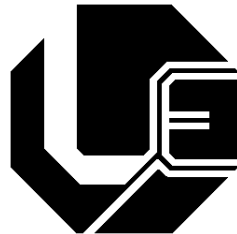


Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Pós Graduação em Engenharia Elétrica



**MAPEAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO DE UMA SUBESTAÇÃO  
USANDO A TÉCNICA DOS ELEMENTOS FINITOS**

**ALIN DO AMARAL MARTINS**

Uberlândia  
2012

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**ALIN DO AMARAL MARTINS**

**MAPEAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO DE UMA SUBESTAÇÃO  
USANDO A TÉCNICA DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada por Alin do Amaral Martins ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em ciências.

Banca Examinadora:

Décio Bispo, Dr. (Orientador) – UFU

José Roberto Camacho, Dr. (Co-orientador) – UFU

Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr.- UFU

Mário Leite Pereira Filho, Dr. - USP

# MAPEAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO DE UMA SUBESTAÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA DOS ELEMENTOS FINITOS

**ALIN DO AMARAL MARTINS**

Dissertação apresentada por Alin do Amaral Martins ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

---

Prof. Décio Bispo, Dr.  
(Orientador - UFU)

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.  
Coordenador do Curso de Pós Graduação

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus e em especial aos meus pais Edmundo e Neyde, que tornaram esse sonho possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dado força nos momentos difíceis e sabedoria, sem a qual não chegaria até aqui.

À minha família, em especial a meus pais, Edmundo e Neyde, pela paciência, compreensão e apoio.

Ao Prof. Dr. Décio Bispo pela confiança depositada, o incentivo, motivação e orientação segura, imprescindível para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário Leite Pereira Filho, meus sinceros agradecimentos pelo apoio e subsídio técnico, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Roberto Camacho, pela ajuda durante toda a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Cardoso, pelo apoio durante a execução deste trabalho, e apoio às contribuições geradas pelo mesmo.

Aos companheiros de jornada, alunos de pós-graduação e amigos do Laboratório de Eficiência Energética e Fontes alternativas de energia, Victor de Paula e Silva, Ciciane Chiovatto, Marcos Vinícius Silva, Afonso Bernardino, Juliana Amâncio e Elise Saraiva.

Ao amigo Ranulfo Gonzaga Jr., pelos dados fornecidos e toda ajuda para a realização deste trabalho.

À Cinara e Marcília pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria de pós graduação.

À CAPES pelo subsídio financeiro e pela credibilidade depositada na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

# RESUMO

Em 2009 (05 de maio), foi sancionada a Lei nº 11.934, que regulamenta os limites da exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Essa Lei estabeleceu que é de responsabilidade das concessionárias de energia a medição e adequação dos valores de campo em suas instalações caso necessário.

Segundo a normativa o campo a ser medido é o não perturbado. No caso do campo elétrico, objeto de estudo deste trabalho, isso é impossível já que o aparelho de aferição perturba o campo, mesmo se o operário estiver localizado remotamente.

Dentro deste contexto a proposta deste trabalho é utilizar um método alternativo de estimativa do campo elétrico, baseado na teoria dos elementos finitos, com aplicação do programa FEMM, que facilite a obtenção dos valores e calcule um campo elétrico não perturbado.

# ABSTRACT

In 2009 (may, 5) the law 11.934 was enacted, regulating the limits of human exposure to electric and magnetic fields originating from generation, transmission and distribution of electricity facilities.

This law establishes that it is the responsibility of the electrical energy authority the measurement and adjustment of field values, if necessary.

According to the rules the field to be measured should not be disturbed. In the case of the electric field, the object of the present study, this is impossible since the unit of measurement disturbs the field, even if the operator is located remotely.

So, the aim of this work is to use an alternative method of estimating the electric field, based on the theory of finite elements, with application of the program FEMM, which simplifies the obtaining of the values and results in an undisturbed electric field.

# Lista de Figuras

Fig. 3.1 - Célula Pockels transversal .....	32
Fig. 3.2 - Geometrias do medidor de espaço livre de eixo único .....	35
Fig. 3.3 - Sondas planas usadas em medidores de terra .....	38
Fig. 3.4 - Sonda para medida de efeito Pockels .....	40
Fig. 4.1- Elemento finito tridimensional.....	50
Fig. 4.2 - Elemento finito bidimensional .....	50
Fig. 4.3 - Elemento finito triangular .....	52
Fig. 5.1 - Linha de transmissão a ser simulada .....	57
Fig. 5.2 - Campo elétrico 1,8 m do solo - medido e método MSC.....	58
Fig. 5.3 - Modelagem da malha.....	59
Fig. 5.4 - Densidade do campo elétrico modelado.....	59
Fig. 5.5 - Campo elétrico 1,8 m do solo – FEMM e MSC .....	60
Fig. 5.6- Localização da subestação principal.....	61
Fig. 5.7 - Vista superior da subestação.....	62
Fig. 5.8 - Corte AA.....	63
Fig. 5.9 - Corte BB.....	64
Fig. 5.10 - Corte CC.....	65
Fig. 5.11 - Corte DD .....	66
Fig. 5.12 - Corte EE .....	67
Fig. 5.13 - Corte FF.....	68
Fig. 5.14 - Barramento em corte .....	69
Fig. 5.15 - Modelagem no software FEMM.....	70
Fig. 5.16 - Modelagem da malha.....	70
Fig. 5.17 – Densidade do campo elétrico modelado.....	72
Fig. 5.18 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase A .....	73
Fig. 5.19 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase B .....	74
Fig. 5.20 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase C .....	75
Fig. 5.21 - Barramento trifásico - 3 isoladores .....	76
Fig. 5.22 – Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase A.....	77
Fig. 5.23 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase B.....	78
Fig. 5.24 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase C.....	79
Fig. 5.25 - Detalhes do transformador monofásico .....	80
Fig. 5.26 – Modelagem no software FEMM .....	81
Fig. 5.27 - Modelagem da malha.....	81
Fig. 5.28 – Densidade de campo elétrico .....	82
Fig. 5.29 - Campo elétrico transformador monofásico 1.5 m do solo .....	82
Fig. 5.30 – Vista superior transformadores monofásicos .....	83
Fig. 5.31 - Malha - Máximo passando pela fase C (alta tensão).....	84
Fig. 5.32- Resultado FEMM - Máximo passando pela fase C (alta tensão) .....	84
Fig. 5.33 - Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase C .....	85





Fig. 5.34 - Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase B .....	86
Fig. 5.35 – Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase A .....	86
Fig. 5.36 – Disjuntor alta tensão.....	87
Fig. 5.37 - Modelagem Disjuntor FEMM .....	88
Fig. 5.38 - Resultado FEMM (disjuntor aberto).....	88
Fig. 5.39 - Resultado FEMM (disjuntor fechado).....	89
Fig. 5.40 – Campo elétrico 1.5 m do solo – disjuntor fechado.....	89
Fig. 5.41 - Campo elétrico 1.5 m do solo – disjuntor aberto.....	90
Fig. 5.42 - Campo elétrico não perturbado - superfícies equipotenciais .....	91
Fig. 5.43 - Campo elétrico não perturbado a 1,5 m do solo.....	92
Fig. 5.44 - Campo elétrico perturbado - superfícies equipotenciais .....	92
Fig. 5.45 - Campo elétrico perturbado a 1,5 m do solo.....	93



# Lista de tabelas

Tabela 1 - Níveis de referência internacionais .....	15
Tabela 2 - Níveis de referência da ANEEL.....	16
Tabela 3 - Limiares de corrente elétrica.....	24
Tabela 5 - Permissividade elétrica dos materiais.....	71



# LISTA DE SÍMBOLOS

a – raio da esfera (m)

A – raio da bobina sonda (m)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

c – velocidade da luz

$c_e$  – coeficiente eletro-óptico do cristal.

CEM's – Campos eletromagnéticos

D – vetor densidade de campo elétrico

dA – elemento da área na metade do corpo com superfície total S

DIT – Demais Instalações de Transmissão

DNA – Ácido desoxirribonucleico

E – campo elétrico

$E'$  – campo elétrico no cristal (V/m)

$E_0$  – Campo elétrico uniforme (V/m)

$E_x$  – campo elétrico na direção x

$E_y$  – campo elétrico na direção y

$E_z$  – campo elétrico na direção z

ELF – Extreme Low Frequency

EPC – Equipamento de proteção coletiva

EPI – Equipamento de Proteção Individual

f – frequência do campo

FCC – Federal Communications Commission

FEMM – Finite Element Method Magnetics

I – corrente circulante (A)

ICNIRP - Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

$I_t$  – luz transmitida (cd)



$k$  – constante dependente da geometria da sonda fornecida pelo fabricante do instrumento

$l$  – comprimento

$I_i$  – luz incidente (cd)

LT – Linha de Transmissão)

MEC – Método dos elementos de contorno

MEF – Método dos Elementos Finitos

MSC – Método de simulação de cargas

$n$  – índice de refração

OMS – Organização Mundial da Saúde

$Q$  – carga induzida em Coulomb;

$\epsilon$  – Permissividade elétrica

$\epsilon_0$  – permissividade do vácuo (F/m)

$\lambda$  - comprimento de onda da luz (nm)

$\rho$  – densidade de carga

$r_0$  – raio da região de contorno em metros



# SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO GERAL .....	15
1.1 Considerações iniciais .....	13
1.2 Critérios de exposição a campos eletromagnéticos.....	13
1.2.1 Lei 11.934 [1].....	15
1.3 Considerações finais.....	18
Capítulo 2 EFEITOS BIOLÓGICOS DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS .....	20
2.1 Considerações iniciais .....	21
2.2 Resumo histórico.....	21
2.3 Efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos .....	22
2.3.1 Acoplamentos de campos elétricos de baixa frequência.....	23
2.3.2 Acoplamentos de campos magnéticos de baixa frequência.....	23
2.3.3 Absorção de energia dos campos eletromagnéticos .....	23
2.3.4 Efeitos indiretos .....	24
2.3.5 Efeitos biológicos entre DC e 100 KHz .....	24
2.4 Considerações finais.....	26
Capítulo 3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO .....	28
3.1 Considerações iniciais .....	29
3.2 Medidores de intensidade do campo elétrico alternado.....	29
3.2.1 Medidor de espaço livre.....	30
3.2.2 Medidor de referência de terra .....	31
3.2.3 Medidor eletro-óptico.....	31
3.3 Procedimentos de Medição .....	32
3.3.1 Medindo a exposição humana .....	33
3.3.2 Teoria de operação .....	34
3.3.3 Metas e métodos de medição.....	40
3.4 Considerações finais.....	45
Capítulo 4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	47
4.1 Considerações iniciais .....	48
4.2 Etapas na solução de um problema via FEM.....	49
4.2.1 Discretização do domínio de solução dentro de uma malha de elementos finitos...	50



4.3 Modelo Matemático do FEM para problemas eletrostáticos.....	51
4.4 Elementos finitos bidimensionais .....	53
4.5 Considerações finais.....	53
Capítulo 5 ESTUDO DE CASO .....	55
5.1 Considerações iniciais .....	56
5.2 Validação do método .....	56
5.2.1 Dados da LT .....	57
5.3 Descrição da Subestação.....	60
5.4 Simulações.....	69
5.4.1 Barramento Trifásico.....	69
5.4.2 Transformador .....	80
5.4.3 Disjuntor .....	87
5.5 Perturbação do campo elétrico durante medição .....	90
5.6 Considerações finais.....	93
Capítulo 6 Conclusões .....	95
6.1 Trabalhos Futuros.....	100
Referências .....	101
Anexo A .....	105
AnexoB .....	112



# Capítulo 1 - INTRODUÇÃO GERAL



## 1.1 Considerações iniciais

Estudos de planejamento do sistema elétrico brasileiro mostram a necessidade de expansão da capacidade desse sistema, a fim de garantir o atendimento das demandas e ao mesmo tempo proporcionar maior confiabilidade e qualidade.

Em geral, reforços e ampliações da rede necessitam de investimentos na construção de novas subestações e linhas de transmissão, e/ou modernização e recapacitação das instalações já existentes, que por sua vez, devem estar sempre associados a um controle efetivo de possíveis impactos ambientais.

Como muitas instalações do sistema elétrico estão localizadas nas cidades ou próximas delas, a população fica exposta aos campos eletromagnéticos gerados e deve-se, portanto garantir que estes não ultrapassem os limites recomendados pelas normas.

Existem normas e diretrizes nacionais [1] e internacionais [2] que recomendam limites para exposição a campos elétricos e magnéticos e recomendações para os procedimentos de determinação desses campos por meio de medição e cálculo [3].

O objetivo deste trabalho é aplicar um método baseado na teoria dos elementos finitos que possa simular a planta de uma subestação e estimar o valor do campo elétrico na mesma.

## 1.2 Critérios de exposição a campos eletromagnéticos

As mais importantes Diretrizes de exposição a campos (ICNIRP e IEEE) adotam a seguinte estrutura [2], [4]:

- São determinados valores para grandezas físicas (correntes, campos) que quando superados podem provocar efeitos fisiológicos indesejáveis no corpo humano;





- São aplicados fatores de redução, baseados em critérios de segurança (fator 5, ICNIRP, e fator 1/3, IEEE) definindo os máximos valores admissíveis para estas grandezas – Restrições Básicas;

As restrições básicas compreendem valores de densidades máximas de correntes [2] e campo elétrico induzido em certas regiões do corpo [4], em que se evitam efeitos como estimulação do sistema nervoso central e dos nervos periféricos. A partir desses valores são aplicados fatores de redução distintos para as duas categorias de exposição consideradas: a ocupacional e o público em geral. O que resulta em níveis de exposição mais restritivos para o público em geral, o que oferece proteção adicional, considerando a maior heterogeneidade nas condições de saúde dessa categoria.

