

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO SCHEIBLER

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO EM SUBESTAÇÃO DE
ALTA TENSÃO**

Porto Alegre
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO SCHEIBLER

**CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO EM SUBESTAÇÃO DE
ALTA TENSÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO SCHEIBLER

**CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO EM SUBESTAÇÃO DE
ALTA TENSÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Felipe Treviso, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais pelos ensinamentos dados pelo exemplo e em especial a minha esposa Ingrid pela dedicação e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Aos pais pelos esforços incansáveis durante anos para proporcionarem a melhor formação social e cultural a todos os filhos. Pelos seus ensinamentos irreplicáveis em qualquer escola por meio do exemplo de dedicação e trabalho.

A toda a família pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

À esposa pelo afeto, carinho e amor essenciais a continuidade de minha esperança e fé no alcance de nossos objetivos.

Aos colegas e amigos pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À empresa Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D), em especial ao Alexandre de Oliveira Pires pelo apoio na realização de horários diferenciados de trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por proporcionar um ambiente que desperta a colaboração entre os colegas e o trabalho em equipe.

RESUMO

Este projeto apresenta o cálculo da distribuição do campo elétrico em subestação de alta tensão de forma simplificada e eficaz. São expostas as motivações para a realização deste trabalho com relação ao impacto dos campos elétricos nos seres humanos e os seus efeitos biológicos, com relação ao limite de exposição a estes campos definidos na legislação vigente e com relação a sua influência nos projetos de subestações. Para o embasamento teórico do cálculo do campo elétrico são apresentados os conceitos físicos necessários como a lei de Coulomb, o princípio da superposição, as equações de Maxwell e a lei de Gauss. Com base nas pesquisas realizadas foi definida a escolha do Método das Cargas Equivalentes (MCE) para o cálculo do campo elétrico. A partir do método escolhido foi elaborado um algoritmo para o cálculo de forma a simplificar e facilitar a sua execução e elaboração de diferentes modelagens. O algoritmo foi validado pela aplicação em duas instalações com resultados conhecidos. Foram realizados os cálculos do campo elétrico para duas subestações de alta tensão, utilizadas diferentes modelagens e comparados os resultados com dados reais de medições realizadas nos locais. Por fim estão apresentadas as comparações entre os valores dos cálculos e os valores medidos e suas demais considerações. Nas conclusões destaca-se que este método pode melhorar o atendimento aos níveis máximos de campo elétrico e o processo de elaboração ou adequação dos projetos de subestações.

Palavras-chaves: Campo Elétrico. Subestação de Alta Tensão. Método das Cargas Equivalentes.

ABSTRACT

This project presents the calculation of the electric field distribution in a high voltage substation in a simplified and efficient way. The impact of electric fields on humans and their biological effects, the limit of exposure to these fields defined in current legislation and their influence on substation projects will be addressed in the motivations to carry out this work. The necessary physical concepts such as Coulomb's law, the superposition principle, Maxwell's equations and Gauss's law are presented for the theoretical basis of the calculation of the electric field. Based on the researches, the Equivalent Loads Method (MCE) was chosen for the calculation of the electric field. From the chosen method is presented the algorithm elaborated for the calculation in order to simplify and facilitate its execution and elaboration of different models. The algorithm is validated based on two known examples of results from two different references. The electric field calculations are performed for two high voltage substations and the results are compared with actual measurements data at the sites. Finally, the results obtained regarding the approximation of the calculations to the measured values are presented and what this method can improve in the process of attending to the maximum levels of the electric field and in the process of elaboration or adaptation of the substation projects.

Keywords: Electric Field. High Voltage Substation. Method of Equivalent Loads.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	EMBASAMENTO TEÓRICO	16
2.1.	EFEITOS BIOLÓGICOS	16
2.2.	LEGISLAÇÃO, NORMAS E NÍVEIS DE REFERÊNCIA	19
2.3.	COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	21
2.3.1.	ACOPLAMENTO CAPACITIVO	22
2.4.	SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO	23
2.4.1.	INFLUÊNCIA DO CAMPO ELÉTRICO NO PROJETO DE SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO ..	25
3.	CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO	27
3.1.	A LEI DE COULOMB	27
3.2.	O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO	28
3.3.	O CAMPO ELÉTRICO	29
3.4.	AS LINHAS DE FORÇA DO CAMPO ELÉTRICO	30
3.5.	O POTENCIAL ELÉTRICO	30
3.6.	LEI DE GAUSS	32
4.	MÉTODOS DE CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO	34
4.1.	MÉTODO DAS CARGAS EQUIVALENTES (MCE)	35
4.1.1.	DETERMINAÇÃO CARGAS EQUIVALENTES	36
4.1.2.	CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO DAS CARGAS EQUIVALENTES	39
5.	CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO PELO MCE	41
5.1.	VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO	42
6.	PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO EM SUBESTAÇÃO DE AT	44
6.1.	PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO DA SUBESTAÇÃO PAL10	45

6.1.1.	MODELAGEM I.....	48
6.1.2.	MODELAGEM II	49
6.1.3.	MODELAGEM III	51
6.1.4.	CONCLUSÕES DA MODELAGEM I	54
6.1.5.	CONCLUSÕES DA MODELAGEM II.....	54
6.1.6.	CONCLUSÕES DA MODELAGEM III.....	55
6.2.	PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO DA SUBESTAÇÃO PAL9.....	57
6.3.	CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS LIMITES EXCEDIDOS.	66
7.	RESULTADOS DO ALGORITMO DE CÁLCULO.....	68
8.	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE – ALGORITMOS DE CÁLCULO NO MATLAB	75
	ANEXO – RELATÓRIO DAS MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito de acoplamento capacitivo em subestações de AT.	23
Figura 2 – Ilustração de uma subestação de AT.	24
Figura 3 – Modelo simplificado da balança de torção de Coulomb.	27
Figura 4 – Aspecto do campo elétrico para uma carga pontual positiva (a), para um dipolo com cargas iguais (b) e para um fio cilíndrico uniformemente carregado (c).	30
Figura 5 – Ilustração do método das imagens de uma carga pontual e plano equipotencial (a) e da configuração da imagem e linhas de campo (b).	36
Figura 6 – Ilustração dos componentes para o cálculo dos coeficientes de potencial.	38
Figura 7 – Representação do algoritmo de cálculo do campo elétrico.	41
Figura 8 – Primeira comparação dos cálculos para validação.	42
Figura 9 – Segunda comparação dos cálculos para validação.	43
Figura 10 – Pontos de medição da subestação PAL10.	45
Figura 11 – Planta baixa subestação PAL10.	46
Figura 12 – Planta em corte da subestação PAL10.	47
Figura 13 – Perfil do campo elétrico nos pontos 7 e 8 considerando três eletrodos.	48
Figura 14 – Perfil do campo elétrico nos pontos 11 e 16 considerando três eletrodos.	49
Figura 15 – Perfil do campo elétrico nos pontos 7 e 8 considerando seis eletrodos.	50
Figura 16 – Perfil do campo elétrico nos pontos 11 e 16 considerando seis eletrodos.	50
Figura 17 – Perfil do campo elétrico do barramento principal.	51
Figura 18 – Perfil do campo elétrico no ponto 7 com seis eletrodos e o barramento principal.	52
Figura 19 – Perfil do campo elétrico no ponto 8 com seis eletrodos e o barramento principal.	52

Figura 20 – Perfil do campo elétrico no ponto 11 com seis eletrodos e o barramento principal.	53
Figura 21 – Perfil do campo elétrico no ponto 16 com seis eletrodos e o barramento principal.	53
Figura 22 – Identificação do ponto máximo teórico do campo elétrico na PAL10.....	57
Figura 23 – Pontos de medição da subestação PAL9.....	58
Figura 24 – Planta baixa da subestação PAL9.	59
Figura 25 – Planta em corte da subestação PAL9.	60
Figura 26 – Perfil do campo elétrico do barramento principal.....	61
Figura 27 – Perfil do campo elétrico do barramento principal modificado.....	61
Figura 28 – Perfil do campo elétrico no ponto 25 com seis eletrodos e o barramento modificado.....	62
Figura 29 – Perfil do campo elétrico no ponto 26 com seis eletrodos e o barramento principal.	62
Figura 30 – Perfil do campo elétrico no ponto 27 com seis eletrodos e o barramento principal.	63
Figura 31 – Perfil do campo elétrico no ponto 40 com seis eletrodos e o barramento principal.	63
Figura 32 – Identificação do ponto máximo teórico do campo elétrico na PAL9.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de referência para exposição a campos elétricos.....	20
Tabela 2 – Valores e localização dos pontos de medição da subestação PAL10.....	46
Tabela 3 – Comparação entre medição e cálculo da subestação PAL10.....	54
Tabela 4 – Valores máximos calculados do campo elétrico na subestação PAL10.....	56
Tabela 5 – Valores e localização dos pontos de medição da subestação PAL9.....	59
Tabela 6 – Comparação entre medição e cálculo da subestação PAL9.....	64
Tabela 7 – Valores máximos calculados do campo elétrico na subestação PAL9.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CEEE-D: Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica

CEEE: Companhia Estadual de Energia Elétrica

ICNIRP: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

RNI: Radiações Não Ionizantes

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ELF: *Extremely Low Frequency*

PIB: Produto Interno Bruto

SEP: Sistema Elétrico de Potência

AT: Alta Tensão

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

OMS: Organização Mundial da Saúde

CEM: Campos Eletromagnéticos

IARC: *International Agency for Research on Cancer*

NIEHS: *National Institute of Environmental Health Sciences*

EM: *Electric and Magnetic Fields*

RAPID: *Research and Public Information Dissemination*

NR: Norma Regulamentadora

STF: Superior Tribunal Federal

EMC: *Electromagnetic Compatibility*

EMI: *Electromagnetic Interference*

LT: Linha de Transmissão

SI: Sistema Internacional de Unidades

MCE: Método das Cargas Equivalentes

MEF: Método dos Elementos Finitos

MSC: Método da Simulação de Cargas

CIGRE: *International Council on Large Electric Systems*

PAL: Porto Alegre

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade está fortemente condicionado a sua capacidade de geração e distribuição da energia elétrica. Mesmo diante da atual situação econômica com projeções negativas do Produto Interno Bruto (PIB), são mantidos os investimentos e projeções de crescimento da matriz de geração de energia elétrica nacional [1].

Devido ao constante desenvolvimento do setor elétrico surgem consequências como o aumento de linhas de transmissão, unidades geradoras e subestações de energia, assim como a elevação das tensões e correntes dos sistemas com o intuito de atender maiores potências e reduzir as perdas. As elevações das tensões nestes sistemas resultam no aumento do campo elétrico e conseqüentemente maior exposição da população e trabalhadores e na menor eficiência do sistema.

Com a evolução da capacidade de fornecimento de energia espera-se a conquista de uma melhor qualidade de vida da sociedade e isto inclui a integridade do meio ambiente e a saúde da população. Os sistemas devem evoluir respeitando os limites de segurança estabelecidos pelas diversas normas do setor mostrando uma capacidade de operação sustentável.

Em 23 de março de 2010, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa N° 398 [2], que regulamenta a exposição humana a campos elétricos e magnéticos gerados pelos sistemas elétricos. Nesse documento, além da definição de limites de exposição, é estabelecido que todos os agentes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) devem verificar a conformidade de suas instalações. A resolução normativa da ANEEL foi baseada em estudos realizados pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP*) que publicou um dos documentos mais referenciados na área com as diretrizes de orientação para os limites de exposição a campos elétricos e magnéticos variáveis ao longo do tempo para frequências de 1Hz a 100kHz [3].

A distribuição do campo elétrico em subestações de alta tensão é mais intensa e os trabalhadores do local estão mais vulneráveis devido às distâncias de exposição serem menores, se comparadas com as distâncias das linhas de transmissão de mesmo potencial elétrico, bem como devido ao período de exposição ser mais prolongado do que a exposição da população de uma forma geral. Com isso os trabalhadores destes locais estão mais suscetíveis a estes campos [4].

As subestações de Alta Tensão (AT) são grandes fontes de emissão eletromagnética e o conhecimento do perfil de seu campo elétrico em fase de projeto é uma ótima ferramenta para a sua execução. Devido ao conhecimento prévio do campo elétrico e levando em consideração as premissas da compatibilidade eletromagnética, é possível reduzir os custos de possíveis adequações posteriores da instalação, e ainda levando em consideração as distâncias de isolamento e níveis de campo, é possível a redução da área de instalação da subestação, diminuindo um dos fatores mais importantes no custo da subestação que é a aquisição do terreno.

As subestações de AT têm um potencial de apresentarem os maiores índices de campo elétrico, pois trabalham com barramentos de tensões elevadas, acima de 138kV, a distâncias reduzidas do solo, comumente entre cinco e oito metros de distância em relação ao solo, e comportam componentes com grandes massas metálicas como seccionadoras e barramentos. Essas características elegem as subestações como pontos críticos quando se trata de níveis de campos elétricos próximos ao nível do solo.

Estão descritos no trabalho os embasamentos teóricos da física do eletromagnetismo necessários ao desenvolvimento do método de cálculo que será apresentado posteriormente. Resumidamente será descrito que com o uso da Lei de Coulomb e do Princípio da Superposição é possível a obtenção do campo elétrico a partir de uma distribuição de cargas, e, a partir das Equações de Maxwell e da Lei de Gauss é possível a obtenção do campo elétrico a partir do potencial elétrico.

Será desenvolvida neste trabalho uma metodologia de cálculo para obter a distribuição de campos elétricos em pátios de subestações de AT para definir as contribuições dos componentes do sistema e dos acoplamentos elétricos da instalação, sendo possível estimar um perfil do campo elétrico dos pontos calculados da instalação. O Método das Cargas Equivalente (MCE) foi escolhido devido as suas características como o método a ser utilizado.

Para a execução do método, visto que será necessária a obtenção do valor do campo em diversos pontos, foi elaborado um algoritmo de cálculo do software MATLAB®. O algoritmo foi elaborado com base no MCE e foi validado realizando comparações com cálculos de duas referências que utilizam três diferentes métodos.

É realizado o cálculo com o uso do algoritmo elaborado para duas subestações reais. Para a correta obtenção dos valores são descritas e utilizadas diferentes técnicas de modelagem. Por fim, os resultados teóricos são comparados com dados de medição de campo elétrico realizados previamente nestes locais.

O objetivo final é proporcionar um método que resulte em uma estimativa adequada do perfil do campo elétrico de forma prática e direta em subestações de alta tensão, sendo possível um projeto eficiente dessas instalações e ainda assegurar o respeito aos níveis de campos elétricos estipulados.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1. EFEITOS BIOLÓGICOS

Os campos elétricos de subestações de alta tensão no Brasil são, em sua maioria, oriundos de sistema que operam em 60 Hz, estes são conhecidos como Campos de Baixa Frequência – *Extremely Low Frequency (ELF) fields* – são campos com frequências de 30 à 300 Hz segundo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. Além disso, esses se enquadram como Radiações Não Ionizantes (RNI), pois não tem energia suficiente para quebrar as ligações que mantêm as moléculas ligadas em células e, portanto, não podem produzir ionização.

Correntes elétricas existem naturalmente no corpo humano e são partes essenciais das funções corporais naturais. Todos os nervos enviam sinais via a transmissão de impulsos elétricos. A maioria das reações bioquímicas, desde aquelas associadas com a digestão até as envolvidas com a atividade cerebral, envolve processos elétricos [5]. Os campos elétricos de baixas frequências influenciam na distribuição das cargas elétricas na superfície dos tecidos condutores e causam um fluxo de corrente elétrica não natural no corpo. A exposição ambiental prolongada, mesmo que não muito intensa, pode constituir uma ameaça se dela resultar fadiga. Em seres humanos um efeito adverso à saúde resulta de um efeito biológico que cause um agravo detectável na saúde ou no bem estar dos indivíduos expostos.

Um estudo pioneiro exatamente com relação às influências exclusivamente de campos elétricos em trabalhadores de manutenção de sistemas de 500 e 750kV foi relatado na Rússia em 1972 [6]. Contudo esta publicação teve pouca repercussão na época, pois se tratavam de riscos ocupacionais relativos a uma pequena parcela da população e com métodos não muito precisos, mas a preocupação com esse assunto teve aumento significativo após a publicação, em 1979 do artigo de Nancy Wertheimer e Ed Leeper [7], no qual descrevem um estudo epidemiológico associado a maior incidência de câncer infantil em bairros próximos às linhas de transmissão na cidade de Denver do estado do Colorado. Este estudo apesar de tratar os campos eletromagnéticos de uma forma geral envolvendo tanto campos elétricos quanto magnéticos teve função importante como catalisador para a intensificação dos estudos na área.

Atualmente existem muitos estudos científicos a respeito dos possíveis efeitos nocivos dos campos ELF à saúde dos seres humanos. Com isso evidencia-se a preocupação da

população e da comunidade científica com os limites de exposição humana a campos elétricos originados das instalações elétricas de alta tensão.

Como forma de sintetizar as diversas análises dessa área a ICNIRP publicou em 2010 o documento - *Guidelines For Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz – 100 KHz)* [3], e suas principais conclusões quanto a literatura científica atual estão resumidas a seguir:

- 1) Com relação ao neurocomportamento, ou seja, as diversas possíveis reações nervosas de nosso corpo destacam-se a percepção da carga elétrica superficial, a estimulação direta dos nervos e do tecido muscular e a indução de fosfenos na retina (visão periférica com brilho intermitente), como efeitos adversos devidamente comprovados por meio de testes conduzidos com técnicas de amostragem consolidadas.
- 2) Conforme o documento existe evidência de que as funções cerebrais como o processamento e a coordenação motora podem ser afetadas de forma temporária por campos elétricos induzidos, contudo quanto a efeitos neurocomportamentais como a cognição, o sono e a disposição geral dos voluntários expostos não existem evidências suficientes nos estudos realizados que possam indicar influências, não sendo possível assim definir uma base para limites de exposição humana nesses casos.
- 3) Ligados ao campo da psiquiatria, existem alegações de hipersensibilidade a Campos Eletromagnéticos (CEM), mas as evidências de estudos duplo cegos sugerem que os sintomas identificados não estão relacionados com a exposição a CEM conforme citação da Organização Mundial da Saúde (OMS) em Rubin et al. 2005¹ e OMS 2007a² apud ICNIRP [3]. Indícios sem comprovações claras indicam que a exposição a campos ELF pode causar sintomas depressivos ou suicídio em OMS 2007a² apud ICNIRP [3].
- 4) Com relação a doenças neurodegenerativas e doenças cardiovasculares, os estudos são inconclusivos quanto à existência de relação com a exposição a campo ELF.
- 5) Quanto a reprodução e o desenvolvimento humano indicam que a exposição de mamíferos a campos ELF não resulta em deformações externas, viscerais ou esqueléticas graves numa exposição em campos de até 20 mT em Juutilainen 2003, 2005 e OMS 2007a² apud ICNIRP [3].

¹ – Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 67:224–232; 2005.

² – OMS 2007a, *The world health report 2007 - A safer future: global public health security in the 21st century.*

³ – Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Protect Dosim* 106:385–390; 2003.

- 6) Referente ao câncer, os estudos dos efeitos da exposição a campos ELF não demonstraram qualquer indução de genotoxicidade em campos abaixo de 50 mT em Crumpton and Collins 2004; OMS 2007a⁴ apud ICNIRP [3]. Ainda que existam alguns estudos com evidências epidemiológicas de uma associação entre a leucemia infantil e a exposição prolongada a campos magnéticos à frequência industrial, como contraponto os dados relativos a testes de câncer em animais, com vários estudos em larga escala e de longo prazo em roedores não demonstraram qualquer aumento consistente em nenhum tipo de câncer. Assim como o teste com células, em sua maioria, têm resultados de mesmas conclusões que os realizados em animais.

Resumidamente, a descrição do estudo da ICNIRP conclui que todos os efeitos agudos devidamente comprovados possuem limites abaixo dos quais não ocorrem e podem ser evitados, se forem respeitadas as limitações básicas sobre os campos elétricos induzidos no corpo. A prevenção destes efeitos se dará através da definição de níveis de referência. Já para os efeitos crônicos como o caso do câncer, o setor da OMS para a investigação do câncer, a IARC (*International Agency for Research on Cancer*) avaliou os campos ELF em 2002 e classificou-os na categoria 2 B, o que significa “possivelmente cancerígenos para os seres humanos”. A base desta definição foram os estudos epidemiológicos sobre a leucemia infantil. Mesmo assim é descrito como opinião da ICNIRP [3] que as evidências científicas atualmente existentes são demasiadamente fracas para poderem constituir um elemento de fundamentação sobre a exposição. Foi salientado ainda que a relação epidemiológica dos estudos entre campos ELF e o câncer é não causal, pois a redução da exposição não proporciona qualquer benefício para a saúde.

Os estudos do ICNIRP são os mais completos e atuais encontrados, além disso, corroboram com eles as publicações realizadas pelo *National Institute of Environmental Health Sciences* (NIEHS) [8], e de publicações da OMS [9] [10] [11].

Em comum acordo com todos os estudos expostos acima, está a indicação das entidades à observância dos limites de exposição como a forma de controlar os riscos das exposições que possam ser prejudiciais à saúde humana. Com isso, serão descritos a seguir os métodos e as bases utilizadas para a definição da dosimetria máxima aceitável do campo elétrico.

⁴ – Crumpton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair* (Amst) 3:1385–1387; 2004.

2.2. LEGISLAÇÃO, NORMAS E NÍVEIS DE REFERÊNCIA

Foi publicada em 05 de Maio de 2009 a Lei Nº 11.934, que estabelece limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos [12], posteriormente pela ANEEL em 23 de março de 2010 foi publicada a resolução normativa Nº 398 [2], que regulamenta a exposição humana a campos elétricos e magnéticos gerados pelos sistemas elétricos e definem competências dos operadores do SEP.

E como consta na Lei Nº 11.934 em seu artigo 4º e seu parágrafo único:

Art. 4º Para garantir a proteção da saúde e do meio ambiente em todo o território brasileiro, serão adotados os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos gerados por estações transmissoras de radiocomunicação, por terminais de usuário e por sistemas de energia elétrica que operam na faixa até 300 GHz.

Parágrafo único. Enquanto não forem estabelecidas novas recomendações pela Organização Mundial de Saúde, serão adotados os limites da Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante - ICNIRP, recomendados pela Organização Mundial de Saúde.

Para a definição de uma dosimetria máxima aceitável e de níveis de referência para exposição são utilizados como base os modelos mais atuais e específicos indicados pelo ICNIRP [3]. Esses modelos são utilizados também para as estimativas de correntes induzidas no corpo humano e para o cálculo dos campos elétricos induzidos por campos eletromagnéticos variáveis ao longo do tempo.

Os níveis de referência apresentam uma orientação separada para a exposição ocupacional e para a exposição do grande público. A exposição ocupacional refere-se a adultos expostos nos seus locais de trabalho a CEM, normalmente sob condições conhecidas, e em resultado da execução das suas tarefas e funções profissionais habituais. A expressão “população em geral”, refere-se às pessoas de todas as idades e com um estado de saúde variado que pode aumentar a variabilidade das susceptibilidades individuais. De forma geral os membros do público não estão cientes da sua exposição a CEM.

Estas considerações salientam a necessidade da adoção de limitações à exposição mais exigentes para o “público em geral” do que para os trabalhadores em ambiente ocupacional.

Abaixo são apresentados os níveis de referência atuais estabelecidos pelo ICNIRP, que são os mesmos estabelecidos pela resolução nº 398 da ANEEL. Para este trabalho destacam-se somente os valores do campo elétrico para a frequência de 60 Hz.

Tabela 1 – Níveis de referência para exposição a campos elétricos.

Valores Limites para 60 Hz	Campo Elétrico [kV/m]
Ocupacional	8,333
Público em Geral	4,167

Esses valores foram definidos de forma a garantir a adequação das instalações a restrições básicas de segurança, como o aterramento das estruturas. Caso uma instalação apresente, por meio de cálculo ou medições, valores abaixo dos limites de exposição, esta instalação comprova que atende as Restrições Básicas definidas em pela ICNIRP [3].

Caso os valores sejam superiores aos limites a entidade responsável poderá apresentar a ANEEL o Relatório de Conformidade comprovando o atendimento as Restrições Básicas. Caso o resultado do Relatório de Conformidade demonstre o não atendimento às Restrições Básicas, deve ser apresentado um Plano de Adequação das instalações [2].

Os relatórios que devem ser enviados por todas as entidades à ANEEL podem ser obtidos em sua página na internet [13]. Existem diversas instalações que não atendem aos limites máximos estabelecidos, e devido a isto as empresas responsáveis por esses locais tem se utilizado da possibilidade de envio dos Relatórios de Conformidade, fato legalmente previsto [2].

Além destes documentos, foi elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a Norma 25.415 de 19 de Julho de 2016 que estabelece: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz [14]. Nessa norma, também é utilizado como referência os estudos realizados pelo ICNIRP [3], contudo são definidos somente limites de exposição para o grande público, os limites ocupacionais não são definidos e nem mesmo mencionados. Na versão anterior da ABNT, NBR 15415:2006, ainda constava que os limites ocupacionais estariam estabelecidos na Norma Regulamentadora nº 15 do Ministério Trabalho e Emprego, contudo nessa norma que se refere as Atividades e Operações Insalubres, em seu Anexo nº 7 Radiações Não Ionizantes, é afirmado que os campos ELF não são considerados como RNI, especificamente dizem que para os efeitos da norma, são radiações não-ionizantes as microondas, ultravioletas e laser.

