM – *Transmission Line Modelling*), cujos resultados têm sido considerados satisfatórios quando usada para solucionar problemas de acoplamentos entre cabos e linhas [28].

Uma terceira teoria aplicável à análise dos acoplamentos em sistemas elétricos é a teoria de circuitos. A teoria de circuitos constitui-se uma teoria muito mais simples que as duas primeiras e que está baseada nas leis de Kirchhoff e nas leis de Lenz. Sua aplicação está condicionada aos seguintes aspectos:

- O comprimento do circuito é muito menor que o comprimento de onda, não existindo efeitos de propagação envolvidos;
- A corrente pode ser considerada constante em cada elemento do circuito.

Uma das maiores vantagens do emprego desse método é a simplicidade dos cálculos, que não requerem o uso de extensivos métodos computacionais, além de possibilitar uma melhor compreensão dos mecanismos físicos envolvidos no acoplamento quando o circuito analisado é de pequenas dimensões [28]. Esse modelo pode ser aplicado a instalações do sistema elétrico e, por esse motivo, a análise dos mecanismos de acoplamento apresentada é baseada nessa teoria.

O mecanismo de acoplamento entre dois circuitos pode ser representado por uma função de transferência entre a fonte de energia, emissor ou agressor, e o equipamento susceptível, receptor ou vítima, representada por uma impedância, ou por uma admitância, qualquer que seja o mecanismo de acoplamento considerado.

A Figura 2.4 ilustra o circuito, no qual a interação eletromagnética entre emissor (circuito fonte E_f , Z_f) e receptor (circuito vítima, U_v , Z_v) é modelada por um circuito T, de impedâncias Z_1 , Z_2 e Z_3 . Nesse circuito, o condutor de retorno é a terra.

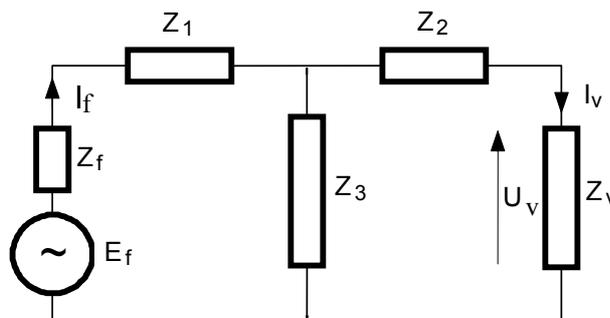
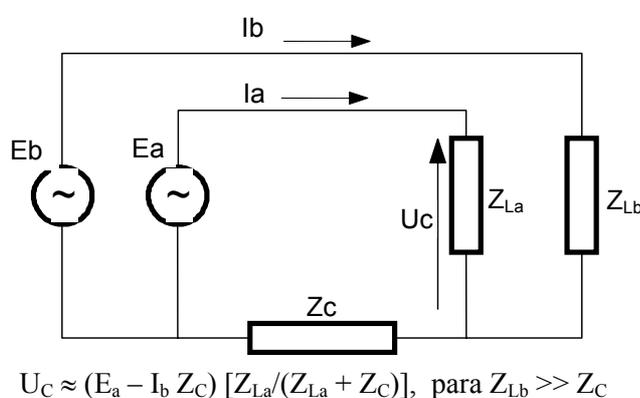


Figura 2.4: Modelo de circuito de acoplamento entre a fonte de distúrbio (Emissor) e o circuito vítima (Receptor).

2.5.1. ACOPLAMENTO POR IMPEDÂNCIA COMUM

Este é um acoplamento por caminho compartilhado que ocorre quando circuitos diferentes compartilham uma ou várias impedâncias. Um caso típico desse mecanismo de acoplamento é a própria malha de terra, que propicia aos circuitos um retorno comum, como mostrado na Figura 2.5.

Nesse circuito, a queda de tensão na impedância de carga do circuito 1 (U_C) é a soma algébrica dos sinais de tensão e de interferência, devido ao efeito da impedância comum Z_C , submetida ao fluxo de corrente no circuito 2 (I_b). Como as impedâncias de carga costumam ser bem maiores que a impedância Z_C , a tensão de perturbação reduz-se a $-Z_C \times I_b$, em que Z_C corresponde à função transferência definida na Figura 2.4 e que também é uma impedância de transferência.



Em que:

E_a é a tensão de alimentação do circuito 1;

E_b é a tensão de alimentação do circuito 2;

Z_{La} é a impedância de carga do circuito 1;

Z_{Lb} é a impedância de carga do circuito 2;

Z_C é a impedância comum aos 2 circuitos.

Figura 2.5: Acoplamento por impedância comum.

Os acoplamentos por impedância comum ainda podem ser classificados como resistivos ou condutivos.

2.5.1.1. Acoplamento Resistivo

Esse tipo de acoplamento é definido como a capacidade de propagação da corrente nos circuitos de terra, no solo ou nos cabos pára-raios, quando da ocorrência de faltas à terra. A parcela de corrente injetada no solo, através dos sistemas de aterramento das torres e subestações, pode resultar em tensões de passo e de contato, provocadas pela elevação do potencial de terra nas

proximidades do ponto de injeção, e pode, também, ser transferida para pontos remotos, por meio de uma outra instalação próxima.

Esse modo de acoplamento pode ser influenciado:

- Pelos níveis de corrente para o solo: o nível de indução resistiva é diretamente proporcional ao nível da corrente injetada no solo, que depende de outros fatores, como o tipo de aterramento do neutro do sistema, existência e conexão de cabos pára-raios, tipo e local do defeito, etc.;
- Pela resistividade do solo e do sistema de aterramento: quanto maior a resistividade, maior a tensão induzida no solo; a geometria de um sistema de aterramento pode influenciar no formato das curvas equipotenciais próximas a ponto de injeção;
- Pela distância entre o ponto de injeção e a instalação: quanto mais afastados, menores os níveis de indução.

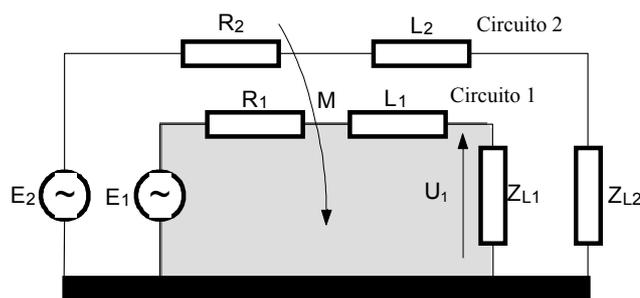
2.5.1.2. Acoplamento Condutivo

Quando envolve frequências mais elevadas, o acoplamento por impedância comum também é chamado de acoplamento condutivo. Ele é gerado pela diferença de potencial entre dois pontos que apresentam uma impedância comum a dois circuitos: um circuito sujeito a correntes espúrias (como um circuito de terra ou o solo) e um circuito sensível (um equipamento vítima).

Um caso grave e particular desse tipo de acoplamento é causado pelas interligações entre equipamentos referidos a terras distintos, como, por exemplo, sistemas de telefonia para comunicação de voz e/ou para comunicação de dados em uma subestação. A elevação de potencial de terra a partir de faltas e descargas atmosféricas impõe um forte acoplamento condutivo sobre as pessoas e sobre os equipamentos localizados nas extremidades da linha de comunicação, podendo resultar em danos aos equipamentos ou em acidentes com os operadores [38].

2.5.2. ACOPLAMENTO INDUTIVO OU MAGNÉTICO

O acoplamento indutivo é o modo mais comum de penetração de perturbações em sistemas elétricos e acontece sempre que dois circuitos compartilham um fluxo comum de indução. Ou seja, como no caso em que a terra é parte de vários circuitos e uma corrente flui, pelo menos, em um dos condutores. O caso mais simples, mostrado no circuito da Figura 2.6, envolve dois condutores paralelos acima do plano de terra, que atua como caminho de retorno para os dois circuitos.



Em que:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2$$

$$U_1 \approx (E_1 + I_2 j\omega M) [Z_{L1} / (Z_{L1} + Z_1)]$$

Figura 2.6: Acoplamento indutivo.

O circuito 2 é a fonte de perturbação e o circuito 1 é a vítima. Se a corrente do sinal no circuito 1 é muito maior que a corrente de perturbação do circuito 2, a influência do circuito 2 sobre o circuito 1 pode ser desprezada. A zona compartilhada representa a área cruzada pelo fluxo comum e determina o valor da indutância mútua M entre os dois circuitos.

A solução das equações desses circuitos mostra que U_1 é a composição de um sinal de tensão, $E_1 \cdot Z_{L1} / (Z_{L1} + Z_1)$, com a tensão de interferência induzida, dada por $j\omega M \cdot I_2 \cdot Z_{L1} / (Z_{L1} + Z_1)$. Quando os dois circuitos encontram-se próximos, o valor de M aproxima-se do valor de L_1 , e então, comparando-se essa expressão com a da Figura 2.5, verifica-se que o termo $j\omega M$ tem o mesmo papel que Z_C .

Os parâmetros que influenciam nesse tipo de acoplamento são:

- As correntes elétricas nos condutores de fase e cabos pára-raios do sistema elétrico;
- As condições de operação do sistema elétrico: a tensão induzida será tanto maior quanto maior for o desbalanceamento entre as fases do sistema, sendo o caso mais crítico quando ocorre uma falta de fase a terra;
- A distância entre as instalações: a indução será tanto menor quanto maior for a separação entre os circuitos;
- A extensão da área de exposição: a força eletromotriz induzida é proporcional ao comprimento do paralelismo;
- Os circuitos de blindagem: constituídos por condutores paralelos às instalações e aterrados em mais de um ponto. Permitem a circulação de correntes em sentido contrário ao das correntes indutoras, gerando campos magnéticos opostos aos incidentes, e conseqüentemente, reduzindo o nível de indução. É um circuito de *loop* “benéfico” [28].

O acoplamento indutivo ocorre quando o campo magnético resultante da circulação de uma corrente em um condutor enlaça outros condutores pertencentes ao mesmo circuito ou a outro circuito próximo. Se o enlace ocorre entre condutores pertencentes a um mesmo circuito são geradas tensões de modo diferencial. Se o enlace se dá por um *loop* do qual fazem parte duas ou mais interligações de um equipamento, são geradas tensões de modo comum. Tensões de modo comum podem comprometer a integridade do equipamento e provocar a queima de seus componentes, tornando necessário verificar a suportabilidade do equipamento definida por sua rigidez dielétrica.

2.5.3. ACOPLAMENTO CAPACITIVO OU ELÉTRICO

O acoplamento capacitivo é devido à tensão da fonte da perturbação e não à corrente que flui no circuito que a contém. Como as capacitâncias de acoplamento são pequenas quando a distância entre os circuitos fonte e vítima é grande, o acoplamento capacitivo ocorre, principalmente, quando a impedância do circuito vítima (ou as impedâncias de carga de modo comum, quando a vítima é um cabo) é alta e/ou quando o circuito fonte e o circuito vítima estão próximos.

Como os cabos blindados geralmente têm admitância de transferência muito baixa, ela pode ser desprezada quando a blindagem é conectada ao plano de terra. Isto é particularmente verdadeiro para 50/60 Hz, e explica, por exemplo, porque mesmo condutores imperfeitos, como as paredes de uma casa, são suficientemente eficientes para cancelar o campo elétrico que haveria em seu interior por efeito de uma linha de transmissão externa.

A eficiência de uma blindagem na redução de perturbações devido aos campos elétricos somente existe para baixas frequências quando as impedâncias de modo comum podem ser desprezadas com relação às capacitâncias. Para frequências maiores torna-se necessário aterrar a blindagem em mais de um ponto e, particularmente, em ambas extremidades do cabo.

Na prática, o acoplamento capacitivo ocorre quando há uma transferência de energia de uma linha de transmissão para uma instalação aérea vizinha através de suas capacitâncias próprias e mútuas, ou ainda, quando o campo elétrico decorrente da diferença de potencial entre dois circuitos induz uma corrente nos condutores do outro.

Se a outra instalação for isolada da terra haverá uma diferença de potencial entre a instalação e a terra, gerando assim uma tensão induzida; se a instalação for aterrada haverá uma corrente elétrica para a terra, caracterizada como uma corrente de descarga.

Um modelo de acoplamento capacitivo e de blindagem capacitiva é mostrado na Figura 2.7.

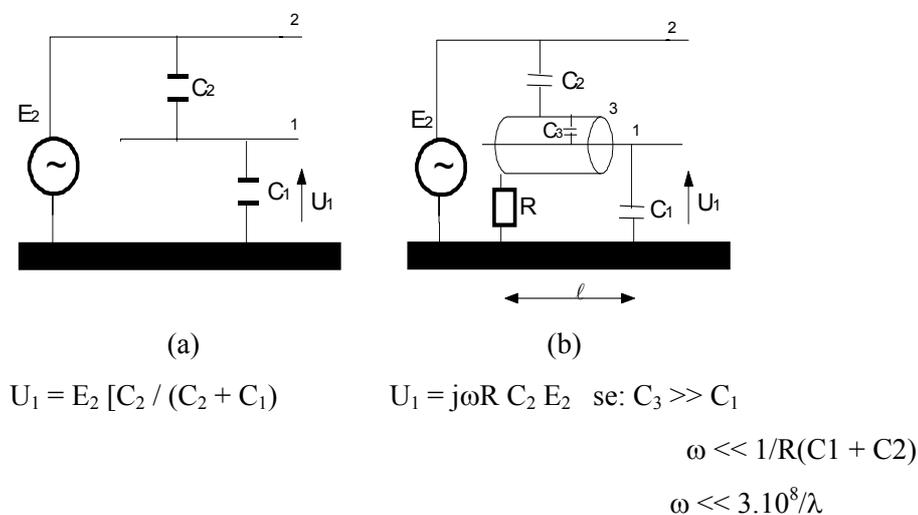


Figura 2.7: (a) Acoplamento capacitivo; (b) Blindagem capacitiva.

Os parâmetros que afetam esse tipo de acoplamento são [38]:

- A tensão de operação do sistema elétrico;
- As condições de operação do sistema elétrico: a tensão induzida será tanto maior quanto maior for o desbalanceamento entre as fases do sistema;
- A distância entre as instalações: a indução será tanto menor quanto maior for a separação entre os circuitos;
- O Comprimento de exposição: a corrente de descarga é proporcional ao comprimento do paralelismo.

2.5.4. ACOPLAMENTO RADIADO OU ELETROMAGNÉTICO

A perturbação eletromagnética tem natureza impulsiva e a componente de frequência mais alta de seu espectro é dada pela expressão $f = 1/(\pi\tau_r)$, em que τ_r é o tempo de subida do impulso que define as zonas de campo próximo ou de condição de indução.

Nas zonas onde essa relação se aplica, a razão entre o campo elétrico e o campo magnético, $Z_\omega = \vec{E}/\vec{H}$ (impedância de onda), pode assumir qualquer valor. Quando $Z_\omega < 377\Omega$ ($120\pi \Omega$), o campo magnético é dominante e a fonte é denominada fonte de baixa impedância com altas

correntes e baixas tensões, permitindo que o modelo do acoplamento indutivo seja utilizado. Quando $Z_w > 377\Omega$, o campo elétrico prevalece, a fonte é de alta impedância, com altas tensões e baixas correntes, possibilitando que o modelo de acoplamento capacitivo seja utilizado [28].

À medida que a distância da fonte aumenta, a razão \vec{E}/\vec{H} tende progressivamente para 377Ω , que é o valor da impedância do vácuo. Neste caso é impossível dizer qual componente de campo predomina e o campo é descrito como um campo eletromagnético radiado. A distância onde $\vec{E}/\vec{H} = 377\Omega$ determina o limite entre campo próximo e campo distante, ou ainda, do campo radiado, e depende das dimensões da fonte. Quando a fonte é muito menor que o comprimento de onda, o limite entre esses campos é dado para uma distância a partir de $\lambda/2\pi$ (cerca de um sexto do comprimento de onda). Se a dimensão máxima da fonte, D , é maior que $\lambda/2$, a distância limite é dada por $D^2/2\lambda$. A variação de Z_w com a distância normalizada x a partir da fonte e a razão de diminuição dos componentes de campo transversal é ilustrada na Figura 2.8.

Sempre que as condições de campo distante são aplicadas, o estudo do fenômeno torna-se muito mais complexo, principalmente se o circuito tem grandes dimensões quando comparado ao comprimento de onda. Nesse caso, a análise do sistema não pode ser aproximada pela teoria de Kirchhoff, sendo necessário utilizar os modelos gerais da teoria eletromagnética baseados nas equações de Maxwell, apresentada resumidamente no Apêndice B.

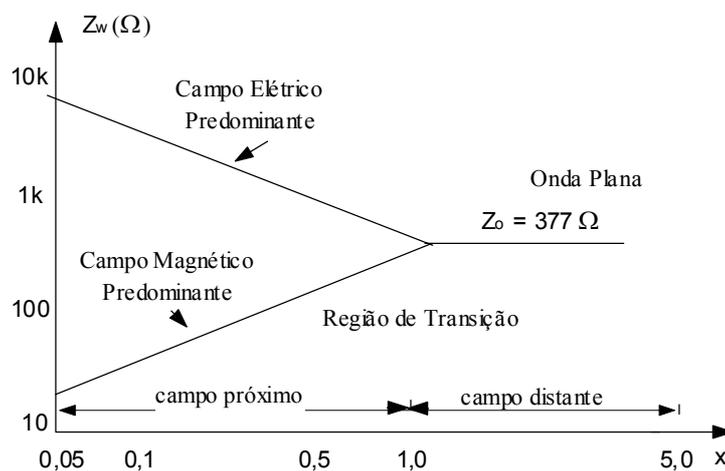


Figura 2.8: Impedância de onda como função da distância e do tipo de fonte – regiões de campo próximo e campo distante (componentes radiais desprezadas).

O acoplamento por radiação de campos distantes se caracteriza pela indução de correntes e tensões em condutores e blindagens a partir de campos eletromagnéticos gerados a distâncias

superiores a $\lambda/2\pi$, em que λ é o comprimento de onda do sinal interferente [38]. Seu cálculo deve considerar as contribuições em amplitude e fase das diversas reflexões de interferências geradas por sistemas de UHF ou VHF, celulares, TVs, rádios, entre outras [39].

2.6. NORMAS TÉCNICAS EM EMC

Uma norma representa um consenso sobre alguns parâmetros de interesse comum, orientando assim fabricantes, usuários ou todos aqueles que podem ser afetados por esses parâmetros.

Normalmente as normas são regulamentadas em cada país. Eventualmente, os países assumem normas existentes em comunidades onde os estudos em uma determinada área de interesse estejam mais avançados. No Brasil, os profissionais da área de EMC, as empresas do setor e as indústrias de dispositivos eletro-eletrônicos têm adotado as normas internacionais do IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*), do CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) e da IEC (*International Electrotechnical Commission*), atualizadas continuamente em função das evoluções tecnológicas e das questões socioambientais.

A primeira norma brasileira que trata de EMC é a NBR 12.304 – Limites e Métodos de Medição de Rádio-Perturbação em Equipamentos de Tecnologia da Informática (ETI), editada em abril de 1992. A mais recente é o procedimento da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) para sistemas de comunicação móvel.

Como o mercado atual é globalizado, as normas de EMC de todos os países são relevantes para os fabricantes de equipamentos eletrônicos. Elas podem ser divididas em dois grandes grupos definidos de acordo com o mercado: o mercado americano e o mercado europeu; e ainda podem ser subdivididas em normas para uso comercial e para uso militar.

A IEC apresenta um conjunto de normas técnicas de EMC, cuja finalidade é subsidiar a análise de possíveis interferências, definindo faixas de intensidade para todos os tipos de ambiente. A série de normas IEC 61.000 foi desenvolvida para atender à Compatibilidade Eletromagnética. A Tabela C.1, no Anexo C, resume algumas seções da IEC-61.000 que estão mais relacionadas à qualidade da energia elétrica e às aplicações de EMC aos sistemas de energia; algumas dessas seções ainda se encontram em fase de desenvolvimento [40].

Além da IEC, as organizações americanas de padronização, ANSI e IEEE, não têm um conjunto abrangente e bem-estruturado de normas em qualidade da energia elétrica como a IEC. Entretanto, as normas do IEEE fornecem informações práticas aliadas aos fundamentos teóricos, o

que torna os documentos normativos do IEEE referência em vários estudos relacionados à área, mesmo fora dos Estados Unidos da América.

A Tabela C.2 lista normas IEEE em EMC e qualidade da energia. Além das normas IEC 61.000 e das recomendações propostas pelos procedimentos do CIGRÉ [28] e das normas ANSI/IEEE, existem outras normas de ampla aplicação a projetos de EMC, incluídas as normas da ABNT, como resumido na Tabela C.3.

2.7. CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentado um breve histórico da compatibilidade eletromagnética em sua aplicação a sistemas elétricos. Além disso, foram apresentados os fundamentos da EMC, seus princípios teóricos e as normas técnicas nas quais estes princípios se baseiam. Complementando essa abordagem, foram apresentados os mecanismos de acoplamento eletromagnético, seus modelos de análise com base na teoria de circuitos, assim como os parâmetros que influenciam cada tipo de acoplamento.

No Capítulo 3, a seguir, são apresentados os critérios e os procedimentos adotados na medição de campos eletromagnéticos em subestações, considerando a análise dos acoplamentos existentes na planta como definidos nessa teoria. Neste capítulo também são avaliados os instrumentos utilizados durante as medições e enumerados os fatores do sistema que podem interferir nessas medições.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES

3.1. INTRODUÇÃO

Avaliar o ambiente eletromagnético de uma subestação é um processo que requer alguns cuidados bastante peculiares, uma vez que se trata de um sistema dinâmico, no qual correntes e tensões variam com o tempo e, conseqüentemente, os campos elétrico e magnético inerentes ao processo.

Esses cuidados vão desde a escolha do equipamento de medição até a definição dos pontos a serem medidos, dos horários e das condições climáticas nas quais essas medidas deverão ser efetuadas.

Alguns medidores de campos eletromagnéticos disponíveis no mercado possuem melhor desempenho que outros, o que não invalida os resultados obtidos com medidores de campo mais simples, de custo bem mais acessível do que aqueles que seriam mais adequados a essas medidas.

Neste capítulo serão apresentados dois medidores de campos elétrico e magnético de características distintas, que serão analisados por meio da comparação dos resultados obtidos em uma série de medidas realizadas em uma subestação. Além disso, serão discutidos aspectos com relação às peculiaridades da medição desses campos em subestações energizadas e apresentados os critérios e procedimentos utilizados durante a realização das medições.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS MEDIDORES DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Para efeito desta análise foram considerados um medidor unidirecional e um medidor isotrópico, com os quais foram realizadas medições de campos elétrico e magnético no ambiente 138kV de uma subestação 230/138kV do sistema elétrico.

3.2.1. O MEDIDOR UNIDIRECIONAL

O medidor HI-3604 *ELF Survey Meter*, da *Holaday Industries Inc*, mostrado na Figura 3.1, é capaz de executar medidas unidirecionais de intensidade de campos elétrico e magnético de baixa frequência. A faixa de medição de densidade de fluxo magnético é de 10nT a 2mT e de campo elétrico é de 1V/m a 199kV/m.

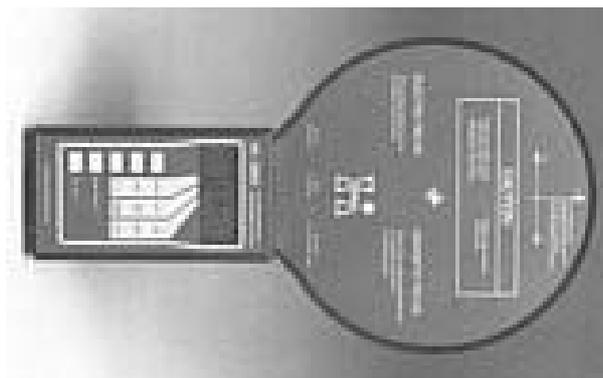


Figura 3.1: Medidor HI-3604 da *Holaday Industries*.

Esse equipamento é composto basicamente por:

- Unidade HI-3604 (*ELF Field Strength Measurement System*): medidor de campos elétrico e magnético, unidirecional, com ponta de prova embutida e memória para armazenar até 112 leituras;
- Unidade HI-3616 (*Fiber Optic Remote Control*);
- Cabo de fibra ótica com cinco metros de comprimento;
- Software para aquisição dos dados medidos por um computador tipo PC ou portátil, com comunicação por cabo de fibra ótica.

A Figura 3.2 apresenta as respostas em frequência típicas dos filtros disponíveis para as medições de campo elétrico e magnético [41]. Dessa figura pode-se concluir que o medidor HI-3604 mede campos elétricos na faixa de 25Hz a 2kHz e campos magnéticos na faixa de 25Hz a 1,5kHz, considerando -3dB como a frequência de corte.

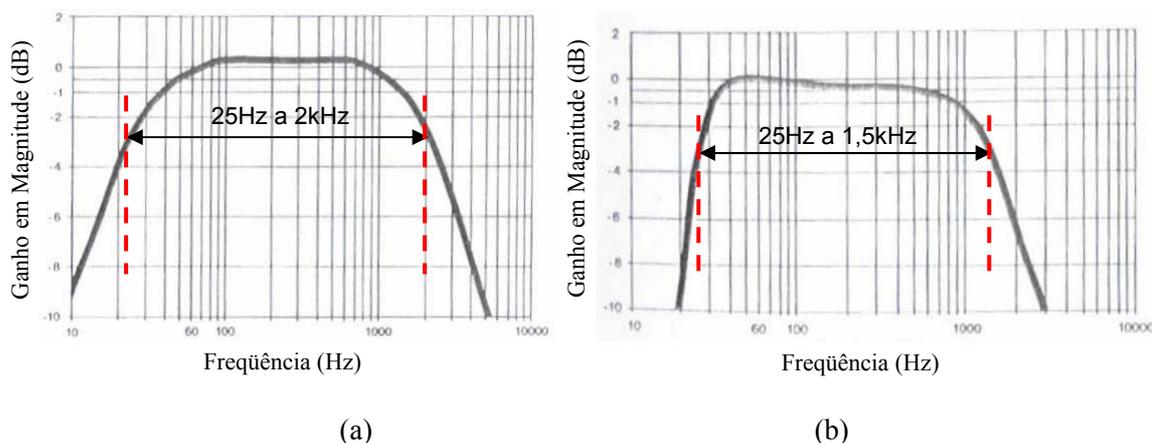


Figura 3.2: Resposta em frequência típica do filtro do medidor HI-3604 para medição de: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.

3.2.2. O MEDIDOR ISOTRÓPICO

O medidor de campos eletromagnéticos EFA-300, da *Wandel & Goltermann*, atual *Narda Safety-Test-Solutions*, apresentado na Figura 3.3, é um equipamento capaz de executar medidas unidirecionais e isotrópicas de intensidade de campos elétrico e magnético de baixa frequência. A faixa de medição de densidade de fluxo magnético é de 100nT a 31,6mT e de campo elétrico é de 10V/m a 100kV/m.

Este medidor é composto por:

- Unidade Principal EFA-300: medidor de campo magnético, isotrópico, com ponta de prova embutida e memória para armazenar até 4.000 registros; essa unidade também opera como controle das medidas de campo elétrico, quando essa função não está sendo executada a partir de um computador portátil;
- Unidade de Campo Elétrico (*E-Unit*): medidor de campo elétrico, isotrópico, com memória para armazenar até 4.000 registros; o comando dessa unidade é feito remotamente pela unidade principal ou por um computador portátil;
- Dois cabos de fibra ótica: 2m e 20m de comprimento;
- Tripé em madeira para uso com a unidade de campo elétrico *E-Unit*;
- Software para aquisição dos dados medidos por um computador tipo PC ou portátil, com comunicação por cabo de fibra ótica.

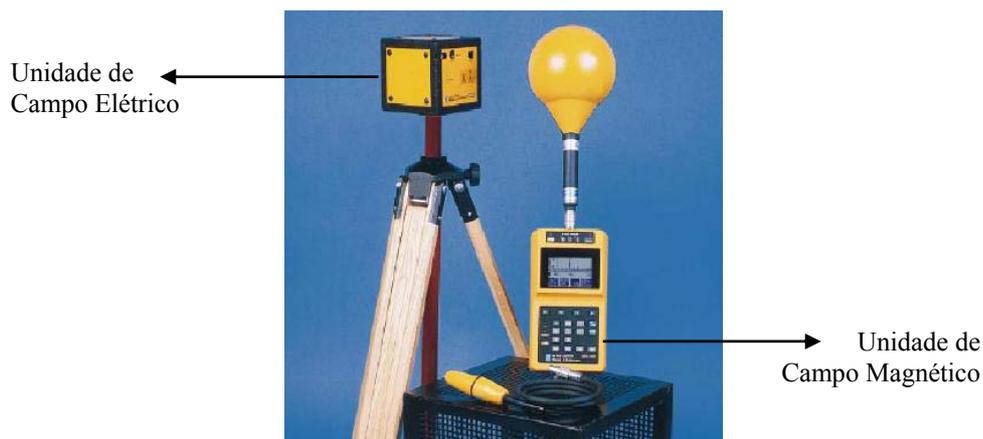


Figura 3.3: Medidor EFA-300 da *Narda Measurements*.

Esse medidor executa medidas na faixa de frequências de 5Hz a 32kHz nas três direções, x , y e z , e também em seu valor isotrópico [42]. A faixa de frequências pode ser selecionada a partir da escolha do tipo de filtro a ser empregado nas medições. A Figura 4.4 apresenta as respostas em frequência típicas dos filtros disponíveis (faixa-larga, passa-faixa e rejeita-faixa) [42].

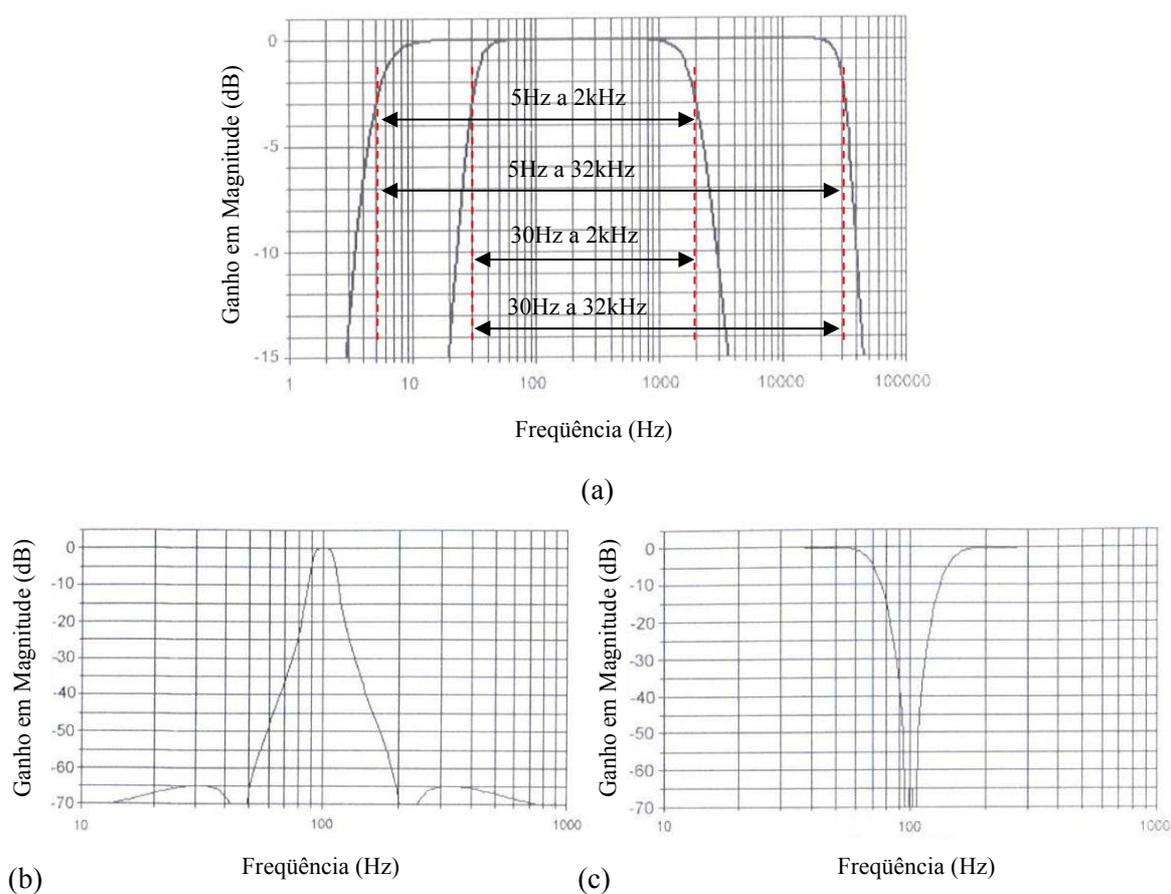


Figura 3.4: Respostas em frequência típicas dos filtros disponíveis no medidor EFA-300 para medição de campos elétrico e magnético: (a) Faixa-larga; (b) Passa-faixa; (c) Rejeita-faixa.

Para efeito das medições de campos elétrico e magnético realizadas com esse medidor, foi utilizado o filtro de faixa-larga, considerando a faixa de frequências de 5Hz a 2kHz.

3.3. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MEDIDORES

Foram escolhidos 12 (doze) pontos no pátio de uma subestação 230/138kV e realizadas 36 (trinta e seis) medidas de campos elétrico e magnético utilizando o medidor HI-3604. O campo magnético foi medido nas direções x e y a uma altura de 1m do solo e o campo elétrico foi medido apenas para a direção y a 70cm do solo. Os valores medidos estão apresentados nas Tabelas D.1, D.2 e D.3 do Apêndice D. A aquisição dos valores medidos foi feita com o auxílio de um computador portátil, tendo sido registradas 5 (cinco) leituras dos valores de campo para cada ponto medido. Essas leituras foram realizadas automaticamente por *software* e programadas para intervalos de três segundos entre elas. Esse recurso possibilita a leitura de um valor médio, ou máximo, a depender da proposta de análise, mais estável.

Utilizando o medidor EFA-300, foram realizadas 96 (noventa e seis) medidas de campos elétrico e magnético para os mesmos 12 (doze) pontos previamente definidos. Com esse medidor, os campos elétrico e magnético foram medidos nas direções x , y e z , e em seu valor isotrópico, a uma altura de 1m do solo. Os valores medidos estão apresentados nas Tabelas D.4 e D.5 do Apêndice D. Nesse caso, foi realizada apenas uma medida para cada grandeza por ponto de medição e a aquisição dos valores medidos de densidade de fluxo magnético foi feita pela unidade principal do EFA-300, e de campo elétrico pela unidade *E-Unit*.

A Figura 3.5 mostra a posição do corte transversal na subestação onde foram realizadas essas medições. A Figura 3.6 apresenta o croqui dos pontos medidos na instalação, onde PL corresponde ao corte transversal da instalação, onde foi executada a série de medições. Os equipamentos existentes na vizinhança dos pontos também estão representados no diagrama. A distância entre os pontos de medição foi de 2,5m.

O instrumento HI-3604 mede a intensidade de campo magnético em ampère por metro (A/m), enquanto que, o EFA-300, mede a densidade de fluxo magnético, dada em teslas (T). Logo, para comparar os valores medidos pelos dois instrumentos foi necessário efetuar a conversão dos valores de campo magnético medidos pelo HI-3604 para densidade de fluxo magnético, por meio da relação $0,1 \mu\text{T} = 80 \text{ mA/m}$, sugerida pelo fabricante do instrumento [41].



Figura 3.5: Corte transversal da subestação 230/138kV onde foram realizadas as medições de campos eletromagnéticos com os medidores unidirecional e isotrópico.

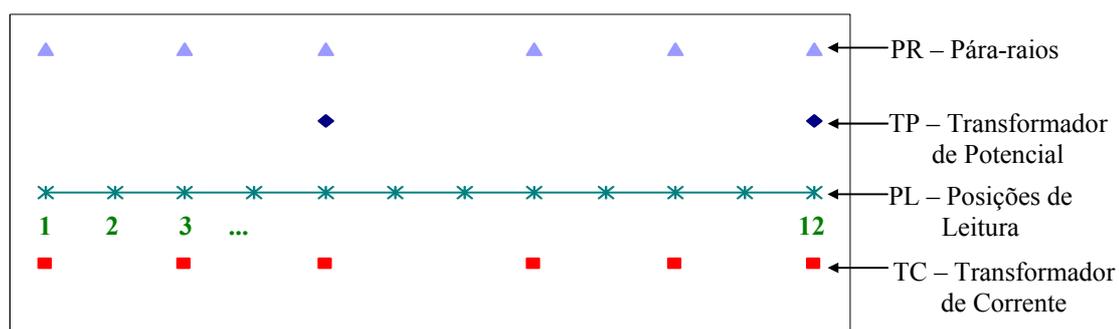


Figura 3.6: Croqui de referência para as medições.

Os gráficos das Figuras 3.7 e 3.8 apresentam, respectivamente, as medições realizadas de campos magnético e elétrico pelo instrumento unidirecional e pelo instrumento isotrópico. Considere: B_{iso} o valor da densidade de fluxo magnético total medida pelo instrumento isotrópico; $B_{x_{iso}}$, $B_{y_{iso}}$ e $B_{z_{iso}}$, respectivamente, o valor da densidade de fluxo magnético na direção x, y e z medida pelo instrumento isotrópico; $B_{x_{uni}}$ e $B_{y_{uni}}$, respectivamente, o valor da densidade de fluxo magnético na direção x e y medida pelo instrumento unidirecional. A mesma nomenclatura aplica-se para as medidas de campo elétrico.

A título de ilustração, a Figura 3.9 apresenta o quadro de horários das medições dos doze pontos medidos pelo medidor EFA-300.

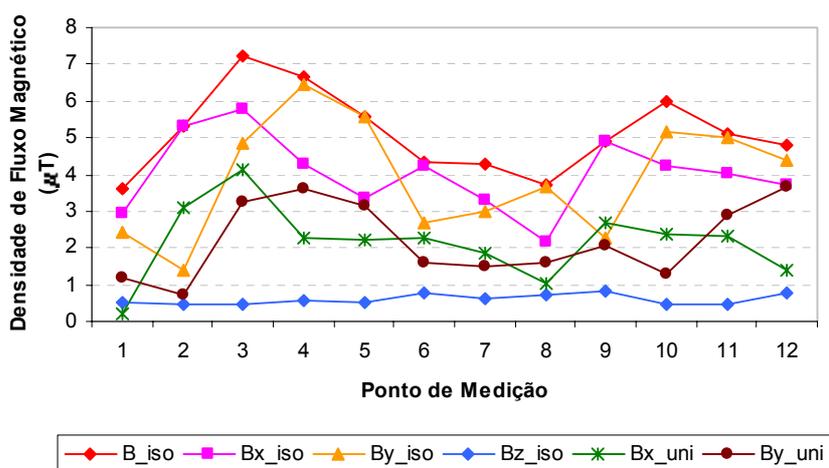


Figura 3.7: Valores de densidade de fluxo magnético medidos com os instrumentos unidirecional e isotrópico.

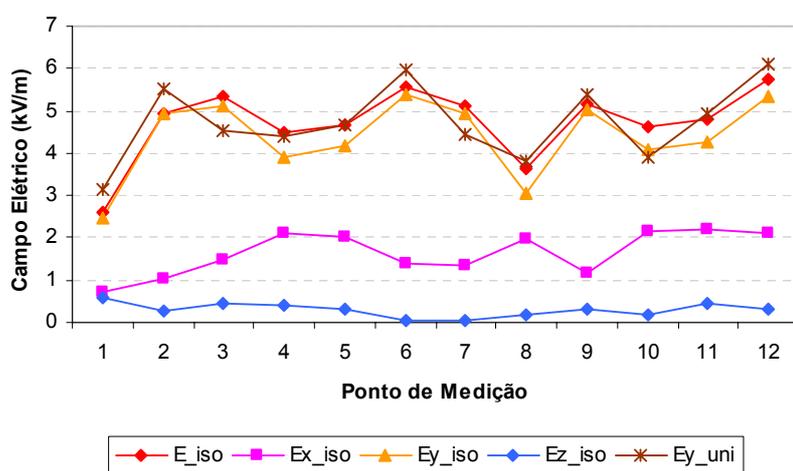


Figura 3.8: Valores de campo elétrico medidos com os instrumentos unidirecional e isotrópico.

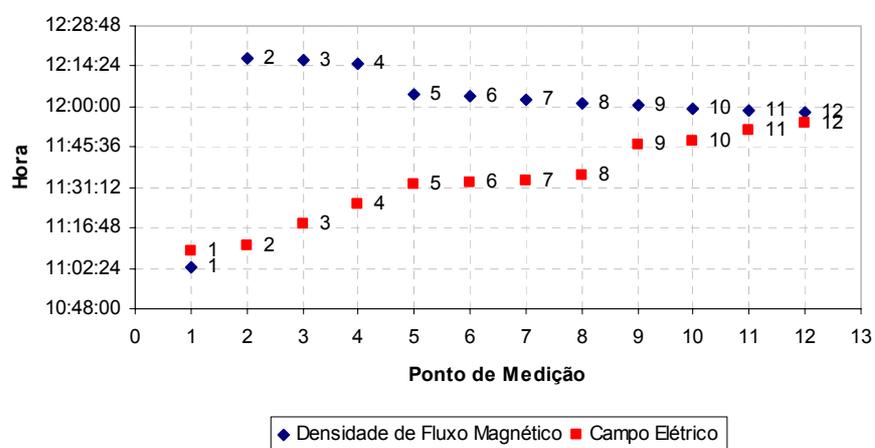


Figura 3.9: Horário das medições realizadas com o medidor EFA-300.

O horário em que foram realizadas as medições interfere diretamente nos valores medidos de campos magnético e elétrico, uma vez que os campos eletromagnéticos variam em função das tensões e correntes do sistema, que, por sua vez, variam com a carga da instalação. Os procedimentos de operação da subestação também podem alterar esses valores.

3.3.1. CONSIDERAÇÕES QUANTO ÀS MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO

Da Figura 3.7 verifica-se que a estimativa do valor do campo magnético da instalação pelas componentes medidas pelo instrumento unidirecional não se constituiu um resultado efetivamente confiável; o medidor unidirecional está sujeito a erros humanos consideráveis, o que torna essencial seu emprego nas condições sugeridas no procedimento definido para sua utilização.

A Figura 3.10 apresenta um gráfico dos valores de densidade de fluxo magnético medidos pelos dois instrumentos, considerando as componentes transversal, direção x , e vertical, direção y . Da figura, verifica-se que não há como estabelecer uma relação ou uma aproximação válida entre os valores medidos pelos dois instrumentos para os mesmos pontos. Nesse caso, não há como comparar a validade da medida feita pelo instrumento unidirecional com a medida efetuada pelo instrumento isotrópico.

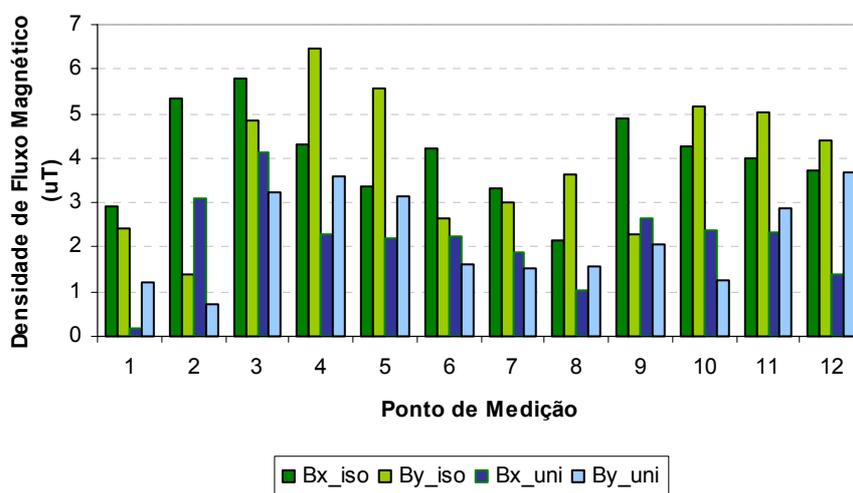


Figura 3.10: Componentes x e y da densidade de fluxo magnético medidas com os instrumentos unidirecional e isotrópico.

Como uma subestação de alta tensão é uma instalação onde os acoplamentos das diversas fontes de campo magnético não podem ser desprezados, a medição do campo magnético com um

instrumento unidirecional não é recomendável, devendo-se optar, sempre que possível, por um medidor isotrópico.

O valor isotrópico do campo representa sua resultante no ponto medido, correspondente ao módulo dos fasores das direções x , y e z . Logo, no caso da medição das componentes x , y e z , é possível calcular o valor do campo resultante no ponto medido pela da equação

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} . \quad (3.1)$$

Partindo do pressuposto que os instrumentos de medição utilizados estavam aferidos e calibrados, pode-se assegurar que as medidas realizadas com o EFA-300 são mais precisas que as realizadas com o HI-3604.

Tomando como base as medições realizadas com o EFA-300, é possível comparar a característica isotrópica obtida diretamente pelo instrumento com o valor calculado a partir da aplicação da Equação (3.1) às componentes x , y e z medidas. A Figura 3.11 apresenta as curvas relativas a esses valores, na qual se evidencia uma diferença entre os valores medido e calculado, que, teoricamente, não deveria existir. Essa diferença decorre do registro dos valores medidos das componentes x , y e z e do valor isotrópico não ter sido efetuado simultaneamente, caracterizando assim “instantes de medida” distintos para cada uma delas. Logo, pode-se afirmar que o valor da densidade de fluxo magnético medido diretamente em seu valor isotrópico retrata o resultado mais preciso dos campos em subestações.

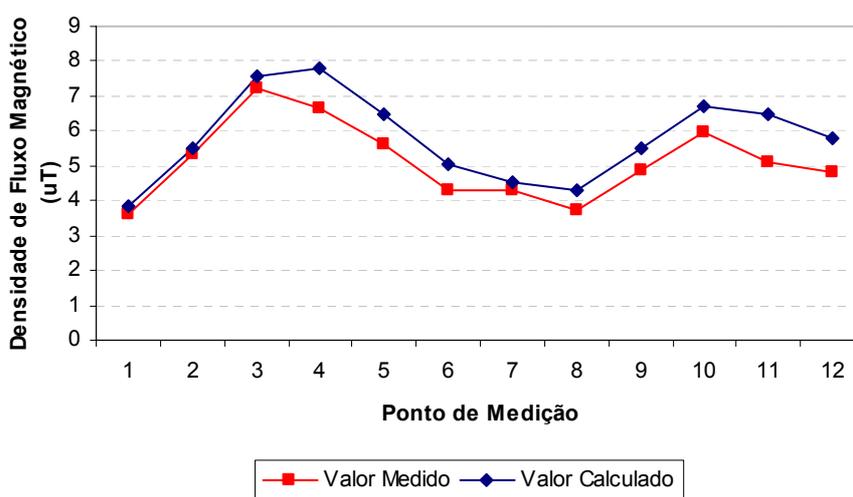


Figura 3.11: Densidade de fluxo magnético isotrópica: valores medido e calculado.

3.3.2. CONSIDERAÇÕES QUANTO ÀS MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO

Quando o objeto de medição de campos elétricos é caracterizar o ambiente eletromagnético na vizinhança de linhas de transmissão, a medição da componente de campo na direção y é suficiente; isto ocorre porque as componentes nas direções x e z se compensam e o valor de E_y se constitui boa aproximação da medida isotrópica do campo no ponto avaliado. Se o sistema envolve uma maior complexidade, como a existência de barramentos, circuitos cruzados e equipamentos, essa aproximação pode ser considerada grosseira e o emprego do medidor isotrópico é mais indicado [43].

A partir da Figura 3.8 verifica-se que a componente y do campo elétrico, medida pelo instrumento unidirecional, tem seu valor da ordem de grandeza do valor medido pelo instrumento isotrópico. A Figura 3.12 apresenta os valores das componentes y e medidas pelos dois instrumentos, E_{y_iso} e E_{y_uni} , e o valor de campo isotrópico medido pelo instrumento isotrópico, E_{iso} .

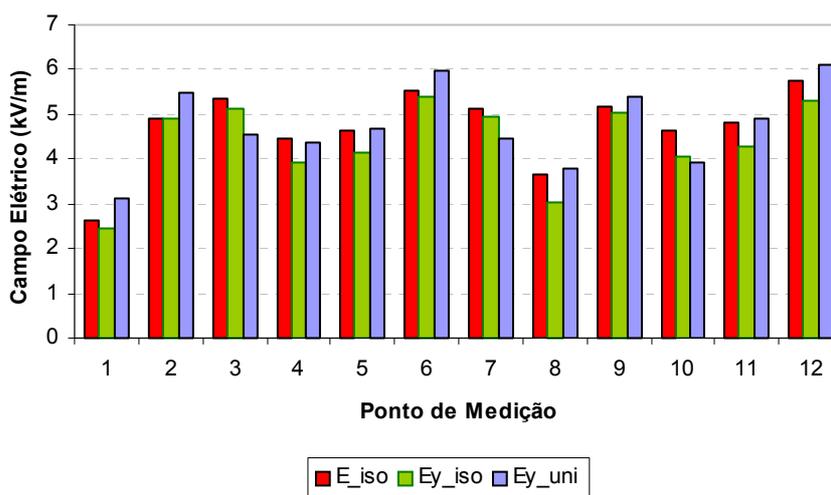


Figura 3.12: Campo elétrico: componentes y e valor isotrópico.

Analisando a Figura 3.12 constata-se que os valores de campo elétrico medidos na direção y se aproximam da resultante de campo definida por seu valor isotrópico. Pode-se observar, entretanto, que esse comportamento não é constante para todos os pontos medidos. Isto ocorre devido à natureza dos acoplamentos existentes na instalação, função da existência de várias fontes de energia eletromagnética que interagem na instalação.

Considerando as medições realizadas com o EFA-300, a Figura 3.13 apresenta os valores isotrópicos de campo elétrico, medido e calculado.

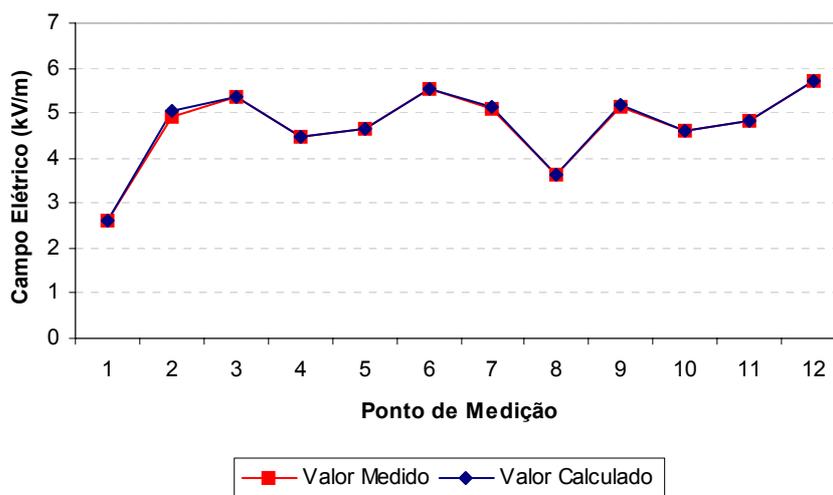


Figura 3.13: Campo elétrico isotrópico: valores medido e calculado.

Observa-se que a diferença entre esses valores é menor do que a observada na medição da densidade de fluxo magnético. Esse é um resultado esperado, tendo em vista que a variação de tensão em uma subestação é bem menor que a variação de corrente.

3.3.3. CONCLUSÕES

O caráter isotrópico do instrumento EFA-300 traduz as intensidades de campo medidas com mais precisão do que o HI-3604 e, por este motivo, é recomendável o emprego de medidores isotrópicos nas medições de campos eletromagnéticos em subestações.

Em função da característica dinâmica das subestações do sistema elétrico, os instrumentos unidirecionais não são adequados para a realização desse tipo de medição, pois eles não são capazes de medir simultaneamente as componentes x , y e z dos campos eletromagnéticos, que são intensamente acoplados no ambiente eletromagnético de uma subestação. Algumas empresas do setor elétrico dispõem de medidores unidirecionais para avaliação do campo eletromagnético na vizinhança de linhas de transmissão e não dispõem de medidores isotrópicos, cujo custo é bem mais elevado. Isto torna o emprego desses instrumentos unidirecionais atraente para essas empresas, embora o seu emprego em subestações não seja o mais indicado.

Na avaliação do campo magnético o emprego do medidor unidirecional resulta em uma medição grosseira para as componentes x , y e z , mas que pode ser considerada aceitável em

instalações nas quais se observe pouca influência do arranjo da subestação quanto à natureza dos acoplamentos existentes, ou que atendam aos seguintes requisitos:

- As medições devem ser efetuadas nos horários nos quais a curva de carga da instalação apresenta a menor variação possível; ou seja, o erro inserido nessa medida em função do tempo e da variação de corrente é minimizado; como a curva de carga de uma subestação é aleatória, é preciso analisar o histórico recente da subestação antes de proceder às medições;
- Deve-se assegurar a não-coincidência do instante da medida com a ocorrência de manobras da instalação, sejam estas automáticas ou manuais. Neste caso, mesmo que a corrente esteja aparentemente constante, o campo magnético variará substancialmente entre uma leitura e outra;
- Devem ser executadas séries de três a cinco leituras da mesma medida eletronicamente com auxílio de um microcomputador portátil, considerando um intervalo entre os registros dos valores da ordem de dois a três segundos. Dessa forma é possível verificar a estabilidade do valor medido.

Com relação à avaliação dos campos elétricos, verifica-se que os valores medidos com o instrumento unidirecional, na direção y , se aproximam dos valores medidos com o instrumento isotrópico. Por esse motivo, é possível aproximar a medida de campo elétrico em uma instalação pelo valor de sua componente na direção y ., sem incorrer em erros significativos.

Logo, o emprego de medidores unidirecionais em subestações de concessionárias de distribuição de energia elétrica de pequeno porte pode ser aceitável sob as condições específicas já citadas, mas não se aplica às subestações compactadas ou às subestações urbanas dos grandes centros de consumo, que costumam ter potência nominal e densidade de carga elevadas. Nesses casos, o emprego do medidor isotrópico é fundamental.

3.4. ASPECTOS QUE INTERFEREM NAS MEDIÇÕES

A característica dinâmica das subestações do sistema elétrico e a aleatoriedade dos eventos que envolvem essas instalações são dois aspectos básicos e fundamentais que dificultam a caracterização de seu ambiente eletromagnético.

3.4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SUBESTAÇÃO

Uma subestação é projetada para atender às condições de carga do mercado consumidor considerando um horizonte médio de 20 anos. Ao longo do período de análise são propostas modificações e ampliações na capacidade instalada que podem contemplar alternativas como:

- Entrada em operação de outros transformadores de potência ou a substituição dos existentes por outros de maior potência, que geralmente dispõem de um comutador de tensão automático sob carga (*Load Tap Changer – LTC*);
- Novas entradas e saídas de linha, tanto na alta como na baixa tensão;
- Entrada em operação ou ampliação de bancos de capacitores e/ou reatores;
- Instalação de reguladores de tensão, entre outras.

Cada uma dessas alternativas modifica o arranjo da instalação e interfere na natureza e intensidade dos acoplamentos existentes, o que define um novo perfil eletromagnético para a instalação.

Como a tendência predominante de mercado é a ampliação das subestações, pode-se afirmar que o ambiente eletromagnético destas torna-se mais complexo, mais denso. As ampliações resultam na necessidade de revisão do projeto do sistema de aterramento e na alteração ou substituição dos dispositivos automatizados de medição, proteção e controle instalados na planta. Nesses casos os requisitos da EMC precisam ser considerados de forma a assegurar o desempenho satisfatório desses dispositivos no “novo” ambiente eletromagnético da subestação.

3.4.2. A CARGA DA SUBESTAÇÃO

A previsão de carga de uma subestação é feita em bloco para cada ano de referência de estudo, com base em fatores históricos e análises estatísticas desenvolvidas pelos Analistas de Mercado das Empresas do Setor Elétrico. A partir dessa análise se define o cronograma de obras da subestação e do sistema no qual ela está inserida.

A carga do sistema, é, pois, o primeiro dado aleatório a ser considerado na subestação. A operação da subestação da concessionária está condicionada ao comportamento das cargas secundárias e que, geralmente, variam continuamente. A curva de carga diária de uma subestação é

obtida a partir das medições de tensão e corrente na instalação e reflete o caráter dinâmico e a aleatoriedade dos valores.

Como exemplo, as Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão, de corrente e de carga para um dia típico em uma subestação 138/13,8kV.

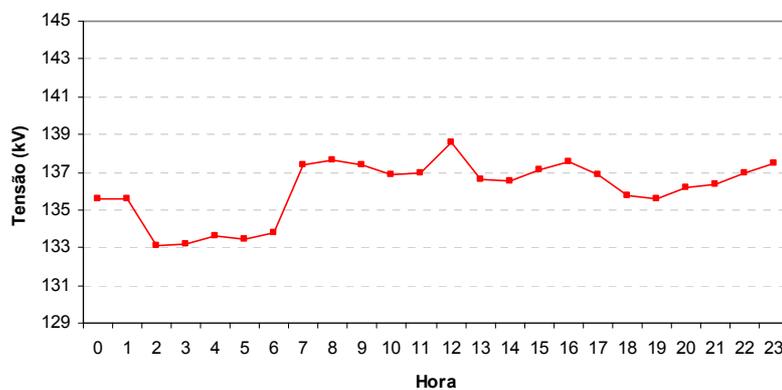


Figura 3.14: Perfil diário de tensão em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.

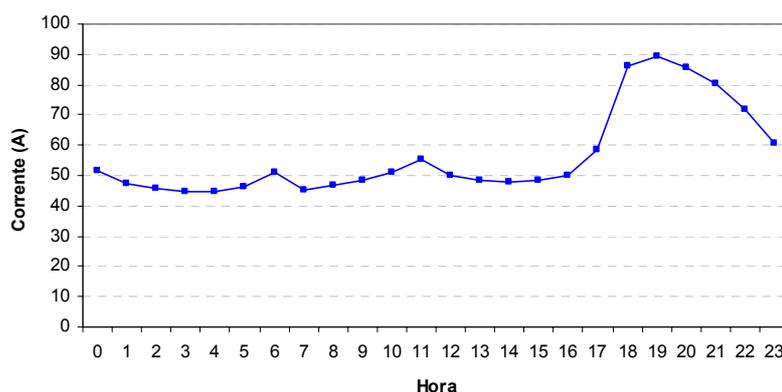


Figura 3.15: Perfil diário da corrente em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.

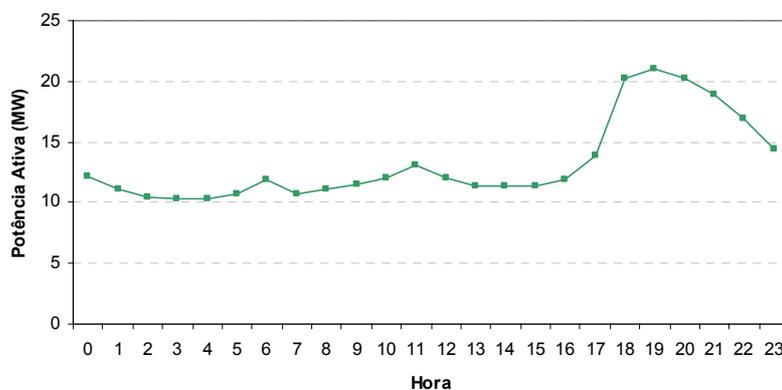


Figura 3.16: Perfil diário da carga em uma subestação 138/13,8kV, lado de 138kV.

A curva da Figura 3.16 é bastante similar à curva apresentada na Figura 3.15, o que possibilita o uso da curva de corrente como curva de carga, principalmente para as subestações que só possuem medição de corrente. A partir desses gráficos verifica-se que a carga varia continuamente, sem que se identifique, a priori, um período do dia em que ela possa ser considerada constante.

A variação de carga na subestação não interfere apenas nos níveis de tensão e corrente da instalação, mas também na operação de outros dispositivos da instalação, como reguladores de tensão, banco de capacitores, reatores e *taps* dos transformadores, principalmente se esses dispõem de comutador sob carga, que é o caso da maioria dos transformadores de potência acima de 10MVA. A operação desses dispositivos ocasionará uma variação nos valores de campo medidos, sem que se possa identificar, nos dados de corrente e tensão da concessionária, o momento exato em que ocorreu uma manobra do sistema.