- Calculam-se os valores dos campos aplicados externamente (elétrico e magnético) que se pode assegurar que não induzirão aqueles níveis determinados. Estes limites de CEM's são os Níveis de Referência.

Os Níveis de Referência das principais Diretrizes, especificamente para o público em geral, encontram-se reunidos na Tabela 1.

No Brasil, entre as principais ações a respeito da regulamentação da exposição a campos eletromagnéticos estão:

- Desenvolvimento da norma NBR 15415 (Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos nas frequências de 50 Hz e 60 Hz) [3] que, além de definir os níveis de referência e critérios da ICNIRP para utilização nos empreendimentos no Brasil, ainda define critérios para realização de medições de campo;
- Lei nº 2.576 de 01 de abril de 2009, que dispõe sobre a instalação de fontes emissoras de radiação eletromagnética [5];
- Lei nº 11.934 de 05 de maio de 2009 que regulamenta os limites da exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica [1].



Tabela 1 - Níveis de referência internacionais de campos eletromagnéticos

Diretriz	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (mG)
ICNIRP	5	1000
IEEE	5	9040

### 1.2.1 Lei 11.934 [1]

Esta resolução normativa estabeleceu que 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 relativos aos serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Estabelece ainda as seguintes definições:

- *Campo elétrico*: é a região de atuação de uma força resultante da interação entre duas ou mais cargas elétricas. O campo elétrico está presente ao redor de qualquer instalação elétrica, devido à diferença de potencial entre os condutores (tensão) sendo sua intensidade expressa em quilovolt por metro (kV/m).
- *Campo Magnético*: é a região de atuação de uma força resultante da passagem de uma corrente elétrica por um condutor. A densidade de fluxo magnético é expressa em microtesla ( $\mu\text{T}$ ).
- *Instalação de Interesse Restrito*: subestação e linha de transmissão, em qualquer nível de tensão, pertencente à concessionária ou autorizada de geração de energia elétrica que conecta a usina aos sistemas de transmissão ou distribuição.
- *Instalação de Geração*: conjunto de equipamentos necessários para a produção de energia elétrica, incluindo as unidades geradoras, pertencente à concessionária ou autorizada de geração de energia elétrica.



- *Instalação de Transmissão*: conjunto de subestações e linhas de transmissão, em tensão igual ou superior a 230 kV, ou àquele classificado como Demais Instalações de Transmissão – DIT, pertencentes à concessionária de transmissão de energia elétrica.
- *Instalação de Distribuição*: conjunto de subestações e linhas de distribuição, em tensão igual ou inferior a 230 kV, pertencente à concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica.

Os limites de referência para exposição da população em geral e de trabalhadores a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz determinados por esta norma são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de referência da ANEEL

	Campo elétrico (kV/m)	Campo magnético ( $\mu$ T)
<b>População</b>	5	100
<b>Ocupacional</b>	10	416,67

Caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos limites estabelecidos na norma, o projeto deverá ser adequado para atender aos referidos limites.

Os cálculos ou as medições dos campos elétricos e magnéticos para as respectivas instalações de interesse restrito, de transmissão e de distribuição com tensão igual ou superior a 138 kV devem ser realizados pelos agentes de geração, transmissão e distribuição.

Caso o método escolhido seja os cálculos, estes devem ser baseados em metodologia consagrada e considerar:

- Tensão nominal;
- Temperatura máxima admissível de projeto;
- Carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência;
- Condição de flecha máxima dos cabos;
- Vão típico para cada linha de interesse restrito, de transmissão e de distribuição, por nível de tensão, para cada geometria típica dos



condutores e altura mínima exigida por norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas);

- 1,5 m de altura do nível do solo para a população em geral.

Os cálculos ou as medições dos campos devem ser realizados:

- No interior da subestação, para avaliar a exposição dos trabalhadores, e no perímetro de cada subestação, de forma a verificar a exposição da população em geral, para as instalações de geração, transmissão e distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV;
- No interior da faixa de servidão, para avaliar a exposição dos trabalhadores, e no limite da faixa de servidão, de forma a verificar a exposição da população em geral, para as linhas de interesse restrito, de transmissão ou distribuição com tensões iguais ou superiores a 138 kV;

As medições, quando realizadas, devem ser executadas no período de carga pesada, conforme metodologia estabelecida na NBR 15415 ABNT [3], com equipamentos com certificado de calibração emitido por órgão credenciado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). E o campo que deve ser medido é o não perturbado.

Para as instalações já existentes e cujos valores calculados, como disposto na norma, sejam iguais ou superiores aos limites estabelecidos na resolução da ANEEL devem ser realizadas medições dos campos elétricos e magnéticos e caso os valores medidos sejam superiores aos limites, o agente deve providenciar as adequações necessárias para atender aos referidos limites.

No caso da determinação dos campos eletromagnéticos em subestações, proposta deste trabalho, deve ser enviado à ANEEL:

➤ Para cálculo:

- Nome da subestação;



- Município;
- Intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);
- Intensidade do campo magnético (expresso em  $\mu\text{T}$ );
- Tensão de transformação;
- Temperatura ambiente;
- Corrente nominal de projeto por fase;
- Corrente máxima admissível por fase;
- Altura mínima dos condutores;
- Método utilizado para calcular o campo elétrico;
- Método utilizado para calcular o campo magnético;
- Pontos calculados (informando a distância para o ponto geométrico da subestação).

➤ Para medição

Além dos dados descritos no item anterior, devem ser informados também:

- Data e horário da medição;
- Corrente medida por fase;
- Temperatura ambiente;
- Pontos de medição (informando a distância para o ponto geométrico da subestação);
- Equipamento utilizado.

### 1.3 Considerações finais

Como visto cabe aos agentes de geração, transmissão e distribuição determinar os valores dos campos elétricos e magnéticos em suas instalações. Para tal segundo resolução normativa [1] estes devem realizar cálculos empregando metodologia consagrada ou medição.

O intuito deste trabalho é propor um método alternativo, baseado em elementos finitos, com utilização do software FEMM, para a estimativa dos valores de campo elétrico. O objetivo é aplicar uma metodologia que possa ser empregada em qualquer subestação, inclusive na fase de projeto da mesma,



quando medições ainda não são possíveis. A expectativa é que essa metodologia apresente maior facilidade de emprego que os métodos já existentes. A grande vantagem de se fazer uma simulação na fase de projeto é a facilidade de poder alterar o mesmo para adequação aos valores determinados pela norma.



# Capítulo 2

## EFEITOS BIOLÓGICOS DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS



## 2.1 Considerações iniciais

Os riscos ao ser humano decorrentes da exposição aos campos eletromagnéticos têm sido estudados durante os últimos 65 anos. Em geral, as conclusões à que se tem chegado não são com base em estudos detalhados de cada caso e ainda existe grande controvérsia a respeito do assunto. Vários trabalhos não demonstram efeitos negativos da exposição, no entanto há outros que colocam suspeitas sobre possíveis danos que podem ser causados por exposição ocupacional ou mesmo da população em geral aos campos eletromagnéticos. O problema desses trabalhos é que muitos apresentam problemas metodológicos. A seguir serão descritos alguns dos possíveis danos à saúde humana da exposição aos campos eletromagnéticos.

## 2.2 Resumo histórico

O problema dos efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos com relação ao ser humano foi estudado pela primeira vez com os trabalhos de D'Arsonval (1850) para os efeitos de acoplamento indireto e Gosset (1924) para os campos irradiados. Durante a Segunda Guerra Mundial o conhecimento dos efeitos adversos dos campos eletromagnéticos tornou-se publicamente conhecido devido a acidentes ocorridos com soldados que trabalhavam próximos a campos intensos na faixa de UHF. Durante essa época começaram a surgir os primeiros esforços para limitar a exposição das pessoas aos efeitos adversos relacionados a campos extremos [6].

A limitação dos campos eletromagnéticos relacionados aos sistemas de radiodifusão caminhou paralelamente aos estudos sobre os campos. No entanto as legislações de caráter obrigatório de limitação foram estabelecidas apenas em 1997 pelo Federal Communications Commission (FCC) para os EUA, em 1999 para a Comunidade Europeia e 2002 pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) para o Brasil [7], [8] e [9]. Anteriormente existiam apenas recomendações de aplicação restrita (alguns órgãos governamentais e empresas adotavam estas recomendações).





Já com relação aos campos eletromagnéticos gerados em frequência industrial (sistemas de potência, por exemplo), as principais diretrizes internacionais foram estabelecidas em 1994, pelo IEEE [4] e 1998 pelo ICNIRP [2]. Enquanto que no Brasil, apenas em 2009 esses limites foram regulamentados pela ANEEL [1].

## 2.3 Efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos

Através dos estudos feitos durante os últimos 65 anos foi constatado que os campos eletromagnéticos interagem com o corpo humano de várias formas, dependendo do comprimento de onda destes [6]. Em síntese a forma de interação é basicamente dependente de:

- Frequência dos campos;
- Intensidade dos campos;
- Tempo de exposição.

A forma de acoplamento entre os campos eletromagnéticos e os tecidos do corpo humano é determinante para o aparecimento dos efeitos biológicos [11], [12] e estas podem ser: acoplamentos dos campos elétricos de baixa frequência, acoplamentos dos campos magnéticos de baixa frequência, absorção de energia dos campos eletromagnéticos (alta frequência), efeitos indiretos [10].

Os campos eletromagnéticos são divididos em:

- Baixa frequência ( $< 5$  kHz): as fontes são linhas de transmissão, subestações, aparelhos eletrodomésticos, computadores, entre outros;
- Alta frequência ( $> 5$  kHz): as fontes são instalações de emissoras de radio e televisão, telefone móvel e suas estações.

Os CEM's são fracos para quebrar as ligações das moléculas com as células, não produzindo, portanto ionização. Por essa razão são chamados de radiações não ionizantes.

Campos de baixa frequência atravessam o corpo, enquanto que campos de alta frequência são parcialmente absorvidos e penetram em uma pequena profundidade no tecido.



### **2.3.1 Acoplamentos de campos elétricos de baixa frequência**

Os acoplamentos dos campos elétricos de baixa frequência influenciam a distribuição de cargas elétricas na superfície dos tecidos condutores e causam um fluxo de corrente elétrica no corpo. A amplitude dos efeitos depende da condutividade e da permissividade de cada tecido.

### **2.3.2 Acoplamentos de campos magnéticos de baixa frequência**

Os acoplamentos dos campos magnéticos de baixa frequência induzem a formação de campos elétricos e provocam circulação de corrente no corpo. As amplitudes são proporcionais ao caminho (que depende da condutividade e da taxa de variação da densidade de fluxo magnético) formado dentro do organismo.

### **2.3.3 Absorção de energia dos campos eletromagnéticos**

A absorção de energia dos campos eletromagnéticos tem como principal característica apresentar efeitos significativos a partir de 100 kHz. Com o aumento da frequência existe uma absorção crescente de energia e consequentemente um aumento da temperatura do corpo. Este aumento tem seu máximo situado entre 70 MHz e 100 MHz. Estes valores são correspondentes à frequência de ressonância da cavidade torácica de uma pessoa de estatura média. Acima destes valores a absorção de energia começa a decrescer e afetar apenas as partes superficiais do corpo humano.

Os mecanismos de acoplamento citados se manifestam no corpo humano em diversos efeitos que podem ser melhor compreendidos separando os efeitos por faixas de frequência dos campos eletromagnéticos. As faixas de frequências são divididas entre DC a 100 kHz e 100 kHz a 300 GHz.



### 2.3.4 Efeitos indiretos

Os efeitos indiretos (esse nome é porque não são causados diretamente pelos campos eletromagnéticos e sim por corrente elétrica e diferenças de potencial devido à presença desses campos) são resultado do contato físico em objetos ou pessoas que estejam em potenciais elétricos diferentes. O resultado é o fluxo de carga elétrica (choque).

#### 2.3.5 Efeitos biológicos entre DC e 100 KHz

Os efeitos nesta faixa de frequências são em sua maioria devidos a circulação de corrente elétrica no corpo, estes efeitos cessam após ser removida a fonte e dependem da dose do campo recebido.

##### 2.3.5.1 Choque elétrico

O primeiro efeito que pode ser notado nesta faixa de frequência é o choque elétrico. Este efeito indireto é o principal causador de acidentes relacionados aos campos eletromagnéticos. O choque é causado tanto com o contato direto, como por descargas através do ar, desde que o potencial seja suficiente para romper a barreira dielétrica deste.

O choque afeta principalmente a forma como as células musculares e nervosas se comportam. A tabela 3 resume os limiares de corrente elétrica para a manifestação dos efeitos biológicos do choque elétrico. Os testes são considerados indicativos para seres humanos masculinos, adultos e com condições cardíacas saudáveis. Para o sexo feminino os valores de corrente tendem a ser mais baixos.

Tabela 3 - Limiares de corrente elétrica

Efeito indireto	Corrente limiar (mA)			
	50/60 Hz	1 KHz	100 KHz	1 MHz
Percepção ao toque	0,2 - 0,4	0,4 - 0,8	25 - 40	25 - 40
Dor na parte em contato	0,9 - 1,8	1,6 - 3,3	33 - 55	28 - 50
Choque doloroso / limiar de contração	8 - 16	12 - 24	112 - 224	-
Choque grave / dificuldade na respiração	12 - 23	21 - 41	160 - 320	-



As reações fisiológicas manifestadas pelo choque elétrico em ordem crescente de manifestação são:

- Estímulo dos tecidos musculares;
- Estímulo dos tecidos nervosos;
- Contração violenta de tecidos musculares;
- Lesões em tecidos nervosos;
- Queimaduras;
- Fibrilação ventricular cardíaca;
- Óbito:
  - Devido à efeitos indiretos (quedas, batidas);
  - Por asfixia (> 30 mA circulando por minutos).