Com isso há uma legislação que define os limites ocupacionais de exposição a campos elétricos, contudo não existe a normatização devida. A definição desse limites, por se tratar de um tema complexo, tem gerado ações judiciais cobrando um posicionamento jurídico quanto à validade e aplicação desses estudos a casos de possíveis danos de campo ELF a sociedade e a trabalhadores. Devido a isso, se criou na sociedade a expectativa em se utilizar o princípio

da precaução para a definição de limites mais criteriosos. O conteúdo jurídico do princípio da precaução remete à “Carta Mundial da Natureza”, de 1982, cujo princípio, estabeleceu a necessidade de os Estados controlarem as atividades potencialmente danosas ao meio ambiente, ainda que seus efeitos não sejam completamente conhecidos. Esse princípio foi posteriormente incluído na Declaração do Rio de Janeiro sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Eco-92). Além desses documentos, o princípio da precaução estaria contido na Constituição no Art. 225 [15].

Existe um forte embasamento que defende que o princípio da precaução seria resultante do exercício ativo da dúvida, que se realizaria frente ao perigo de dano grave e irreversível e diante da falta de certeza científica ou da ausência de informação, e ainda que as decisões judiciais, especialmente nos países que compõe a União Européia, cuja tendência os tribunais nacionais estariam a acompanhar, seriam orientados pela precaução na defesa da integridade do meio ambiente e na proteção à saúde.

Conforme Informativo Nº 829 do Superior Tribunal Federal (STF) [15]. O plenário assentou não haver dúvida quanto à licitude daqueles que atendem os limites estabelecidos pela Lei 11.934/2009 regulamentada pela ANEEL em sua Resolução Normativa 398/2010. E definem que a Lei 11.934/2009, ao estabelecer os limites e os procedimentos referentes à exposição por parte do público em geral e dos trabalhadores aos campos elétricos e magnéticos, aplica em todo o território nacional os limites estabelecidos pelo ICNIRP em respeito às recomendações da OMS.

Perante o exposto, fica claro que o atendimento das definições descritas pela Lei Nº 11.934 e o respeito aos níveis de referência da tabela 1, definidos pelo ICNIRP, são suficientes quanto ao atendimento dos requisitos legais.

2.3. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

Com base na ABNT NBR IEC 61000-4-3: 2014 [16], a *Electromagnetic Compatibility* (EMC), é a característica de um equipamento, dispositivo ou sistema de não interferir ou sofrer interferência quando localizado em determinado ambiente. Quando existe um problema de EMC em um ambiente, diz-se que o componente do sistema está sob ação de uma *Electromagnetic Interference* (EMI) isto somente ocorre quando existe o acoplamento entre a fonte do sinal e o receptor.

Para que um componente seja eletromagneticamente compatível com o ambiente em que será submetido, o sistema deverá ser projetado de forma a minimizar os seguintes pontos:

- Seu potencial de EMI em outros sistemas da instalação;
- Sua susceptibilidade a EMI produzidas por outros sistemas da instalação;
- Seu potencial de EMI em si próprio.

Para a prevenção das EMI basicamente são possíveis três formas de atuação [17]:

- Eliminar ou reduzir a emissão dos sinais da fonte;
- Eliminar ou reduzir o acoplamento entre fonte e emissor;
- Reduzir a susceptibilidade do receptor aos sinais interferentes;

Como as subestações de alta tensão são grandes fontes de emissão eletromagnética, o conhecimento do perfil de seu campo elétrico em fase de projeto é uma ótima ferramenta para o atendimento aos critérios da EMC. Um projeto que leva em consideração premissas da EMC será menos oneroso, pois os custos de adequação após a finalização do sistema são muito maiores devido à dificuldade específica na manutenção destes locais [18].

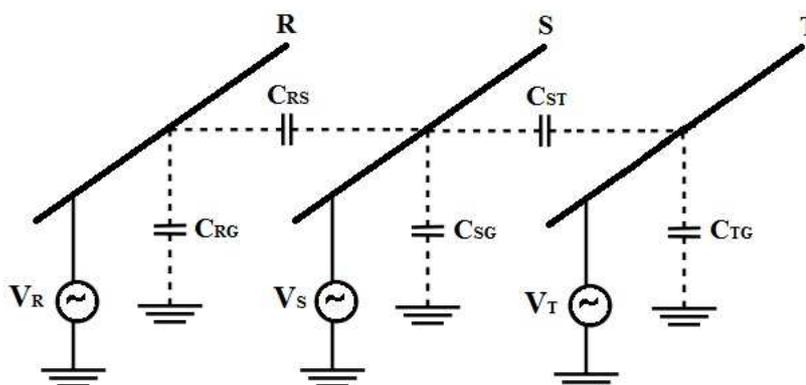
Os acoplamentos possíveis em subestações para os campos ELF podem ser indutivos ou capacitivos. Como será tratado especificamente sobre os campos elétricos será explicitado o acoplamento capacitivo.

2.3.1. ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O acoplamento capacitivo ocorre devido ao nível de tensão de um componente do sistema que produz linhas de campo elétrico no seu entorno. Estas linhas se estendem radialmente decaindo de forma proporcional ao inverso do quadrado da distância. Algumas destas linhas de campo atingem possíveis receptores resultando em uma capacitância mútua entre estes dois componentes. Outra forma de acoplamento capacitivo ocorre quando o campo elétrico, decorrente da diferença de potencial entre os dois componentes, induz uma corrente. O modelo de acoplamento capacitivo pode ser exemplificado pela Figura 1 onde, C_{RS} e C_{RT} são as capacitâncias entre os barramentos das fases e C_{RG} , C_{SG} e C_{TG} são as capacitâncias entre cada barramento e a terra.

Se o componente que sofrerá a EMI estiver isolado da terra, existirá uma diferença de potencial entre o componente e a terra; caso o componente esteja aterrado, haverá então uma corrente elétrica para a terra. Este último caso é o que ocorre com o corpo humano quando está submetido a um campo elétrico variante no tempo, pois este induz correntes no tecido humano em direção a terra, também conhecidas como correntes de descarga. A magnitude deste efeito depende das propriedades elétricas do corpo como a condutividade e permissividade.

Figura 1 – Circuito de acoplamento capacitivo em subestações de AT.



Fonte: Acervo do autor.

Os principais parâmetros que influenciam o acoplamento capacitivo são [18]:

- Os níveis de tensão de operação do sistema elétrico e dos seus componentes. Quanto maior a tensão maior será o campo elétrico e conseqüentemente maior o acoplamento capacitivo;
- Desbalanceamento entre as fases do sistema, o que gera uma diferença de potencial entre elas;
- Distância entre emissor e receptor. Quanto menor a distância, maior será a indução;
- Comprimento dos eletrodos. A corrente de descarga é proporcional ao comprimento dos eletrodos;
- Posição relativa dos eletrodos. Quanto mais paralelos, maior será o acoplamento capacitivo.

2.4. SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

As subestações de energia são pontos de interligação do SEP com a função principal de seccionamento e comutação de ramos do sistema de diferentes níveis de tensão. São compostas geralmente por transformadores, chaves seccionadoras, disjuntores, equipamentos de medição, de proteção e de controle, podendo possuir reatores, compensadores síncronos e/ou estáticos [19].

O constante aumento de demanda e a necessidade de atender as premissas básicas do SEP como estabilidade, confiabilidade e segurança, remetem a construção de subestações de

energia com capacidade de crescimento ordenado e contínuo, com objetivo de possibilitar novos seccionamentos e distribuição a novas localidades.

As subestações podem ser classificadas quanto a sua aplicação em [19]:

- Subestações geradoras: responsáveis por interligar as usinas geradoras ao SEP;
- Subestações consumidoras: aquelas que conectam os consumidores ao SEP;
- Subestações de manobra: responsáveis pelo seccionamento e manobra de grandes quantidades de potência, possibilitando o fluxo de montantes de energia entre as unidades geradoras e os centros de carga. Comumente estas subestações não possuem transformadores;
- Subestações de distribuição: responsáveis por alimentarem diretamente os consumidores. Localizam-se usualmente próximas aos centros de carga.

As subestações ainda podem ser [14]:

- Abrigada ou externa;
- Isoladas a ar ou a gás SF₆;
- Extra alta tensão (EAT), alta tensão (AT), média tensão (MT) ou subestações em corrente contínua;

Neste trabalho serão abordadas em específico as subestações externas de alta tensão isoladas a ar. É apresentada abaixo uma exemplificação desta estrutura na Figura 2.

Figura 2 – Ilustração de uma subestação de AT.



2.4.1. INFLUÊNCIA DO CAMPO ELÉTRICO NO PROJETO DE SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Diversos fatores influenciam no projeto das subestações, incluindo-se a definição das tensões de operação, o número de alimentadores e a capacidade das linhas de transmissão. Contudo, salienta-se a necessidade de localização do terreno necessário para a sua construção, pois os custos relacionados ao terreno são altamente influenciados pela sua dimensão e localização, o que deve ser cuidadosamente analisado [21].

Para a definição das dimensões mínimas da subestação é necessário o prévio projeto eletromecânico da subestação para a alocação de componentes do sistema, assim como estudos de coordenação de isolamento, estabilidade transitória, curto-circuito, blindagem eletromagnética, fluxo de potência e compatibilidade eletromagnética. Devido a isso, a definição dos níveis de campo elétrico torna-se parte indispensável do projeto.

Os pontos de maiores níveis de campos elétricos nas subestações são encontrados nos pontos de mais elevado potencial e de menor distância entre o emissor e receptor, ou seja, entre os condutores e o solo, assim como em pontos de grandes massas metálicas. Estes pontos estão localizados geralmente nas seguintes situações:

- Na entrada da Linha de Transmissão (LT) em subestações;
- Na interligação de barramentos de alta tensão;
- Nos pontos de sobreposição ou cruzamento de barramentos.

Para a adequação dos níveis de campo elétrico dos projetos de subestações existem métodos descritos abaixo que possibilitam a sua redução [22] [23].

A. Elevação da altura dos condutores em relação ao solo: Cabe salientar que esta é a influência mais significativa para a redução e adequação de projetos de subestações quanto aos níveis de campo elétrico, contudo devido à necessidade de utilização de torres e suportes mais elevados, e conseqüente maior custo, não figura entre as mais atrativas.

B. Alteração dos espaçamentos entre condutores: Quanto mais próximas as linhas, menores serão os níveis do campo elétrico ao nível do solo, contudo a proximidade pode gerar problemas de efeito corona e isolamento entre as fases.

C. Arranjo dos condutores: Pode ser horizontal, vertical ou triangular. O campo elétrico é definido ao nível do solo para todas as configurações. Para a configuração horizontal o campo é maior que as demais dentro e fora da faixa de passagem. Para a configuração vertical apresenta níveis menores que a triangular dentro da faixa de passagem.

Fora da faixa de passagem, a configuração triangular apresenta os menores níveis de campo [24].

D. Alteração da sequência de fases: A sequência de fases de circuitos adjacentes influencia fortemente a distribuição dos níveis de campo elétrico no interior da subestação, com isso a alocação de fases iguais próximas em circuitos adjacentes deve ser evitada. Esta é uma medida de baixo custo que pode proporcionar reduções significativas.

E. Instalação de cabos aterrados abaixo dos condutores: A solução de utilização de cabos de aço que interligam as bases dos equipamentos e estruturas da subestação nos pontos onde o campo elétrico apresenta níveis elevados mostra-se eficaz em alguns casos [22] [23]. Contudo sob o ponto de vista de isolamento elétrico e disposição dos equipamentos, esta medida equivale à elevação dos condutores.

3. CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO

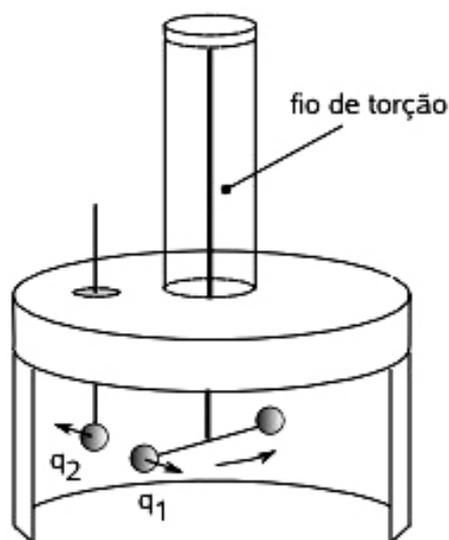
O campo elétrico pode ser descrito como o campo estabelecido em todos os pontos do espaço sob a influência de uma carga geradora, de forma que qualquer carga de prova ficará sujeita a uma força de interação (atração ou repulsão).

Esta força de interação pode ser obtida de forma direta e mais clara a partir da distribuição das cargas utilizando os conceitos da Lei de Coulomb e do Princípio da Superposição, ou ainda a partir do potencial elétrico com a utilização das Equações de Maxwell e a Lei de Gauss.

3.1. A LEI DE COULOMB

Para a comprovação da existência de cargas elétricas e do seu comportamento é apresentado o experimento conclusivo da lei das forças que foi realizado em 1785 por Charles Augustin Coulomb [25], utilizando um instrumento construído por ele e conhecido como balança de torção que pode ser visto de forma simplificada na Figura 3.

Figura 3 – Modelo simplificado da balança de torção de Coulomb.



Fonte: Adaptado de

http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Lei%20de%20Coulomb.htm

Neste equipamento inicialmente em equilíbrio, carrega-se uma pequena esfera fixa com uma carga q_2 , e próximo a ela, sobre o mesmo eixo de rotação, outra esfera com uma

carga q_1 é posicionada fixada a uma haste suspensa por um fio de torção. O torque produzido pela interação entre as duas cargas faz girar o fio de torção.

A força de interação em q_2 devido a q_1 pode ser calculada pelo ângulo de rotação da haste central que será igual à força em q_1 devido a q_2 no sentido contrário. O resultado obtido se exprime pela equação (1).

$$\vec{F}_{2(1)} = k \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \hat{r}_{12} = -\vec{F}_{1(2)} \quad (1)$$

Onde, $F_{i(j)}$ é a força sobre a partícula i , devido a partícula j , r_{12} é a distância entre as duas partículas carregadas e \hat{r}_{12} é o vetor unitário da direção de q_1 para q_2 , k é a constante de proporcionalidade que no Sistema Internacional de Unidades (SI) é escrita na equação (2).

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2)$$

Onde a constante ϵ_0 é a permissividade do espaço livre. Aplicando (2) em (1) se obtém a fórmula da Lei de Coulomb na equação (3).

$$F_{2(1)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \vec{r}_{12} = -F_{1(2)} \quad (3)$$

Conclui-se então com a Lei de Coulomb que a força é proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Além disso, se q_1 e q_2 tem cargas de mesmo sinal, a força será repulsiva, e se forem de sinais contrários, a força será atrativa [25].

3.2. O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

Para analisar o efeito da lei da força em um ponto devido a uma distribuição de cargas elétricas, é possível utilizar o Princípio da Superposição que demonstra pela prática de experiências que os efeitos das interações entre as cargas se sobrepõem, ou seja, a resultante será uma soma vetorial das influências de todas as demais cargas [25]. Assim, a força sobre a carga i é dada pela equação (4).

$$\vec{F}_i = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{i(j)} = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \vec{r}_{ji} \quad (4)$$

Este princípio será também utilizado nos demais cálculos de campo elétrico e potencial elétrico nas diversas distribuições de cargas possíveis.

3.3. O CAMPO ELÉTRICO

Os campos elétricos são produzidos pela presença da distribuição de cargas elétricas que, devido a sua interação eletrostática, produzem uma força sobre um determinado ponto, a carga elétrica elementar é definida como $e = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Coulomb) [25]. No caso de instalações de alta tensão, as cargas aparecem na superfície dos condutores quando são energizados com uma tensão e o campo elétrico em um determinado ponto do espaço representa a força, em magnitude e direção, que pode ser aplicada à uma carga unitária elementar localizada naquele ponto. Visto isso, a unidade do campo elétrico é N/C (Newton por Coulomb).

O campo elétrico E produzido por uma distribuição de cargas pontuais em determinado ponto P pode ser calculado pela soma vetorial das contribuições de cada carga desta distribuição assim como demonstrado na equação (4). A equação para o cálculo do campo elétrico no ponto i será igual a equação (4) contudo como este é definido como a força pela unidade de carga, deve-se dividir pela carga elementar, que é a menor carga admissível, e assim chega-se a fórmula do campo elétrico na equação (5).

$$\vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{(r_i)^2} \vec{r}_i \quad (5)$$

Onde r_i é a distância entre a carga q_i e o ponto P e \hat{r}_i é o vetor unitário da direção e sentido da carga ao ponto P. Caso existam inúmeras cargas é possível considerar uma distribuição contínua de carga, com isso a somatória acima pode ser representada como:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\vec{r}}{r^2} dq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\vec{r}}{r^3} dq \quad (6)$$

Para esta equação $r = x - x'$, logo $r \equiv |r|$, onde x é o vetor da posição do ponto P no qual quer se calcular o campo elétrico, e x' é o vetor de posição do elemento de carga dq , os limites de integração serão as coordenadas de x' .

Caso seja uma distribuição tridimensional, o vetor de posição será $dq = \rho dv$, onde ρ é a densidade volumétrica de carga e dv é o elemento de volume. Se for uma distribuição superficial de carga em uma superfície S, com densidade superficial de carga σ o vetor será

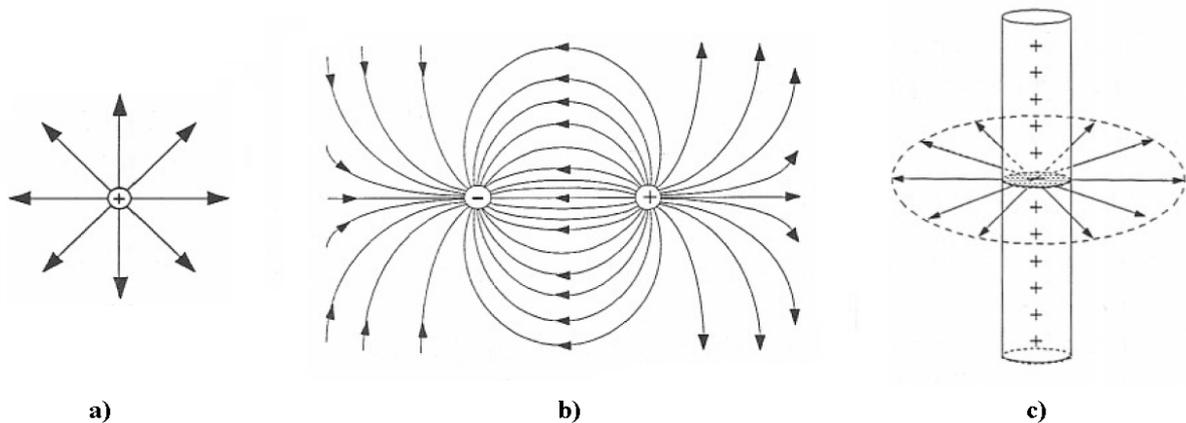
$dq = \sigma dS$, onde dS é o elemento de volume, assim como se houver uma distribuição sobre uma linha será verificada uma densidade linear de cargas representada por λ e dl como elemento de linha tendo assim $dq = \lambda dl$.

3.4. AS LINHAS DE FORÇA DO CAMPO ELÉTRICO

Por meio dos cálculos é possível saber da existência do campo elétrico, contudo é necessário, como forma de facilitar a visualização de sua forma física numa região do espaço, definir o formato das linhas de força. Uma linha de força é a curva tangente em cada ponto na direção do campo neste ponto. Dessa forma é possível determinar a direção e sentido do campo em cada um dos pontos [25].

É ilustrado na Figura 4 o aspecto da distribuição das linhas de força para uma carga pontual positiva que tem uma disposição radial (a), para um par de cargas pontuais iguais de sinais opostos (b) e para um fio cilíndrico uniformemente carregado (c). Não devendo esquecer que o campo elétrico é tridimensional, tendo simetria de revolução em torno de qualquer eixo que passa pela carga.

Figura 4 – Aspecto do campo elétrico para uma carga pontual positiva (a), para um dipolo com cargas iguais (b) e para um fio cilíndrico uniformemente carregado (c).



Fonte: Imagem adaptada de [25].

3.5. O POTENCIAL ELÉTRICO

“O potencial elétrico em qualquer ponto é a diferença de potencial entre esse ponto e um ponto escolhido no qual o potencial é arbitrado como zero.” [26].

Considerando potencial zero no infinito, o potencial calculado a uma distância d da carga pontual será o trabalho realizado por unidade de carga se deslocar uma carga teste do infinito até este ponto, com isso define-se a equação (7):

$$V = - \int_{\infty}^d \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

O campo elétrico é um campo conservativo, ou seja, pode ser escrito como o gradiente de um campo escalar, além disso, pelo teorema de Stokes, verifica-se que a integral de linha de um campo conservativo não depende do caminho entre os pontos inicial e final. Isto permite simplificar a sua descrição, reduzindo-o a uma função escalar que será o potencial elétrico [21]. Isto está demonstrado a seguir para que seja possível comprovar a viabilidade da obtenção do campo elétrico a partir do potencial elétrico.

O cálculo a partir do potencial elétrico escalar V é comumente aplicado por utilizar componentes escalares ao contrário das componentes vetoriais da distribuição de cargas pela Lei de Coulomb [26].

O potencial elétrico entre dois pontos A e B independe da trajetória percorrida, logo:

$$V_{BA} = -V_{AB} \longrightarrow V_{BA} + V_{AB} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (8)$$

Isto denota que a integral de linha de E ao longo de um caminho fechado é zero, e isso significa fisicamente que não é realizado trabalho ao se movimentar uma carga nesta trajetória fechada dentro de um campo elétrico. Aplicando o teorema de Stokes na equação (8) resultará na equação (9):

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (9)$$

As equações (8) e (9) são conhecidas como equações de Maxwell para campos eletrostáticos e qualquer campo que as satisfaçam é considerado conservativo. A equação (8) é a forma integral e a equação (9) a forma diferencial.

Partindo da definição de potencial na equação (7) se obtém:

$$V = - \int_{\infty}^d \vec{E} \cdot d\vec{l} \longrightarrow dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -E_x dx - E_y dy - E_z dz \quad (10)$$

Contudo pelo cálculo de derivação de múltiplas variáveis sabe-se que:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz \quad (11)$$

A partir das equações (10) e (11) é possível verificar que:

$$E_x = \frac{\partial V}{\partial x}$$

$$E_y = \frac{\partial V}{\partial y}$$

$$E_z = \frac{\partial V}{\partial z}$$

Logo,

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (12)$$

A equação (12) significa que o campo elétrico \vec{E} é o gradiente de V e o sinal negativo denota a direção do campo contrária à direção que cresce o potencial elétrico. A equação (12) mostra um novo caminho para o cálculo do campo a partir do potencial. Isto somente é possível, pois as componentes do campo são explicitamente relacionadas pela condição da equação (10).

3.6. LEI DE GAUSS

“A lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total Ψ através de qualquer superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície.” [26].

Dessa forma a carga Q abrangida por uma superfície fechada é descrita na equação (13).

$$Q = \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_v \rho_v dv \quad (13)$$

Onde D é a densidade de fluxo elétrico e ρ é a densidade volumétrica de carga. Ao aplicar o teorema da divergência na integral de superfícies de (13) e derivando as integrais em ambos os lados da equação chegasse à equação (14).

$$\oint_s \vec{D} dS = \int_v \nabla \cdot \vec{D} dv \quad \longrightarrow \quad \rho_v = \nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (14)$$

Desse modo, para a aplicação da lei de Gauss ao cálculo do campo elétrico, é necessária a observação da existência de simetria de cargas, pois será necessário escolher uma superfície de tal forma que o vetor \vec{D} seja normal ou tangencial a esta superfície, conhecida como superfície gaussiana. Para uma carga pontual é escolhida uma superfície esférica que englobe a carga, resultando na equação (15).

$$Q = D_r \oint_s dS = D_r 4\pi r^2 \quad \therefore \quad \vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \vec{r}_r \quad (15)$$

Sabendo a relação entre D e E se obtém o campo elétrico de uma carga puntiforme a partir da lei de Gauss na equação (16).

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0} \quad \therefore \quad \vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}_r \quad (16)$$

4. MÉTODOS DE CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO

Foi descrito como obter o campo elétrico a partir da Lei de Coulomb e Lei de Gauss quando são conhecidas as distribuições de cargas que devem ter uma simetria limitada e bem definida, assim como obtenção do campo pelo potencial de uma região quando este é conhecido. Contudo em componentes das subestações nem a distribuição e nem o potencial de uma região são conhecidos, e para tal problema usualmente são utilizadas as equações de Poisson, Laplace ou ainda o método das imagens. Estes problemas são conhecidos como resoluções para problemas de valor de fronteira [26].

É possível obter as equações de Poisson e Laplace pelas equações (11) e (14) que resultam em (17).