As variações de carga podem ainda exceder os limites da faixa de operação normal da subestação, geralmente de 95% a 105% da tensão nominal [1], e gerar distúrbios como as variações de tensão de curta duração (VTCD), caracterizados por variações de tensão superiores a 110% ou inferiores a 90% da tensão nominal do sistema [2], que podem interferir no desempenho do sistema e causar a falha de operação dos dispositivos instalados. Esses eventos, diretamente associados à operação em regime permanente, são objeto de estudo da Qualidade da Energia, da qual a Compatibilidade Eletromagnética também é parte relevante, visando assegurar o desempenho satisfatório do sistema em condição normal de operação, mesmo diante da ocorrência desses distúrbios.

3.4.3. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Como já discutido no decorrer deste capítulo, as características dos medidores de campo interferem diretamente na qualidade da medição realizada. Dentre estas características destacam-se a precisão do aparelho, a estabilidade das medidas efetuadas, o erro intrínseco do aparelho, a calibração, a sensibilidade para efetuar os registros dos dados e ainda, a susceptibilidade do instrumento aos eventos eletromagnéticos no ambiente. Quanto mais sensível e preciso é um instrumento, maior o seu custo.

A avaliação do ambiente eletromagnético de uma subestação deve considerar esses aspectos, bem como o objetivo principal da avaliação, para que se possa identificar o instrumento mais adequado.

Outra característica importante refere-se à resposta em frequência dos filtros disponíveis no aparelho. A crescente implementação de dispositivos digitais em subestações tem elevado a faixa de frequências das ocorrências observadas no interior das subestações, o que torna necessário avaliar o ambiente eletromagnético da instalação, não apenas para a faixa das baixas frequências, mas também para faixas de frequências mais elevadas.

No caso do mapeamento completo da instalação, onde a operação em regime permanente é observada juntamente com transitórios de manobra, seria necessário o emprego de outros instrumentos de medição, como os analisadores de EMC, ou ainda, os osciloscópios digitais de elevada precisão e elevadas taxas de amostragem [44]. Todos esses equipamentos têm custo elevado e, por este motivo, as investigações da EMC no âmbito das subestações ainda permanecem restritas a casos isolados.

3.4.4. OUTROS FATORES

O erro humano é parte integrante de todo o processo de avaliação de campos eletromagnéticos em subestações. Ele ocorre durante a execução das medições e também durante a sua análise.

Durante as medições os erros mais comuns são:

- Escolha dos horários de medição;
- Medição das distâncias e marcação dos pontos;
- Posicionamento do aparelho durante as medições de campo magnético;
- Posicionamento do sensor de campo elétrico durante as medições;
- Erro de posicionamento na instalação: coordenada do ponto e o local medido, principalmente na repetição da medição de um mesmo ponto;
- Erro de armazenamento dos dados;
- Erros de leitura;
- Erros na correspondência de dados entre o mapa de medição e as posições de memória do medidor;
- Cansaço físico, entre outros.

O horário das medições é um aspecto importante a ser observado durante a avaliação do ambiente eletromagnético da subestação. O caráter dinâmico da instalação e a contínua variação dos valores de tensão e corrente não podem ser desprezados e podem acarretar erros significativos, principalmente em instalações de maior porte. Subestações de maiores dimensões necessitam de um número maior de pontos de medição, o que demanda tempo e trabalho. Do ponto de vista prático sugere-se uma avaliação abrangente do ambiente eletromagnético da instalação em que se conciliem a viabilidade de execução e o grau de precisão da avaliação.

Além dos aspectos citados, ainda podem ser fontes de falha nas medições de campo em subestações:

- Aspectos climáticos e de relevo;
- Regime de operação da subestação;
- A ocorrência de transitórios rápidos e de faltas no sistema;
- As características do sistema de aterramento, entre outros.

3.5. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

3.5.1. CRITÉRIOS DE MEDIÇÃO

Para a realização das medições foram estabelecidos alguns critérios e procedimentos preliminares:

- Em nenhum dos casos analisados foi realizado o mapeamento eletromagnético completo da instalação. Nesse caso, seria necessário o levantamento dos valores de campo elétrico e magnético de toda a área da instalação, incluindo a casa de comando, o sistema de aterramento e toda a área interligada a este, mesmo que fora dos limites físicos da instalação;
- Todas as medições foram realizadas em regime permanente e fora do horário de ponta da instalação. As manobras não foram incluídas neste estudo;
- As subestações analisadas não possuem dispositivos de regulação de tensão. A existência de comutadores sob carga ou de reguladores de tensão torna a análise dos campos mais complexa e não favorece a identificação dos mecanismos de acoplamento existentes nas subestações;

- Os horários de medição foram definidos considerando variações de carga de até 20%. Com isso, as medições foram realizadas em intervalos de duas a quatro horas, sempre iniciados no turno da manhã e fora da ponta do sistema;
- A distância mínima de monitoração da medição de campo elétrico foi de 10 metros. A distância considerada visou assegurar que a presença da equipe na instalação não iria interferir nos valores de campo medidos.

3.5.2. AS SUBESTAÇÕES AVALIADAS

Nesta pesquisa foram consideradas medições de campos eletromagnéticos em três subestações do sistema elétrico, aqui denominadas, SE Alfa, SE Beta e SE Gama.

A primeira subestação analisada foi a SE Alfa. Nela foi considerada a utilização do medidor unidirecional HI-3604 e só foram medidos pontos na vizinhança dos equipamentos da instalação. A partir do resultado dessa avaliação, optou-se por ampliar a investigação para a análise do ambiente de uma subestação por meio de cortes transversais e longitudinais na vizinhança dos equipamentos instalados. Essa metodologia foi aplicada a SE Beta, fazendo uso do medidor isotrópico EFA-300.

A avaliação da SE Beta forneceu informações relevantes acerca das características dos acoplamentos existentes em subestações sob a condição de operação de regime permanente. Entretanto, visando ampliar e sedimentar as observações feitas na SE Beta, optou-se pela realização de mais uma série de medições, visando mapear uma subestação. Esse mapeamento eletromagnético foi realizado no pátio 69/13,8kV da SE Gama, também com o uso do medidor isotrópico EFA-300.

3.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os instrumentos utilizados nas medições de campos eletromagnéticos nesta pesquisa. Foram analisados os fatores que interferem nas medições e estabelecidos os critérios de medição a serem adotados na avaliação das subestações Alfa, Beta e Gama. As conclusões obtidas em cada uma destas avaliações são apresentadas, respectivamente, nos Capítulos 4, 5 e 6 e subsidiam a metodologia proposta no Capítulo 7 e as conclusões e recomendações desta pesquisa, apresentadas no Capítulo 8.

CAPÍTULO 4

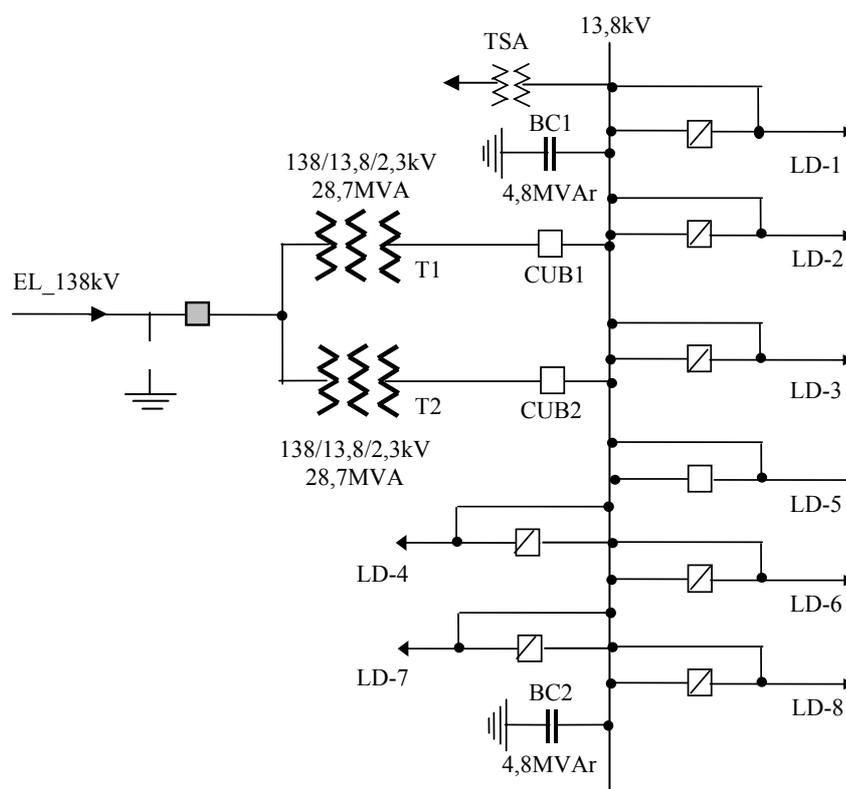
MEDIÇÃO DE CAMPOS

ELETROMAGNÉTICOS NA SUBESTAÇÃO

ALFA

4.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO

A subestação (SE) Alfa é uma subestação 138-13,8kV, de 57,4MVA, com dois bancos de capacitores de 4,8MVAr, uma entrada de linha em 138kV e oito alimentadores de distribuição em 13,8kV. Seu diagrama unifilar simplificado é apresentado na Figura 4.1.



Legenda:

EL_138kV: Entrada de Linha em 138kV

T1, T2: Transformadores de Potência 138-13,8kV

TSA: Transformador de Serviços Auxiliares

BC1, BC2: Bancos de Capacitores

LD-1 a 8: Saídas de linha em 13,8kV

Figura 4.1: Diagrama unifilar simplificado da subestação Alfa.

A Figura 4.2 apresenta um esboço da planta baixa referente ao pátio da subestação Alfa.

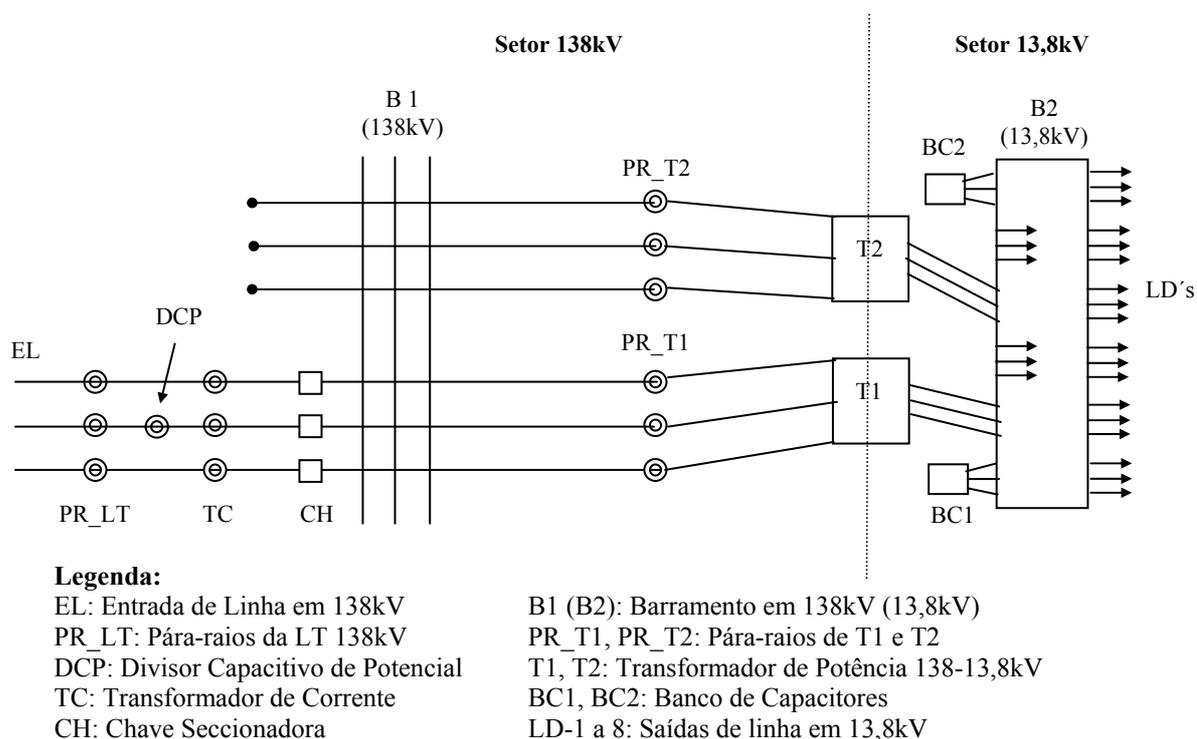


Figura 4.2: Croqui da SE Alfa.

4.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO

Na subestação Alfa o transformador T1 é mantido energizado a vazio, constituindo-se em reserva quente do transformador T2. Assim, T1 só deve entrar em operação quando T2, que alimenta as cargas da SE Alfa, encontra-se fora de serviço, ou ainda, quando, excepcionalmente, a carga excede a potência nominal de T2. Neste caso, T1 opera em paralelo com T2, dividindo com este o carregamento da instalação.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as curvas de variação e tensão e corrente na SE Alfa relativas ao dia das medições; na Figura 4.5 estão representadas as curvas de potência ativa e reativa medidas em relação ao secundário dos transformadores de potência T1 e T2, que correspondem à curva de carga da subestação. Analisando essas figuras, verifica-se que o transformador T2 supre satisfatoriamente às cargas secundárias da SE Alfa, mesmo no horário de ponta do sistema, quando seu carregamento atinge cerca de 80% de sua potência nominal. Como transformador T1 está energizado a vazio, a corrente nele é praticamente nula e a curva de corrente mostrada na Figura 4.4 refere-se exclusivamente ao transformador T2.

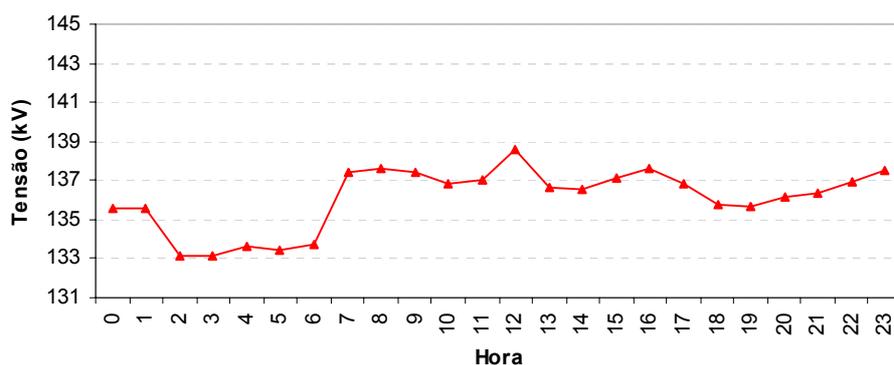


Figura 4.3: Perfil diário de tensão no setor 138kV da subestação Alfa.

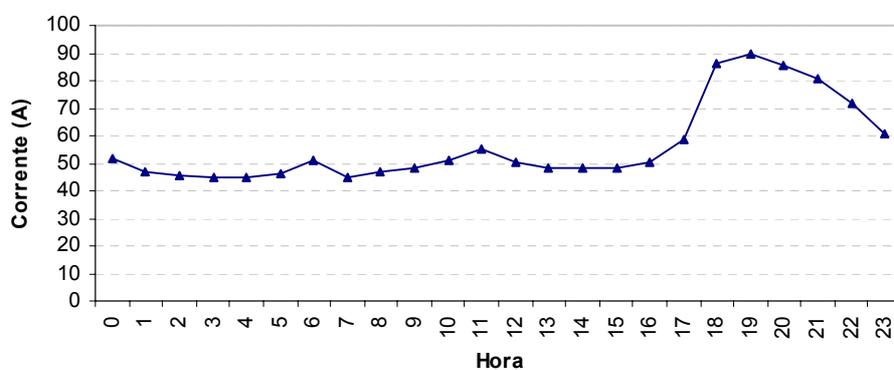


Figura 4.4: Perfil diário da corrente no setor 138kV da subestação Alfa.

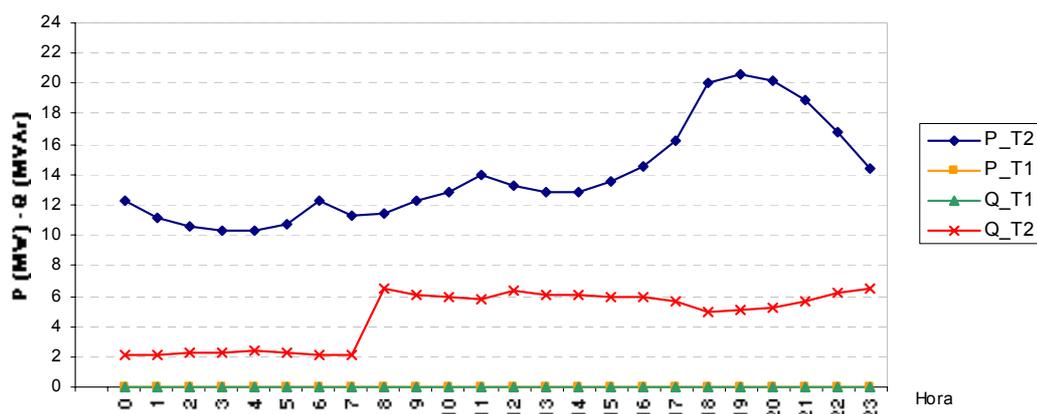


Figura 4.5: Perfil de potência ativa (MW) e potência reativa (MVar) na subestação Alfa.

Apesar da corrente de T1 ser praticamente nula, irá existir tensão em seu secundário, como mostrado na Figura 4.6.

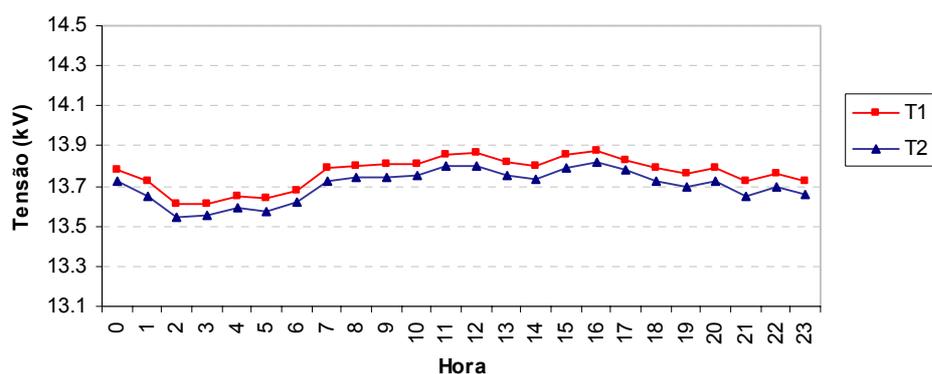


Figura 4.6: Curvas de tensão nos secundários dos transformadores T1 e T2.

As Figuras 4.7 a 4.9 apresentam as curvas relativas às correntes no secundário dos transformadores T1 e T2, e nos oito alimentadores da subestação em 13,8kV.

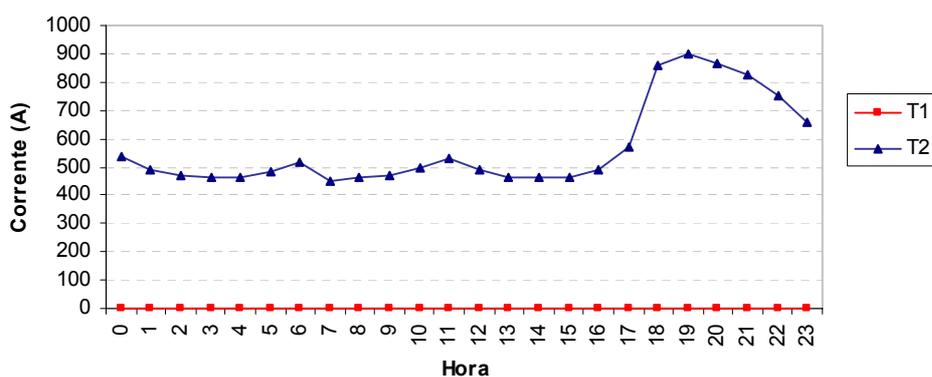


Figura 4.7: Curvas de corrente nos secundários dos transformadores T1 e T2.

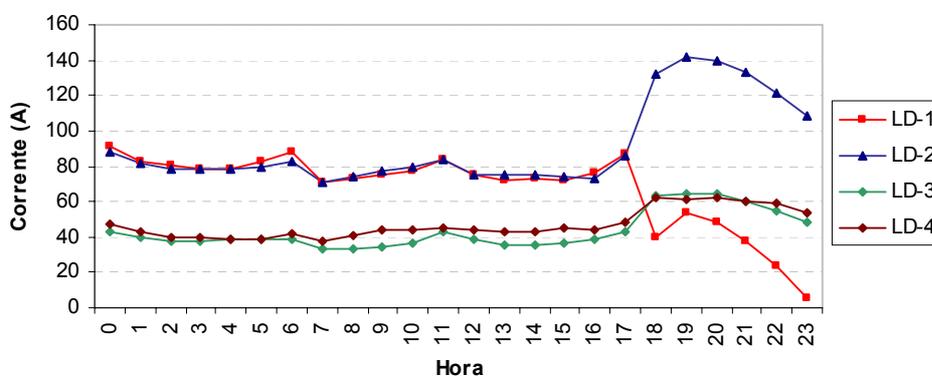


Figura 4.8: Curvas de corrente nos alimentadores em 13,8kV: LD-1 a LD-4.

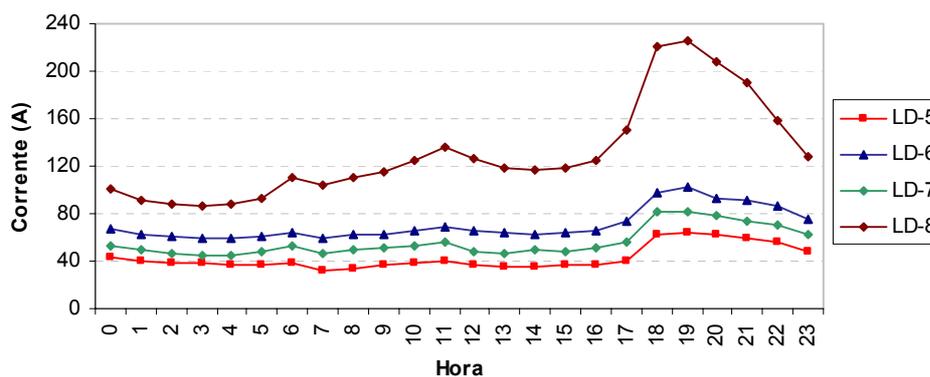


Figura 4.9: Curvas de corrente nos alimentadores em 13,8kV: LD-5 a LD-8.

4.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições na SE Alfa foram realizadas pela manhã, fora do horário de ponta da instalação, nos seguintes pontos:

- Entrada de linha de transmissão em 138kV (EL_138), antes do pára-raios (PR_LT), entre o pára-raios e os transformadores de corrente (TC) e entre esses e a chave seccionadora (SEC);
- Vizinhança dos equipamentos, tanto na alta quanto na baixa tensão: nos pára-raios dos transformadores de potência (PR_T1, PR_T2), no ponto médio do barramento em 138kV (B1), nos transformadores (T1_AT, T1_BT, T2_AT, T2_BT), nos cubículos dos disjuntores dos circuitos gerais em 13,8kV (CUB1, CUB2) e nos bancos de capacitores (BC_T1, BC_B1, BC_T2, BC_B2);
- Saídas de linha em 13,8kV: alimentadores em 13,8kV (LD-1 a 8) e no alimentador do banco de capacitores (EL_BC).

As medições de campo elétrico e magnético na SE Alfa foram realizadas com o medidor unidirecional HI-3604 para um total de 71 pontos na instalação. Nessa avaliação, o campo magnético foi medido para as direções x , y e z a uma altura média entre 70cm e 100cm do solo. A partir dessas componentes, o valor da resultante de campo magnético foi calculado usando a Equação (3.1). O campo elétrico foi medido apenas na direção y à altura de 70cm do solo e a distância linear entre os equipamentos da subestação e o medidor HI-3604 variou de 1,2m a 1,5m. Os valores medidos e calculados estão apresentados na Tabela D.6 do Apêndice D.

4.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO

O sentido estabelecido para as componentes de campo magnético em relação aos eixos coordenados e sua aplicação ao arranjo da subestação obedeceu ao diagrama fasorial apresentado na Figura 4.10. Os dados medidos foram representados na forma $P(P_x, P_y, P_z)$, em que as coordenadas P_x e P_y referem-se às coordenadas x e y da planta baixa da subestação e a coordenada P_z , aos valores de campo E_y ou B_y .

As Figuras 4.11 a 4.14 apresentam os croquis relativos aos pontos medidos na subestação Alfa, identificando as distâncias envolvidas, a posição das fases, a localização dos equipamentos e a posição de leitura considerada em cada caso.

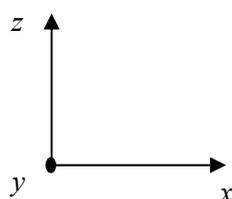


Figura 4.10: Eixos de Coordenadas x , y e z .

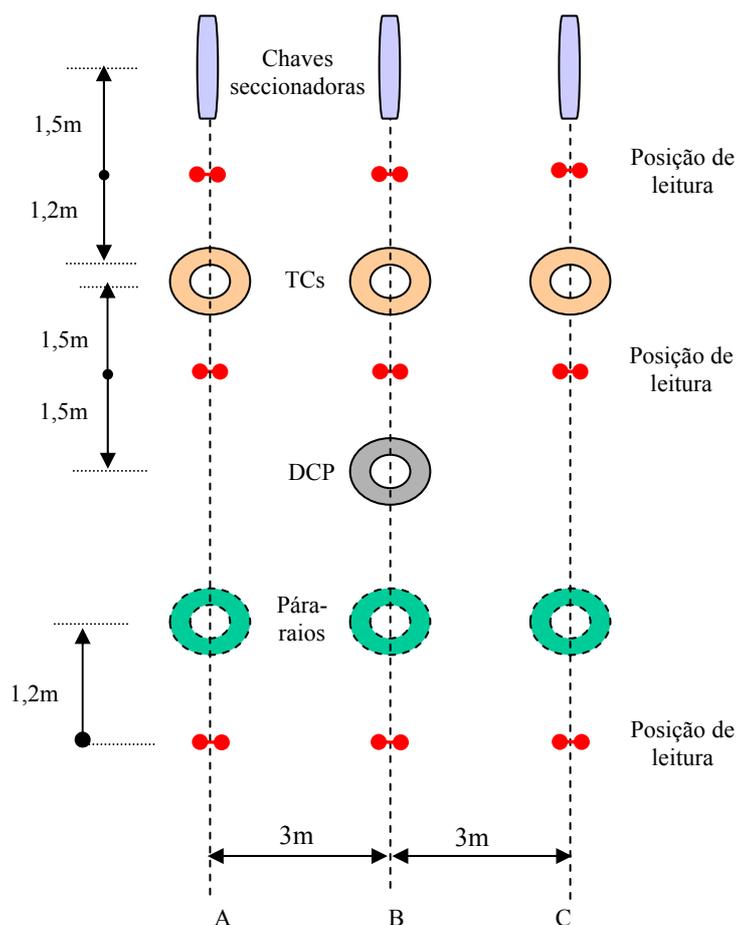


Figura 4.11: Croqui de medição nas proximidades do pára-raios, dos TCs e das chaves seccionadoras do setor 138kV.

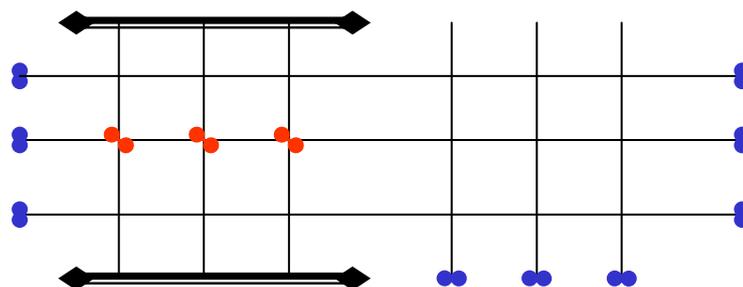


Figura 4.12: Croqui de medição no barramento 138kV.

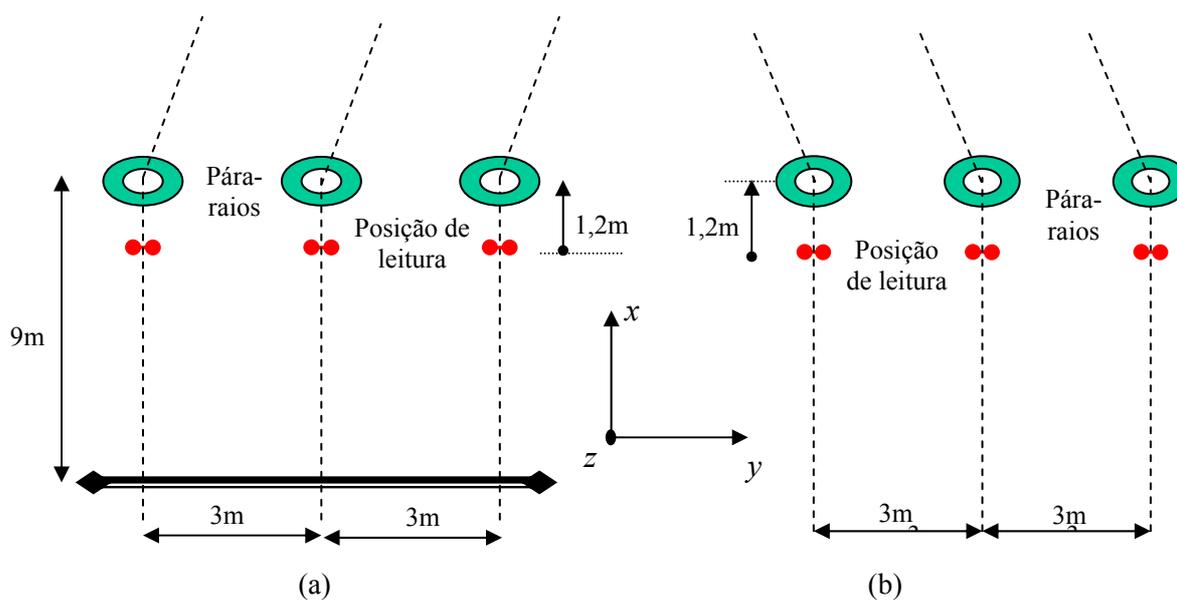


Figura 4.13: Croqui de medição nas proximidades do pára-raios do lado primário (AT) dos transformadores: (a) T1; (b) T2.

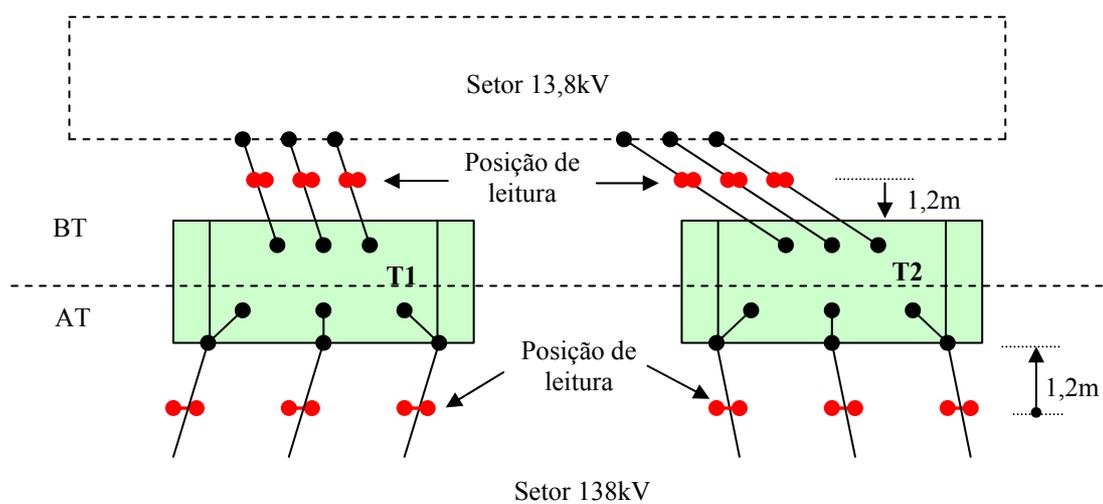


Figura 4.14: Croqui de medição nas proximidades dos transformadores T1 e T2.

A Figura 4.15 mostra a distribuição das saídas de linha em 13,8kV da subestação. Nesse caso, os valores de campo foram medidos sob cada uma das fases das saídas de linha LD-1 a LD-8 e das saídas para os bancos de capacitores. Também foram medidos pontos na vizinhança das chaves de comando dos bancos de capacitores BC1 e BC2 existentes na instalação.

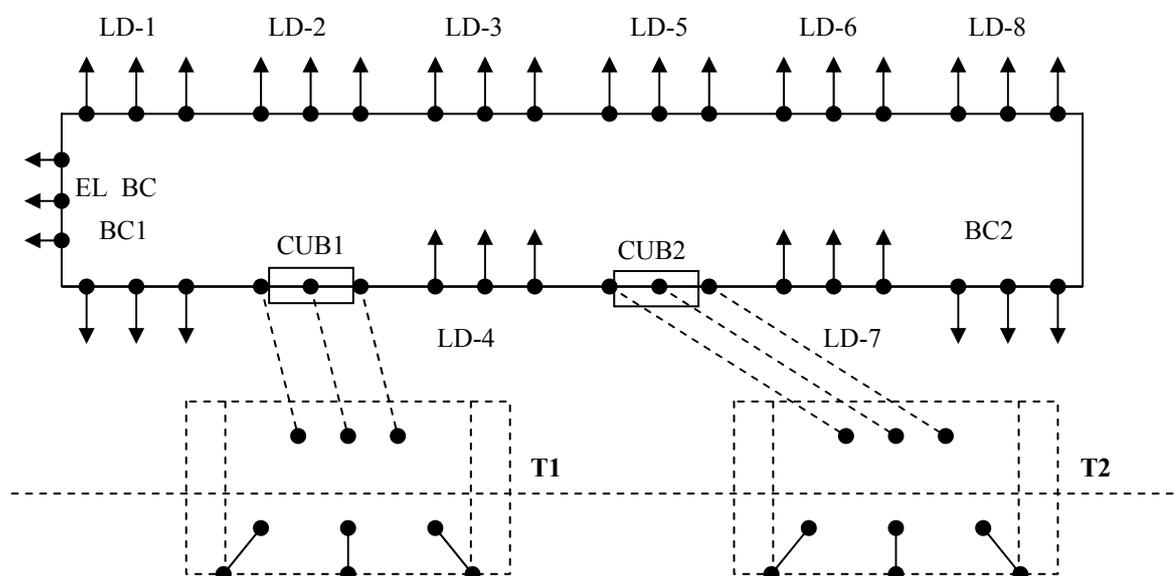


Figura 4.15: Distribuição das saídas de linha em 13,8kV: LD-1 a LD-8 e bancos de capacitores BC1 e BC2.

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores de campo medidos na instalação decorrem dos acoplamentos na instalação, que são resultados da superposição das componentes vetoriais, definidas pelo arranjo da instalação e pelos valores de tensão e corrente do sistema. As contribuições são definidas pelas componentes vetoriais de cada fonte isoladamente: se essas componentes estão em oposição, determinam como resultante um valor de campo atenuado; se essas componentes se somam e não se atenuam, o valor de campo resultante é mais significativo, pois ocorre uma superposição aditiva destas componentes.

As Figuras 4.16 a 4.19 mostram os valores de campos elétrico e magnético medidos sob cada fase, considerando os setores 138kV e 13,8kV separadamente.

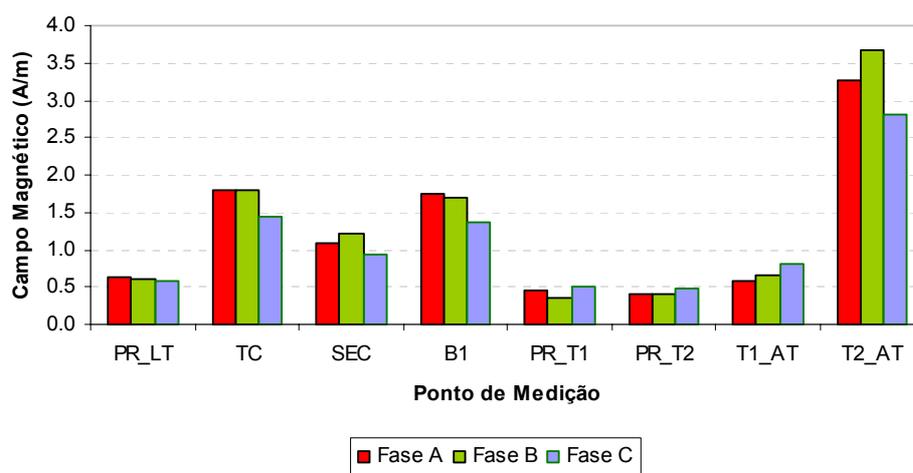


Figura 4.16: Valores de campo magnético medidos no setor 138kV da SE Alfa.

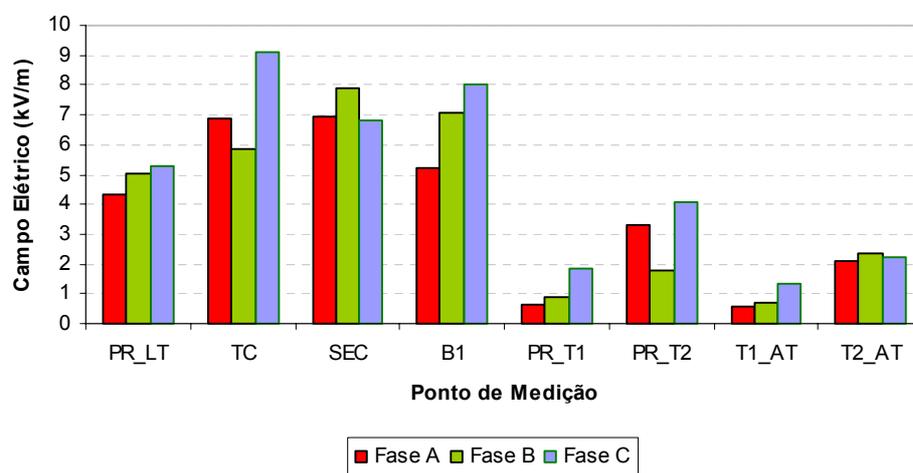


Figura 4.17: Valores de campo elétrico medidos no setor 138kV da SE Alfa.

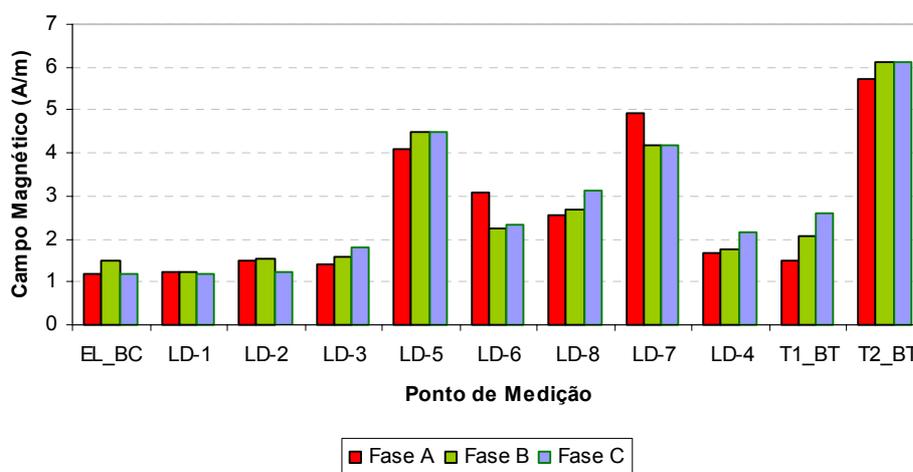


Figura 4.18: Valores de campo magnético medidos no setor 13,8kV da SE Alfa.

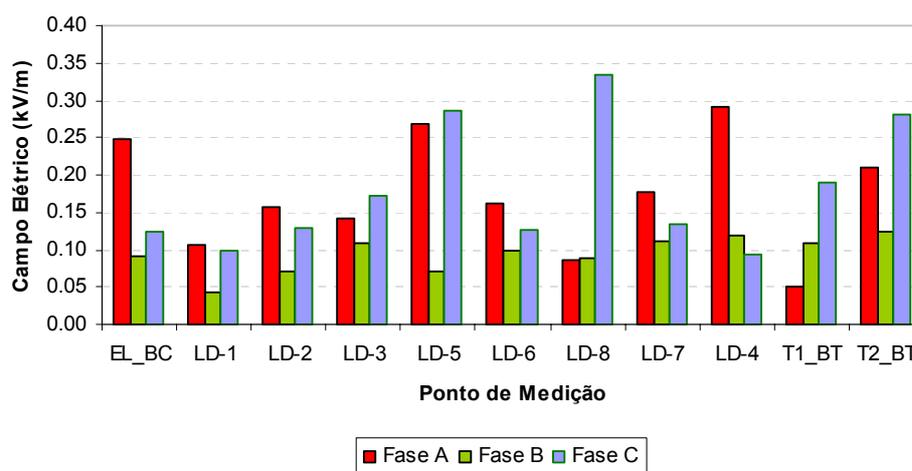


Figura 4.19: Valores de campo elétrico medidos no setor 13,8kV da SE Alfa.

4.5.1. EQUIPAMENTOS INSTALADOS NA ENTRADA DE LINHA 138kV

No pára-raios de entrada da subestação Alfa, o campo elétrico é um pouco mais intenso quando medido sob a fase *c*, em função dos acoplamentos entre as fases e os equipamentos energizados existentes em sua vizinhança. O campo magnético, por sua vez, é aproximadamente o mesmo sob as três fases, ainda que suas componentes nas direções *x*, *y* e *z* se comportem de formas distintas.

Na vizinhança dos TCs o valor de campo elétrico medido sob a fase *b* apresenta-se inferior ao das demais fases, o que sugere uma atenuação da intensidade de campo por efeito de blindagem associado ao DCP. As considerações feitas na análise anterior com relação aos campos magnéticos também são válidas para esse caso.

Na vizinhança das chaves seccionadoras em 138kV, ao contrário da medida efetuada na vizinhança dos TCs, o valor do campo elétrico sob a fase *b* apresenta-se superior ao das demais fases, o que indica um acoplamento com uma resultante positiva, sem o efeito de atenuação por blindagem identificado no caso anterior, associado ao DCP.

As medições de campo elétrico no barramento 138kV foram feitas sob a fase central. Por conta da simetria existente entre as fases mais externas em relação à fase central ocorre uma compensação dos efeitos de acoplamentos, fornecendo uma resultante de campo elétrico mais estável. Analisando a Figura 4.17, observa-se que o campo elétrico medido é mais intenso sob a fase *c* e menos intenso quando medido sob a fase *a*.

O campo magnético, por sua vez, apresenta valores significativos nas componentes y e z , em função da ação dos condutores transversais. Observando o valor da densidade de fluxo magnético verifica-se que o campo magnético é mais intenso sob a fase a e menor sob a fase c . Isto se deve ao efeito de compensação das componentes de campo em sentidos opostos, que se atenuam. Na vizinhança da fase a , ao contrário do que é observado na vizinhança da fase c , não existem fontes de corrente acopladas indutivamente, de forma que as componentes de campo não se compensam e a resultante de campo é mais elevada.

4.5.2. PÁRA-RAIOS 138kV E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

O campo elétrico na vizinhança do pára-raios de T1 é função do nível de tensão no primário de T1, influenciado pelos campos do pára-raios do transformador T2 e do barramento 138kV.

Observa-se ainda que, tanto para o campo elétrico quanto para o campo magnético, o campo é mais intenso sob a fase c , por efeito do acoplamento indutivo com os dispositivos energizados do sistema.

Como o transformador T2 está operando com carga, os valores de campo magnético medidos no lado de alta tensão de T2 serão mais altos que os de T1. Analisando as componentes de campo magnético apresentadas na Tabela D.6 do Apêndice D, verifica-se que a componente da direção x é mais significativa que a componente y , indicando uma superposição aditiva dessas componentes, que não pode ser desprezada.

Mesmo sem carga, o transformador T1 está submetido a acoplamentos eletromagnéticos, principalmente sob a fase c , que é mais próxima do transformador T2.

Os campos magnéticos na vizinhança de T2 são bem mais intensos que os observados na vizinhança de T1, dado que T1 está em vazio. Na Figura 4.18 observa-se que os campos elétricos na vizinhança de T2 também são superiores aos de T1, entretanto a diferença entre eles não é tão significativa.

4.5.3. BARRAMENTO E SAÍDAS DE LINHA EM 13,8kV

Os valores de campo elétrico observados no setor 13,8kV apresentam-se bem abaixo dos valores encontrados em 138kV, o que decorre, *a priori*, da redução no nível de tensão do sistema.

De acordo com os dados de operação, todos os alimentadores encontravam-se com carga e os bancos de capacitores inativos. Como as distâncias elétricas são reduzidas, variando entre 70cm e 1m, o acoplamento indutivo entre as fases do mesmo circuito e entre as fases de circuitos distintos é significativo.

Observando o croqui da Figura 4.16, verifica-se que existe uma superposição entre os alimentadores LD-3 e LD-4 e entre os alimentadores LD-6 e LD-7, provocando o acoplamento entre eles. Como consequência desta superposição, os alimentadores inferiores, LD-3 e LD-6, funcionam como blindagem dos circuitos superiores, LD-4 e LD-7 e o campo elétrico resultante desses circuitos é menor que os observados nas demais saídas em 13,8kV.

4.6. CONCLUSÕES

As medições de campos eletromagnéticos na SE Alfa foram realizadas de forma bastante simples, uma vez que esses campos foram avaliados apenas na vizinhança dos equipamentos instalados na planta. A SE Alfa não é uma subestação automatizada e, por este motivo, não foram feitas considerações acerca do arranjo da instalação e da disposição de dispositivos eletrônicos sensíveis na planta.

Após a análise dos resultados obtidos para essa subestação, verificou-se a necessidade de ampliar a análise dos campos eletromagnéticos na vizinhança dos equipamentos da instalação. Nesse caso, a medição de campos deverá contemplar mais pontos na vizinhança dos equipamentos, sendo os pontos definidos por cortes transversais e longitudinais na instalação.

Outro aspecto evidenciado pelas medições realizadas na SE Alfa foi a necessidade de emprego do medidor isotrópico nessas medições, em função dos acoplamentos existentes na instalação.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pela medição de campos elétricos e magnéticos na subestação Beta, que foi medida com um instrumento isotrópico.

CAPÍTULO 5

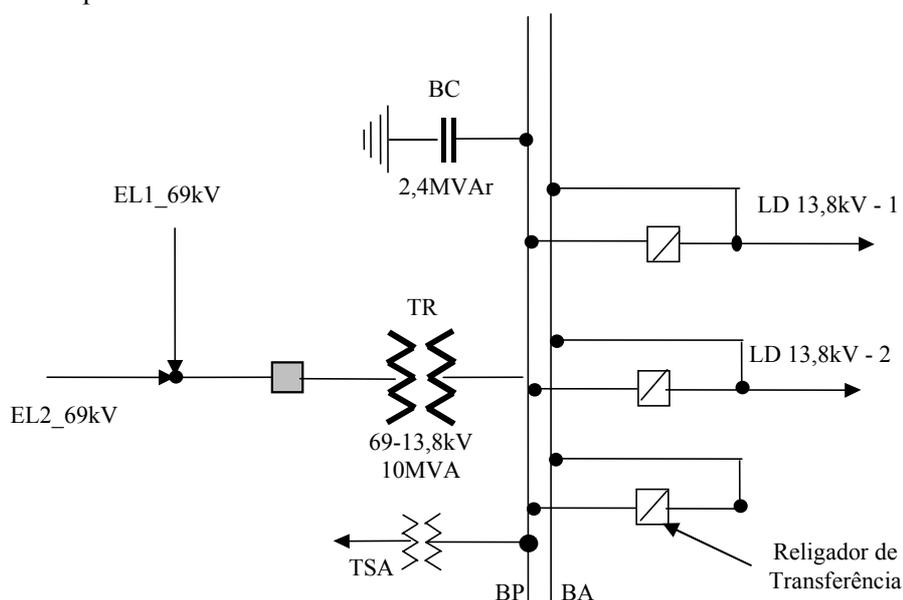
MEDIÇÃO DO AMBIENTE

ELETROMAGNÉTICO DA SUBESTAÇÃO

BETA

5.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO

A SE Beta, cujo diagrama unifilar simplificado é apresentado na Figura 5.1, é uma subestação 69-13,8kV, de 10MVA, com um banco de capacitores de 2,4MVar, duas entradas de linha em 69kV e dois alimentadores de distribuição em 13,8kV. É uma subestação automatizada e dispõe de duas unidades remotas instaladas no pátio, interligadas a uma unidade remota central, situada na casa de comando, por meio da qual os dados da subestação são transferidos ao centro de operação e supervisão da concessionária.



Legenda:

EL: Entrada de Linha em 69kV

TR: Transformador de Potência 69-13,8kV

BP (BA): Barramento Principal (Auxiliar)

BC: Banco de Capacitores

LD-1 a 2: Saídas de linha em 13,8kV

TSA: Transformador de Serviços Auxiliares

Figura 5.1: Diagrama unifilar simplificado da SE Beta.

Na Figura 5.2 é apresentado o croqui da SE Beta usado como referência nas medições.

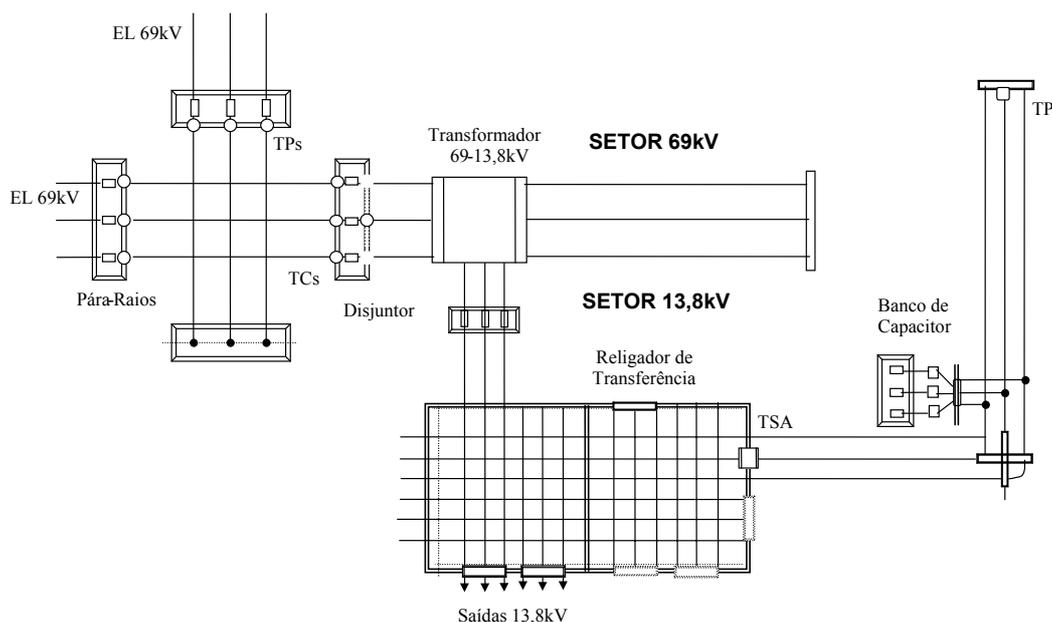


Figura 5.2: Croqui da SE Beta.

5.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO

A medição de campos eletromagnéticos na subestação Beta foi realizada em uma manhã de sábado, de 8:30h às 12:30h, partindo do princípio de que a curva de carga para este dia, mostrada nas Figuras 5.3 a 5.5, teria um perfil mais homogêneo que as curvas de carga de dias úteis.

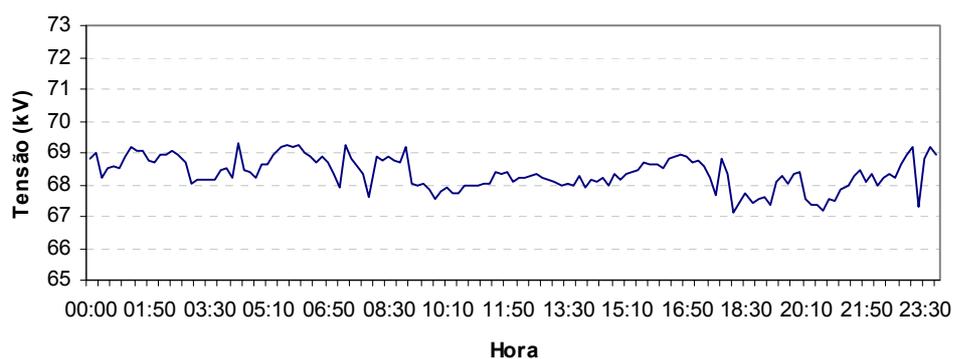


Figura 5.3: Perfil de tensão da subestação Beta, medido no 69kV.

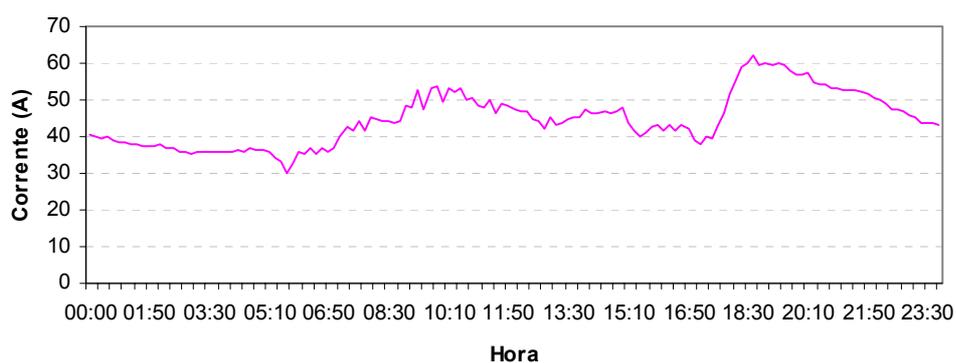


Figura 5.4: Perfil de corrente da subestação Beta, medido no 69kV.

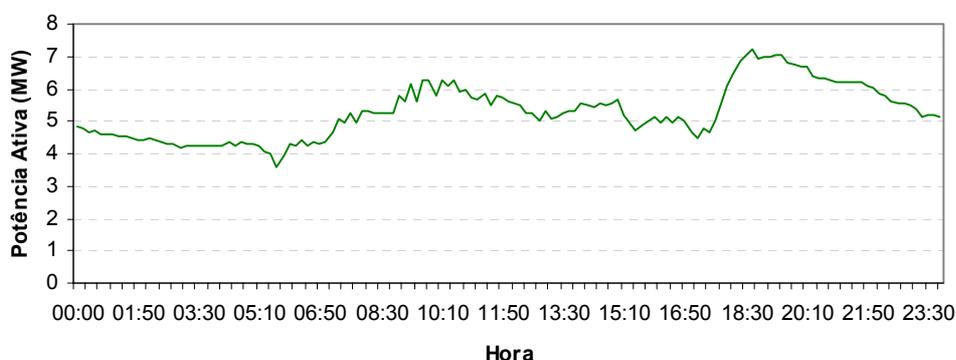


Figura 5.5: Curva de carga da subestação Beta.

5.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

O equipamento utilizado na SE Beta foi o EFA-300. Nessa avaliação, optou-se por uma medição em pontos próximos aos equipamentos da instalação tendo sido realizadas 223 medidas de campo elétrico e 223 medidas de densidade de fluxo magnético nos setores de 69kV e 13,8kV, concentrados nas seguintes áreas:

- Setor 69kV: seções transversais às entradas de linha 69kV, até o transformador de potência;
- Setor 13,8kV: seções transversais ao secundário do transformador de potência e aos barramentos principal e auxiliar, até a saída dos alimentadores de distribuição;
- Contorno da área restrita ao banco de capacitores, em 13,8kV;
- Pontos avulsos nos limites da área do pátio da subestação.

Os valores de campo elétrico e de densidade de fluxo magnético medidos na SE Beta estão apresentados nas Tabelas D.7 e D.8 do Apêndice D.

A metodologia de medição adotada para a SE Beta considerou a medição de pontos espaçados de um metro, distribuídos em 21 réguas de medição, definidas a partir de seções transversais e longitudinais do arranjo da instalação.

Em princípio, esse seccionamento considerou a definição de 15 réguas de medição no setor 69kV e 6 réguas no setor 13,8kV. Entretanto, o arranjo da instalação não possibilita esta divisão, haja vista que pontos medidos em réguas supostamente situadas no setor 69kV localizam-se efetivamente no setor 13,8kV, como pode ser observado nas Figuras 5.6 e 5.7.

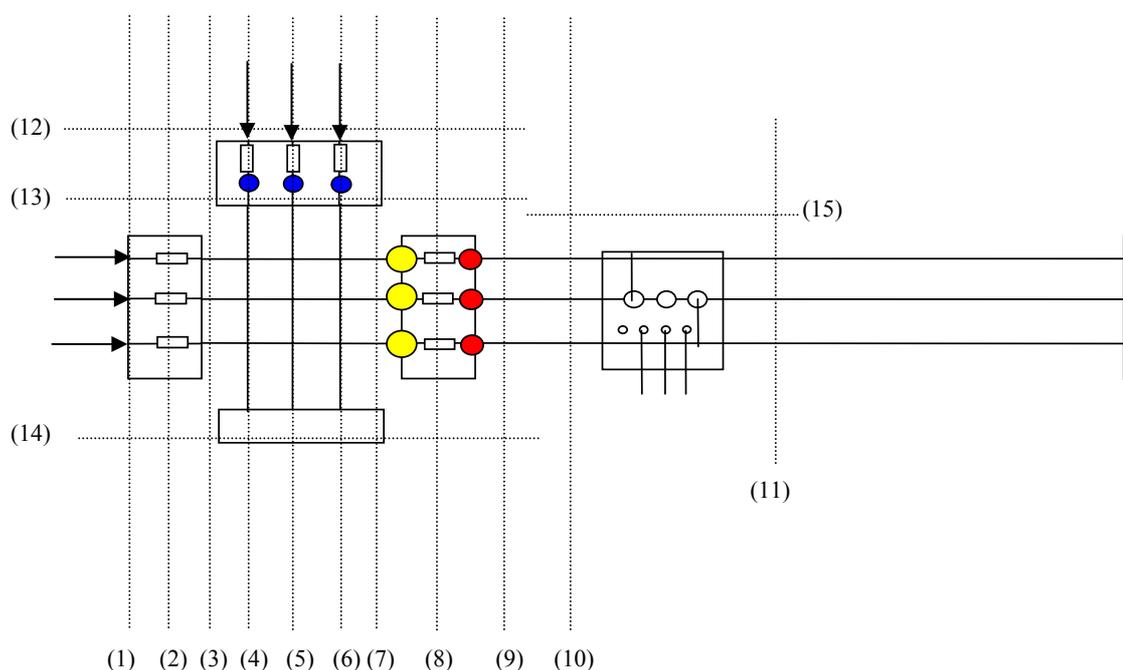


Figura 5.6: Croqui do Setor 69kV da SE Beta – Réguas de Medição 1 a 15.