#### **2.3.5.2 Inibição da onda T**

A onda T é um pulso elétrico responsável por controlar os batimentos cardíacos. O assunto resumido pode ser encontrado em [13]. A corrente proveniente do choque elétrico afeta a onda T e dá início à fibrilação ventricular.

Além disso, estudos mostraram que campos magnéticos incidentes sobre o coração podem provocar aumento ou diminuição da amplitude dessas ondas, chegando até ao ponto de inibi-las por completo sem, entretanto reproduzir a fibrilação ventricular causada pelo choque elétrico [14].

#### **2.3.5.3 Fosfenos elétricos e magnéticos**

Sensações luminosas causadas por agentes que não a luz são chamadas de fosfenos. Podem ser pressão mecânica aplicada no globo ocular diretamente ou campos eletromagnéticos de frequências muito baixas (ELF).

Neste caso o campo eletromagnético vai interagir com as células nervosas dos olhos e com o córtex visual no cérebro.



#### **2.3.5.4 Efeitos não comprovados**

Existem efeitos que ainda não foram comprovados pela ciência, as neoplasias e a esterilidade. A maior dúvida com relação a esses efeitos é quanto à aplicação do modelo de quebra de cadeias de DNA por incidência de fótons. Existe a possibilidade da morte das células ou ocorrência de mutações quando da incidência de fótons (depende de sua energia) [15].

##### **2.3.5.4.1 Neoplasias**

Neoplasia são alterações celulares que provocam seu crescimento exagerado, podendo ser maligna ou benigna.

A OMS (Organização Mundial da Saúde) tem uma classificação de condições ocupacionais que podem dar origem a neoplasias em humanos, e segundo esta campos magnéticos de alta frequência estão na categoria 2b, que são os possíveis, mas não prováveis carcinogênicos humanos, categoria a que pertencem também o café e o chá mate.

Já o campo magnético estático e o campo elétrico estático e de frequência industrial estão no grupo 3, não carcinogênico a humanos [16].

#### **2.4 Considerações finais**

Em suma, de todos os estudos realizados até então sobre os efeitos biológicos da exposição aos campos eletromagnéticos, nenhum conseguiu demonstrar e/ou comprovar que estes representam risco à saúde humana, ou seja, não se chegou a nenhuma evidência conclusiva e consistente que mostra que a exposição provoque câncer, efeitos neurocomportamentais adversos ou efeitos sobre a reprodução e desenvolvimento.

Foram feitos inclusive estudos epidemiológicos em seres humanos, e estes não conseguiram associar os campos eletromagnéticos aos males citados acima. No entanto alguns estudos deste tipo revelaram alguma evidência epidemiológica de que a prolongada exposição a altos níveis de campo magnético na frequência industrial esteja associada à leucemia infantil,



mas como estes níveis eram raramente encontrados no local em estudo e por não haver tais indícios em adultos ou em experiências com animais, o estudo chegou à conclusão de que não se poderia afirmar que os campos realmente causem leucemia em crianças [17].



# Capítulo 3

## MÉTODOS DE MEDIÇÃO



### 3.1 Considerações iniciais

No Brasil a Norma NBR 15415 define os procedimentos de medição para a caracterização dos campos elétricos e magnéticos de baixa frequência.

A Norma estabelece os procedimentos para medição dos valores eficazes do estado-permanente de campos elétricos e magnéticos quase estáticos ( $f \ll c/l$ , onde  $f$  é a frequência do campo,  $c$  é a velocidade da luz, e  $l$  é uma dimensão característica de uma medida geométrica, por exemplo, a distância entre a fonte do campo e o ponto de medição) que têm componentes de frequência 50 e 60 Hz. Fontes de campos quase estáticos incluem dispositivos que operam nas frequências industriais e produzem campos nessas frequências industriais e suas harmônicas [3].

Para uma boa caracterização dos campos elétricos e magnéticos através de medições deve ser feita uma escolha adequada dos procedimentos de medição. De acordo com a necessidade específica da medição algumas características dos campos, como variação temporal, variação espacial, componentes de frequência, entre outras devem ser avaliadas para que os objetivos sejam atingidos [18].

Uma vez os objetivos identificados, deve ser feita a escolha adequada da instrumentação que será utilizada. Vários tipos de medidores são encontrados para a medição dos campos elétricos e magnéticos. A seguir serão apresentados os medidores de campo elétrico existentes [18].

### 3.2 Medidores de intensidade do campo elétrico alternado

São medidores projetados para medir campos elétricos alternados. Três tipos de medidor de intensidade de campo elétrico estão disponíveis: medidor de espaço livre, medidor de referência de terra e medidor eletro-óptico.

Os três tipos são constituídos de duas partes: a sonda ou elemento sensível de campo, e um detector que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz do campo elétrico através de um mostrador analógico ou digital.





Os sensores também podem ser de eixo único ou três eixos. Para medições de campo elétrico nas proximidades do solo é indicada a utilização do equipamento na posição vertical [4], pois nessa região a componente vertical é a mais representativa no campo resultante [19]. O campo elétrico resultante também pode ser determinado através da medição dos valores eficazes dos três componentes espaciais ortogonais e o cálculo com a aplicação da equação 3.1.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (3.1)$$

Os sensores de três eixos são compostos por três pares de placas paralelas arranjadas ortogonalmente que detectam o campo nas três direções do espaço. O campo elétrico resultante é determinado pelo detector também através da equação 3.1.

### 3.2.1 Medidor de espaço livre

Medidores de espaço livre medem a intensidade do campo elétrico em um ponto acima do solo, suspenso no espaço sem um contato condutivo ligado a terra.

São construídos para medir a corrente elétrica induzida entre duas partes isoladas de um corpo condutor. Sabendo que a corrente elétrica induzida é proporcional à derivada no tempo da intensidade de campo elétrico, o circuito do detector do medidor contém frequentemente um estágio integrador com a finalidade de recuperar a forma de onda da intensidade de um campo elétrico. A corrente da onda integrada também coincide com a corrente recarregada induzida. O estágio de integração é também desejado, particularmente para a medição dos campos elétricos harmônicos, pelo fato dele eliminar a carga excessiva das componentes harmônicas no sinal da corrente induzida [3].



### 3.2.2 Medidor de referência de terra

Medidores de referência de terra medem o campo elétrico na superfície do solo ou próximo dela, frequentemente usado para medir a corrente induzida ou a oscilação da carga entre um eletrodo isolado e o solo. O eletrodo isolado é geralmente uma placa localizada no mesmo nível ou um pouco abaixo da superfície do solo [3].

Estes medidores frequentemente contêm um circuito integrador para compensar a relação da derivada entre a corrente induzida e o campo elétrico [3].

### 3.2.3 Medidor eletro-óptico

Medidores eletro-óptico medem a intensidade do campo elétrico através de mudanças na transmissão da luz por meio de uma fibra ou cristal sob o efeito do campo elétrico.

Enquanto vários métodos eletro-ópticos podem ser usados para medir campos elétricos, por exemplo, o efeito Pockels, o efeito Kerr e técnicas interferométricas, a Norma NBR 15415 considera apenas medidores de campo eletro-óptico que utilizam o efeito Pockels.

As células Pockels podem ser classificadas em [20]:

- Longitudinais: campo elétrico externo é aplicado na direção do eixo óptico.
- Transversais: campo elétrico externo é aplicado perpendicularmente à direção de propagação.

#### 3.2.3.1 Efeito Pockels

O Efeito Pockels, ou Efeito Pockels electro-óptico, é a produção de birrefringência proporcional ao campo elétrico em um meio óptico induzida por um campo elétrico lentamente variável. O efeito Pockels ocorre somente em



cristais que não tenham simetria de inversão (não centro-simétricos), tais como o niobato de lítio ou o arsenieto de gálio [21].

O efeito Pockels é usado na construção de células de Pockels, que são placas de onda controladas por tensão. Em associação com um polarizador, estas podem ser usadas para criar obturadores super rápidos, que podem alternar entre condução e bloqueio da luz em intervalos de nano segundos. Estas combinações de dispositivos são usadas em uma variedade de aplicações técnicas e científicas [21].

As células de Pockels também podem ser usadas para modulação em fase um raio laser incidente. Quando um campo elétrico senoidal é aplicado a este material birrefringente, o raio incidente é modulado em fase em relação ao campo variável E.

Friedrich Carl Alwin Pockels estudou o efeito, que leva o seu nome, em 1893. A figura 3.1 mostra uma célula Pockels transversal.

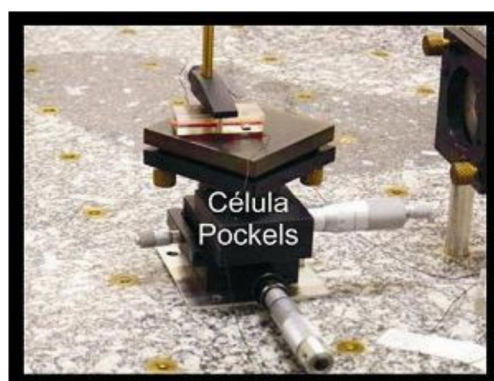


Fig. 3.1 - Célula Pockels transversal

Fonte: Seminário Transdutor óptico de tensão, Universidade Federal do Paraná [20]

### 3.3 Procedimentos de Medição

O campo elétrico na frequência industrial é modificado em magnitude ou direção, ou ambos, pela introdução de um objeto ou uma pessoa, por isso durante as medições de campo elétrico, o observador deve ficar distante da sonda para evitar uma perturbação significativa do campo no ponto de medição [4], [22]. Existem medidores de espaço livre, projetados para que o visor seja separado do elemento sensor através de uma conexão por cabo de fibra-



óptica, minimizando as perturbações introduzidas pelo operador do equipamento [23].

A medição de campo não perturbado deve ser feita com uma instrumentação que indique a magnitude e direção do campo elétrico, por exemplo, medidores de eixo único de espaço livre, medidores de três eixos de espaço livre que indicam a orientação do campo, medidores eletro-ópticos, e medidores de referência de terra. O tamanho da sonda ou dos elementos sensores deve ser apropriado para variações espaciais do campo e a proximidade de áreas planas condutoras que estiverem perto [3].

A banda passante do instrumento deve ser apropriada ao conteúdo da frequência do campo que está sendo medido. Quando o campo é tal, que a banda passante do instrumento pode afetar significativamente a leitura (i.e. onde mais de uma frequência está presente no campo), a banda passante deve ser registrada e reportada com os resultados.

Quando campos elétricos são produzidos por sistemas de potência, as frequências apresentadas serão, normalmente, as fundamentais (50 Hz ou 60 Hz). Um instrumento com banda passante mais estreita, centrado na frequência industrial será conveniente nos casos de medição do valor eficaz do campo elétrico [3].

Equipamentos portáteis que emitem campos eletromagnéticos (por exemplo, telefones celulares) devem ser desligados ou não ser usados quando estiverem sendo feitas medições de campo elétrico.

### 3.3.1 Medindo a exposição humana

Considera-se que as medições de campos elétricos praticamente uniformes correspondem a expor todo o corpo humano dos que estão presentes no local e hora da medição. Medições de campo elétrico em campos não uniformes têm uma interpretação mais restrita ao determinar a exposição humana, isto é, a medição do campo representa a exposição humana apenas para aquela porção de anatomia humana a qual coincidiria com o local da



medição. A escolha dos locais da medição pode variar dependendo em parte das fontes do campo e da posição relativa do ser humano [3].

Diferentemente de campos magnéticos, campos elétricos serão perturbados pelo corpo humano. Devido aos valores de referência de exposição ser expressos em termos de campo elétrico não perturbado, deve-se obter a caracterização de um campo elétrico não perturbado.

Como parte do processo para desenvolver o protocolo de medição para determinar a exposição humana em campos elétricos, os objetivos de medição e métodos para alcançá-los devem ser claramente indicados para determinar os requisitos de instrumentação e calibração, por exemplo, a banda passante, escala de magnitude, e pontos de frequência de calibração. O protocolo de medição deve indicar quais parâmetros de campo devem ser medidos, quando as medições serão feitas e como as medições devem ser feitas. Em geral, um único protocolo de medição pode não ser suficiente para atender todas as situações [3].

Medidores de espaço livre e eletro-óptico devem ser suficientemente pequenos para que a dimensão da sonda não perturbe significativamente as distribuições da carga nos limites da superfície que geram o campo elétrico, isto é, superfícies energizadas e aterradas. Embora os medidores de campo sejam calibrados em campos elétricos praticamente uniformes, o campo que é medido não precisa ser muito uniforme. Medidores de campo elétrico medem a projeção do vetor do campo elétrico oscilante (linearmente polarizado) ou girante (elipticamente ou circularmente polarizado) nos eixos elétricos de sonda (o eixo da maior sensibilidade do campo elétrico). Medidores de campo elétrico de espaço livre, de três eixos, são disponíveis para medir o campo elétrico resultante [3].

### **3.3.2 Teoria de operação**

#### **3.3.2.1 Medidores de espaço livre**

Medidores de espaço livre determinam a intensidade do campo elétrico medindo a corrente induzida permanente ou a carga oscilante entre as duas



partes condutoras (eletrodos) de uma sonda isolada eletricamente, depois da sonda ser introduzida no campo elétrico. Nos medidores comercialmente disponíveis, o detector é geralmente contido dentro ou é parte integrante da sonda. A sonda e o detector são mantidos no campo elétrico pela extremidade isolante [24], [25]. Ele é adequado para medições de mapeamento porque é portátil, permitindo medições acima do plano da terra, e não requer uma referência de potencial de terra. Existem medidores de eixo único e três eixos comercialmente disponíveis e estes são normalmente alimentados por bateria.