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho_v \quad (17)$$

Assumindo um meio homogêneo, ϵ será constante, e a expressão pode ser reescrita abaixo.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (18)$$

A equação (18) é conhecida como equação de Poisson. Quando $\rho_v = 0$ ocorre um caso especial desta, conhecida como equação de Laplace, explicita em (19).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (19)$$

O operador ∇^2 conhecido como Laplaciano pode ser representado em coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas. A forma cartesiana resulta na equação (20) e denota a sua expansão e necessidade de cálculos em todas as coordenadas para cada ponto observado.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$$

A resolução das equações (17) ou (18) são simples para sistemas com perfis geométricos conhecidos como, por exemplo, lineares, esféricos e coaxiais. Com base nesses sistemas mais simples é possível a determinação do campo para algumas distribuições diferenciadas. Nos componentes da subestação, além do desconhecimento da distribuição das cargas e do potencial como mencionado, as estruturas apresentam configurações geométricas que não são solúveis analiticamente e apresentam diversos meios para o campo elétrico.

Nesses casos se torna necessário ou uma solução numérica aproximada por meio de processos de iterações com verificação da aproximação satisfatória para cada etapa ou por método analítico com exata modelagem do sistema.

As soluções por métodos numéricos normalmente são obtidas por processos computacionais devido ao grande número de operações aritméticas assim como o número de iterações exigidas e a escolha do melhor método depende do tipo de problema a ser resolvido. Para cálculos de campo em espaços limitados, o método das diferenças finitas é bastante adequado, já para resolução do cálculo em espaços não limitados, este método e o método dos elementos finitos, exigem a modelagem de uma rede relativamente espaçadas no meio a ser calculado [27].

Por outro lado, para o cálculo do campo elétrico e do gradiente de potencial próximos a terra, abaixo de linhas de alta tensão e subestações, o método mais adequado é o Método das Cargas Equivalentes (MCE) [27]. Este método apresenta resolução matemática simplificada e a sua precisão depende da correta modelagem do sistema. O cálculo nesse método pode ser mais refinado quanto maior for o número de cargas consideradas.

Dessa forma esse método apresenta a possibilidade de consideração de poucas cargas para pontos de geometria simplificada e somente o uso de inúmeras equações para as situações que tenham percentual significativa de influência de diversas cargas. Outro ponto positivo em relação a sua utilização em subestações é que nos pontos de maiores níveis de campo elétrico, normalmente o maior percentual do campo será resultante de poucas cargas muito próximas. Perante o exposto o MCE foi escolhido para ser utilizado como método de cálculo do campo elétrico.

4.1. MÉTODO DAS CARGAS EQUIVALENTES (MCE)

O método consiste basicamente de duas etapas, a primeira é o cálculo das cargas equivalentes por unidade de comprimento do condutor em função da sua tensão de operação e a segunda é o cálculo do campo elétrico produzido por essas cargas.

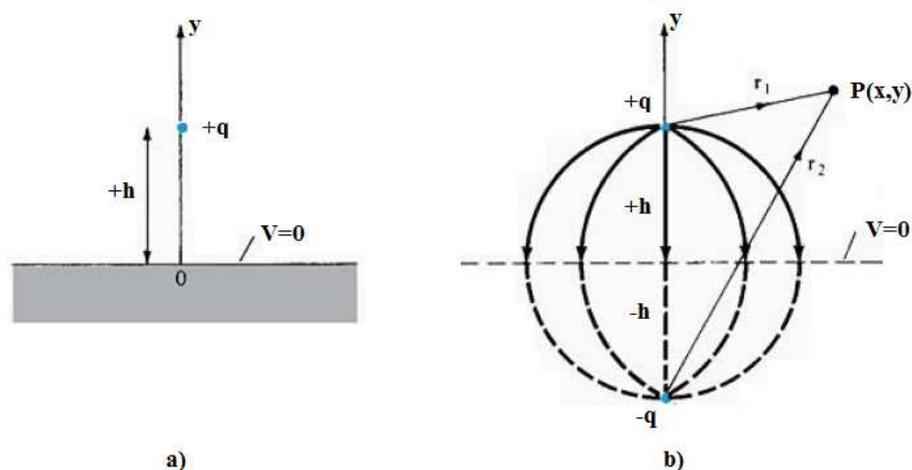
Para a definição do campo elétrico em duas dimensões são necessárias algumas delimitações como:

- As cargas são consideradas uniformemente distribuídas no condutor;
- A superfície do solo é plana e condutora perfeita;
- Os demais equipamentos próximos aos condutores e ao solo não distorcem o campo elétrico.

Para o cálculo das cargas equivalentes é utilizada a teoria do método das imagens, embasada nos princípios acima descritos de uma superfície condutora perfeita poder ser considerada uma superfície equipotencial. Esta estabelece que uma configuração de cargas próximas a um plano infinito condutor perfeito e aterrado pode ser substituída pela própria configuração de carga, ou seja, substituída pela sua imagem e o condutor substituído por uma superfície equipotencial.

A figura 5 ilustra o método, com o condutor representado pela distribuição de uma carga q a uma altura h , e com isso no solo define-se uma carga $-q$ a uma altura $-h$ da superfície do solo, e esse condutor é a imagem idealizada do condutor em relação ao solo.

Figura 5 – Ilustração do método das imagens de uma carga pontual e plano equipotencial (a) e da configuração da imagem e linhas de campo (b).



Fonte: Imagem adaptada de [26].

Quanto maior o número de cargas pontuais equivalentes, maior será a precisão de cada contorno representado. Geometrias específicas podem ser representadas não somente por cargas pontuais, mas também por distribuições lineares de cargas, com o uso de distribuições de cilindros condutores, ou por cargas anelares, com distribuições toroidais e esféricas.

4.1.1. DETERMINAÇÃO CARGAS EQUIVALENTES

Com conhecimento da disposição dos condutores das fases da subestação e as suas imagens pelo método das imagens, é possível calcular as capacitâncias próprias e mútuas de cada condutor. Conforme é possível ver na figura (5b), essa disposição se assemelha a disposição de um capacitor de placas paralelas, em que a distância entre o condutor e solo é muito menor que a dimensão da superfície equipotencial e as linhas de campo elétrico entre o

condutor e o solo são consideradas uniformes. Com isso, o campo elétrico é dado pela equação (21) [25].

$$E = |\vec{E}| = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad , \quad \sigma = \frac{Q}{A} \quad (21)$$

Onde A é a área do plano.

O potencial entre o condutor e sua imagem é dado pela equação (22):

$$V \equiv V_+ - V_- = \int \vec{E} \cdot \vec{dl} = E \times h \quad (22)$$

Verificando que E aponta no sentido do condutor de carga positiva ($q+$) para o condutor de carga negativa ($q-$), obtém-se a equação (23):

$$V = \frac{\sigma h}{\varepsilon_0} = \frac{qh}{\varepsilon_0 A} \quad (23)$$

Isso denota que V é proporcional a carga q do condutor positivo e essa proporcionalidade pode ser aplicada para qualquer par de condutores independente da forma de disposição [25]. Entre os condutores se estabelecerá um potencial V em consequência da sua carga $\pm q$, o quociente de q em relação à V tem o nome de capacitância C do par de condutores e é dada pela equação (24).

$$C = \frac{q}{V} \quad (24)$$

Para determinar as capacitâncias é necessário determinar os diferentes coeficientes de potencial de cada ponto, assim como as respectivas cargas complexas desse ponto, e reunir cada componente de forma matricial.

Para determinar a matriz $[C]$, calculam-se primeiramente os coeficientes de potencial pelas equações (25) a (28) [28].

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (F} \cdot \text{m}^{-1}\text{)} - \textit{Permissividade elétrica do vácuo} \quad (25)$$

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (26)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (27)$$

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji} \quad (28)$$

Onde,

λ_{ii} – Coeficiente de potencial próprio relativo ao potencial do condutor i gerado por sua carga ($m. F^{-1}$);

λ_{ij} – Coeficiente de potencial próprio relativo ao potencial do condutor j gerado por sua carga ($m. F^{-1}$);

h_i – Altura do condutor (m);

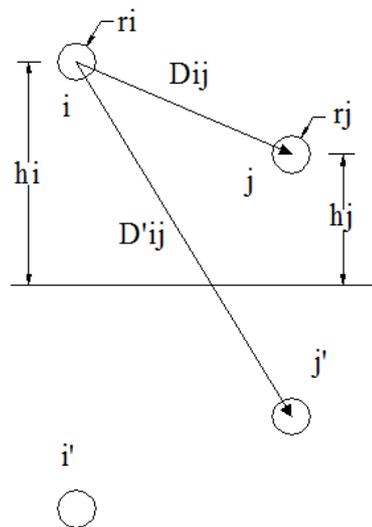
D'_{ij} – Distância entre o condutor i e a imagem do condutor j, j' (m);

D_{ij} – Distância entre o condutor i e o condutor j (m);

r_i – Raio do condutor i (m)

A figura 6 ilustra a disposição dos componentes para o cálculo.

Figura 6 – Ilustração dos componentes para o cálculo dos coeficientes de potencial.



Fonte: Acervo do Autor.

Ao inverter a matriz de coeficientes de potencial $[\lambda]$, se obtém a matriz $[C]$, procedimento explicitado na equação (29).

$$[C] = [\lambda]^{-1} \quad (29)$$

Com a equação (29) pode-se chegar à equação matricial (30), usualmente utilizada para o cálculo das distribuições de carga em condutores ou grupos de condutores [27].

$$\{\dot{q}\} = [C]\{\dot{V}\} \quad (30)$$

Onde,

$$[\dot{q}] = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \cdot \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz de cargas complexas (C. m}^{-1}\text{);}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & C_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & C_{nn} \end{bmatrix} - \text{Matriz quadrada das capacitâncias da linha (C.(V. m}^{-1}\text{));}$$

$$[\dot{V}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \cdot \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} - \text{Matriz das tensões complexas, composta pela tensão dos condutores}$$

n – número de condutores.

No caso de feixes de condutores, estes podem ser substituídos por um único condutor de raio equivalente r_{eq} ao raio de todos os condutores do feixe. Isto pode ser feito com o uso da equação (31) [27].

$$r_{eq} = \sqrt[m]{mrR^{m-1}} \quad (31)$$

Onde,

m – número de subcondutores;

r – raio de um subcondutor;

R – raio geométrico do feixe.

4.1.2. CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO DAS CARGAS EQUIVALENTES

Tendo definidas as cargas, a intensidade do campo elétrico pode ser determinada pela resolução do teorema de Gauss, que foi deduzida para uma carga pontual na equação (16). Contudo como são cargas por unidade de comprimento e o condutor será aproximado por um cilindro de comprimento infinito, o campo resultante será o somatório das contribuições de cada condutor e a sua imagem.

Definindo as coordenadas do condutor c como x_c e y_c , as coordenadas de sua imagem c' serão x_c e $-y_c$. Com isso determinam-se as componentes vetoriais da intensidade do campo

elétrico horizontal, \dot{E}_{xc} na equação (32), e vertical, \dot{E}_{yc} na equação (33), produzidos pelas cargas do condutor e a sua imagem.

$$\dot{E}_{xc} = \frac{\dot{q}_c}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{x - x_c}{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} - \frac{x - x_c}{(x - x_c)^2 + (y + y_c)^2} \right\} \quad (32)$$

$$\dot{E}_{yc} = \frac{\dot{q}_c}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{y - y_c}{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} - \frac{y + y_c}{(x - x_c)^2 + (y + y_c)^2} \right\} \quad (33)$$

Para n condutores o campo elétrico resultante será o somatório das contribuições de cada condutor, obtido pelas equações (34) a (36).

$$\dot{E}_{xn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \cdot \left\{ \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (34)$$

$$\dot{E}_{yn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \cdot \left\{ \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (35)$$

E a resultante da soma vetorial destas duas componentes está definida na equação (36).

$$E_r = \sqrt{|\dot{E}_{xn}|^2 + |\dot{E}_{yn}|^2} \quad (36)$$

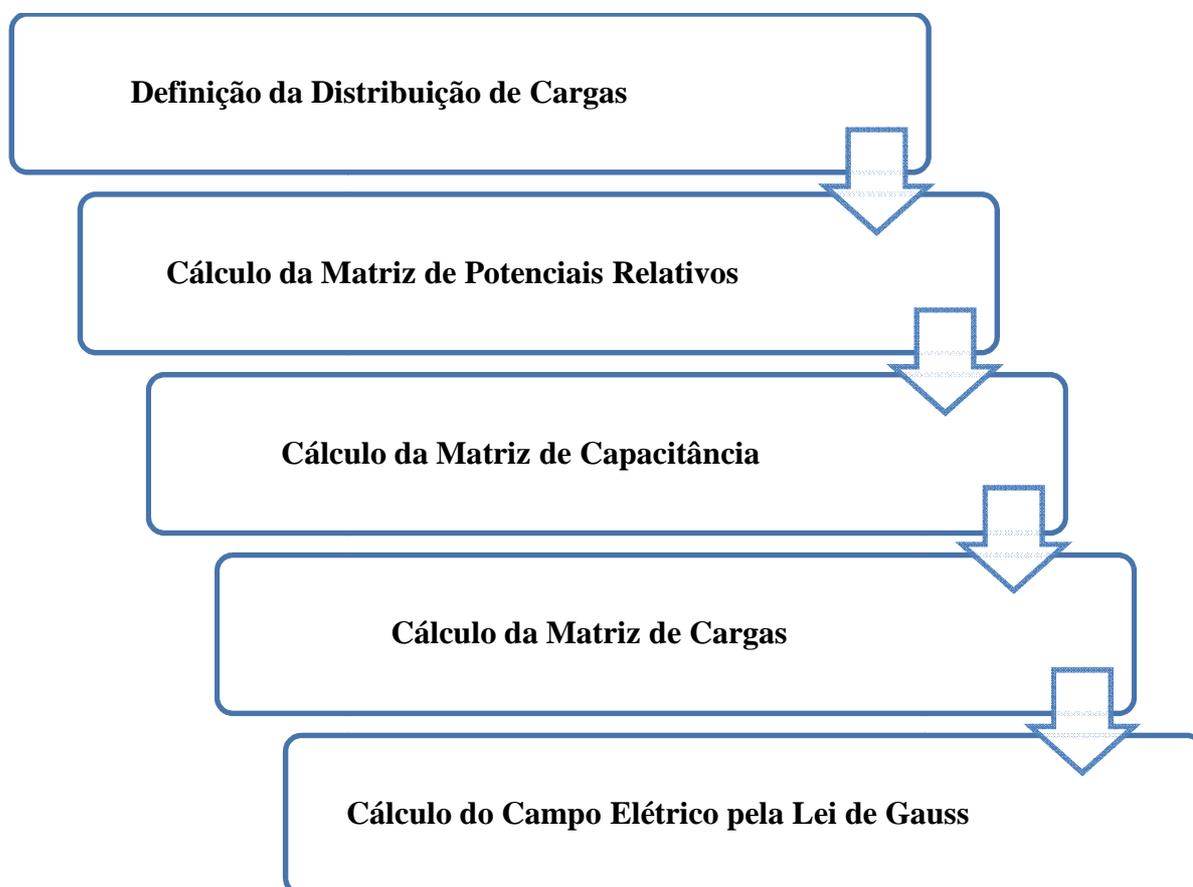
Utilizando as tensões eficazes do sistema, este campo terá também como resultado o seu valor eficaz. Este valor do campo será o valor máximo no ponto considerado, independente do ângulo de fase e do instante de tempo.

5. CÁLCULO DE DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO PELO MCE

Para o cálculo do perfil do campo elétrico, devido a possibilidade de existirem elevadas dimensões das matrizes de carga q e capacitância C e a necessidade de realização da inversa da matriz C , torna-se muito importante o uso de ferramentas de cálculos para facilitar a realização dos cálculos em diferentes configurações de distribuição das cargas.

Com esse objetivo foi elaborado um algoritmo de cálculo do software MATLAB®. O algoritmo completo pode ser consultado no APÊNDICE. Este algoritmo foi elaborado com base no MCE e está representado por um diagrama de blocos na figura 7.

Figura 7 – Representação do algoritmo de cálculo do campo elétrico.



Fonte: Acervo do autor.

Na realização dos cálculos foram utilizadas distribuições de cargas diversas, iniciando com dois condutores e na maioria das configurações com três e seis condutores. Apesar do uso com o mesmo algoritmo é possível a configuração do número e a distribuição de cargas que for desejada.

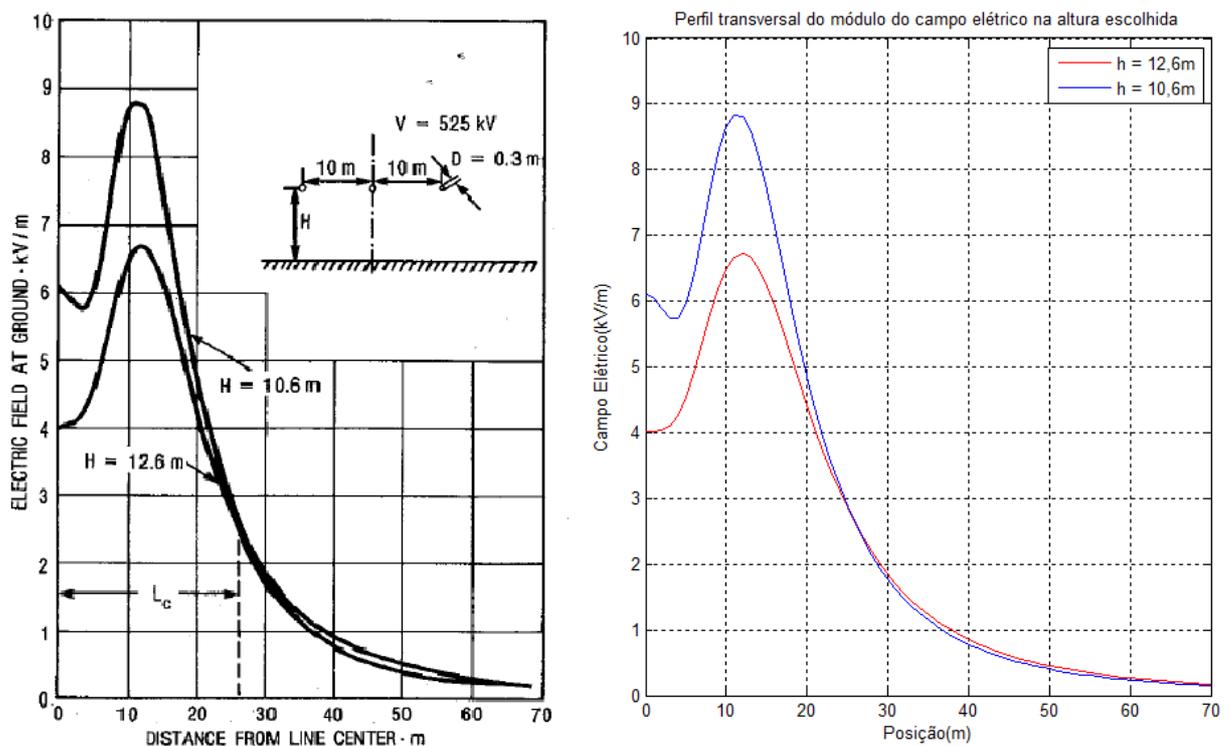
5.1. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO

Para a validação do algoritmo foram comparados os resultados do cálculo do campo elétrico do algoritmo elaborado com exemplos de resultados conhecidos para diferentes níveis de tensão, altura em relação ao solo, distanciamento entre fases e raios equivalentes dos condutores.

O primeiro modelo de cálculo do campo elétrico para validação foi obtido do livro *Transmission Line Reference Book* [24], páginas 348 e 349, no qual é também utilizado o MCE. Neste modelo o campo elétrico é calculado para uma linha de transmissão de 525 kV, tensão de linha, e cada fase é composta por três condutores de 3,3cm de diâmetro espaçados de 45 cm equivalendo a um condutor de diâmetro igual a 0,3m, ou seja, raio equivalente de cada eletrodo de 0,15m. O espaçamento entre os eletrodos é de 10m e foram realizados os cálculos para o potencial ao nível do solo para duas alturas da linha, 10,6 e 12,6 metros.

Como nessa referência não são apresentados os valores numéricos de cada ponto não é possível o cálculo do erro relativo, contudo é feito na figura 8 a comparação visual dos dois gráficos. O gráfico a esquerda são os resultados obtidos em [24] e o gráfico da direita os dados obtidos na simulação do algoritmo elaborado.

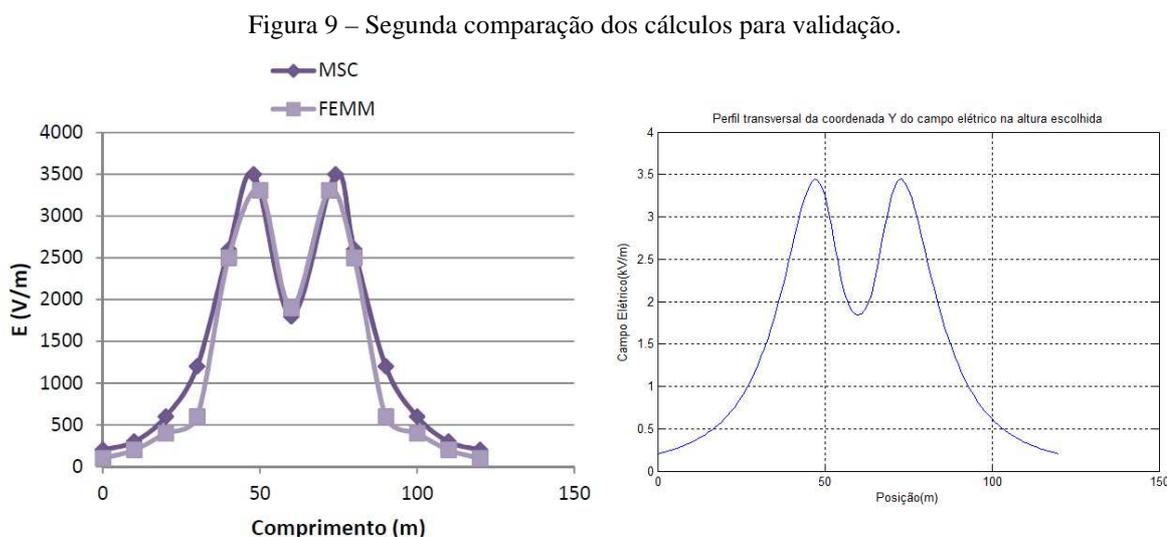
Figura 8 – Primeira comparação dos cálculos para validação.



Fonte: Adaptado de *Transmission Line Reference Book* [24].

O segundo modelo do cálculo do campo elétrico para validação é apresentado na dissertação de mestrado de Martins, Alin do Amaral. 2012 - Mapeamento do Campo Elétrico de uma Subestação usando a técnica dos elementos finitos [29], na página 56, no qual são utilizados o Método de Simulação de Cargas – MSC e o Método de Elementos Finitos utilizado na aplicação de software específico conhecido como FEMM. Neste modelo o campo elétrico é calculado para uma linha de transmissão de 400 kV, tensão de linha, e cada fase é composta por dois condutores de 1,3cm de diâmetro espaçados de 40 cm, isto resulta em um raio equivalente de cada eletrodo de 0,0719m. O espaçamento entre os eletrodos é de 10,3m e foram realizados os cálculos para o potencial a 1,8 metros acima do nível do solo para uma linha a 15 metros acima do solo.

Como nesta referência não são apresentados os valores numéricos de cada ponto não foi possível realizar o cálculo do erro relativo, contudo é feita a comparação dos dois gráficos na figura 9. O gráfico a esquerda são os resultados obtidos em [29] e o gráfico da direita os dados obtidos na simulação do algoritmo elaborado.



Fonte: Adaptado de [29].

Com a apresentação da comparação desses dois modelos é comprovada a aproximação aceitável dos resultados obtidos com algoritmos de cálculo criado, permitindo dessa forma seu uso para posteriores análises.

6. PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO EM SUBESTAÇÃO DE AT

O cálculo do campo elétrico para situações estáveis aonde são considerados somente poucos condutores de cargas com potenciais fixos e de posição espacial bem definida é de fácil resolução. Contudo, nas subestações existem diversas fontes de radiação eletromagnética, potências diversos e variáveis, assim como variação nas dimensões de condutores e barramentos. Essas características resultam em cálculos tão complexos quanto a necessidade de aproximação do valor calculado ao valor real.

Com o objetivo de salientar os pontos mais importantes do cálculo em subestações e o impacto de cada consideração nos resultados finais, serão realizados os cálculos para duas subestações localizadas na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, de propriedade da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), são elas a Subestação Porto Alegre 10 (PAL10) e a Subestação Porto Alegre 9 (PAL9).

Foram escolhidas estas instalações, pois em 28/12/2011 foram realizadas medições de campo elétrico e campo magnéticos em cumprimento as resoluções normativas [2] [12]. Além disso, são de conhecimento todas as características da composição do sistema e projetos destas subestações como distâncias entre condutores, seção de cabos e barramentos, etc. Os dados destas medições serão utilizados para comparação com os resultados do algoritmo elaborado.