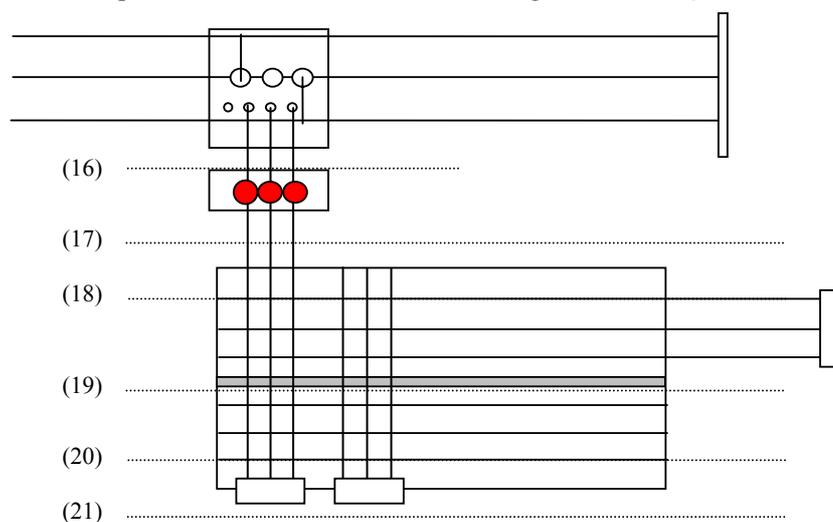


Figura 5.7: Croqui do Setor 13,8kV da SE Beta – Réguas de Medição 16 a 21.

5.4. REPRESENTAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS

A partir dos valores medidos, foram traçados gráficos relativos ao perfil eletromagnético da instalação, que foram classificados em três diferentes grupos:

- Gráficos com os valores de campo elétrico e densidade de fluxo magnético medidos a cada ponto de medição da régua: esses gráficos serviram de apoio na análise dos efeitos dos acoplamentos a cada seção medida, representada por cada régua de medição;
- Gráficos tridimensionais considerando como dados do plano xy as coordenadas dos pontos medidos na subestação, e como coordenada em z , a magnitude do campo elétrico ou magnético medido;
- Projeções: gráficos com a projeção dos campos observados sobre o croqui em escala da subestação, tanto para os setores 69kV e 13,8kV, quanto para todo o pátio da subestação.

A análise concomitante dessas três representações gráficas da distribuição dos campos elétricos e magnéticos na SE Beta subsidiam a caracterização do ambiente eletromagnético de toda a instalação.

5.4.1. REPRESENTAÇÃO LINEAR

A forma como os valores de campo variam ao longo de cada corte transversal da instalação indica a natureza da superposição das componentes inerentes aos equipamentos que os influenciam diretamente, ou ainda, da própria tensão e corrente do sistema.

As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os valores de densidade de fluxo magnético e campo elétrico, respectivamente, considerando as régua 12, 13 e 14, mostradas na Figura 5.6, que correspondem a três cortes longitudinais traçados no setor 69kV. Os gráficos relativos às demais régua de medição estão apresentados no Apêndice E.

A Figura 5.8 evidencia que a densidade de fluxo magnético é maior nos pontos de medição mais próximos ao setor 13,8kV, por acoplamento indutivo. Analogamente, a Figura 5.9 evidencia que o campo elétrico é mais intenso nos pontos mais próximos aos TCs 69kV, por acoplamento capacitivo.

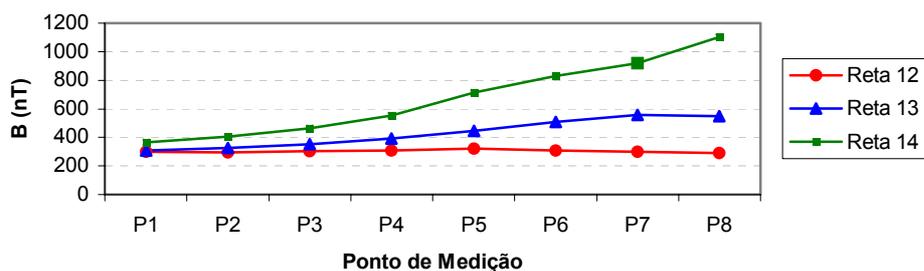


Figura 5.8: Distribuição da densidade de fluxo magnético sobre as réguas de medição 12, 13 e 14.

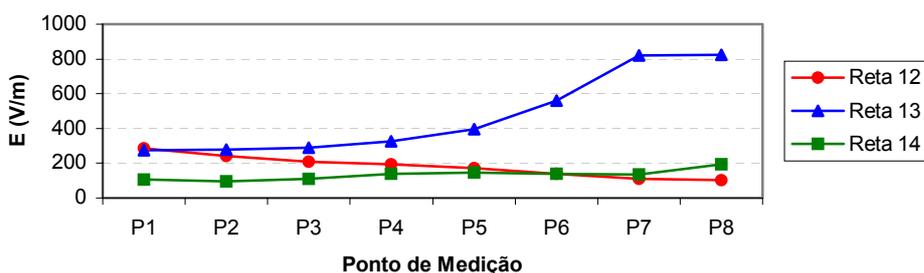


Figura 5.9: Distribuição do campo elétrico sobre as réguas de medição 12, 13 e 14.

5.4.2. REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam, respectivamente, a distribuição da densidade de fluxo magnético nos setores 69kV e 13,8kV da SE Beta.

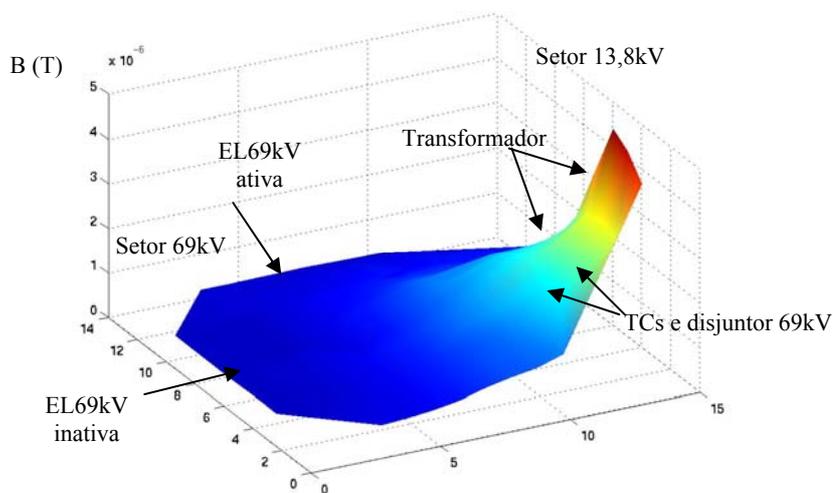


Figura 5.10: Distribuição da densidade de fluxo magnético no Setor 69kV da SE Beta.

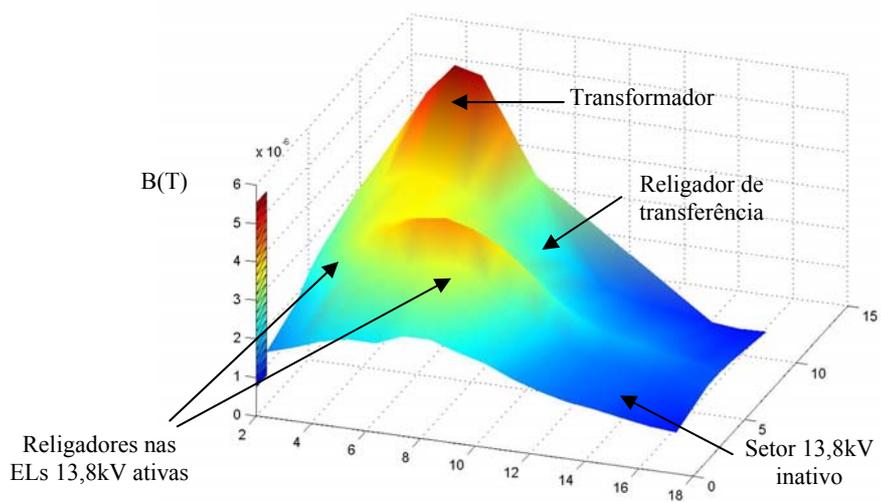


Figura 5.11: Distribuição da densidade de fluxo magnético no Setor 13,8kV da SE Beta.

A Figura 5.12 apresenta a distribuição da densidade de fluxo magnético no pátio da SE Beta, incluindo os setores 69kV e 13,8kV.

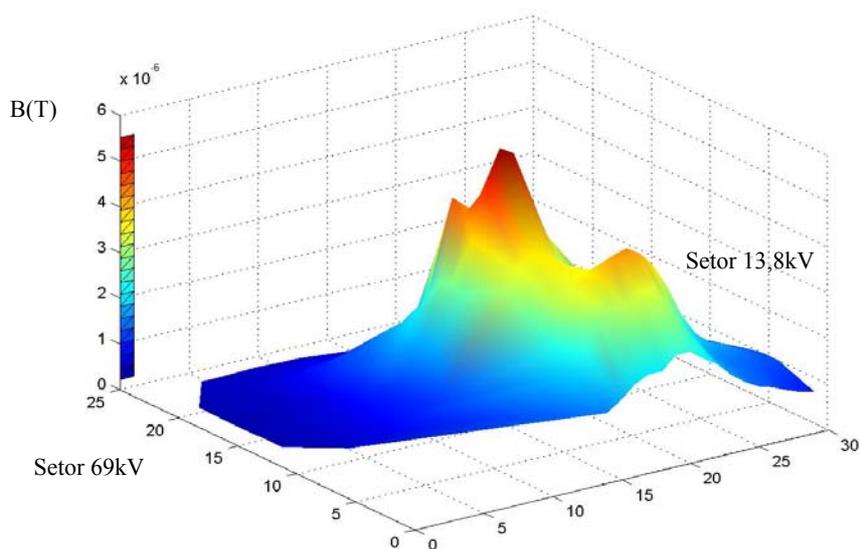


Figura 5.12: Distribuição da densidade de fluxo magnético no pátio 69/13,8kV da SE Beta.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam, respectivamente, a distribuição do campo elétrico nos setores 69kV e 13,8kV da SE Beta.

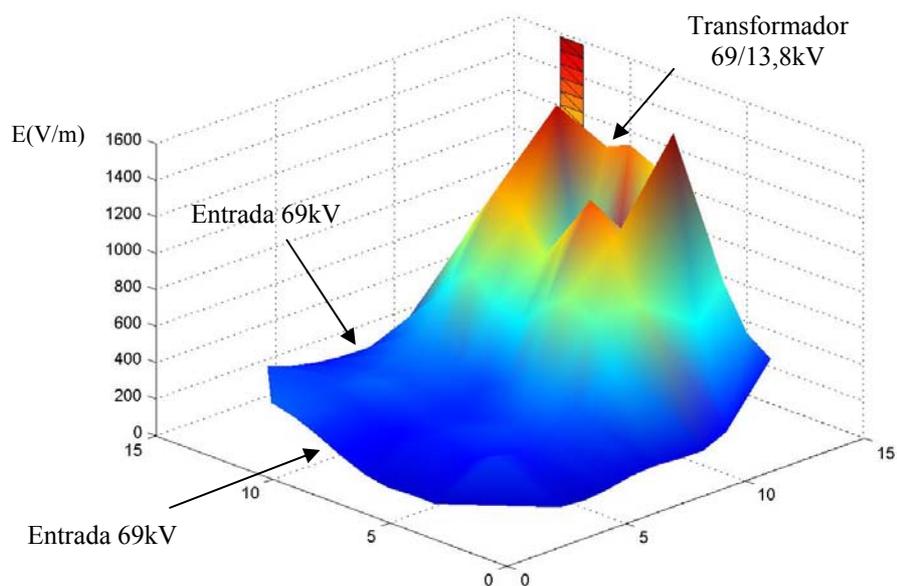


Figura 5.13: Distribuição do campo elétrico no setor 69kV da SE Beta.

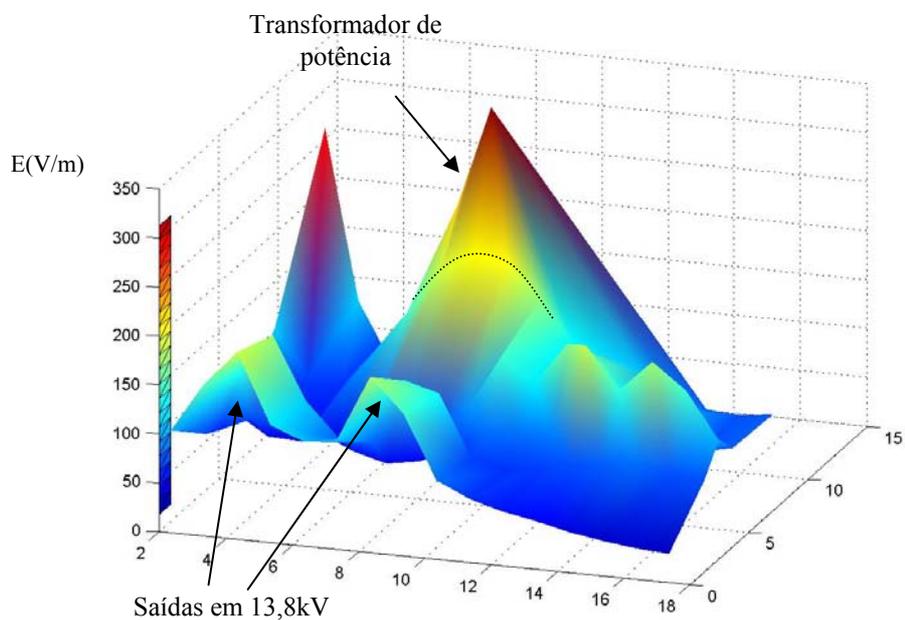


Figura 5.14: Distribuição do campo elétrico no setor 13,8kV da SE Beta.

Analogamente, a Figura 5.15 apresenta o gráfico de distribuição de campo elétrico no pátio da SE Beta, considerando os setores 69kV e 13,8kV.

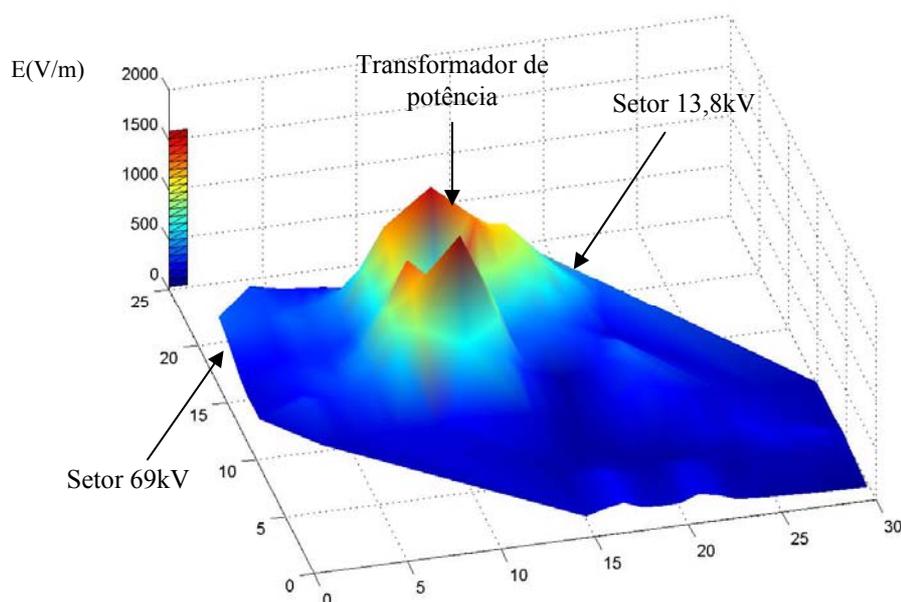


Figura 5.15: Distribuição do campo elétrico no pátio 69/13,8kV da SE Beta.

5.4.3. PROJEÇÕES

Apesar da representação tridimensional fornecer uma idéia de como os campos se distribuem na instalação, ela não permite identificar a distribuição dos campos medidos em relação ao layout da subestação. Esta associação é possível por meio da projeção da distribuição de campo no plano xy associado ao croqui da subestação, conforme mostrado nas Figuras 5.16 a 5.21.

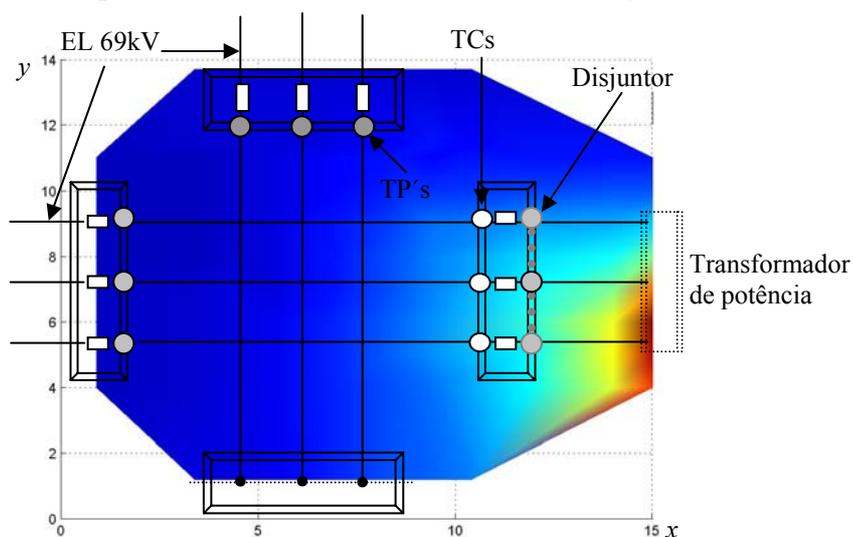


Figura 5.16: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o setor 69kV da SE Beta.

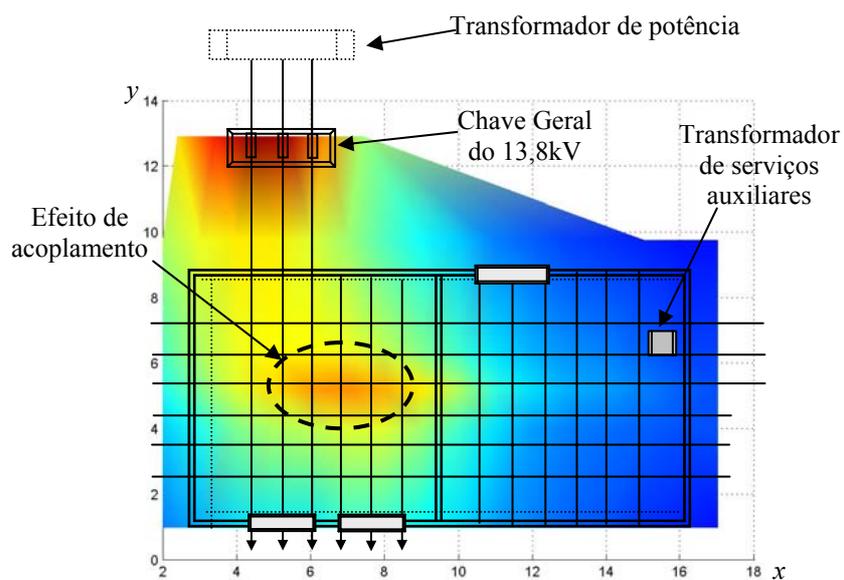


Figura 5.17: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o setor 13,8kV da SE Beta.

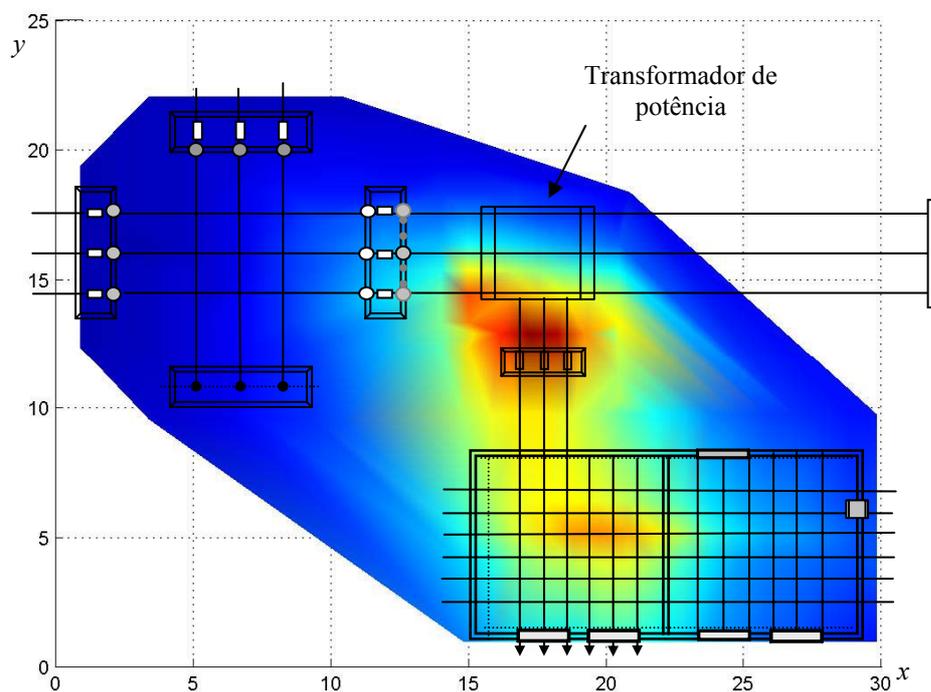


Figura 5.18: Projeção da densidade de fluxo magnético sobre o pátio 69-13,8kV da SE Beta.

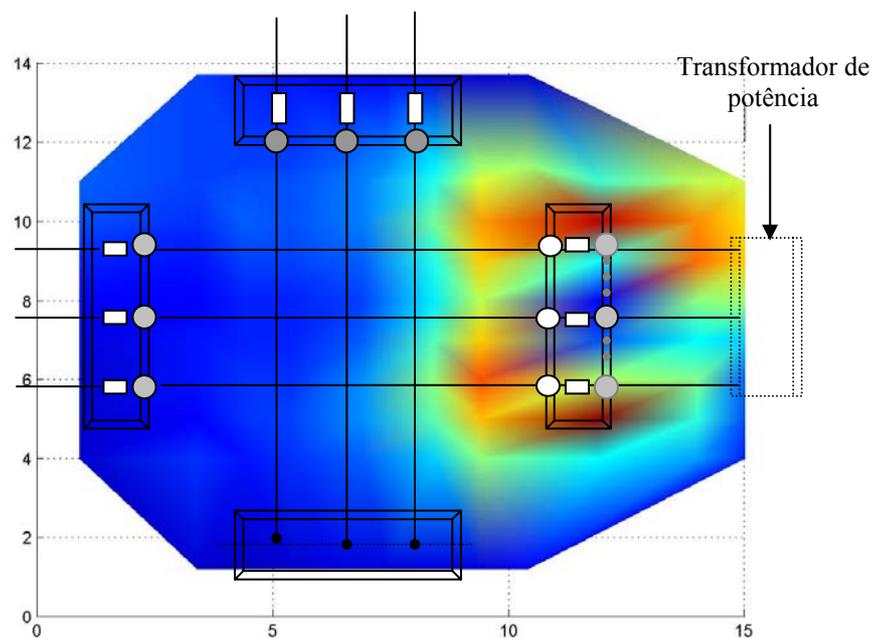


Figura 5.19: Projeção da distribuição do campo elétrico no setor 69kV da SE Beta.

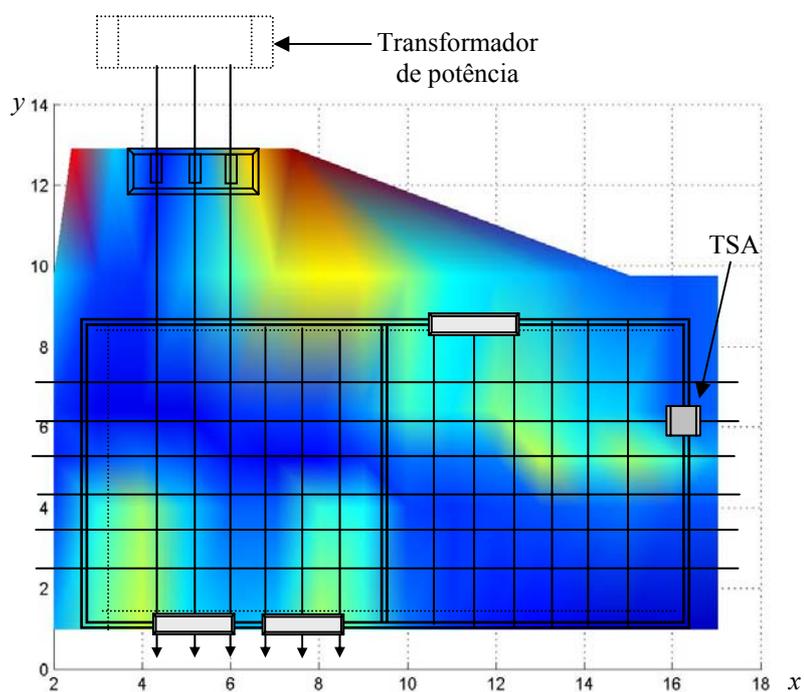


Figura 5.20: Projeção da distribuição do campo elétrico no setor 13,8kV da SE Beta.

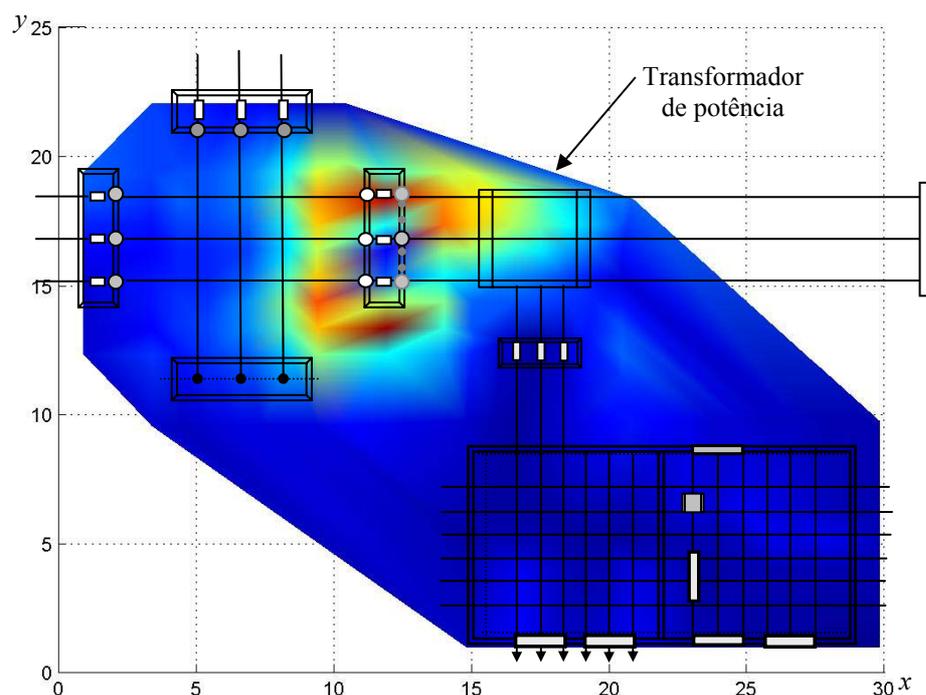


Figura 5.21: Projeção da distribuição do campo elétrico no pátio 69-13,8kV da SE Beta.

Observando os gráficos das Figuras 5.18 e 5.21 verifica-se, respectivamente, que a densidade de fluxo magnético é mais intensa no setor 13,8kV, na vizinhança do transformador de potência, e que o campo elétrico é mais significativo no setor 69kV, também na vizinhança do transformador.

Partindo-se dessas figuras, é possível verificar a não-homogeneidade da distribuição de campos elétrico e magnético na instalação, identificando-se os pontos da instalação onde os acoplamentos são mais significativos.

5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 5.22 apresenta a curva de carga da subestação Beta relativa ao horário das medições. De acordo com esta figura, a carga da subestação Beta variou de 5,22MW a 6,3MW, com valor médio em torno de 5,75MW. Essa variação não é contínua, nem apresenta uma tendência definida, uma vez que a carga secundária de uma subestação varia de forma aleatória.

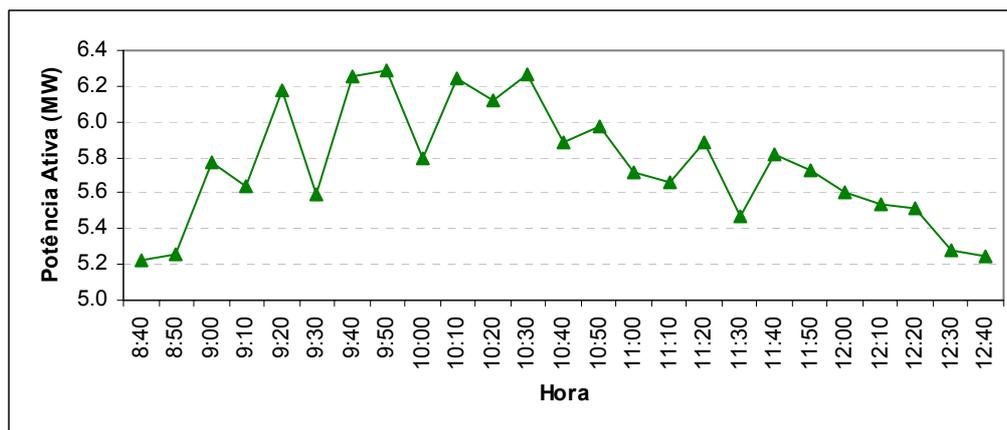


Figura 5.22: Curva de carga da SE Beta no horário das medições.

A intensidade de corrente varia em função da carga e, conseqüentemente, a densidade de fluxo magnético também. Logo, como a carga na instalação não é constante, o campo magnético gerado pela corrente que a alimenta também não será constante.

Na SE Beta o valor mínimo de corrente medidos no setor 69kV, no dia das medições, foi de 30,1A e ocorreu às 5:40h, enquanto que o valor máximo foi de 62,1A às 18:30h. Durante o horário das medições, a corrente mínima foi de 43,9A, medida às 8:40h, enquanto que o máximo foi de 53,4A, medido às 10:30h, também no setor 69kV da instalação.

Logo, de acordo com esses dados, teoricamente, os valores de campo magnético deveriam ser máximos nos instantes em que as correntes foram máximas, e mínimos nos instantes em que as correntes foram mínimas, pelo menos no setor 69kV.

Quando a carga varia, entretanto, a tensão varia em proporção bem menor, principalmente se a instalação não possui transformadores com comutadores sob carga (LTC) instalados, nem tampouco reguladores de tensão, como é o caso da SE Beta.

No caso da SE Beta o valor mínimo de tensão foi de 67,1kV e ocorreu às 18:10h, enquanto que o valor máximo medido foi de 69,3kV às 4:20h, no dia das medições. Durante o horário das medições, a tensão mínima foi de 67,6kV, medida às 9:50h, enquanto que a máxima foi de 69,17kV, medida às 9:00h.

Tomando por base a tensão nominal do sistema, 69kV, a regulação da SE Beta no dia das medições foi de 3,21%, abaixo do valor admissível de $\pm 5\%$. No horário das medições a tensão variou em 2,31%, o que, do ponto de vista da EMC, pode ser considerado um valor praticamente constante.

Se a tensão na SE Beta praticamente não variou e não existem dispositivos de regulação de tensão na instalação, poder-se-ia supor que o campo elétrico na instalação não varia, pelo menos, não significativamente, já que as variações de tensão são muito pequenas.

Com base nesses elementos, desprezando-se ainda os efeitos dos acoplamentos existentes na instalação, espera-se “teoricamente” um campo magnético variável, proporcional à variação de corrente de carga, e um campo elétrico constante na SE Beta.

Na prática, como apresentado no próximo item, os campos não se comportam nem se distribuem dessa forma.

5.5.1. RELAÇÃO ENTRE OS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E AS GRANDEZAS ELÉTRICAS MEDIDAS NA SUBESTAÇÃO

Para avaliar a magnitude dos campos elétrico e magnético na subestação em função dos valores de corrente e tensão informados pela concessionária, foram considerados pontos medidos no setor 69kV coincidentes com o posicionamento das fases *a* e *c*, das entradas de linha até a vizinhança do transformador, como ilustrado através do diagrama da Figura 5.23.

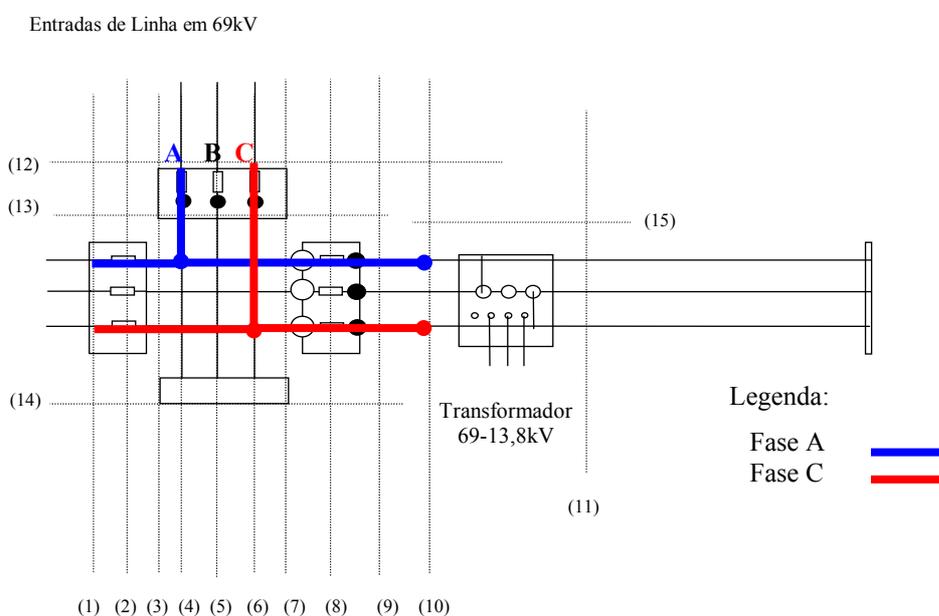


Figura 5.23: Diagrama representativo dos pontos considerados na análise da relação entre a corrente e a densidade de fluxo magnético no setor 69kV, para as fases *a* e *c*.

5.5.1.1. Densidade de Fluxo Magnético

A Figura 5.24 apresenta o valor da corrente primária medida na fase *a* e os valores de densidade de fluxo magnético medidos sob ela, referidos ao mesmo instante de tempo. O sentido de fluxo considerado foi das entradas de linha em 69kV até a vizinhança do primário do transformador de potência. Nessa representação, como as medições foram realizadas na ordem seqüencial definida pelas régua de medição, os valores de densidade de fluxo magnético relativos às entradas de linha em 69kV são os primeiros e os últimos representados no gráfico.

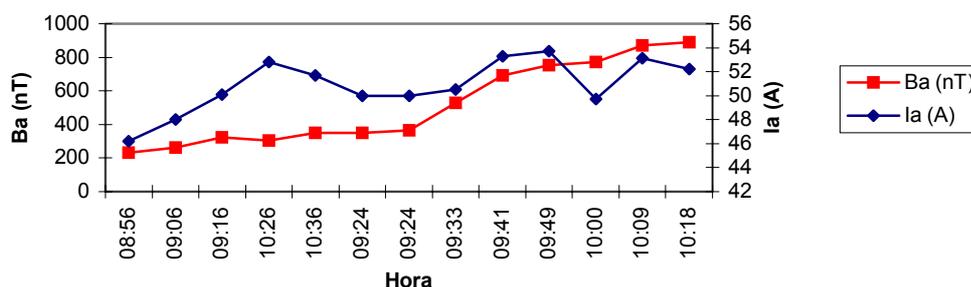


Figura 5.24: Corrente da fase *a* e densidade de fluxo magnético medida sob a fase *a*.

Na Figura 5.25, esta distribuição é reapresentada em função do horário das medições. Neste caso a corrente está representada em décimos de ampères, de forma a facilitar a visualização dos valores em relação à magnitude dos campos.

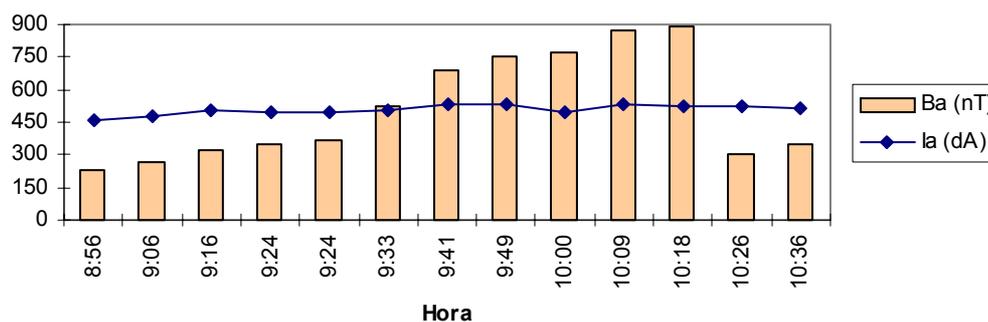


Figura 5.25: Corrente da fase *a* e densidade de fluxo magnético medida sob a fase *a*, considerando a seqüência dos horários das medições.

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam os gráficos análogos aos das Figuras 5.24 e 5.25, considerando a corrente da fase *c* e os campos medidos no setor 69kV sob a fase *c*.

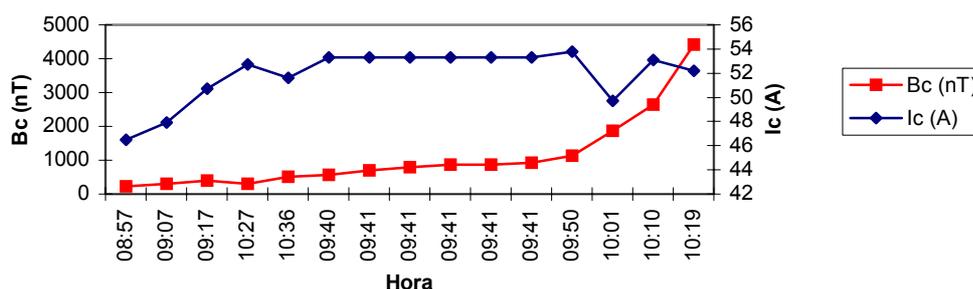


Figura 5.26: Corrente da fase *c* e densidade de fluxo magnético medida sob a fase *c*.

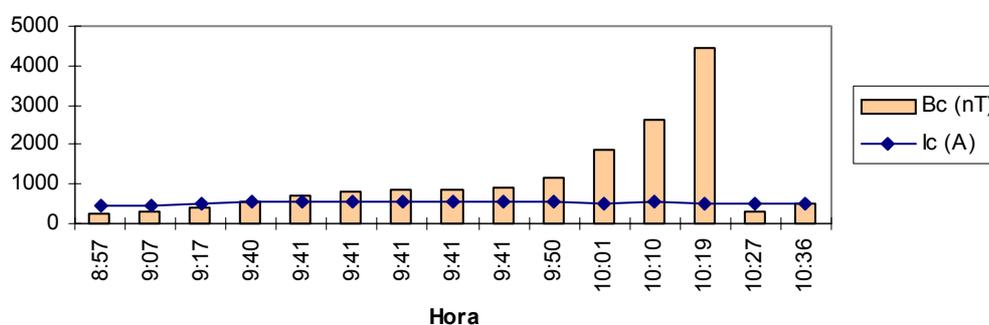


Figura 5.27: Corrente da fase *c* e densidade de fluxo magnético medida sob a fase *c*, considerando a seqüência dos horários das medições.

Comparando as Figuras 5.24 com 5.26 e 5.25 com 5.27, verifica-se que, apesar das correntes de fase terem aproximadamente os mesmos valores, o comportamento da densidade de fluxo magnético observada sob as fases *a* e *c* é completamente distinto. Os valores de densidade de fluxo magnético observados para a fase *c* são bem mais elevados do que os para a fase *a*.

Logo, observando o diagrama da Figura 5.23, é possível verificar que os campos gerados foram influenciados diferentemente nos dois trechos de circuito analisados devido ao efeito dos acoplamentos existentes na planta.

Na fase *a*, os acoplamentos resultam principalmente do acoplamento indutivo com a fase *b* e dos equipamentos instalados em 69kV. A fase *c*, ao contrário, além dos efeitos de acoplamentos com o circuito 69kV, é altamente influenciada pela ação dos campos magnéticos gerados no setor 13,8kV. Esta fase está indutivamente acoplada ao sistema em 13,8kV que se distribui a partir do transformador de potência, perpendicularmente ao sentido de fluxo do circuito. Com isso, a resultante desse acoplamento é predominantemente aditiva e o campo resultante é bastante superior

àquele que seria gerado, caso o campo magnético na vizinhança da fase *c* tivesse sido gerado exclusivamente pela corrente que flui na linha energizada em 69kV.

Os diagramas apresentados nas Figuras 5.25 e 5.27 evidenciam, com muita clareza, como a densidade de fluxo magnético variou na instalação, sem que se observasse uma significativa e representativa variação de corrente.

5.5.1.2. Campo Elétrico

A Figura 5.28 apresenta a tensão primária na fase *a* e os valores de campo elétrico referidos ao mesmo instante, medidos sob a fase *a*, nas mesmas condições do caso anterior relativo à densidade de fluxo magnético. As medições foram realizadas na ordem seqüencial definida pelas régua de medição.

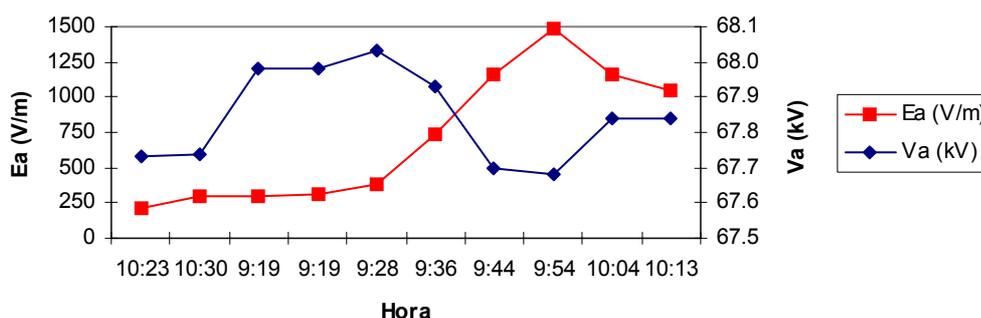


Figura 5.28: Tensão da fase *a* e campo elétrico medido sob a fase *a*.

Da Figura 5.28 verifica-se que o campo elétrico não é constante na instalação e que varia em função de fatores que não são relativos à variação de tensão. De fato, como o campo elétrico sofre a influência dos dispositivos, pessoas ou objetos em sua vizinhança, não há como estabelecer uma relação única com a tensão do sistema e desconsiderar o efeito dos acoplamentos existentes na instalação.

Os campos elétricos gerados na instalação se acoplam capacitivamente entre as fases do sistema e na vizinhança dos equipamentos. A resultante desse acoplamento poderá ser aditiva, resultando em um campo mais intenso, ou subtrativa, resultando em um campo atenuado, a depender das características do ponto do circuito e dos equipamentos envolvidos.

Como no caso anterior, na Figura 5.29, a distribuição é reapresentada em função do horário de realização das medições.

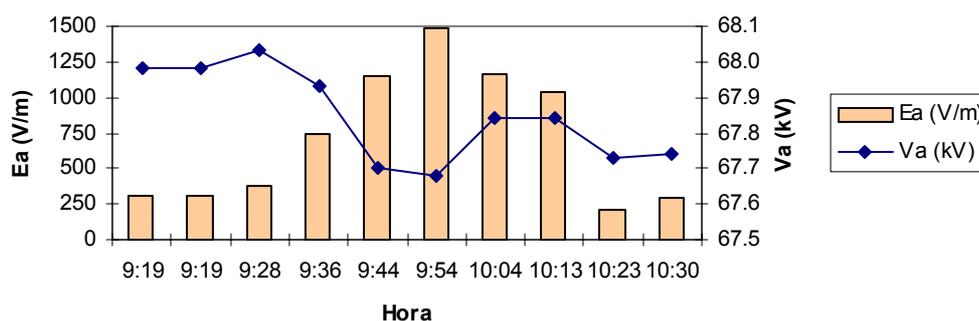


Figura 5.29: Tensão da fase *a* e campo elétrico medido sob a fase *a*, considerando a seqüência dos horários das medições.

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam os gráficos definidos a partir dos valores de campo elétrico medidos no setor 69kV para as tensões da fase *c*.

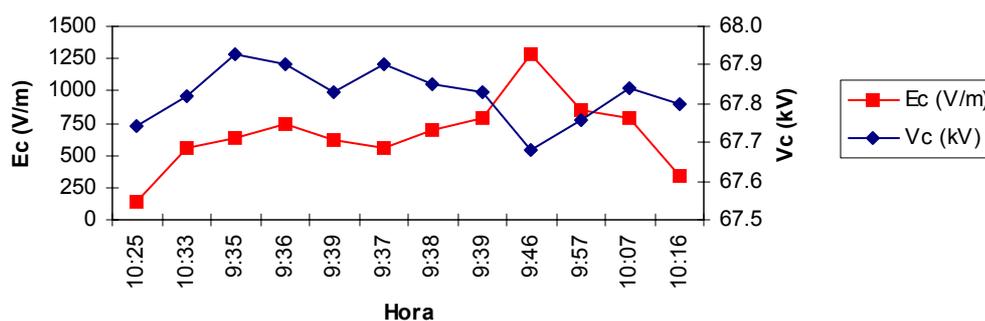


Figura 5.30: Tensão da fase *c* e campo elétrico medido sob a fase *c*.

Comparando a Figura 5.28 com a Figura 5.30 verifica-se que a distribuição do campo elétrico na vizinhança da fase *c* aparentemente não é tão abrupta quanto na vizinhança da fase *a*, embora apresente valores de pico semelhantes em horários próximos. Entretanto, se observados os valores de campo na vizinhança das entradas de linha em 69kV, verifica-se que os valores de campo para a fase *c* e para a fase *a* são semelhantes na vizinhança da 1ª entrada de linha, mas bastante distintos na vizinhança da 2ª entrada, quando o valor de campo na vizinhança da fase *a* é bastante superior ao correspondente medido na fase *c*.

Comparando os valores de campo elétrico nas Figuras 5.28 com 5.30 pode-se ainda observar que, apesar de próximos, os valores de campo medidos sob a fase *a* são ligeiramente superiores aos medidos nas proximidades da fase *c*.

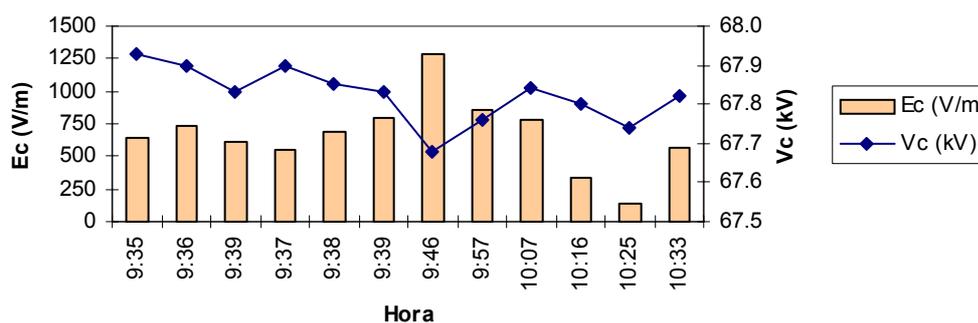


Figura 5.31: Tensão da fase c e campo elétrico medido sob a fase c , considerando a seqüência dos horários das medições.

Esse efeito é coerente com o arranjo da instalação, onde os campos elétricos gerados pelo sistema em 69kV se acoplam capacitivamente com os campos elétricos gerados pelo 13,8kV, de menor magnitude, resultando em valores de campo menores.

Logo, como no caso da densidade de fluxo magnético, é possível verificar que os campos elétricos produzidos na instalação foram influenciados diferentemente nos dois trechos de circuito analisados devido ao efeito dos acoplamentos existentes na planta e não dependem exclusivamente da tensão do sistema, nem são constantes.

5.5.2. REPRESENTAÇÃO LINEAR

A análise dos cortes transversais e longitudinais feitos na instalação facilita a compreensão do comportamento dos campos elétricos e da densidade de fluxo magnético, servindo como ferramenta auxiliar na interpretação de detalhes da representação tridimensional e, principalmente, das projeções desses no croqui da instalação referido ao plano xy .

Como o corte também está referido ao croqui, é possível verificar, por meio dele, como os campos estão variando no trecho do circuito, que é uma informação não fornecida pela representação em projeção.

As Figuras 5.32 a 5.34 ilustram esse fato, tomando como referência para esta análise o corte transversal da régua 08.

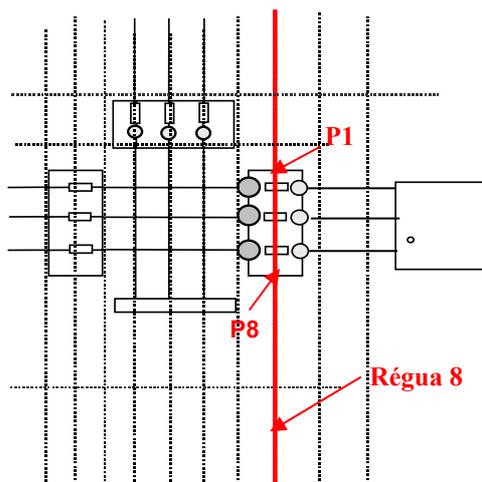


Figura 5.32: Croqui de localização da régua de medição 8 – corte transversal.

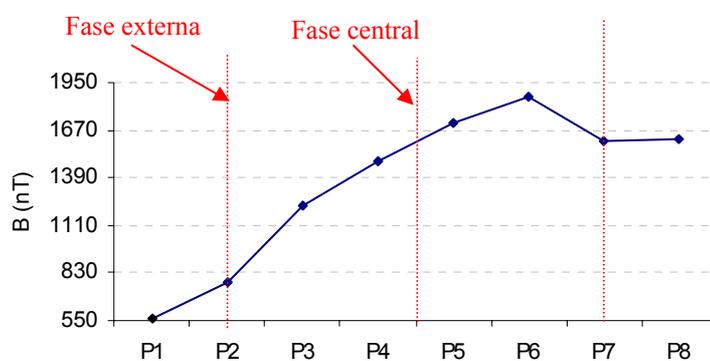


Figura 5.33: Régua de medição 8 – Densidade de fluxo magnético.

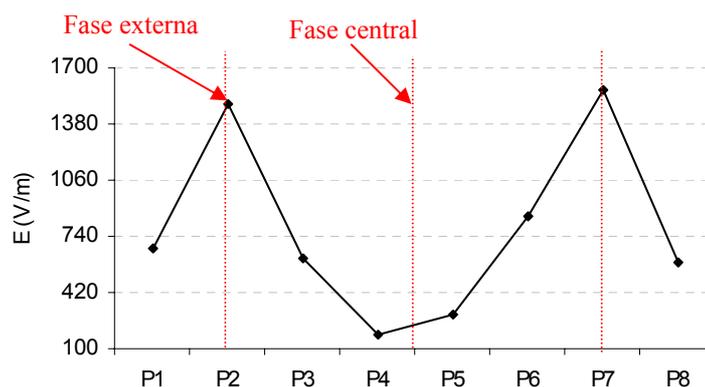


Figura 5.34: Régua de medição 8 – Campo elétrico.

Observando as figuras verifica-se que os pontos P_2 e P_7 estão sob as fases a e c , respectivamente. Observando o perfil da Figura 5.33, verifica-se que a densidade de fluxo magnético aumenta até a proximidade da fase c , ponto P_6 , atenuando-se ligeiramente ao atingir a

fase em questão, mantendo-se aproximadamente constante até P_8 . Esta atenuação sugere uma compensação do acoplamento indutivo nessa região, ainda que na vizinhança do setor 13,8kV da instalação.

A distribuição de campo elétrico no perfil definido pela régua 8 apresentada na Figura 5.34, por sua vez, demonstra claramente o efeito do acoplamento capacitivo das tensões de fase. Os picos ocorrem para as fases mais externas, a e c , enquanto que, na vizinhança da fase b ocorre uma compensação das componentes vetoriais do campo, resultando em um campo elétrico atenuado em relação aos das outras fases. A não-simetria observada na definição desse ponto de mínimo, em P_4 , também pode ser justificada pelos acoplamentos, não obstante não ter sido feita nenhuma medição de campo exatamente sob a fase b em questão.

Logo, os perfis de campo traçados com base nas seções transversais e longitudinais da SE Beta, permitem avaliar, linearmente, de que forma esses campos estão distribuídos na instalação.

5.5.3. REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A representação tridimensional possibilita uma análise espacial da forma como os campos medidos compõem o ambiente eletromagnético da instalação.

Embora os pontos medidos na SE Beta ainda não tenham sido na quantidade que se mediria no caso de um mapeamento eletromagnético na instalação, a quantidade medida foi suficiente para fornecer uma idéia da distribuição espacial dos campos na planta, bem como de sua magnitude.

Com base nas Figuras 5.10 a 5.12 relativas às medições de densidade de fluxo magnético, pode-se constatar o seguinte:

- A densidade de fluxo magnético no ambiente do setor 69kV é baixa, elevando-se na vizinhança dos equipamentos e, principalmente, do transformador de potência. Não se identifica nessa representação nenhum ponto de acoplamento adicional ou pontos quentes, que possam denotar um comportamento particular de algum equipamento do sistema;
- No setor 13,8kV, por sua vez, é possível identificar a existência de um ponto de elevado acoplamento indutivo entre os alimentadores (fase a de um alimentador com a fase c do outro). Como esperado, os níveis de densidade de fluxo magnético são bem mais elevados que os observados no setor 69kV, principalmente na vizinhança do transformador de potência;

- Na Figura 5.12 está representado o pátio 69/13,8kV como um monobloco. Nessa representação fica evidenciado o fato de que a densidade de fluxo magnético é bem maior na vizinhança do transformador de potência e se mantém mais elevada no setor de 13,8kV.

É importante considerar o fato de que a representação de uma instalação como um todo esconde detalhes, principalmente para os valores de campo menores, onde a escala do gráfico torna todos os valores representados em uma mesma faixa. Essa representação é ideal para fornecer uma idéia do conjunto e da distribuição espacial desses campos.

Tomando por base as Figuras 5.13 a 5.15 relativas às medições de campo elétrico, pode-se constatar o seguinte:

- A distribuição dos campos elétricos no setor 69kV, como mostra a Figura 5.13, confirma que os campos nas entradas de linha são mais baixos e que se elevam significativamente na vizinhança dos equipamentos 69kV e do transformador de potência. A imagem sugere alguns picos muito próximos, mas não permite a identificação de como esses campos se distribuem. Neste caso, a análise da projeção pode ser determinante;
- Da Figura 5.14 ficam evidenciados dois picos de campo elétrico. Como no caso anterior, não há como detalhar a distribuição dos campos. Aparentemente o primeiro deles é resultado do acoplamento capacitivo dos equipamentos 69kV com a saída 13,8kV do transformador de potência e o segundo resulta do próprio transformador. Picos menores são observados na vizinhança das saídas 13,8kV e também nas proximidades do transformador de serviços auxiliares. Esses pontos onde o campo elétrico é mais intenso não se constituem necessariamente pontos quentes, embora estejam na vizinhança de buchas de equipamentos de manobra, religadores das saídas de linha em 13,8kV, sujeitos a efeitos corona e ferroressonância;
- Finalmente, a Figura 5.15 traz a distribuição dos campos elétricos no pátio 69/13,8kV. Nela está evidenciada a maior intensidade do campo elétrico na vizinhança do transformador de potência, dos TCs e do disjuntor, no setor 69kV.

Analisando o conjunto de diagramas tridimensionais apresentados nas Figuras 5.10 a 5.15 verifica-se que a subestação Beta não apresenta, a princípio, uma característica de distribuição de campos eletromagnéticos que possa vir a justificar a adoção de alguma solução de engenharia do ponto de vista da EMC. Para um parecer conclusivo, entretanto, é preciso avaliar ainda as projeções dos campos na instalação e o arranjo dos dispositivos eletrônicos sensíveis instalados no pátio.

5.5.4. PROJEÇÕES

As Figuras 5.16 a 5.21 apresentam as projeções dos gráficos tridimensionais apresentados, respectivamente, nas Figuras 5.10 a 5.15 no plano xy relacionando as coordenadas dos pontos medidos com o arranjo simplificado da instalação.

Essa representação é extremamente elucidativa, pois possibilita verificar a distribuição dos campos em relação ao arranjo da instalação, fornecendo detalhes de pontos que não puderam ser efetivamente visualizados na representação anterior.

Tomando por base as Figuras 5.16 a 5.18 relativas à densidade de fluxo magnético, verifica-se que:

- No setor 69kV, Figura 5.16, fica evidenciada com maior clareza a elevação crescente da magnitude da densidade de fluxo magnético na vizinhança do transformador de potência, principalmente no ponto onde o setor 69kV se acopla indutivamente com os campos produzidos pela corrente secundária do transformador;
- Na Figura 5.17, como esperado, a densidade de fluxo magnético é mais elevada na vizinhança do transformador; o detalhe importante nessa figura refere-se ao efeito de acoplamento identificado na Figura 5.11 e evidenciado nessa figura de forma mais precisa que o da imagem anterior. Observa-se também que os campos na vizinhança do transformador de serviços auxiliares não são significativos;
- A projeção da Figura 5.18 reúne os dois setores evidenciando o acoplamento indutivo entre os alimentadores e os barramentos 13,8kV. Interessante observar nessa figura é a distribuição da densidade de fluxo magnético no circuito na vizinhança do transformador de potência.

Com relação ao campo elétrico, Figuras 5.19 a 5.21, tem-se:

- Na Figura 5.19 fica evidenciada a elevação de campo elétrico na vizinhança dos equipamentos, principalmente das buchas dos TCs e do disjuntor. Como já verificado, os campos nas entradas de linha não são tão elevados quanto os observados na vizinhança destes equipamentos. Verifica-se também que o campo elétrico na vizinhança do transformador de potência não está evidenciado como na representação anterior, o que sugere que os picos identificados na Figura 5.13 sejam relativos ao conjunto composto pelos TCs e pelo disjuntor;
- A Figura 5.20 ratifica os pontos de elevação de campo elétrico observados na Figura 5.14, evidenciando que os campos mais intensos ocorrem, de fato, na vizinhança do setor 69kV, ratificando o acoplamento capacitivo e na vizinhança do transformador de potência, mas não no

setor identificado como 13,8kV. Esse campo é gerado pela continuação das linhas em 69kV que atendem ao transformador e que podem ser vistas com mais detalhes na Figura 5.21;

- Finalmente, através da Figura 5.21 ratifica-se que os campos elétricos são mais significativos na vizinhança dos equipamentos 69kV e na vizinhança da “fase *a*” do circuito 69kV que atende ao transformador. Como esperado, os picos de campo elétrico, evidenciados no setor 13,8kV, não são significativos para a instalação.

5.5.5. CUIDADOS COM RELAÇÃO AOS EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS INSTALADOS NA SE BETA

A SE Beta possui duas unidades terminais remotas (UTR) instaladas em seu pátio 69/13,8kV, como apresentado na Figura 5.35.

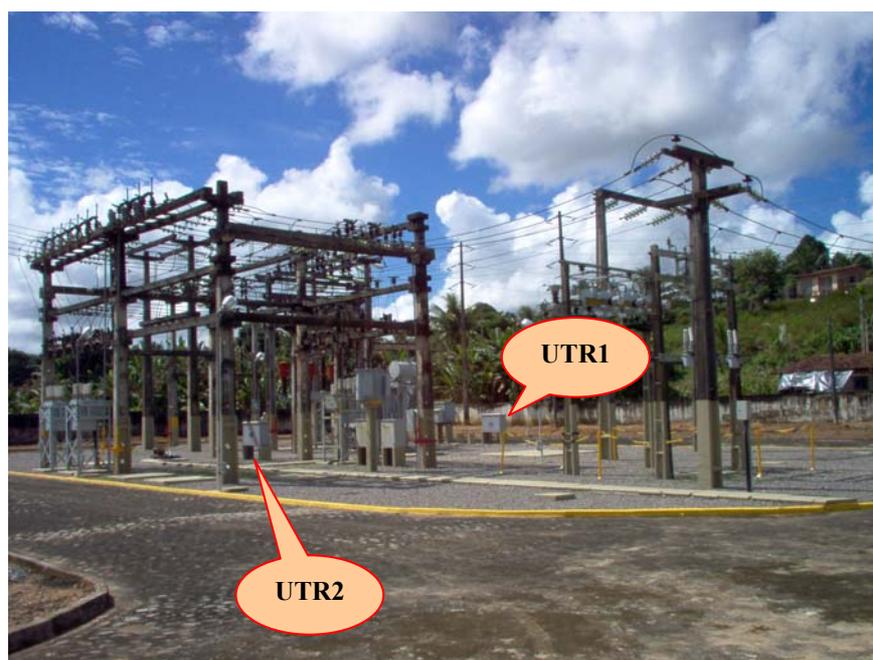


Figura 5.35: Vista geral do pátio 69/13,8kV com as UTRs.