Também existem medidores de espaço livre projetados para ter um display remoto da intensidade do campo elétrico. Nesse caso, uma porção do circuito processador de sinal está contida na sonda e o resto do detector está em uma parte separada com um display analógico ou digital. Uma conexão por fibra-óptica conecta a sonda à unidade de display [26], [27].

A figura 3.2 mostra medidores de espaço livre de eixo único.

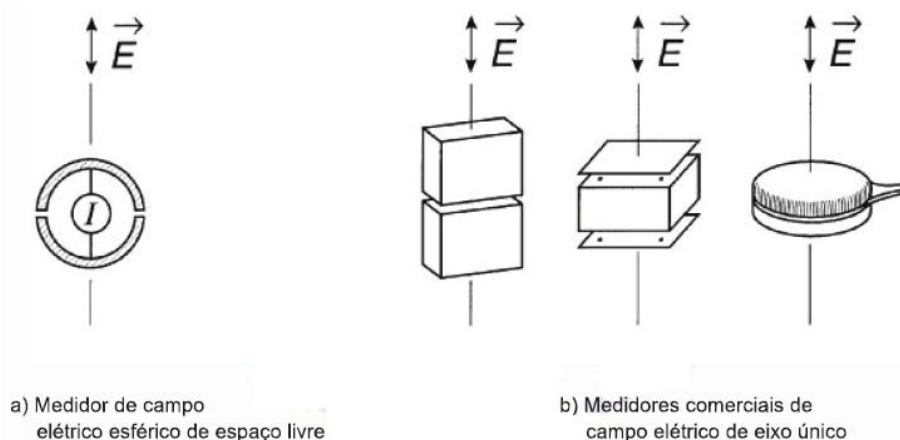


Fig. 3.2 - Geometrias do medidor de espaço livre de eixo único  
Fonte: NBR 15415, 2006 [3]

A teoria de operação dos medidores de espaço livre pode ser entendida considerando um corpo condutor descarregado com partes ou eletrodos separados, introduzidos em um campo elétrico uniforme  $E$ . A carga induzida em um dos eletrodos é dada pela equação 3.2 [18].

$$Q = \int_{s/2} D \cdot n \, dA \quad (3.2)$$



Onde,

$Q$  – carga induzida em Coulomb;

$D$  – vetor densidade de campo elétrico;

$n$  – vetor unitário perpendicular à superfície do eletrodo;

$dA$  – elemento da área na metade do corpo com superfície total  $S$ .

Para o caso de uma geometria esférica como mostrado na figura 3.2a o resultado é dado pela equação 3.3.

$$Q = 3\pi \times a^2 \varepsilon_0 E \quad (3.3)$$

Onde,

$\varepsilon_0$  – permissividade do vácuo (F/m);

$E$  – campo elétrico (V/m);

$a$  – raio da esfera (m).

Já para geometrias menos simétricas o resultado é dado pela equação 3.4.

$$Q = k \varepsilon_0 E \quad (3.4)$$

Onde,

$k$  – constante dependente da geometria da sonda fornecida pelo fabricante do instrumento.

A figura 3.2b mostra eletrodos sensores que usam cubos e placas paralelas. Neste tipo de sensor, se o campo elétrico for senoidal, a carga induzida oscila entre as duas partes e a corrente é dada pela equação 3.5.

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega E_0 \cos\omega t \quad (3.5)$$

Onde,

$I$  – corrente circulante (A);

$E_0$  – Campo elétrico uniforme (V/m).



A constante  $k$  pode ser considerada uma constante de medidor de campo e é determinada pela calibração. A influência do suporte manual, representando uma impedância de fuga, e a perturbação introduzida pelo observador é tida como desprezível na discussão acima.

Se houver harmônicas no campo elétrico, existe um termo adicional no lado direito da equação 3.5 para cada harmônica. Por causa da operação de diferenciação na equação 3.5, cada um dos termos adicionais é ponderado pelo número da harmônica associada. Por exemplo, um amplificador integrador ou um circuito passivo integrador combinados com um voltímetro, podem ser usados como um detector. A resposta em frequência da combinação da sonda e do circuito integrador deve ser plana na faixa de frequência de interesse. Filtros devem ser usados para excluir os sinais que estiverem fora da faixa de frequência de interesse.

### 3.3.2.2 Medidores de referência de terra

Medidores de referência de terra determinam a intensidade do campo elétrico medindo a corrente ou carga da superfície sensora de uma sonda plana. Tais medidores são normalmente usados para medir o campo elétrico no nível do solo ou em superfícies condutoras planas que estão no potencial de terra. Duas sondas projetadas têm sido empregadas. Um projeto usa de um único condutor plano com uma seção central isolada que serve como uma superfície sensora. Pequenas versões desse tipo de sonda têm sido feitas com uma placa de circuito coberta por uma dupla face. Um segundo projeto consiste de duas placas paralelas separadas por uma lâmina fina de isolamento, com a placa superior agindo como a superfície sensora [3], como mostrado na figura 3.3.

A carga  $Q$  induzida na superfície sensora (Lei de Gauss) é dada pela equação 3.6.

$$Q = \epsilon_0 EA \quad (3.6)$$

Onde,

$E$  – média da intensidade do campo elétrico na área sensora (V/m);





A – raio da bobina sonda (m);

Q – carga induzida (C).

Se o campo variar senoidalmente a corrente induzida será dada pela equação 3.7.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \epsilon_0 E_0 A \cos \omega t \quad (3.7)$$

Onde,

$E_0$  – intensidade campo elétrico uniforme (V/m);

I – corrente na bobina de campo (A).

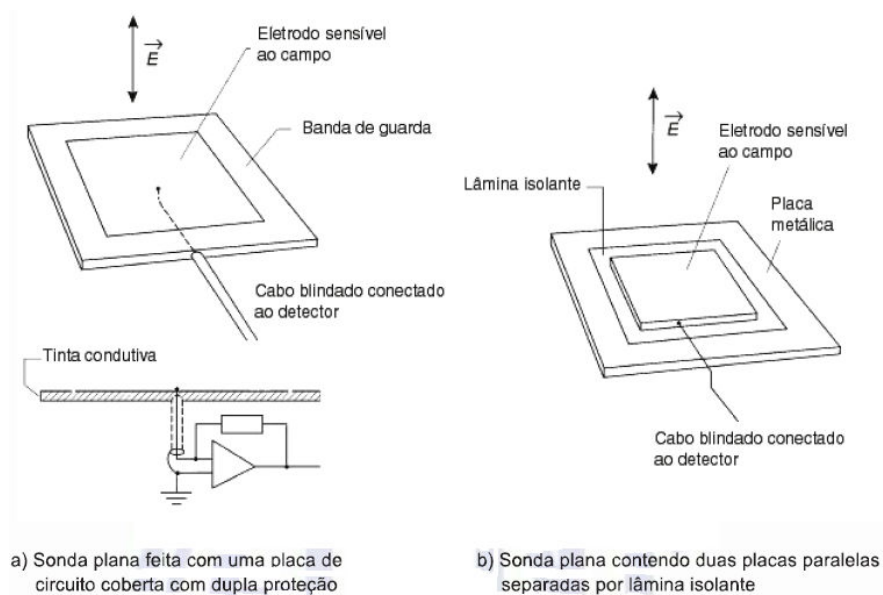


Fig. 3.3 - Sondas planas usadas em medidores de terra

Fonte: NBR 15415, 2006 [3]

No caso da existência de harmônicas o processo é análogo ao descrito para medidores de espaço livre.

Medidores de campo elétrico com sondas planas podem ser usados para medir a intensidade do campo elétrico em superfícies planas energizadas eletricamente se o detector é operado no mesmo potencial que a superfície energizada. Em tais casos, o display analógico ou digital do detector deve ser observado remotamente, por exemplo, visualmente, a uma distância, ou usando uma conexão de fibra-óptica [3].



### 3.3.2.3 Medidores eletro-ópticos

O medidor de campo eletro-óptico considerado na norma emprega uma sonda que exhibe o efeito de Pockels quando introduzido no campo elétrico. Este tipo de medidor de campo é similar ao medidor de espaço livre que é apropriado para medições de mapeamento, permite medições na maioria dos pontos acima do plano da terra, e não requer uma referência do potencial de terra. A sonda, que é separada do detector, pode ser apoiada no campo isolante. A sonda e o detector são conectados com fibras ópticas através da qual a luz do detector é enviada da e para a sonda. Em geral, as sondas são pequenas em dimensão (~0,02 m) comparadas com as sondas dos medidores de espaço livre e isso permite que medições feitas sejam próximas de superfícies condutoras devido a pequenas interações com as distribuições de carga na superfície. Entretanto, mesmo pequenas nas dimensões, as sondas de efeito Pockels têm menos sensibilidade a campos elétricos (~5 kV/m e maiores) quando comparadas aos medidores de espaço livre (~1 V/m e maiores) e são mais caras para fabricar [3].

A figura 3.4 mostra um esboço da sonda de efeito Pockels e seus componentes constituintes. A luz originária do detector é enviada da e para a sonda via fibras ópticas. O campo elétrico induz uma refração dupla em um cristal (Pockels) dielétrico adequadamente orientado que causa a modulação da intensidade de uma luz polarizada linearmente de acordo com a equação 3.8 [28].

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{[1 + \sin(E'/F)]}{2} \quad (3.8)$$

$$F = \frac{\lambda}{2\pi n^3 c_e l} \quad (3.9)$$

Onde,

$I_t$  – luz transmitida (cd);

$I_i$  – luz incidente (cd);

$E'$  – campo elétrico no cristal (V/m);



$\lambda$  - comprimento de onda da luz (nm);

$n$  – índice de refração;

$l$  – espessura do cristal (nm);

$c_e$  – coeficiente eletro-óptico do cristal.

A equação 3.8 mostra que a amplitude da modulação da luz é uma função do campo elétrico no cristal que, por sua vez, é dependente de um campo externo  $E$ . Devido à transmissão da luz rastrear a forma de onda do campo elétrico, um estágio de integração é desnecessário no detector para processar apropriadamente sinais devido às harmônicas que podem estar presentes no campo elétrico. O cristal Pockels é às vezes revestido com eletrodos transparentes para permitir medições de voltagem usando o efeito Pockels. Medidores eletro-ópticos podem funcionar ligados à rede ou à bateria.

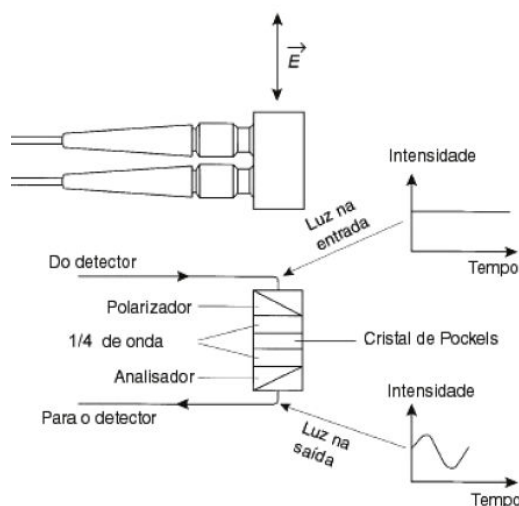


Fig. 3.4 - Sonda para medição de efeito Pockels  
Fonte: NBR 15415, 2006 [3]

### 3.3.3 Metas e métodos de medição

Abaixo é apresentada uma lista de metas e possíveis métodos de medição para o alcance dessas metas. Para cada meta a banda de passagem da frequência da instrumentação é escolhida para a frequência ou frequências de interesse.

- Caracterização dos níveis de campo elétrico;



- Caracterização de variações espaciais;
- Caracterização da variação temporal;
- Caracterização da média ponderada no tempo do campo elétrico;
- Caracterização da intermitência do campo elétrico;
- Caracterização dos níveis de campo excedendo um valor específico;
- Caracterização do conteúdo da frequência no campo elétrico.

### 3.3.3.1 Caracterização dos níveis de campo elétrico

A Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009 regulamenta os limites da exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses valores requerem a determinação dos níveis de campo com a maior magnitude assim como suas direções em áreas específicas.

Medidores de espaço livre ou eletro-ópticos devem ser usados para fazer medições pontuais em campos elétricos máximos ou resultantes. Medidores de referência de terra devem ser usados para medidas no plano de terra ou em superfícies no potencial de terra. Instruções existem para medir predominantemente a vertical do campo elétrico da frequência industrial próxima do nível do solo nas vizinhanças das linhas de potência [29]. O campo elétrico vertical é frequentemente medido porque essa quantidade pode ser usada para calcular efeitos de indução em objetos próximos do nível do solo [30]. Diferentemente das medições pontuais de campos magnéticos de linhas de potência, os valores medidos não mudarão muito porque as tensões se mantêm quase constantes (a flecha dos condutores devido ao aquecimento provocado por altas correntes de carga pode levar a níveis maiores de campo).

Algumas instruções são dadas para medir a frequência industrial de campos elétricos longe de linhas de potência onde a área geométrica do campo é bem menos definida [29]. Um arranjo similar, aquele usado para determinar efeitos de proximidade também pode ser usado para realizar



medições. Estimativas da variação dos níveis do campo elétrico podem ser obtidas fazendo medições pontuais com todas as ferramentas elétricas e equipamentos ligados e desligados na área de interesse [31].