As medições foram realizadas com o equipamento Monitor de campos elétricos e magnéticos modelo EFA300 do fabricante NARDA, com precisão de $\pm 3\%$ em sua faixa de medição de 10V/m a 100kV/m. O equipamento foi configurado para uma faixa de frequência de 5Hz a 2kHz. Esse intervalo de frequência utilizado é suficiente para considerar harmônicas típicas dos sinais de tensão e corrente do sistema de potência (60 Hz). Todas as medições foram realizadas a 1,5 metros do solo conforme orientação normativa.

As medições foram realizadas seguindo orientações da Norma ABNT 15415:2006 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz, válida na época das medições e hoje substituído pela Norma ABNT 25415:2016 – Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz [14].

Os valores exatos e posição relativa dos pontos de medição das duas subestações estão descritas ANEXO - Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações, documento integrante do relatório enviado pela empresa CEEE a ANEEL, como comprovação do atendimento das resoluções normativas. Para auxiliar na localização dos

pontos de medição foi criado um arquivo com a localização das medições para utilização em programas de posicionamento via satélite.

6.1. PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO DA SUBESTAÇÃO PAL10.

Esta é uma subestação 13,8/69/230kV, e os setores de maior interesse são os de alta tensão, como o barramento principal de 230kV.

Nesta subestação foi realizado um total de 27 medições e na figura 10 é possível visualizar a subestação e todos os pontos de medição.

Figura 10 – Pontos de medição da subestação PAL10.

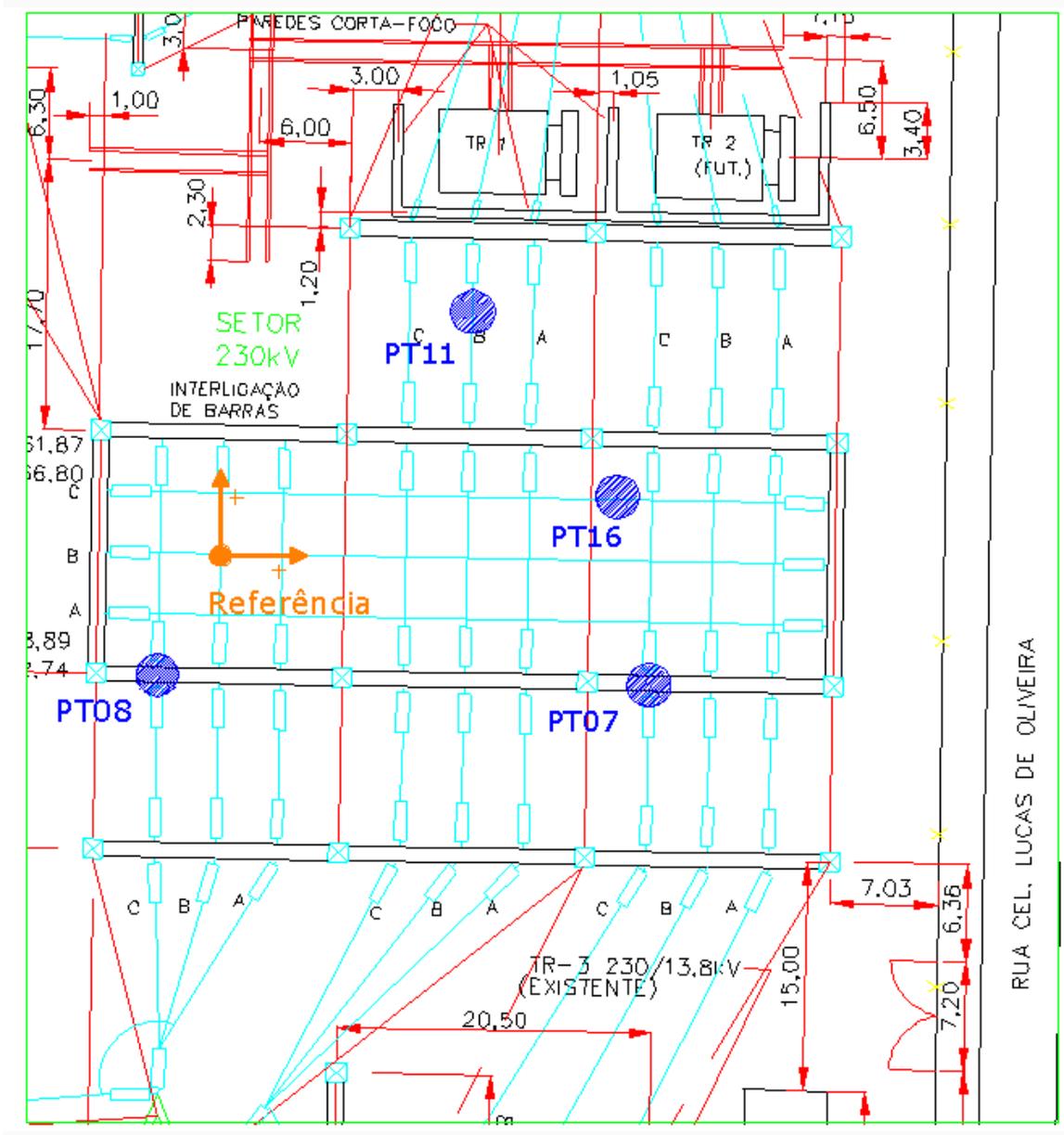


Fonte: Acervo técnico da CEEE.

Os pontos de maior interesse são aqueles que apresentam os maiores valores de campo elétrico. Consequentemente são os pontos mais próximos dos maiores níveis de tensão e mais próximos do solo, de grandes massas metálicas ou de cruzamentos de barramentos. São eles os pontos identificados como 07, 08, 11 e 16.

Para melhor visualização é apresentado na figura 11 a planta baixa e na figura 12 a planta em corte, ambas da subestação PAL10 com a localização dos referidos pontos e a definição de um ponto de origem como referência para os posteriores cálculos que serão realizados.

Figura 11 – Planta baixa subestação PAL10.



Fonte: Adaptado do acervo técnico da CEEE.

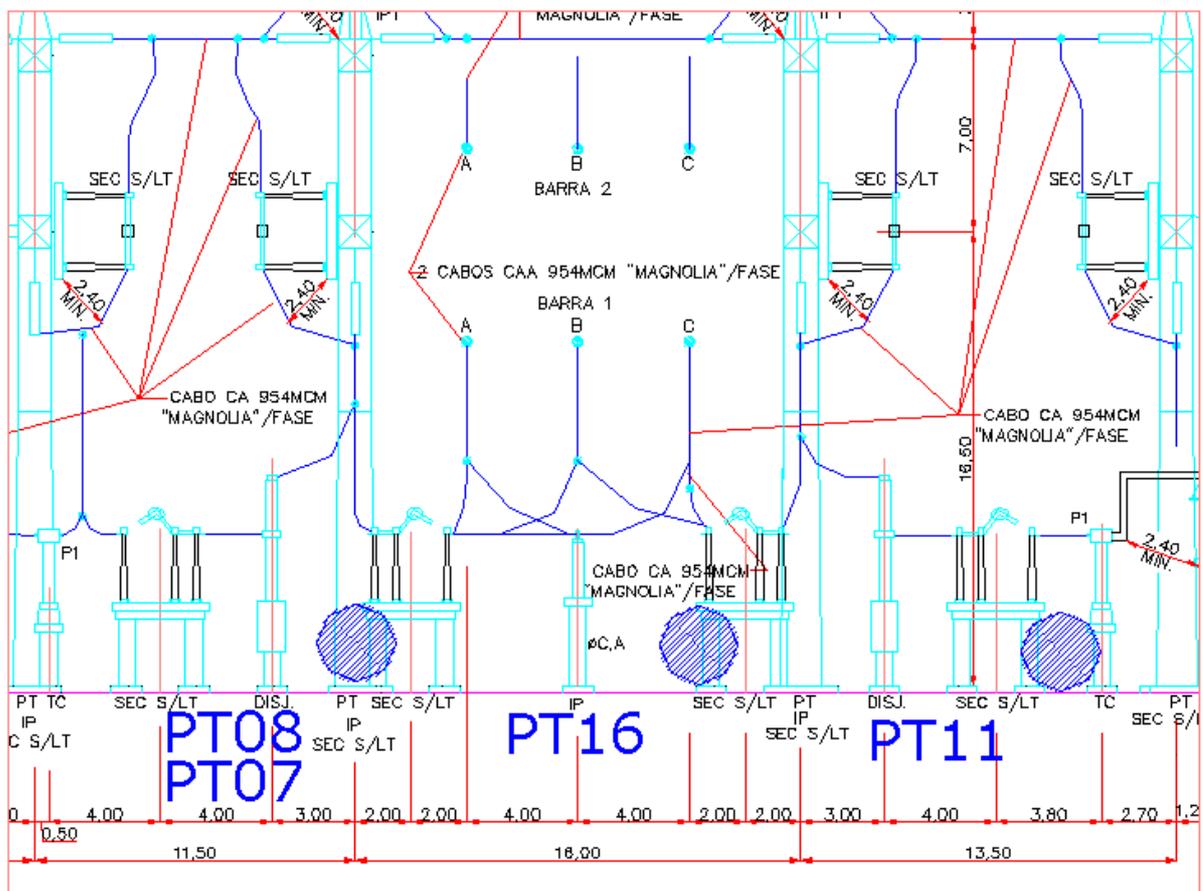
Na tabela 2 são descritos os dados principais de cada ponto com valores de campo elétrico medido e localização relativa para facilitar as referências dos cálculos.

Tabela 2 – Valores e localização dos pontos de medição da subestação PAL10.

Ponto de Medição	Campo Elétrico Medido (kV/m)	Posição Relativa Horizontal	Posição Relativa Vertical
7	6,973	27,5	-8
8	7,457	-4	-8
11	7,404	16	17
16	7,110	25	5

Todos os eletrodos considerados nos cálculos dessa subestação são energizados no nível de tensão de 230kV considerando uma variação de tensão de 5%. Os espaçamentos são: entre fases de 4,5m, entre diferentes barramentos de 7m, de 5,5m em relação ao solo. Todos os cálculos serão realizados com relação ao ponto identificado como “referência” na figura 11, e nesta mesma figura estão contidas as sequências de fases dos eletrodos que foram utilizados.

Figura 12 – Planta em corte da subestação PAL10.



Fonte: Adaptado do acervo técnico da CEEE.

Para cada ponto foi calculado o campo elétrico para três diferentes configurações:

- I. Modelagem I - Considerando os três eletrodos mais próximos do ponto;
- II. Modelagem II - Considerando os seis eletrodos mais próximos do ponto;
- III. Modelagem III - Considerando os seis eletrodos mais próximos e o seis eletrodos do barramento principal;

Para as linhas que passam sobre os pontos 7 e 8 foi considerando cabo CA Magnólia 954MCM equivalente a um raio de 14,28mm.

Para as linhas que passam sob os pontos 11 e 16 foi considerado barramento rígido de 3” equivalente a um raio de 38,1mm.

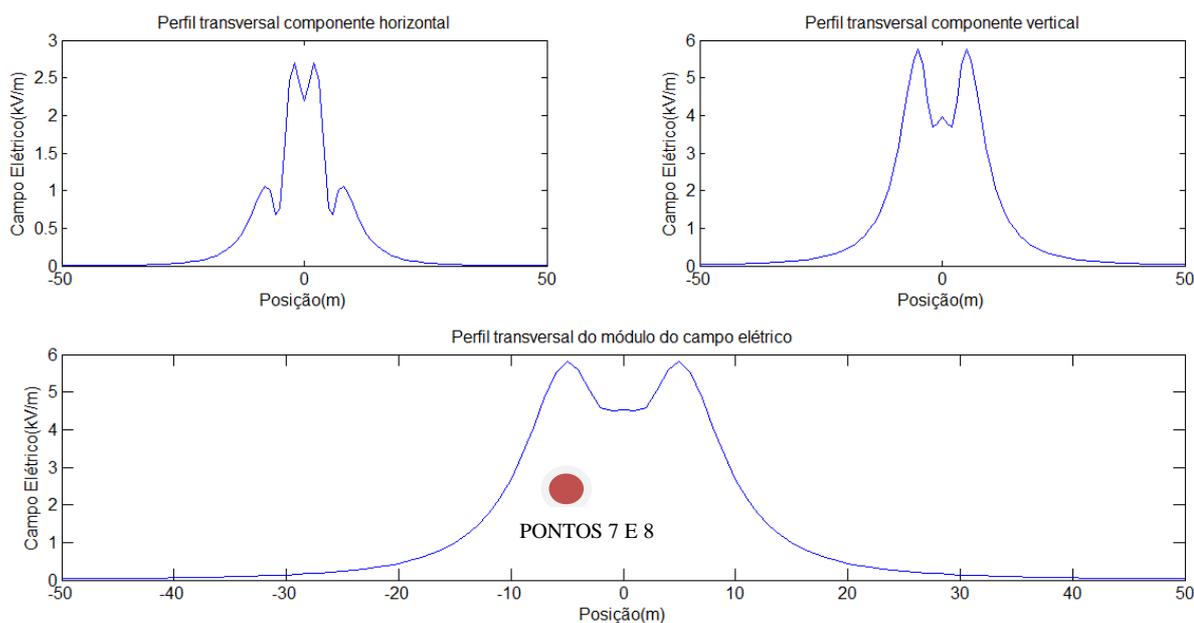
Para o barramento principal foram considerados dois cabos CA Magnólia 954MCM, espaçados de 35cm, com raio equivalente calculado conforme equação (31) de 70,7mm.

6.1.1. MODELAGEM I

Para cada ponto foi calculado o campo elétrico devido somente aos três eletrodos posicionados mais próximos de cada ponto de medição.

A figura 13 mostra o perfil do campo elétrico para os pontos 7 e 8. São exibidos gráficos para as componentes horizontal do campo elétrico a esquerda, a componente vertical a direita e abaixo o módulo do perfil do campo elétrico. A diferença do nível de campo para o cálculo dos pontos 7 e 8 se diferencia somente pela distância relativa ao centro desse perfil.

Figura 13 – Perfil do campo elétrico nos pontos 7 e 8 considerando três eletrodos.



Fonte: Acervo do autor.

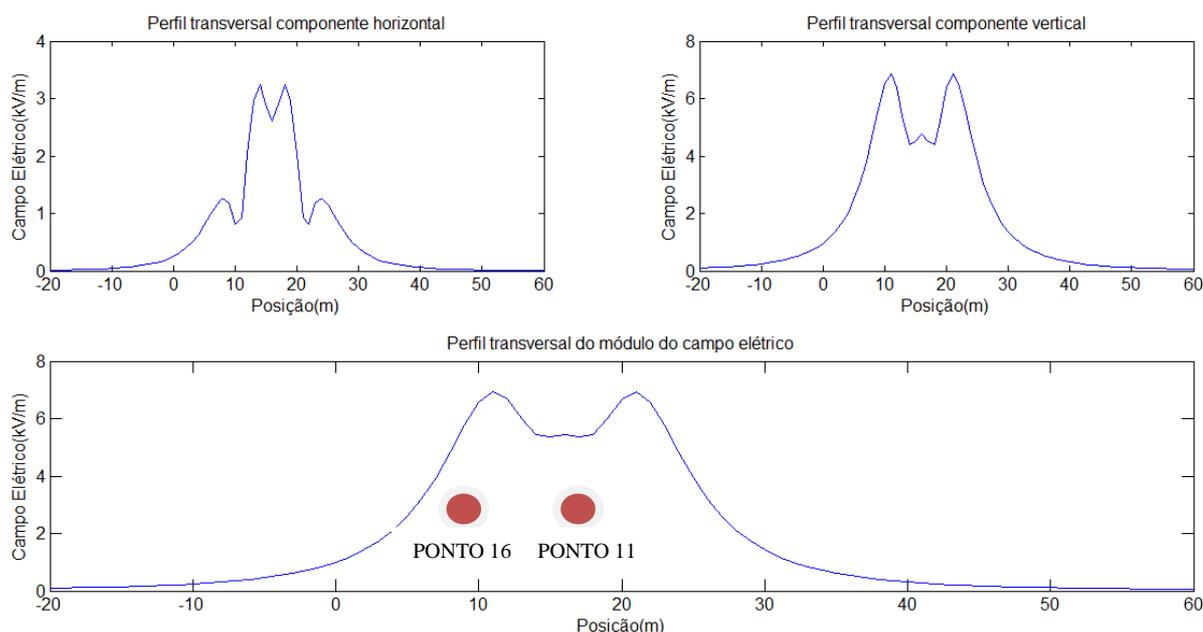
A figura 14 descreve o perfil do campo elétrico para os pontos 11 e 16. A diferença do nível de campo para a medição entre os pontos 11 e 16 se diferencia somente pela distância relativa ao centro deste perfil.

Nos resultados apresentados nas figuras 13 e 14, é possível observar que o perfil do módulo do campo elétrico acompanha o mesmo formato do perfil da componente vertical.

No caso de um sistema polifásico, o campo resultante em cada ponto no espaço é um campo elíptico rotativo, no entanto, ao nível do solo a elipse degenera e o campo é perpendicular ao solo. Além disso, na zona entre 0 e 2 m acima do solo, a componente vertical do campo elétrico é mais uniforme e a componente horizontal é desprezível [27].

As evidências da etapa I reforçam as afirmações teóricas de que para os níveis de campo elétrico em subestações a componente de maior influência é a componente vertical.

Figura 14 – Perfil do campo elétrico nos pontos 11 e 16 considerando três eletrodos.



Fonte: Acervo do autor.

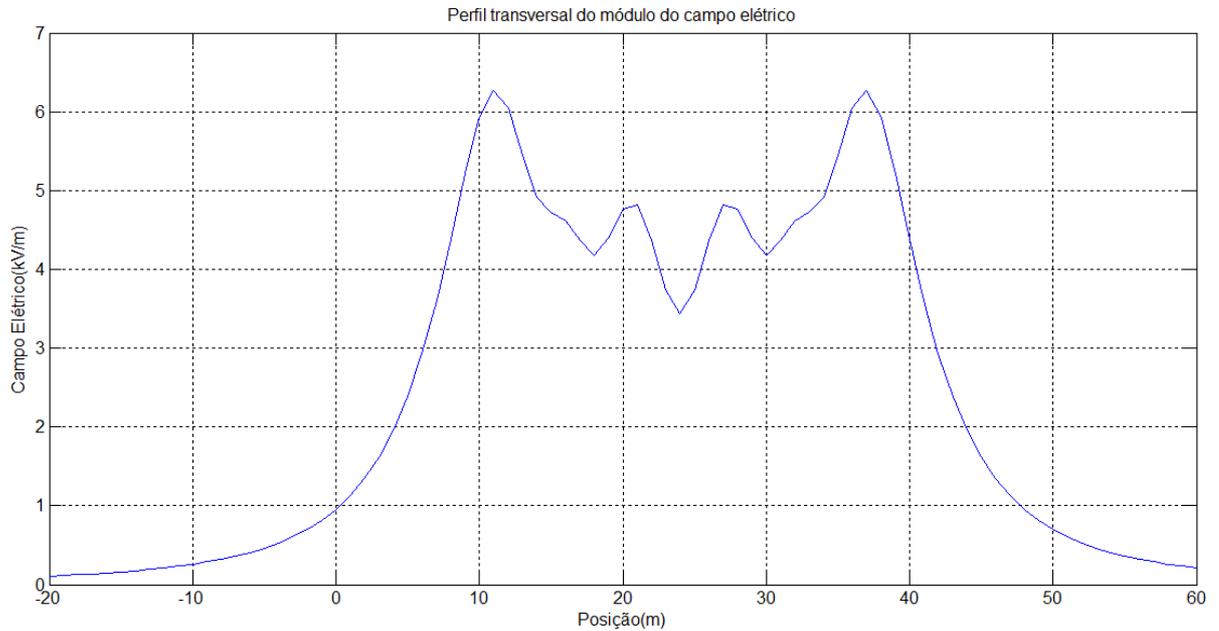
Devido ao exposto, para os demais cálculos será apresentado somente o módulo resultante do perfil do campo elétrico, contudo ainda serão consideradas para efeito dos cálculos todas as componentes do campo elétrico.

6.1.2. MODELAGEM II

Para cada ponto foi calculado o campo elétrico devido aos seis eletrodos posicionados mais próximos de cada ponto de medição. Todas as demais características foram mantidas inalteradas.

A figura 15 mostra o perfil do campo elétrico para os pontos 7 e 8. A diferença do nível de campo para o cálculo dos pontos 7 e 8 se diferencia somente pela distância relativa ao centro do perfil.

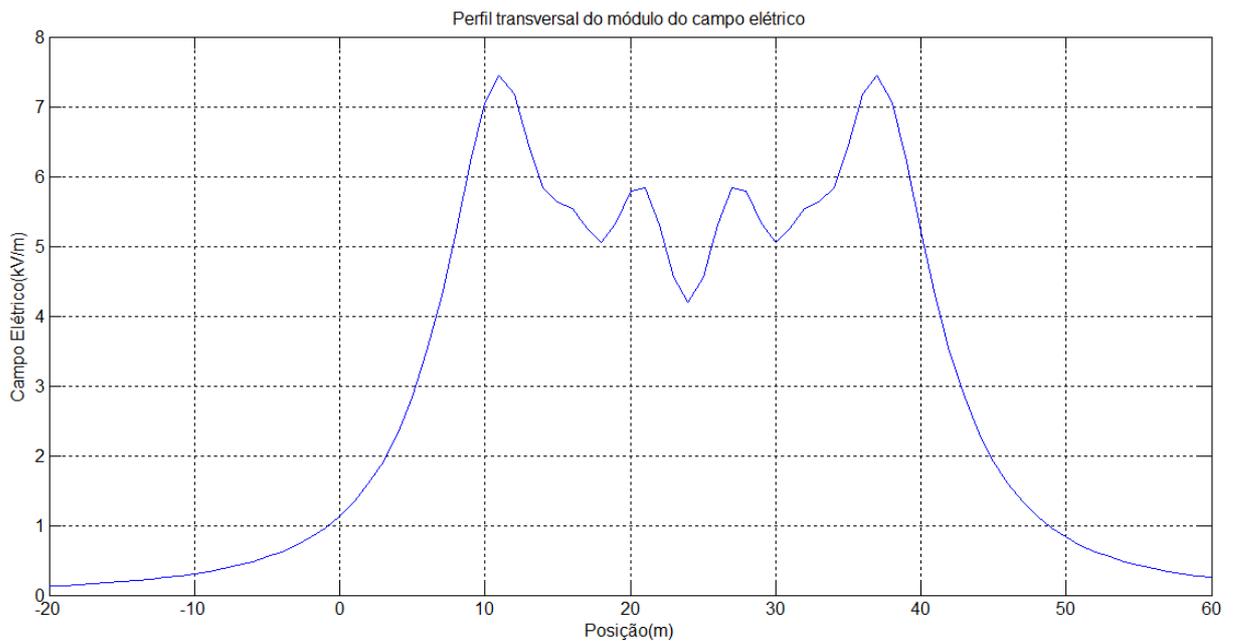
Figura 15 – Perfil do campo elétrico nos pontos 7 e 8 considerando seis eletrodos.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 16 descreve o perfil do campo elétrico para os pontos 11 e 16. A diferença do nível de campo para a medição entre os pontos 11 e 16 se diferencia somente pela distância relativa ao centro deste perfil.

Figura 16 – Perfil do campo elétrico nos pontos 11 e 16 considerando seis eletrodos.



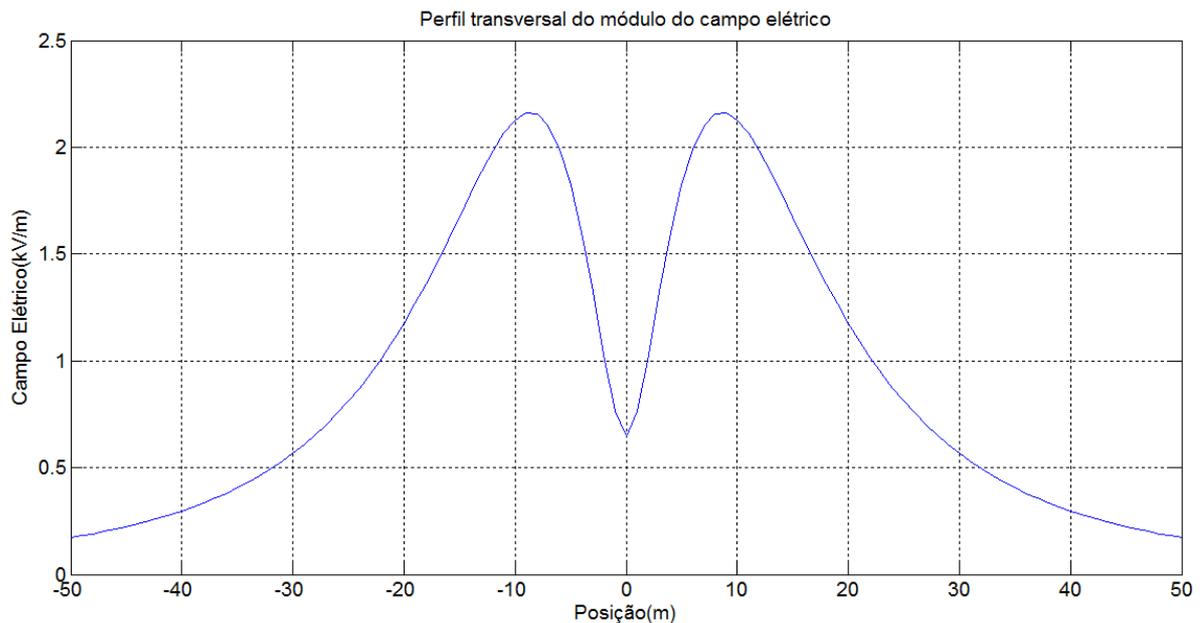
Fonte: Acervo do autor.