Essas UTRs são responsáveis pela medição e pela supervisão da subestação Beta, integrando, para esse fim, medidores e relés digitais, além de sensores e filtros. A primeira delas (UTR1) é responsável pelo setor 69kV, enquanto que a segunda (UTR2) é responsável pelo setor 13,8kV. Elas se comunicam com uma terceira unidade que está instalada na casa de comando da SE Beta, que é responsável pela transferência dos dados de campo ao centro de operações da área à qual a subestação está subordinada.

Analisando os campos elétrico e magnético medidos na instalação em função do local de instalação das remotas, pode-se concluir que:

- A UTR1 está situada no setor 69kV, paralela ao transformador de potência. De acordo com os valores medidos essa UTR não está submetida a nenhum campo que possa vir a comprometer seu desempenho, considerando-se aqui que sua instalação obedeceu aos requisitos mínimos de EMC impostos pelos sistemas de supervisão automatizados;
- A UTR2 está situada sob o barramento 13,8kV, em contraposição ao 2º alimentador da SE Beta e paralela ao religador de transferência dos barramentos em 13,8kV. Analisando a distribuição dos campos elétricos e da densidade de fluxo magnético para esse caso, verifica-se que não existem campos elétricos significativos em sua vizinhança. Com relação à densidade de fluxo magnético, entretanto, verifica-se que a UTR está instalada bem próxima ao ponto da instalação onde foi observada a elevação de campo por acoplamento indutivo, como ilustrado nas Figuras 5.11 e 5.17. Em uma situação ideal, a UTR2 deveria estar instalada em outro ponto da planta, menos susceptível aos acoplamentos magnéticos.

É importante observar que a medição realizada na SE Beta contemplou as condições operacionais de regime permanente. Os valores medidos de campo elétrico e densidade de fluxo magnético não foram influenciados por fontes transitórias, nem decorrentes de manobras, nem de VTCD.

Se os campos observados em condição de regime permanente já são significativos, a ocorrência concomitante de qualquer evento que eleve a corrente e/ou a tensão da instalação pode vir a comprometer o desempenho ou danificar os equipamentos eletrônicos sensíveis instalados em sua vizinhança.

Dessa forma, tomando por base o princípio da precaução, seria conveniente buscar soluções que minimizassem o nível de acoplamento magnético com a UTR2, predominantemente indutivo, e com isso, reduzindo o risco da remota vir a sofrer os efeitos de campos incidentes.

O acoplamento indutivo pode ser minimizado pela redução de *loops* no circuito ou pelo “roteamento” dos cabos próximos a condutores e a elementos de aterramento. O uso de blindagens em condutores ou em conjuntos de condutores que permitam a circulação da corrente induzida que flui em oposição ao sentido assegurado pela blindagem também atenua o efeito dos acoplamentos indutivos. Esse aspecto é um dos motivos pelos quais as blindagens devem ter as duas extremidades aterradas e as bandejas devem assegurar a continuidade do fluxo em toda sua extensão.

É importante considerar que, a depender da natureza do evento eletromagnético interferente, o acoplamento pode ser condutivo, ao invés de indutivo. Como a maioria dos casos de acoplamento condutivo envolve os sistemas de aterramento, as soluções mais viáveis para o problema costumam envolver as conexões dos equipamentos com a malha de terra.

Uma alternativa a considerar seria a revisão do arranjo dos dispositivos eletrônicos sensíveis na instalação. Entretanto, em todas as alternativas não podem ser descartados os aspectos técnicos e financeiros envolvidos na questão.

5.6. CONCLUSÕES

As medições realizadas na SE Beta permitiram uma boa caracterização do ambiente eletromagnético de seu pátio 69/13,8kV e possibilitaram o desenvolvimento de análises relativas ao perfil eletromagnético da instalação.

A avaliação do ambiente eletromagnético da instalação identificou um ponto de acoplamento magnético relevante na vizinhança de um dispositivo eletrônico sensível, mesmo para a operação em regime permanente, sob as condições estabelecidas pela curva de carga. É necessário minimizar o efeito desse acoplamento, o que implica em modificar aspectos da topologia da instalação.

A metodologia empregada para avaliar a SE Beta atende a boa parte das subestações do sistema elétrico. Entretanto, não se pode descartar a importância de realizar o mapeamento de uma instalação considerando uma área retangular, onde os pontos medidos estão distribuídos uniformemente compondo uma grade de medições. Logo, apesar desses bons resultados, optou-se pela realização do mapeamento eletromagnético de outra subestação, como será visto no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 6

MAPEAMENTO DO AMBIENTE

ELETROMAGNÉTICO DA SUBESTAÇÃO

GAMA

6.1. DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO

A subestação Gama, cujo diagrama unifilar simplificado é apresentado na Figura 6.1, é uma subestação 69-13,8kV, de 10/12,5MVA, com dois bancos de capacitores de 2,4MVAR, uma entrada de linha em 69kV e quatro alimentadores de distribuição em 13,8kV. É uma subestação automatizada e dispõe de duas unidades remotas instaladas no pátio da subestação, que estão interligadas a uma unidade remota central na casa de comando que transfere os dados da subestação ao sistema supervisorio da concessionária local via rádio.

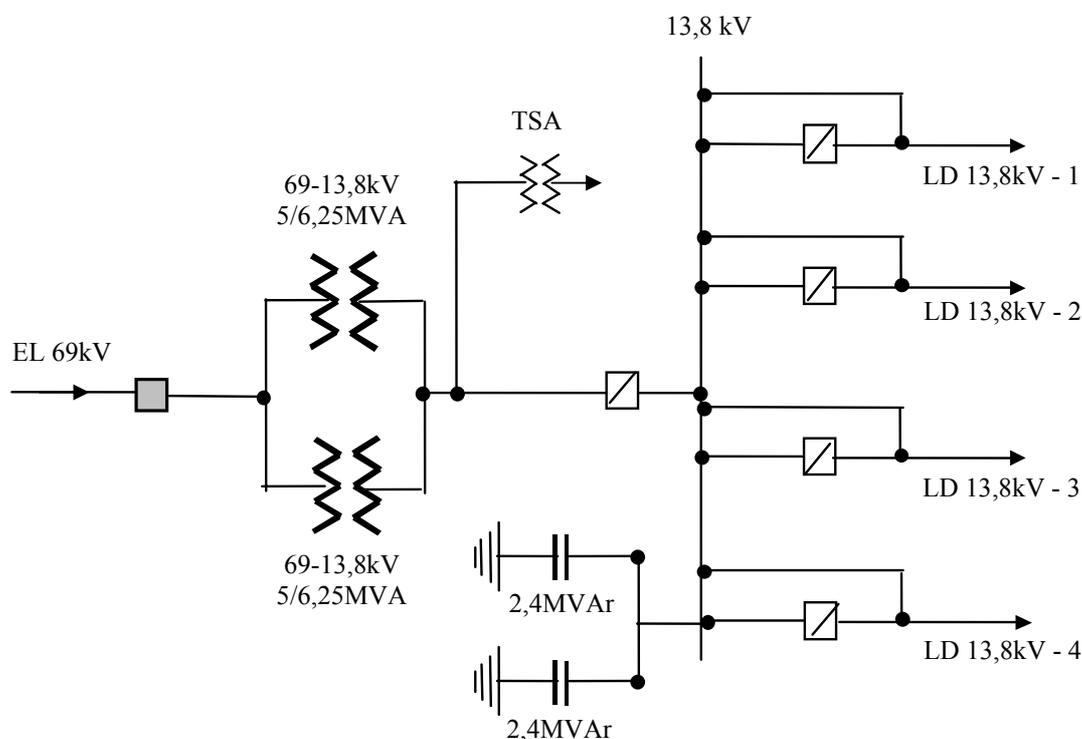
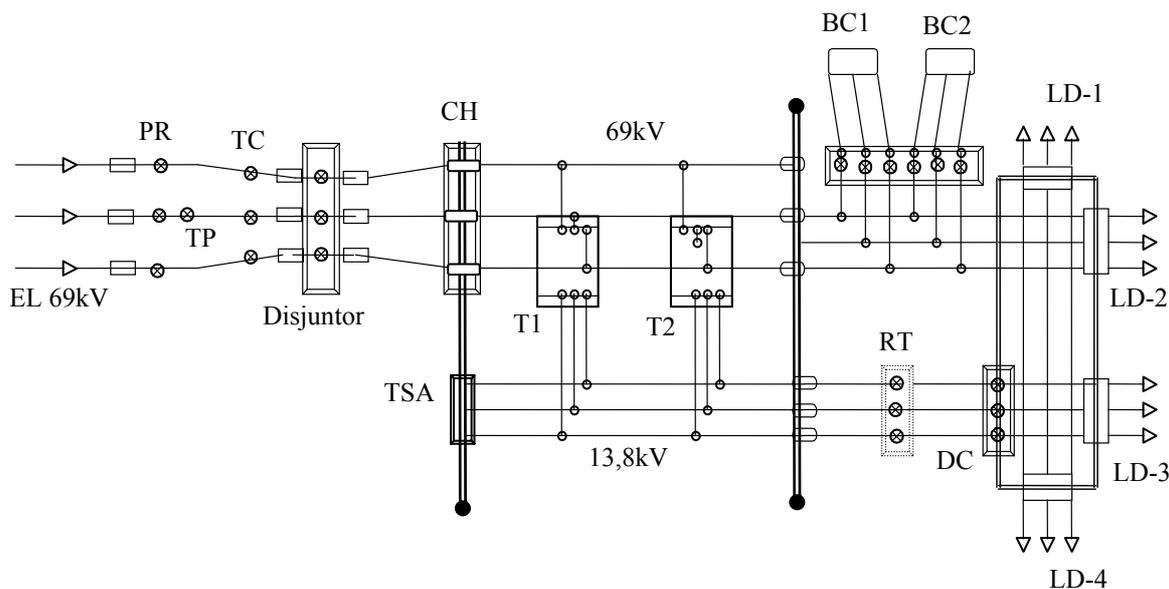


Figura 6.1: Diagrama unifilar simplificado da subestação Gama.

A Figura 6.2 apresenta o croqui do pátio da SE Gama.



Legenda:

EL – Entrada de Linha na Subestação

TP – Transformador de Potencial

CH – Chave Seccionadora 69kV

T1, T2 – Transformadores de Potência 1 e 2

LD-1 a 4 – Alimentares 13,8kV de 1 a 4

RT – Regulador de Tensão - retirado de operação.

PR – Pára-raios

TC – Transformador de Corrente

TSA – Transformador de Serviços Auxiliares

BC1, BC2 – Bancos de Capacitores 1 e 2

DC – Disjuntor 13,8kV em cubículo

Figura 6.2: Croqui da SE Gama.

A malha de terra desta subestação foi reconstruída recentemente e ocupa uma extensão maior (63m x 32m) do que aquela ocupada pelos equipamentos da subestação, cujo pátio em 69kV mede 38m x 13m e em 13,8kV, 38m x 17m.

6.2. DADOS OPERACIONAIS DA SUBESTAÇÃO

A medição de campos eletromagnéticos na subestação Gama foi realizada em dois dias. Como a maior parte das medições foi realizada no primeiro dia, as Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 apresentam, respectivamente, o perfil diário de tensão, de corrente e de carga da SE Gama nesse dia.

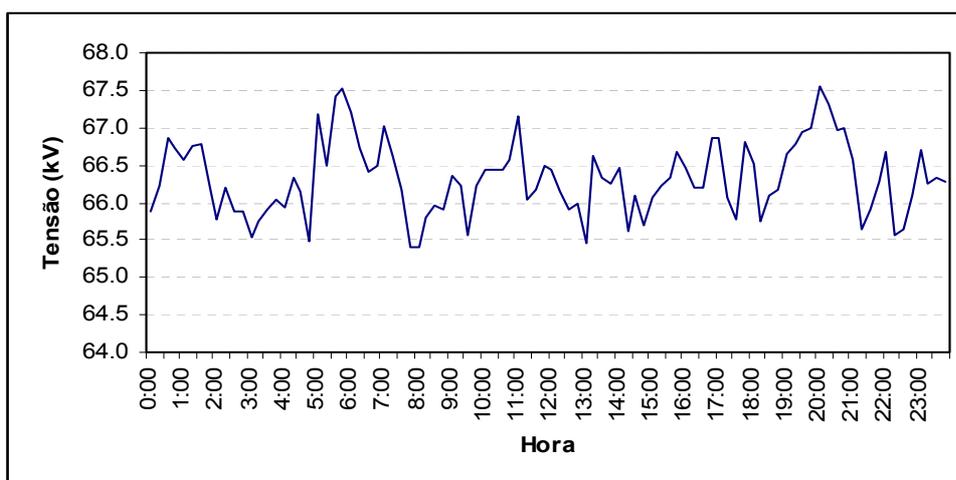


Figura 6.3: Perfil de tensão da subestação Gama, medido no 69kV.

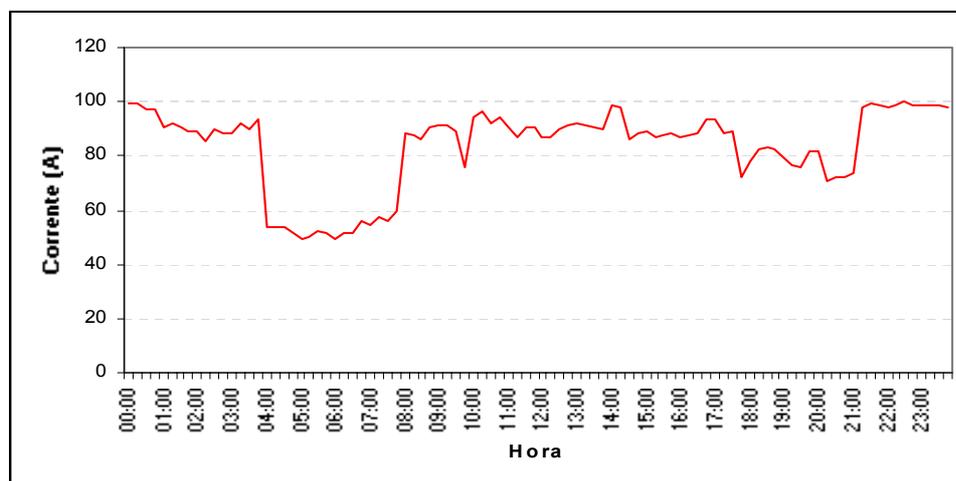


Figura 6.4: Perfil de corrente da subestação Gama, medido no 69kV.

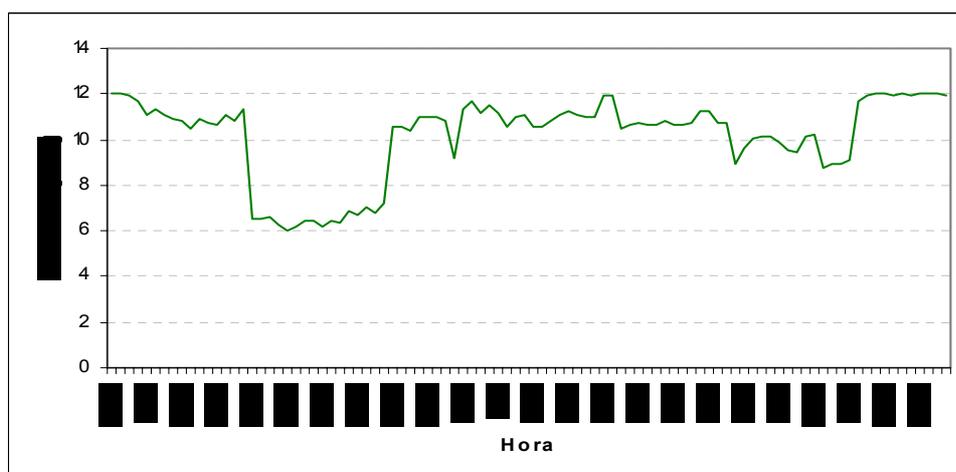


Figura 6.5: Curva de carga da subestação Gama.

6.3. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

O equipamento utilizado na SE Gama foi o medidor isotrópico de campos elétricos e magnéticos EFA-300 da *Narda Measurements*.

Nesta subestação foi considerado um maior número de medidas com o intuito de promover o mapeamento eletromagnético do pátio 69/13,8kV. Foram definidas 38 réguas de medição, transversais à entrada de linha 69kV e espaçadas de 1m a 1,5m, como mostrado na Figura 6.6. Neste caso os setores de medição não foram definidos *a priori*, como no caso da SE Beta.

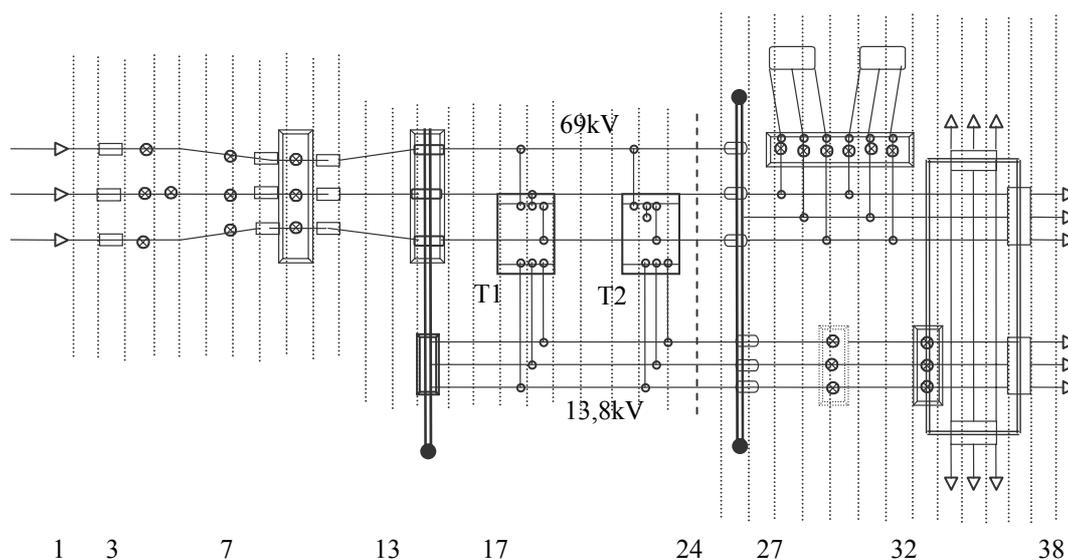


Figura 6.6: Croqui de medição da SE Gama considerando 38 réguas paralelas.

Os valores de campo medidos nos 480 pontos nos dois dias de mapeamento estão apresentados nas Tabelas D.9 e D.10 do Apêndice D.

6.4. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS

Gráficos do perfil eletromagnético da instalação foram gerados a partir dos valores medidos e que podem ser classificados como:

- Gráficos dos valores de campo medidos por ponto de medição sobre cada régua;
- Gráficos tridimensionais, considerando como dados do plano xy as coordenadas dos pontos medidos na subestação e como coordenada em z , a magnitude do campo elétrico ou magnético medido;
- Gráficos com a projeção dos campos medidos sobre o croqui em escala da subestação.

6.4.1. REPRESENTAÇÃO LINEAR

As curvas definidas a partir dos valores de intensidade de campo magnético e de campo elétrico para os pontos medidos no pátio da subestação representam o comportamento desses campos nos cortes considerados. No caso de cortes transversais, os valores corresponderão aos pontos das próprias réguas de medição, enquanto que, para os cortes longitudinais, os pontos serão definidos por meio de um ponto a cada régua de medição do corte transversal.

Supondo que se deseja avaliar o comportamento dos campos elétrico e magnético na vizinhança do transformador T1, por exemplo, consideram-se os valores medidos nas réguas 15 e 18, como ilustrado no croqui da Figura 6.7, apresentados nas Figuras 6.8 e 6.9.

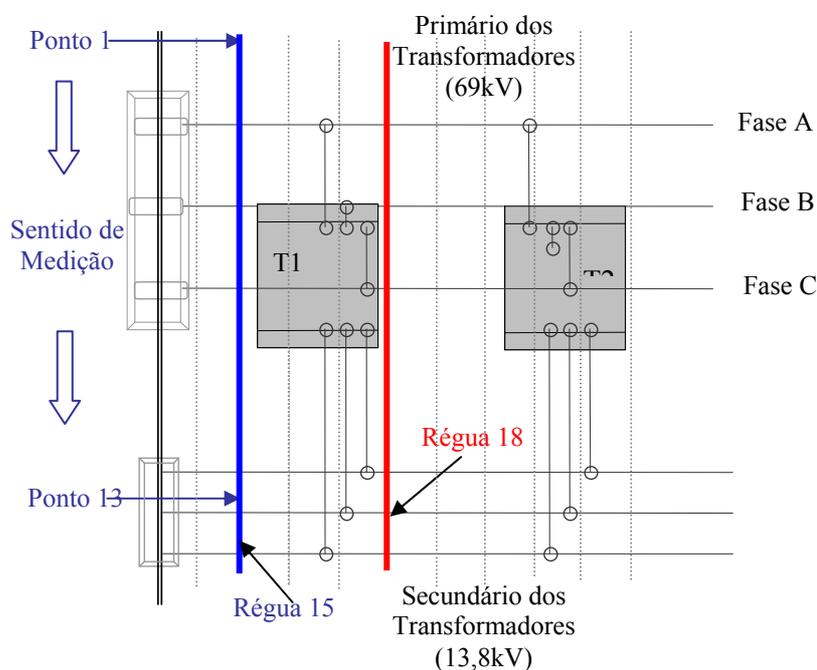


Figura 6.7: Croqui relativo às réguas 15 e 18 na vizinhança do transformador T1.

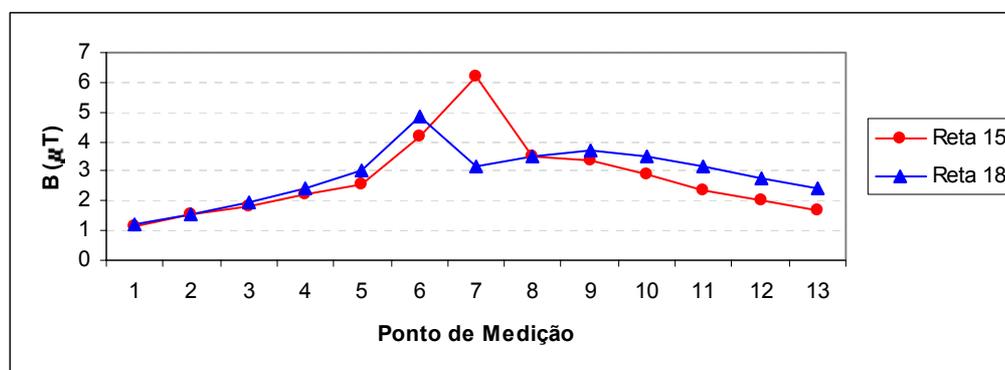


Figura 6.8: Densidade de fluxo magnético nas réguas 15 e 18.

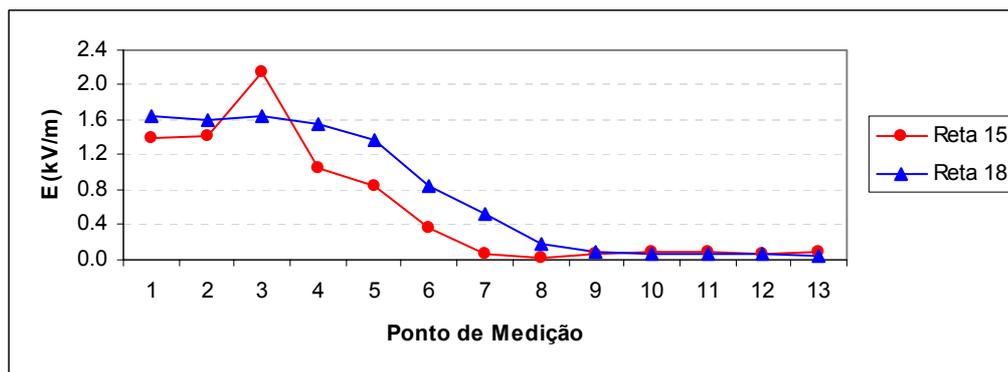


Figura 6.9: Campo elétrico nas réguas 15 e 18.

Considerando um corte longitudinal que envolva as 38 réguas de medição, como ilustrado no croqui da Figura 6.10, pode-se estimar os perfis de densidade de fluxo magnético e campo elétrico na instalação, como representado nas Figuras 6.11 e 6.12.

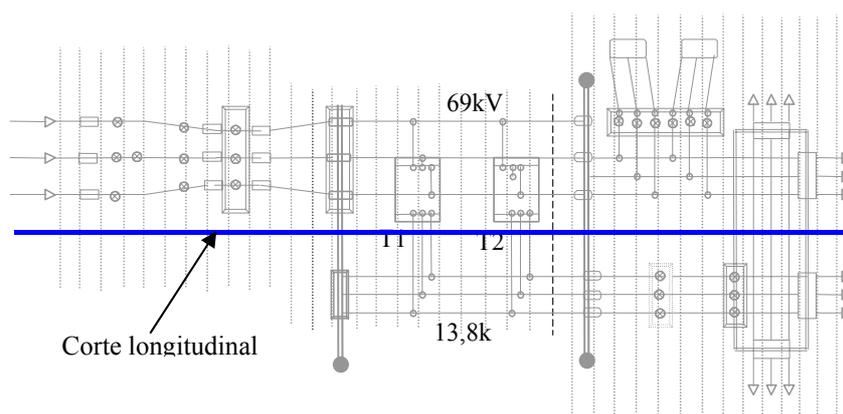


Figura 6.10: Corte longitudinal na SE Gama, transversal às 38 réguas de medição.

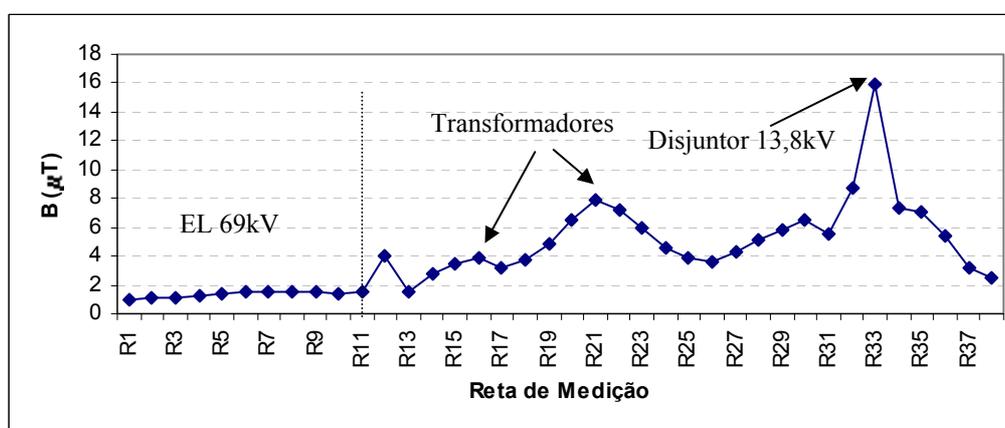


Figura 6.11: Perfil da densidade de fluxo magnético da instalação na posição do corte longitudinal.

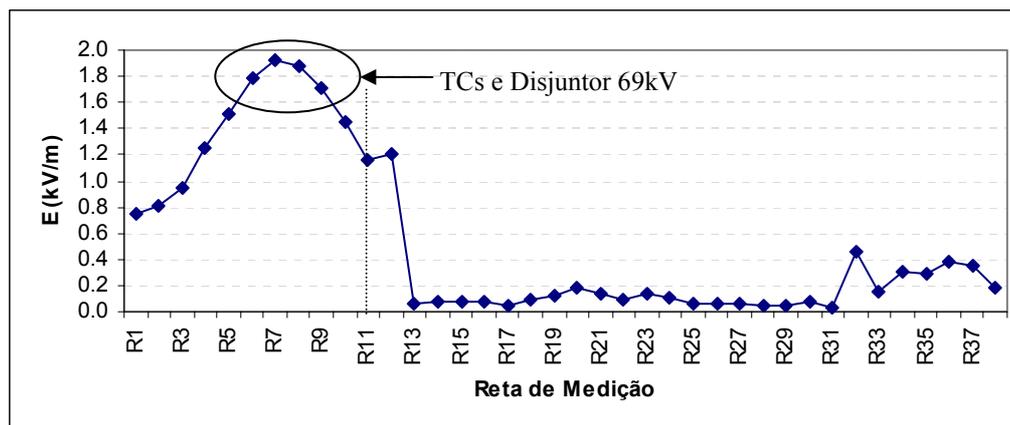


Figura 6.12: Perfil do campo elétrico da instalação na posição do corte longitudinal.

Tomando por referência o gráfico da Figura 6.11 em relação ao croqui da Figura 6.10, observa-se que o campo magnético é baixo no setor da EL69kV; sendo maior nos secundários dos transformadores e na vizinhança do transformador T2. O valor máximo de densidade de fluxo magnético foi medido no setor 13,8kV e refere-se ao disjuntor eletromecânico instalado em cubículo na entrada do barramento 13,8kV da subestação.

Com relação ao campo elétrico, Figura 6.12, verifica-se que o campo é mais intenso na entrada de linha em 69kV, menor no secundário dos transformadores T1 e T2, e assume valores intermediários no setor do barramento 13,8kV.

Com base nesses diagramas foi possível identificar três ambientes com características eletromagnéticas peculiares: (a) Setor 69kV; (b) Setor de transformação; (c) Setor 13,8kV. Esta distribuição pode ser útil no detalhamento dos campos medidos durante o mapeamento da instalação.

6.4.2. REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL

As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam, respectivamente, os valores de densidade de fluxo magnético e do campo elétrico medidos na SE Gama de acordo com o croqui apresentado na Figura 6.6.

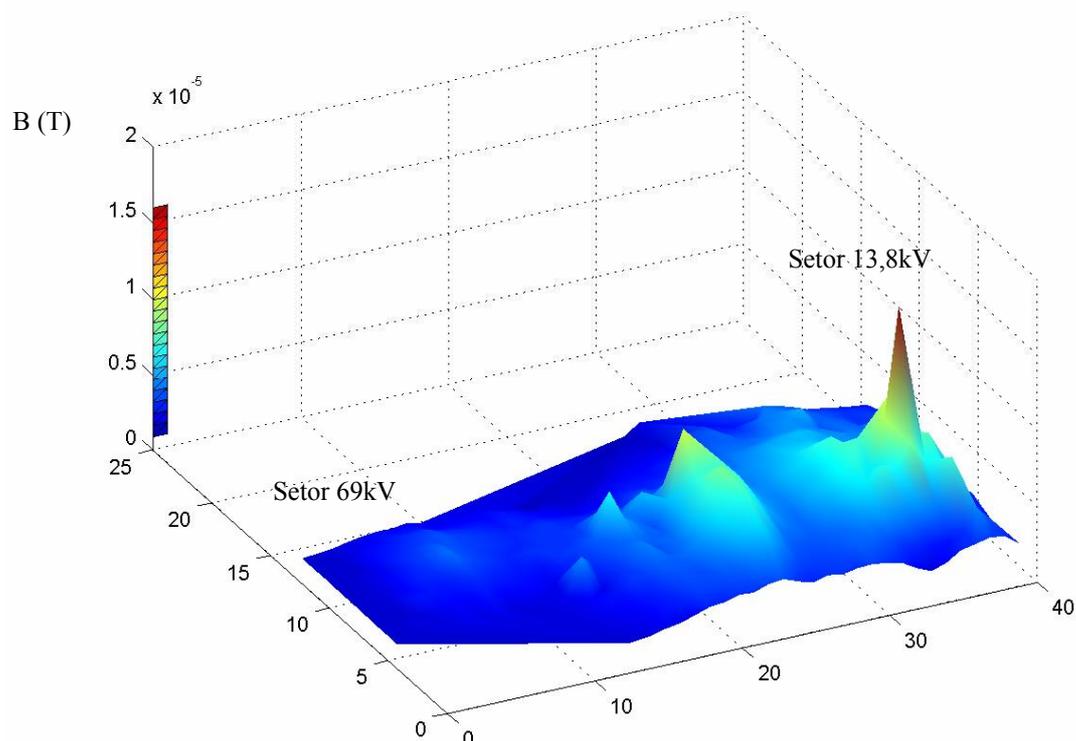


Figura 6.13: Distribuição da densidade de fluxo magnético na SE Gama.

Analisando a Figura 6.13 percebe-se nitidamente a distribuição setorial citada no item anterior. Os três setores apresentam características distintas no que se refere à densidade de fluxo magnético.

A Figura 6.14 evidencia a distribuição dos campos elétricos na SE Gama. Ao contrário da Figura 6.13, não existem setores bem definidos para possibilitar o detalhamento da distribuição dos campos elétricos na instalação. Na Figura 6.14 existem vários picos que não se pode identificar diretamente pela imagem tridimensional, que, como no caso da SE Beta, fornece apenas uma idéia de como é o perfil eletromagnético da instalação. O detalhamento de parte desses picos de tensão pode ser obtido por meio da projeção desta figura e por um posterior seccionamento da instalação.

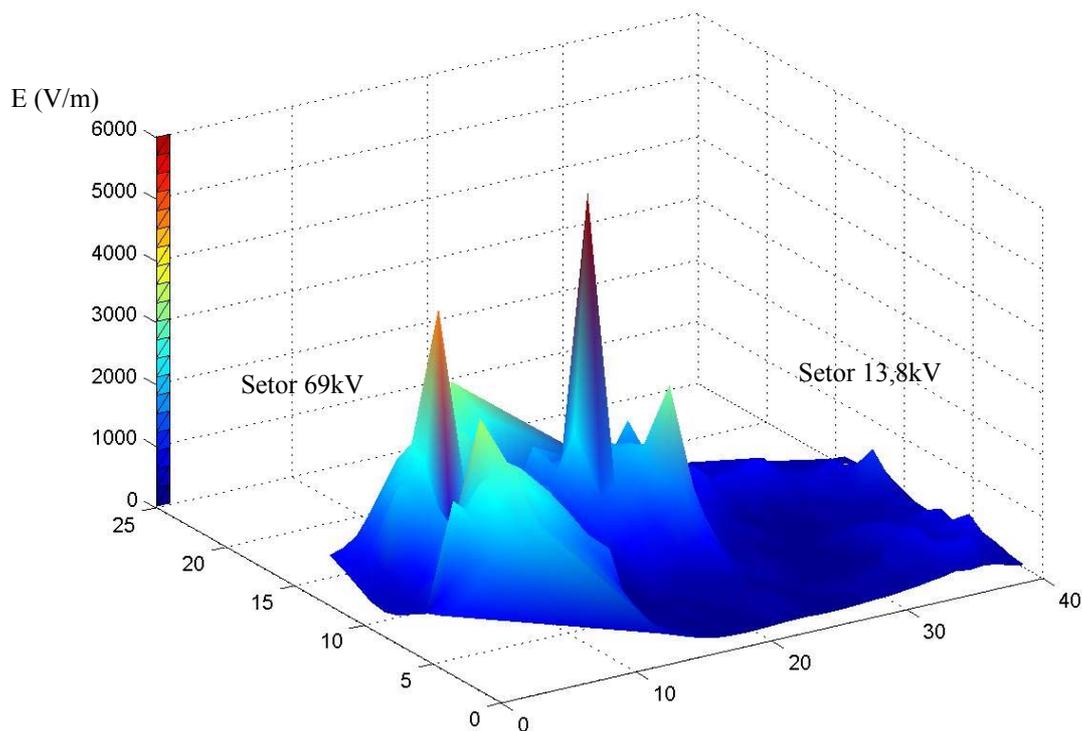


Figura 6.14: Distribuição do campo elétrico na SE Gama.

6.4.3. PROJEÇÕES

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam, respectivamente, as projeções de distribuição de densidade de fluxo magnético e de campo elétrico mostradas nas Figuras 6.13 e 6.14, relativas ao croqui apresentado na Figura 6.6.

Na Figura 6.15 é possível identificar os pontos onde a densidade de fluxo magnético é mais significativa. Observa-se que há uma maior densidade de fluxo magnético na vizinhança do transformador T2, por acoplamento indutivo, uma vez que, pelo paralelismo de T2 com o transformador T1, deveria ter uma distribuição similar à deste. O valor máximo da densidade de fluxo observado na instalação ocorre na vizinhança do disjuntor em cubículo do 13,8kV.

A Figura 6.16 evidencia a maior densidade de campo elétrico em 69kV, tanto na vizinhança dos equipamentos do setor 69kV, quanto na vizinhança do primário do transformador. Observa-se também a existência de dois pontos quentes na vizinhança do TC 69kV e do primário do transformador T1, ambos na vizinhança da fase *a*. A reavaliação dos campos medidos em

relação a setores da SE Gama irá possibilitar uma melhor caracterização da distribuição dos campos na instalação.

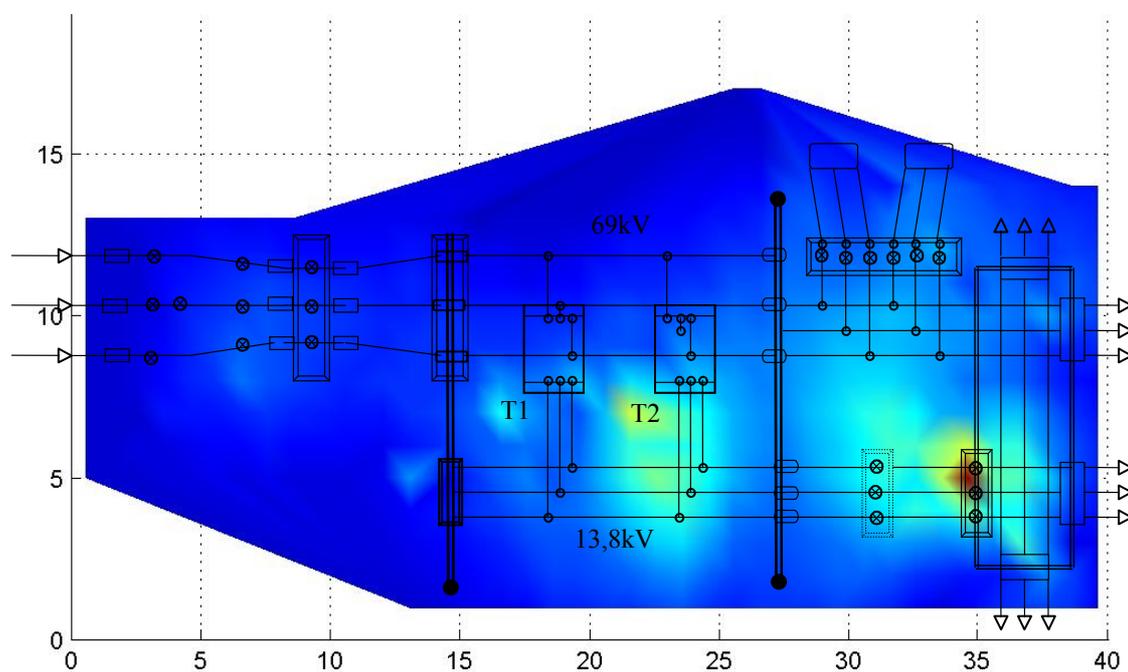


Figura 6.15: Projeção da distribuição da densidade de fluxo magnético sobre o pátio 69/13,8kV da SE Gama.

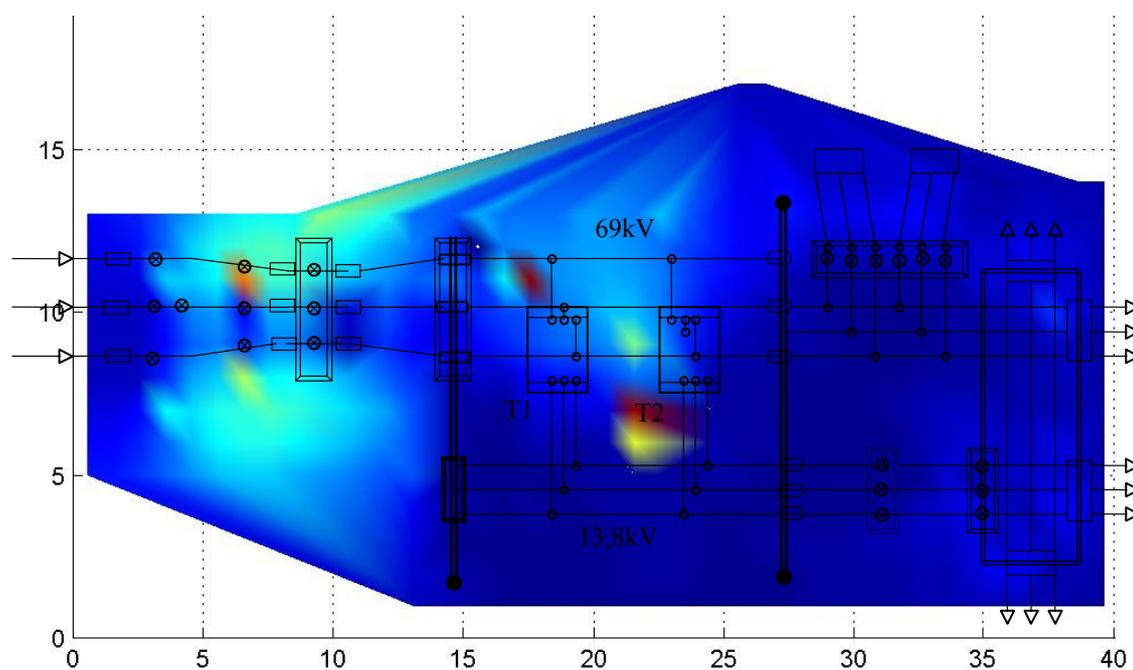


Figura 6.16: Projeção da distribuição de campo elétrico sobre o pátio 69/13,8kV da SE Gama.

6.4.4. AVALIANDO OS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS POR SETORES

Os gráficos das Figuras 6.13 a 6.16 não permitem uma análise precisa da natureza dos acoplamentos eletromagnéticos na instalação. Isto porque os valores medidos, tanto para a densidade de fluxo magnético, quanto para o campo elétrico, variam bastante na instalação, fazendo com que a escala dos gráficos não favoreça a observação das características, principalmente dos campos menores. A divisão da área medida em setores permite uma melhor caracterização dos valores medidos, razão pela qual a instalação foi reavaliada considerando sua divisão em três setores, como mostrado na Figura 6.17.

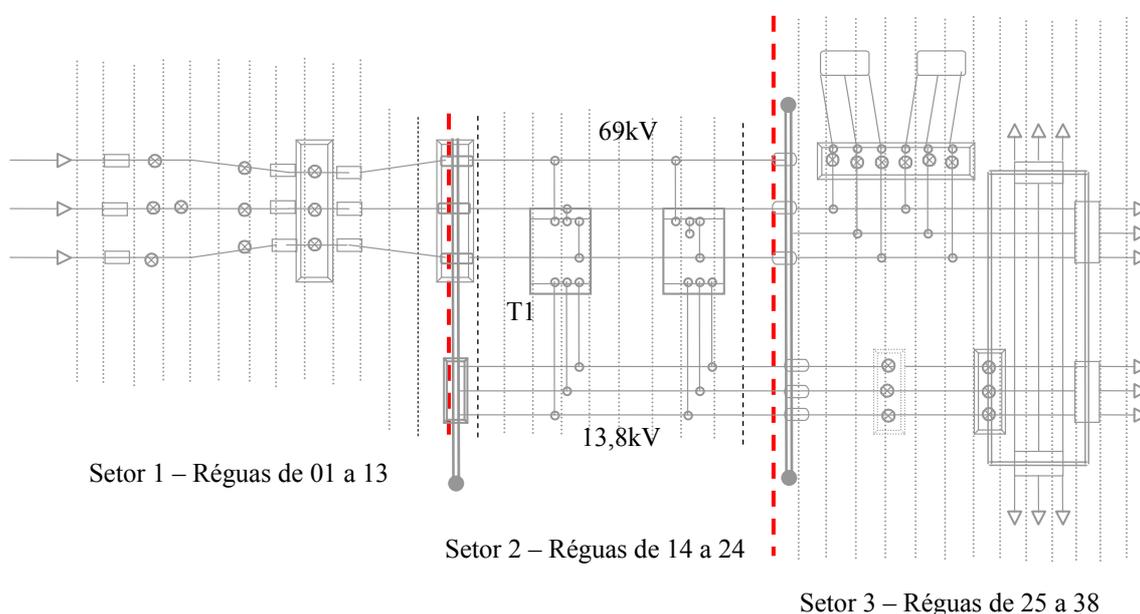


Figura 6.17: Croqui da SE Gama distribuído em três setores de medição.

As Figuras 6.18 a 6.23 apresentam os gráficos relativos aos valores medidos de densidade de fluxo magnético e campo elétrico e suas respectivas projeções no plano xy para cada um desses setores.

Na Figura 6.18 é possível identificar as variações que ocorrem na densidade de fluxo magnético no setor 69kV, que não é perceptível na representação das Figuras 6.13 e 6.15. Como esperado, a magnitude da densidade de fluxo magnético no setor 69kV é menor do que a observada no setor 13,8kV.

Analogamente, na Figura 6.23 é possível identificar a variação do campo elétrico no setor 13,8kV, que tampouco é perceptível na representação das Figuras 6.14 e 6.16. Neste caso, a magnitude do campo elétrico no setor 13,8kV é menor do que a observada no setor 69kV.

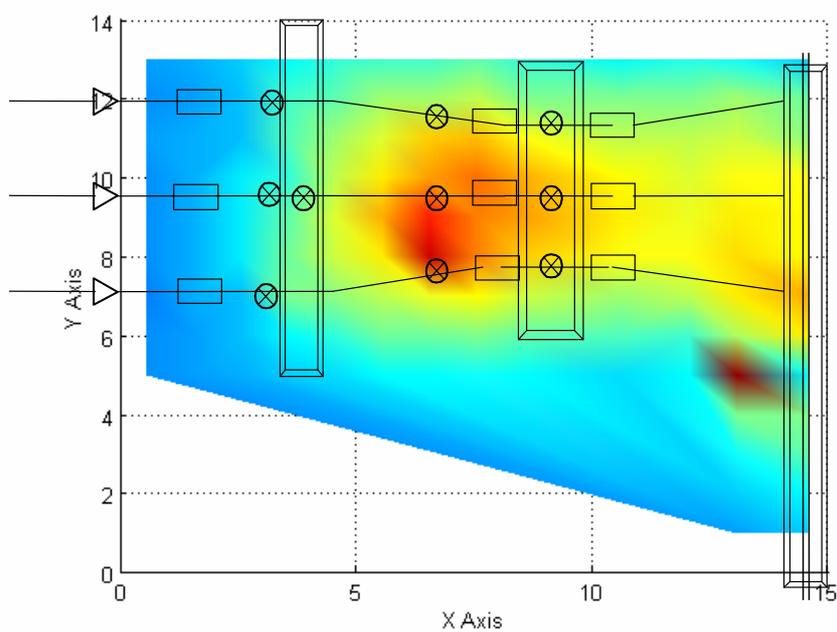
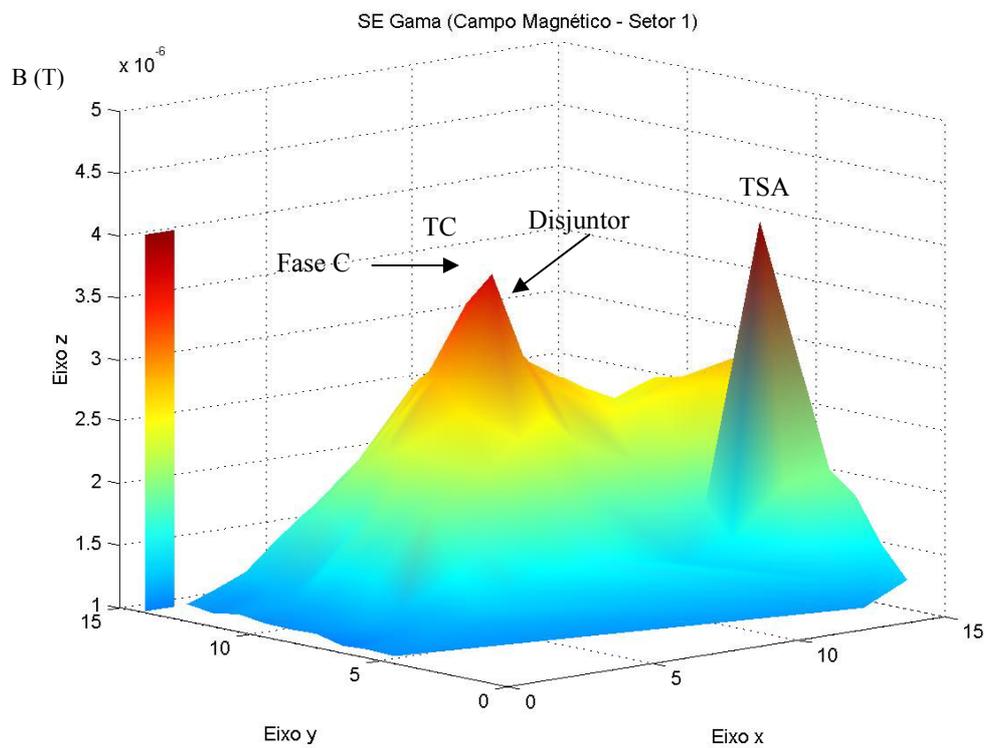
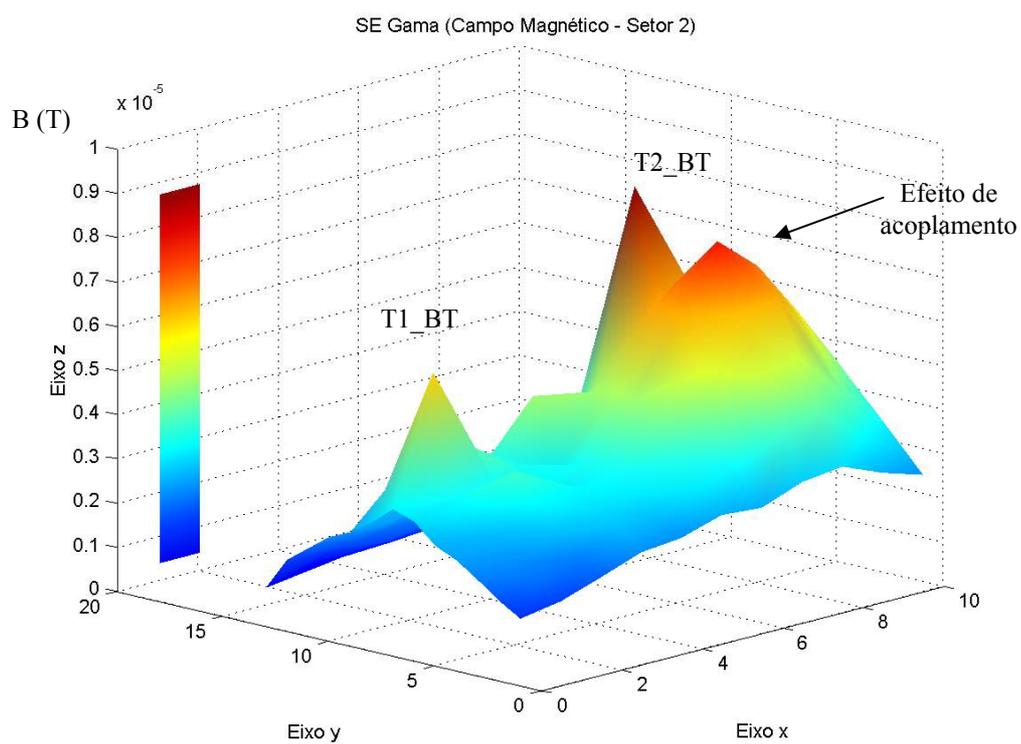
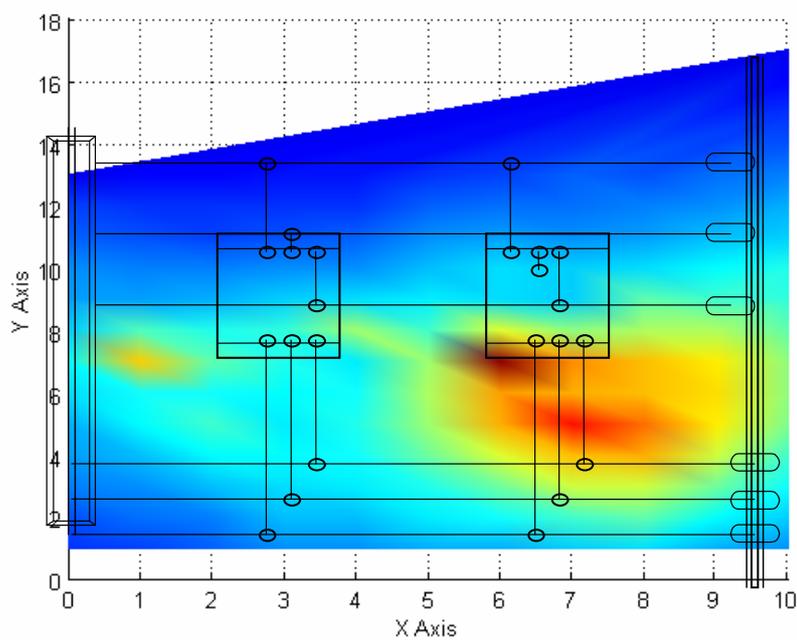


Figura 6.18: Densidade de fluxo magnético medida no setor 1 – Régua 1 a 13: (a) Representação tridimensional; (b) Projecção no plano xy .

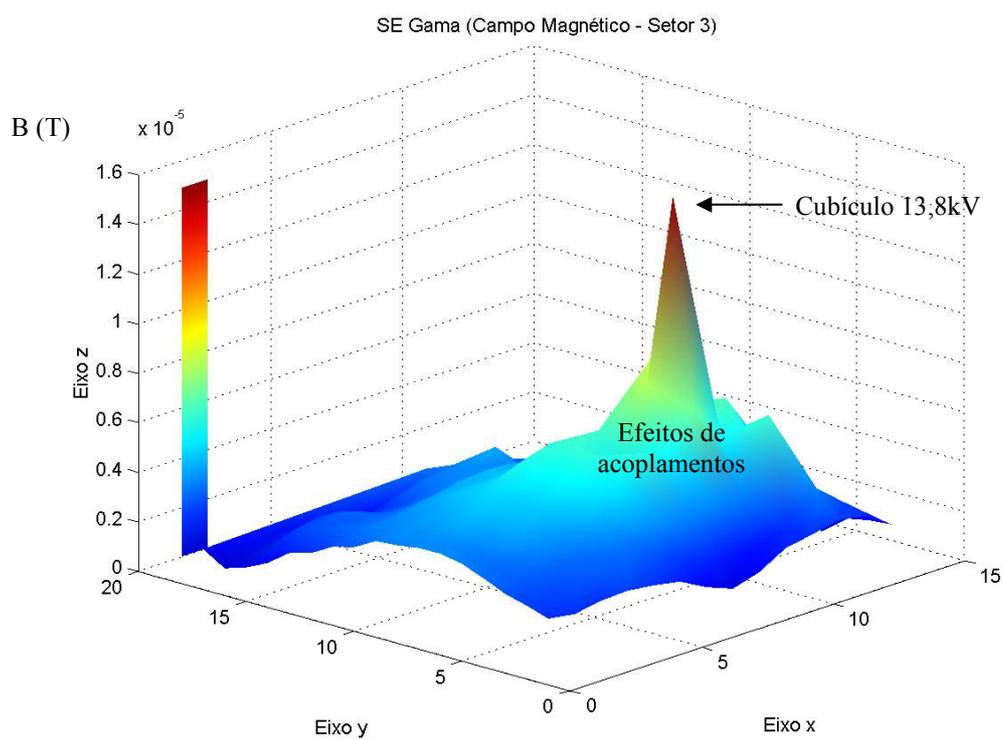


(a)

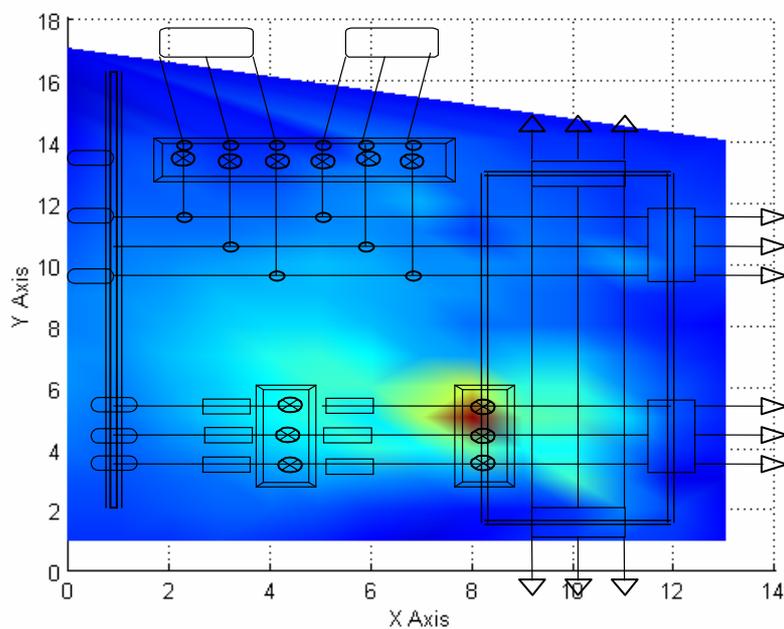


(b)

Figura 6.19: Densidade de fluxo magnético medida no setor 2 – Régua 14 a 24: (a) Representação tridimensional; (b) Projeção no plano xy .

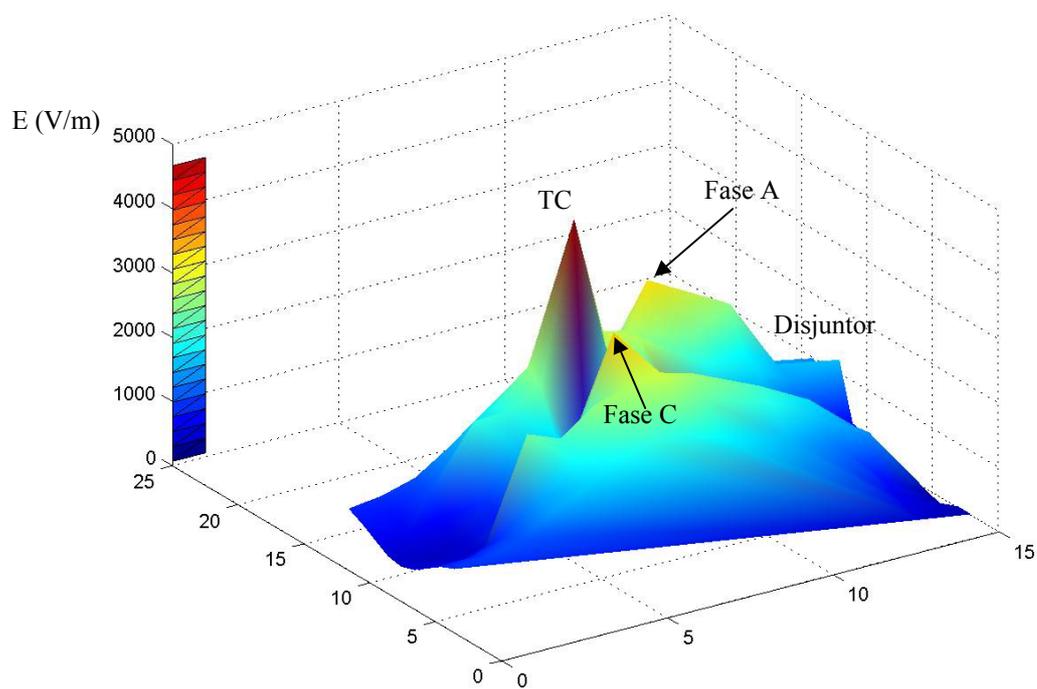


(a)

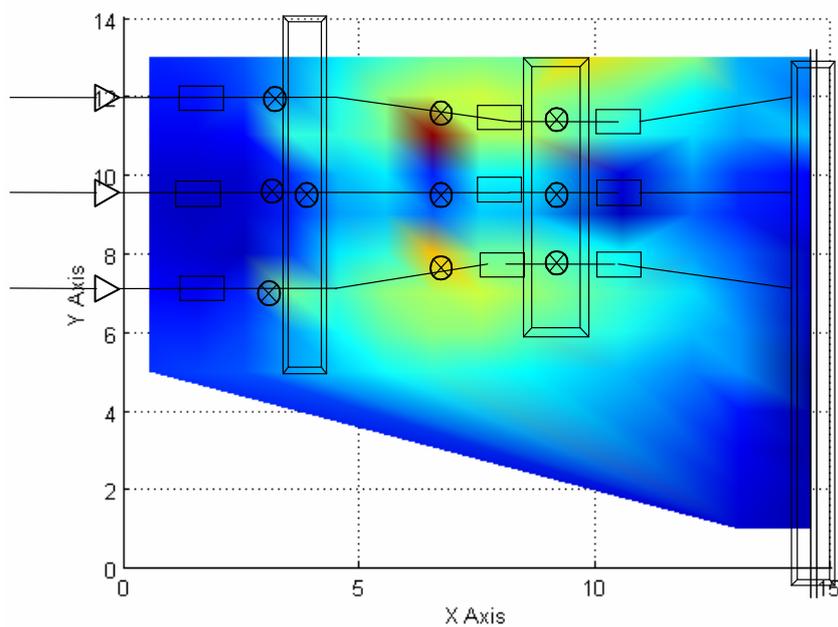


(b)

Figura 6.20: Densidade de fluxo magnético medida no setor 3 – Régua 15 a 38: (a) Representação tridimensional; (b) Projecção no plano xy .