### **3.3.3.2 Caracterização de variações espaciais**

A distribuição espacial de campos elétricos distantes das linhas de potência é tipicamente desconhecida. Campos elétricos alternados, na maioria dos ambientes, serão não uniformes devido às dependências espaciais das fontes dos campos (condutores energizados).

Medições de variação espacial requerem o registro das componentes do campo elétrico em função da posição física. Existem normas para realizar tais medições próximas de linhas de potência [29], [25]. Tais medições podem ser feitas com os medidores mapeadores. O software fornecido com tal instrumentação permite a geração de registros sobre o perfil da intensidade do campo elétrico, equipotenciais de campo, análises estatísticas dos níveis do campo, etc. Tais dados não irão captar as variações temporais do perfil do campo sem que haja medições repetidas. Variações no campo podem ocorrer se a sonda for movimentada, passando pelas superfícies com carga elétrica, tais como plásticos e roupas sintéticas.

### **3.3.3.3 Caracterização da variação temporal**

As variações temporais dos campos elétricos, em geral, não podem ser maiores que as variações dos campos magnéticos. Campos elétricos são produzidos por condutores que são energizados eletricamente. O campo elétrico em certo ponto será a soma das contribuições vetoriais de todos os condutores energizados nas vizinhanças do local de medição. Efeitos de blindagem fornecidos por materiais de construção, que podem depender das condições do tempo (como estruturas molhadas em um tempo chuvoso), podem contribuir para essa variação. Variações de curto prazo irão ocorrer se



houver o movimento de objetos condutores (como carro e caminhões) que estiverem passando pelos locais de medição.

Instrumentação de espaço livre que registra periodicamente o campo elétrico em um ponto no espaço e que pode ser usada em uma análise posterior, para determinar as variações temporais (ver meta 3.3.3.2), é disponível. Medidores de referência de terra que podem ser usados com registradores de dados, disponíveis comercialmente, para registrar o campo elétrico nas superfícies do solo para uma análise posterior. A banda passante de frequência da instrumentação deve ser adequada para a frequência ou frequências de interesse (ver 3.3.3.5).

#### **3.3.3.4 Caracterização dos níveis de campo excedendo um valor específico**

Esses parâmetros podem ser determinados para intervalos de tempo de interesse pela análise dos dados coletados com os medidores de campo elétrico que tem capacidade de registro (ver 3.3.3.2 e 2.3.3.3).

#### **3.3.3.5 Caracterização do conteúdo da frequência no campo elétrico**

Devido aos valores de referência do campo magnético ser colocados em função da frequência [32], [33], a caracterização do conteúdo da frequência pode ser uma meta importante.

A instrumentação de espaço livre comercialmente disponível, que pode registrar periodicamente a forma da onda do campo elétrico, possui um software que permite a determinação do conteúdo da frequência dos dados gravados. Os sinais dos medidores de campo elétrico de referência de terra podem ser usados com analisadores de espectro para determinar o conteúdo da frequência dos campos caracterizados em superfícies aterradas. Medidores de espaço livre de três eixos que podem ser sintonizados em certas frequências estão sendo desenvolvidos. A banda de passagem de frequência



da instrumentação deve ser adequada para a frequência ou frequências de interesse.

### **3.3.3.6 Caracterização da polarização do campo elétrico**

Uma caracterização completa do campo elétrico requer uma determinação da sua polarização para uma dada frequência.

Medidores de campo de espaço livre de eixo único, medidores de campo eletro-ópticos podem ser usados para medir os valores eficazes dos semi-eixos maior e menor da elipse do campo elétrico para determinar sua polarização em um ponto no espaço. Os medidores de espaço livre de três eixos que podem indicar a polarização também estão em desenvolvimento. Como observado anteriormente, esse procedimento assume que apenas uma única componente de frequência do campo está sendo medida. Com a presença de outras frequências no campo, o vetor elétrico girante não traça mais uma simples elipse. Instrução para a determinação da polarização próxima de linhas de potência é dada em [29], [25].

### **3.3.3.7 Caracterização da exposição humana ao campo elétrico**

Uma distinção deve ser feita entre a caracterização de um ou mais parâmetros do campo elétrico e a exposição a tais parâmetros. Como foi discutido previamente, devido ao fato dos medidores de exposição a campo elétrico não serem facilmente disponíveis, e a interpretação dos dados registrados serem complicada, uma determinação direta da história da exposição pode ser difícil. Isso sugere que o campo elétrico não perturbado seja caracterizado em termos de um ou mais parâmetros de interesse considerados nas metas de 3.3.3.1 até 3.3.3.5. Estimativas da exposição humana para um ou mais parâmetros em uma área específica podem ser feitas por uma combinação de medições de variações espaciais e temporais e informações que descrevam padrões de atividades humanas na área. Um



estudo dessa técnica levou a determinação dos “fatores de atividades” que podem ser usados como parte do processo para estimar a exposição de longo prazo no campo elétrico em uma área agrícola [34]. A magnitude do campo na superfície do corpo pode ser estimada usando fatores de aprimoramento previamente determinados para a área do campo considerada.

Para geometrias fixas de campo elétrico, durante as quais existe uma movimentação humana limitada, a intensidade do campo elétrico perturbado na superfície do corpo pode ser determinada usando um manequim vestindo uma capa condutora e sondas planas isoladas eletricamente ou sensores afixados na superfície do manequim nos locais de interesse [24]. Os potenciais de referência do manequim e circuitos detectores das sondas são mantidos os mesmos, e podem ser variados para ficar quase compatíveis com as condições predominantes nos ambientes reais. Registrando o sinal de saída do detector com um registrador de dados obtém-se a informação sobre a variação temporal do campo perturbado.

### 3.4 Considerações finais

As diferentes características dos campos elétricos e magnéticos, tais como componentes de frequência, variações temporais, variações espaciais e intensidade requerem um conhecimento prévio das fontes e do ambiente para a definição dos métodos e procedimentos para a caracterização desses campos.

As fontes principais de campo elétrico e magnético em uma subestação são as tensões e correntes elétricas dos equipamentos na frequência apresentada pelos sistemas de potência (50 ou 60 Hz). A variação de intensidade do campo elétrico ao longo do dia não é muito significativa, pois ele está associado às tensões que se mantêm praticamente constantes (a não ser pelas quedas de tensão que dependem da corrente) [18].

Limites de campo elétrico em função da frequência têm sido recomendados e adotados em vários países. No Brasil a Lei nº 11.934 limita os valores máximos de campo elétrico para exposição humana. Desta forma, uma caracterização dos campos elétricos em uma subestação para comparação





com os níveis recomendados torna-se importante. Essa caracterização pode ser feita durante a fase de projeto da subestação e depois que ela estiver em operação. Na fase de projeto, os campos podem ser determinados através da simulação em softwares, como por exemplo, o FEMM, método proposto neste trabalho. Este estudo visa garantir que os campos gerados não ultrapassarão os valores recomendados pela norma. Os valores utilizados deverão ser para a condição máxima de operação, que implicarão em valores resultantes máximos do campo elétrico. Com a subestação em operação além do método de elementos finitos, o campo elétrico pode ser determinado através de medição, para verificar se os níveis estão dentro dos recomendados pelas normas para renovação da licença de operação, para estudos do compartilhamento da faixa de servidão com outras instalações [35] ou até mesmo para verificar a segurança das pessoas em áreas invadidas. Os procedimentos para medição dos campos elétricos foram apresentados neste capítulo.



# Capítulo 4

## MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS



## 4.1 Considerações iniciais

O método dos elementos finitos (MEF ou *FEM* em inglês) é uma ferramenta de resolução numérica para resolver equações diferenciais parciais. Esse tipo de equação descreve a maioria dos problemas dentro da engenharia. O inconveniente é que sua solução é complexa e só possível de ser feita analiticamente no caso de sistemas muito simples, o que na maioria das vezes não é o que ocorre em sistemas reais. Para resolver esse problema, utilizam-se os métodos numéricos para obtenção da solução aproximada.

Dentre esses métodos se destacam: método das diferenças finitas, método dos elementos de contorno, método dos volumes finitos, método de Galerkin, método de Rayleigh-Ritz e o método dos elementos finitos. O método a ser utilizado vai depender do problema que se deseja estudar, já que dependendo da aplicação, da solução desejada, capacidade computacional um dos métodos vai simula-lo com um erro menor. Devido à grande quantidade de softwares livres que surgiu o FEM se tornou o método mais popular entre todos. Além disso, ele apresenta menos limitações e dificuldades do que outros métodos.

O método dos elementos finitos consiste em dividir a geometria do objeto estudado em várias regiões, os elementos finitos, discretizando um domínio contínuo. Essa divisão é chamada de malha (grid) e é composta de faces e nós (pontos de interseção entre os elementos) e são constituídas por triângulos ou quadriláteros (bidimensional) ou pirâmides e tetraedros (tridimensional). Através dos nós é montado um sistema de equações que permite solucionar o problema analisado. No caso eletromagnético, a solução será o potencial magnético ou elétrico em cada nó, a partir dos quais se determina os campos magnéticos e elétricos, energia, força, torque, resistência, capacitância, indutância.

O FEM pode ser usado em diversas aplicações:

- Estruturas oceânicas e navios;
- Veículos rodoviários e ferroviários;
- Hidrogeradores;



- Estruturas aeroespaciais e aviões;
- Mecânica estrutural;
- Mecânica dos fluidos computacionais;
- Condução de calor;
- Eletromagnetismo.

## 4.2 Etapas na solução de um problema via FEM

As etapas do método de elementos finitos são:

### 1. Pré-processamento:

- Desenho da geometria do objeto estudado;
- Imposição das propriedades físicas dos meios e materiais envolvidos;
- Imposição dos valores das fontes de campo no objeto;
- Imposição das condições de contorno;
- Geração da malha;

### 2. Processamento:

- Montagem do sistema de equações;
- Resolução das equações através de métodos iterativos;

### 3. Pós-processamento:

- Através dos resultados obtidos nas etapas anteriores é possível calcular parâmetros necessários a análise do problema. Esses parâmetros podem ser:
  - Superfícies equipotenciais;
  - Energia;
  - Força;
  - Torque;
  - Campos eletromagnéticos;
  - Potencial;



- Entre outros.

#### 4.2.1 Discretização do domínio de solução dentro de uma malha de elementos finitos

Os elementos finitos podem ser de três tipos: unidimensional, bidimensional e tridimensional. As figuras 4.1 e 4.2 mostram exemplos dos dois últimos.

Apesar da tendência que se tem de acreditar que elementos finitos 3D resultariam em respostas mais exatas que os outros dois modelos, isso nem sempre é verdade. A escolha do elemento depende da geometria do objeto analisado e da aproximação que se deseja obter.

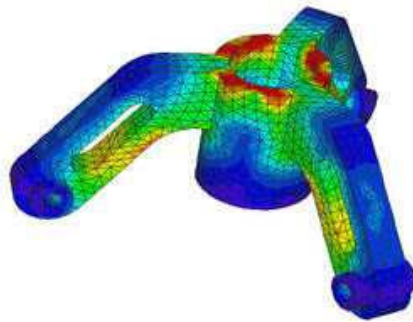


Fig. 4.1- Elemento finito tridimensional  
Fonte: Introdução ao Método de Elementos Finitos, 2009 [36]

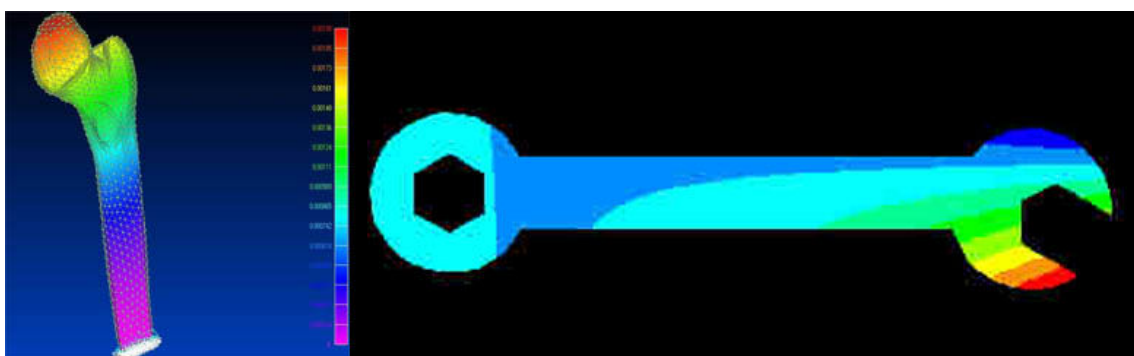


Fig. 4.2 - Elemento finito bidimensional  
Fonte: Introdução ao Método de Elementos Finitos, 2009 [36]



### 4.3 Modelo Matemático do FEM para problemas eletrostáticos

O modelo eletrostático é baseado nas Leis de Maxwell e considera o comportamento da intensidade de campo elétrico  $E$ , e densidade de fluxo elétrico  $D$ .

A primeira equação vem da Lei de Gauss que estabelece a relação entre o fluxo elétrico que passa através de uma superfície fechada e a quantidade de carga elétrica que existe dentro do volume limitado por esta superfície. A lei de Gauss é uma das quatro Equações de Maxwell e foi elaborada por Carl Friedrich Gauss no século XIX. A equação 4.1 mostra essa relação.

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4.1)$$

Onde,

$\rho$  – densidade de carga.

A segunda relação é a Lei circuital de Ampère na forma diferencial e é mostrada na equação 4.2.

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (4.2)$$

A equação 4.3 mostra a relação entre o campo e a densidade de fluxo elétrico.

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (4.3)$$

Onde,

$\varepsilon$  – Permissividade elétrica.