6.1.3. MODELAGEM III

Para cada ponto foi calculado o campo elétrico devido aos seis eletrodos posicionados mais próximos de cada ponto de medição e mais a contribuição da componente vertical devido aos barramentos principais da subestação. Todas as demais características foram mantidas inalteradas.

O perfil do campo elétrico devido somente aos barramentos principais é apresentado na figura 17. Como o barramento está perpendicular aos condutores das linhas que ficam sob os pontos calculados deverá ser observada a correta soma vetorial deste campo, assim como devem ser observadas e obedecidas as sequências de fases.

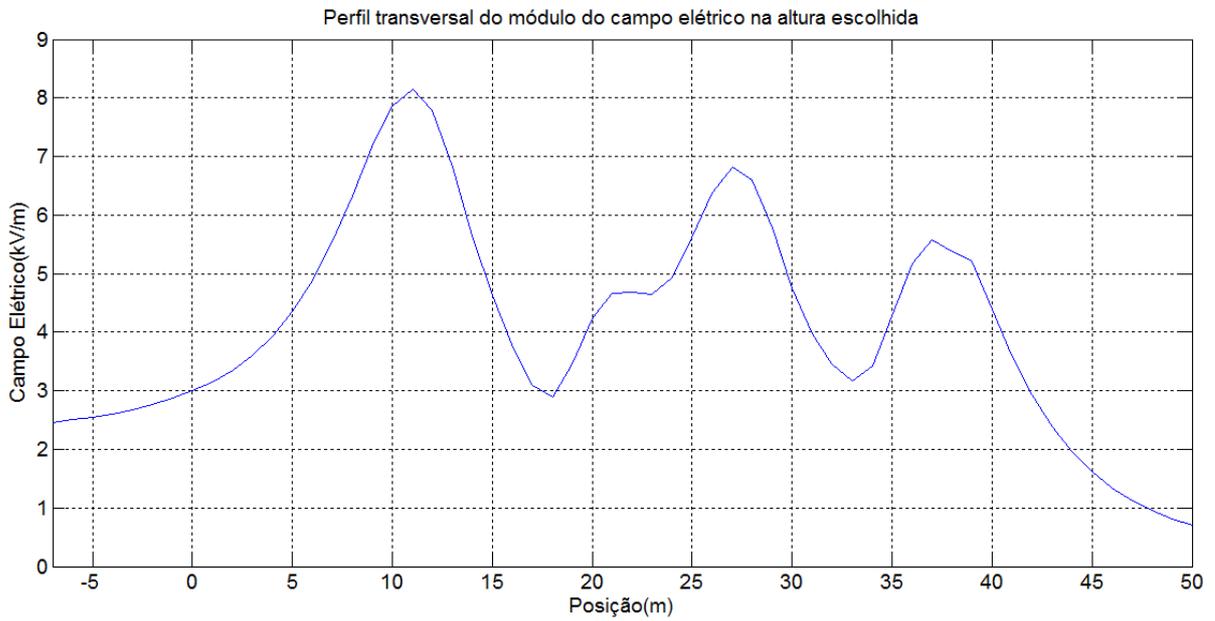
Figura 17 – Perfil do campo elétrico do barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 18 mostra o perfil do campo elétrico para o ponto 7 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

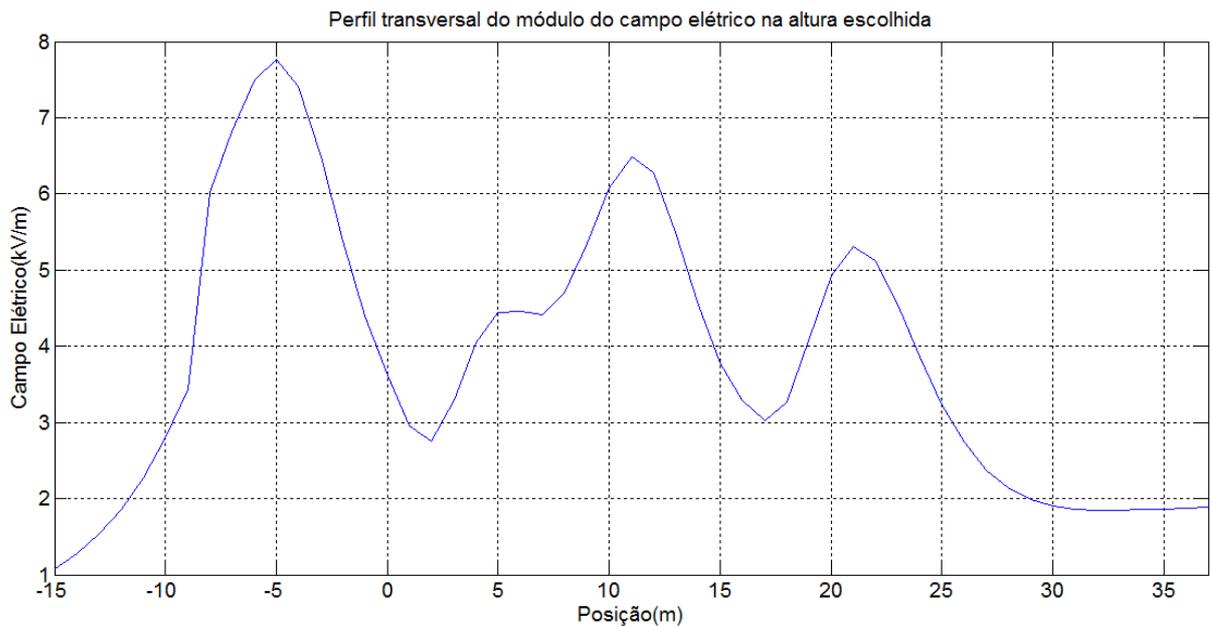
Figura 18 – Perfil do campo elétrico no ponto 7 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 19 mostra o perfil do campo elétrico para o ponto 8 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

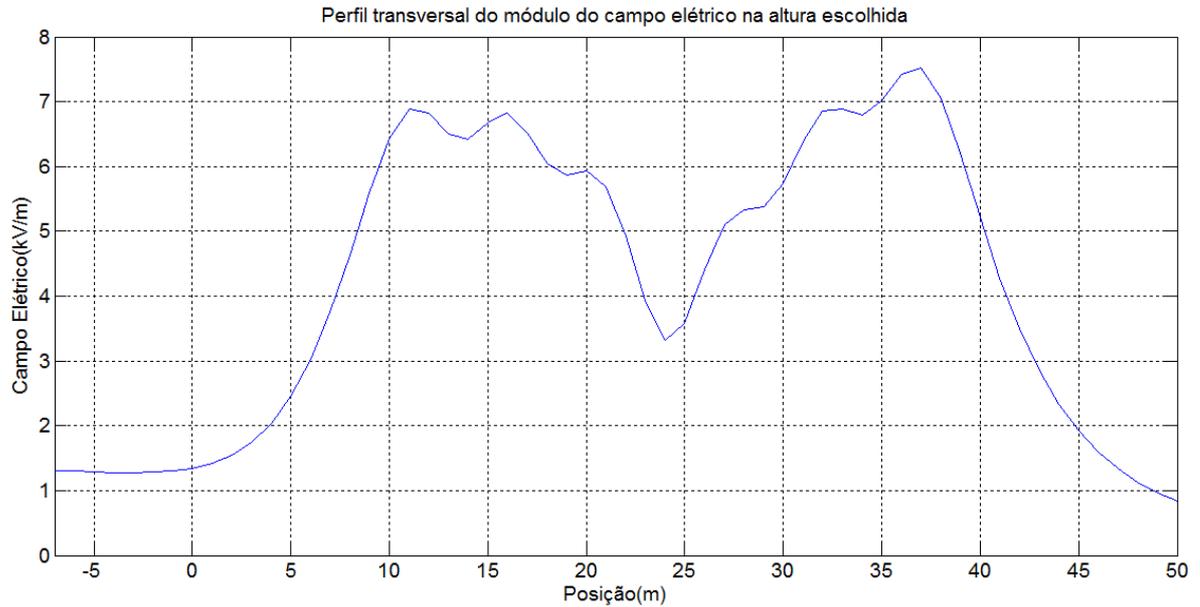
Figura 19 – Perfil do campo elétrico no ponto 8 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 20 descreve o perfil do campo elétrico para o ponto 11 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

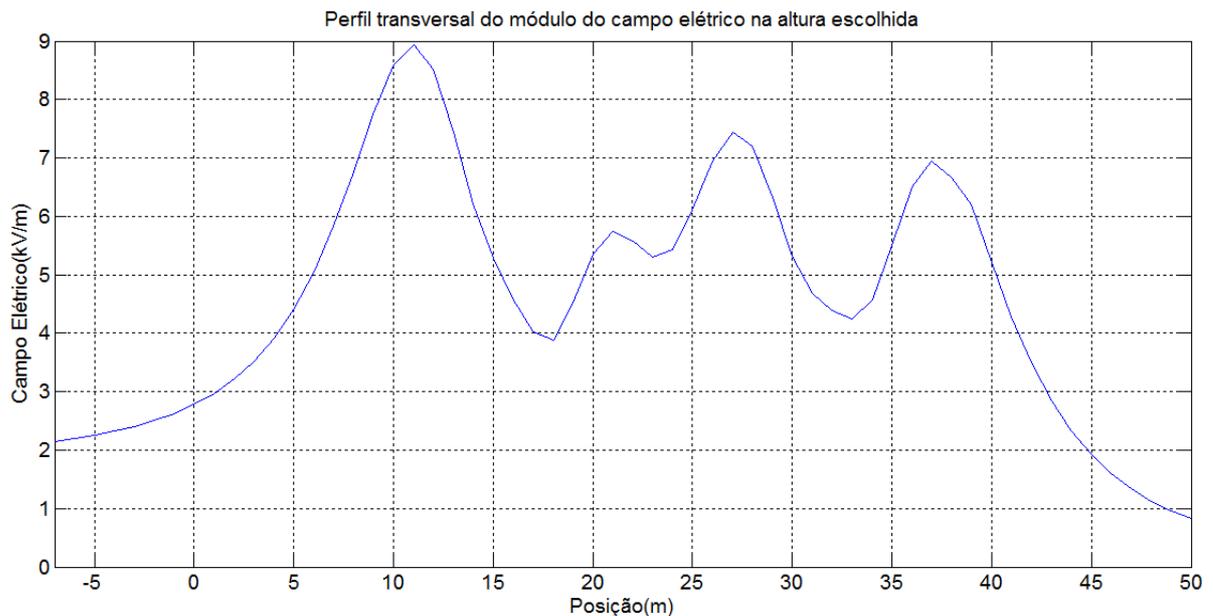
Figura 20 – Perfil do campo elétrico no ponto 11 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 21 descreve o perfil do campo elétrico para o ponto 16 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

Figura 21 – Perfil do campo elétrico no ponto 16 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

Após os cálculos das configurações I, II e III está apresentado na tabela 3 uma comparação entre os valores calculados e os valores medidos, em cada ponto, para cada configuração.

Tabela 3 – Comparação entre medição e cálculo da subestação PAL10.

Ponto Medição	Campo (kV/m) Medido	Campo (kV/m) Modelagem I	Campo (kV/m) Modelagem II	Campo (kV/m) Modelagem III	Desvio % Modelagem III/ Medido
7	6,973	6,060	4,855	6,791	-2,61%
8	7,457	5,775	5,949	7,410	-0,63%
11	7,404	5,643	5,259	6,819	-7,90%
16	7,110	5,081	4,196	6,948	-2,28%

6.1.4. CONCLUSÕES DA MODELAGEM I

Para os pontos 7 e 8 são considerados condutores de seção inferior a dos condutores dos pontos 11 e 16, como todos os demais dados se mantiveram inalterados, o nível de campo elétrico em 7 e 8 são relativamente menores. A componente horizontal dos campos elétricos nesses casos exerce pequena influência nos resultados finais, e, como visto, poderia até mesmo ser desprezada [27].

Os níveis de campo elétrico calculados com esta configuração ficaram bastante distantes dos valores medidos, demonstrando a necessidade de consideração de um maior número de cargas.

6.1.5. CONCLUSÕES DA MODELAGEM II

Quanto existe dois barramentos de circuitos distintos paralelos é usual utilizar a sequência de fases ordenadas de forma que os eletrodos internos aos barramentos sejam de fases distintas e assim tendem a anular parte dos efeitos de seu campo elétrico, e conseqüentemente nas periferias destes barramentos, como não existe mais nenhum condutor para se anularem, o nível do campo elétrico será mais elevado.

A sequência de fase utilizada é ferramenta importante no projeto de subestações. Na subestação PAL10 essas condições também ocorreram, as sequências de fases específicas consideradas em todos os eletrodos, que pode ser observada na figura 11, são C/B/A e C/B/A.

Devido a isto, dependendo da posição dos pontos de medição, quando são considerados no cálculo do campo elétrico mais eletrodos, como na configuração II, esses podem influir de forma positiva ou negativa no nível de campo elétrico no ponto específico.

Para o ponto 7, que está localizado mais para o lado de dentro dos barramentos, existe uma redução do campo elétrico quando são considerados os demais barramentos, pois a sequência de fases ordenadas resulta na redução do campo.

Para o ponto 8, como o seu posicionamento é para fora dos barramentos, a consideração de mais eletrodos somente exerce influência adicional no nível do campo.

O ponto 11 está posicionado no centro dos três primeiros condutores considerados, logo sofre pequena variação do campo quando adicionados os três demais eletrodos a direita.

O ponto 16 está mais para dentro da configuração de seis eletrodos, logo tem uma redução no nível do campo elétrico da configuração I para a II, mas não tão significativa quanto a redução no ponto 7.

Devido a esta variabilidade nas possibilidades de soma ou subtração no nível de campo elétrico dependente da sequência de fases utilizadas, a consideração de demais barramentos próximos ao ponto de medição no cálculo não pode ser negligenciada. Contudo os níveis de campo elétrico calculados com esta configuração ainda ficaram bastante distantes dos valores medidos, demonstrando ainda a necessidade da consideração de um maior número de cargas.

6.1.6. CONCLUSÕES DA MODELAGEM III

Levando-se em consideração a influência do barramento principal, os valores pontuais calculados se comparados com os valores medidos são altamente satisfatórios, visto o baixo erro percentual.

Os pontos 7, 8 e 16 apresentaram erro abaixo de 3%, demonstrando que para estes pontos a consideração das cargas utilizadas para o cálculo é satisfatória.

O ponto 11 apresentou erro de 7,9% e demonstra que seriam necessárias demais considerações para aproximar o valor calculado do valor medido. Remete-se a este fato ao ponto 11 ser o ponto mais distante do barramento principal e mais próximo do transformador, levando a acreditar que para a sua maior aproximação da realidade, devam ser considerados demais barramentos. Mesmo com percentual mais elevado de erro, foi possível a visualização de um perfil de distribuição do campo elétrico em todos os pontos de forma clara.

Os valores dos perfis calculados são úteis para a definição dos pontos escolhidos, mas também, para verificar o ponto com maior nível de campo elétrico.

Essa é uma ferramenta muito importante e que se difere da obtenção do campo por medição, pois nesse são necessárias inúmeras medições para estipular o ponto de mais elevado nível de campo elétrico.

Com isso é apresentado na tabela 4 os valores de campo máximo nos perfis dos pontos calculados.

Tabela 4 – Valores máximos calculados do campo elétrico na subestação PAL10.

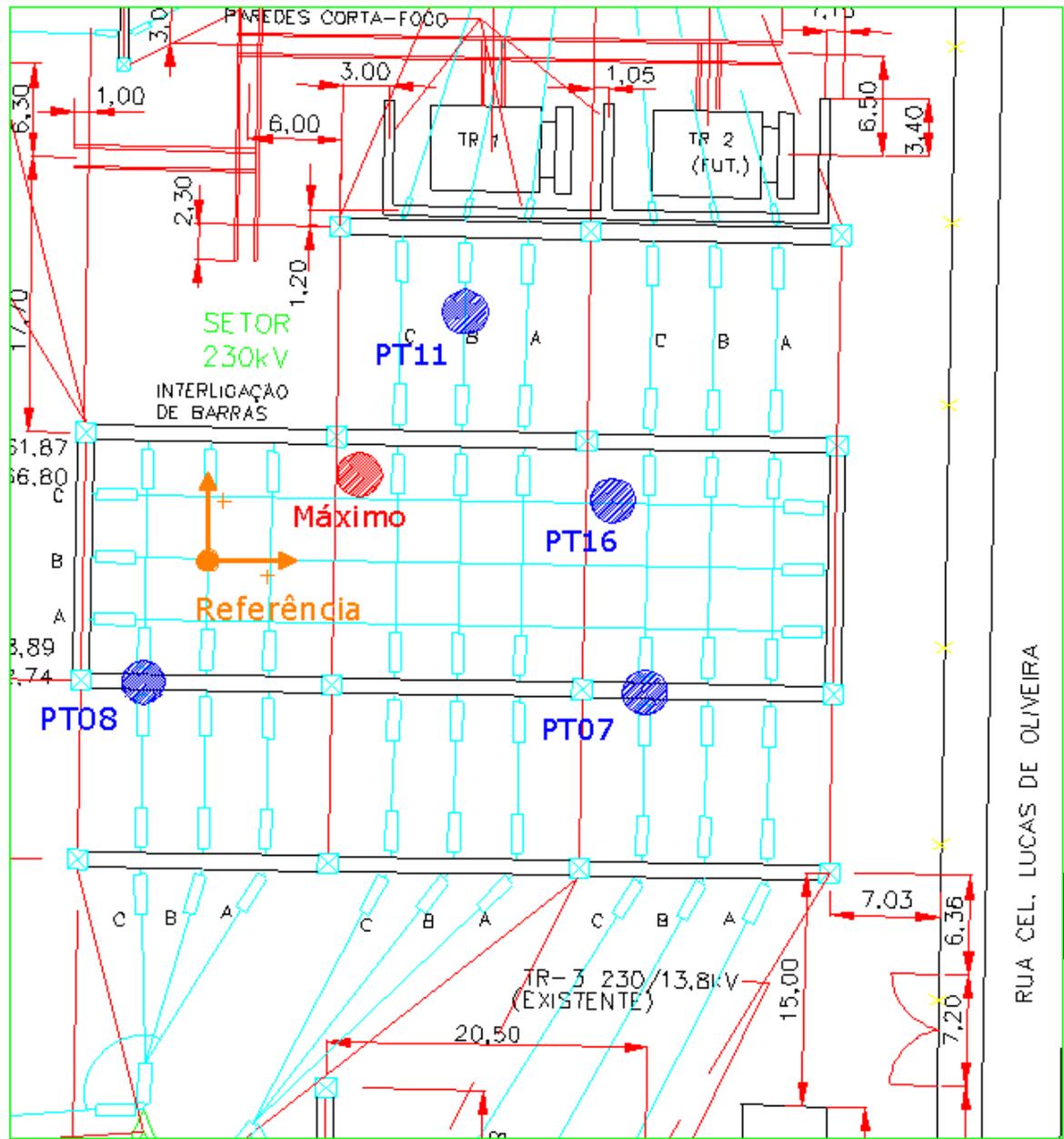
Ponto Medição	Campo Elétrico Máximo Calculado (kV/m)
7	8,16
8	7,77
11	7,52
16	8,63

Todos os pontos apresentam valores máximos superiores aos valores calculados para os pontos específicos. Isto demonstra uma lacuna que não é preenchida pelo método de medição do campo, pois mesmo com a realização de diversas medidas não foi possível definir um perfil do campo elétrico na subestação.

O ponto 16 apresentou valor máximo teórico calculado acima de 8,33 kV/m em 60Hz, valor estipulado na tabela 1. Este ponto máximo estaria localizado próximo as coordenadas 11 horizontal e 5 vertical tomando como centro o ponto de referência. Este ponto teórico pode ser visualizado na figura 22.

A identificação deste como um ponto relevante é coerente visto a disposição da sequência de fases do local, resultando que neste ponto ficam sobrepostas as duas fases ‘C’ do barramento e uma fase ‘C’ da linha de entrada.

Figura 22 – Identificação do ponto máximo teórico do campo elétrico na PAL10.



Fonte: Adaptado do acervo técnico da CEEE.

6.2. PERFIL DO CAMPO ELÉTRICO DA SUBESTAÇÃO PAL9.

Esta é uma subestação 13,8/69/230kV, e os setores de maior interesse são os de alta tensão, como o barramento principal de 230kV. Para esta subestação foi calculado diretamente o campo elétrico devido aos seis eletrodos posicionados mais próximos de cada ponto de medição e mais a contribuição da componente vertical devido aos barramentos

principais da subestação, visto que foi observada a correta aproximação deste método no caso da subestação PAL10.

Na subestação PAL9 foi realizado um total de 43 medições e na figura 23 é possível visualizar a subestação e todos os pontos de medição.

Figura 23 – Pontos de medição da subestação PAL9.



Fonte: Acervo técnico da CEEE.

Os pontos de maior interesse são aqueles que apresentam os maiores valores de campo elétrico e que tenham definido em projeto todos os dados necessários para os cálculos. Conseqüentemente foram escolhidos os pontos com maiores níveis de tensão e mais próximos do solo, de grandes massas metálicas e de cruzamentos de barramentos. São estes os pontos identificados como 25, 26, 27 e 40.

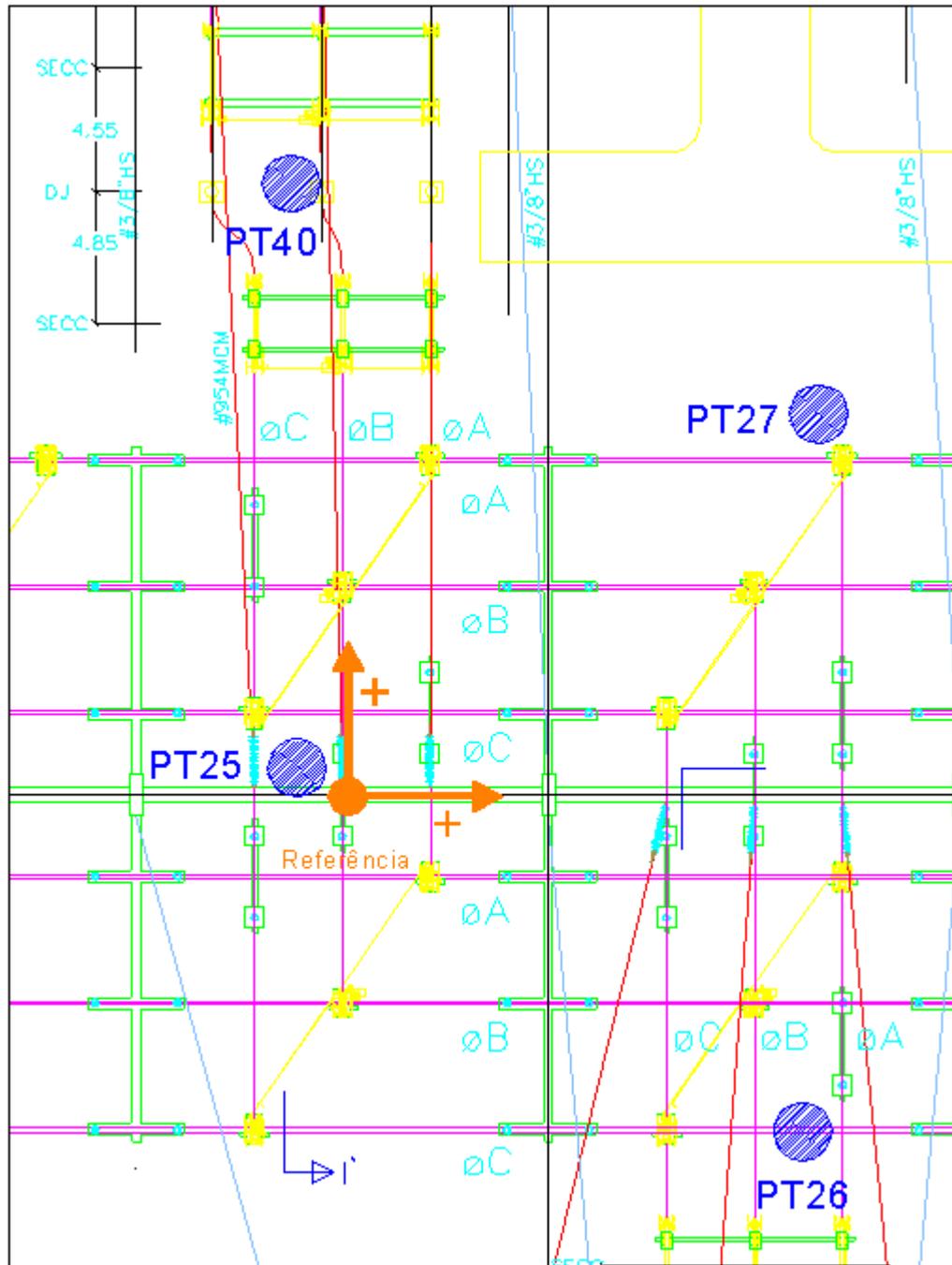
Para melhor visualização, é apresentada na figura 24 a planta baixa e na figura 25 a planta em corte, ambas da subestação PAL9 com a localização dos referidos pontos e a definição de um ponto de origem como referência para os posteriores cálculos que serão realizados.