(a)



(b)

Figura 6.21: Campo elétrico medido no setor 1 – Réguas 1 a 13: (a) Representação tridimensional;
(b) Projção no plano xy .

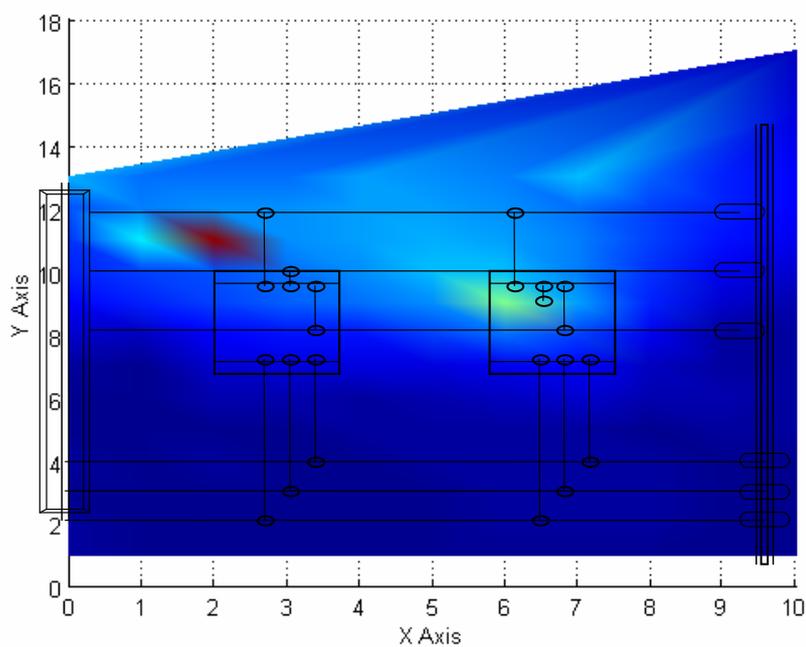
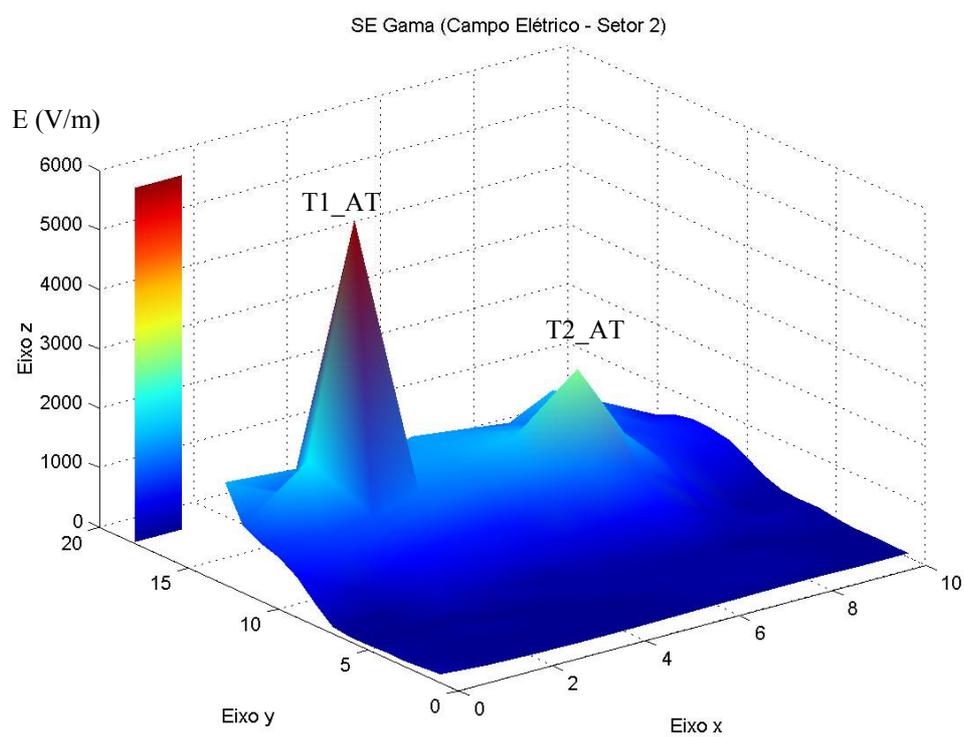


Figura 6.22: Campo elétrico medido no setor 2 – Régua 14 a 24: (a) Representação tridimensional;
(b) Projeção no plano xy .

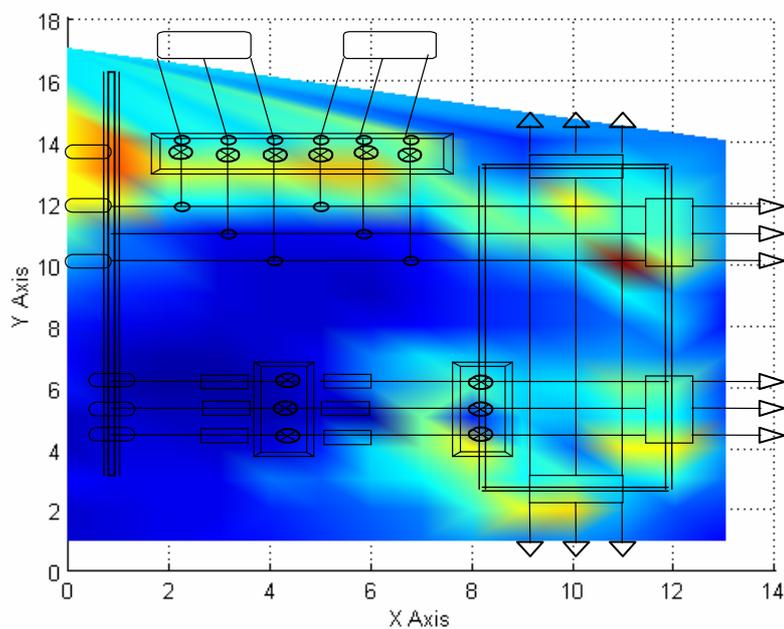
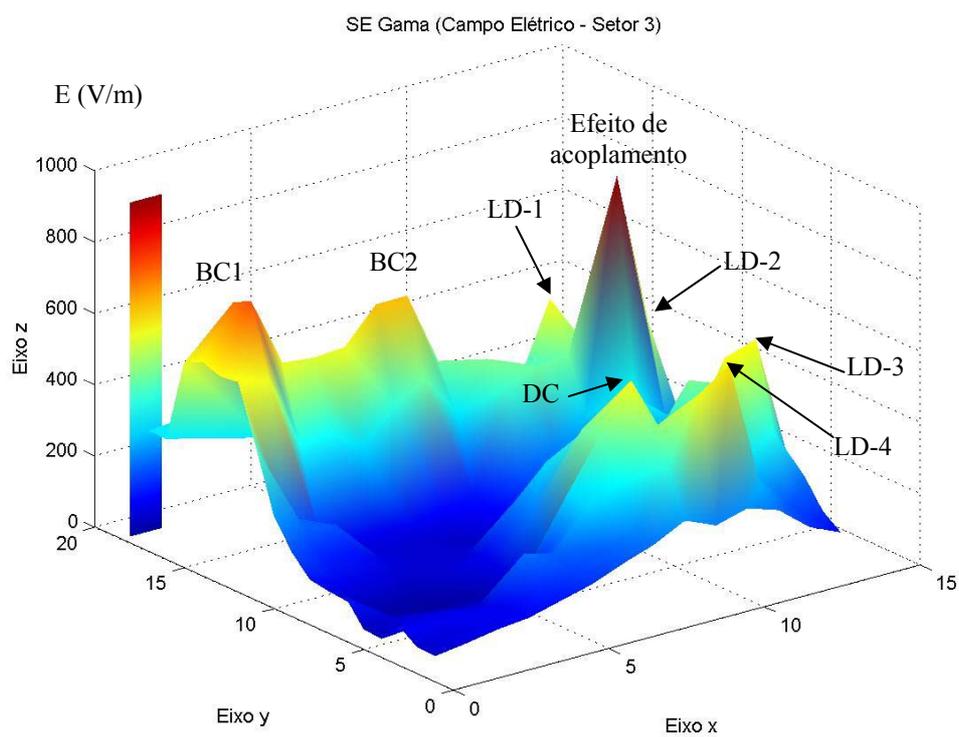


Figura 6.23: Campo elétrico medido no setor 2 – Régua 25 a 38: (a) Representação tridimensional; (b) Projecção no plano xy .

6.4.4.1. Densidade de Fluxo Magnético

A partir dos gráficos anteriores pode-se concluir o seguinte:

- Da Figura 6.18, verifica-se que a densidade de fluxo magnético é mais intensa na vizinhança do TC e do disjuntor, principalmente na vizinhança da fase *c*. Há outro pico no setor 1 que é relativo ao transformador de serviços auxiliares, no 13,8kV. Este campo, pequeno em relação ao setor em 13,8kV, é significativo quando analisado em relação ao setor 69kV;
- Da Figura 6.19, verifica-se que a densidade de fluxo magnético é mais intensa na vizinhança do secundário do 2º transformador e menor no secundário do 1º transformador. Em ambos os casos, o valor mais intenso situa-se referente à fase *a*;
- Finalmente, na Figura 6.20 o pico relativo ao cubículo inibe uma maior investigação acerca da distribuição da densidade de fluxo magnético no setor 13,8kV. Na circunvizinhança desse pico pode-se verificar que há uma distribuição uniforme decrescente da magnitude do campo, que se acopla indutivamente ao fluxo de densidade magnética medido no barramento 13,8kV.

O pico na Figura 6.20 é relativo ao campo magnético gerado pelo cubículo em 13,8kV, no qual estão instalados um disjuntor PVO (pequeno volume de óleo) eletromecânico e um conjunto de transformadores de corrente e de tensão. Devido à grande diferença entre essa medida e as demais efetuadas em sua vizinhança, foi necessário investigar as prováveis características desse fenômeno.

A Tabela D.12, no Apêndice D, apresenta os valores de densidade de fluxo magnético em torno desse cubículo, tanto a 1m quanto a 2,1m do solo, medidos em data posterior à avaliação do ambiente eletromagnético da SE Gama.

Após a realização dessa nova série de medições, constatou-se que o elevado valor da densidade de fluxo magnético no cubículo deve-se às características do disjuntor eletromecânico instalado no local, que é um equipamento antigo, e ao acoplamento existente entre esse disjuntor e os transformadores de instrumentos instalados no cubículo.

6.4.4.2. Campo Elétrico

A partir dos gráficos anteriores pode-se concluir o seguinte:

- Da Figura 6.21 verifica-se que o campo elétrico é maior na vizinhança do TC e do disjuntor 69kV, próximo a fase *a*; o campo elétrico nas fases *a* e *c* é superior ao campo relativo à fase *b*;

- Da Figura 6.22, verifica-se que o campo elétrico é mais intenso na vizinhança do primário do transformador T1, com um pico menor no secundário do transformador T2. Esses efeitos podem ser resultado do acoplamento capacitivo entre as fases;
- Na Figura 6.23, que evidencia os campos elétricos relativos ao setor 13,8kV, é possível identificar valores de campo mais elevados na vizinhança dos equipamentos existentes: chaves dos bancos de capacitores BC1 e BC2, religadores das saídas em 13,8kV, LD-1 a LD-4 e disjuntor 13,8kV em cubículo (DC). Há um acoplamento capacitivo na vizinhança dos bancos de capacitores e do setor 69kV, como também se observa a existência de um pico na vizinhança dos alimentadores LD-1 e LD-2, que é resultante do acoplamento eletromagnético entre os condutores desses circuitos.

Com base na análise desses gráficos, é possível verificar que, em todos os casos, os picos caracterizam a distribuição assimétrica dos campos na instalação, o que denota, na maioria deles, um efeito da superposição dos campos gerados pelos circuitos ativos. Este aspecto pode ser verificado tanto para campos magnéticos quanto para campos elétricos.

Logo, os campos eletromagnéticos na instalação não são determinados apenas pelas tensões e correntes medidas, mas principalmente, pela superposição desses campos.

6.5. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a análise dos acoplamentos eletromagnéticos no pátio 69/13,8kV da SE Gama, obtidos a partir do mapeamento da instalação. No capítulo a seguir são analisados os resultados obtidos nas medições das subestações Alfa, Beta e Gama e, a partir dessa análise, foram estabelecidas as bases dos procedimentos da metodologia proposta.

CAPÍTULO 7

UMA PROPOSTA PARA A AVALIAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES

Nos capítulos anteriores foram apresentados alguns procedimentos de avaliação do ambiente eletromagnético de subestações do sistema elétrico, por meio de medições de campos elétrico e magnético realizadas em três subestações distintas. Em cada subestação foram consideradas formas distintas de efetuar essas medições, as quais foram apresentadas e analisadas individualmente.

Neste capítulo os resultados destas medições são reavaliados conjuntamente e, com base nesta análise, é proposta uma metodologia de medição de campos eletromagnéticos para a avaliação do ambiente eletromagnético de subestações em regime permanente. Dentro desta proposta ainda será computada uma análise estatística dos dados, no intuito de avaliar sua consistência e validá-los para utilização na metodologia proposta.

7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As medições realizadas nas subestações Alfa, Beta e Gama obedeceram a procedimentos diferenciados com o objetivo comum de avaliar o ambiente eletromagnético dessas instalações em regime permanente, identificando os acoplamentos existentes.

Na SE Alfa, a quantidade de pontos medidos foi insuficiente para possibilitar um diagnóstico acerca da natureza dos acoplamentos eletromagnéticos na planta. Na SE Beta, a quantidade de medidas realizadas permitiu uma boa caracterização do ambiente eletromagnético da instalação, embora valores intermediários tenham sido estimados para a composição das representações tridimensionais e suas projeções. A SE Gama, por sua vez, foi medida levando em conta a proposta de um mapeamento da instalação, ao menos no que se refere ao pátio 69/13,8kV da subestação, onde se encontram instalados os equipamentos de força.

A Tabela 7.1 apresenta uma síntese dos dados relativos a essas três medições e a Tabela 7.2 resume alguns dados relativos à estrutura física das subestações consideradas nesta investigação.

Tabela 7.1: Dados gerais das medições de campo nas subestações Alfa, Beta e Gama.

Subestação	Instrumento de Medição	Pontos Medidos		Comentários
		E	H ou B	
Alfa	HI-3604	71	71 x 3	<i>E_y, B_x, B_y e B_z</i>
Beta	EFA-300	223	223	Valores Isotrópicos
Gama	EFA-300	456	456	Valores Isotrópicos

Tabela 7.2: Dados das subestações Alfa, Beta e Gama.

Subestação	Classe de Tensão (kV)	Potência Instalada (MVA)	Dados de Linha		Área do Pátio (m ²)
			EL AT	SL BT	
Alfa	138/13,8	2 x 28,34	02	08	3525
Beta	69/13,8	10/12,5	02	02	693
Gama	69/13,8	2 x 5/6,25	01	04	648

Analisando os dados acima, verifica-se que a área do pátio de manobra da SE Alfa é cinco vezes superior às dos pátios da SE Beta e da SE Gama, assim como sua potência instalada. Ou seja, a SE Alfa é uma instalação de porte, na qual a utilização do medidor unidirecional HI-3604 não é recomendável. As medições nessa subestação deveriam ser repetidas considerando o emprego de um instrumento isotrópico.

Tomando por base a recomendação da norma alemã VDE-0848 citada por Placidet [45], os pátios das subestações analisadas deveriam ser medidos a cada metro, considerando a altura de 1m, o que praticamente inviabilizaria a realização dessas medições de maneira sistemática pelas empresas do setor elétrico, pela grande quantidade de pontos a medir. Por outro lado, quanto maior a quantidade de medidas realizadas e quanto mais uniformemente distribuídas forem essas medições, mais precisa e confiável será a caracterização do ambiente eletromagnético da instalação.

Como a intenção desta investigação é tornar este procedimento uma metodologia que possa ser integrada aos procedimentos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica, esta proposta buscou estabelecer um compromisso entre a quantidade de medidas realizadas e a viabilidade de realização dessas medições por essas Empresas.

Com base nos procedimentos e nos resultados obtidos nas medições de campo das subestações Beta e Gama, é possível identificar duas alternativas de medição dos campos eletromagnéticos nas subestações:

- Adotar como distância para a malha de medições o espaçamento entre as fases do setor de alta tensão, reduzindo o número de pontos a medir se essa distância for 1m;

- Adotar um modelo de medição similar ao empregado na SE Beta, observando as seguintes etapas de procedimentos preliminares:
 - a) Análise das plantas da instalação a ser medida, visando, a princípio, definir os pontos de medição mais prováveis. Essa avaliação é o primeiro passo na definição de que pontos devem ser medidos e onde devem ser feitos os cortes;
 - b) Análise do perfil de carga da subestação, baseado em curvas de carga anteriores, de forma a identificar quais os dias e horários mais adequados à realização das medições. Essa estimativa tem caráter apenas preditivo, pois não há como assegurar que as condições identificadas como ideais tenham sido mantidas durante a realização das medições.

A definição dos pontos a serem medidos requer experiência e conhecimento, pois a escolha de pontos inadequados pode levar a interpretações errôneas, que, por sua vez, conduzem a análises incorretas. A princípio, sempre que possível, deve-se fazer o mapeamento da área.

Para a análise por cortes, com base nas medições realizadas na SE Beta, pode-se identificar os seguintes pontos de medida como relevantes:

- Entradas e saídas de linha em alta tensão;
- Vizinhança dos equipamentos: transformadores de corrente, transformadores de potencial, disjuntores, chaves, pára-raios, transformadores de potência, transformadores de serviços auxiliares, religadores, reatores e bancos de capacitores;
- Circuitos alimentadores em tensão secundária;
- Painéis e quadros CA e CC;
- Vizinhança de Equipamentos eletrônicos sensíveis, como as Unidades Terminais Remotas espalhadas pelo pátio.

Como recomendação adicional sugere-se que os cortes sejam paralelos, transversais ao sentido de fluxo de corrente, na vizinhança dos equipamentos instalados. A distância entre o medidor de campo isotrópico e o equipamento deve ficar em torno de 1m, sempre considerando a altura do medidor a 1m do solo.

Com relação às curvas de carga, sugere-se analisar pelo menos um mês de dados de carga da instalação a ser avaliada e comparar as curvas de carga diárias pelos dias da semana, a fim de identificar os dias e horários nos quais as tensões e correntes sofrem variações menores. Quanto menor for a variação de tensão e corrente na instalação, mais evidentes são os efeitos dos

acoplamentos: se a tensão e a corrente não variam significativamente com a carga, variações significativas nos valores de campo medidos podem ser atribuídas aos efeitos dos acoplamentos existentes na instalação.

Para efeito desta análise, foram solicitados os dados de corrente e tensão medidos na SE Beta pelo período de um mês. De posse desses dados, determinados a cada 15 minutos, verificou-se a existência de lacunas em alguns horários e até mesmo, em dias inteiros, denotando falha do sistema de medição. Foram traçados gráficos relativos aos dados de corrente agrupados por dias da semana.

Analisando as curvas de corrente da SE Beta nesse período, foram identificados os dias de quarta-feira e de domingo como os mais adequados às medições da planta.

As Figuras 7.1 e 7.2 mostram as curvas de carga da SE Beta, expressas em função da corrente primária, referentes a dois dias da semana.

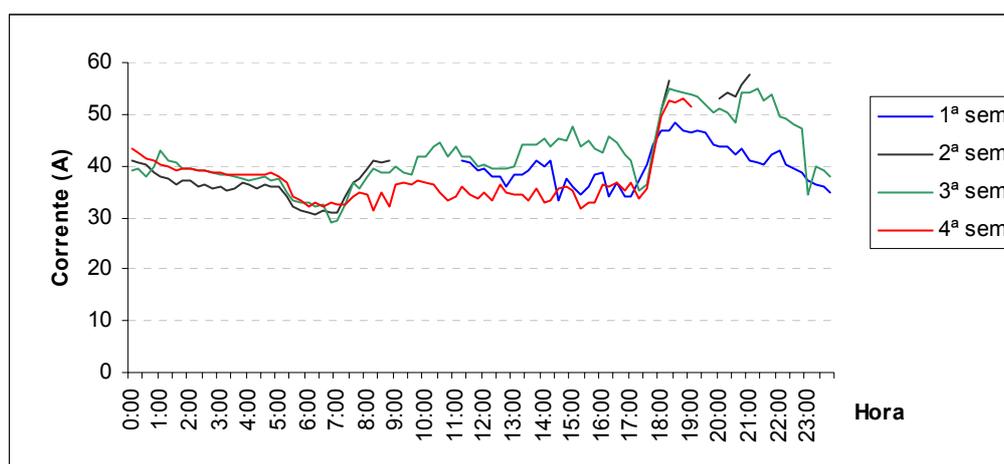


Figura 7.1: Curvas de carga da SE Beta – dia da semana: quarta-feira.

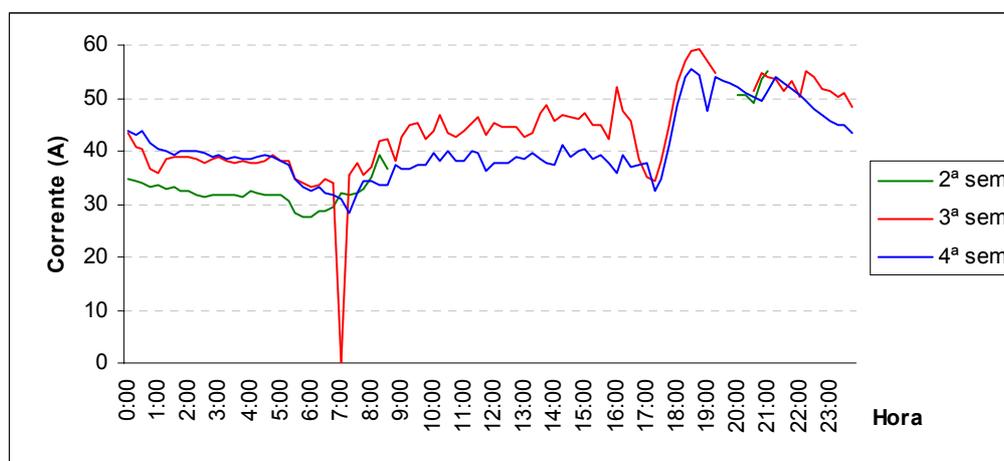


Figura 7.2: Curvas de carga da SE Beta – dia da semana: segunda-feira.

De acordo com as Figuras 7.1 e 7.2 verifica-se que a avaliação do ambiente eletromagnético da SE Beta deveria ser realizada, preferencialmente, às quartas-feiras, nos horários entre 9:00h e 14:00 horas.

A definição da extensão do corte transversal da instalação, por sua vez, depende da análise prévia do arranjo, da experiência da equipe, ou ainda, da observação do comportamento do medidor durante as medições.

Considerando que o corte seja feito de uma extremidade a outra do pátio da subestação, é importante iniciar as medições na vizinhança dos equipamentos que o justificaram, evoluindo até a extremidade oposta. Eventualmente, com a experiência, a medição de pontos complementares irá sendo reduzida, sem comprometimento da avaliação do ambiente eletromagnético da instalação.

Cortes longitudinais podem ser considerados na avaliação da instalação como visto no Capítulo 6, para a SE Gama, ou ainda, para confirmar ou detalhar setores da subestação onde apenas as medições dos cortes transversais não pareçam satisfatórias. Muitas vezes a medição de seções longitudinais ratificam os efeitos de campo já observados na medição das seções transversais.

Finalmente, foram realizadas outras séries de medições na SE Beta, cujos valores foram analisados estatisticamente com o objetivo de verificar a validade da metodologia proposta para a identificação dos acoplamentos eletromagnéticos e o mapeamento das subestações sob condição de operação normal em regime permanente.

7.2. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS VALORES MEDIDOS

Os fenômenos eletromagnéticos, produzidos por equipamentos ou gerados por fonte naturais, são função de fatores como frequência, tempo, distância, direção, além de parâmetros sazonais, ambientais e atmosféricos. No caso de equipamentos ainda é preciso considerar seus dados e especificações, além do tempo de uso e as condições de manutenção [9].

Na definição de modelos aplicados a análises de EMI esses fatores precisam ser levados em conta, o que significa afirmar que a base desses modelos não é determinística, mas, predominantemente aleatória e de característica não-gaussiana [9].

Assim sendo, as interferências eletromagnéticas podem ser expressas por meio de variáveis aleatórias, combinando os aspectos físicos e estatísticos na definição de modelos canônicos. Esses modelos não são específicos para caracterizar uma determinada fonte de ruído, um mecanismo de acoplamento ou a forma de onda do sinal interferente.

Particularizando para as medidas realizadas nesta pesquisa, é necessário avaliar o grau de correlação existente entre os dados medidos nas subestações, considerando que as medidas comparadas foram realizadas em dias, horários e condições de carga distintas.

A Tabela 7.3 apresenta a matriz relativa à análise de correlação realizada entre as oito séries de medidas repetidas na instalação, considerando dias, horários e seqüências de dados distintas para cada um dos perfis analisados.

Tabela 7.3: Matriz de Correlação das Medidas M1-M8 x M1-M8.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
M1	1,0000	,9989	,9942	,9978	,9966	,9962	,9961	,9959
	p= ---	p=0,00						
M2	,9989	1,0000	,9961	,9985	,9982	,9956	,9970	,9969
	p=0,00	p= ---	0	p=0,00	0	0	0	0
M3	,9942	,9961	1,0000	,9926	,9972	,9891	,9914	,9946
	0	0	p= ---	0	0	0	0	0
M4	,9978	,9985	,9926	1,0000	,9975	,9979	,9987	,9968
	p=0,00	p=0,00	0	p= ---	0	0	0	0
M5	,9966	,9982	,9972	,9975	1,0000	,9952	,9977	,9987
	0	p=0,00	0	p=0,00	p= ---	0	0	0
M6	,9962	,9956	,9891	,9979	,9952	1,0000	,9973	,9966
	0	0	0	p=0,00	0	p= ---	0	0
M7	,9961	,9970	,9914	,9987	,9977	,9973	1,0000	,9977
	0	0	0	p=0,00	0	0	p= ---	0
M8	,9959	,9969	,9946	,9968	,9987	,9966	1	1,0000
	0	0	0	0	0	0	0	p= ---

O Apêndice F apresenta a análise de correlação efetuada a partir de séries de medições realizadas na SE Beta que avaliam o grau de correlação entre os valores medidos.

De acordo com a matriz de correlação, as medições realizadas apresentam um alto grau de correlação, o que ratifica a afirmação anterior de que as medidas realizadas referem-se ao mesmo fenômeno. A distribuição dos campos eletromagnéticos na planta apresenta o mesmo comportamento, independentemente das variações carga na instalação. Logo, os acoplamentos existentes na planta não dependem exclusivamente dos valores de corrente e tensão, mas também do arranjo dos equipamentos e da distribuição dos circuitos na instalação. Ou seja, os acoplamentos eletromagnéticos em subestações do sistema elétrico não dependem exclusivamente da magnitude dos campos medidos, mas também da arquitetura da instalação e do arranjo dos equipamentos na planta.

Como essas considerações são válidas tanto para as medidas de campo elétrico quanto para campo magnético, independente dos dias e horários medidos, conclui-se que a metodologia proposta atende ao seu objetivo de identificar os acoplamentos eletromagnéticos na instalação, caracterizando seu ambiente eletromagnético em condição de regime permanente.

7.3. TÉCNICAS PARA A REDUÇÃO DOS EFEITOS DOS ACOPLAMENTOS

A partir da teoria apresentada no Capítulo 2, item 2.5, pode-se considerar duas estratégias para reduzir o acoplamento eletromagnético entre os circuitos fonte-emissor e receptor-vítima, tornando o meio de acoplamento ineficiente:

- Estratégia de curto-circuito: a impedância de acoplamento é nula;
- Estratégia de circuito aberto: as impedâncias do sistema são muito maiores que a impedância de acoplamento, de modo que podem ser consideradas supostamente infinitas em suas magnitudes. Isso caracteriza um circuito aberto e assegura que nenhuma energia vinda do emissor irá alcançar o receptor.

A estratégia de curto-circuito tem como objetivo reduzir a impedância do circuito de retorno e, em particular, sua indutância, que se torna significativa em frequências superiores a 1kHz. Essa estratégia é aplicada na maioria dos circuitos de aterramento e, mais particularmente, em circuitos blindados. A estratégia de circuito aberto, por sua vez, tem como objetivo isolar o receptor do emissor pelo incremento da distância ou pela inserção de barreiras físicas que reduzam o grau de acoplamento entre os circuitos. Ela é aplicada a circuitos ativos e recomenda que, sempre que possível, seja evitado o retorno comum e os circuitos sejam aterrados em apenas um ponto.

Essa distinção entre as estratégias de circuito aberto e de curto-circuito refere-se, respectivamente, aos conceitos de modo diferencial (MD), no que concerne principalmente aos sinais, e de modo comum (MC), no que concerne principalmente às perturbações [28].

7.3.1. ACOPLAMENTO INDUTIVO

Existem duas formas de reduzir o acoplamento indutivo entre fonte e receptor:

- Reduzir a indução de tensões e correntes, reduzindo o acoplamento em modo comum;
- Desacoplar as tensões dos circuitos vítimas, reduzindo o acoplamento em modo diferencial.

A eficiência do acoplamento em modo comum pode ser reduzida com a redução de *loops*, pelo “roteamento” dos cabos próximos a condutores ou elementos de aterramento, ou ainda, pelo

uso de blindagens em condutores ou em conjuntos de condutores, desde que eles permitam a circulação de corrente induzida em oposição a que assegura a blindagem. Esse é um dos motivos pelos quais as blindagens devem ser aterradas nas duas extremidades; as bandejas elétricas devem assegurar a continuidade em toda sua extensão.

Em termos práticos, a redução dos efeitos dos acoplamentos em subestações que se encontram em operação requer modificações na disposição dos circuitos de sinal e do arranjo dos equipamentos eletrônicos sensíveis. Isto porque não é possível modificar o arranjo dos equipamentos instalados no pátio de manobras.

Em geral, as ampliações em subestações energizadas obedecem aos mesmos critérios de projeto que foram definidos no projeto inicial. Entretanto, se forem identificados problemas de acoplamentos na instalação, é possível modificar a concepção inicial de projeto da nova etapa, adequando a topologia aos requisitos da EMC.

No caso de subestações projetadas a reavaliação da topologia da instalação pode ser feita sem maiores implicações, até porque, minimizar os acoplamentos durante a fase de projeto de um equipamento ou de uma instalação tem custo bastante inferior à implementação de soluções em EMC quando a instalação já se encontra em operação.

O uso de uma topologia mais adequada na instalação deve considerar a maior distância possível entre linhas e equipamentos de tensões superiores, e os dispositivos, circuitos e equipamentos sensíveis, minimizando os paralelismos entre linhas poluidoras, como, por exemplo, entre os circuitos de alta tensão e os de serviços auxiliares de uma subestação e os circuitos de supervisão e controle.

7.3.2. ACOPLAMENTO CAPACITIVO

A estratégia de circuito aberto não se aplica à redução desse tipo de acoplamento, uma vez que não é possível aumentar a distância de separação entre os circuitos. O único modo de reduzir o acoplamento capacitivo é colocar uma blindagem ao redor do circuito a ser protegido, com pelo menos um ponto conectado ao plano de terra, que é uma estratégia de curto-circuito [28].

Do ponto de vista prático, a redução do acoplamento capacitivo é obtida pelo distanciamento dos cabos de sinalização e controle dos cabos de força e das fontes de distúrbios, com simultânea aproximação dos condutores ao plano de terra. O uso de blindagens no circuito vítima pode ser eficiente, desde que proporcione um desacoplamento de campo elétrico e que seu aterramento apresente uma baixa impedância.

7.3.3. ACOPLAMENTO CONDUTIVO

O acoplamento por impedância comum pode ser reduzido com a eliminação do retorno comum, de acordo com a estratégia de circuito aberto, ou pela redução da impedância de retorno comum, pela estratégia de curto-circuito.

Fenômenos como distorções harmônicas, *flicker* e afundamentos de tensão, classificados como VTCD nos quais se baseiam as análises e os indicadores da Qualidade da Energia Elétrica, definem acoplamentos eletromagnéticos condutivos nas instalações. Isto decorre da relação desses acoplamentos com o desequilíbrio de corrente no sistema, que, via de regra, flui pelos sistemas de aterramento.

Se a impedância de acoplamento caracteriza um sistema de aterramento, as opções para minimizar os efeitos do acoplamento condutivo seriam:

- Não considerar mais que uma conexão para a terra em nenhum circuito, o que corresponde à eliminação do retorno comum;
- Aumentar o número de condutores em paralelo no circuito de retorno comum, o que corresponde a reduzir a impedância do retorno comum.

Existem duas alternativas para reduzir o acoplamento condutivo entre um circuito fonte-emissor e o circuito vítima-receptor:

- Reduzir a diferença de potencial sobre a impedância comum aos dois circuitos. Isto pode ser obtido com um melhor aterramento para altas frequências, principalmente nas proximidades das fontes de correntes transitórias (reforço da malha de terra);
- Redução do acoplamento da diferença de potencial ao circuito vítima, sendo este método eficiente também para a redução do acoplamento de diferenças de potencial por indução.

Um método bastante utilizado em instalações elétricas é o aumento da impedância do *loop* formado pelo circuito vítima, que pode ser obtido pelo emprego do isolamento galvânico no ponto de conexão sensível a ruídos e a surtos, usando acopladores ópticos. A comunicação entre a subestação e os pontos fora de sua malha de terra deve ser realizada, preferencialmente, via rádio ou fibra ótica, para assegurar a isolação galvânica.

É importante ressaltar que a grande maioria dos acoplamentos eletromagnéticos em sistemas elétricos é de natureza indutiva ou condutiva, sendo que, muitas vezes eles se confundem. A distinção entre eles pode ser feita por meio de uma aproximação da teoria de circuitos [28]:

- No acoplamento condutivo a corrente de perturbação flui no circuito vítima;
- No acoplamento indutivo a corrente de perturbação flui em circuitos separados.

7.3.4. OS ACOPLAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS EM INSTALAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO

A Tabela 7.4 apresenta exemplos de perturbações associadas aos tipos de acoplamentos por elas originados, considerando os eventos eletromagnéticos em regime permanente, transitórios de manobras e descargas.

Restringindo essa análise à condição de operação normal do sistema, em regime permanente, verifica-se que os acoplamentos indutivos são causados por campos magnéticos produzidos pelas instalações de alta e baixa tensão à frequência industrial e os acoplamentos capacitivos, pela ação de campos elétricos de baixa frequência produzidos nas instalações de alta tensão, que podem causar problemas de segurança na instalação.

Tabela 7.4: Acoplamentos em Sistemas Elétricos.

Acoplamento	Natureza do Evento Eletromagnético
Indutivo	Operações de manobra em subestações isoladas a ar
Indutivo	Campos magnéticos produzidos por instalações de alta e baixa tensão à frequência industrial
Indutivo	Descargas atmosféricas indiretas: caem próximo a um circuito, mas não diretamente sobre ele
Indutivo	Descargas eletrostáticas na vizinhança de equipamentos
Capacitivo	Campos elétricos de baixa frequência produzidos por instalações de alta tensão
Capacitivo	Transitórios rápidos devidos às operações de manobra em equipamentos de baixa tensão
Capacitivo	<i>Crosstalk</i> em cabos de sinal
Capacitivo	Acoplamento de modo comum entre enrolamentos primário e secundário de transformadores de isolamento, optoacopladores, transformadores de potencial (TP) ou transformadores de corrente (TC) em subestações
Condutivo	Correntes de curto-circuito em 50/60 Hz em um sistema de aterramento usado como um plano de potencial de referência
Condutivo	Descargas atmosféricas incidentes, diretamente, em um sistema de aterramento, circuitos ou equipamentos
Condutivo	Descargas eletrostáticas aplicadas diretamente aos equipamentos

Acoplamento	Natureza do Evento Eletromagnético
Conutivo	<i>Crosstalk</i> entre circuitos que compartilham um retorno comum
Conutivo	Fenômenos como Harmônicos, <i>flicker</i> e afundamentos de tensão
Radiado	Fenômenos transitórios elétricos devidos às manobras de chaveamento em subestações isoladas a gás – GIS
Radiado	Descargas atmosféricas remotas, que ocorrem a poucos metros da fonte
Radiado	Campos de alta frequência produzidos por sistemas radiotransmissores

Nos acoplamentos radiados as duas primeiras fontes geram campos impulsivos, e a última, campos a frequência fixa.

7.4. METODOLOGIA PROPOSTA PARA A MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES

A avaliação do ambiente eletromagnético em subestações ora proposta parte do princípio de que o arranjo físico da instalação é um elemento fundamental na definição da natureza dos acoplamentos eletromagnéticos existentes na planta e dos efeitos dos campos eletromagnéticos gerados em operação normal do sistema elétrico sobre os equipamentos eletrônicos sensíveis instalados.

Partindo dessa premissa, a base metodológica proposta para o mapeamento eletromagnético de uma instalação desenvolve-se, basicamente, nas seguintes etapas:

- Procedimentos de Medição;
- Procedimentos de Análise;
- Diagnóstico dos Acoplamentos na Instalação.

7.4.1. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Os procedimentos de medição de campo em subestações englobam todas as atividades relacionadas com a realização das medições até a representação gráfica da distribuição dos campos eletromagnéticos na instalação:

- Atividades Preliminares:
 - 1) De posse da planta baixa da subestação, definir uma grade de medição considerando os pontos espaçados simetricamente e em séries definidas;
 - 2) Levantar os dados de tensão e corrente da instalação e proceder com a análise das curvas de carga;
 - 3) Traçar o diagrama de medições que servirá de referência para os valores medidos em campo;
 - 4) Traçar um croqui da subestação, correspondente à planta baixa da instalação, que possibilite a análise da distribuição dos campos na instalação;

- Atividades em Campo:
 - 5) Demarcar os pontos de medição na planta utilizando material não metálico, para evitar interferência desses marcadores nos valores de campo medidos;
 - 6) Medir os campos elétrico e magnético da instalação nos pontos definidos de acordo com a malha traçada na etapa anterior;
 - 7) Registrar no diagrama de medições o horário e a posição de memória do instrumento correspondente a cada série de medidas efetuadas;
 - 8) Registrar no diagrama o posicionamento das fases e dos equipamentos eletrônicos sensíveis instalados na subestação.

- Atividades após a realização das medições em campo:
 - 9) Fazer o tratamento dos dados medidos em campo: transferir os dados, analisar, ajustar os horários, conferir as posições medidas e a relação dos valores com o diagrama de medição e o croqui da instalação;
 - 10) Interpolar linearmente os valores de campo elétrico e magnético para os pontos onde não foi possível realizar a medição pela existência de equipamentos no local;
 - 11) Traçar os gráficos lineares relativos às series medidas em campo;
 - 12) Traçar o gráfico tridimensional de pontos $P_i(x,y,z)$, onde as coordenadas x e y correspondem ao ponto da área da subestação e a coordenada z corresponde ao valor da variável medida, campo elétrico ou densidade de fluxo magnético, medida ou calculada para aquele ponto de medição;

- 13) Traçar a projeção da projeção tridimensional sobre o croqui correspondente à planta baixa da instalação;
- 14) Analisar os gráficos conjuntamente para avaliar a distribuição dos campos eletromagnéticos na instalação;
- 15) Representar a distribuição dos campos na instalação por setores e reavaliá-los com detalhes, visando identificar a natureza dos acoplamentos existentes na planta;
- 16) Identificar os acoplamentos eletromagnéticos na subestação;
- 17) Promover o mapeamento eletromagnético da planta, estabelecendo um diagnóstico da instalação em regime permanente sob a ótica da compatibilidade eletromagnética.

Outros aspectos a considerar durante os procedimentos de medição seriam:

- Emprego de um instrumento isotrópico: as medições efetuadas com instrumentos isotrópicos traduzem as intensidades de campo com melhor precisão, razão pela qual esse procedimento de medição recomenda o emprego sistemático deste tipo de instrumento em medições de ambiente eletromagnético em subestações;
- Análise da instalação por setores: não é possível avaliar toda a instalação como um único bloco. A existência de níveis distintos de tensão define campos elétricos proporcionais a tensões e campos magnéticos proporcionais às correntes circulantes no sistema, que, uma vez representadas conjuntamente, podem ocultar detalhes relevantes do ambiente em estudo. A alternativa considerada para resolver este problema deve ser a divisão da área medida em setores distintos, tantos quantos necessários, para se obterem mais detalhes das características dos campos e dos acoplamentos. Da análise desses setores é possível definir um perfil mais preciso da natureza dos acoplamentos eletromagnéticos existentes na planta.

A possibilidade de representar a instalação por setores e analisá-los separadamente, independente da avaliação da instalação, é uma vantagem da metodologia proposta e pode ser aplicada até o nível de detalhe desejado para a pesquisa.

A Figura 7.3 apresenta um diagrama que resume as principais etapas definidas do procedimento apresentado nesse item.

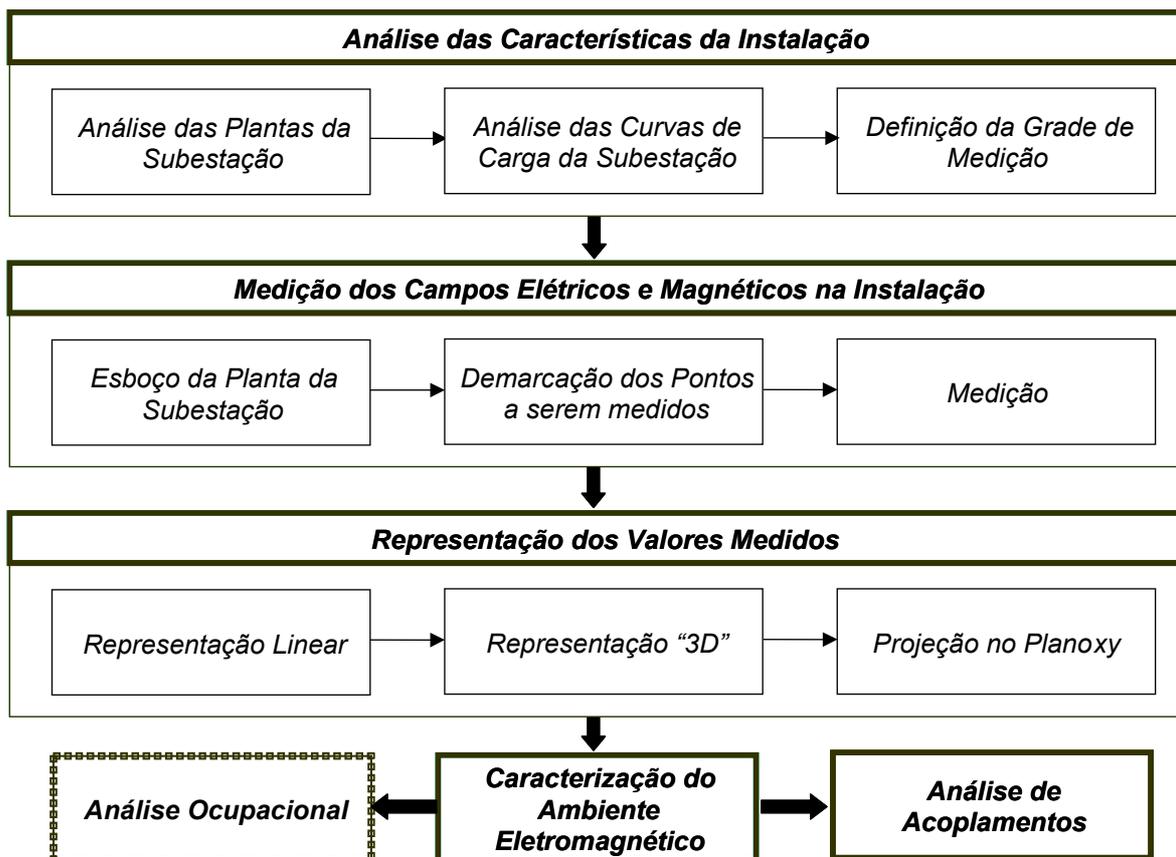


Figura 7.3: Mapeamento Eletromagnético de Subestações.

7.4.2. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

A análise dos acoplamentos existentes na planta requer a identificação da natureza do acoplamento predominante no ponto considerado e a formulação das alternativas mais adequadas à mitigação de seus efeitos.

O acoplamento ocorre sempre que há uma aproximação entre dispositivos energizados de outros elementos metálicos, energizados ou não, causando uma indução que pode ser indutiva, capacitiva ou condutiva.

Baseado nas técnicas de mitigação de acoplamentos apresentada no item 7.3, a metodologia de análise proposta nesta metodologia consiste basicamente nos seguintes aspectos:

- Após analisar os diagramas definidos na etapa 7.4.1., identificar a natureza dos acoplamentos existentes em função das características dos circuitos fonte e vítima;
- Avaliar a extensão do acoplamento e os equipamentos e dispositivos envolvidos;

- Formular alternativas para a redução dos acoplamentos e analisá-las, principalmente quanto à viabilidade de aplicação;
- Propor uma solução para o problema técnica e economicamente viável.

No desenvolvimento desta análise é importante computar quais os parâmetros do sistema que estão predominando no mecanismo de acoplamento observado:

- Correntes e tensões na instalação;
- Condição de operação do sistema;
- Distâncias existentes entre os equipamentos e seus circuitos;
- Extensão da área onde ocorre o acoplamento;
- Existência de dispositivos de blindagem.

A Figura 7.4 apresenta as etapas do processo de análise dos acoplamentos eletromagnéticos em subestações com base na metodologia proposta.

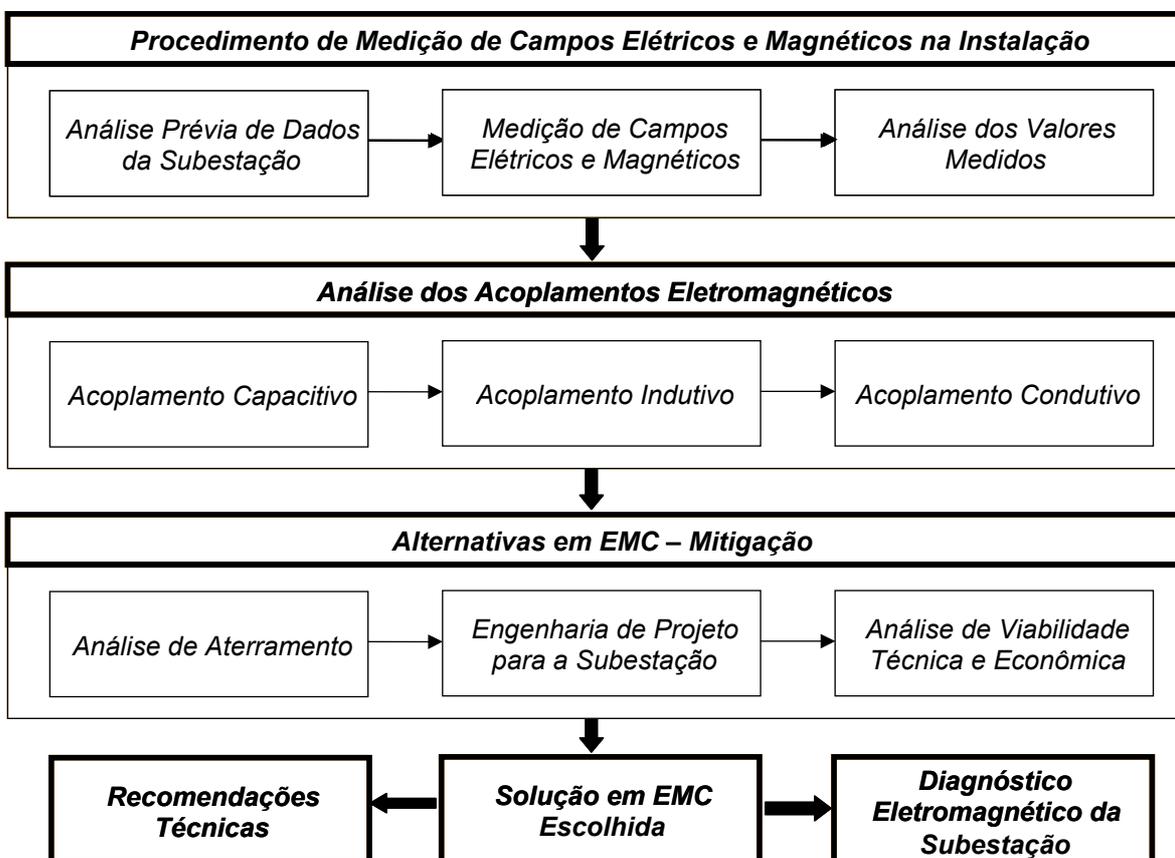


Figura 7.4: Diagrama de procedimentos para a análise dos acoplamentos.

Com base nesses elementos é possível identificar a existência de condições favoráveis aos acoplamentos de uma subestação, principalmente em função da topologia considerada para os circuitos. A acuidade dessa análise estará diretamente relacionada com o grau de detalhamento das medições e de suas representações.

Além do medidor de característica isotrópica, esta metodologia exige do analista um bom conhecimento das normas técnicas, em constante processo de atualização, e da tecnologia de EMC. Isto é particularmente relevante na análise de subestações do sistema elétrico, uma vez que a instalação não se comporta como um equipamento e sim como um sistema, onde atuam distintas fontes de energia eletromagnética, variáveis aleatoriamente com o tempo.

7.4.3. DIAGNÓSTICO DA INSTALAÇÃO

Esta etapa contempla uma formalização dos resultados observados nas medições de campo e nas análises dos acoplamentos, considerando-se, a princípio, as características do ambiente eletromagnético da subestação em regime permanente.

Em seguida devem ser apresentados os resultados da análise dos acoplamentos existentes, identificando aqueles que podem vir a representar aumento do risco de falha para os dispositivos eletrônicos sensíveis instalados na planta.

Finalizando o diagnóstico, devem ser propostas medidas compensatórias ou corretivas para minimizar os problemas identificados na etapa anterior.

Vale ressaltar que uma subestação é projetada para operar em regime permanente sem falhas. Logo, a referência dessa investigação é a inexistência de situações que favoreçam a ocorrência dessas falhas. A relevância da investigação está, portanto, na identificação de pontos da instalação onde o risco de falhas é maior.

A ocorrência de algum evento transitório associado ao acoplamento identificado na condição de regime permanente, aumenta o risco de falha na instalação e pode comprometer o desempenho do dispositivo e até mesmo de toda a subestação.

Para ilustrar essas observações, o item a seguir apresenta um complemento da análise dos acoplamentos identificados na SE Beta, bem como seu diagnóstico, de acordo com a metodologia de investigação ora proposta.

7.4.4. DIAGNÓSTICO DA SE BETA

As medições e os acoplamentos eletromagnéticos da SE Beta foram analisados com detalhes no Capítulo 5. Entretanto não foram consideradas alternativas para a mitigação dos pontos de risco identificados, não obstante a análise apresentada no item 5.5.5. quanto aos cuidados com os equipamentos eletrônicos sensíveis instalados na planta.

7.4.4.1. Mitigação dos Acoplamentos

Na análise do perfil eletromagnético da SE Beta foi identificado um ponto sob o barramento duplo em 13,8kV, Figura 7.5, no qual o efeito dos acoplamentos eletromagnéticos pode vir a comprometer a operação de uma UTR e, conseqüentemente, o desempenho da instalação.



Figura 7.5: Detalhe do barramento duplo em 13,8kV da SE Beta.

Da foto verifica-se que há uma superposição cruzada de condutores. No caso de campos magnéticos essa superposição é aditiva e seus efeitos só poderiam ser minimizados pelo aumento da distância entre os condutores cruzados. Das Figuras 5.11 e 5.17 verifica-se que o maior valor do acoplamento ocorre entre a 3ª fase do primeiro alimentador e a 1ª fase do segundo. Em princípio,

esse acoplamento não compromete o desempenho do sistema elétrico, mas pode vir a comprometer a operação da UTR2, que é um dispositivo eletrônico sensível instalado em sua vizinhança ou ainda, do sistema automatizado, uma vez que a UTR2 é interligada a outra UTR instalada na casa de comando. Outra alternativa, já comentada no item 5.5.5., contempla o remanejamento da UTR2 para outro ponto da instalação, afastando-a do local do acoplamento. Esta alternativa apresenta-se como mais viável que a anterior, onde a proposta considera o distanciamento dos condutores cruzados no barramento duplo em 13,8kV.

7.4.4.2. Diagnóstico da SE Beta

De acordo com a análise dos acoplamentos eletromagnéticos identificados na SE Beta, determinados a partir dos valores de campo elétrico e densidade de campo magnético medidos na planta, verificou-se que existe uma condição de risco para uma Unidade Terminal Remota instalada nas proximidades do barramento duplo em 13,8kV. Para minimizar esse fator de risco, recomenda-se verificar a possibilidade de redefinir um local para a UTR em questão no setor 13,8kV, que esteja eletricamente menos susceptível aos efeitos do acoplamento indutivo identificado.

Não foram observados outros acoplamentos significativos em outros pontos da instalação que possam comprometer, *a priori*, o desempenho dos dispositivos sensíveis na instalação.

7.4.4.3. Considerações Finais

A SE Beta não apresenta histórico de falhas em seu sistema automatizado, não obstante a identificação de um ponto de risco na vizinhança de seu barramento 13,8kV.

Analisando o arranjo da instalação, verifica-se que a subestação tem uma topologia em “L”, ou seja: tomando o transformador de potência da subestação como referência, a entrada no primário e as saídas secundárias formam um ângulo de 90°. Essa configuração favorece a superposição de campos em vários pontos do sistema, fazendo que valores de campo típicos de um nível de tensão se manifestem, aparentemente, em áreas onde era esperada a predominância de valores típicos de campo relativos a outros níveis de tensão. Exemplos disso são os elevados valores de densidade de campo magnético medidos em régua teoricamente situadas no setor 69kV da SE Beta.

A SE Gama também apresenta uma topologia em L, ainda que não de todo similar a SE Beta. Na SE Gama os dois transformadores paralelos estão instalados “lateralmente” à entrada de

linha em 69kV e às saídas em 13,8kV. Essa configuração também favorece a superposição dos ambientes eletromagnéticos típicos de cada nível de tensão, definindo acoplamentos que não existiriam, caso a instalação fosse contínua e direta, como no caso da SE Alfa.

Observando o diagrama da SE Alfa verifica-se que os setores da alta e da baixa tensão não se superpõem por consequência do arranjo. Os transformadores de potência definem os limites desses setores. Neste caso, os acoplamentos existentes tendem a preservar o perfil típico do nível de tensão.

Logo, a recomendação desta pesquisa é que, sempre que possível, a topologia da instalação preserve como setores diferenciados, os setores de alta e baixa tensão nas subestações do sistema elétrico.

Finalmente, é necessário considerar o papel do sistema de aterramento na avaliação do ambiente eletromagnético da instalação. Em princípio, a malha de terra é projetada para atender ao sistema operando a 60Hz e também, para a condição de curto-circuito. Em regime permanente o aterramento deve absorver, sem problemas, os desequilíbrios de carga do sistema e sob falta, deve drenar as correntes de falta para a malha de terra, protegendo os equipamentos de seus efeitos.

Entretanto, com a automação do processo elétrico e a necessidade de assegurar o bom desempenho desses dispositivos na subestação, a estrutura deste sistema de aterramento foi modificada e deve poder absorver tanto as componentes a frequência fundamental, quanto às altas frequências [46]-[49].

A eficiência de um sistema de aterramento pode assegurar uma menor severidade dos acoplamentos, principalmente condutivos, que são gerados principalmente sob a ação de VTCD ou de faltas [50], [51]. Os requisitos de segurança, principalmente frente aos campos elétricos gerados por efeito do acoplamento capacitivo, devem ser assegurados pelo sistema de aterramento. Logo, a malha de terra projetada de acordo com a EMC considera todos os aspectos dinâmicos de operação e deve ser projetada para assegurar desempenho e segurança da instalação e de seus operadores.

Uma técnica recente no projeto de malhas de terra considera o arranjo da grade de terra com espaçamentos distintos, de forma a atender aos fenômenos de alta frequência, proporcionando o desacoplamento do campo elétrico e fazendo com que o sistema de aterramento apresente uma baixa impedância. Para prover uma blindagem eficiente aos ruídos de alta frequência, ela deve ter um comprimento menor que uma parcela de $\lambda/4$, não superior a 20%, para λ igual ao comprimento de onda do sinal interferente. Em sistemas digitais e em instalações de informática a frequência do sinal interferente é considerada igual a 100MHz [52].

7.5. CONCLUSÕES

Equacionar fisicamente o ambiente eletromagnético de uma subestação envolve uma modelagem matemática altamente complexa, que pouca aplicabilidade e praticidade oferece ao setor elétrico.

Na medida em que é possível identificar a natureza dos campos elétrico e magnético presentes na instalação sob condição de regime permanente, é possível definir um arranjo para os dispositivos eletrônicos sensíveis que favoreça o grau de EMC na planta. A metodologia apresentada permite uma visualização satisfatória de como se comportam os campos eletromagnéticos na planta e pode ser aprimorada na medida em que novas conclusões possam ser estabelecidas e generalizadas para as subestações do sistema elétrico.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

8.1. CONCLUSÕES GERAIS

A avaliação dos acoplamentos eletromagnéticos existentes em subestações do sistema elétrico, em condição normal de operação, constitui uma informação relevante na caracterização do ambiente eletromagnético da instalação.

O mapeamento dos acoplamentos em subestações pelo emprego da metodologia de medição proposta permite uma visualização tridimensional da distribuição dos campos eletromagnéticos, que, associado aos detalhes das projeções em planta e dos cortes, permite a caracterização do ambiente eletromagnético da instalação, sem a necessidade de uma formulação matemática complexa. Com base nesses dados, é possível analisar os mecanismos de acoplamento e as técnicas mais adequadas a sua mitigação. A partir dessa análise, é possível estabelecer um perfil eletromagnético para a instalação em condição de regime permanente.

A aleatoriedade de tensões e correntes em subestações do sistema elétrico durante as medições não interfere na natureza dos acoplamentos na instalação, o que torna válido o desenvolvimento dessa análise a partir dos valores de campos elétrico e magnético medidos na subestação, mesmo considerando as variações da curva de carga. Essa análise, por sua vez, permite a realização de um diagnóstico eletromagnético da instalação a partir de dados obtidos por medições de campo, sem que a aleatoriedade dos sinais de corrente e tensão na planta comprometam a validade desta análise.