Vale ressaltar que em alguns problemas eletrostáticos a relação entre  $E$  e  $D$  não é linear, no entanto neste estudo a relação linear dada por 4.3 será considerada, o que simplifica os cálculos. Neste contexto, o potencial elétrico é dado por 4.4.

$$E = -\nabla V \quad (4.4)$$



Devido ao vetor identidade dado por 4.5 a Lei Circuital de Ampère é automaticamente satisfeita.

$$\nabla \times \nabla f = 0 \quad (4.5)$$

Substituindo os valores de D e E na Lei de Gauss obtém-se a relação 4.6.

$$-\varepsilon \nabla^2 V = \rho \quad (4.6)$$

A equação 4.6 se aplica para regiões com  $\varepsilon$  homogêneo. O método dos elementos finitos consiste em resolver a equação 4.6 para a tensão ao longo de um domínio, com fontes e condições de contorno definidas.

Como já mencionado a resolução das equações apresentadas são muito difíceis de serem feitas de forma analítica. Foi justamente isso que levou ao desenvolvimento e utilização do método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos consiste em discretizar o objeto de estudo em pequenas regiões, os “elementos finitos”. A formulação é então aplicada a cada um desses elementos e se obtém a solução global do problema. Quanto menores forem as regiões discretizadas, mas o resultado se aproxima do real, dado pela solução contínua da região.

Como os problemas ligados ao eletromagnetismo são por sua natureza de alta complexidade física, a utilização de elementos finitos simples facilitam o trabalho. No caso deste trabalho, serão utilizados os elementos finitos triangulares, como o mostrado na figura 4.3.

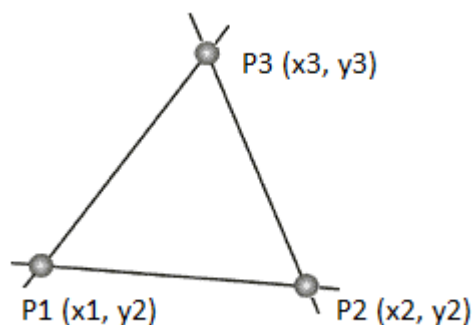


Fig. 4.3 - Elemento finito triangular  
Fonte: acervo da autora



Considerando que o potencial varia linearmente no interior do elemento as equações dos três nós ficam:

$$\begin{aligned}V_1 &= a_1 + a_2x_1 + a_3y_1 \\V_2 &= a_1 + a_2x_2 + a_3y_2 \\V_3 &= a_1 + a_2x_3 + a_3y_3\end{aligned}\tag{4.7}$$

Através da resolução das equações acima, a partir do prévio conhecimento das coordenadas dos pontos e dos potenciais dos nós, obtêm-se os valores de  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ .

#### 4.4 Elementos finitos bidimensionais

Quando o problema a ser solucionado for 2D, as equações diferenciais a serem resolvidas pelo método dos elementos finitos serão de segunda ordem.

Os sistemas que podem ser descritos por equações de segunda ordem são:

- Fluxo de potência 2D;
- Fluxo de calor em regime permanente;
- Difusão;
- Barras sujeitas a torção;
- Deformação em placas e membranas;
- Campos eletromagnéticos 2D.

Somente em poucas situações que uma equação diferencial de segunda ordem terá solução exata obtida de forma analítica. Por isso na maioria das vezes a solução será encontrada via método numérico, dentre os quais está o método dos elementos finitos.

#### 4.5 Considerações finais

Como a maioria dos problemas de engenharia são descritos por equações diferenciais parciais, sua resolução analítica é complexa, principalmente se





tratando de problemas reais, que não são simples. Neste caso a utilização de métodos computacionais é de suma importância para resolução dos problemas.

Dentre os métodos existentes o de elementos finitos se tornou o mais popular devido à existência de vários softwares livres.

Dentro da eletrostática, área do presente trabalho, é possível através do método dos elementos finitos a determinação dos campos elétricos de uma instalação, pela resolução computacional das Equações de Maxwell.



# Capítulo 5

## ESTUDO DE CASO



## 5.1 Considerações iniciais

No presente capítulo será estimado o campo elétrico em vários pontos de uma subestação real, através da simulação no programa FEMM, como discutido no capítulo anterior.

Para tal serão utilizados cortes em duas dimensões da referida subestação.

## 5.2 Validação do método

Como as normas limitam o campo elétrico não perturbado sua medição se torna um procedimento difícil de ser realizado, pois a presença de uma pessoa ou dos aparelhos de medição altera o seu valor. Dentro deste contexto, o intuito deste trabalho é mostrar que um método de elementos finitos pode ser usado para estimar o valor do campo não perturbado de forma mais prática e fácil.

Neste primeiro momento será feita uma simulação do campo elétrico de uma linha de transmissão e os valores obtidos comparados à medição da grandeza e simulação feita pelo Método de Simulação de Cargas (MSC) acoplado com o Método de Elementos de Contorno (MEC) [37].

Esse procedimento é para validar o método que será utilizado no trabalho e mostrar que o mesmo pode ser utilizado com erro pequeno. Os valores de medição e a simulação pelos métodos MSC e MEC foram retirados de [37]. Além disso, como o programa utilizado neste trabalho é bidimensional, esse procedimento será também para validar o método em duas dimensões em relação a três dimensões.

Será simulado o campo elétrico de uma linha de transmissão (LT) de 400 kV mostrada na figura 5.1.





Fig. 5.1 - Linha de transmissão a ser simulada  
Fonte: Tese de doutorado, Mário Pereira, 2005 [37]

### 5.2.1 Dados da LT

Circuito horizontal, 400 kV, *bundle* de dois condutores de 525 mm<sup>2</sup> distanciados de 0,4 m, distância entre fases de 10,3 m, altura em relação ao solo plano 15 m, cabos paralelos ao solo.

A figura 5.2 mostra o módulo do componente vertical do campo elétrico a 1,8 m de altura em relação ao solo, resultado obtido pelo método MSC (curva) [37], enquanto que os pontos mostrados na figura são valores medidos experimentalmente. Analisando o gráfico, observa-se que os valores do MSC com os medidos são bem concordantes.



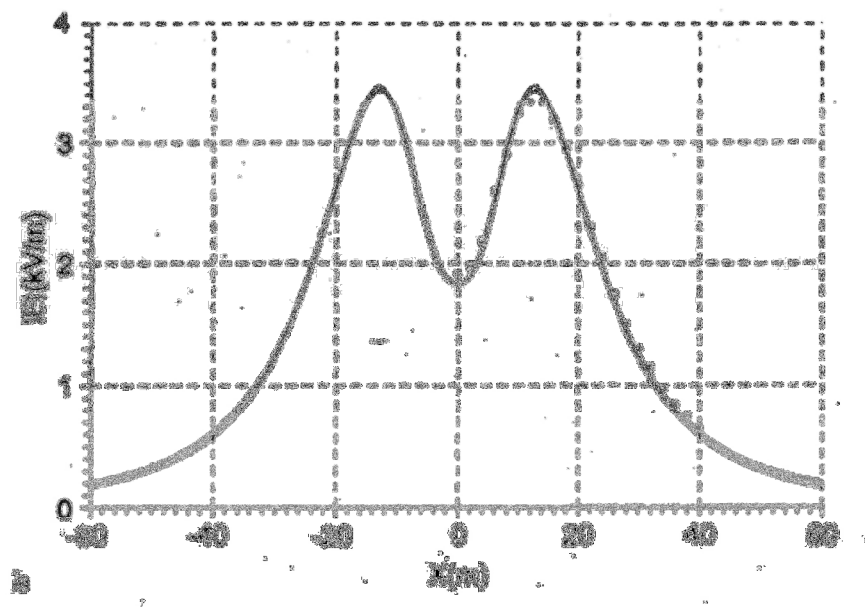


Fig. 5.2 - Campo elétrico 1,8 m do solo - medido e método MSC  
Fonte: Tese de doutorado, Mário Pereira, 2005 [37]

A modelagem feita no software FEMM é mostrada nas figuras 5.3 e 5.4. A linha vermelha da figura 5.4 representa a altura onde o gráfico do campo elétrico foi plotado (1,5 m do solo).



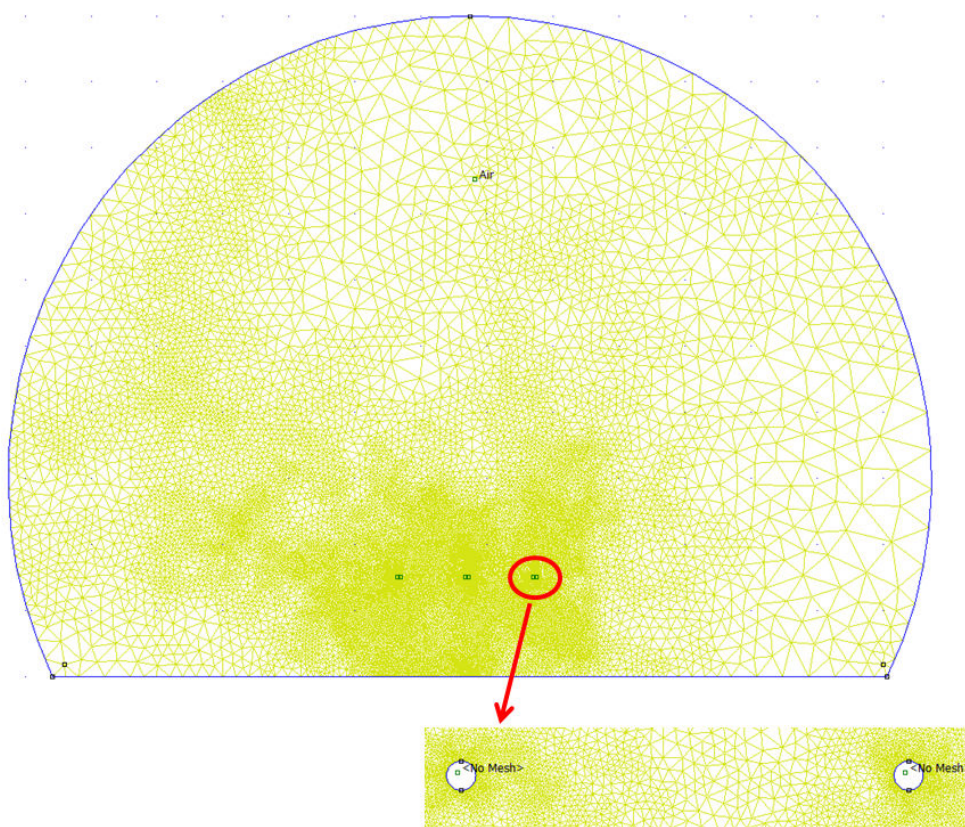


Fig. 5.3 - Modelagem da malha  
Fonte: Acervo da autora

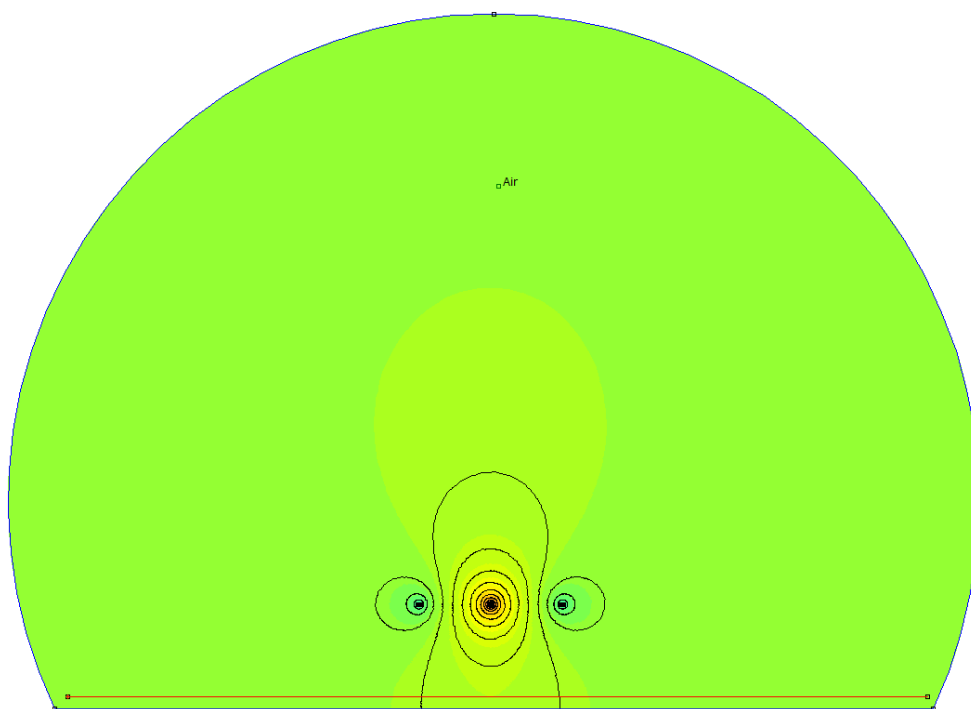


Fig. 5.4 - Densidade do campo elétrico modelado  
Fonte: Acervo da autora



A figura 5.5 mostra os resultados obtidos no FEMM 4.2 juntamente com os obtidos pelo MSC para que uma comparação possa ser feita.