Na tabela 2 são descritos os dados principais de cada ponto com valores de campo elétrico medido e a localização relativa para facilitar as referências dos cálculos.

Tabela 5 – Valores e localização dos pontos de medição da subestação PAL9.

Ponto de Medição	Campo Elétrico Medido (kV/m)	Posição Relativa Horizontal	Posição Relativa Vertical
25	8,980	-2	1,7
26	4,424	2,2	-11,3
27	8,470	17,3	13,9
40	3,673	-1,0	22,5

Figura 24 – Planta baixa da subestação PAL9.



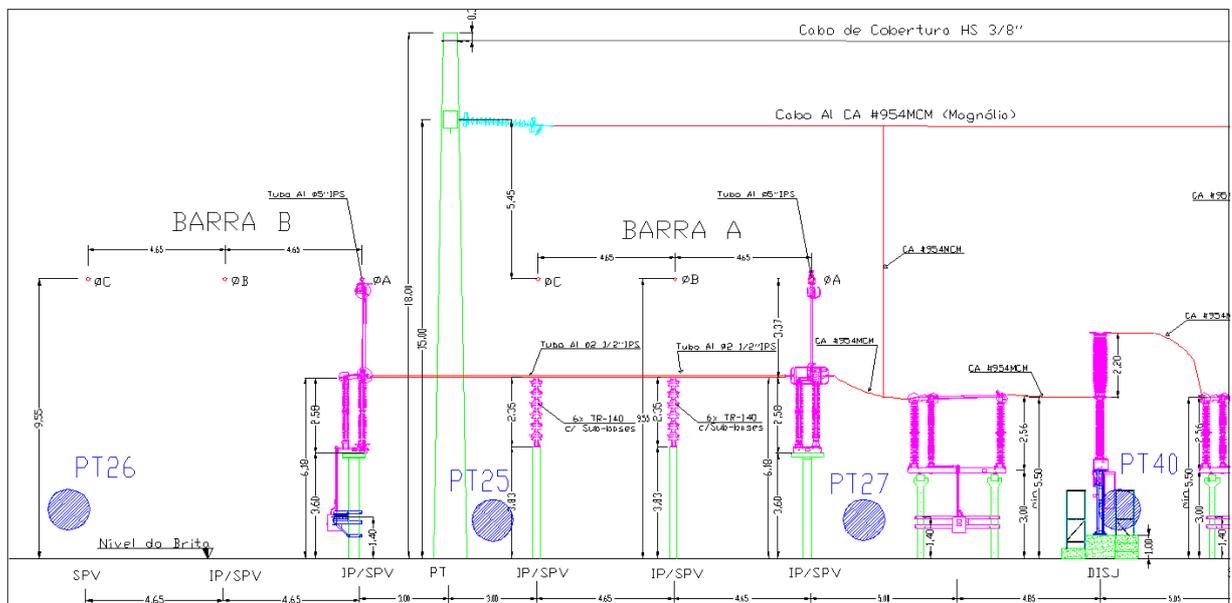
Fonte: Adaptado do acervo técnico da CEEE.

Todos os eletrodos considerados nos cálculos dessa subestação são energizados no nível de tensão de 230kV considerando uma variação de tensão de 5%. Os espaçamentos são: entre fases de 3,2m, entre diferentes barramentos de 8,6m, de 5,5m em relação ao solo no nível mais baixo e 6,18m no mais elevado. Todos os cálculos serão realizados com relação ao ponto identificado como “referência” na figura 24, e nesta mesma figura estão contidas as sequências de fases dos eletrodos que foram utilizadas

Para as linhas que passam sob todos os pontos foi considerado barramento rígido de 2 e ½ ” equivalente a um raio de 36,51mm.

Para o barramento principal foi considerado um barramento rígido de 5” equivalente a um raio de 70,65mm.

Figura 25 – Planta em corte da subestação PAL9.



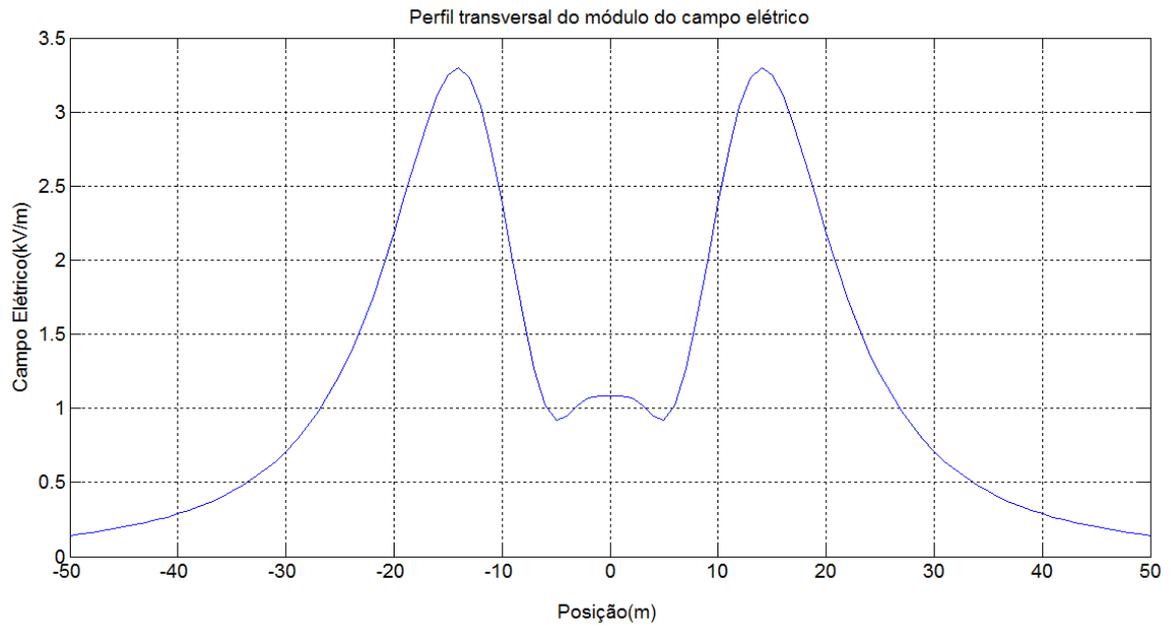
Fonte: Adaptado do acervo técnico da CEEE.

O perfil do campo elétrico devido somente aos barramentos principais é apresentado na figura 26.

Como o barramento está perpendicular aos condutores das linhas que ficam sob os pontos calculados, deverá ser observada a correta soma vetorial deste campo, assim como devem ser observadas e obedecidas as sequências de fases.

Neste caso em específico, foi observado também que existem seccionadoras verticais próximas ao ponto 25 que interligam o barramento principal aos demais eletrodos, com isso a altura relativa de uma das fases é reduzida modificando o perfil do barramento. Foi então definida a altura do eletrodo da fase A do barramento na altura de 6,18m.

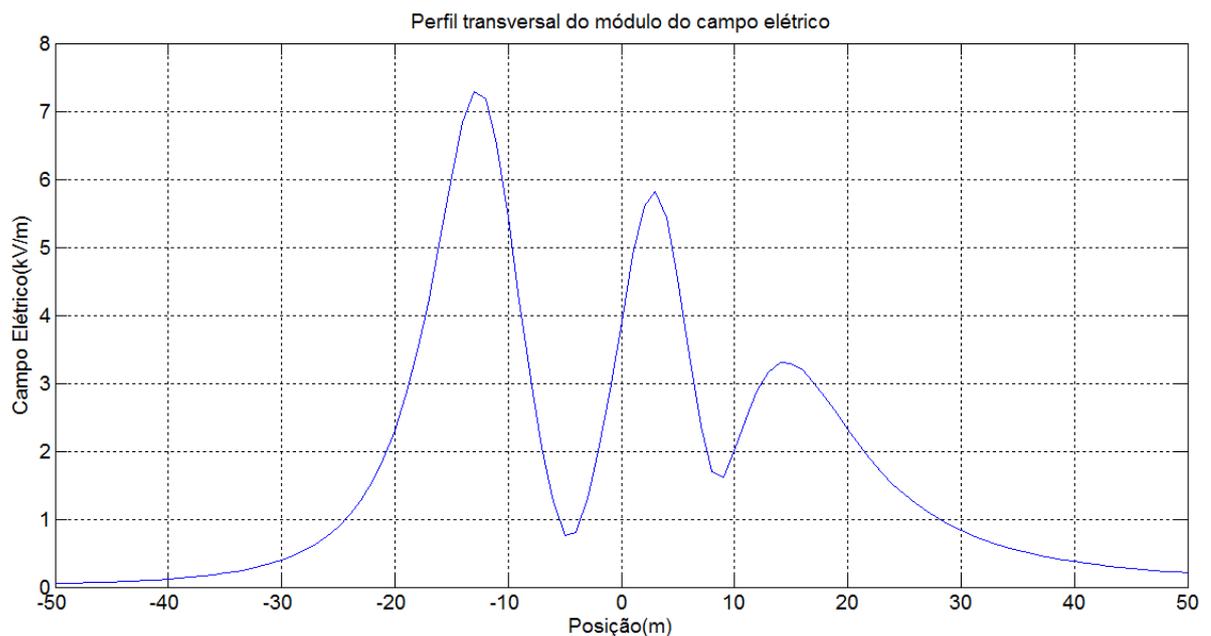
Figura 26 – Perfil do campo elétrico do barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

Devido à redução da altura pela posição das seccionadoras é apresentado o perfil do barramento modificado para os pontos próximos destes equipamentos, que neste caso será somente para o ponto 25. A figura 27 mostra o perfil do barramento principal modificado devido a esta alteração.

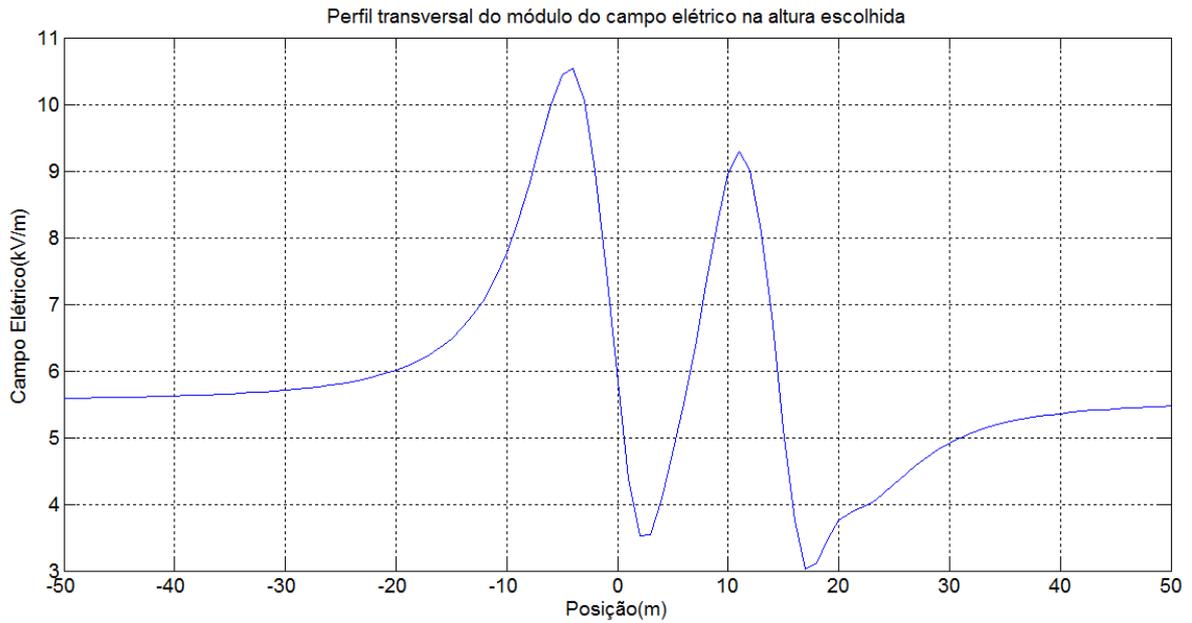
Figura 27 – Perfil do campo elétrico do barramento principal modificado.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 28 mostra o perfil do campo elétrico para o ponto 25 considerando seis eletrodos e o barramento principal modificado. Para os demais pontos será considerado no barramento principal o modelo apresentado na figura 26.

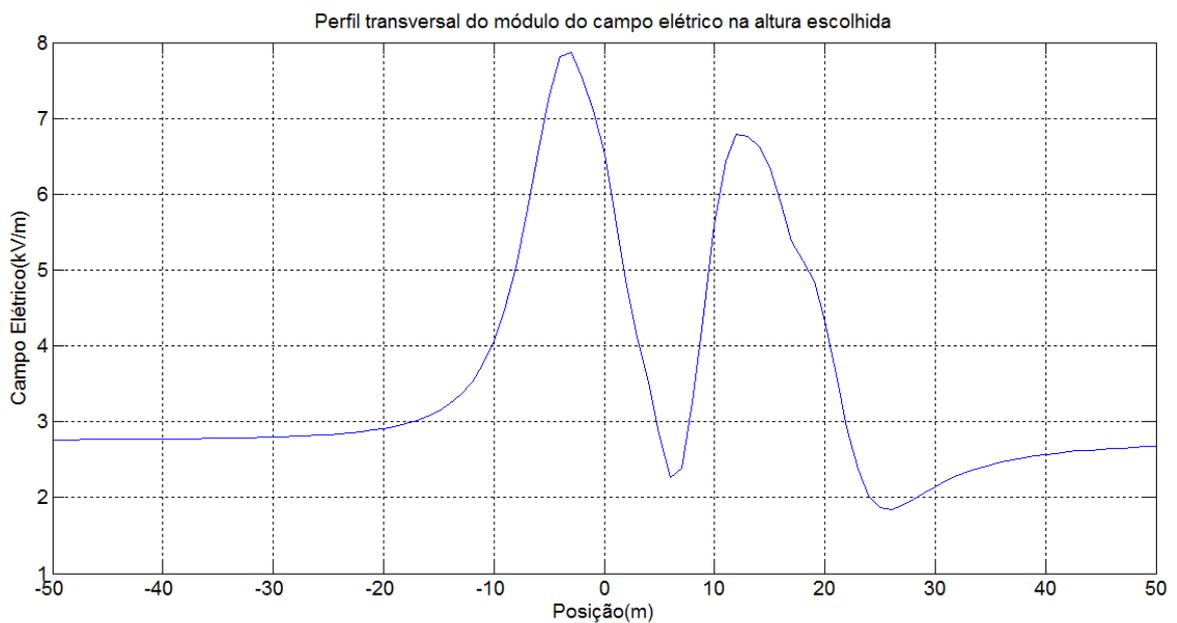
Figura 28 – Perfil do campo elétrico no ponto 25 com seis eletrodos e o barramento modificado.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 29 mostra o perfil do campo elétrico para o ponto 26 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

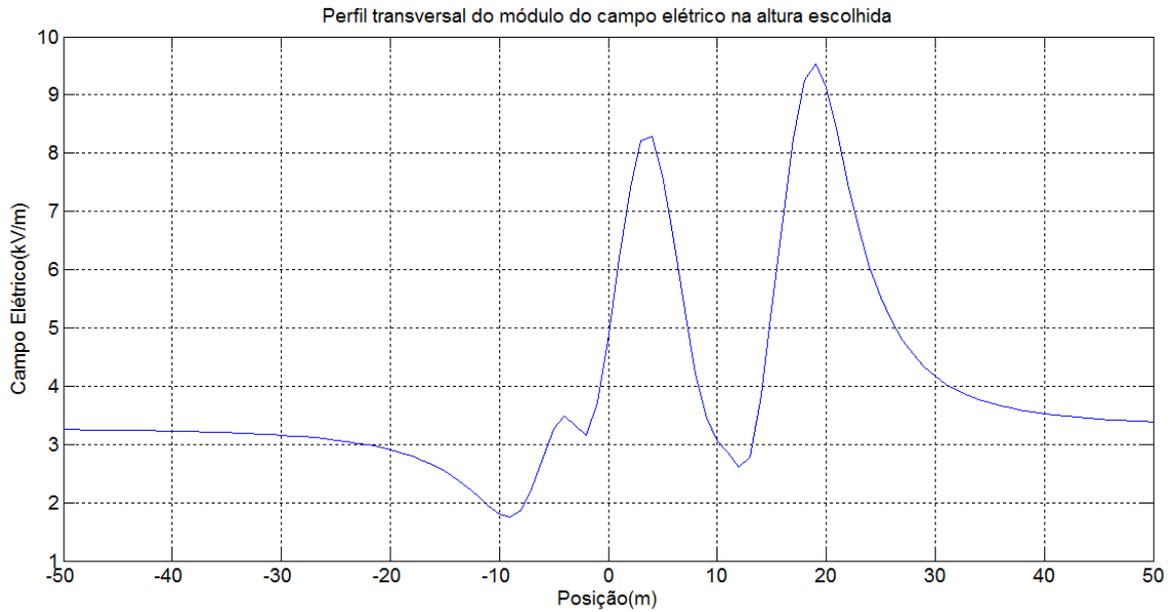
Figura 29 – Perfil do campo elétrico no ponto 26 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 30 descreve o perfil do campo elétrico para o ponto 27 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

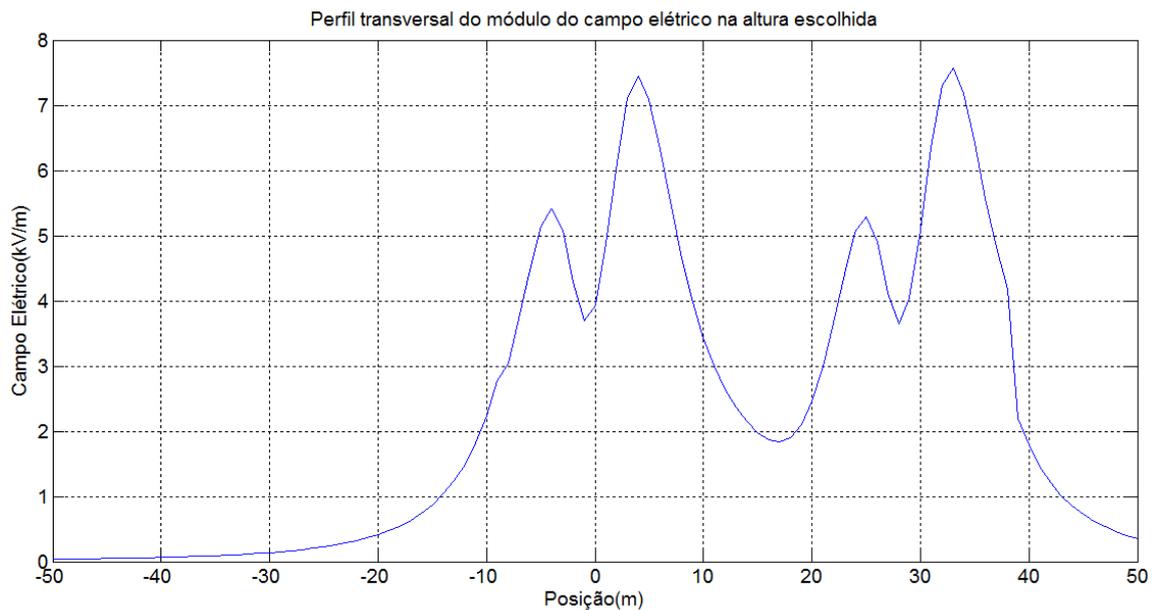
Figura 30 – Perfil do campo elétrico no ponto 27 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

A figura 31 descreve o perfil do campo elétrico para o ponto 40 considerando seis eletrodos e o barramento principal.

Figura 31 – Perfil do campo elétrico no ponto 40 com seis eletrodos e o barramento principal.



Fonte: Acervo do autor.

Após os cálculos das configurações está apresentado na tabela 6 uma comparação entre os valores calculados e os valores medidos em cada ponto.

Tabela 6 – Comparação entre medição e cálculo da subestação PAL9.

Ponto Medição	Campo Elétrico Medido (kV/m)	Campo Elétrico Calculado (kV/m)	Desvio %
25	8,980	8,846	-1,49%
26	4,424	4,639	4,86%
27	8,470	8,667	2,33%
40	3,673	3,696	0,63%

No cálculo do ponto 25 somente foi possível alcançar resultados próximos do valor medido considerando a redução do barramento principal devido a utilização de seccionadoras verticais muito próximas a este ponto. Contudo, como se trata de uma aproximação, deve ser utilizada com cautela em demais cálculos.

Com relação a todos os demais cálculos, esses apresentaram aproximação com erro relativo inferior a 5% demonstrando novamente bons resultados. Ainda deve-se observar pelo perfil que o campo varia muito com pequenas modificações de sua posição relativa isso até mesmo justificaria divergência devido à dificuldade de comparação do ponto medido e o ponto calculado.

Assim como apresentado na subestação PAL10, são apresentados na tabela 7 os valores de campo máximo nos perfis dos pontos calculados na PAL9.

Tabela 7 – Valores máximos calculados do campo elétrico na subestação PAL9.

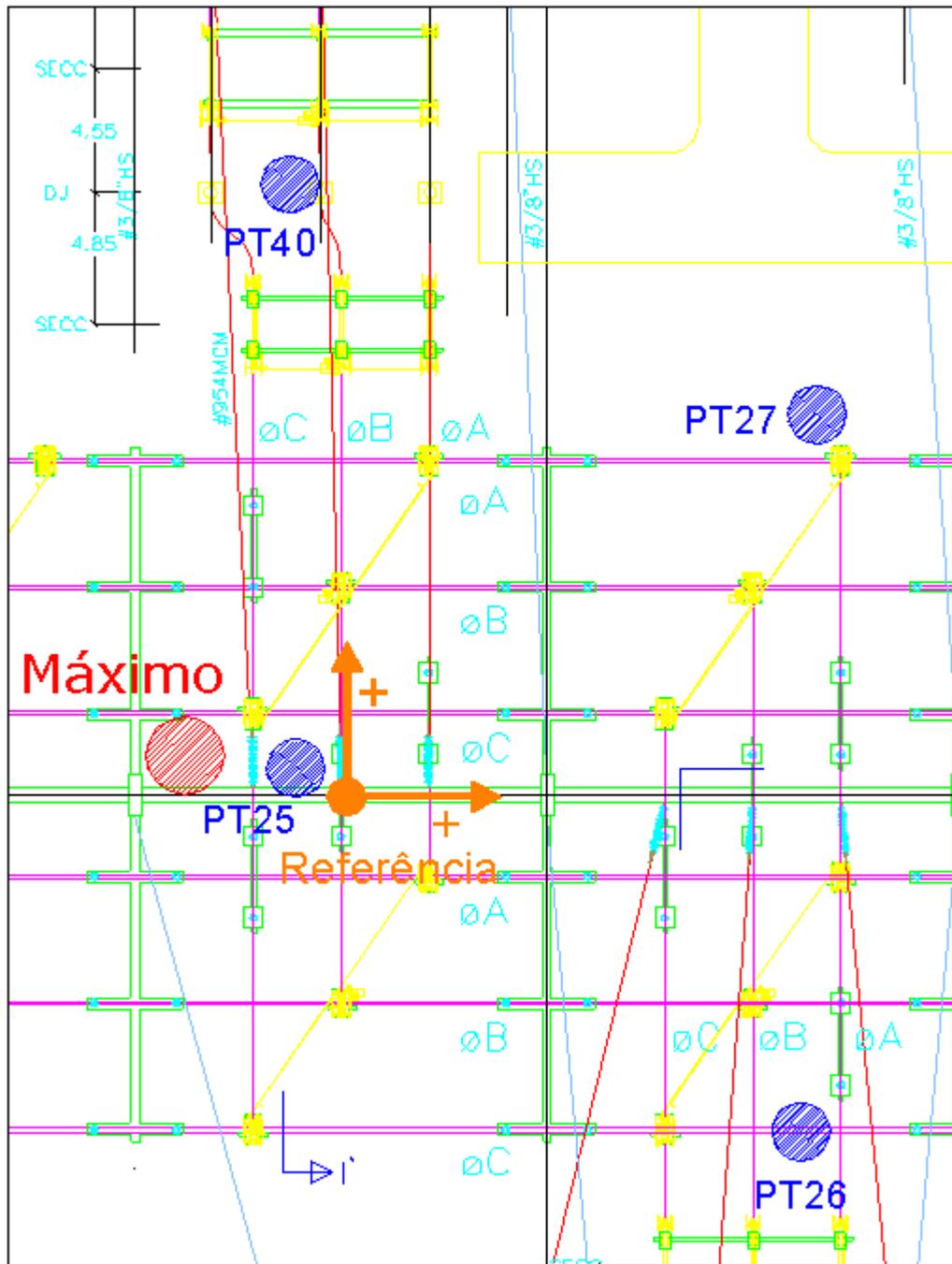
Ponto Medição	Campo Elétrico Máximo Calculado (kV/m)
25	10,38
26	7,86
27	9,53
40	7,57

Todos os pontos apresentam valores máximos superiores aos valores calculados para os pontos específicos. Isto demonstra uma lacuna que não é preenchida pelo método de medição do campo, pois mesmo com a realização de diversas medidas não foi possível definir um perfil do campo elétrico na subestação.