Com base nas medições realizadas, conclui-se ainda que:

- Os acoplamentos eletromagnéticos existentes em uma subestação em condição normal de operação são essenciais à caracterização do ambiente eletromagnético da instalação;
- A avaliação do ambiente eletromagnético da instalação, baseada nos mecanismos de acoplamento existentes, pode ser realizada por meio de medições de campos elétrico e magnético na planta;

- As medidas de campo em subestações devem ser realizadas com medidores isotrópicos, que não são influenciados pela direção das componentes desses campos. Medidores unidirecionais não são recomendados para este fim;
- Os mecanismos de acoplamento são predominantemente indutivos ou magnéticos, e podem ser minimizados, principalmente, pelo distanciamento físico entre o circuito emissor-fonte e o circuito receptor-vítima. Este distanciamento pode significar mudanças na topologia da instalação. Isto também se aplica ao acoplamento capacitivo ou elétrico;
- As variações de carga na subestação não modificam a distribuição dos campos eletromagnéticos na planta, mantendo um alto grau de correlação entre uma série de medidas amostrais. Logo, o mapeamento do ambiente eletromagnético de uma subestação pode ser definido a partir de uma única série de medições;
- Topologias em “L” definem um maior número de acoplamentos que as topologias contínuas e por este motivo, devem ser evitadas.

Esse estudo identifica ainda a necessidade de revisão de procedimentos e padrões adotados pelas empresas concessionárias de energia na definição do projeto de suas instalações, tanto de linhas de transmissão, quanto de subestações. É necessário adequar o ambiente físico das subestações às evoluções tecnológicas e aos requisitos de desempenho e segurança dessas novas tecnologias.

Integrados ao projeto de subestações, os resultados da aplicação da metodologia proposta no Capítulo 7 para a avaliação dos acoplamentos eletromagnéticos em subestações existentes, permitem definir, *a priori*, um arranjo teoricamente mais adequado para os equipamentos do sistema e para os equipamentos eletrônicos sensíveis que serão responsáveis pela monitoração, supervisão, medição, proteção e controle da instalação. Este procedimento tem caráter preventivo e pode vir a favorecer a compatibilidade eletromagnética entre esses sistemas, reduzindo os custos futuros relativos à aplicação de medidas corretivas em EMC quando a nova subestação estiver em operação.

8.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nas conclusões desta pesquisa, foram identificadas algumas aplicações futuras relacionadas ao emprego da metodologia desenvolvida para a investigação de mecanismos de

acoplamento eletromagnéticos, tanto em instalações do sistema elétrico, quanto associados a outras aplicações.

São propostas de estudos que dão continuidade a esta pesquisa:

- Estender o mapeamento feito nos pátios das subestações às instalações da casa de comando, sala de equipamentos e instalações de comunicação;
- Explorar os recursos disponíveis no medidor isotrópico, utilizando toda a faixa de frequências de 5Hz a 32kHz;
- Verificar as contribuições de campo por efeito de radiointerferência, principalmente com relação ao campo elétrico na vizinhança das buchas dos equipamentos, como os TCs, TPs, pára-raios e transformadores de potência;
- Avaliar o desempenho das malhas de terra das subestações;
- Integrar à metodologia proposta procedimentos de medição que permitam o monitoramento da instalação por um período contínuo de tempo, por meio da utilização de equipamentos de medição adequados;
- Desenvolver modelos que possibilitem a simulação dos campos eletromagnéticos em instalações projetadas;
- Estender a metodologia proposta à avaliação de outros ambientes, como instalações industriais, prediais urbanas, hospitais e casas de repouso.

Outros estudos em EMC que podem justificar pesquisas futuras, mas que não estão diretamente relacionados com a metodologia proposta neste trabalho, seriam:

- Verificar as características dos dispositivos de controle e mitigação das perturbações eletromagnéticas em sistemas digitais (par trançado, cabo coaxial, blindagem, etc.);
- Analisar os efeitos ressonantes causados pela reflexão de sinais de alta frequência nos sistemas de aterramento projetados para atender a sistemas eletrônicos sensíveis e dimensionar a malha de terra adequada à absorção desses impulsos;
- Verificar a adequação das normas técnicas que estabelecem os valores máximos de RIV (*Radio Interference Voltage*) para os equipamentos de alta tensão com relação à digitalização do processo elétrico;

8.3. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Analisar o perfil eletromagnético de subestações em condição de regime permanente, identificando os acoplamentos existentes na instalação não é um procedimento habitual da EMC, não obstante ser esta a condição de operação normal do sistema.

Essa omissão pode resultar em problemas futuros envolvendo os dispositivos eletrônicos, uma vez que a instalação desses dispositivos não exclui os locais nos quais ocorrem acoplamentos significativos. Isto pode vir a aumentar o risco de falha desses equipamentos e conseqüentemente, provocar a falha do processo elétrico, causando prejuízos diversos. Como nem sempre é possível minimizar o efeito dos acoplamentos existentes na planta, torna-se ainda mais relevante avaliar o ambiente eletromagnético da instalação, antes que seja definida a topologia dos circuitos eletrônicos sensíveis.

Outro aspecto a considerar envolve questões ambientais, cada vez mais determinantes na definição de novos investimentos do setor elétrico. Campos eletromagnéticos em linhas de transmissão vêm sendo avaliados com o intuito de atender aos órgãos de controle ambiental, preocupados com o nível de poluição eletromagnética [13], [53]-[55], principalmente nos grandes centros urbanos. Mais recentemente, as subestações também têm sido objeto dessas questões epidemiológicas [55], principalmente se estão localizadas em áreas de alta densidade populacional.

Essa demanda da sociedade resulta em custos elevados para as empresas do setor elétrico, que ainda não dispõem efetivamente de um procedimento ou de uma metodologia que atenda a todos os aspectos envolvidos nessas análises e que incluem desde a verificação dos níveis de exposição ocupacional e pública, até os níveis de ruído e de interferência da subestação em sua vizinhança.

Como essas análises enfocam principalmente a condição de operação normal do sistema, a sistematização das etapas propostas por esta metodologia de avaliação dos acoplamentos eletromagnéticos se constitui uma contribuição fundamental para a integração desse tipo de análise aos procedimentos normalmente adotados pela EMC.

APÊNDICE A

TERMINOLOGIA

O Projeto de Norma do Vocabulário Técnico Internacional – Capítulo 161 – Compatibilidade Eletromagnética foi preparado pela CE-03-077.01 – Comissão de Estudo de Compatibilidade Eletromagnética do CB-03 – Comitê Brasileiro de Eletricidade.

É tradução (equivalente) da IEC 60050 (161):1990, incorporando as emendas 1:1997 e 2:1998. Quando de sua homologação, se não sofrer alterações técnicas, será denominada NBR IEC 60050(161).

As definições apresentadas que se encontram referidas no projeto de norma da ABNT trazem o número de referência no texto. Alguns termos trazem mais de uma definição em EMC, em função do contexto das referências bibliográficas consultadas.

A

Acoplamento: é a aproximação entre uma instalação elétrica (linha de transmissão ou subestação) e uma outra instalação, ficando esta última submetida a induções por acoplamento capacitivo, indutivo e condutivo.

Acoplamento Capacitivo: transferência de energia de uma instalação elétrica para uma instalação aérea vizinha através de suas capacitâncias próprias e mútuas.

Acoplamento Condutivo: é aquele gerado pela diferença de potencial entre dois pontos que apresentem uma impedância comum a dois circuitos: um circuito sujeito a correntes espúrias (circuito de terra) e um circuito sensível.

Acoplamento Indutivo: o acoplamento indutivo se dá pela variação, no tempo, do campo magnético, que gera uma tensão induzida para terra local e uma corrente circulante pela instalação e pela terra. Ele ocorre quando o campo magnético resultante da circulação de uma corrente enlaça condutores de um outro circuito, que é o circuito vítima; gera tensões em modo diferencial quando os condutores considerados pertencem ao mesmo circuito e tensões de modo comum, quando enlaçado por um *loop* do qual fazem parte duas ou mais interligações de um equipamento.

Acoplamento por Radiação de Campos Distantes: o acoplamento por radiação de campos distantes caracteriza-se pela indução de correntes e tensões em condutores e blindagens a partir de campos eletromagnéticos gerados a

distâncias superiores a $\lambda/2\pi$ onde λ é o comprimento de onda do sinal interferente.

Acoplamento Resistivo: transferência de energia de uma instalação elétrica para a terra (solo) através dos pontos de aterramento do sistema.

Ambiente Eletromagnético: conjunto de fenômenos eletromagnéticos existentes em um dado local. Em geral, o ambiente eletromagnético é dependente do tempo e sua caracterização pode requerer uma abordagem estatística. **Ref. 161-01-01.**

Ambiente de Radio-freqüência: (1) ambiente eletromagnético na faixa de radiofreqüências; (2) totalidade de campos eletromagnéticos num dado local produzidos pelo funcionamento de emissores de radiofreqüência. **Ref.:161-01-11.**

Aparelho: todos os dispositivos elétricos e eletrônicos, bem como os equipamentos de sistemas que contém componentes elétricos ou eletrônicos. Combinação final de dispositivos ou equipamentos com uma função intrínseca para um usuário final, visando uma colocação no mercado como uma unidade comercial singular.

Aterramento: forma de ligação de dispositivos, sistemas ou equipamentos à terra, para prover-lhes um desempenho satisfatório, assegurando um grau de proteção à falhas, o escoamento de cargas residuais, eletrostáticas ou não,

segurança e circuito de retorno para correntes incidentes no solo.

B

Blindagem: dispositivo utilizado para reduzir a penetração de um campo em uma determinada região. **Ref.: 161-03-25.** Uma divisão metálica colocada entre duas regiões do espaço com o objetivo de controlar a propagação do campo elétrico e magnético de uma região para a outra. Mais especificamente, uma blindagem eletromagnética é um invólucro metálico que divide duas regiões, impedindo que um determinado campo eletromagnético transmita-se de uma região à outra.

Blindagem Eletromagnética: blindagem condutiva destinada a reduzir a penetração de um campo eletromagnético variável em uma determinada região. **Ref.: 161-03-26.**

Burst: (pulsos ou oscilações): Sequência de um número finito de pulsos distintos, ou oscilações com duração limitada. **Ref.: 161-02-07.**

C

Câmara Blindada - Gaiola de Faraday: alojamento fechado por parede de chapa ou malha metálica, projetado com a finalidade de separar o ambiente eletromagnético interno do externo. **Ref.: 161-04-37.**

Caminho de Acoplamento: caminho ao longo do qual toda ou parte da energia eletromagnética proveniente de uma fonte

especificada é transferida para outro circuito ou dispositivo. **Ref.: 161-03-19.**

Campo de Perturbação: campo produzido num dado local por uma perturbação eletromagnética, medido de maneira específica. **Ref.: 161-04-02.**

Campo elétrico: quantidade de energia armazenada entre duas placas dielétricas separadas por uma distância D_p e submetidas a uma diferença de potencial V , cuja intensidade é dada pela expressão $E = V/D_p$ (V/m)

Campo eletromagnético: campo gerado por correntes e tensões elétricas, que geram campos elétricos e campos magnéticos.

Campo magnético: quantidade de energia armazenada na vizinhança de um condutor de comprimento l_c pela passagem de uma corrente elétrica I , cuja intensidade é dada pela expressão $H = I/l_c$ (A/m)

Certificação: comprovação formal, emitida por um laboratório certificado em EMC de que um determinado dispositivo está *eletromagneticamente compatível*, de acordo com ensaios e normas vigentes.

Compatibilidade Eletromagnética: geralmente designada pela sigla EMC (*Electromagnetic Compatibility*). Um equipamento é eletromagneticamente compatível com um ambiente quando o seu funcionamento não for interferido pelos campos eletromagnéticos

presentes no ambiente (permanentes ou esporádicos), nem interferir no funcionamento de equipamentos ou sistemas. Aptidão de um dispositivo, de um aparelho ou de um sistema, de funcionar em seu ambiente eletromagnético de modo satisfatório e sem produzir ele próprio, perturbações eletromagnéticas que possam criar problemas graves no funcionamento dos aparelhos ou dos sistemas situados em seu ambiente. Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema para funcionar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético, sem introduzir perturbação eletromagnética intolerável em tudo que se encontra nesse ambiente. **Ref.: 161-01-07.**

Componente Fundamental: componente de ordem 1 da série de Fourier de uma grandeza periódica. **Ref.: 161-02-17.**

Componente Harmônica: componente de ordem superior a 1 da série de Fourier de uma grandeza periódica. **Ref.: 161-02-18.**

Condutor de Proteção: em sua concepção mais geral, é prescrito para proteção contra choques elétricos, interligando eletricamente as massas, os elementos condutores, terminais de aterramento, eletrodos de aterramento e o ponto da alimentação ligada à terra.

Corrente em Modo Comum em um cabo com mais que um condutor, incluindo blindagens, é a magnitude da soma dos fasores que representam as correntes de cada um dos condutores. **Ref.: 161-04-39.**

Corrente em Modo Diferencial em um cabo de dois condutores, ou para dois condutores em particular de um cabo multicondutor, é a metade da amplitude da diferença dos fasores que representam as correntes em cada condutor. **Ref.: 161-04-38.**

D

Degradação (de desempenho): afastamento indesejado do desempenho funcional de um dispositivo, equipamento ou sistema em relação ao desempenho previsto. O termo "degradação" pode aplicar-se a uma falha temporária ou permanente. **Ref.: 161-01-19.**

Descarga Eletrostática - ESD (abreviação): transferência de cargas elétricas entre corpos de potenciais eletrostáticos diferentes quando próximos ou em contato direto. **Ref.:161-01-22.**

Desequilíbrio de Tensão: em sistema polifásico, é a condição na qual os valores eficazes das tensões de fase ou os ângulos de fase entre fases consecutivas não são todos iguais. **Ref.: 161-08-09.**

Diafonia: é um tipo de acoplamento onde a perturbação passa de um cabo a outro, mesmo que estes não estejam ligados entre si, por reflexo capacitivo ou indutivo, de um campo elétrico ou magnético.

Diretiva: regulamentação emitida por um Conselho, formado por Estados membros, com o objetivo de eliminar as barreiras técnicas ao intercâmbio comercial entre tais Estados. Cada

Estado membro deve incluir a diretiva na legislação nacional e, eliminar toda a regulamentação contrária - Diretriz.

Dispositivo Susceptível: dispositivo, equipamento ou sistema cujo desempenho pode ser degradado por uma perturbação eletromagnética. **Ref.: 161-01-24.**

E

Emissão Eletromagnética: fenômeno pelo qual energia eletromagnética emana de uma fonte. **Ref.: 161-01-08.**

Emissor (de perturbação eletromagnética): dispositivo, equipamento ou sistema que produza tensões, correntes ou campos eletromagnéticos que agem como perturbações eletromagnéticas. **Ref.: 161-01-23.**

Equipamento para Tecnologia da Informação - ETI (abreviação): equipamento projetado com a finalidade de:

- a) receber dados de uma fonte externa (tal como uma linha de entrada de dados ou de um teclado);
- b) executar funções de processamento de dados recebidos (tais como computação, transformação ou gravação, arquivamento, classificação, armazenamento, transferência de dados);
- c) fornecer dados de saída (seja por transferência a outro equipamento ou por reprodução de dados ou imagens).

Esta definição inclui unidades ou sistemas elétricos ou eletrônicos que predominantemente

geram uma multiplicidade de formas de ondas elétricas ou eletrônicas, pulsadas binárias, periódicas, e que se destinam a efetuar funções de processamento de dados tais como: processamento de texto, computação eletrônica, transformação de dados, gravação, arquivamento, classificação, armazenamento, recuperação e transferência, e reprodução de dados sob forma de imagens. **Ref.: 161-05-04.**

Espectro: histograma utilizado para representar os fatores de harmônicas para diversas ordens.

F

Fator de Acoplamento: razão entre uma grandeza eletromagnética, normalmente tensão ou corrente, existente num ponto especificado de um dado circuito, e a grandeza correspondente num ponto especificado do circuito, a partir do qual a energia é transferida por acoplamento. **Ref.: 161-03-18.**

Fator de Desacoplamento em relação à Alimentação Elétrica: relação entre a tensão aplicada em um ponto especificado de uma rede de alimentação elétrica e a correspondente tensão aplicada em uma porta de entrada especificada de um dispositivo, de modo a produzir o mesmo efeito de perturbação nesse dispositivo. **Ref.: 161-03-04.**

Fator de Fundamental: relação entre o valor eficaz da fundamental de uma grandeza alternada e o valor eficaz desta grandeza. **Ref.: 161-02-22.**

Fator de Harmônicas: relação entre o valor eficaz do resíduo harmônico de uma grandeza alternada e o valor eficaz desta grandeza. **Ref.: 161-02-23.**

Fator de Harmônica de Ordem "n": relação entre seu valor eficaz, I_n (ou U_n), e o valor de I_1 (ou U_1), dado em %. Relação entre valor eficaz da harmônica de ordem "n" e o valor eficaz da fundamental. **Ref.: 161-02-20**

Ferrite: material utilizado para proteger circuitos eletrônicos, que garantem igualmente uma função de filtragem, pois absorvem, por efeito joule, as correntes de HF (*high frequency*) em modo-comum.

Filtro Ativo: é um circuito que age como gerador de frequência, injetando um sinal inverso ao que se quer eliminar. É montado em série ou paralelo e é essencialmente utilizado contra as harmônicas.

Filtro de Bloqueio (de um quarto de comprimento de onda): estrutura coaxial móvel sintonizada em uma determinada frequência e que é colocada em torno de um condutor, de modo a limitar o comprimento de radiação do mesmo para essa frequência. Um filtro de bloqueio para um quarto de comprimento de onda é um caso especial de "indutor de RF de um quarto de comprimento de onda". **Ref.: 161-04-29.**

Filtro Passivo: é um circuito constituído por capacitores e indutores, de baixa impedância,

utilizado para atenuar as perturbações cujas frequências situem-se fora da banda passante. Muito utilizado para HF (*high frequency*).

G

Gaiola de Faraday: o princípio da Gaiola de Faraday é de absorver, canalizar e refletir as ondas eletromagnéticas ambientes graças às paredes metálicas da Gaiola. Assim, em seu interior, dispõe-se de uma zona que não é influenciada pelas perturbações eletromagnéticas externas. **Câmara Blindada.**

H

Harmônicas: formas de onda não senoidais de um sinal de tensão ou corrente à frequência industrial, ou ainda, componentes senoidais de ondas de tensão e corrente alternadas, com frequência igual a um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema. Sinais periódicos, de fase e amplitude diferentes, que somam-se à senoide da onda fundamental. Tensões ou correntes senoidais que possuem frequências que são múltiplas inteiras da frequência que o sistema de potência opera.

I

Impedância de Transferência (de circuito blindado): quociente da tensão que aparece entre dois pontos especificados no circuito blindado, pela corrente em seção transversal definida da blindagem. **Ref.: 161-04-14.**

Imunidade Em Relação à Alimentação

Elétrica: imunidade a perturbações transmitidas via alimentação elétrica. **Ref.: 161-03-03.**

Imunidade Externa: capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de funcionar sem degradação quando perturbações eletromagnéticas estiverem presentes em outras vias, diferentes dos terminais de entradas normais ou antenas. **Ref.: 161-03-07.**

Imunidade Interna: capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema para funcionar sem degradação quando perturbações eletromagnéticas estiverem presentes nos seus terminais de entrada normais ou antenas. **Ref.: 161-03-06.**

Imunidade a Uma Perturbação: é a habilidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de operar corretamente na presença de uma perturbação. Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de ter desempenho isento de degradação em presença de uma perturbação eletromagnética. **Ref.: 161-01-20.**

Instalação: combinação de muitos itens ou sistemas instalados juntos em um local pré-determinado para atender a um objetivo específico, mas sem visar a colocação no mercado como um serviço, como uma unidade funcional singular.

Interferência por Acoplamento Através da

Terra: interferência eletromagnética resultante de uma perturbação eletromagnética transferida

por acoplamento de um circuito a outro por meio de um condutor de terra ou de um caminho de retorno pela terra. **Ref.: 161-03-20.**

Interferência Eletromagnética: geralmente é designada pela sigla EMI (*Electromagnetic Interference*). Degradação do desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema causada por uma perturbação eletromagnética. Degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema, causada por uma perturbação eletromagnética. Os termos "perturbação eletromagnética" e "interferência eletromagnética" designam, respectivamente, causa e efeito, e não devem ser utilizados indiscriminadamente. **Ref.: 161-01-06.**

Interferência Inter-sistemas: interferência eletromagnética que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida por outro sistema. **Ref.: 161-01-15.**

Interferência Intra-sistema: interferência eletromagnética que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida dentro do próprio sistema. **Ref.: 161-01-16.**

Interferência de Radio-freqüência: degradação da recepção de um sinal desejado causada por uma perturbação de radio-freqüência. Em inglês as palavras *interference* e *disturbance* são freqüentemente usadas com o mesmo sentido. A expressão *radio frequency interference - RFI* é também comumente usada para designar uma perturbação de radio-

freqüência ou um sinal indesejado. **Ref.: 161-01-14.**

Inter-harmônicas: tensões ou correntes que possuem componentes de freqüência que não são múltiplos inteiros da freqüência de operação do sistema.

Interrupção Breve (da Tensão de Alimentação): o desaparecimento da tensão de alimentação por um intervalo de tempo cuja duração esta entre dois limites especificados. Uma interrupção breve deve ser considerada como sendo uma redução da tensão de alimentação para valor inferior a 1% da tensão nominal, com limite de duração inferior tipicamente de alguns décimos de segundo, e limite superior tipicamente da ordem de 1 minuto (ou, em alguns casos, até 3 minutos). **Ref.: 161-08-20.**

Invólucro: pela palavra invólucro, designa-se um armário, um gabinete ou uma caixa contendo material elétrico ou eletrônico.

ISM: sigla que qualifica equipamentos ou utensílios projetados para gerar e utilizar localmente energia de radio-freqüência para fins industriais, científicos, médicos, domésticos ou similares, excluindo-se aplicações no campo de telecomunicações. A sigla ISM deriva das palavras inglesas *Industrial, Scientific and Medical*. **Ref.: 161-05-01.**

L

Limite de Emissão (de uma fonte de perturbação): nível de emissão máximo especificado de uma fonte de perturbação eletromagnética. **Ref.: 161-03-12.**

Limite de Imunidade: nível de imunidade mínimo especificado. **Ref.161-03-15.**

Limite de Interferência: degradação admissível máxima do desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, causada por uma perturbação eletromagnética. **Ref.: 161-03-09.**

Limite de Perturbação: nível de perturbação eletromagnética admissível máximo, quando medido de maneira especificada. **Ref.: 161-03-08.**

Local Próprio de Ensaio (de radiação): local que satisfaz às prescrições necessárias para a correta medição, sob condições definidas, de campos eletromagnéticos emitidos pelo equipamento sob ensaio. **Ref.: 161-04-28.**

M

Margem de Compatibilidade Eletromagnética: é a relação entre os limites de emissão e de imunidade; se esses limites forem expressos em dB (decibel), a margem será então a diferença entre os dois limites. Razão entre o limite de imunidade e o limite de emissão. A margem de compatibilidade é o

LIMITE entre a margem de emissão e a margem de imunidade. **Ref.: 161-03-17.**

Margem de Emissão: relação entre o nível de compatibilidade eletromagnética e o nível limite de emissão. Razão entre o nível de compatibilidade eletromagnética e o limite de emissão. **Ref.: 161-03-13.**

Margem de Imunidade: relação entre o nível limite de imunidade e o nível de compatibilidade eletromagnética. Razão entre o limite de imunidade e o nível de compatibilidade eletromagnética. **Ref.: 161-03-16.**

Massa de Acompanhamento: é uma massa que não faz parte do equipamento considerado, que pode ser assimilado à massa que protege contra os acoplamentos eletromagnéticos a alta frequência (campo irradiado) ou contra os acoplamentos por impedância comum.

Massa Elétrica: de um equipamento elétrico ou eletrônico é a parte condutora que o envolve (invólucro) ou o suporta, e que pode, acidentalmente, ser posta sob tensão quando de uma fuga de isolamento.

Massa Funcional: é uma parte condutora cuja função é manter uma referência de potencial (zero Volt), diferente, portanto, daquela desempenhada pela massa elétrica: aterramento.

Modo Comum: diz-se que um acoplamento é de modo comum quando a perturbação é transmitida ao conjunto dos condutores vivos. Ex.: Corrente de choque devido a um raio.

Modo Diferencial: diz-se que um acoplamento é de modo diferencial quando a perturbação se produz entre condutores vivos. Ex.: Diafonia indutiva.

N

Nível (de uma grandeza variável): valor de uma grandeza, tal como potência ou uma grandeza relacionada com o campo, medido e/ou avaliado de maneira especificada, durante um intervalo de tempo especificado. O nível de uma grandeza pode ser expresso em unidades logarítmicas, como por exemplo em decibels, em relação a um valor de referência. **Ref.: 161-03-01.**

Nível de Compatibilidade Eletromagnética: nível da máxima perturbação eletromagnética especificada para um dispositivo, equipamento ou sistema, em determinadas condições. Não deve definir o pior caso, mas sim, um nível estatisticamente aceitável sob o aspecto de custo/benefício. Nível de perturbação eletromagnética a ser utilizado como nível de referência para coordenação no estabelecimento dos limites de emissão e imunidade. (1) Por convenção, o nível de compatibilidade é escolhido de modo a haver somente uma pequena probabilidade deste ser excedido pelo nível de perturbação real. No entanto, compatibilidade eletromagnética somente é alcançada se os níveis de emissão e imunidade forem controlados de maneira tal que, em cada local, o nível de perturbação resultante das emissões cumulativas for mais baixo que o nível de imunidade de cada dispositivo,

equipamento e sistema situados no mesmo local; (2) o nível de compatibilidade pode ser dependente do fenômeno, tempo ou local.

Ref.161-03-10

Nível de Emissão (de uma fonte de perturbação): nível de uma dada perturbação eletromagnética emitida por um dispositivo, equipamento ou sistema particular. **Ref.: 161-03-11.**

Nível de Imunidade: é o nível máximo de determinada perturbação sob o qual um dispositivo, equipamento ou sistema opera com uma degradação aceitável. Nível máximo de uma dada perturbação eletromagnética incidente num dispositivo, equipamento ou sistema particulares, para o qual, qualquer uma dessas estruturas, permanece capaz de funcionar num grau de desempenho prescrito. **Ref.: 161-03-14.**

Nível de Perturbação Eletromagnética: nível de uma perturbação eletromagnética existente em um dado lugar resultante da contribuição de todas as fontes de perturbação. **Ref.:161-03-29.**

O

Optoacoplador: dispositivo utilizado na transmissão de sinais para isolar um circuito secundário de um principal, ineficiente diante de perturbações de HF (*high frequency*).

Ordem da Harmônica: relação entre sua frequência e a frequência da fundamental. Número inteiro dado pela relação entre a

freqüência dessa harmônica e a freqüência da fundamental. **Ref.: 161-02-19**

P

Perturbação Conduzida: quando uma perturbação é transmitida diretamente, por cabo de ligação ou por um circuito comum, entre a fonte emissora e o receptor. Perturbação eletromagnética na qual a energia é transferida através de um ou mais condutores. **Ref.: 161-03-27.**

Perturbação Eletromagnética: fenômeno eletromagnético capaz de causar degradação no funcionamento de um dispositivo, equipamento ou sistema. Todo fenômeno eletromagnético, notadamente um ruído eletromagnético, um sinal não desejado ou uma modificação do próprio meio de propagação, susceptível de criar problemas de funcionamento num dispositivo, nos aparelhos ou nos sistemas. Fenômeno eletromagnético capaz de degradar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou de afetar desfavoravelmente matéria viva ou inerte. Uma perturbação eletromagnética, pode ser um ruído eletromagnético, um sinal não desejado ou uma modificação do próprio meio de propagação. **Ref.: 161-01-05.**

Perturbação de Radio-freqüência:

perturbação eletromagnética que se manifesta na faixa de radio-freqüência. **Ref.: 161-01-13.**

Perturbação Irradiada: quando uma perturbação é transmitida entre aparelhos ou circuitos que não têm nenhuma interligação direta ou indireta.

Perturbação Radiada: perturbação eletromagnética na qual a energia é transferida através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas. O termo "perturbação radiada" é algumas vezes utilizado para tratar o fenômeno indução. **Ref.: 161-03-28.**

Perturbação Transmitida via Alimentação

Elétrica: perturbação eletromagnética transmitida para um dispositivo através dos condutores que o ligam a uma fonte de alimentação elétrica. **Ref.: 161-03-02.**

Plano (de referência) de Terra: superfície condutiva plana, cujo potencial é utilizado como uma referência comum. **Ref.: 161-04-36.**

Ponto de Acoplamento Comum - PAC

(abreviação): ponto da rede de alimentação elétrica, eletricamente mais próximo a uma dada carga, ao qual outras cargas estão ou poderão ser ligadas. (1) Estas cargas podem ser tanto dispositivos, equipamentos ou sistemas, ou instalações de consumidores distintas. (2) Para algumas aplicações, o termo ponto de acoplamento comum se aplica unicamente a rede pública. **Ref.: 161-07-15.**

Porta: caso particular de interfaces de um aparelho especificado com um ambiente eletromagnético externo.

Pulso: variação abrupta e de curta duração de uma grandeza física, seguida por um retorno rápido ao valor inicial. **Ref.: 161-02-02.**

Q

Queda de Tensão: redução abrupta da tensão em um ponto de um sistema elétrico seguida de um restabelecimento da tensão, após um período de tempo curto, de alguns ciclos até alguns segundos. **Ref.: 161-08-10.**

R

Radiação Eletromagnética: (1) fenômeno pelo qual energia emana de uma fonte para o espaço sob forma de ondas eletromagnéticas; (2) energia transferida através do espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas. O sentido do termo "radiação eletromagnética" pode em alguns casos estender-se ao fenômeno de indução. **Ref.: 161-01-10.**

Rede de Massas Funcionais: é o conjunto dos condutores, de massas de acompanhamento e de estruturas condutoras da edificação, que tem uma função de equipotencialidade e de blindagem frente às perturbações.

Relação Sinal/Perturbação: relação entre o nível do sinal desejado e o nível da perturbação eletromagnética, medidos sob condições especificadas. O termo "relação sinal/interferência" é desaconselhado no sentido de "relação sinal/perturbação". **Ref.: 161-06-03.**

Relação Sinal/Ruído: relação entre o nível do sinal desejado e o nível de ruído eletromagnético, medidos sob condições especificadas. **Ref.: 161-06-04.**

Relação de Proteção: valor mínimo da relação sinal/perturbação necessário para se obter um desempenho especificado de um dispositivo ou equipamento. **Ref.: 161-06-05.**

Resíduo Harmônico: grandeza obtida subtraindo-se de uma grandeza alternada a componente fundamental. **Ref.: 161-02-21.**

Ruído Artificial: ruído eletromagnético produzido artificialmente. **Ref.: 161-01-18.**

Ruído Natural: ruído eletromagnético cuja fonte reside em fenômenos naturais e não são produzidos artificialmente. **Ref.: 161-01-17.**

Ruído Eletromagnético: fenômeno eletromagnético variável no tempo, aparentemente não contendo informação e capaz de superpor-se a um sinal desejado ou de combinar-se com o mesmo. **Ref.:161-01-02**

Ruído de Radiofrequência: ruído eletromagnético que se manifesta na faixa de radiofrequência. **Ref.: 161-01-12.**

S

Seletividade: aptidão ou medida da aptidão de um receptor para discriminar entre um dado sinal desejado e sinais não desejados. **Ref.: 161-06-15.**

Sinal Não Desejado: sinal capaz de prejudicar a recepção de um sinal desejado. **Ref.:161-01-03**

Sinal Interferente: sinal que prejudica a recepção de um sinal desejado. **Ref.161-01-04**

Sistema: muitos itens de aparelhos combinados para atender um objetivo específico, visando a colocação no mercado ou colocado em operação como uma unidade funcional singular.

Sobretensão: um aumento na tensão senoidal rms que leva a tensão de operação a valor superior a 110% à frequência nominal por um período de tempo superior a 1 minuto.

Subtensão: uma redução na tensão senoidal rms que leva a tensão de operação a valor inferior a 90% à frequência nominal por um período de tempo superior a 1 minuto.

Supressão de Interferência: ação que reduz ou elimina interferências eletromagnéticas. **Ref.: 161-03-23.**

Supressão de Perturbação: ação que reduz ou elimina perturbações eletromagnéticas. **Ref.: 161-03-22.**

Supressor - Dispositivo de Supressão: dispositivo especialmente projetado para a supressão de perturbação. **Ref.:161-03-24.**

Surto de Tensão: onda de tensão transitória que se propaga ao longo de uma linha ou de um circuito e é caracterizada por um aumento rápido seguido de diminuição mais lenta da tensão. **Ref.: 161-08-11.**

Susceptibilidade Eletromagnética: é a incapacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema operar com uma degradação aceitável, diante de uma perturbação. Incapacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de ter desempenho isento de degradação em presença de uma perturbação eletromagnética. **Ref.: 161-01-21.**

T

Tensão de Perturbação: tensão produzida por uma perturbação eletromagnética entre dois pontos em dois condutores distintos, medida de maneira especificada. **Ref.: 161-04-01.**

Tensão em Modo Comum - tensão assimétrica: média dos fasores que representam as tensões entre cada condutor e uma referência especificada, geralmente a terra ou a massa. **Ref.: 161-04-09.**

Tensão em Modo Diferencial - tensão simétrica: tensão entre dois condutores quaisquer de um conjunto especificado de condutores ativos. **Ref.: 161-04-08.**

Transitório (adjetivo ou substantivo): termo atribuído a um fenômeno ou grandeza que varia entre dois regimes estacionários consecutivos, durante um intervalo de tempo relativamente curto, quando comparado com a escala de tempo de observação considerada. **Ref.: 161-02-01 (702-07-78).**

APÊNDICE B

TEORIA ELETROMAGNÉTICA

B.1. FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Os aspectos da teoria eletromagnética aqui apresentados estão concentrados nos aspectos mais importantes relacionados com a EMC e consistem basicamente nas equações de Maxwell que definem leis fundamentais do eletromagnetismo, nas quais se baseia a análise dos sistemas elétricos e fenômenos eletromagnéticos associados.

As equações de Maxwell constituem um conjunto de equações diferenciais parciais, nas quais os vetores de campo são funções do tempo e de parâmetros espaciais x , y e z . Elas descrevem a natureza dos parâmetros distribuídos dos campos elétrico e magnético por todo o espaço e relacionam quatro importantes vetores de campo, identificados na Tabela B.1.

Tabela B.1: Símbolos e unidades de grandezas eletromagnéticas.

Grandeza	Símbolo	Unidade
Campo Elétrico	\vec{E}	V/m
Densidade de Fluxo Elétrico	\vec{D}	C/m ²
Densidade de Fluxo Magnético	\vec{B}	Tesla
Campo Magnético	\vec{H}	A/m

Estas grandezas estão relacionadas por meio das equações de Maxwell, aqui apresentadas sob a forma de expressões do cálculo vetorial:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (\text{B.1})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (\text{B.2})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v, \quad (\text{B.3})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{B.4})$$

em que ρ_v é a densidade de carga elétrica e \vec{J} é o vetor densidade de corrente.

Analisando a Equação (B.1) verifica-se que ela corresponde à lei de Faraday expressa na forma diferencial. Na forma integral, a lei de Faraday é dada por

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}. \quad (\text{B.5})$$

Ou seja, uma variação de fluxo magnético cria uma força eletromotriz na espira que limita a seção através da qual o fluxo criado variou. O sinal negativo decorre da lei de Lenz: o sentido da corrente induzida tende a se opor à variação de fluxo que a originou. Da lei de Faraday verifica-se que uma variação de indução magnética induz um campo elétrico, da mesma forma que uma distribuição de carga estática.

A Equação (B.2) corresponde à lei de Ampère, também na forma diferencial. A lei de Ampère complementa a lei de Faraday e afirma que uma variação da densidade de fluxo elétrico induz um campo magnético. Em sua forma integral, esta lei é dada por

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s}. \quad (\text{B.6})$$

Na Equação (2.6) os termos à direita da igualdade referem-se, respectivamente, à corrente de condução e à corrente de deslocamento, que representam as correntes que atravessam a superfície S.

A equação de Gauss na forma diferencial está expressa na Equação (B.3) para o campo elétrico e na Equação (B.4) para o campo magnético. Na forma integral a Equação (B.3) é dada por

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho_v dv. \quad (\text{B.7})$$

Analisando a Equação (B.7) verifica-se que o fluxo do vetor \vec{D} circulando na superfície de um determinado volume corresponde à carga contida neste volume.

Aplicando a lei de Gauss ao campo magnético, verifica-se que

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0, \quad (\text{B.8})$$

o que significa que todas as linhas de campo magnético formam caminhos fechados e não existem fontes isoladas de campo magnético. Em outras palavras, o fluxo magnético é conservativo.

Quando ocorrem variações no campo magnético, uma corrente é induzida no circuito. Experimentalmente verifica-se que a variação do campo magnético é produzida por um potencial induzido, que gera a corrente que flui no circuito. O potencial induzido V no circuito fechado corresponde à variação da densidade de fluxo magnético \vec{B} .

B.2. A INFLUÊNCIA DO MEIO

Os meios nos quais os campos eletromagnéticos se propagam possuem características elétricas e magnéticas próprias, que podem ser expressas pelas grandezas:

- ε : permissividade elétrica;
- μ : permeabilidade magnética.

Os valores da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética de um meio qualquer podem ser expressos em função dos valores de ε_0 e μ_0 , que são os valores de ε e μ relativos ao ar

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (\text{B.9})$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (\text{B.10})$$

em que ε_r e μ_r correspondem aos valores relativos de ε e μ do meio em questão.

Integrando as características dos meios definidas por ε e μ às equações de campo apresentadas anteriormente, tem-se:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (\text{B.11})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (\text{B.12})$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E}, \quad (\text{B.13})$$

em que σ expressa a condutividade do meio.

Considerando estas relações aplicadas às equações da lei de Faraday e da lei de Ampère, tem-se que:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (\text{B.14})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_s. \quad (\text{B.15})$$

O meio para o qual os campos vetoriais estão relacionados pelas relações constitutivas das leis de Maxwell, é definido como linear, homogêneo e isotrópico. Um meio não-linear é aquele no qual \vec{D} é uma função da magnitude de \vec{E} , \vec{B} é uma função da magnitude de \vec{H} e \vec{J} é uma função da magnitude de \vec{E} .

Um meio é considerado não-homogêneo quando os valores das constantes ε , μ e σ dependem da posição relativa, nas direções x , y e z , ou seja, são funções de posição, $\varepsilon(x, y, z)$, $\mu(x, y, z)$ e/ou $\sigma(x, y, z)$.

Finalmente, o meio será classificado como anisotrópico se os vetores de campo \vec{E} e \vec{D} , \vec{B} e \vec{H} , \vec{J} e \vec{E} não forem paralelos.

B.3. CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

Campos magnéticos estão intimamente associados a campos elétricos. Esta relação foi completamente descrita no século XIX pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), que conseguiu expressar o comportamento dos campos elétricos e magnéticos através de equações aparentemente simples, mas de soluções complexas, conhecidas como as “Equações de Maxwell”. Maxwell previu o que seria a descoberta experimental das ondas eletromagnéticas por Heinrich Hertz, em 1888 [56].

O campo magnético gerado ao longo de um condutor, Figura B.1, produz uma força \vec{F} que atua nas cargas positivamente carregadas existentes em sua vizinhança.

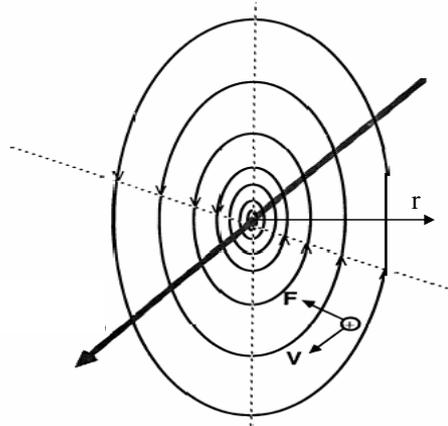


Figura B.1: Linhas de força do campo magnético gerado pela passagem de corrente em um condutor.

Quanto mais próximas estiverem as linhas de força imaginárias, mais intenso será o campo magnético. As linhas de força do campo magnético formam círculos concêntricos em torno do condutor. A intensidade do campo magnético será diretamente proporcional à corrente no condutor e inversamente proporcional à distância r do condutor [57]-[59]. Como o campo magnético sempre é produzido por uma corrente circulando em um sistema fechado, ele sempre é um campo rotacional.

Se uma corrente de magnitude I flui em um condutor retilíneo, é possível estabelecer uma relação direta entre a intensidade de campo magnético e a corrente no condutor, baseada na lei de Ampère:

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = I. \quad (\text{B.16})$$

Ou seja, a corrente que flui em S é igual à integral do campo magnético sobre a curva fechada S . Se, para um condutor retilíneo, a superfície S é definida como a área circular de rádio r que atravessa o condutor perpendicularmente, a intensidade de campo magnético em um condutor no qual circula uma corrente I pode ser dada por:

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (\text{B.17})$$

Em sistemas elétricos as correntes não são constantes e o campo magnético é determinado pela aplicação da lei de indução de Faraday. Quando ocorrem variações no campo magnético, uma corrente é induzida no circuito. Experimentalmente verifica-se que a variação do campo magnético é produzida por um potencial induzido, que gera a corrente que flui no circuito.

Da Equação (B.12) tem-se que a indução magnética nas instalações do sistema elétrico é dada por

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (\text{B.18})$$

em que μ_0 é a permeabilidade magnética para o vácuo ou ar. A Fórmula (B.19) é a expressão geral de \vec{B} .

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}. \quad (\text{B.19})$$

É uma prática comum referir-se à densidade de fluxo magnético \vec{B} no lugar da intensidade de campo magnético \vec{H} . A unidade da densidade de fluxo magnético é o Tesla, T, ou o Gauss, G, sendo $1 \text{ G} = 100 \mu\text{T}$.

Analogamente aos campos magnéticos, os campos elétricos também são mais intensos na proximidade das cargas que os geram. A Figura B.2 apresenta as linhas de força de campo elétrico gerado por uma carga puntiforme e por um dipolo.

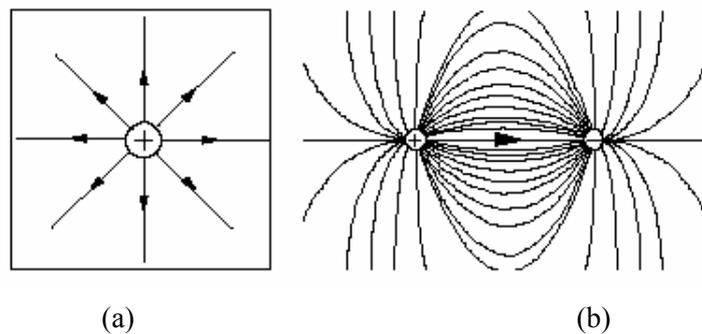


Figura B.2: Linhas de força de campo elétrico gerado: (a) por uma carga puntiforme; (b) por um dipolo.

Nesses campos a densidade das linhas de força dos campos gerados diminui na medida em que se afastam das cargas, caracterizando campos não-homogêneos. A Figura B.3 apresenta as linhas de força de campo elétrico entre as placas de um capacitor plano. Esses campos são homogêneos entre as placas e não-homogêneos nas extremidades das placas do capacitor.

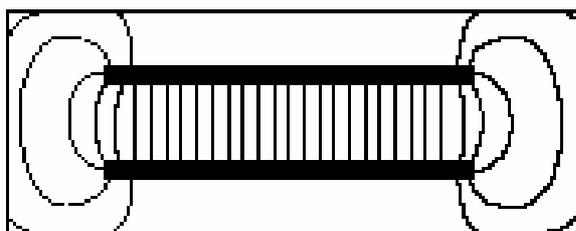


Figura B.3: Linhas de força de campo elétrico entre as placas de um capacitor plano.

No caso de sistemas elétricos, os campos elétricos predominantes são variáveis e não-homogêneos. Alguns campos elétricos são gerados por fontes de tensão ou pelas cargas, enquanto que outros são campos elétricos rotacionais produzidos na vizinhança dos campos magnéticos variáveis, também chamados campos elétricos induzidos.

Logo, os campos elétricos também variam no tempo e em função das variações do campo magnético, com base nos princípios da indução eletromagnética.

Quanto à magnitude desses campos, observa-se que eles são mais intensos onde os campos magnéticos são menores, da mesma forma que costumam ser pequenos onde os campos magnéticos são mais significativos.

APÊNDICE C

NORMAS TÉCNICAS

C.1. NORMAS IEC 61.000

A IEC 61000 se divide em seis partes, que são subdivididas em seções.

- Parte 1: Geral;
- Parte 2: Ambiental;
- Parte 3: Limites;
- Parte 4: Testes e Técnicas de Medição;
- Parte 5: Procedimentos sobre Instalação e Mitigação;
- Parte 6: Normas Gerais.

Tabela C.1: Normas IEC 61.000.

Parte.Seção	Título da Norma
1.1	<i>Application and interpretation of fundamental definitions and terms.</i>
1.2	<i>Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic equipment.</i>
2.1	<i>Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in power supply systems.</i>
2.2	<i>Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public supply systems.</i>
2.3	<i>Description of the environment – Radiated and non-network-frequency-related conducted disturbances.</i>
2.4	<i>Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.</i>
2.5	<i>Classification of electromagnetic environments.</i>
2.6	<i>Assessment of the emission level s in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances</i>
2.7	<i>Low-frequency magnetic fields in various environments</i>
2.8	<i>Voltage dips, short interruptions and statistical measurement results</i>

Parte.Seção	Título da Norma
2.12	<i>Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.</i>
3.1	<i>Overview of emission standards and guides</i>
3.2	<i>Limits for harmonic current emission (equipment input current $\leq 16A$ per phase).</i>
3.3	<i>Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current $\leq 16A$.</i>
3.4	<i>Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A.</i>
3.5	<i>Limitation of voltage fluctuations in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A.</i>
3.6	<i>Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems.</i>
3.7	<i>Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems.</i>
3.8	<i>Signalling on low-voltage electrical installations – Emission levels, frequency bands and electromagnetic disturbance levels.</i>
3.9	<i>Limits for interharmonic current emissions (equipment with input power $\leq 16A$ per phase and prone to produce interharmonics by design)</i>
3.10	<i>Emission limits in the frequency range 2...9kHz</i>
3.11	<i>Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in low voltage supply systems for equipment with rated current $\leq 75A$ and subject to conditional connection</i>
4.1	<i>Overview of immunity tests.</i>
4.2	<i>Electrostatic discharge immunity test.</i>
4.3	<i>Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.</i>
4.4	<i>Electrical fast transient/burst immunity test.</i>
4.5	<i>Surge immunity test.</i>
4.6	<i>Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.</i>
4.7	<i>General guide on harmonic distortion and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.</i>
4.8	<i>Power frequency magnetic field immunity test.</i>
4.9	<i>Pulse magnetic field immunity test.</i>
4.10	<i>Damped oscillatory magnetic field immunity test.</i>
4.11	<i>Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.</i>
4.12	<i>Oscillatory waves immunity test.</i>
4.13	<i>Test for immunity to harmonics and interharmonics including mains signaling at ac power port</i>
4.14	<i>Voltage fluctuations – immunity test.</i>

Parte.Seção	Título da Norma
4.15	<i>Flickermeter – Functional and design specifications.</i>
4.16	<i>Test for immunity to conducted common mode disturbances in the frequency range 0Hz to 150kHz.</i>
4.17	<i>Ripple on dc input power port, immunity test</i>
4.20	<i>TEM cells</i>
4.21	<i>Reverberation chambers</i>
4.22	<i>Guide on measurement methods for electromagnetic phenomena</i>
4.26	<i>Calibration of probes and associated instruments for measuring electromagnetic fields</i>
4.27	<i>Unbalance, immunity test</i>
4.28	<i>Variation of power frequency, immunity test</i>
4.29	<i>Voltage dips, short interruptions and voltage variations on dc input power ports, immunity tests</i>
4.30	<i>Measurements of power quality parameters</i>
4.31	<i>Measurements in the frequency range 2kHz to 9kHz</i>
5.1	<i>General considerations.</i>
5.2	<i>Earthing and cabling.</i>
5.6	<i>Mitigation of external EM influences</i>
5.7	<i>Degrees of protection against electromagnetic disturbances provided by enclosures</i>
6.1	<i>Immunity for residential, commercial and light-industrial environments.</i>
6.2	<i>Immunity for industrial environments.</i>
6.4	<i>Emission standard for industrial environments.</i>
6.5	<i>Immunity of apparatus for generating stations and high-voltage substations</i>

C.2. NORMAS IEEE EM EMC E QUALIDADE DA ENERGIA

Tabela C.2: Normas ANSI/IEEE em EMC e Qualidade da Energia.

Norma	Título
Std 4-1995	<i>Standard techniques for high-voltage testing.</i>
Std 120-1989	<i>Master Test Guide for Electrical Measurements in Power Circuits.</i>
Std 141-1993	<i>Recommended practice for electric power distribution for industrial plants.</i>
Std 142-1991	<i>Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. (Green book).</i>

Norma	Título
Std 213-1993	<i>Standard procedure for measuring conducted emissions in the range of 300kHz to 25MHz from TV and FM broadcast receivers to power lines.</i>
Std 241-1990	<i>Recommended practice for electric power systems in commercial buildings.</i>
Std 281-1994	<i>Standard service conditions for power system communication equipment.</i>
Std 299-1991	<i>Standard method of measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures.</i>
Std 352-1993	<i>Guide for general principles of reliability analysis of nuclear power generating station safety systems.</i>
Std 367-1996	<i>Recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault.</i>
Std 376-1993	<i>Standard for the measurement of impulse strength and impulse bandwidth.</i>
Std 430-1991	<i>Standard procedures for the measurement of radio noise from overhead power lines and substation.</i>
Std 446-1987	<i>Recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications. (Orange Book)</i>
Std 449-1990	<i>Standard for ferroresonance voltage regulators.</i>
Std 473-1991	<i>Recommended practice for an electromagnetic site survey (10kHz to 10GHz).</i>
Std 493-1991	<i>Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. (Gold Book)</i>
Std 519-1992	<i>Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems</i>
Std 539-1990	<i>Standard definitions of terms relating to corona and field effects of overhead power lines.</i>
Std 762-1987	<i>Standard definitions for use in reporting electric generating unit reliability, availability, and productivity.</i>
Std 859-1987	<i>Standard terms for reporting and analyzing outage occurrences and outage states of electrical transmission facilities.</i>
Std 944-1986	<i>Application and testing of uninterruptible power supplies for power generating stations.</i>
Std 998-1996	<i>Guide for direct lightning stroke shielding of substations.</i>
Std 1048-1990	<i>Guide for protective grounding of power lines.</i>
Std 1057-1994	<i>Standard for digitizing waveform recorders.</i>
Std 1100-1992	<i>Recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment, (Emerald Book).</i>
Std 1159-1995	<i>Recommended practice for monitoring electric power quality.</i>
Std 1184-1995	<i>Guide for the selection and sizing of batteries for uninterruptible power systems.</i>
Std 1250-1995	<i>Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances.</i>

Norma	Título
Std 1325-1996	<i>Recommended practice for reporting field failure data for power circuit breakers.</i>
Std 1313.1-1996	<i>Standard for insulation coordination – definitions, principles, and rules.</i>
Std 1346-1998	<i>Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronics process equipment.</i>
Project 1409	<i>Custom power task force.</i>
Project 1433	<i>A standard glossary of power quality terminology.</i>
Project 1453	<i>Voltage flicker.</i>
Std C37.10-1995	<i>Guide for diagnostics and failure investigation of power circuit breakers.</i>
Std C37.95-1994	<i>Guide for protective relaying of utility-consumer interconnections.</i>
Std C37.100-1992	<i>Standard definitions for power switchgear.</i>
Std C57.110-1986	<i>Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents.</i>
Std C57.117-1986	<i>Guide for reporting failure data for power transformers and shunt reactors on electric utility power systems.</i>
Std C62.41-1991	<i>Recommended practice on surge voltages in low-voltage ac power circuits.</i>
Std C62.45-1992	<i>Guide on surge testing for equipment connected to low-voltage ac power circuits.</i>
Std C62.48-1995	<i>Guide on interactions between power system disturbances and surge-protective devices.</i>

C.3. OUTRAS NORMAS EM EMC E QUALIDADE DA ENERGIA

Tabela C.3: Outras Normas em EMC e Qualidade da Energia.

Norma		Relativa a
IEC 255-5 (1977)	ABNT NBR 7116	Dielétrico – Isolamento
IEC 255-5	ABNT NBR 7116	Impulso 1,2/50 μ s – Isolamento
IEC 801-2	IEC 255-22-2	Descarga Eletrostática
IEC 255-22-3	IEC 801-3	Radiação Eletromagnética
IEC 801-4	IEC 255-22-4	Trem de Pulsos Rápidos
IEC 255-11		Interrupção de Alimentação e Componente Alternada em Alimentação de Corrente Contínua
IEC 255-22-1	IEC 61000-4-12	Distúrbio de Alta Freqüência (SWC)

APÊNDICE D

CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS MEDIDOS NAS SUBESTAÇÕES

D.1. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS DURANTE A ETAPA DE AVALIAÇÃO DOS MEDIDORES UNIDIRECIONAL E ISOTRÓPICO

A Tabela D.1 resume os valores de campo elétrico medidos em campo pelo instrumento unidirecional HI-3604.

Tabela D.1: Valores de campo elétrico medidos pelo instrumento isotrópico.

Medida	Ponto	Horário	Ey (kV/m)	Ponto	Horário	Ey (kV/m)
1	1	11:08:30	3,22	7	11:33:40	4,92
2	1	11:08:32	3,14	7	11:33:43	4,35
3	1	11:08:34	3,15	7	11:33:45	4,5
4	1	11:08:37	3,20	7	11:33:47	3,9
5	1	11:08:39	2,97	7	11:33:49	4,55
1	2	11:10:37	5,7	8	11:35:26	3,17
2	2	11:10:39	5,26	8	11:35:28	3,93
3	2	11:10:41	5,48	8	11:35:30	4,25
4	2	11:10:43	5,57	8	11:35:32	4,06
5	2	11:10:45	5,51	8	11:35:34	3,61
1	3	11:18:20	4,24	9	11:46:09	5,42
2	3	11:18:22	4,82	9	11:46:12	5,6
3	3	11:18:25	4,83	9	11:46:15	5,15
4	3	11:18:27	4,29	9	11:46:18	5,5
5	3	11:18:29	4,46	9	11:46:21	5,26
1	4	11:24:56	4,42	10	11:47:36	3,46
2	4	11:24:58	4,58	10	11:47:39	4,45
3	4	11:25:00	4,26	10	11:47:42	3,71
4	4	11:25:02	4,39	10	11:47:46	4,16
5	4	11:25:05	4,31	10	11:47:49	3,8
1	5	11:32:08	4,67	11	11:51:35	4,94
2	5	11:32:10	4,6	11	11:51:38	4,93
3	5	11:32:12	4,75	11	11:51:41	4,87

Medida	Ponto	Horário	Ey (kV/m)	Ponto	Horário	Ey (kV/m)
4	5	11:32:14	4,7	11	11:51:44	4,95
5	5	11:32:17	4,6	11	11:51:47	4,89
1	6	11:32:56	5,84	12	11:54:21	6,3
2	6	11:32:58	5,88	12	11:54:24	6,07
3	6	11:33:00	5,91	12	11:54:27	5,98
4	6	11:33:02	6,09	12	11:54:30	6,05
5	6	11:33:04	6,19	12	11:54:33	6,14

A Tabela D.2 resume os valores de campo magnético medidos pelo instrumento unidirecional HI-3604 na direção x e a Tabela D.3 os valores medidos na direção y.

Tabela D.2: Valores de campo magnético medidos na direção x pelo HI-3604.

Medida	Ponto	Horário	Bx (mA/m)	Ponto	Horário	Bx (mA/m)
1	1	11:03:01	169,6	7	12:02:18	1499
2	1	11:03:03	164,2	7	12:02:21	1409
3	1	11:03:05	149,0	7	12:02:24	1513
4	1	11:03:08	122,9	7	12:02:27	1525
5	1	11:03:10	130,9	7	12:02:31	1535
1	2	12:17:09	1999	8	12:01:14	870
2	2	12:17:12	3260	8	12:01:17	847
3	2	12:17:15	1999	8	12:01:21	842
4	2	12:17:18	3160	8	12:01:24	832
5	2	12:17:21	1999	8	12:01:27	822
1	3	12:16:37	3150	9	12:00:36	2270
2	3	12:16:40	2820	9	12:00:39	2120
3	3	12:16:43	3810	9	12:00:42	2080
4	3	12:16:46	3260	9	12:00:45	2090
5	3	12:16:50	3530	9	12:00:48	2090
1	4	12:15:04	1871	10	11:59:01	1900
2	4	12:15:07	1837	10	11:59:05	1890
3	4	12:15:10	1817	10	11:59:08	1900
4	4	12:15:13	1795	10	11:59:11	1900
5	4	12:15:16	1819	10	11:59:14	1900
1	5	12:04:19	1750	11	11:58:26	1870
2	5	12:04:22	1770	11	11:58:29	1860
3	5	12:04:25	1800	11	11:58:32	1860
4	5	12:04:29	1760	11	11:58:35	1860
5	5	12:04:32	1750	11	11:58:38	1860
1	6	12:03:27	1850	12	11:57:53	174
2	6	12:03:30	1820	12	11:57:56	630
3	6	12:03:33	1800	12	11:57:59	1229

Medida	Ponto	Horário	Bx (mA/m)	Ponto	Horário	Bx (mA/m)
4	6	12:03:37	1780	12	11:58:02	1756
5	6	12:03:40	1780	12	11:58:05	1789

Tabela D.3: Valores de campo magnético medidos na direção y pelo HI-3604.

Medida	Ponto	Horário	By (A/m)	Ponto	Horário	By (A/m)
1	1	12:20:32	1,049	7	12:24:50	1,21
2	1	12:20:36	0,957	7	12:24:53	1,196
3	1	12:20:39	0,952	7	12:24:56	1,218
4	1	12:20:42	0,932	7	12:24:59	1,204
5	1	12:20:45	0,944	7	12:25:02	1,201
1	2	12:19:34	0,6	8	12:25:48	1,272
2	2	12:19:37	0,594	8	12:25:51	1,28
3	2	12:19:41	0,581	8	12:25:54	1,303
4	2	12:19:44	0,588	8	12:25:57	1,243
5	2	12:19:47	0,569	8	12:26:01	1,253
1	3	12:21:06	2,64	9	12:26:14	1,656
2	3	12:21:09	1,999	9	12:26:17	1,648
3	3	12:21:13	3,46	9	12:26:20	1,691
4	3	12:21:16	1,999	9	12:26:23	1,602
5	3	12:21:19	2,82	9	12:26:27	1,676
1	4	12:22:17	1,999	10	12:28:04	1,031
2	4	12:22:21	4,01	10	12:28:08	0,98
3	4	12:22:24	1,999	10	12:28:11	1,034
4	4	12:22:27	3,05	10	12:28:14	1,027
5	4	12:22:30	3,37	10	12:28:17	1,02
1	5	12:22:50	3,32	11	12:28:31	1,999
2	5	12:22:53	3,28	11	12:28:35	1,98
3	5	12:22:56	1,999	11	12:28:38	2,91
4	5	12:23:00	3,69	11	12:28:41	1,999
5	5	12:23:03	0,27	11	12:28:44	2,6
1	6	12:24:14	1,301	12	12:29:07	1,999
2	6	12:24:18	1,267	12	12:29:10	3,51
3	6	12:24:21	1,289	12	12:29:13	1,999
4	6	12:24:24	1,295	12	12:29:17	3,57
5	6	12:24:27	1,271	12	12:29:20	3,58

A Tabela D.4 resume os valores de campo elétrico e a Tabela D.5 os valores de densidade de fluxo magnético, medidos pelo instrumento isotrópico EFA 300.

Tabela D.4: Campo elétrico medido pelo instrumento isotrópico EFA-300.