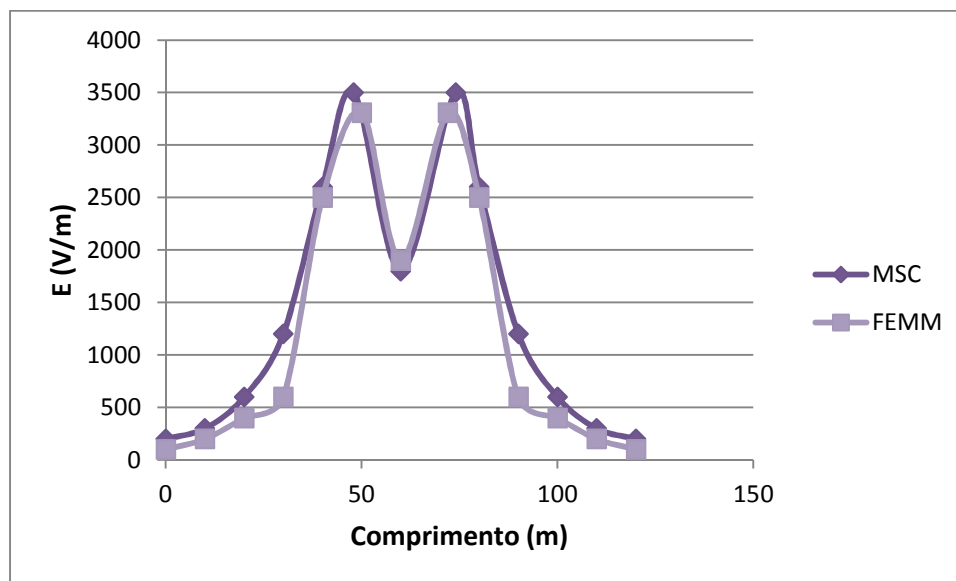


Fig. 5.5 - Campo elétrico 1,8 m do solo – FEMM e MSC  
Fonte: Acervo da autora

Pode-se observar pela figura 5.5 que os valores obtidos no FEMM se aproximam dos obtidos por medição e simulação pelo MSC, sendo que o erro máximo foi de -3,85%. Com isso, chega-se à conclusão que a simulação através do FEMM estima o valor do campo elétrico com erro pequeno e o método pode ser utilizado para este fim.

### 5.3 Descrição da Subestação

A subestação que será utilizada no estudo pertence à mineradora Kinross, e está localizada na cidade de Paracatu – MG. Trata-se da subestação principal da empresa e seu nível de tensão é 230/138/13,8 kV. A figura 5.6 mostra a localização da subestação (43–SE–501) dentro da planta da empresa.



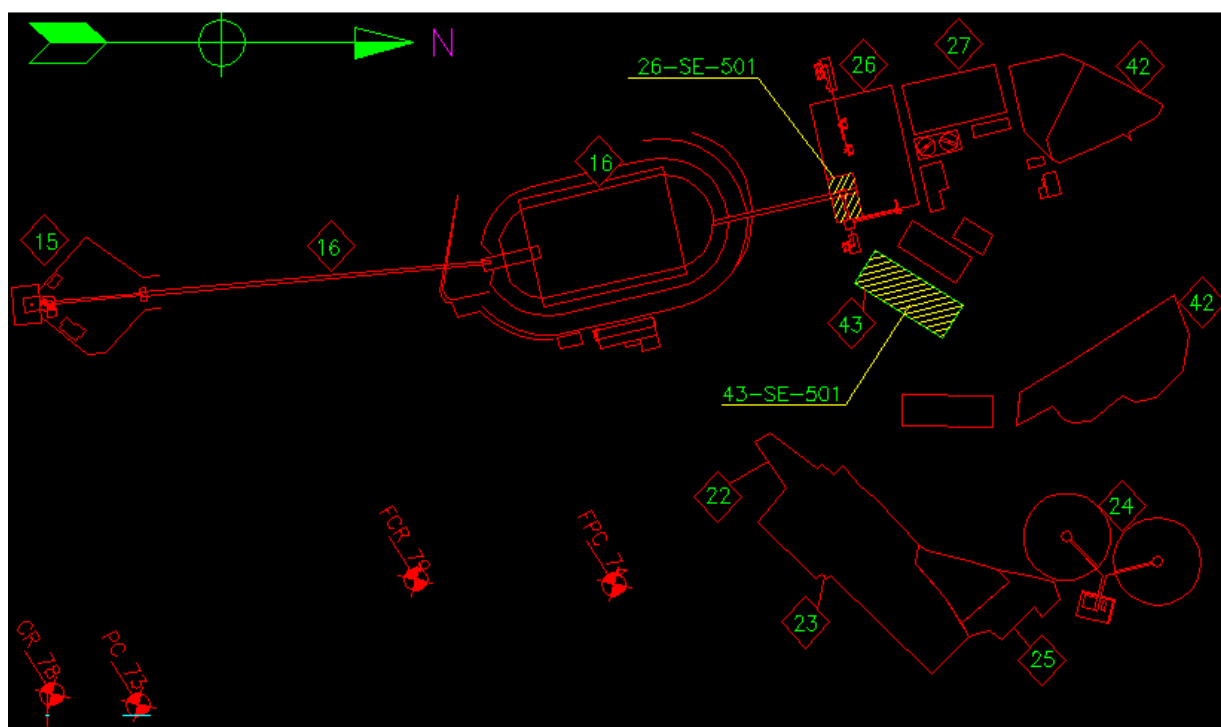


Fig. 5.6- Localização da subestação principal  
Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross

A figura 5.7 mostra a vista superior da subestação e as figuras de 5.8 a 5.13 mostram os cortes representados na figura 5.7.





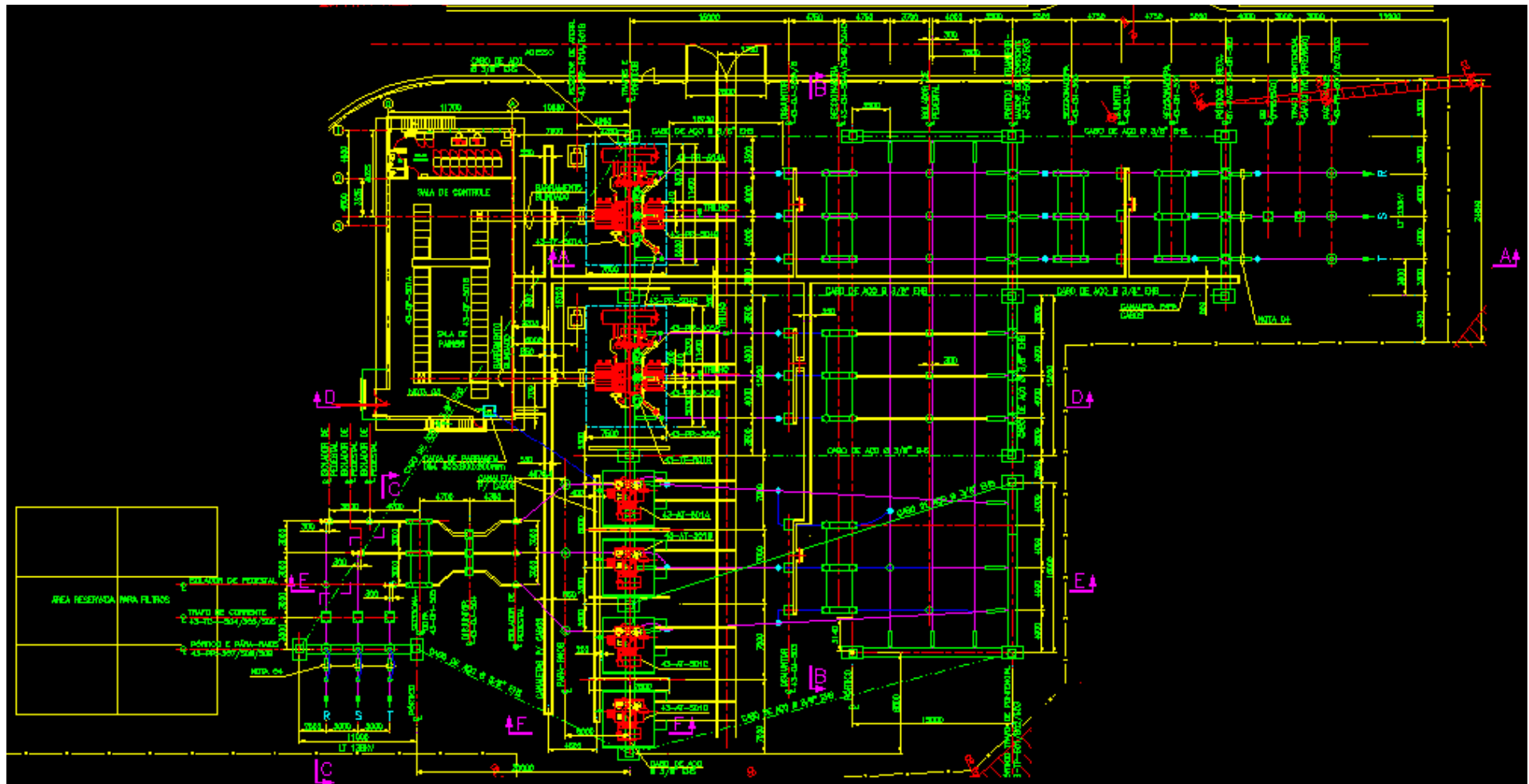


Fig. 5.7 - Vista superior da subestação  
 Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