Os pontos 25 e 27 apresentaram valores máximo teórico calculados acima de 8,33 kV/m em 60Hz, valor estipulado na tabela 1. O ponto máximo do perfil calculado para o ponto 25 foi o mais elevado e estaria localizado próximo as coordenadas -5 horizontal e 1,75 vertical tomando como centro o ponto de referência. Este ponto teórico pode ser visualizado na figura 32.

A identificação desse ponto como um ponto relevante é coerente visto a disposição da sequência de fases do local, resultando que neste ponto ficam sobrepostas as fases 'C' do barramento e da linha de entrada, além disso, estão próximas a seccionadoras verticais que rebaixam a altura relativa do barramento principal.

Figura 32 – Identificação do ponto máximo teórico do campo elétrico na PAL9.



Fonte: Adaptado do acervo da CEEE.

6.3. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS LIMITES EXCEDIDOS.

Nas subestações PAL10 e PAL9 foram obtidos resultados do nível de campo elétrico pontual que ultrapassam os limites estabelecidos em norma. Na subestação PAL9 inclusive já tinham sido medidos nos pontos 25 e 27 níveis acima dos valores descritos na tabela 1.

A empresa responsável enviou os Relatórios de Conformidade, e, assim como verificado em demais relatório de outras empresas, utilizam o argumento de que garantem que os aterramentos das estruturas metálicas dos referidos locais estão adequados, e desta forma podem utilizar o fator 2 (dois) sobre os limites para exposição ocupacional, com isso o novo limite seria estabelecido em 16,66kV/m. Vale ressaltar que essa consideração no Relatório de Conformidade restringe-se a locais em que possam garantir, além do aterramento das estruturas metálicas, o acesso restrito somente ocupacional.

Contudo este fator de aumento do limite não está descrito de forma explícita no documento do ICNIRP [3] que define os limites estabelecidos em [2]. O Nível de Referência de campo elétrico para a População Ocupacional possui um fator de segurança adicional para minimizar as correntes por efeito indireto. O *Guidelines* do ICNIRP de 1998 [31] abordava a possibilidade de se adotar o valor de 16,67 kV caso se garanta o aterramento das estruturas metálicas não energizadas, contudo o novo *Guidelines* do ICNIRP de 2010 [3] não aborda essa possibilidade. Entretanto, como a metodologia científica que embasa estes limites não mudou, ainda há o entendimento técnico de que seria possível utilizar o valor de 16,67 kV/m com segurança. Contudo este fator e demais considerações não estão explícitos na legislação atual e também em suas referências.

Outra possibilidade que existe para a aceitação de níveis pontuais mais elevados, e com isso o uso de fatores como o exposto, poderia ser explicado pela necessidade de consideração de uma média espacial dos valores medidos, uma vez que o valor que ultrapassou o limite é pontual.

Para uma fonte muito localizada a uma distância de poucos centímetros do corpo, a distribuição do campo elétrico é não homogênea e a única forma para a avaliação da exposição é determinar o campo elétrico induzido naquele ponto em específico. Já quando a distância ultrapassa os 20 cm, que são os casos avaliados, a distribuição do campo torna-se menos localizada, e, mesmo que continue a ser não uniforme, já é possível determinar a média espacial no corpo exposto.

Com isso, a média espacial não deverá ultrapassar o nível de referência. A exposição local pode ultrapassar o nível de referência, mas, e este é um ponto muito importante, a

limitação básica definida pelo ICNIRP [3] não poderá ser ultrapassada, ainda que, as limitações básicas definidas sejam difíceis de serem checadas, pois se tratam de correntes elétricas internas ao corpo humano.

O ICNIPR [3] descreve que é uma competência dos organismos de normalização fornecer normas adicionais sobre situações de exposição específicas em que a determinação da média espacial pode ser aplicada. Essa orientação terá de ser baseada numa dosimetria bem estabelecida. Os organismos de normalização podem igualmente apresentar novos níveis de referência para tipos especiais de exposição não uniforme.

Resumindo, a situação atual das empresas quanto ao cumprimento da legislação é bastante complicada, pois existe uma legislação que define os limites e os níveis de referências ocupacionais de exposição a campos elétricos [2], contudo não existe a normatização devida.

Esta normatização deveria existir e deixar claro quais seriam os pontos a serem medidos ou calculados nas instalações e de que forma isto deve ser realizado. Assim como no caso de ultrapassarem os limites, quais seriam as medidas cabíveis ou até mesmo os pontos de exceção que possam existir. Esta indefinição gera diferentes métodos, considerações e interpretações da atual legislação.

7. RESULTADOS DO ALGORITMO DE CÁLCULO

Com base nas teorias e métodos apresentados foi desenvolvido um algoritmo de cálculo, elaborado no software MATLAB®, que é capaz de calcular o campo elétrico em subestações de alta tensão, que envolvem uma grande complexidade de distribuição de cargas, com um número limitado de modelagens. Desta forma este algoritmo apresenta uma resolução simplificada do cálculo do campo elétrico e como visto em comparação com as medidas realizadas, alcançou um desvio da ordem máxima de 7,9%, o que é preciso o suficiente para serem definidos perfis e os pontos críticos do campo elétrico nas subestações.

Os resultados dos cálculos das subestações foram bastante próximos aos casos de medição no local sendo utilizada a distribuição de cargas bastante limitada. Foram considerados poucos eletrodos em cada caso, no pior caso foram utilizados quinze eletrodos. Métodos numéricos como MEF e MSC necessitariam de muitos mais pontos e maior capacidade de processamento para executarem o mesmo procedimento.

Com a utilização do algoritmo é possível a apresentação de um perfil do campo sendo possível definir os pontos de maior campo elétrico previamente. Dessa forma é possível reduzir drasticamente a quantidade de pontos a serem medidos em cada instalação. Como pode ser visto no documento completo das medições realizadas pela CEEE [32], foram realizadas medições em um total de 58 subestações, totalizando 2490 pontos de medição, dos quais foram enviados somente parte deles a ANEEL. Com a utilização do método para a definição da distribuição do campo elétrico em cada subestação seria possível, de forma conservadora, a definição de aproximadamente 15 pontos críticos em que seria necessária a medição local. Isto resultaria em um total de 870 pontos a serem medidos, o que significaria uma redução de aproximadamente 65 % do número de pontos a serem medidos. Além disso, fica assegurada a medição dos locais onde é mais provável a incidência dos maiores valores de campo elétrico devido à definição prévia do perfil do campo. Isso é um importante contraponto pois no método utilizado para a medição, dependia-se da identificação, pelo operador do instrumento, do local que este considerava de provável maior campo elétrico.

Essa modelagem também pode ser utilizada na elaboração de projeto de subestações, pois uma vez definido o perfil do campo é possível a alteração de parâmetros para a escolha do melhor sequenciamento de fases, da melhor disposição de componentes da subestação e da altura mínima do nível do solo. Também é possível observar qual a influência relativa de cada alteração do projeto nos níveis de campo elétrico apresentados. Desta forma este algoritmo de cálculo contribui para a execução de melhores projetos de subestações de AT.

8. CONCLUSÕES

Sobre a influência dos campos elétricos nos seres vivos conclui-se que todos os efeitos agudos devidamente comprovados não ocorrem abaixo dos limites do campo elétrico definidos e podem ser evitados se forem respeitadas as limitações básicas sobre campos elétricos induzidos no corpo. A prevenção destes efeitos é obtida através da definição de níveis de referência.

Um passo importante nesta área no Brasil foi a publicação em 05 de Maio de 2009 a Lei Nº 11.934, que estabelece limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos [12], tendo como resultado claro que todas as entidades do setor deverão respeitar os limites estabelecidos.

A necessidade de proteção prévia do ser humano soma-se a importância do cálculo do campo elétrico em instalações de alta tensão e com isso se torna uma etapa indispensável dos projetos de subestações. Os níveis de campos elétricos podem influenciar diretamente as dimensões da subestação, as dimensões dos cabos e barramento, as blindagens eletromagnéticas e com isso podem impactar de forma relevante no custo das instalações.

Para o cálculo do campo elétrico existem diversos métodos, o mais adequado conforme estudos teóricos, para as subestações de alta tensão isoladas a ar, é o MCE. Este método apresenta facilidade em seu uso, pois necessita basicamente da entrada de três variáveis que são a posição relativa, o potencial elétrico e o raio das cargas consideradas. Com isso o algoritmo calcula então a matriz de potenciais relativos que será base para o cálculo da matriz de capacitância, e obtém a partir destes dados a matriz de cargas equivalentes e assim realiza a definição do potencial do campo elétrico em cada ponto.

Devido à praticidade do cálculo e ao número reduzido de distribuições de cargas necessárias para serem alcançadas uma aproximação dos valores medidos o MCE provou sob condições reais e práticas ser adequado para o cálculo do campo elétrico em subestações de alta tensão.

Foi observado que para uma correta aproximação dos cálculos em relação a pontos medidos é necessária a consideração dos eletrodos das linhas mais próximas e dos barramentos principais da subestação. Contudo, como o ponto onde existe o barramento principal é o mais crítico para níveis de campo elétrico nos casos analisados, é possível afirmar que o número máximo de eletrodos a serem considerados para o cálculo satisfatório em qualquer ponto das subestações analisadas será de 15 eletrodos.

Com a utilização do algoritmo para a realização dos cálculos de forma iterativa, foi possível a montagem rápida, com pequenas alterações, de três diferentes modelagens na subestação PAL10. O algoritmo tornou prática a análise e conclusões de cada ponto alterado conforme consideradas distribuições de cargas distintas. Foi possível também analisar as alterações dos valores de campo elétrico para as variações das posições relativas e diferentes sequências de fase.

Os resultados numéricos finais, em comparação com os dados das medições, apresentaram erro percentual inferiores a 7,9% conforme tabelas 3 e 6. Devido a grande complexidade de influências no campo elétrico em subestações de alta tensão, este percentual é considerado baixo, e aceitável para a verificação de um perfil similar ao que será encontrado caso sejam realizadas infinitas medições.

Sempre existirá diferença entre os dados medidos e calculados, contudo com a utilização do algoritmo é possível a apresentação de um perfil do campo sendo possível definir os pontos de maior campo elétrico previamente. Dessa forma é possível reduzir drasticamente a quantidade de pontos críticos e somente estes necessitariam ser medidos em cada instalação.

Para o cálculo de configurações mais complexas com diferentes disposições, o algoritmo montado requer cuidado na definição das variáveis, pois como este foi elaborado para uma distribuição em duas dimensões, deve-se a cada mudança de orientação, observar a correta disposição dos componentes e das sequências de fases.

Como oportunidades de melhoria foram identificadas as possibilidades de automatização e otimização do código do algoritmo e a utilização das três dimensões das coordenadas cartesianas no cálculo do campo elétrico, essas possibilidades e seus benefícios são descritas a seguir.

A automatização da entrada de dados deste algoritmo pode ser feita pela alteração de poucas linhas de código do algoritmo e irá tornar o algoritmo mais amigável e de fácil uso.

A otimização do algoritmo resultará na redução de códigos utilizados com objetivo de diminuir o tempo de processamento e o número de linhas do código, tornando o algoritmo mais claro e com menor tamanho digital de armazenamento.

O uso das coordenadas de entrada em três dimensões e realização de todo o cálculo para o perfil do campo em três dimensões da subestação requer mudanças significativas no código. Contudo essa alteração facilitaria muito na entrada de dados de componentes do cálculo em diferentes coordenadas como nos casos dos barramentos principais que estão perpendiculares as linhas dos alimentadores de cada circuito, assim como reduziria

consideravelmente a possibilidade de falha na inserção de dados e consequentes erros de cálculo.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Boletim de Informações Gerenciais: 1º trimestre de 2016. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/publicacoes/>>. Acessado em: set. 2016.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL Nº 398 de 23 de março de 2010. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf>>. Acessado em: nov. 2016.
- [3] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines For Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz – 100 KHz). Health Physics, Lexington, 2010 99(6): 818-836; 2010;
- [4] de MEDEIROS, L. H. A.; ANJOS, A. D. F.; SILVEIRA, C. A. ET AL. Occupational Exposure In Typical 69/13,8 kV Brazilian Substations. In: ON BIOLOGICAL EFFECTS OF ELETROMAGNETIC FIELDS – 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP (2004: Kos Island). Proceeding, Kos-Grécia, 2004. V. 2. P. 600-606.
- [5] MACHADO, Angelo B. M. Neuroanatomia funcional. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2006.
- [6] KOROBKOVA, V. P., MOROZOV, A., STOLAROV, A., YAKUB, A. Influence of electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection. Report 23-06, CIGRE (1972).
- [7] WERTHEIMER, N.; LEEPER, W. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol*, v., 109, n. 3, p. 273-284, 1979.
- [8] NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES. Research and Public Information Dissemination (RAPID). North Carolina, Sept. 2004. Disponível em: <http://www.niehs.nih.gov/health/materials/electric_and_magnetic_fields_associated_with_the_use_of_electric_power_questions_and_answers_spanish_508.pdf>. Acessado em: nov. 2016.
- [9] ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Fact Sheet* Nº 205. Nov. 1998. Disponível em: <http://monit.it.pt/downloads/file109_pt.pdf>. Acessado em: nov. 2016.
- [10] ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Proceedings International Workshop on EMF Hypersensitivity. Prague, Czech Republic, Oct. 2004. Disponível em: <http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/EHS_Proceedings_June2006.pdf>. Acessado em; dez. 2016.
- [11] ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Environmental Health Criteria 238 – ELF Fields, 2007. Disponível em: <http://www.who.int/peh-emf/publications/Compleet_DEC_2007.pdf>. Acessado em: nov. 2016.

- [12] BRASIL. Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009 - Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Casa Civil da Presidência da República do Brasil, Brasília, maio 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/111934.htm>. Acessado em: nov. 2016.
- [13] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Campos Elétricos e Magnéticos. Publicador de conteúdo web, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/campos-eletricos-e-magneticos1>>. Acessado em: nov. 2016.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 25.415:2016 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz. Rio de Janeiro, 2016.
- [15] BRASIL. Informativo Nº 829: Repercussão Geral Princípio da precaução e campo eletromagnético. Superior Tribunal Federal, Brasília, maio 2016. Disponível em: <<http://www.stf.jus.br/arquivo/informativo/documento/informativo829.htm>>. Acessado em: nov. 2016.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 61000-4-3:2014 – Compatibilidade Eletromagnética (EMC). Rio de Janeiro, 2014.
- [17] CHRISTOPOULOS, Christo. Transmission Line Modeling Method: TLM, *Volume 8 de IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, Wiley, 1995.
- [18] SILVEIRA, Cristiane Abreu. 2004. 191f. Uma Contribuição a Avaliação de Acoplamentos Eletromagnéticos em Subestações do Sistema Elétrico. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- [19] INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRÉ). General Guidelines for the Design of Outdoor AC Substations: Working Group 23.03. Paris: August 2000.
- [20] S. RAO. Electrical Substation: Engineering & Practice – EHV-AC, HVDC & SF6 GIS. Third Edition. Vasandani: Khanna Publishers, 1999.
- [21] GRIGSBY, L. L. Electric Power Substations Engineering. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [22] ALBURGUETTI, Livia Maria. 2013. 91f. Influência dos campos elétricos e magnéticos no projeto eletromecânico de subestações de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2013.
- [23] FILHO, Oscar Kastrup. JARDINI, José A.. SILVA, Rulemar P.. COSENTINO, Aldo. Subestações de 500kV da Eletrosul: Coordenação de isolamento.in: IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, grupo VIII. Rio de Janeiro, 1977. P. 1-56.

- [24] TRANSMISSION Line Reference Book, 345kV and Above, Second Edition, EPRI TL-2500, EPRI, Palo Alto, CA, 1982.
- [25] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física básica, vol. 3, 1ª edição, São Paulo, Edgard Blucher, 1997.
- [26] SADIKU, Matthew N. O. Elementos do Eletromagnetismo; tradução: Jorge Amoretti Lisboa, Liane Ludwig Loder. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- [27] INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRÉ). Technical brochure 21 – Electrical and Magnetic Field produced by Transmission Systems – Description of Phenomena – Practical Guide for Calculation, Paris, 1980.
- [28] PINHO, Antônio Carlos. 1994. 105f. O Cálculo do campo elétrico em 2D gerado por linhas de transmissão e o efeito em seres vivos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1994.
- [29] MARTINS, Alin do Amaral. 2012. 107f. Mapeamento do Campo Elétrico de uma Subestação usando a técnica dos elementos finitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.
- [30] FAIZ, J., OJAGHI, M. Instructive Review of Computation of Electric Fields using Different Numerical Techniques. In: Int. J. Engng Ed. Vol. 18, Nº 3, pp 344-356, 2002;
- [31] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines For Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (Up to 300GHz). Health Physics, Lexington, 1998 74(4): 494-522; 1998;
- [32] COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (Brasil). Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações. Porto Alegre, dez 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/campos-eletricos-e-magneticos1>>. Acessado em: nov. 2016.

APÊNDICE – ALGORITMOS DE CÁLCULO NO MATLAB

ALGORITMO DE CÁLCULO MODELAGEM I

```

%ALGORITMO DE CALCULO PARA 3 BARRAS PARALELAS - MODELAGEM I
%
%
%DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS:
%r-raio do condutor das fases;
%E- campo vetorial intensidade de campo elétrico da posição escolhida
anteriormente;
%Ece- matriz que armazena o módulo do campo vetorial intensidade de campo
elétrico para cada elemento de xp;
%Eo- permissividade elétrica do vácuo;
%ET- módulo total do campo vetorial intensidade de campo elétrico
%ETx- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção ax
%ETz- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção az
%Ex- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção ax
%Ey- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção az
%h- altura em relação ao nível do sólo, orientada no eixo Z;
%k,j- índice matricial;
%Mod- Tensão Elétrica de Linha em KV;
%P(k,j)- matriz que designa os potenciais de Maxwell;
%pol- matriz que envolve as densidades lineares de carga das fases A,B e C;
%pos- um valor de posição para o cálculo do campo elétrico num ponto
qualquer desejado;
%V- matriz que envolve os potenciais das fases A,B e C;
%Vas- potencial da fase A, em kv;
%Vbs- potencial da fase B, em kv;
%Vcs- potencial da fase C, em kv;
%x-distância entre as fases, orientada em relação ao eixo X, preferencia
colocar a fase b em x=0 para centraliar gráficos;
%xp- matriz que dá a variação da posição X;
%h- altura das fases em relação ao sólo;
%w- índice das matrizes de componentes x e y do campo elétrico
clear;
x=[4.5 0 -4.5];%distância entre as fases, orientada em relação ao eixo X
y=[5.5 5.5 5.5];%altura das fases em relação ao sólo
r1=0.01428;%raio de apenas um condutor
R=0.075;%raio geométrico do conjunto de condutores
m=2;%numero de condutores por fase
req=(m*r1*R^(m-1))^(1/m);%raio equivalente para o conjunto de cabos
r=0.01428;%raio utilizado do condutor das fases
Eo=8.854e-12;%permissividade elétrica do vácuo
%
%cálculo da matriz dos potenciais de maxwell, [P]
for k=1:3
    for j=1:3
        if k==j
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*log((2*y(k))/r);
        else
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*(log((((x(k)-
x(j))^2+(y(k)+y(j))^2)^(0.5))/((x(k)-x(j))^2+(y(k)-y(j))^2)^(0.5))));
        end
    end
end

```

```

end
%
%cálculo da matriz capacitância, [C]
C=inv(P);
%
%definição dos potenciais das fases
Mod=230*1,05/sqrt(3); %tensão de linha em kV, divide por raiz de 3 para
tensão de fase, e usa 5% de sobretensão
Vas=Mod;%potencial da fase a, em KV
Vbs=Mod*(-0.5-0.866i);%potencial da fase b em, KV
Vcs=Mod*(-0.5+0.866i);%potencial da fase c em, KV
V=[Vas; Vbs; Vcs]; % matriz potenciassi fases e sequencia valores em KV
pol=C*V;%calculo das densidades lineares de carga, em KC/m * 2piEo
%
h=1.5;%altura em relação ao solo definida
pos=-3.8; %ponto de calculo em x fixado
%cálculo do campo elétrico em um ponto 'pos'
for a=1:3
    Exc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
    ((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
    Eyc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((h-y(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
    ((h+y(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
end
Estx=Exc(1)+Exc(2)+Exc(3);
Esty=Eyc(1)+Eyc(2)+Eyc(3);
Emod=sqrt(real(Estx)^2+imag(Estx)^2+real(Esty)^2+imag(Esty)^2);
disp(['o campo elétrico no ponto desejado é: ' num2str(Emod) 'KV/m'])
%Ece = matriz que recebe o módulo do campo eletrico
xp=[-50:50]; % matriz que dá a variação da posição X;
for w=1:101
    Ex(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((xp(w)-x(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-
y(1))^2))-((xp(w)-x(1))/((xp(w)-
x(1))^2+(h+y(1))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h-y(2))^2))-((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((xp(w)-x(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h-y(3))^2))-((xp(w)-x(3))/((xp(w)-x(3))^2+(h+y(3))^2))));
    Ey(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((h-y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-y(1))^2))-
    ((h+y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h+y(1))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((h-
y(2))/((xp(w)-x(2))^2+(h-y(2))^2))-((h+y(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((h-y(3))/((xp(w)-x(3))^2+(h-
y(3))^2))-((h+y(3))/((xp(w)-x(3))^2+(h+y(3))^2))));
    Etxp(w)=real(Ex(w))+imag(Ex(w));
    Etyp(w)=real(Ey(w))+imag(Ey(w));
    Etx(w)=sqrt((real(Ex(w))^2+(imag(Ex(w))^2));
    Ety(w)=sqrt((real(Ey(w))^2+(imag(Ey(w))^2));
    ET(w)=sqrt(real(Ey(w))^2+imag(Ey(w))^2+real(Ex(w))^2+imag(Ex(w))^2);
end
%impressão dos resultantes do campo na componente x, y e modulo do campo
figure(1)
subplot(2,1,2),plot(xp,ET)
title(['Perfil transversal do módulo do campo elétrico'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,1),plot(xp,Etx)
title(['Perfil transversal da coordenada X do campo elétrico '])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,2),plot(xp,Ety)
title(['Perfil transversal da coordenada Y do campo elétrico'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')

```

ALGORITMO DE CÁLCULO MODELAGEM II

```

%
%DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS:
%r-raio do condutor das fases;
%E- campo vetorial intensidade de campo elétrico da posição escolhida
anteriormente;
%Ece- matriz que armazena o módulo do campo vetorial intensidade de campo
elétrico para cada elemento de xp;
%Eo- permissividade elétrica do vácuo;
%ET- módulo total do campo vetorial intensidade de campo elétrico
%ETx- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção ax
%ETz- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção az
%Ex- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção ax
%Ey- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção az
%h- altura em relação ao nível do sólo, orientada no eixo Z;
%k,j- índice matricial;
%Mod- Tensão Elétrica de Linha em KV;
%P(k,j)- matriz que designa os potenciais de Maxwell;
%pol- matriz que envolve as densidades lineares de carga das fases A,B e C;
%pos- um valor de posição para o cálculo do campo elétrico num ponto
qualquer desejado;
%V- matriz que envolve os potenciais das fases A,B e C;
%Vas- potencial da fase A, em kv;
%Vbs- potencial da fase B, em kv;
%Vcs- potencial da fase C, em kv;
%x-distância entre as fases, orientada em relação ao eixo X, preferencia
colocar a fase b em x=0 para centraliar gráficos;
%xp- matriz que dá a variação da posição X;
%h- altura das fases em relação ao sólo;
%w- índice das matrizes de componentes x e y do campo elétrico
clear;
x=[-4.5 0 4.5 11.5 16 20.5];%distância entre as fases, orientada em relação
ao eixo X - posição horizontal
y=[5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5];%altura das fases em relação ao sólo - posição
vertical
r1=0.033;%raio de apenas um condutor
R=0.3;%raio geométrico
m=3;%numero de condutores por fase
req=(m*r1*R^(m-1))^(1/m);%raio equivalente par conjunto de cabos
r=0.01428;%raio do condutor das fases
Eo=8.854e-12;%permissividade elétrica do vácuo
%
%cálculo da matriz dos potenciais de maxwell, [P]
for k=1:6
    for j=1:6
        if k==j
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*log((2*y(k))/r);
        else
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*(log((((x(k)-
x(j))^2+(y(k)+y(j))^2)^(0.5))/((x(k)-x(j))^2+(y(k)-y(j))^2)^(0.5))));
        end
    end
end
%
%cálculo da matriz capacitância, [C]
C=inv(P);