Ponto	E (kV/m)	Ex (kV/m)	Ey (kV/m)	Ez (kV/m)	Ecalc (kV/m)
1	2,610	0,696	2,454	0,563	2,612
2	4,916	1,014	4,919	0,269	5,030
3	5,340	1,460	5,127	0,461	5,351
4	4,479	2,122	3,924	0,385	4,478
5	4,653	2,023	4,167	0,310	4,642
6	5,546	1,379	5,377	0,050	5,551
7	5,116	1,343	4,940	0,042	5,119
8	3,640	1,970	3,040	0,177	3,627
9	5,153	1,170	5,025	0,320	5,169
10	4,627	2,170	4,070	0,169	4,615
11	4,819	2,212	4,259	0,444	4,820
12	5,730	2,100	5,320	0,310	5,728

Tabela D.5: Densidade de fluxo magnético medido pelo instrumento isotrópico EFA-300.

Ponto	B (μ T)	Bx (μ T)	By (μ T)	Bz (μ T)	Bcalc (μ T)
1	3,634	2,920	2,412	0,536	3,825
2	5,318	5,330	1,400	0,468	5,531
3	7,248	5,780	4,857	0,451	7,563
4	6,673	4,290	6,473	0,592	7,788
5	5,594	3,346	5,553	0,493	6,502
6	4,322	4,211	2,667	0,779	5,045
7	4,275	3,322	3,000	0,638	4,521
8	3,733	2,147	3,653	0,721	4,298
9	4,885	4,909	2,287	0,839	5,480
10	5,970	4,245	5,149	0,459	6,689
11	5,118	4,010	5,030	0,475	6,450
12	4,810	3,707	4,406	0,756	5,807

D.2. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO ALFA

A Tabela D.6 resume os valores de campo elétrico e magnético medidos em campo. Os valores de B foram calculados a partir das componentes B_x , B_y e B_z , através da Equação (3.1). A descrição das siglas que representam os pontos de medição é apresentada ao final da tabela.

Tabela D.6: Valores de campo elétrico e magnético medidos e calculado na SE Alfa.

Ponto	E (kV/m)	By (μT)	Bx (μT)	Bz (μT)	B (μT)
PR_LT A	4,31	0,380	0,400	0,320	0,6378
PR_LT B	5,04	0,426	0,251	0,340	0,6001
PR_LT C	5,27	0,360	0,280	0,380	0,5936
SEC_LT A	6,92	0,480	0,920	0,360	1,0984
SEC_LT B	7,88	0,720	0,740	0,650	1,2200
SEC_LT C	6,8	0,500	0,700	0,340	0,9250
TC A	6,9	0,870	1,530	0,420	1,8095
TC B	5,84	1,490	0,980	0,138	1,7887
TC C	9,14	0,840	1,080	0,420	1,4312
PR_T1 A	0,62	0,28	0,23	0,077	0,4641
PR_T1 B	0,89	0,175	0,29	0,137	0,3654
PR_T1 C	1,83	0,191	0,467	0,111	0,5166
PR_T2 A	3,3	0,270	0,290	0,125	0,4155
PR_T2 B	1,79	0,350	0,220	0,059	0,4176
PR_T2 C	4,1	0,220	0,440	0,012	0,4921
B AT 1	5,2	1,440	0,880	0,470	1,7518
B AT 2	7,1	1,280	0,700	0,860	1,6935
B AT 3	8	0,730	0,450	1,080	1,3791
T1 AT A	0,59	0,360	0,420	0,210	0,5917
T1 AT B	0,72	0,440	0,420	0,240	0,6539
T1 AT C	1,36	0,570	0,420	0,380	0,8036
T1 BT A	0,0513	0,450	1,220	0,770	1,5112
T1 BT B	0,1094	0,670	1,770	0,870	2,0830
T1 BT C	0,191	0,320	2,100	1,470	2,5833
T2 AT A	2,12	2,640	0,800	1,740	3,2615
T2 AT B	0,36	1,337	3,400	0,450	3,6810
T2 AT C	2,21	0,400	1,044	2,570	2,8026
T2 BT A	0,21	5,450	1,530	0,870	5,7272
T2 BT B	0,124	5,800	1,440	1,250	6,1054
T2 BT C	0,28	4,600	3,730	1,620	6,1398
CUB 1	0,104	0,48	1,76	1,12	2,1407
CUB 2	0,1323	4,57	0,68	0,61	4,6604
BC 1T A	0,046	0,63	1,08	0,61	1,3912
BC 1T B	0,027	0,79	1,1	0,5	1,4436
BC 1T C	0,0295	0,67	1,2	0,72	1,5515
BC 1B A	0,1705	0,44	1,41	0,53	1,5693
BC 1B B	0,068	0,44	1,52	0,48	1,6536
BC 1B C	0,0423	0,54	1,51	0,73	1,7620
EL BC A	0,248	0,291	1,13	0,26	1,1955
EL BC B	0,092	0,372	1,22	0,8	1,5056
EL BC C	0,123	0,3	1,1	0,31	1,1816
LD-1 A	0,1051	0,221	1,18	0,36	1,2533
LD-1 B	0,0442	0,387	1,06	0,54	1,2510
LD-1 C	0,0993	0,408	1,02	0,397	1,1681

Ponto	E (kV/m)	By (μ T)	Bx (μ T)	Bz (μ T)	B (μ T)
LD-2 A	0,156	0,65	1,297	0,38	1,4997
LD-2 B	0,0699	0,97	1,08	0,48	1,5290
LD-2 C	0,1293	0,791	0,86	0,45	1,2521
LD-3 A	0,1415	0,97	0,95	0,31	1,3927
LD-3 B	0,11	1,16	1,06	0,31	1,6017
LD-3 C	0,173	1,47	0,96	0,49	1,8228
LD-5 A	0,269	2,88	0,51	2,85	4,0837
LD-5 B	0,071	2,68	1,84	3,11	4,4989
LD-5 C	0,287	1,803	2,99	2,8	4,4756
LD-6 A	0,163	0,737	2,9	0,69	3,0707
LD-6 B	0,0987	1,345	1,76	0,31	2,2367
LD-6 C	0,127	1,82	1,33	0,6	2,3327
LD-8 A	0,0851	2,41	0,45	0,72	2,5552
LD-8 B	0,089	2,5	0,79	0,65	2,7012
LD-8 C	0,334	2,39	1,72	1,11	3,1468
LD-7 A	0,178	1,18	2,6	4	4,9145
LD-7 B	0,112	1	2,7	3,02	4,1726
LD-7 C	0,1343	0,42	3,36	2,47	4,1913
LD-4 A	0,292	0,124	1,51	0,71	1,6732
LD-4 B	0,1202	0,42	1,66	0,331	1,7440
LD-4 C	0,0928	0,66	1,81	0,973	2,1583
BC 2B A	0,676	1,6	1,83	2,67	3,6108
BC 2B B	0,0853	2,35	1,27	1,96	3,3132
BC 2B C	0,1894	1,92	1,61	1,72	3,0392
BC 2T A	0,0654	0,61	2,67	1,41	3,0804
BC 2T B	0,0892	0,607	2,47	1,43	2,9179
BC 2T C	0,1221	0,356	2,42	0,93	2,6169

Legenda da Tabela:

PR_LT – Pára-Raios da Entrada de Linha em 138kV
 SEC_LT – Chave Seccionadora Tripolar na entrada de linha em 138kV
 TC – Transformador de Corrente 138kV
 PR_T1 – Pára-Raios do Transformador 1 em 138kV
 PR_T2 – Pára-Raios do Transformador 2 em 138kV
 B_AT – Barramento 138kV
 T1_AT – Transformador 1 – lado de alta tensão - 138kV
 T1_BT – Transformador 1 – lado de baixa tensão – 13,8kV
 T2_AT – Transformador 2 – lado de alta tensão - 138kV
 T2_BT – Transformador 2 – lado de baixa tensão – 13,8kV
 CUB1 – Cubículo de Medição 1 em 13,8 kV
 CUB2 – Cubículo de Medição 2 em 13,8 kV
 BC T1 – Banco de Capacitor 1 – lado do TT1
 BC B1 – Banco de Capacitor 1 – lado do barramento de 13,8 kV
 BC T2 – Banco de Capacitor 2 – lado do TT2
 BC B2 – Banco de Capacitor 1 – lado do barramento de 13,8 kV
 EL BC – Saída para banco de capacitor – lado do barramento de 13,8 kV
 LD-1 a LD-8 – Saídas de linha em 13,8 kV.

D.3. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO BETA

A Tabela D.7 resume os valores de densidade de fluxo magnético medidos na SE Beta e a Tabela D.8 resume os valores medidos relativos a campos elétricos.

Tabela D.7: Valores de densidade de fluxo magnético medidos na SE Beta nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 12; (c) 13 a 16, banco de capacitores e malha de terra; (d) 17 a 21.

(a) Régua 01 a 06:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (nT)					
	Régua 01	Régua 02	Régua 03	Régua 04	Régua 05	Régua 06
01	238,7	272,8	328,1	351,0	497,2	575,4
02	233,0	262,7	321,8	366,3	527,6	690,2
03	228,4	262,6	310,6	379,9	564,8	792,4
04	222,8	250,1	334,9	388,3	586,2	867,0
05	223,6	277,5	360,7	400,4	589,5	865,0
06	233,6	299,2	388,1	417,5	640,3	930,8
07	241,0	319,2	400,3	442,3	675,2	900,2
08	232,1	319,7	395,9	436,1	651,8	849,3

(b) Régua 07 a 12:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (nT)					
	Régua 07	Régua 08	Régua 09	Régua 10	Régua 11	Régua 12
01	547,3	564,0	582,0	571,0	555,0	297,7
02	754,2	772,0	870,0	889,0	751,0	294,6
03	986,7	1224	1268	1388	1169	303,4
04	1071	1485	1661	2147	1999	310,0
05	1097	1709	2164	3413	2974	319,7
06	1141	1863	2634	4420	3511	307,6
07	1125	1608	2730	4166	3179	297,8
08	991,0	1620	2564	3680	3012	292,1
09					2933	

(c) Régua 13 a 16, Banco de Capacitores e Malha de Terra:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (nT)					
	Régua 13	Régua 14	Régua 15	Régua 16	Banco Cap.	Malha T.
01	308,4	367,8	865	3622	1295	974,0
02	324,9	405,2	894	4732	1237	545,0
03	351,2	465,3	908	5513	934,0	272,7
04	394,5	554,7	820	5338	1523	176,6
05	446,2	712,2	692	4115	1560	171,5
06	509,4	829,4	638	2924	2480	205,7
07	558,1	918,2	587		1819	237,3
08	549,7	1103			1443	259,6

Ponto	Densidade de fluxo magnético (nT)					
	Régua 13	Régua 14	Régua 15	Régua 16	Banco Cap.	Malha T.
09						291,8

(d) Réguas 17 a 21:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (nT)				
	Régua 17	Régua 18	Régua 19	Régua 20	Régua 21
01	2932	2491	2233	1806	1353
02	3356	2930	2723	2188	1566
03	3605	3336	3189	2747	1824
04	3536	3525	3627	3013	1974
05	3250	3523	3996	3034	1968
06	2909	3352	4083	3257	2252
07	2460	3070	3895	3272	2256
08	2118	2700	3545	2874	2025
09	1798	2360	2996	2364	1836
10	1358	1887	2322	1826	1530
11	1125	1597	1852	1550	1305
12	996,0	1438	1599	1378	1135
13	906,0	1326	1488	1273	1042
14	821,0	1126	1321	1193	914,0
15	749,0	960,0	1199	1106	798,0
16	771,0	996,0	1051	1047	736,0

Tabela D.8: Valores de campo elétrico medidos na SE Beta nas réguas: (a) 01 a 06; (b) 07 a 12; (c) 13 a 16, banco de capacitores e malha de terra; (d) 17 a 21.

(a) Réguas 01 a 06:

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 01	Régua 02	Régua 03	Régua 04	Régua 05	Régua 06
01	331,4	285,2	303,4	302,5	370,7	637,0
02	297,9	255,9	324,9	313,4	385,0	740,0
03	244,4	256,4	285,7	276,0	327,5	619,0
04	180,1	205,3	228,3	226,1	294,0	554,0
05	127,1	207,8	223,1	230,9	340,9	693,0
06	102,5	213,6	256,2	269,0	413,3	790,0
07	111,1	179,8	259,7	279,5	404,4	720,0
08	108,3	189,5	220,3	252,5	337,3	505,0

(b) Réguas 07 a 12:

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 07	Régua 08	Régua 09	Régua 10	Régua 11	Régua 12
01	927,0	670,0	886,0	911,0	374,8	285,5
02	1154	1491	1167	1044	306,1	240,7
03	1063	614,1	1223	1068	207,5	210,2
04	876,0	182,1	808,2	835,7	141,3	194,0

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 07	Régua 08	Régua 09	Régua 10	Régua 11	Régua 12
05	1075	296,8	573,7	516,6	202,7	172,8
06	1282	856,0	784,4	339,2	301,0	139,7
07	1104	1578	664,8	311,1	320,5	109,7
08	802,0	589,0	431,5	244,0	265,3	103,4
					200,0	

(c) Réguas 13 a 16, Banco de Capacitores e Malha de Terra:

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 13	Régua 14	Régua 15	Régua 16	Banco Cap.	Malha T.
01	274,0	107,1	1142	273,2	73,9	71,1
02	277,7	96,2	1030	101,2	108,3	123,1
03	291,2	110,3	848,7	39,85	39,08	99,1
04	325,1	137,9	662,8	80,1	109,0	64,7
05	396,0	147,5	496,0	209,7	172,3	93,4
06	561,0	137,7	383,5	311,5	156,2	289,4
07	821,9	135,0	336,4		60,3	309,2
08	825,0	195,3			112,0	111,7
09						90,0

(d) Réguas 17 a 21:

Ponto	Campo elétrico (V/m)				
	Régua 17	Régua 18	Régua 19	Régua 20	Régua 21
01	100,9	52,29	47,5	56,1	92,1
02	55,26	30,99	62,64	121,7	142,9
03	49,1	29,57	72,64	163,8	178,5
04	88,4	33,35	62,29	100,1	107,7
05	132,2	49,53	39,04	65,3	94,3
06	176,2	57,2	29,98	63,7	99,8
07	197,4	56,3	35,7	130,8	166,9
08	192,0	78,9	50,4	121,4	133,2
09	159,3	135,0	72,8	57,71	68,4
10	116,2	111,4	72,7	48,96	52,73
11	105,2	155,7	77,5	56,8	43,25
12	96,4	139,1	97,8	62,0	37,03
13	77,7	104,5	128,6	66,1	29,16
14	63,4	98,35	160,7	70,3	23,62
15	60,7	59,64	135,3	62,1	19,61
16	64,7	66,81	87,9	60,1	17,16

D.4. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS NA SUBESTAÇÃO GAMA

A Tabela D.9 resume os valores de densidade de fluxo magnético medidos na SE Gama e a Tabela D.10 resume os valores medidos relativos a campos elétricos. A Tabela D.11 refere-se ao potencial medido nos pontos da malha de terra enquanto que a Tabela D.12 resume os valores de densidade de fluxo magnético medidos na vizinhança do disjuntor 13,8kV, para o medidor nas alturas de 1m, 1,6m e 2,1m.

Tabela D.9: Valores de campo magnético medidos na SE Gama nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 13; (c) 14 a 20; (d) 21 a 27; (e) 28 a 33; (f) 34 a 38.

(a) Régua 01 a 06:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)					
	Régua 01	Régua 02	Régua 03	Régua 04	Régua 05	Régua 06
01	1,0896	1,1758	1,2729	1,4807	1,6514	1,7506
02	1,0596	1,1335	1,2129	1,7233	1,8522	2,1113
03	1,0938	1,1769	1,2159	1,7867	2,1034	2,3705
04	1,0633	1,1620	1,4078	1,6952	2,2554	2,6500
05	1,0572	1,1863	1,4383	1,8404	2,3824	2,8992
06	1,0638	1,1536	1,4304	1,9501	2,3289	2,6491
07	1,0107	1,1399	1,2144	1,9994	2,0534	2,2232
08	1,0225	1,1098	1,2479	1,4813	1,6550	1,9421
09	1,0118	1,0837	1,1728	1,2749	1,3759	1,5116

(b) Régua 07 a 13:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)						
	Régua 07	Régua 08	Régua 09	Régua 10	Régua 11	Régua 12	Régua 13
01	1,7359	1,8643	1,6882	1,5154	1,5893	1,5640	1,2923
02	2,0976	2,2164	1,9748	1,9854	1,9748	2,1134	1,9195
03	2,7264	2,8268	2,4976	2,2748	2,2150	2,2944	2,0817
04	2,9125	3,1390	2,8815	2,5484	2,3539	2,4749	2,5042
05	3,4581	3,0970	2,9332	2,6249	2,4469	2,6182	2,5721
06	3,7385	3,0673	2,7514	2,4722	2,5235	2,6700	2,5474
07	2,4432	2,5859	2,3362	2,1055	2,2161	2,6440	2,8621
08	1,9392	1,9996	1,8960	1,7832	1,7446	2,2001	2,6279
09	1,4748	1,5390	1,4676	1,3862	1,5130	4,0462	1,5068
10						1,9741	2,0229
11						1,5205	1,8626
12						1,2767	1,5127
13						1,1001	1,2675

(c) Régua 14 a 20:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)						
	Régua 14	Régua 15	Régua 16	Régua 17	Régua 18	Régua 19	Régua 20
01	0,8731	1,1409	1,1233	1,1663	1,2331	1,4630	1,6305
02	1,6177	1,5507	1,4594	1,4784	1,5418	1,8810	2,0487
03	1,9915	1,8459	1,6726	1,8114	1,9492	2,3432	2,4891
04	2,3596	2,2463	2,2734	2,3516	2,4187	2,8326	3,0513
05	2,5830	2,5513	2,7269	2,8989	3,0489	3,2368	3,0356
06	2,9103	4,1563			4,8226	3,9443	5,4350
07	3,3253	6,1830			3,1656	4,7992	9,1996
08	3,1525	3,4722			3,4902	4,9067	6,6882
09	2,7171	3,3972	3,9295	3,2135	3,6897	4,8343	6,5372
10	2,5006	2,8724	3,3207	3,4344	3,5191	4,3700	5,3435
11	2,1683	2,3566	2,7553	3,0503	3,1910	3,6537	4,3437
12	1,8117	2,0198	2,2919	2,7442	2,7663	3,1812	3,4843
13	1,5220	1,6739	1,9823	2,3111	2,4028	2,6829	2,6131

(d) Régua 21 a 27:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)						
	Régua 21	Régua 22	Régua 23	Régua 24	Régua 25	Régua 26	Régua 27
01				0,9478	1,6373		
02				1,1251	1,0961		
03				1,4615	1,3729		
04				1,8111	1,7962	2,7858	2,9902
05	1,9773	1,8070	2,0449	2,2437	2,4376	3,0534	3,4262
06	2,0725	2,1691	2,3443	2,6885	2,6774	3,3535	3,4215
07	2,3192	2,5425	2,7314	3,0093	3,1655	3,5222	3,6266
08	2,9235	3,1024	3,3431	3,6708	3,3937	3,8505	4,1449
09	2,9536	4,2013	3,9090	3,8284	3,8776	4,0328	4,3802
10			4,9181	4,3000	3,9494	3,9958	4,5753
11			5,9735	4,6846	4,0805	4,0122	4,7405
12			6,1779	4,7190	4,0929	3,8904	4,5149
13	7,9507	7,1613	5,8994	4,5182	3,9214	3,5856	4,2491
14	6,4374	6,5268	5,2666	3,9820	3,5810	3,2837	3,8551
15	5,1753	5,2983	4,3363	3,4714	3,1939	3,0359	3,4643
16	3,8884	4,1860	3,3614	2,9422	2,9607	2,8860	3,1672
17	2,9575	3,0690	2,6942	2,4116	2,6759	2,5072	2,6986

(e) Régua 28 a 33:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)					
	Régua 28	Régua 29	Régua 30	Régua 31	Régua 32	Régua 33
01	2,4301	2,4733	3,2329	3,4943	3,2973	2,9987
02	2,9142	2,8939	3,6160	3,7953	3,6296	3,4639
03	3,2570	3,3097	3,8065	4,0386	4,5053	3,4552
04	3,7090	3,9366	4,0250	4,1721	3,9559	2,8449
05	4,4273	4,6546	4,7406	4,7025	4,2117	4,1062
06	4,7765	4,8684	4,9553	4,6782	4,3999	4,0724

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)					
	Régua 28	Régua 29	Régua 30	Régua 31	Régua 32	Régua 33
07	5,0195	5,2910	5,3429	4,7969	4,3450	3,6914
08	5,3019	6,2473	6,5655	5,7883	4,7333	4,4853
09	5,1294	5,8590	6,8607	6,9656		9,1991
10	5,1551	5,8417	6,5490	5,5205	8,6776	15,9590
11	4,4062	5,0110	5,5300	6,5153	6,1940	7,5348
12	3,7170	4,1771	4,2991	3,9965	3,7496	4,1532
13	3,3866	3,3816	3,2166	2,6838	2,3051	2,1831
14	2,7454	2,6202	2,4175	1,8431	1,4321	1,7492

(f) Régua 34 a 38:

Ponto	Densidade de fluxo magnético (μT)				
	Régua 34	Régua 35	Régua 36	Régua 37	Régua 38
01	2,6313	2,5048	2,2649	2,1889	2,0818
02	3,0484	2,8550	2,6088	2,5972	2,4430
03	3,3130	3,0709	2,5316	2,9712	2,6856
04	3,5586	3,4067	2,8916	3,3286	2,8838
05	3,8102	3,5834	4,2896	3,2466	2,8453
06	3,6743	3,2523	2,5225	2,3334	2,3393
07	3,5584	3,4669	2,6887	2,1151	1,9230
08	4,7567	4,7656	3,6534	2,5811	2,0020
09	6,7103	6,4989	4,0552	3,1743	2,3570
10	7,3444	7,1174	5,4164	3,2384	2,4463
11	6,1626	6,0799	4,2310	2,5840	2,0626
12	3,9625	6,9136	3,9416	1,5024	1,6793
13	2,2329	2,7263	3,8374	2,9515	1,8503
14	2,3651	2,5643	2,7991	2,6302	1,9274

Tabela D.10: Valores de campo elétrico medidos na SE Gama nas régua: (a) 01 a 06; (b) 07 a 13; (c) 14 a 20; (d) 21 a 27; (e) 28 a 33; (f) 34 a 38.

(a) Régua 01 a 06:

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 01	Régua 02	Régua 03	Régua 04	Régua 05	Régua 06
01	716,02	784,77	929,26	1259,20	1653,40	2024,20
02	605,00	653,15	801,54	1267,90	1878,80	2358,70
03	471,57	455,97	548,49	1920,70	1942,60	2184,00
04	337,80	318,60	306,79	791,64	1424,90	1603,30
05	297,57	285,82	350,92	709,39	1284,00	1409,70
06	370,18	336,30	284,99	861,87	1670,50	1933,70
07	514,17	496,84	660,04	2200,30	1998,00	2374,80
08	659,85	685,98	852,71	1288,90	1778,90	2182,30
09	748,05	808,57	941,35	1253,00	1504,00	1788,80

(b) Régua 07 a 13:

Ponto	Campo elétrico (V/m)						
	Régua 07	Régua 08	Régua 09	Régua 10	Régua 11	Régua 12	Régua 13
01	2204,40	2284,00	2232,40	3066,90	2365,10	1332,30	1180,20
02	2557,00	2648,50	2545,20	2184,50	1724,00	1408,30	1024,00
03	4658,60	2532,80	2531,40	1860,80	1570,90	1285,10	1400,30
04	718,40	1749,00	1691,90	396,48	1193,00	768,90	533,92
05	1007,40	1479,50	1430,30	226,85	966,27	715,34	476,33
06	3263,90	2198,70	2246,30	1726,50	1305,80	966,61	257,64
07	2513,70	2621,30	2474,80	2014,90	1598,50	1125,30	231,73
08	2376,80	2362,70	2168,30	1862,30	1418,40	1166,20	196,10
09	1924,30	1873,40	1711,90	1450,60	1157,30	1204,90	68,58
10						608,23	138,77
11						475,57	80,97
12						384,74	213,48
13						330,33	212,47

(c) Régua 14 a 20:

Ponto	Campo elétrico (V/m)						
	Régua 14	Régua 15	Régua 16	Régua 17	Régua 18	Régua 19	Régua 20
01	1720,70	1388,70	1346,50	1393,40	1647,50	1549,70	1410,40
02	1121,80	1414,40	1568,70	1529,00	1602,90	1637,50	1552,40
03	965,22	2149,40	5981,30	1561,10	1634,30	1770,70	1678,50
04	868,81	1053,10	1145,80	1327,80	1552,00	1812,40	1835,30
05	676,76	844,95	1090,20	1274,90	1377,90	1513,40	2919,70
06	374,74	372,72			838,11	1091,90	1397,70
07	115,86	65,05			532,48	532,81	593,76
08	74,35	29,93			186,73	235,63	346,87
09	78,80	79,74	83,72	46,64	96,95	118,38	177,52
10	96,89	90,05	98,00	58,74	64,37	104,10	149,03
11	89,53	81,06	88,61	65,33	67,75	88,25	118,72
12	114,91	73,35	64,43	57,97	59,84	77,15	98,55
13	141,83	83,14	60,13	48,88	47,99	57,55	67,89

(d) Régua 21 a 27:

Ponto	Campo elétrico (V/m)						
	Régua 21	Régua 22	Régua 23	Régua 24	Régua 25	Régua 26	Régua 27
01				315,76	337,25		
02				382,09	336,93		
03				472,75	573,67		
04				612,52	600,30	742,49	339,49
05	1790,10	1252,90	848,26	674,80	582,53	769,16	573,25
06	1371,10	1084,70	870,88	659,23	588,56	569,63	362,19
07	1461,50	1054,60	772,70	602,90	428,76	209,57	149,37
08	1446,20	934,82	643,57	442,77	259,33	195,50	186,20
09	1623,90	875,72	389,46	269,73	179,74	145,69	130,19
10			101,63	160,15	126,38	92,69	75,35

Ponto	Campo elétrico (V/m)						
	Régua 21	Régua 22	Régua 23	Régua 24	Régua 25	Régua 26	Régua 27
11			98,57	145,06	117,97	58,04	35,37
12			196,38	152,95	122,42	41,25	25,42
13	144,68	84,32	133,76	103,63	55,76	65,37	56,74
14	143,50	100,39	88,93	77,08	51,74	82,42	85,93
15	125,67	101,42	87,64	82,57	108,03	99,12	99,87
16	105,63	93,84	83,39	76,70	73,32	88,29	101,45
17	76,98	79,30	66,31	68,30	72,53	84,85	100,11

(e) Réguas 28 a 33:

Ponto	Campo elétrico (V/m)					
	Régua 28	Régua 29	Régua 30	Régua 31	Régua 32	Régua 33
01	385,64	326,14	418,71	427,99	505,02	199,91
02	564,16	570,44	665,91	667,18	461,04	262,62
03	370,13	314,79	400,20	452,79	339,47	466,09
04	93,27	97,20	92,48	108,95	128,28	402,41
05	81,81	68,46	72,32	68,32	114,89	181,20
06	82,79	70,81	62,11	56,09	102,38	135,76
07	72,91	67,75	73,81	97,86	110,03	143,12
08	38,12	61,72	101,61	228,39	314,61	292,21
09	17,94	34,29	78,35	228,20		425,74
10	49,33	44,54	69,15	37,39	452,34	148,31
11	66,22	85,39	147,87	323,97	458,36	589,12
12	94,43	220,21	197,03	300,24	348,55	468,64
13	104,01	135,06	169,90	207,14	225,15	391,87
14	109,45	132,46	155,25	189,80	219,89	264,40

(f) Réguas 34 a 38:

Ponto	Campo elétrico (V/m)				
	Régua 34	Régua 35	Régua 36	Régua 37	Régua 38
01	139,72	196,33	231,17	233,32	222,04
02	205,44	312,75	328,39	275,58	234,15
03	379,53	586,89	415,34	296,66	249,55
04	447,26	453,52	415,38	407,08	263,03
05	230,19	310,03	953,27	522,31	238,59
06	150,20	186,82	353,72	267,16	143,25
07	155,03	187,56	217,05	284,05	120,65
08	246,80	242,49	256,34	227,51	209,71
09	315,37	332,15	473,64	439,33	167,19
10	298,63	287,49	377,17	344,63	189,76
11	386,67	216,96	582,27	610,38	262,95
12	357,68	214,15	312,85	374,49	222,88
13	570,88	631,68	270,69	190,22	150,44
14	227,45	251,89	223,11	152,38	113,81

Tabela D.11: Valores de campo elétrico medidos em pontos da malha de terra.

Ponto	Campo elétrico (V/m)				
	1 a 9	10 a 18	19 a 27	28 a 36	37 a 45
01	71,30	183,00	128,40	50,36	12,14
02	124,60	139,90	121,50	29,06	10,20
03	28,88	208,20	104,60	15,62	33,57
04	86,71	364,80	83,40	10,16	104,70
05	357,30	713,80	73,00	13,64	73,00
06	462,90	409,50	31,52	9,50	115,80
07	570,80	175,90	47,20	12,14	223,20
08	511,10	120,40	50,06	1,98	947,20
09	276,40	132,50	49,24	4,70	682,20

Tabela D.12: Densidade de fluxo magnético na vizinhança do disjuntor 13,8kV.

Altura da Medição em relação ao solo (m)	Densidade de fluxo magnético (μT)			
	P1	P2	P3	P4
1,0	3,01	-	-	-
1,6	11,52	18,86	16,01	9,34
2,1	26,18	87,23	61,47	28,34

D.5. VALORES DE CAMPOS MEDIDOS EM NOVA SÉRIE DE MEDIÇÕES NA SUBESTAÇÃO BETA

As Tabelas D.13 a D.15 resumem os valores de campo elétrico e de densidade de fluxo magnético medidos nos perfis L_1 e L_2 .

Tabela D.13: Medidas de campo elétrico nos perfis L_1 e L_2 .

N	Campo Elétrico (V/m)		
	Perfil L_1		Perfil L_2
	M1	M2	M
1	93,106	93,931	14,853
2	450,110	434,670	36,195
3	809,420	770,430	70,651
4	896,900	870,330	75,369
5	592,830	564,590	41,903
6	983,240	964,640	72,219
7	913,150	910,990	113,410
8	499,900	496,510	134,780
9	161,750	163,770	144,600
10	124,970	129,390	224,360
11	95,109	100,820	278,000
12	68,074	71,027	324,110
13	45,574	47,105	342,880

N	Campo Elétrico (V/m)		
	Perfil L1		Perfil L2
	M1	M2	M
14	28,835	30,092	345,760
15	17,738	17,215	272,730
16	13,212	12,152	83,948
17	35,736	35,720	30,394
18	62,451	64,753	134,290
19	112,130	112,430	350,580
20	117,010	113,950	394,780
21	69,052	64,048	646,730
22	77,548	70,213	905,310
23	101,660	96,595	612,450
24	45,635	46,137	380,760
25	35,067	35,784	247,680
26	25,751	26,005	193,560
27	18,060	17,857	141,430
28	15,556	15,241	89,777

Tabela D.14: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L₁.

N	Densidade de Fluxo Magnético (μ T)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
1	0,2103	0,2501	0,2455	0,2215	0,2422	0,2301	0,2300	0,2245
2	0,2556	0,3086	0,3046	0,2715	0,2978	0,2758	0,3102	0,2874
3	0,4248	0,4683	0,5087	0,4464	0,4840	0,3903	0,4603	0,4542
4	0,6227	0,7090	0,8007	0,7209	0,7824	0,6419	0,7533	0,7285
5	0,7941	0,9059	0,9433	0,9107	0,9685	0,8669	0,9045	0,9129
6	0,8767	0,9623	1,0280	0,9855	1,0031	0,9507	0,9722	0,9995
7	0,8197	0,8912	0,9460	0,8898	0,9285	0,8653	0,8958	0,9005
8	0,7029	0,7748	0,8035	0,7855	0,7848	0,7590	0,7687	0,7754
9	0,6719	0,7419	0,7738	0,7464	0,7539	0,7211	0,7278	0,7210
10	0,6528	0,7398	0,7378	0,7454	0,7554	0,7159	0,7300	0,7053
11	0,6393	0,7075	0,7090	0,7178	0,7240	0,6978	0,7250	0,6846
12	0,6201	0,6690	0,6743	0,6986	0,7050	0,6842	0,6920	0,6680
13	0,6032	0,6408	0,6376	0,6678	0,6714	0,6551	0,6489	0,6443
14	0,5934	0,6163	0,6329	0,6144	0,6294	0,6310	0,6181	0,6201
15	0,5974	0,6066	0,6105	0,6135	0,6237	0,6417	0,6188	0,6007
16	0,7141	0,7623	0,7604	0,7502	0,7536	0,7535	0,7483	0,7480
17	0,9114	0,9899	0,9924	1,0149	0,9745	0,9851	0,9796	0,9682
18	1,0015	1,1171	1,0985	1,1564	1,1197	1,1110	1,0987	1,1151
19	1,1863	1,3268	1,3416	1,3562	1,3431	1,3178	1,3098	1,3293
20	1,5244	1,6981	1,7600	1,7779	1,7494	1,7124	1,6932	1,7127
21	1,4190	1,5640	1,6631	1,5913	1,5716	1,5065	1,4569	1,5068
22	1,7848	1,9821	2,1470	1,9609	1,9702	1,8073	1,7951	1,8583
23	1,5877	1,7729	1,8608	1,8051	1,7744	1,6898	1,7105	1,6741
24	1,3777	1,5123	1,5156	1,6164	1,4968	1,5097	1,4888	1,4146
25	1,1057	1,2320	1,2144	1,2760	1,2149	1,1492	1,1931	1,1514
26	0,9744	1,0758	1,0215	1,0770	1,0505	0,9898	1,0377	1,0073
27	0,8550	0,9328	0,8974	0,9295	0,9092	0,8761	0,9156	0,8768

N	Densidade de Fluxo Magnético (μT)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
28	0,7505	0,7970	0,7666	0,7965	0,7861	0,7695	0,7888	0,7688

Tabela D.15: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L₂.

N	Densidade de Fluxo Magnético (μT)			
	M1	M2	M3	M4
1	0,7908	0,78204	0,76884	0,76058
2	0,97042	0,95046	0,9357	0,9341
3	1,1782	1,1435	1,1319	1,1351
4	1,107	1,0418	1,0582	1,077
5	0,96415	0,97446	0,90134	0,93042
6	0,83997	0,87454	0,80047	0,81998
7	0,75663	0,78911	0,74262	0,74417
8	0,62348	0,62521	0,61638	0,62292
9	0,53937	0,53635	0,54126	0,54061
10	0,55263	0,56378	0,55845	0,55983
11	0,54673	0,59486	0,59765	0,58721
12	0,64014	0,7117	0,73995	0,68043
13	0,8855	0,97471	1,0214	0,96304
14	1,3217	1,5006	1,4924	1,451
15	2,1034	2,3315	2,227	2,1636
16	3,5408	3,7071	3,7595	3,762
17	5,5156	5,4814	5,5268	5,209
18	3,5709	3,6506	3,6219	3,5419
19	2,2033	2,2175	2,2276	2,2915
20	1,6079	1,6594	1,698	1,6727
21	1,1019	1,1661	1,1507	1,1883
22	0,85125	0,89118	0,89553	0,94811
23	0,66905	0,69045	0,6804	0,70689
24	0,46878	0,47378	0,48007	0,49314
25	0,31841	0,33694	0,33898	0,33772
26	0,26857	0,27972	0,27222	0,29231
27	0,21353	0,23553	0,22749	0,247
28	0,19446	0,21832	0,21734	0,21782

APÊNDICE E

GRÁFICOS LINEARES – MEDIÇÕES NAS SUBESTAÇÕES BETA E GAMA

E.1. GRÁFICOS LINEARES PARA A SE BETA

A partir dos dados apresentados nas Tabelas D.7 e D.8, foram traçados gráficos relativos ao perfil eletromagnético da instalação, no plano xy dos valores de campo medidos por ponto em cada régua.

A forma como os valores de campo variam ao longo de cada corte transversal da instalação indica a natureza da superposição das componentes inerentes aos equipamentos que os influenciam diretamente, ou ainda, da própria tensão e corrente do sistema. A superposição das componentes vetoriais dos campos produzidos isoladamente por cada fonte na instalação pode resultar em campos menores, se essas componentes estiverem em oposição, e em campos mais intensos, se essas componentes não se atenuam. Neste caso, o acoplamento eletromagnético produz campos mais intensos que as fontes originais, tornando necessário avaliar a suportabilidade da instalação a seus efeitos.

Os gráficos apresentados nas Figuras E.1 a E.21 representam os valores de densidade de fluxo magnético (a) e de campo elétrico (b) para os pontos medidos sobre as régua numeradas de 1 a 21, correspondentes às seções transversais e longitudinais medidas na SE Beta.

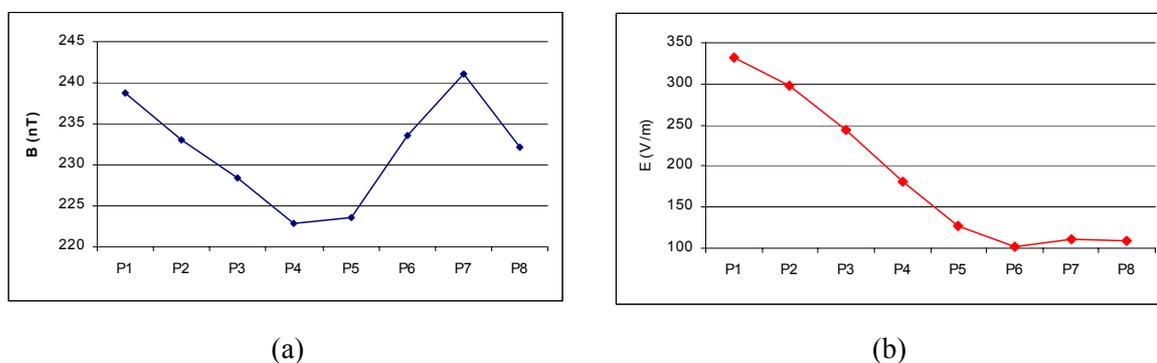
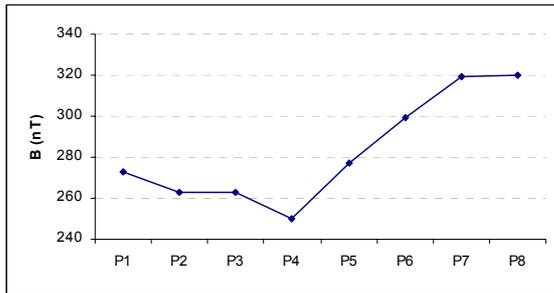
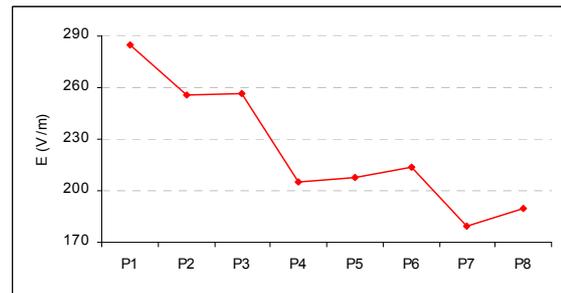


Figura E.1: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 1.

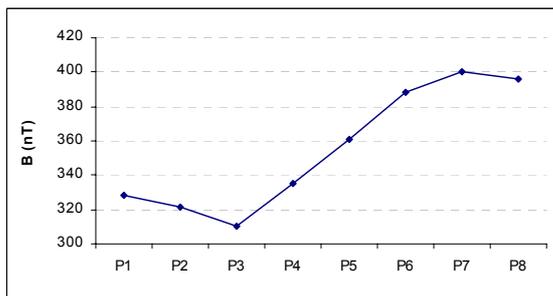


(a)

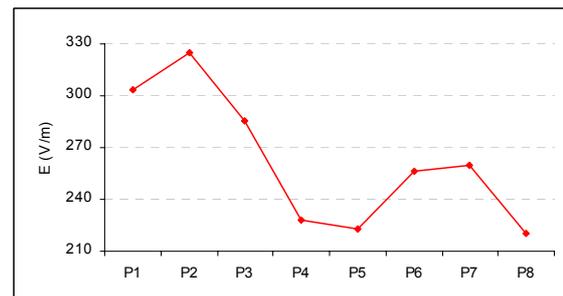


(b)

Figura E.2: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 2.

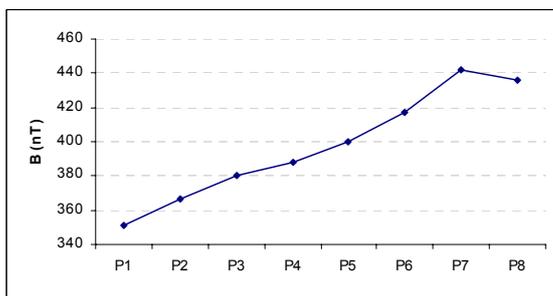


(a)

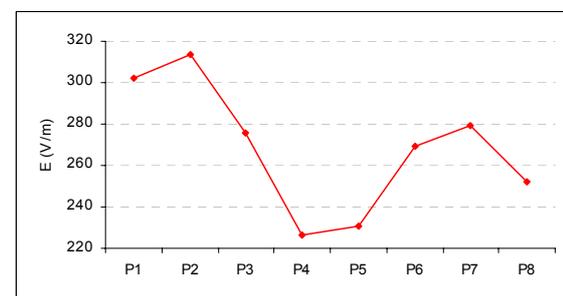


(b)

Figura E.3: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 3.

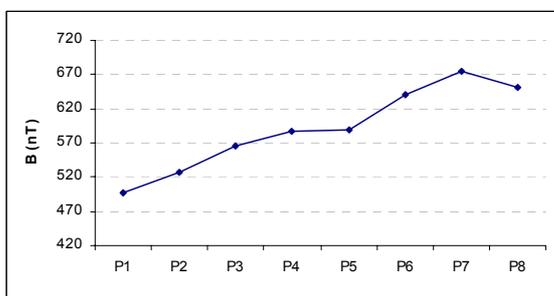


(a)

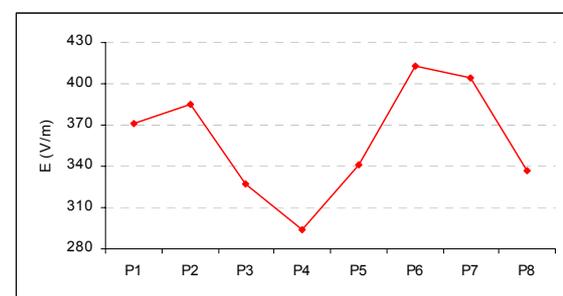


(b)

Figura E.4: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 4.

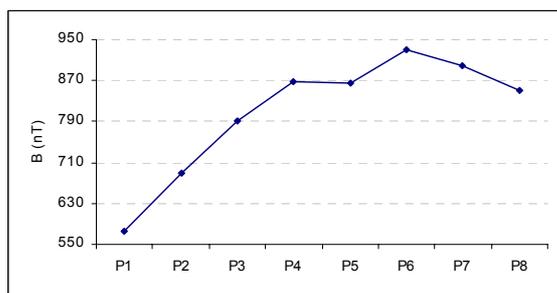


(a)

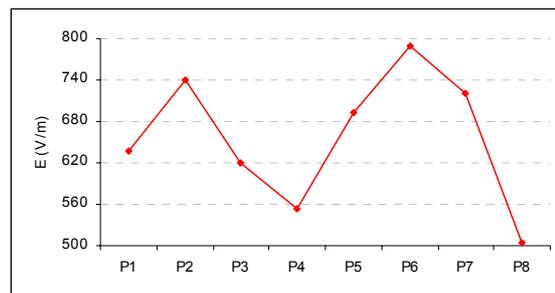


(b)

Figura E.5: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 5.

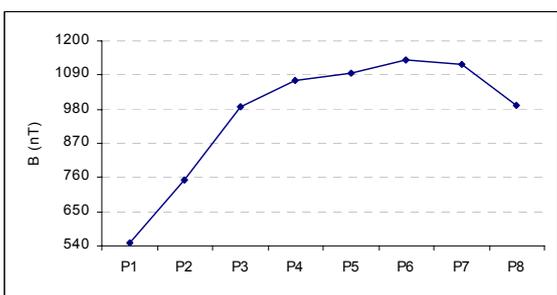


(a)

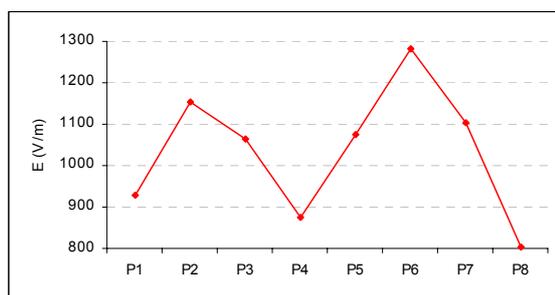


(b)

Figura E.6: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 6.

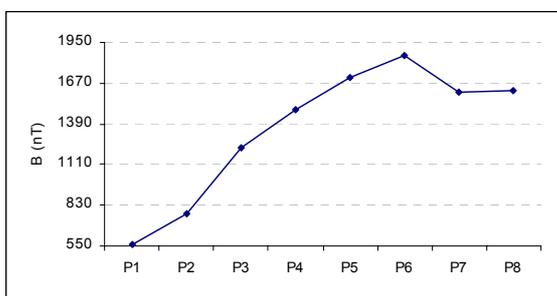


(a)

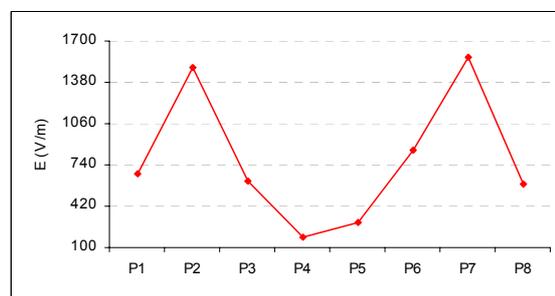


(b)

Figura E.7: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 7.

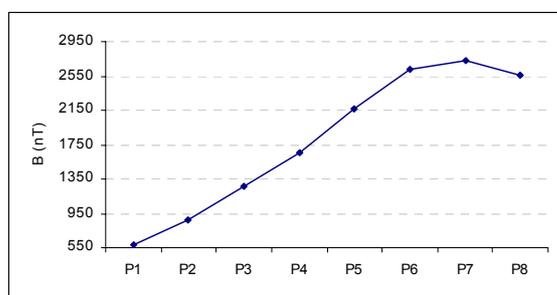


(a)

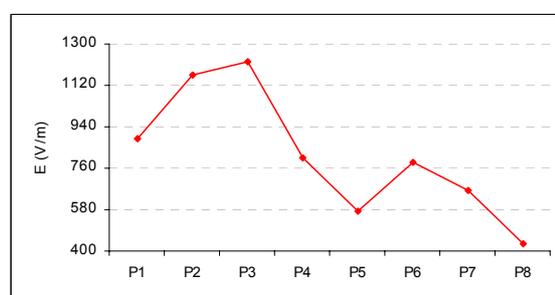


(b)

Figura E.8: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 8.

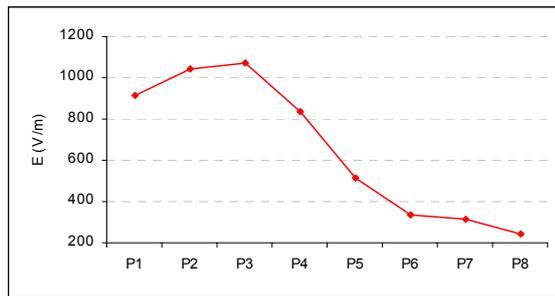
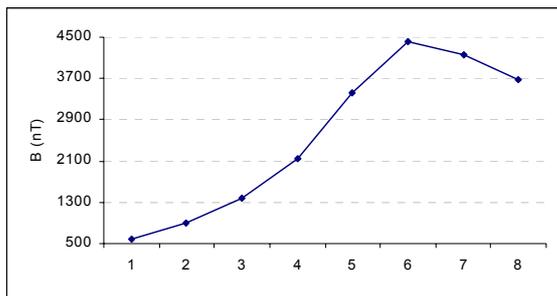


(a)



(b)

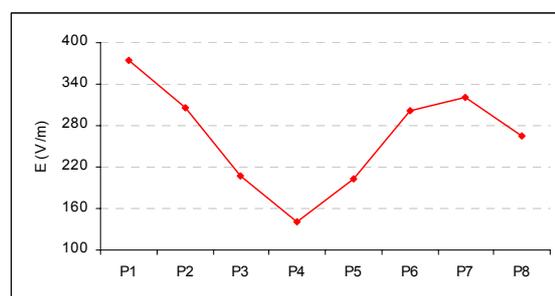
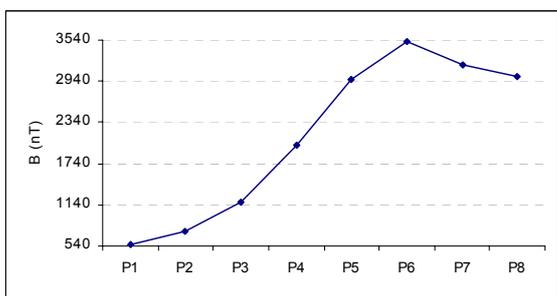
Figura E.9: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 9.



(a)

(b)

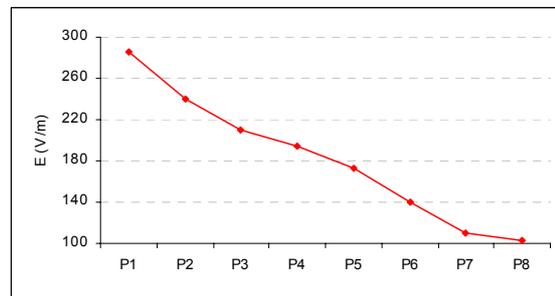
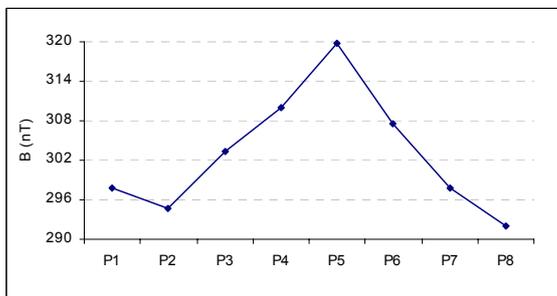
Figura E.10: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 10.



(a)

(b)

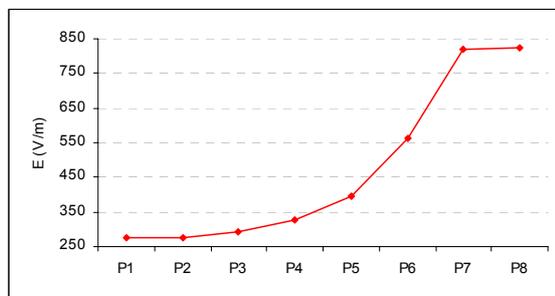
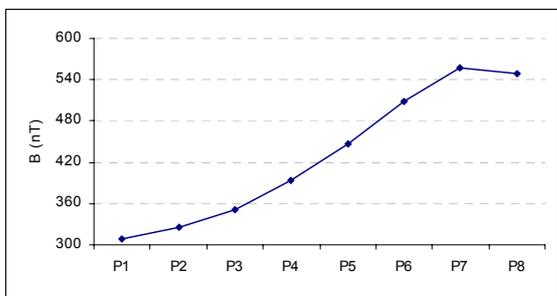
Figura E.11: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 11.



(a)

(b)

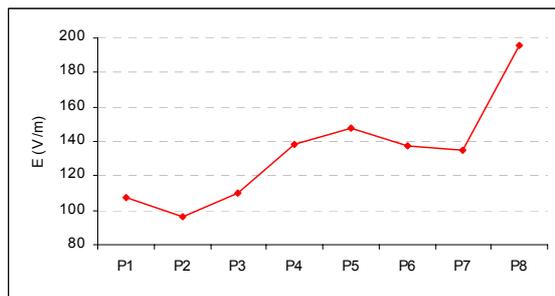
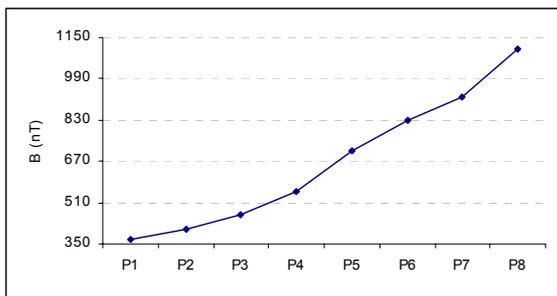
Figura E.12: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 12.



(a)

(b)

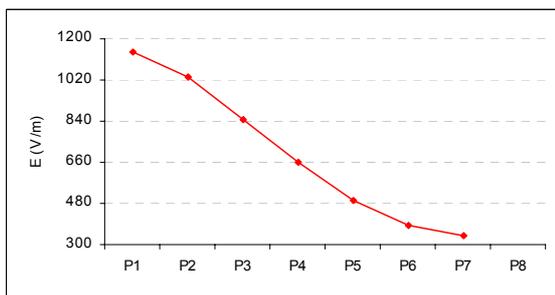
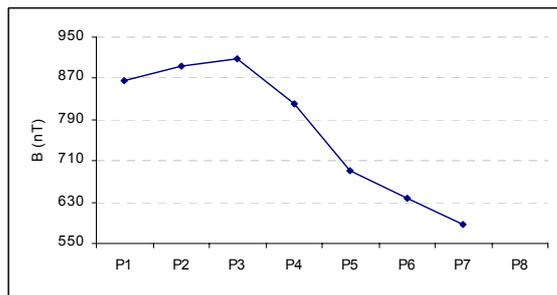
Figura E.13: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 13.



(a)

(b)

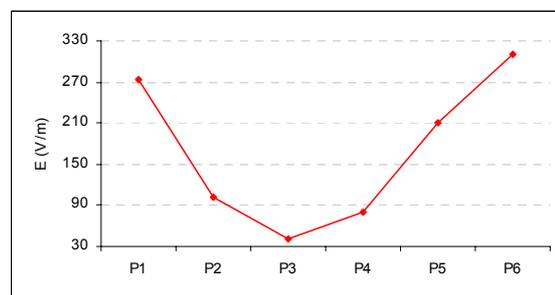
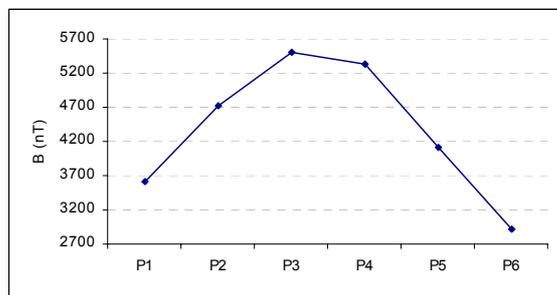
Figura E.14: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 14.



(a)

(b)

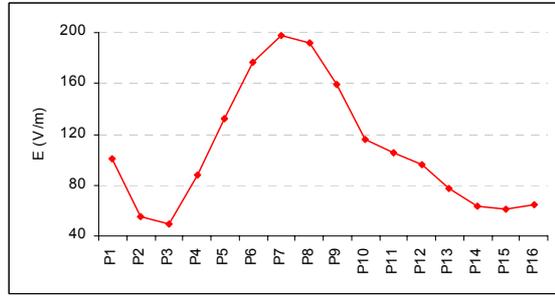
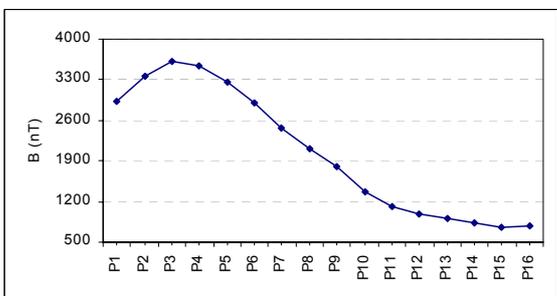
Figura E.15: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 15.



(a)

(b)

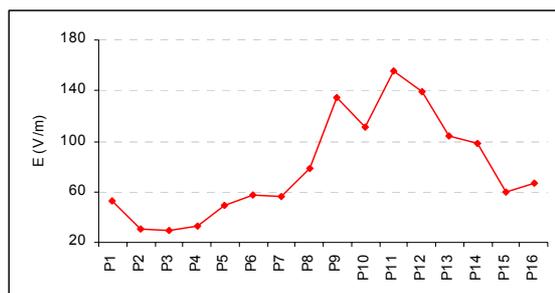
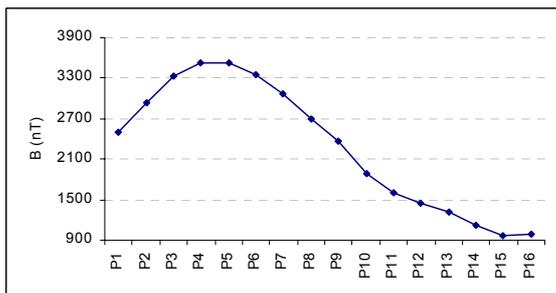
Figura E.16: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 16.



(a)

(b)

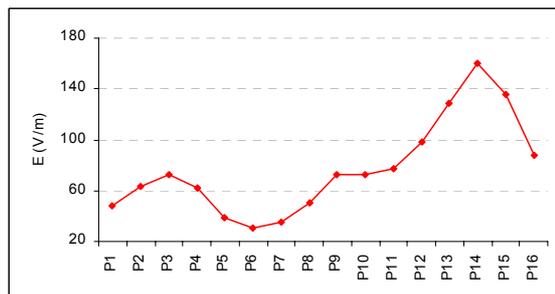
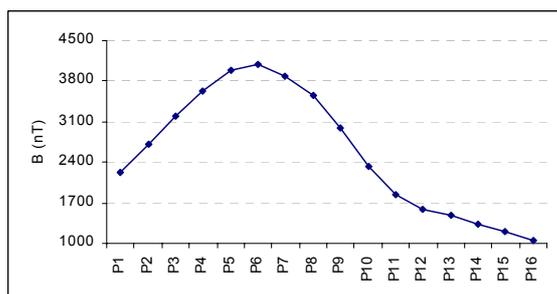
Figura E.17: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 17.



(a)

(b)

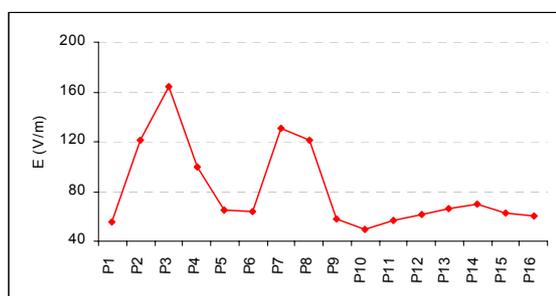
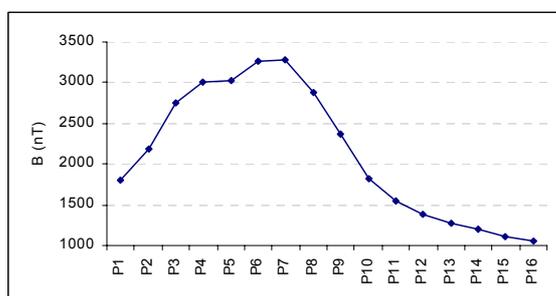
Figura E.18: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 18.



(a)

(b)

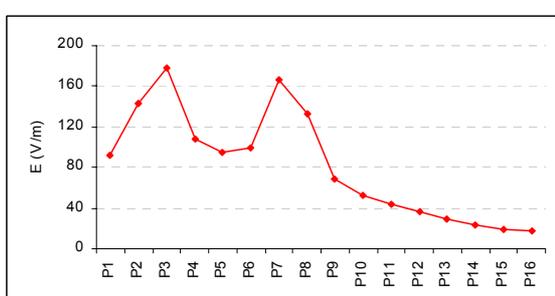
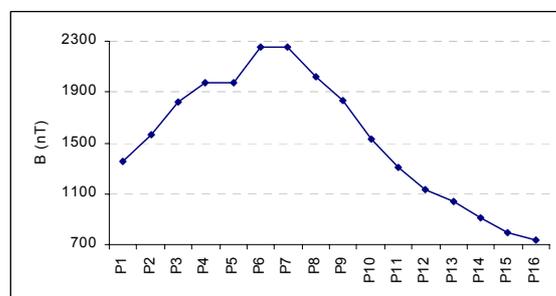
Figura E.19: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 19.



(a)

(b)

Figura E.20: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 20.



(a)

(b)

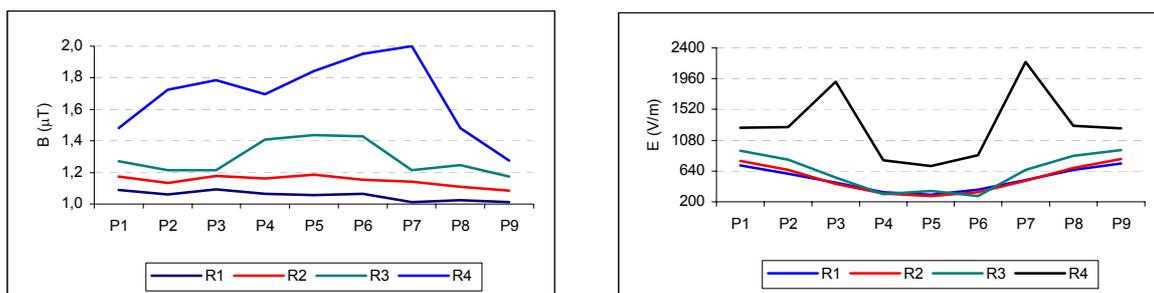
Figura E.21: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 21.

E.2. GRÁFICOS LINEARES PARA A SE GAMA

A partir dos dados apresentados nas Tabelas D.9 e D.10 foram obtidos gráficos relativos ao perfil eletromagnético da instalação, que estão apresentados nas Figuras E.22 a E.33, representando os valores de densidade de fluxo magnético (a) e de campo elétrico (b) para os pontos medidos no pátio da subestação. Dado o grande número de régua de medição deste caso, as representações lineares foram agrupadas de duas a quatro retas.

As descontinuidades observadas em algumas curvas deve-se à “não medição” de campo em pontos onde estão instalados os transformadores de potência e o disjuntor 13,8kV da SE Gama.

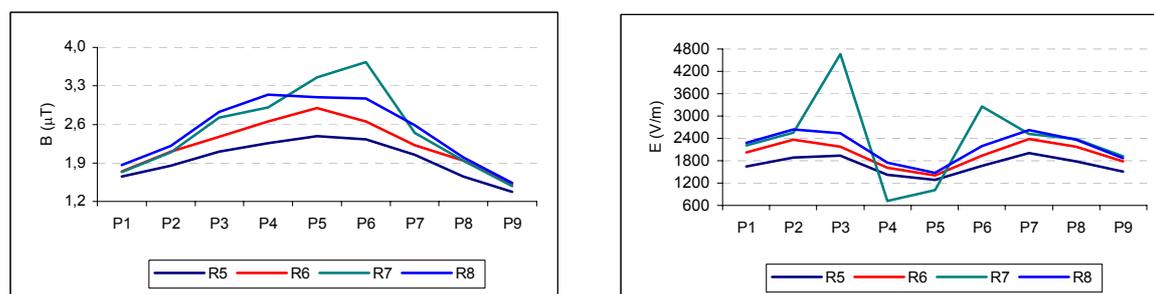
A Figura E.34 apresenta a distribuição gráfica do potencial medido na malha de terra a partir dos dados resumidos na Tabela D.11. A altura considerada para o instrumento foi de 1m em relação ao solo. Da Figura E.34 verifica-se que não existe equipotencialidade na malha de terra da SE Gama, embora se verifique um campo elétrico predominante abaixo de 200 V/m.



(a)

(b)

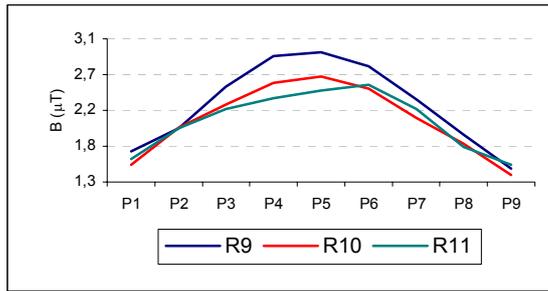
Figura E.22: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 1 a 4.



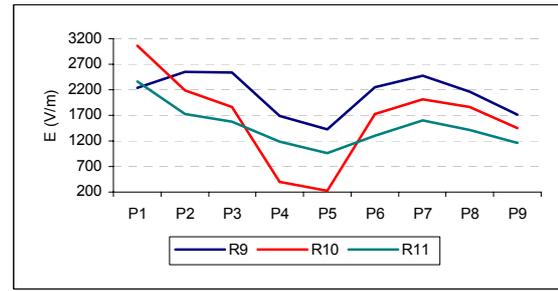
(a)

(b)

Figura E.23: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 5 a 8.

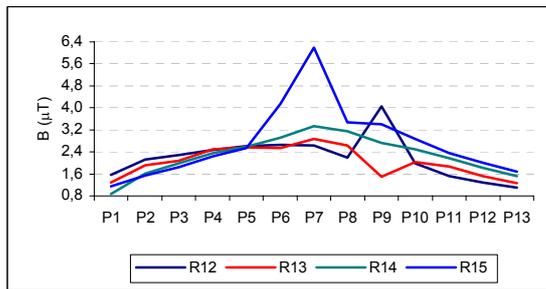


(a)

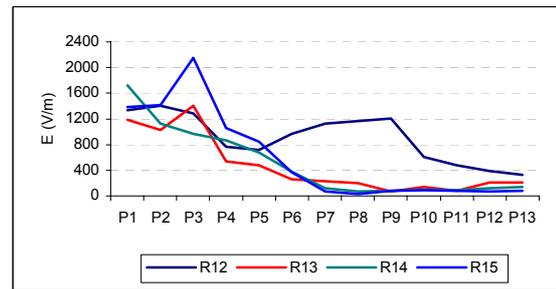


(b)

Figura E.24: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 9 a 11.

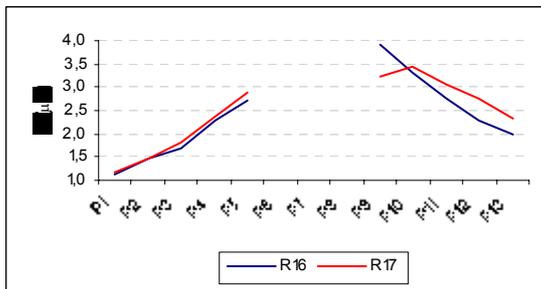


(a)

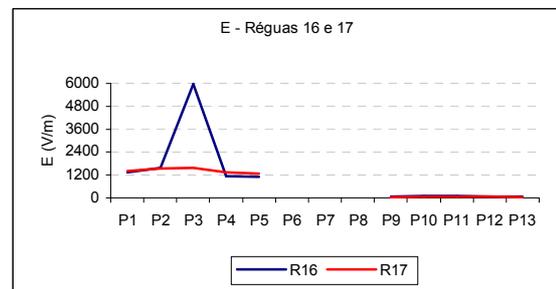


(b)

Figura E.25: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 12 a 15

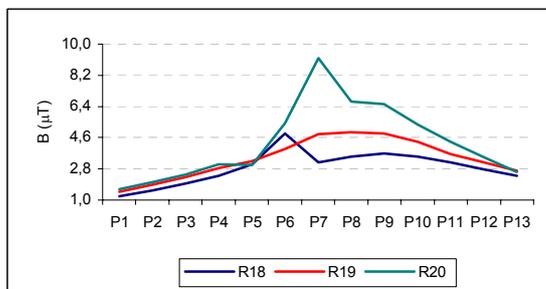


(a)

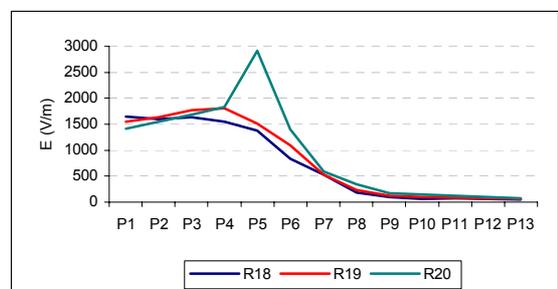


(b)

Figura E.26: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 16 e 17.

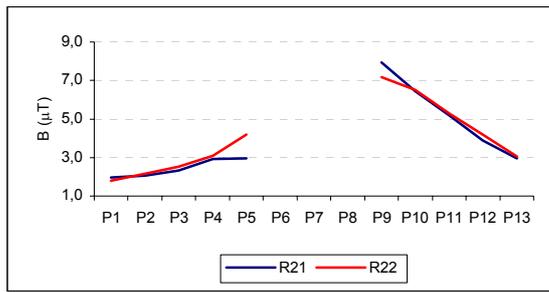


(a)

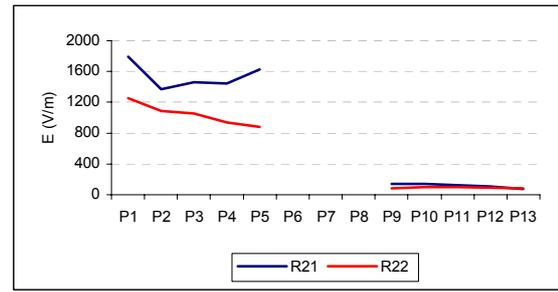


(b)

Figura E.27: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 18 a 20.

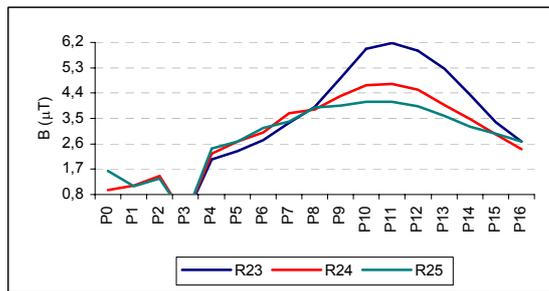


(a)

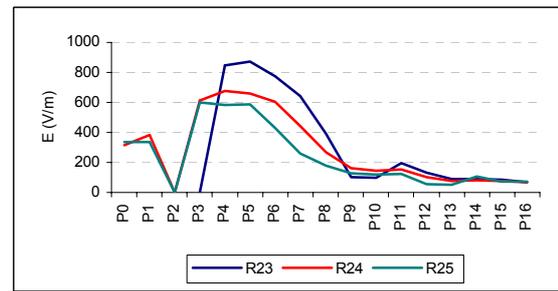


(b)

Figura E.28: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 21 e 22.

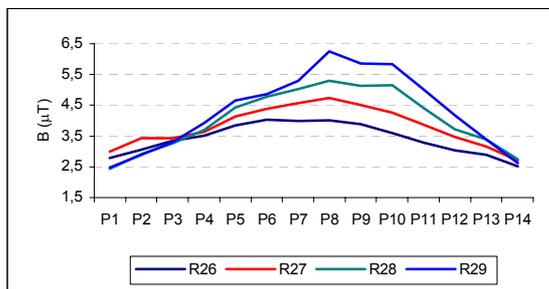


(a)

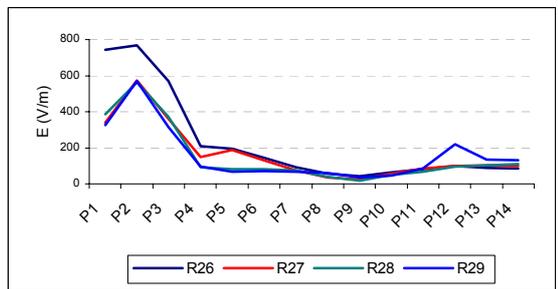


(b)

Figura E.29: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 23 a 25.

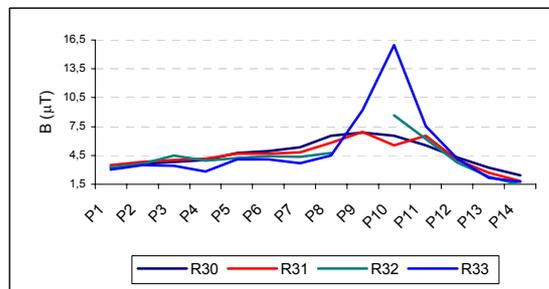


(a)

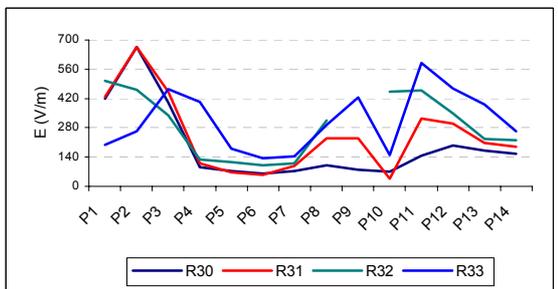


(b)

Figura E.30: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 26 a 29.

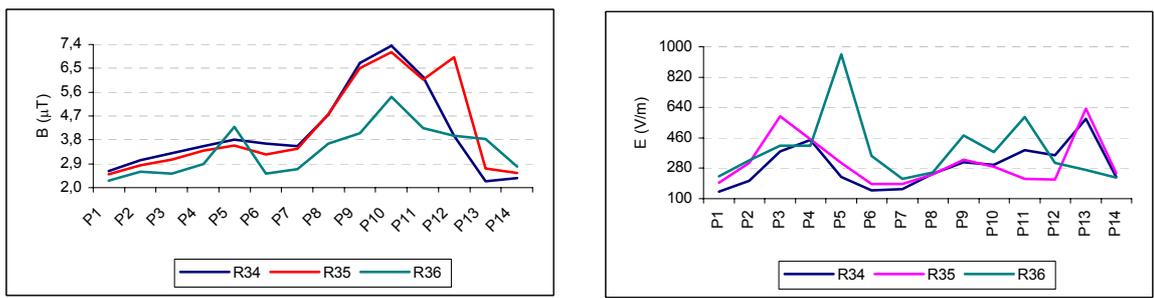


(a)



(b)

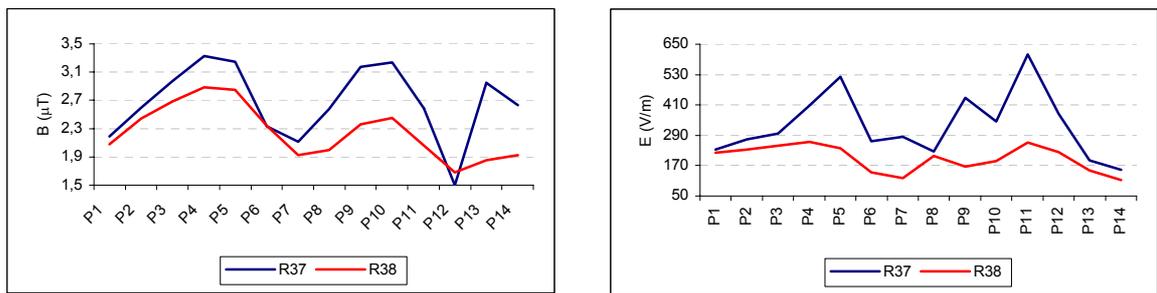
Figura E.31: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 30 a 33.



(a)

(b)

Figura E.32: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 34 a 36.



(a)

(b)

Figura E.33: Densidade de fluxo magnético (a) e campo elétrico (b) – Régua 37 e 38.

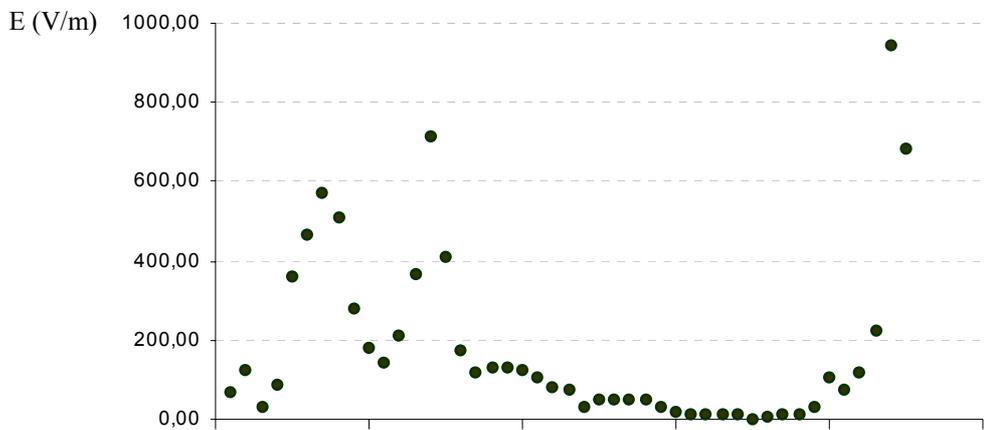


Figura E.34: Campo elétrico medido em pontos avulsos da malha de terra.

APÊNDICE F

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO NA SE BETA

F.1. MEDIÇÕES ADICIONAIS REALIZADAS NA SE BETA

Como as medições realizadas nas subestações objetivaram avaliar os campos eletromagnéticos em regime permanente, as medidas efetuadas consideraram a frequência industrial, 60Hz, como referência, sem que fossem consideradas as componentes de campo nas frequências superiores. Com isso, a distribuição probabilística dos valores de campo medidos na SE Beta foi aproximada satisfatoriamente por uma curva gaussiana e com isso, a análise dos dados foi bastante simplificada.

A Figura F.1 apresenta os perfis L_1 e L_2 considerados nesta avaliação.

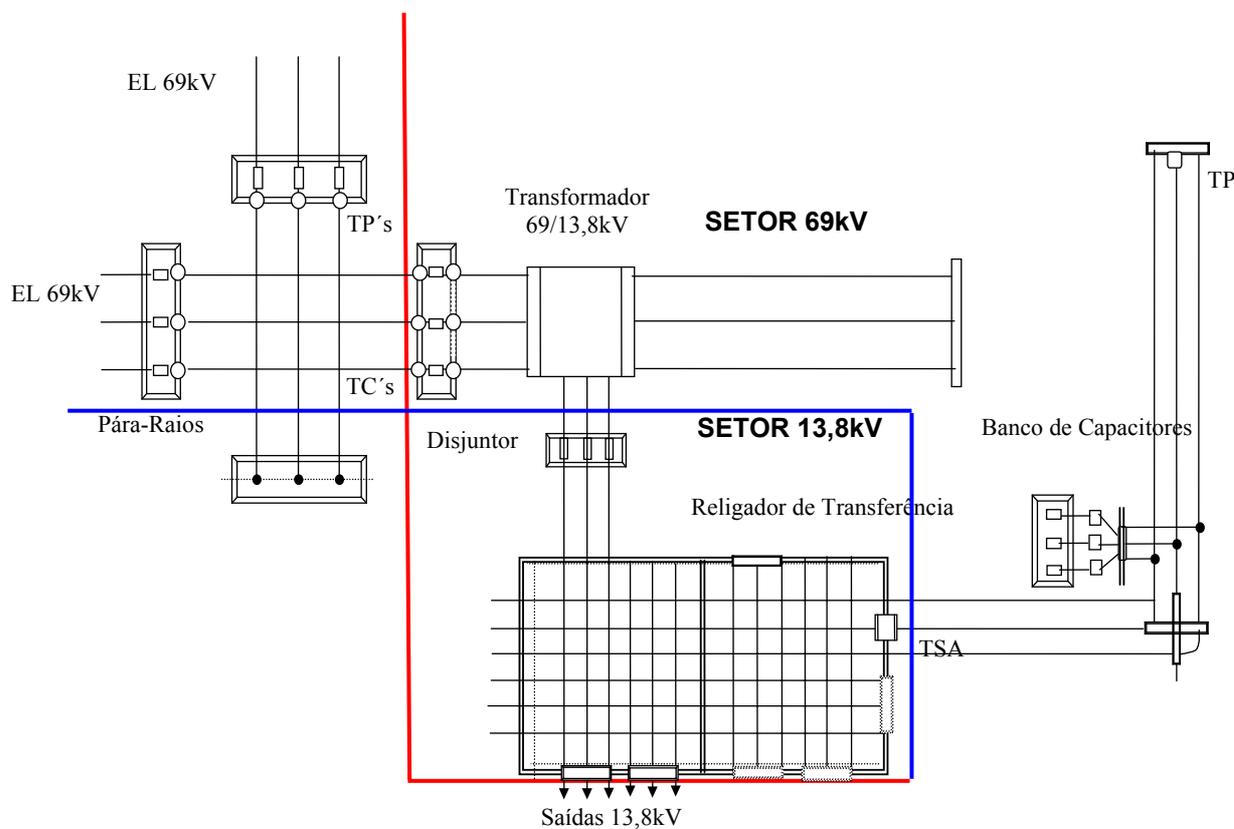


Figura F.1: Croqui de Medição – Perfis L_1 (■) e L_2 (■).

O croqui L_1 foi definido coincidindo com a régua de medição 7 (Figura 5.6), na vizinhança dos TC's 69kV, ampliado de uma extremidade a outra do pátio; desta extremidade o perfil segue longitudinalmente na direção das saídas em 13,8kV. Esses pontos foram medidos considerando como espaçamento da grade de medição a distância existente entre as fases do 69kV, de 1,5m, totalizando 28 pontos de medida. O croqui L_2 , por sua vez, inicia no final do croqui L_1 , transversalmente, contornando o barramento duplo em 13,8kV e seguindo longitudinal para o setor 69kV, passando entre o secundário do transformador de potência e a entrada do barramento em 13,8kV, até encontrar a régua de medição 1 definida na medição inicial, na entrada de linha em 69kV.

O perfil L_1 foi medido em dois dias distintos. O primeiro deles foi uma 2ª feira e o segundo, uma 4ª feira, respectivamente, o pior e o melhor dia da semana para a realização das medições de campo, de acordo com a análise preliminar das curvas de carga da subestação.

Na 2ª feira foi feita uma série de medidas de campo elétrico e cinco séries de medidas de densidade de fluxo magnético, totalizando, respectivamente, 28 e 140 pontos medidos. Na 4ª feira, foi feitas mais uma série de medidas de campo elétrico, no sentido oposto ao considerado na 2ª feira, e mais três séries de medidas de densidade de fluxo magnético, sendo duas no sentido de medição oposto ao considerado na 2ª feira.

O perfil L_2 foi medido apenas na 4ª feira e considerou a realização de quatro séries de medidas de densidade de fluxo magnético, variando o sentido de medição, e uma série de medidas de campo elétrico.

A Tabela D.13 do Apêndice D resume os valores de campo elétrico medidos nos perfis L_1 e L_2 e as Tabelas D.14 e D.15 resumem, respectivamente, os valores de densidade de fluxo magnético medidos no perfil L_1 e no perfil L_2 .

Nas três tabelas, N corresponde aos pontos medidos na SE Beta e os valores correspondentes de campo nesses pontos, independente da ordem em que as séries foram medidas e dos horários nos quais estas séries foram executadas.

As Figuras F.2 e F.3 apresentam os gráficos das tensões medidas nos perfis L_1 e L_2 , enquanto que as figuras F.4 e F.5, os gráficos dos valores medidos de densidade de fluxo magnético nos perfis L_1 e L_2 , respectivamente.

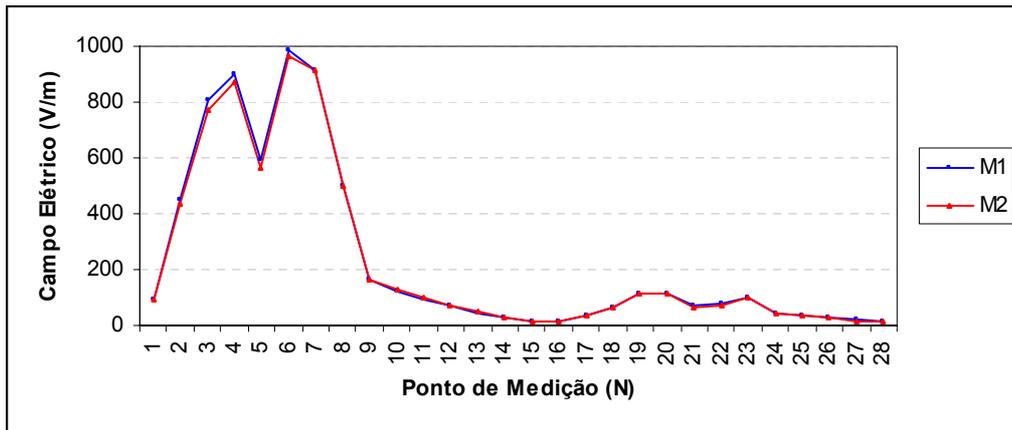


Figura F.2: Medidas de campo elétrico no perfil L₁.

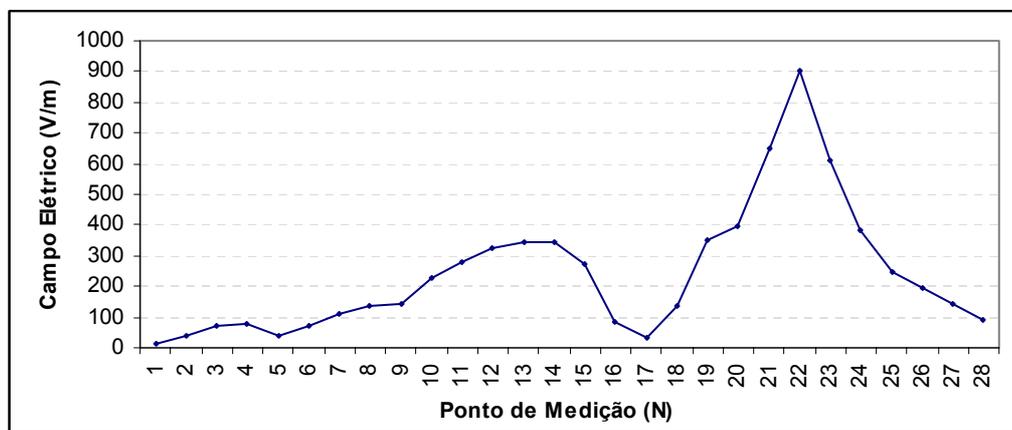


Figura F.3: Medidas de campo elétrico no perfil L₂.

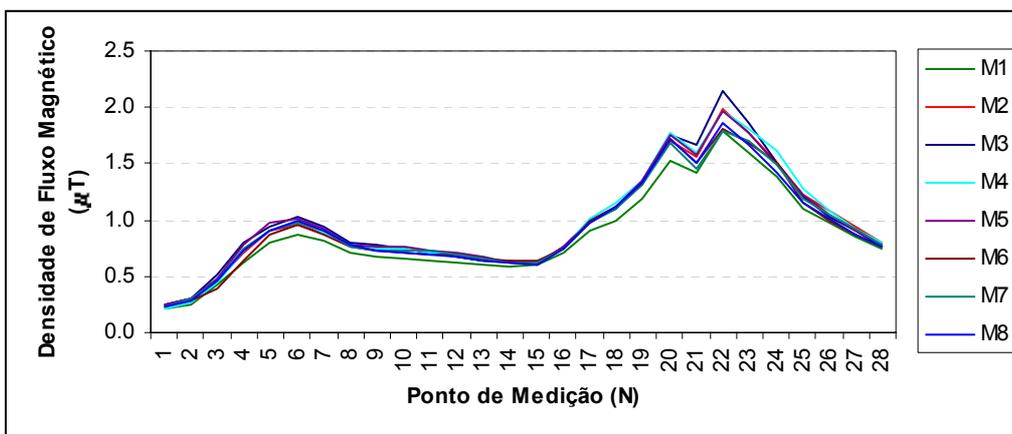


Figura F.4: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L₁.

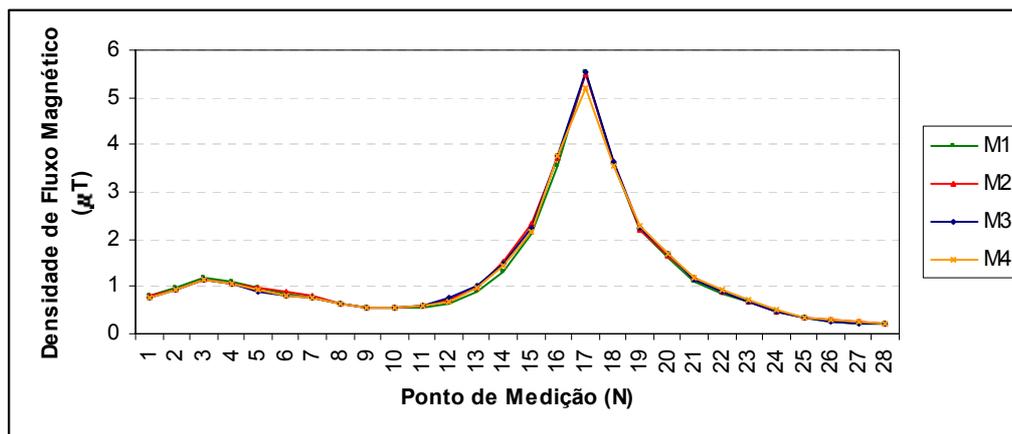


Figura F.5: Medidas de densidade de fluxo magnético no perfil L₂.

Dos gráficos anteriores é possível constatar que, independente da magnitude dos campos medidos, tanto o campo elétrico quanto a densidade de fluxo magnético se distribuem da mesma forma: ou seja, os gráficos são semelhantes e as pequenas diferenças observadas são relativas às diferenças de magnitude dos campos gerados. Em outras palavras: o fenômeno observado é o mesmo.

Em síntese, as análises apresentadas anteriormente não sofreram modificações em sua forma, mesmo considerando que as medidas foram realizadas em dias e horários diferentes. Os mecanismos de acoplamentos se evidenciam de forma idêntica, independentemente da variação de corrente e tensão na instalação.

F.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES MEDIDOS

Regressão e correlação são duas técnicas estreitamente relacionadas que envolvem uma forma de estimação, que diferem nas técnicas de estimação aplicadas. Elas compreendem a análise de dados amostrais de forma a verificar “como duas ou mais variáveis estão relacionadas umas com as outras numa população” [60].

A análise de correlação resulta em um número que define o grau de relacionamento entre duas ou mais variáveis, enquanto que a análise de regressão tem como resultado uma equação que descreve este relacionamento.

Nesse caso, considerando que as medidas de campos elétrico e magnético foram realizadas visando identificar a severidade dos acoplamentos existentes na instalação, torna-se necessário verificar o grau de relacionamento existente entre os valores medidos, uma vez que as medidas

foram realizadas em horários distintos e os campos eletromagnéticos gerados são variáveis no tempo.

Logo, para verificar a validade deste procedimento, é necessário comparar séries de medidas realizadas nos mesmos pontos, em dias e horários diferentes, verificando o grau de relacionamento destas amostras. O resultado desta análise é um coeficiente de correlação que quantifica esse grau de relacionamento chamado r de Pearson. Se o objetivo destas medições contemplasse avaliar os valores máximos de campos eletromagnéticos na instalação seria necessário aplicar a análise de regressão aos dados medidos e verificar o grau de predição das equações determinadas.

O coeficiente de correlação r tem duas propriedades que caracterizam a relação das variáveis:

- O sinal, (+ ou -): é o mesmo do coeficiente angular da reta imaginária de ajuste dos pontos, se estivessem representados em um diagrama de dispersão;
- A magnitude: que indica quão próximos desta reta imaginária estão os pontos analisados.

O valor de r varia de $-1,00$ a $+1,00$. Quanto mais próximos os valores de r estiverem de $\pm 1,00$, mais próximos estão os pontos da reta, enquanto que r próximo de 0 sugere uma maior dispersão dos dados.

Finalmente, se r é positivo a relação entre os dados é direta (valores mais altos de uma variável correspondem a valores mais altos da outra), enquanto se r é negativo, ela é inversa (valores mais altos de uma variável correspondem a valores mais baixos da outra). Se $r \approx 0$, alguns valores altos de uma variável se relacionam com valores baixos da outra e o grau de correlação entre as variáveis é baixo. Se $r = 1$, então a correlação é dita perfeita.

F.2.1. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DOS PERFIS L_1 E L_2

Tomando por base as medidas de indução magnética para o perfil definido por L_1 , é necessário analisar o grau de correlação entre os valores, a fim de verificar, estatisticamente, se a constatação anterior tem validação estatística. A Tabela 7.3 apresenta a matriz de correlação M1-M8 x M1-M8 com os índices de correlação entre os valores medidos em relação aos valores de N.

Comparando esses valores, medidos sob diferentes condições de carga, horários e seqüência de medições, verificou-se que as curvas relativas a esses campos apresentavam as

mesmas tendências, os mesmos pontos de máximos e mínimos, confirmando a hipótese de que, independentemente do horário ou da magnitude das grandezas do sistema, os campos se comportam e se distribuem da mesma forma.

As Figuras F.6 a F.13 apresentam os gráficos de correlação de cada uma das séries de medidas M1 a M8 relacionados com os dados apresentados na Tabela 7.3.

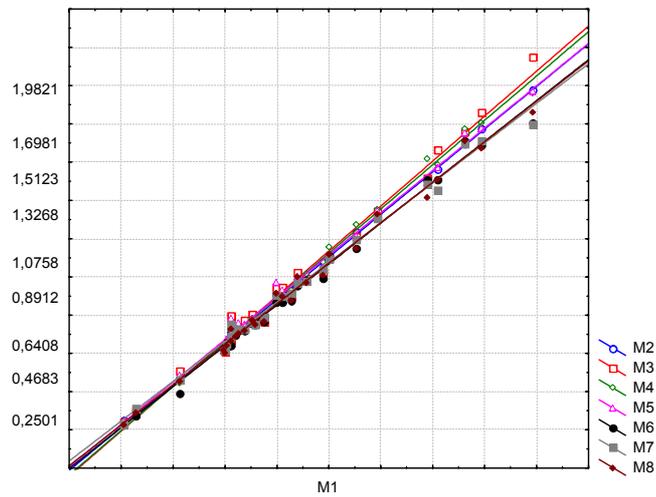


Figura F.6: Correlação de M1 com as séries M2-M8.

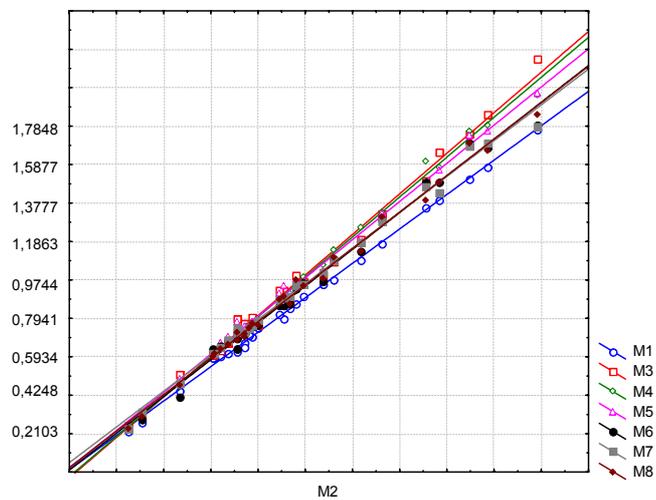


Figura F.7: Correlação de M2 com as séries M1 e M3-M8.

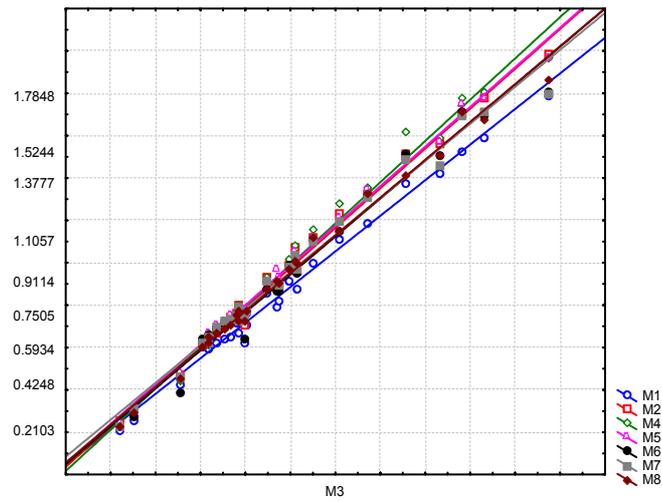


Figura F.8: Correlação de M3 com as séries M1-M2 e M4-M8.

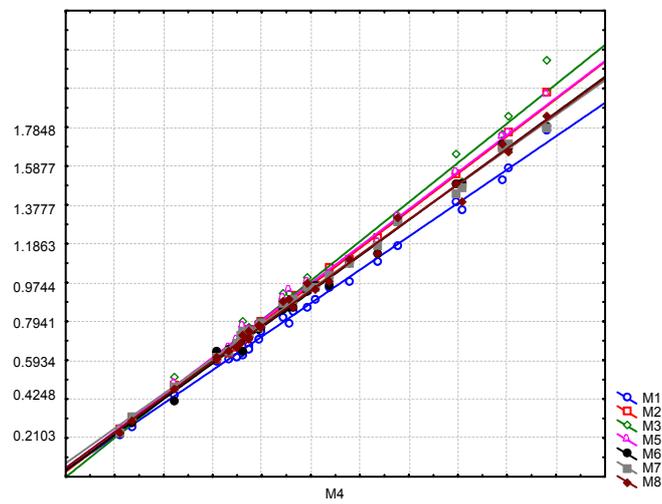


Figura F.9: Correlação de M4 com as séries M1-M3 e M5-M8.

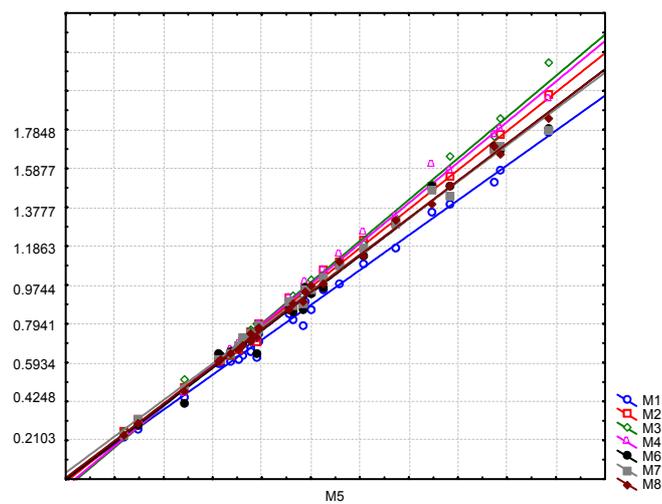


Figura F.10: Correlação de M5 com as séries M1-M4 e M6-M8.

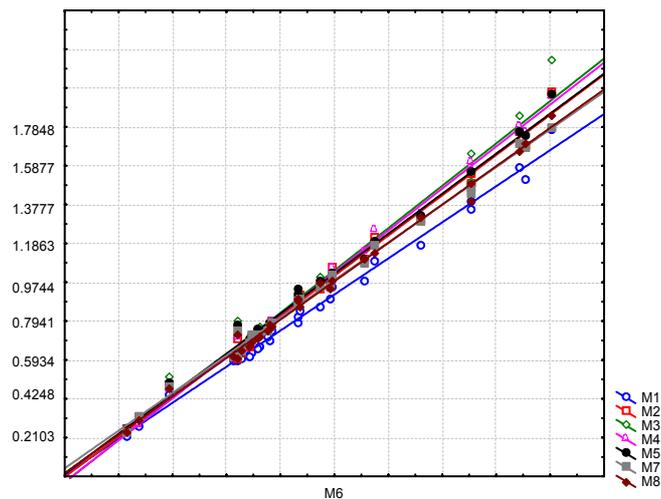


Figura F.11: Correlação de M6 com as séries M1-M5 e M7-M8.

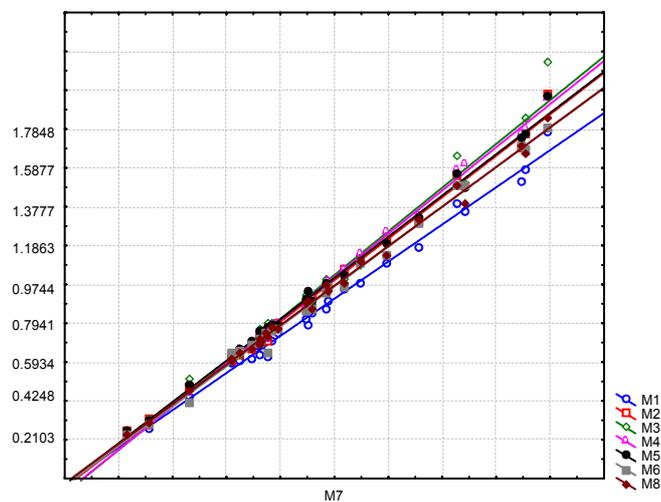


Figura F.12: Correlação de M7 com as séries M1-M6 e M8.

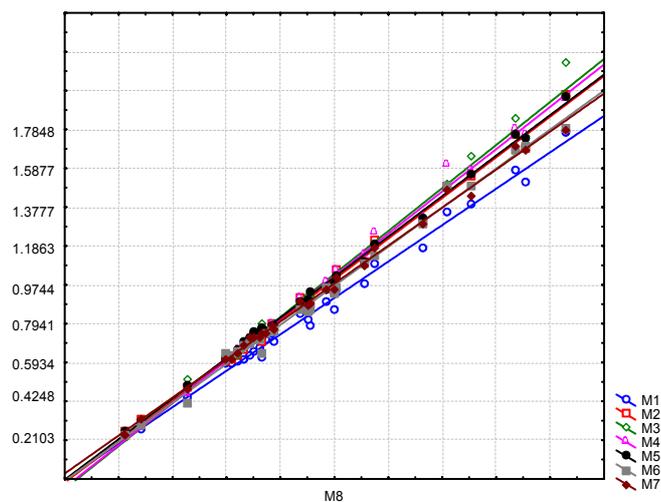


Figura F.13: Correlação de M8 com as séries M1-M7.

Logo, as medidas correspondem ao mesmo fenômeno, diferindo exclusivamente em magnitude, por efeito dos valores de corrente e tensão nos horários das medições. Portanto, no caso de múltiplas medições recomenda-se adotar como série ideal a curva que apresentar os valores máximos de campo elétrico ou indução magnética. Este procedimento está em concordância com o estabelecido na norma alemã VDE-0848 [45], que sugere que as medições de campos sejam sempre referidas aos dados nominais dos sistemas.

A Figura F.14 apresenta um gráfico com os valores máximos e mínimos observados entre as oito séries para cada uma das 28 amostras analisadas. Pode-se observar que as curvas definidas por esses pontos refletem a mesma tendência das curvas apresentadas na Figura F.3, ratificando as observações anteriores.

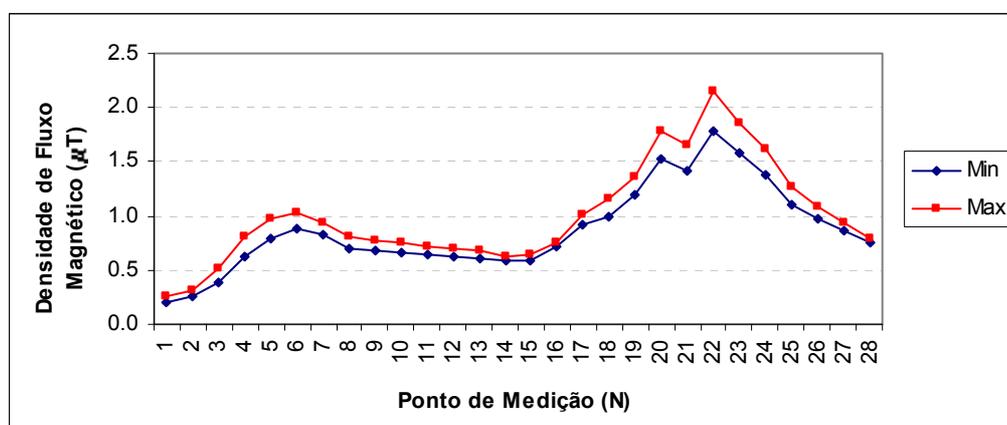


Figura F.14: Valores máximos e mínimos da densidade de fluxo magnético no perfil L₁.

F.3. CONCLUSÕES

Comparando os valores de campo medidos sob diferentes condições de carga, horários e a seqüência de medições, verificou-se que as curvas representativas do comportamento dos campos eletromagnéticos na instalação apresentavam as mesmas tendências, máximos e mínimos, confirmando a hipótese de que, independentemente do horário ou da magnitude das grandezas do sistema, esses campos se comportam e se distribuem da mesma forma na instalação.

Logo, pode-se afirmar que os acoplamentos eletromagnéticos em subestações do sistema elétrico não dependem exclusivamente da magnitude dos campos medidos, mas também da arquitetura da instalação e do arranjo dos equipamentos na planta, tanto para campo elétrico quanto para campo magnético.

Portanto, conclui-se que a metodologia proposta atende ao seu objetivo de identificar os acoplamentos eletromagnéticos na instalação, caracterizando seu ambiente eletromagnético em condição de regime permanente, independente da magnitude desses campos.

APÊNDICE G

PUBLICAÇÕES

Deste trabalho, resultaram as seguintes publicações:

- C.A. Silveira, C.A. Costa, and L.H.A. Medeiros, “Analyzing Substation Electromagnetic Environment under Steady-State Conditions – Part I,” in *Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2004 Latin America Conference (IEEE T&D 2004 Latin America)*, to be published. São Paulo, SP, Nov. 8-11, 2004.
- C.A. Silveira, G.M. Fonseca, R.R.B. Aquino, and L.H.A. Medeiros, “Analyzing Substation Electromagnetic Environment under Steady-State Conditions – Part II,” in *Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2004 Latin America Conference (IEEE T&D 2004 Latin America)*, to be published. São Paulo, SP, Nov. 8-11, 2004.
- L.H.A. Medeiros, A.D.F. Anjos, C.A. Silveira, G.M. Fonseca, A. Raizer, and R.R.B. Aquino, “Occupational Exposure in Typical 69/13,8kV Brazilian Substations,” in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, to be published. Kos Island, Greece, Oct. 4-8, 2004.
- C.A. Silveira, G.M. Fonseca, R.R.B. Aquino, and L.H.A. Medeiros, “Combined Effects of Low Frequency Couplings in Substations,” in *Proceedings of the 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2004)*, to be published. Eindhoven, The Netherlands, Sept. 6-10, 2004.
- C.A. Silveira, G.M. Fonseca, R.R.B. Aquino, L.H.A. Medeiros, F. Nyland, and A. Raizer, “Avaliação dos Acoplamentos Eletromagnéticos em Subestações 69/13,8kV,” in *Anais do V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE'2003)*, vol. 2, pp. 503-508, Aracaju, SE, Ago. 17-20, 2003.
- C.A. Silveira and L.H.A. Medeiros, “Electromagnetic Environment in Power System Substation,” in *Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2002)*, vol. 2, pp. 1053-1058, Sorrento, Italy, Sept. 9-13, 2002.
- C.A. Silveira and L.H.A. Medeiros, “Ambiente Eletromagnético em Subestações do Sistema Elétrico,” in *Anais do IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE'2001)*, pp. 347-352, Porto Alegre, RS, Ago. 12-17, 2001.

APÊNDICE H

BIOGRAFIA

Cristina de Abreu Silveira nasceu na cidade de Salvador/BA, em 27 de maio de 1959. Recebeu o grau de B.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, em janeiro de 1980 (Eletrotécnica) e julho de 1986 (Eletrônica). No período de fevereiro de 1980 a abril de 1982 trabalhou na Divisão de Estudos do Sistema Elétrico, Departamento de Planejamento do Sistema de Transmissão da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), onde desenvolveu estudos na área de transitórios e de compensação estática. De maio de 1982 a novembro de 1983 cumpriu programa de especialização e aperfeiçoamento profissional na SIEMENS AG, Erlangen, Alemanha, através do Programa de Cooperação Técnica Internacional Brasil-Alemanha, com bolsa da *Carl Duisberg Gesellschaft e.V.*, com ênfase em Compensação Estática, Harmônicos e Equipamentos em 230kV. De maio de 1984 a junho de 1996 exerceu atividades profissionais na área de planejamento, operação e automação do sistema elétrico na COELBA, tendo ingressado em março de 1994 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFBA. Em novembro de 1999 recebeu o grau de M.Sc. em Engenharia Elétrica, tendo defendido a dissertação “Compatibilidade Eletromagnética em Sistemas Elétricos de Potência: Um Diagnóstico em EMC para Subestações”. Em março de 2001 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e em agosto de 2004 recebeu o grau de D.Sc. em Engenharia Elétrica. É Bacharel em Musicoterapia pela Universidade Católica de Salvador (UCSal) desde agosto de 1997 e terapeuta certificada em Análise Bioenergética, CBT (*Certificate Bioenergetic Therapist*) pelo IIBA/IABSP (*International Institute of Bioenergetic Analysis/Instituto de Análise Bioenergética de São Paulo*), desde novembro de 2000, desenvolvendo pesquisas relacionadas aos efeitos dos ruídos urbanos na saúde mental e no comportamento dos indivíduos.

A autora atua como professora de terceiro grau no CEFET-BA desde novembro de 1980 onde leciona disciplinas da área de sistemas de potência e eletromagnetismo. Seus campos de interesse incluem automação de sistemas elétricos, sistemas de aterramento, compensação de reativos, efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos e gestão ambiental. É membro do CIGRÉ-Brasil (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*), do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e da SBA (Sociedade Brasileira de Automática).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). *Resolução Normativa N° 024 de 27/01/2000* [pdf]. Available: <http://www.aneel.gov.br>. (Last access: Aug. 2004)
- [2] ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). *Procedimentos de Rede. Módulo 2: Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações. Submódulo 2.2: Padrões de Desempenho da Rede Básica (Revisão 2)* [pdf]. Available: <http://www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.htm>. (Last access: Aug. 2004)
- [3] P.H. Pretorius, A.C. Britten, J.M. Van Coller, and J.P. Reynders, "Evaluation of the Coupling Mechanisms of Electromagnetic Disturbances Resulting from Disconnect Switching in Substations: Experimental Design and Initial Results", in *Proc. of the 1998 IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing (COMSIG '98)*, pp. 315-318, Cape Town, South Africa, Sept. 7-8, 1998.
- [4] C.A. Silveira and L.N. Conceição, "Distúrbios em Sistemas de Telecomunicações decorrentes das Distorções Harmônicas de Alta Frequência de Energia Elétrica dos Sistemas de Transmissão," in *Anais do II CPEO/CCON*, Fortaleza, CE, 1990.
- [5] C.A. Silveira, R.C. Silva, and L.N. Conceição, "Distúrbios em Sistemas de Telecomunicações decorrentes das Distorções Harmônicas de Alta Frequência de Energia Elétrica dos Sistemas de Transmissão", in *Anais do V Seminário Nacional de Telecomunicações das Empresas de Energia Elétrica (SNTEEE'90)*, Brasília, DF, 1990.
- [6] J. Saad Jr., "Recomendação de Instalação para Compatibilidade Eletromagnética dos Equipamentos de Controle e Proteção na Usina Hidroelétrica e Subestação de Xingo," Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, RJ, Relatório Técnico ACET-187/99, Mar. 1999.
- [7] _____, "Análise e Recomendações Relativas à Queima de Modems na SE69 Xingó (CHESF)," Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, RJ, Relatório Técnico (versão preliminar), 2001.
- [8] Clayton R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. New York, NY: John Wiley & Sons Ltd., 1992.
- [9] V.P. Kodali, *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements and Technologies*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996.

- [10] IRPA/INIRC (International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee), "Interim Guidelines On Limits of Exposure to 50/60Hz Electric and Magnetic Fields," *Health Physics*, vol. 58, no. 1, pp. 113-122, Jan. 1990.
- [11] G. Ala, P. Buccheri, and M. Inzerillo, "A Method to Evaluate Electric Fields Induction of Overhead Lines and Substations Equipment in Humans," in *Proc. of the 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp.161-164, Palermo, Italy, 1999.
- [12] HYDRO QUÉBEC, *Electric and Magnetic Fields and Human Health*. Bibliothèque Nationale du Québec, National Library of Canada, 4th ed., June 2000.
- [13] G.E. Guimarães, M.L. Murta, E.B. Giudice Filho, and J.O.S. Paulino, "Campos Magnéticos Gerados por Linhas de Transmissão Subterrânea e Aérea – Análise Comparativa com Vistas a Questões Ambientais," in *Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE'2003)*, CD-ROM, Uberlândia, MG, Out. 19-24, 2003.
- [14] W.K. Daily and F. Dawalibi, "Measurements and Computations of Electromagnetic Fields in Electric Power Substations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 324-333, Jan. 1994.
- [15] J. Saad Jr., M.F.B. Quintais, L.C.O. Costa, and M.V.F. Figueiredo, "Electromagnetic Compatibility in the Automation of Electrical Power System and the Activities of CEPEL," in *Proc. of the 1994 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 34-39, São Paulo, SP, Dec. 5-9, 1994.
- [16] S.T. Sobral, A.J. Sérgio, O. Tessmer, R.M. Campaner, and J.A. Oliveira, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caxias da COPEL," in *Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XIV SNPTEE)*, FL/GSU/23, Belém, PA, 1997.
- [17] J.R. Daconti and J. Saad Jr., "Compatibilidade Eletromagnética em Usinas e Subestações," in *Anais do VIII Encuentro Regional Latinoamericano de la Cigré (VIII ERLAC)*, CE 36-01, Ciudad del Este, Paraguay, 1999.
- [18] C.A. Silveira, "Compatibilidade Eletromagnética em Sistemas Elétricos de Potência: Um Diagnóstico em EMC para Subestações," Dissertação de Mestrado, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Nov. 1999.
- [19] A. Raizer, "Tópicos em Compatibilidade Eletromagnética – Apostila de Mini-Curso," *III Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, São Paulo, SP, 1998.

- [20] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, *Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields—Background Paper, OTA-BP-E-53*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, May 1989.
- [21] J.R. Daconti, “Estudo das Interferências Elétricas entre a LT 230kV Teresina - Piripiri e o Pré-Metrô de Teresina,” Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), Recife, PE, Relatório Técnico RT-06-02-06/89, Jun. 1989.
- [22] D.M. Correia, “Interferência de Linhas de Transmissão sobre Tubulações por Acoplamentos Indutivo e Condutivo,” Dissertação de Mestrado, Dept. Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Fev. 1993.
- [23] J.R. Daconti, D.O.C. Brasil, and D.M. Correia, “Electromagnetic Compatibility Between Electric Power Systems and Other Installations,” in *Proc. of the 1994 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp.70-84, São Paulo, SP, Dez. 5-9, 1994.
- [24] M.M. Saied, “The Capacitive Coupling Between EHV Lines and Nearby Pipelines,” in *Proc. of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2002 Latin America Conference (IEEE T&D 2002 Latin America)*, CD-ROM, São Paulo, SP, Mar. 18-22, 2002.
- [25] C. Christopoulos, *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.
- [26] C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modelling Method - TLM*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.
- [27] R. Perez, *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. San Diego, CA: Academic Press, 1995.
- [28] CIGRÉ WG36.04 (CIGRÉ Working Group 36.04), *Guide on EMC in Power Plants and Substations*. Paris: CIGRÉ, 1997.
- [29] J.L. Silveira, “Modelagem Numérica 3D de Problemas de Compatibilidade Eletromagnética Utilizando o Método TLM-TD,” Tese de Doutorado, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.
- [30] SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica). *Acervo Técnico* [Online]. Available: <http://www.xviisnp tee.com.br>. (Last access: Aug. 2004).
- [31] S. Patel, J. Hildreth, and L. Garrett, “Protection of Electronic Equipment in a Substation Environment,” in *Proc. of the 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 207-211, Chicago, IL, July 21-25, 2002.

- [32] F. Wang and M.H.J. Bollen, "Evaluating the Effect of Measured Power Disturbances on Protective Relay Operation," in *Proc. of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT2000)*, pp.232-237, London, Apr. 4-7, 2000.
- [33] *American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)*, ANSI Standard C63.14-1998 (Revision of ANSI Standard C63.14-1992).
- [34] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Standard 1159, 1995.
- [35] *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 161: Electromagnetic Compatibility*, IEC Standard 60050-161, 1990.
- [36] P.A. Chatterton and M.A. Houlden, *EMC Electromagnetic Theory to Practical Design*. New York, NY: John Wiley & Sons Ltd., 1991.
- [37] M. Mardiguian, "Combined Effects of Several, Simultaneous, EMI Couplings," in *Proc. of the 2000 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, pp. 181-184, Washington, DC, Aug. 21-25, 2000.
- [38] S.T. Sobral, S.L. Lamy, D.S. Rezende, and J.E.D. Olesko, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética em Subestações da COPEL," in *Anais do XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XIII SNPTEE)*, FL/GSU/12, Camboriú, SC, Out. 1995.
- [39] T. Williams, *EMC for Product Designers*. Great Britain: Newnes British Library, 2nd ed., 1996.
- [40] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York, NY: IEEE Press Series, 2000.
- [41] *HI-3604 ELF Survey Meter User's Manual (Manual # 600043-B)*, Holaday Industries Inc., Eden Prairie, MN, 1997.
- [42] *EFA-200/-300 EM Field Analyzer BN 2245/20, 30, Series A. Operating Manual*, Ed. 03/02.01 A., NARDA Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, Germany, 2002.
- [43] Ralf Müller and Hans-Joachim Förster, "Standard Measurements: Electric Fields due to High Voltage Equipment," *ETZ – Elektrotechnik + Automation*, May 1997. Available: <http://www.narda-sts.com/en/produktliteratur/fachartikel.htm>. (Last access: Aug. 2004).
- [44] *Measurement: Products Catalog 2000*, Tektronix Inc., Portland, OR, 2000.

- [45] F. Placidet. *Emission Protection Measurement on Transformer Stations* [pdf]. Available: <http://www.narda-sts.com/en/produktliteratur/fachartikel.htm>. (Last access: Aug. 2004)
- [46] H.W. Denny, *Grounding for the Control of EMI*. Gainesville, VA: Don White Consultants Inc., 1983.
- [47] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standard 80, 2000 (Revision of IEEE Standard 80, 1986).
- [48] *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*, IEEE Standard 1100, 1999 (Revision of IEEE Standard 1100, 1992).
- [49] *IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment*, IEEE Standard 1346, 1998.
- [50] *IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances*, IEEE Standard 1250, 1995.
- [51] R.C. Dugan, M.F. Mcgranaghan, and H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*. New York, NY: McGraw-Hill, 1996.
- [52] J. Sarmiento *et al.*, “Relatórios de Inspeção, Ensaios, Análises, Conclusões e Recomendações para Perturbações em Sistemas de Instrumentação e Controle - Estudos de Transitórios,” TECNOR, Salvador, BA, Relatórios Técnicos Diversos, 1996-1998.
- [53] P.L. Arnera, M.B. Barbieri, and D.A. Esteban, “Campos Electricos y Magneticos em Electroductos, Medicion y Calculo. Comparacion de Disenos de Lineas,” in *Anais do VIII Encontro Regional Latinoamericano de la Cigré (VIII ERLAC)*, CE 36-07, Ciudad del Este, Paraguay, 1999.
- [54] P.C.O. Teixeira, “Avaliação dos Níveis de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão da CTEEP,” in *Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE'2001)*, CD-ROM, Campinas, SP, Out. 21-26, 2001.
- [55] T. Ando, K. Naito, Y. Mizuno, M. Moreno, G. Aponte, H. Cadavid, and M. Castro, “Power Frequency Electric and Magnetic Fields Measurements in Japan and Latin-American Countries,” in *Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2002)*, vol. 1, pp. 365-369, Sorrento, Italy, Sept. 9-13, 2002.
- [56] J.P.A. Bastos, *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 1996.
- [57] R. Morrison, *Grounding and Shielding Techniques*. New York, NY: John Wiley and Sons Inc., 4th ed., 1998.

- [58] D. Tandler, “Measurement of Low-Frequency Electrical and Magnetical Fields”, presented at the EMF Congress, Mar. 29, 1995. Available: <http://www.narda-sts.com/en/produktliteratur/fachartikel.htm>. (Last access: Aug. 2004).
- [59] D. Tandler. *Three-Dimensional Analysis of LF and HF Electric and Magnetic Fields* [pdf]. Available: <http://www.narda-sts.com/en/produktliteratur/fachartikel.htm>. (Last access: Aug. 2004).
- [60] M.R. Spiegel, *Probabilidade e Estatística*. Makron Books, 1977.
- [61] C.A. Silveira and V.L.C. Pinheiro, “Automação de Pequenas Subestações do Sistema Elétrico da COELBA,” in *Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE'93)*, RE/GOP/19, Recife, PE, Out. 1993.