```

```

%
%definição dos potenciais das fases
Mod=230*1.05/sqrt(3); %tensão de linha em kV, divide por raiz de 3 para
tensao de fase, e usa 5% de sobretensão
Vas=Mod;%potencial da fase a, em KV
Vbs=Mod*(-0.5-0.866i);%potencial da fase b em, KV
Vcs=Mod*(-0.5+0.866i);%potencial da fase c em, KV
V=[Vcs; Vbs; Vas; Vcs; Vbs; Vas;]; %valores em KV
pol=C*V;%calculo das densidades lineares de carga, em KC/m * 2piEo
%
h=1.5;%altura em relação ao solo definida fixa
pos=-3.8; %ponto de calculo em x fixado
%cálculo do campo elétrico em um ponto 'pos'
%pos=input('entre com a posição em relação ao eixo x para o calculo do
campo vetorial intensidade de campo elétrico num ponto genérico: ');
for a=1:6
    Exc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
    Eyc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((h-y(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
((h+y(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
end
Estx=Exc(1)+Exc(2)+Exc(3)+Exc(4)+Exc(5)+Exc(6);
Esty=Eyc(1)+Eyc(2)+Eyc(3)+Eyc(4)+Eyc(5)+Eyc(6);
Emod=sqrt(real(Estx)^2+imag(Estx)^2+real(Esty)^2+imag(Esty)^2);
disp(['o campo elétrico no ponto desejado é: ' num2str(Emod) 'KV/m'])
%Ece = matriz que recebe o módulo do campo eletrico
xp=[-50:50];% matriz que dá a variação da posição X;
for w=1:101
    Ex(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((xp(w)-x(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-
y(1))^2))-((xp(w)-x(1))/((xp(w)-
x(1))^2+(h+y(1))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h-y(2))^2))-((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((xp(w)-x(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h-y(3))^2))-((xp(w)-x(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h+y(3))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(4)*(((xp(w)-x(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h-y(4))^2))-((xp(w)-x(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h+y(4))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(5)*(((xp(w)-x(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h-y(5))^2))-((xp(w)-x(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h+y(5))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(6)*(((xp(w)-x(6))/((xp(w)-
x(6))^2+(h-y(6))^2))-((xp(w)-x(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h+y(6))^2))));
    Ey(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((h-y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-y(1))^2))-
((h+y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h+y(1))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((h-
y(2))/((xp(w)-x(2))^2+(h-y(2))^2))-((h+y(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((h-y(3))/((xp(w)-x(3))^2+(h-
y(3))^2))-((h+y(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h+y(3))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(4)*(((h-y(4))/((xp(w)-x(4))^2+(h-
y(4))^2))-((h+y(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h+y(4))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(5)*(((h-y(5))/((xp(w)-x(5))^2+(h-
y(5))^2))-((h+y(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h+y(5))^2))))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(6)*(((h-y(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h-
y(6))^2))-((h+y(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h+y(6))^2))));
    Etxp(w)=real(Ex(w))+imag(Ex(w));
    Etyp(w)=real(Ey(w))+imag(Ey(w));
    Etx(w)=sqrt((real(Ex(w)))^2+(imag(Ex(w)))^2);
    Ety(w)=sqrt((real(Ey(w)))^2+(imag(Ey(w)))^2);
    ET(w)=sqrt(real(Ey(w))^2+imag(Ey(w))^2+real(Ex(w))^2+imag(Ex(w))^2);
end
%impressão dos resultantes do campo na componente x, y e modulo do campo
figure (1)
subplot(2,1,2),plot(xp,ET)

```

```

title (['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,1),plot(xp,ETx)
title (['Perfil transversal da coordenada X do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,2),plot(xp,ETy)
title (['Perfil transversal da coordenada Y do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
figure (2)
plot(xp,ET)
title (['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')

```

ALGORITMO DE CÁLCULO MODELAGEM III

```

%ALGORITMO DE CALCULO PARA 6 BARRAS PARALELAS MAIS 6 BARRAS TRASNVERSAIS
NORMALMENTE CONSIDERADAS DOS BARRAMENTOS- MODELAGEM III
%
%
%DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS:
%r-raio do condutor das fases;
%E- campo vetorial intensidade de campo elétrico da posição escolhida
anteriormente;
%Ece- matriz que armazena o módulo do campo vetorial intensidade de campo
elétrico para cada elemento de xp;
%Eo- permissividade elétrica do vácuo;
%ET- módulo total do campo vetorial intensidade de campo elétrico
%ETx- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção ax
%ETz- módulo das componentes reais e imaginárias do campo vetorial
intensidade de campo elétrico na direção az
%Ex- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção ax
%Ey- componente real e imaginária do campo vetorial intensidade de campo
elétrico na direção az
%h- altura em relação ao nível do sólo, orientada no eixo Z;
%k,j- índice matricial;
%Mod- Tensão Elétrica de Linha em KV;
%P(k,j)- matriz que designa os potenciais de Maxwell;
%pol- matriz que envolve as densidades lineares de carga das fases A,B e C;
%pos- um valor de posição para o cálculo do campo elétrico num ponto
qualquer desejado;
%V- matriz que envolve os potenciais das fases A,B e C;
%Vas- potencial da fase A, em kv;
%Vbs- potencial da fase B, em kv;
%Vcs- potencial da fase C, em kv;
%x-distância entre as fases, orientada em relação ao eixo X, preferencia
colocar a fase b em x=0 para centraliar gráficos;
%xp- matriz que dá a variação da posição X;
%h- altura das fases em relação ao sólo;
%w- índice das matrizes de componentes x e y do campo elétrico

```

```

%índice 1 utilizado nas variáveis para a linha.
clear;
x=[-4 0 4 -4 0 4];%distância entre as fases das linhas transversaisao ponto
de calculo do perfil
y=[12.5 12.5 12.5 19.5 19.5 19.5];%altura das fases em relação ao sólo
r1=0.01428;%raio de um condutor do barramento
R=0.175;%raio geométrico do barramento
m=2;%numero de condutores por fase do barramento
req=(m*r1*R^(m-1))^(1/m);%raio equivalente para o conjunto de cabos do
barramento
r=req; % raio equivalente dos condutor das fases utilizado
Eo=8.854e-12;%permissividade elétrica do vácuo
%
x1=[-4.5 0 4.5 11.5 16 20.5];%distância entre as fases das linhas paralelas
ao ponto de calculo do perfil
y1=[5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5];%altura das fases em relação ao sólo
r8=0.01428;%raio do condutor das fases
%cálculo da matriz dos potenciais de maxwell, [P] para barramento
for k=1:6
    for j=1:6
        if k==j
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*log((2*y(k))/r);
        else
            P(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*(log((((x(k)-
x(j))^2+(y(k)+y(j))^2)^(0.5))/((x(k)-x(j))^2+(y(k)-y(j))^2)^(0.5))));
        end
    end
end
%cálculo da matriz dos potenciais de maxwell, [P] para linhas principais
for k=1:6
    for j=1:6
        if k==j
            P1(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*log((2*y1(k))/r8);
        else
            P1(k,j)=(1/(2*pi*Eo))*(log((((x1(k)-
x1(j))^2+(y1(k)+y1(j))^2)^(0.5))/((x1(k)-x1(j))^2+(y1(k)-
y1(j))^2)^(0.5))));
        end
    end
end
%
%cálculo das matrizes de capacitância, [C]
C=inv(P); %matriz capacitancia barramento
C1=inv(P1); %matriz capacitancia das linhas
%
%definição dos potenciais das fases do barramento
Mod=230*1.05/sqrt(3); %tensão de linha em kV, divide por raiz de 3 para
tensao de fase, e usa 5% de sobretensão
Vbs=Mod;%potencial da fase a, em KV
Vas=Mod*(-0.5-0.866i);%potencial da fase b em, KV
Vcs=Mod*(-0.5+0.866i);%potencial da fase c em, KV
V=[Vas; Vbs; Vcs; Vas; Vbs; Vcs;]; %valores em KV
pol=C*V;%calculo das densidades lineares de carga, em KC/m * 2piEo
%
h=1.5;%altura em relação ao solo definida fixa
%cálculo do campo elétrico em um ponto x qualquer
pos=8; %ponto de calculo em x fixado
%
%definição dos potenciais das fases da linha
Mod1=230*1.05/sqrt(3); %tensão de linha em kV, divide por raiz de 3 para
tensao de fase, e usa 5% de sobretensão

```

```

Vas1=Mod1;%potencial da fase a, em KV
Vbs1=Mod1*(-0.5-0.866i);%potencial da fase b em, KV
Vcs1=Mod1*(-0.5+0.866i);%potencial da fase c em, KV
V1=[Vcs1; Vbs1; Vas1; Vcs1; Vbs1; Vas1;]; %valores em KV
poll=C1*V1;%calculo das densidades lineares de carga, em KC/m * 2piEo
%
h1=1.5;%altura em relação ao solo definida fixa
%calculo do campo elétrico em um ponto x qualquer
pos1=-4; %ponto de calculo em x fixado
%pos=input('entre com a posição em relação ao eixo x para o calculo do
campo vetorial intensidade de campo elétrico num ponto genérico: ');
for a=1:6
    Exc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
((pos-x(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
    Eyc(a)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(a)*(((h-y(a))/((pos-x(a))^2+(h-y(a))^2))-
((h+y(a))/((pos-x(a))^2+(h+y(a))^2))));
end
Estx=Exc(1)+Exc(2)+Exc(3)+Exc(4)+Exc(5)+Exc(6);
Esty=Eyc(1)+Eyc(2)+Eyc(3)+Eyc(4)+Eyc(5)+Eyc(6);
Emod=sqrt(real(Estx)^2+imag(Estx)^2+real(Esty)^2+imag(Esty)^2);
disp(['o campo elétrico no ponto desejado devido barr princ: '
num2str(Emod) 'KV/m'])
%
for a=1:6
    Exc1(a)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(a)*(((pos1-x1(a))/((pos1-x1(a))^2+(h1-
y1(a))^2))-((pos1-x1(a))/((pos1-x1(a))^2+(h1+y1(a))^2))));
    Eyc1(a)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(a)*(((h1-y1(a))/((pos1-x1(a))^2+(h1-
y1(a))^2))-((h1+y1(a))/((pos1-x1(a))^2+(h1+y1(a))^2))));
end
Estx1=Exc1(1)+Exc1(2)+Exc1(3)+Exc1(4)+Exc1(5)+Exc1(6);
Esty1=Eyc1(1)+Eyc1(2)+Eyc1(3)+Eyc1(4)+Eyc1(5)+Eyc1(6);
Emod1=sqrt(real(Estx1)^2+imag(Estx1)^2+real(Esty1)^2+imag(Esty1)^2);
disp(['o campo elétrico no ponto desejado devido linha: ' num2str(Emod1)
'KV/m'])
%
Emx=Exc1(1)+Exc1(2)+Exc1(3)+Exc1(4)+Exc1(5)+Exc1(6);
Emy=Eyc1(1)+Eyc1(2)+Eyc1(3)+Eyc1(4)+Eyc1(5)+Eyc1(6)+Eyc(1)+Eyc(2)+Eyc(3)+Eyc(4)+Eyc(5)+Eyc(6);
Emodt=sqrt(real(Emx)^2+imag(Emx)^2+real(Emy)^2+imag(Emy)^2);
disp(['o campo elétrico no ponto desejado total soma vetorial: '
num2str(Emodt) 'KV/m'])
%
%Ece = matriz que recebe o módulo do campo eletrico
xp=[-50:50];
for w=1:101
    Ex(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((xp(w)-x(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-
y(1))^2))-((xp(w)-x(1))/((xp(w)-
x(1))^2+(h+y(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h-y(2))^2))-((xp(w)-x(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((xp(w)-x(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h-y(3))^2))-((xp(w)-x(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h+y(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(4)*(((xp(w)-x(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h-y(4))^2))-((xp(w)-x(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h+y(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(5)*(((xp(w)-x(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h-y(5))^2))-((xp(w)-x(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h+y(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(6)*(((xp(w)-x(6))/((xp(w)-
x(6))^2+(h-y(6))^2))-((xp(w)-x(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h+y(6))^2))));
    Ey(w)=(1/(2*pi*Eo))*(pol(1)*(((h-y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h-y(1))^2))-
((h+y(1))/((xp(w)-x(1))^2+(h+y(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(2)*(((h-
y(2))/((xp(w)-x(2))^2+(h-y(2))^2))-((h+y(2))/((xp(w)-
x(2))^2+(h+y(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(3)*(((h-y(3))/((xp(w)-x(3))^2+(h-

```

```

y(3)^2)-((h+y(3))/((xp(w)-
x(3))^2+(h+y(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(4)*((h-y(4))/((xp(w)-x(4))^2+(h-
y(4))^2)-((h+y(4))/((xp(w)-
x(4))^2+(h+y(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(5)*((h-y(5))/((xp(w)-x(5))^2+(h-
y(5))^2)-((h+y(5))/((xp(w)-
x(5))^2+(h+y(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(pol(6)*((h-y(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h-
y(6))^2)-((h+y(6))/((xp(w)-x(6))^2+(h+y(6))^2))));
Etx(w)=sqrt((real(Ex(w))^2+(imag(Ex(w))^2);
Ety(w)=sqrt((real(Ey(w))^2+(imag(Ey(w))^2);
ET(w)=sqrt(real(Ey(w))^2+imag(Ey(w))^2+real(Ex(w))^2+imag(Ex(w))^2);
Ex1(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((xp(w)-x1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((xp(w)-x1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((xp(w)-x1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((xp(w)-x1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((xp(w)-x1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((xp(w)-x1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((xp(w)-x1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((xp(w)-x1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((xp(w)-x1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((xp(w)-x1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((xp(w)-x1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((xp(w)-x1(6))/((xp(w)-x1(6))^2+(h1+y1(6))^2))));
Ey1(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((h1-y1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((h1+y1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((h1-y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((h1+y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((h1-y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((h1+y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((h1-y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((h1+y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((h1-y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((h1+y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((h1-y1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((h1+y1(6))/((xp(w)-x1(6))^2+(h1+y1(6))^2))));
Etx1(w)=sqrt((real(Ex1(w))^2+(imag(Ex1(w))^2);
Ety1(w)=sqrt((real(Ey1(w))^2+(imag(Ey1(w))^2);

ET1(w)=sqrt(real(Ey1(w))^2+imag(Ey1(w))^2+real(Ex1(w))^2+imag(Ex1(w))^2);
ExTT(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((xp(w)-x1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((xp(w)-x1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((xp(w)-x1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((xp(w)-x1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((xp(w)-x1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((xp(w)-x1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((xp(w)-x1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((xp(w)-x1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((xp(w)-x1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((xp(w)-x1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((xp(w)-x1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((xp(w)-x1(6))/((xp(w)-x1(6))^2+(h1+y1(6))^2))));
%if e else utilizado para delimitar tamanho do brramento, utilizado
%quando é analisado ponto proximo ao fim do brramento principal, caso
%for feito em 3 dimensões não seria necessário.
if w<42.5
    EyTT(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((h1-y1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((h1+y1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((h1-y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((h1+y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((h1-y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((h1+y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((h1-y1(4))/((xp(w)-

```

```

x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((h1+y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((h1-y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((h1+y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((h1-y1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((h1+y1(6))/((xp(w)-x1(6))^2+(h1+y1(6))^2))));
elseif w>89.5
    EyTT(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((h1-y1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((h1+y1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((h1-y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((h1+y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((h1-y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((h1+y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((h1-y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((h1+y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((h1-y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((h1+y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((h1-y1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((h1+y1(6))/((xp(w)-x1(6))^2+(h1+y1(6))^2))));
else
    EyTT(w)=(1/(2*pi*Eo))*(poll(1)*((h1-y1(1))/((xp(w)-x1(1))^2+(h1-
y1(1))^2))-((h1+y1(1))/((xp(w)-
x1(1))^2+(h1+y1(1))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(2)*((h1-y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1-y1(2))^2))-((h1+y1(2))/((xp(w)-
x1(2))^2+(h1+y1(2))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(3)*((h1-y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1-y1(3))^2))-((h1+y1(3))/((xp(w)-
x1(3))^2+(h1+y1(3))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(4)*((h1-y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1-y1(4))^2))-((h1+y1(4))/((xp(w)-
x1(4))^2+(h1+y1(4))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(5)*((h1-y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1-y1(5))^2))-((h1+y1(5))/((xp(w)-
x1(5))^2+(h1+y1(5))^2)))+(1/(2*pi*Eo))*(poll(6)*((h1-y1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1-y1(6))^2))-((h1+y1(6))/((xp(w)-
x1(6))^2+(h1+y1(6))^2)))+Eyc(1)+Eyc(2)+Eyc(3)+Eyc(4)+Eyc(5)+Eyc(6);
end
    EtxTT(w)=sqrt((real(Ex1(w)))^2+(imag(Ex1(w)))^2);
    EtyTT(w)=sqrt((real(Ey1(w)))^2+(imag(Ey1(w)))^2);

ETT(w)=sqrt(real(EyTT(w))^2+imag(EyTT(w))^2+real(ExTT(w))^2+imag(ExTT(w))^2
);
end
%
%impressão dos resultantes do campo na componente x, y e modulo do campo do
%barramento
figure (1)
subplot(2,1,2),plot(xp,ET)
title(['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,1),plot(xp,Etx)
title(['Perfil transversal da coordenada X do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,2),plot(xp,Ety)
title(['Perfil transversal da coordenada Y do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel ('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
%impressão dos resultantes do campo na componente x, y e modulo do campo do
%linha
figure (2)

```

```

subplot(2,1,2),plot(xp,ET1)
title(['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,1),plot(xp,ETx1)
title(['Perfil transversal da coordenada X do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,2),plot(xp,ETy1)
title(['Perfil transversal da coordenada Y do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
%impressão dos resultantes do campo na componente x, y e modulo do campo do
%resultante total
figure(3)
plot(xp,ETT)
title(['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
figure(4)
subplot(2,1,2),plot(xp,ETT)
title(['Perfil transversal do módulo do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,1),plot(xp,ETxTT)
title(['Perfil transversal da coordenada X do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
subplot(2,2,2),plot(xp,ETyTT)
title(['Perfil transversal da coordenada Y do campo elétrico na altura
escolhida'])
xlabel('Posição(m)')
ylabel('Campo Elétrico(kV/m)')
%
%FIM

```

**ANEXO – RELATÓRIO DAS MEDIÇÕES DE CAMPOS ELÉTRICOS E
MAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES**

 Departamento de Engenharia de Manutenção	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011

Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2011.

 CEEE <small>GERAÇÃO E TRANSMISSÃO</small>	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011
Departamento de Engenharia de Manutenção			

1 NOME DO AGENTE

Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT.

2 INTRODUÇÃO

O presente documento refere-se ao cumprimento das Resoluções Normativas 398/2010 e 413/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. As resoluções supracitadas regulamentam a Lei nº 11.934 de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos, originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os limites máximos de campos elétricos e magnéticos recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS foram estabelecidos pelo ICNIRP - Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (International Commission on Ionizing Radiation Protection).

3 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

- Monitor de campos elétricos e magnéticos. Fabricante: NARDA
Modelo: EFA300;
- Sonda capacitiva isolada óticamente para medição de campo elétrico;
- Cabo de fibra Ótica - 2 [metros];
- Termo-higrômetro. Fabricante: Minipa, Modelo: MT-241.

 CEEE <small>GERAÇÃO E TRANSMISSÃO</small>	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011
Departamento de Engenharia de Manutenção			

4 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO

O equipamento foi configurado para uma faixa de frequência de 5 Hz a 2 kHz, tanto para medição de campo elétrico, quanto de campo magnético. O intervalo de frequência utilizado é suficiente para considerar harmônicas típicas dos sinais de tensão e corrente do sistema de potência (60 Hz).

Nas subestações de propriedade da CEEE-GT foram efetuadas medições em todos os níveis de tensão e não somente nos níveis de tensão que a resolução exige, maior ou igual a 138 kV. Já nas subestações acessadas/compartilhadas pela CEEE-GT as medições foram efetuadas somente nos módulos de propriedade do agente em questão.

Em relação aos pontos de medição sempre se buscou encontrar o maior valor das grandezas mensuradas, ou seja, as medições foram realizadas onde há uma maior proximidade entre o solo e local energizado.

A localização geográfica de todos os pontos de medição foi realizada por meio de uma imagem aérea ou planta baixa da subestação. Após o término da medição, com a localização dos pontos medidos, foi calculada a distância entre os pontos e o ponto de referência.

Por fim, vale mencionar que se tomou o devido cuidado para que o operador do instrumento não causasse distorções nas medidas de campo elétrico, ficando a uma distância de 2 metros da sonda de medição. E também, que as medições foram realizadas seguindo orientações da **Norma ABNT 15415:2006 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz.**

 Departamento de Engenharia de Manutenção	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011

SE Porto Alegre 10 – PAL10

No dia 14/09/2011 foram realizadas as medições na SE PAL10. A temperatura média registrada foi de 22,3°C. O ponto 10, localizado em frente a sala de comando, foi adotado como referência para cálculo das distâncias. Nenhum ponto de medição ultrapassou os limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde - OMS.

Ponto XML	Ponto	População	C. Elétrico [kV/m]	C. Magnético [μ T]	Hora	Distância [m]
001	001	PO	2,262	0,194	10:10	51,77
002	002	PO	6,305	0,654	10:13	52,50
003	003	PO	3,595	1,049	10:19	60,34
004	004	PG	0,085	0,690	10:20	98,49
005	005	PG	0,033	1,359	10:22	83,88
006	006	PO	0,015	6,957	10:23	76,61
007	007	PO	6,973	3,690	10:25	45,70
008	008	PO	7,457	6,700	10:26	28,97
009	009	PO	6,900	0,883	10:28	17,72
010	010	PO	6,272	1,129	10:29	0,00
011	011	PO	7,404	1,768	10:30	25,01
012	012	PG	0,302	0,359	10:31	50,78
013	013	PG	0,005	0,088	10:32	57,11
014	014	PO	2,407	18,150	10:34	47,57
015	015	PG	0,925	1,490	10:37	32,41
016	016	PO	7,110	4,480	10:40	38,12
017	017	PO	0,622	4,160	10:44	26,52
018	018	PO	2,725	8,014	10:45	19,29
019	019	PO	3,010	4,626	10:47	25,61
020	020	PG	0,250	0,278	10:48	49,48
021	021	PG	0,156	0,794	10:49	71,35
022	022	PO	0,359	1,189	10:50	48,05
023	023	PG	0,202	0,552	10:51	72,31
024	024	PO	3,737	8,459	10:52	51,06
025	025	PO	3,670	2,967	10:54	40,95
026	026	PG	0,798	0,854	10:55	47,99
027	027	PO	0,595	0,425	10:56	34,84

 Departamento de Engenharia de Manutenção	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011

SE Porto Alegre 9 – PAL9

No dia 06/10/2011 foram realizadas as medições na SE PAL9. A temperatura média registrada foi de 25°C. O ponto 18, localizado em frente ao disjuntor de transferência 230kV - 24-1, foi adotado como referência para cálculo das distâncias. Os pontos 17, 21 e 23 ultrapassaram os níveis de referência para campo elétrico, no entanto como se trata de uma instalação aterrada, segundo ICNIRP o limite pode ser estendido aplicando o fator 2. Dessa forma todos os pontos atendem os critérios do ICNIRP/OMS.

 Departamento de Engenharia de Manutenção	Relatório das medições de campos elétricos e magnéticos em Subestações		
	REL-CEM.002	Revisão N.º 00	Data da Revisão 28/12/2011

Ponto XML	Ponto	População	C. Elétrico [kV/m]	C. Magnético [μ T]	Hora	Distância [m]
001	001	PG	0,091	0,781	09:32	92,57
002	002	PO	3,699	15,170	09:34	72,59
003	003	PO	4,143	29,540	09:35	82,13
004	004	PG	0,683	2,050	09:36	106,69
005	006	PO	0,757	2,552	09:38	85,96
006	007	PO	1,418	9,534	09:39	76,40
007	008	PO	0,956	13,040	09:41	60,50
008	009	PO	6,996	1,748	09:43	51,80
009	010	PO	6,813	2,306	09:44	51,05
011	012	PG	2,111	0,275	09:47	105,22
012	015	PO	6,116	0,794	09:53	49,89
013	016	PO	6,516	2,073	09:54	50,52
014	017	PO	5,865	2,045	09:56	53,15
015	018	PO	1,663	1,507	09:57	31,91
016	019	PO	6,386	2,767	09:58	21,85
017	020	PO	8,750	2,203	09:59	18,31
018	021	PO	3,593	2,558	10:00	0,00
019	023	PO	5,449	2,457	10:02	19,18
020	024	PO	6,950	3,103	10:04	24,63
021	025	PO	8,980	5,279	10:05	26,04
022	026	PO	4,424	2,632	10:06	43,64
023	027	PO	8,470	4,919	10:07	43,36
024	028	PO	6,179	4,893	10:08	57,39
025	029	PO	5,480	0,645	10:09	73,91
026	030	PG	0,039	0,216	10:11	103,92
027	032	PO	3,469	6,251	10:14	75,40
028	033	PO	3,165	3,670	10:15	79,62
029	034	PG	0,363	0,566	10:16	83,25
030	035	PO	3,791	4,462	10:17	65,64
031	037	PO	1,915	2,675	10:19	50,41
032	038	PG	1,260	1,264	10:20	56,45
033	040	PO	3,673	7,536	10:23	31,34
034	041	PG	1,046	0,384	10:25	44,36
035	043	PG	0,017	0,006	10:28	98,94