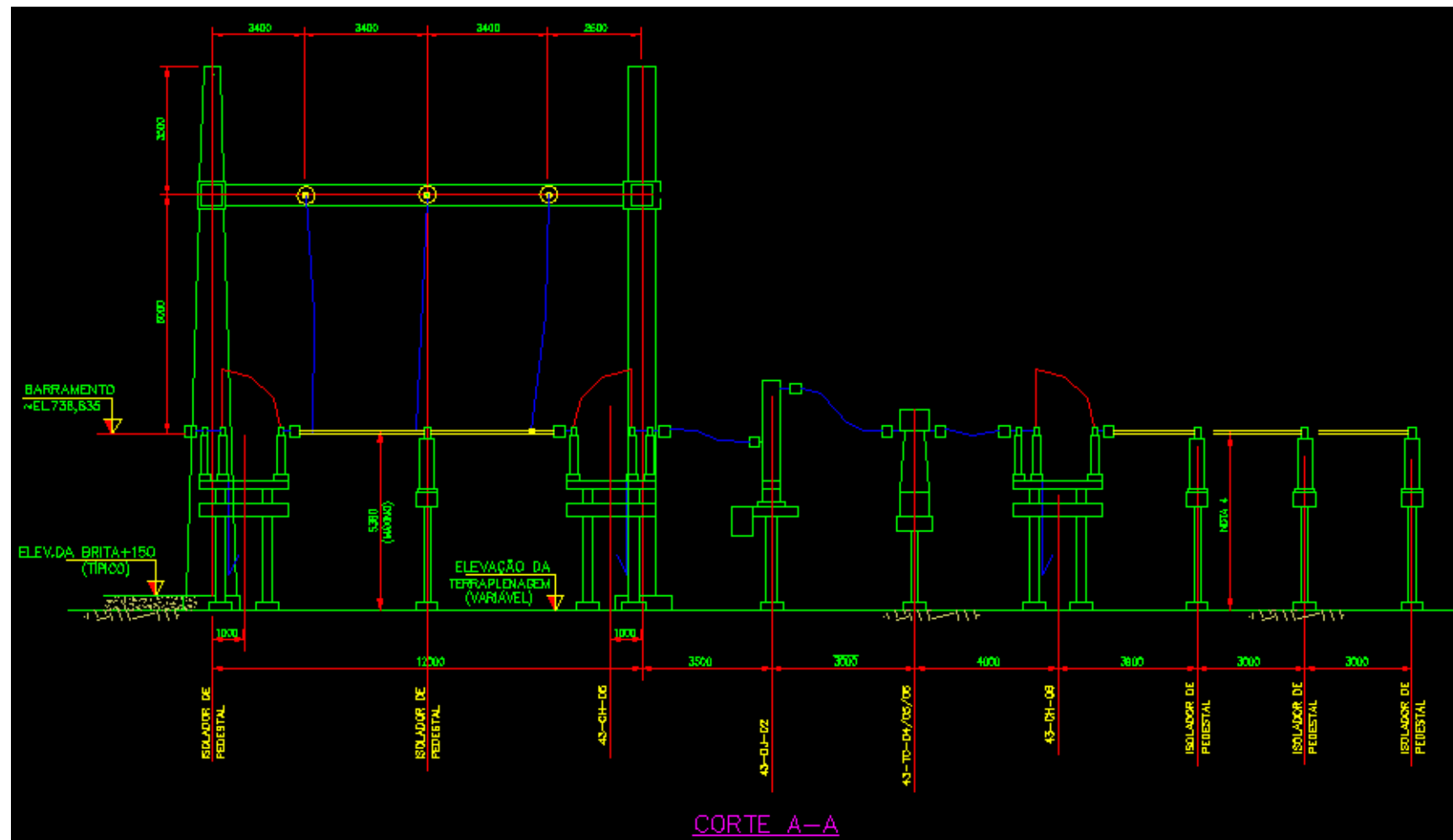


Fig. 5.8 - Corte AA  
 Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



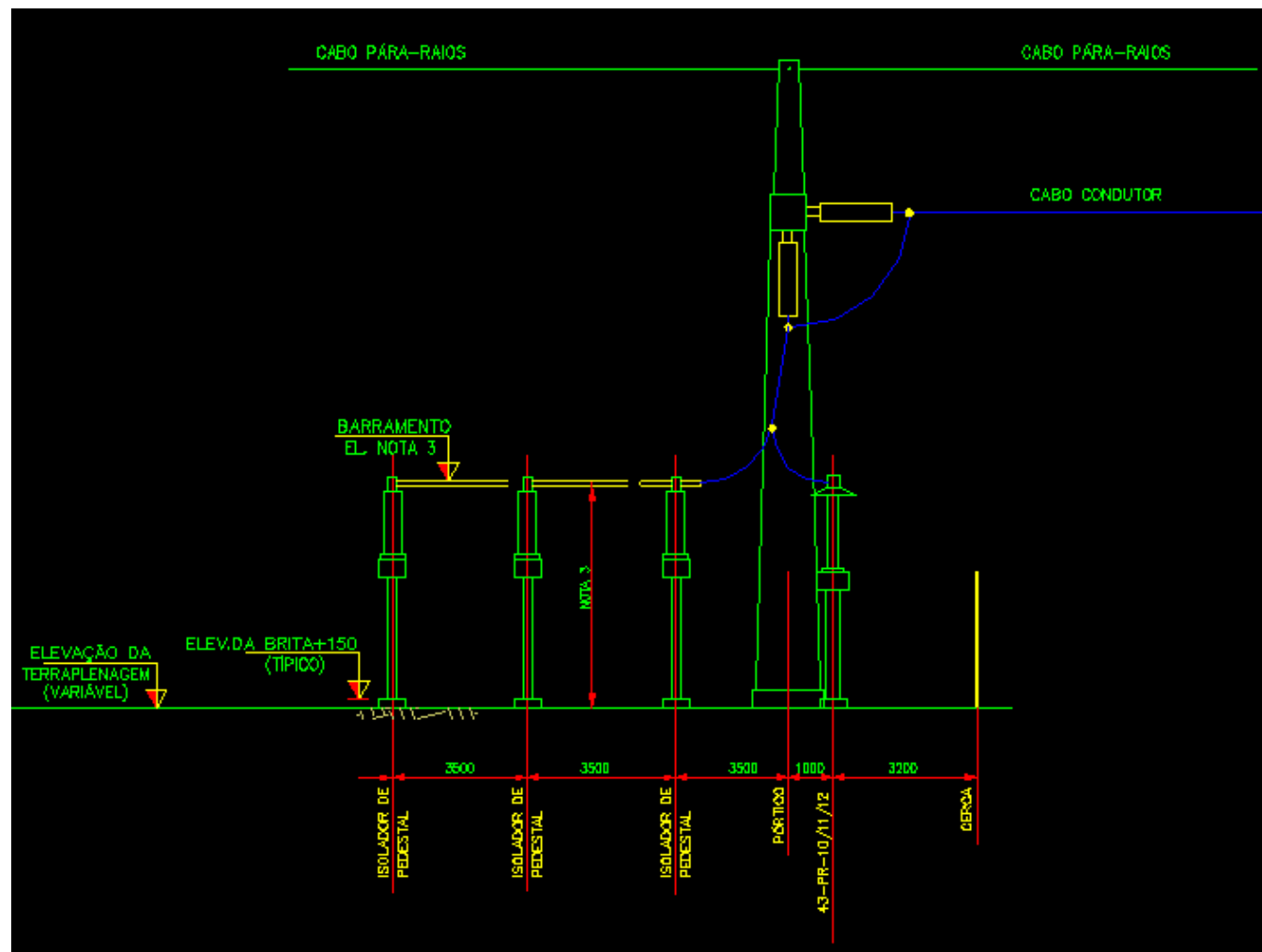


Fig. 5.9 - Corte BB

Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



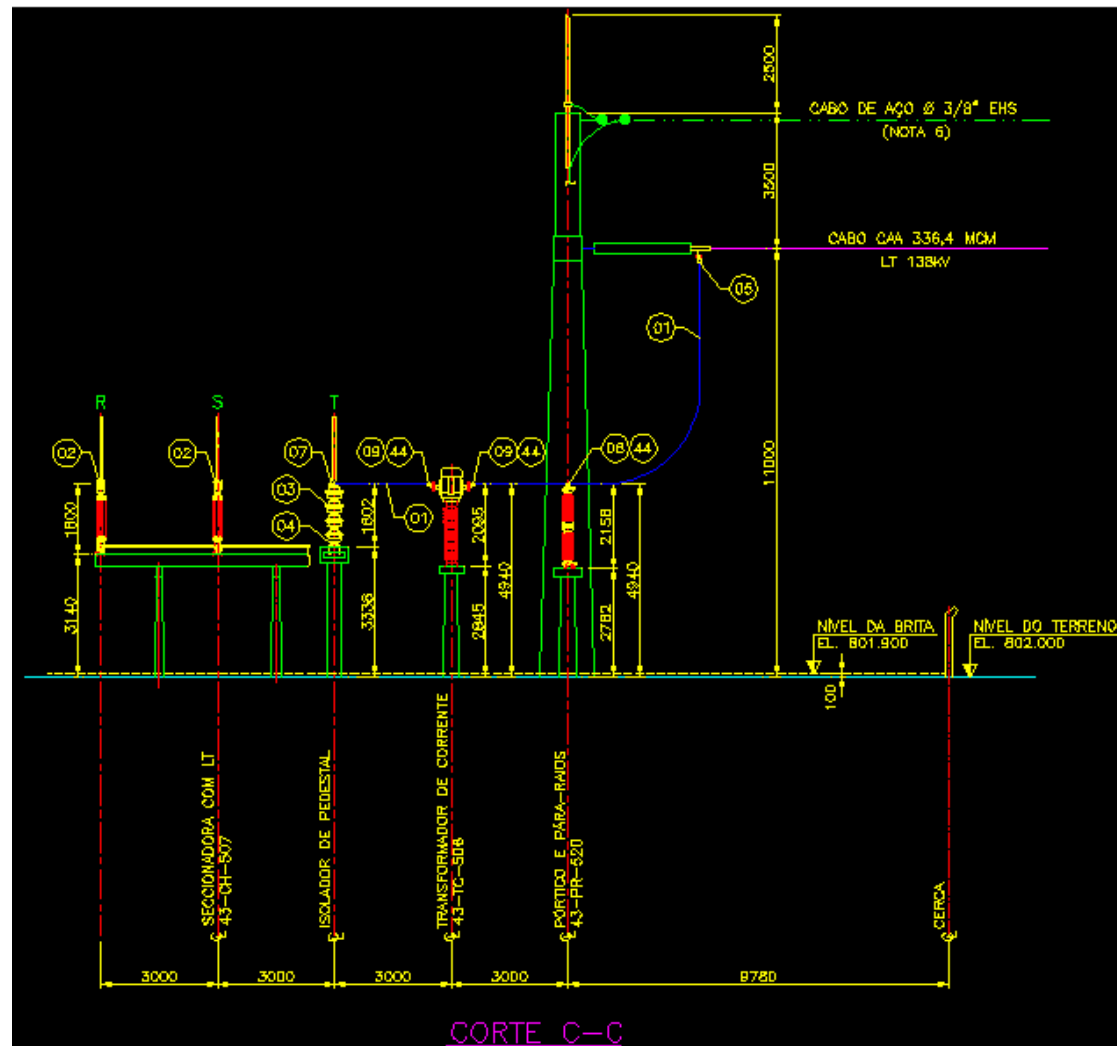


Fig. 5.10 - Corte CC

Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



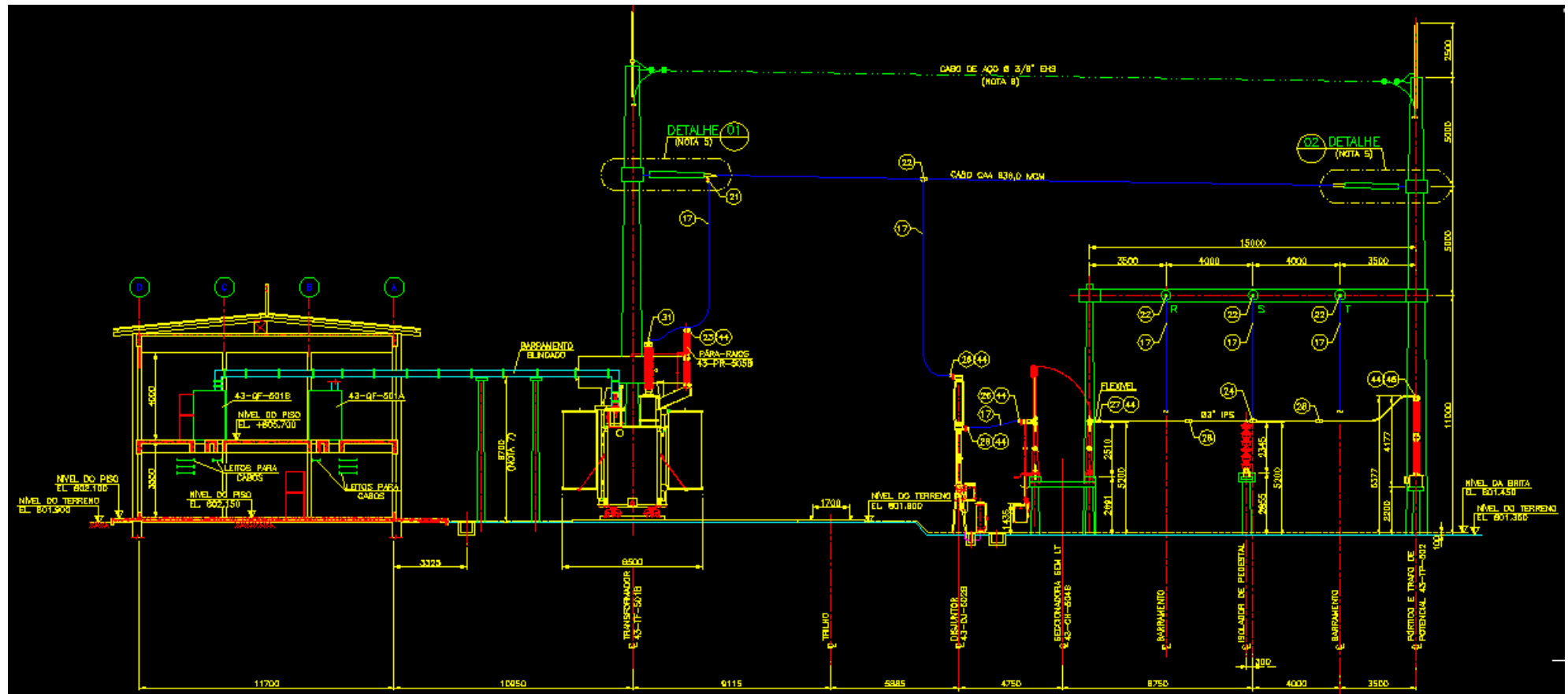


Fig. 5.11 - Corte DD  
Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



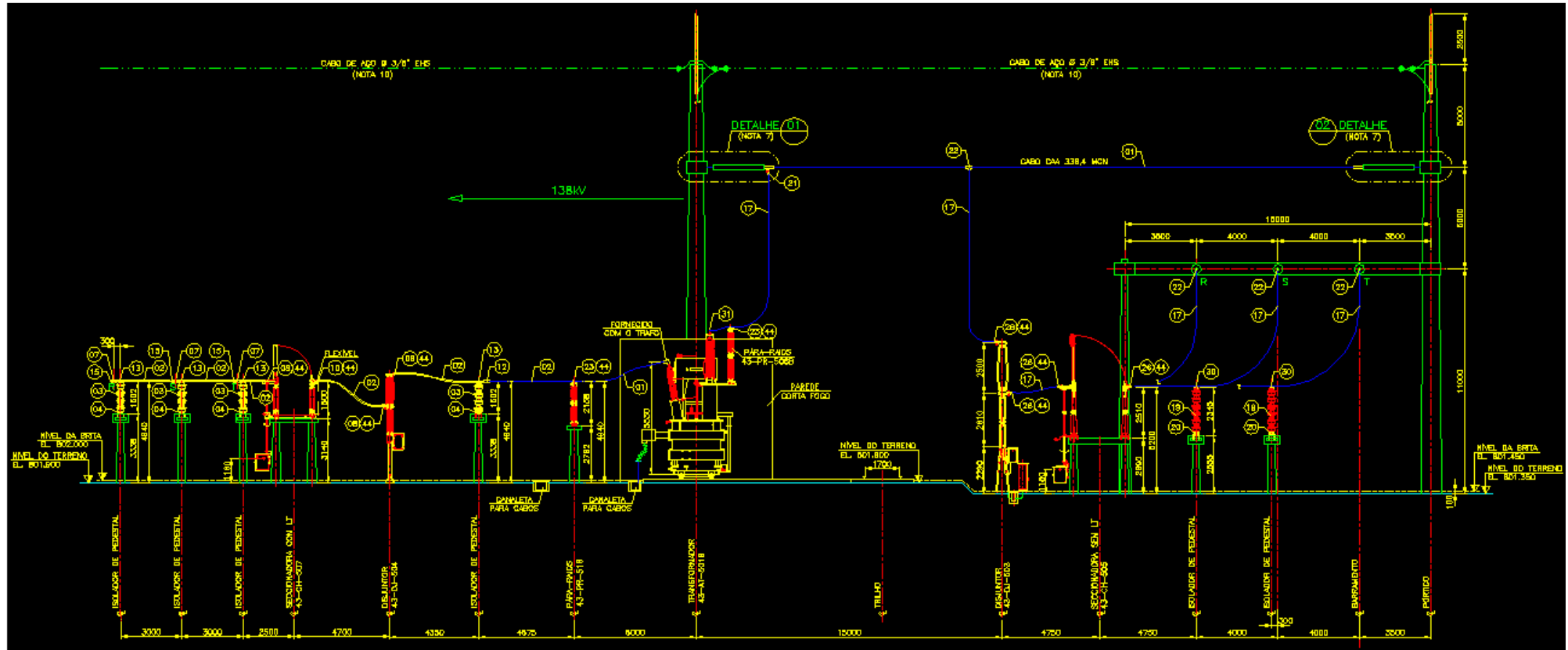


Fig. 5.12 - Corte EE  
 Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



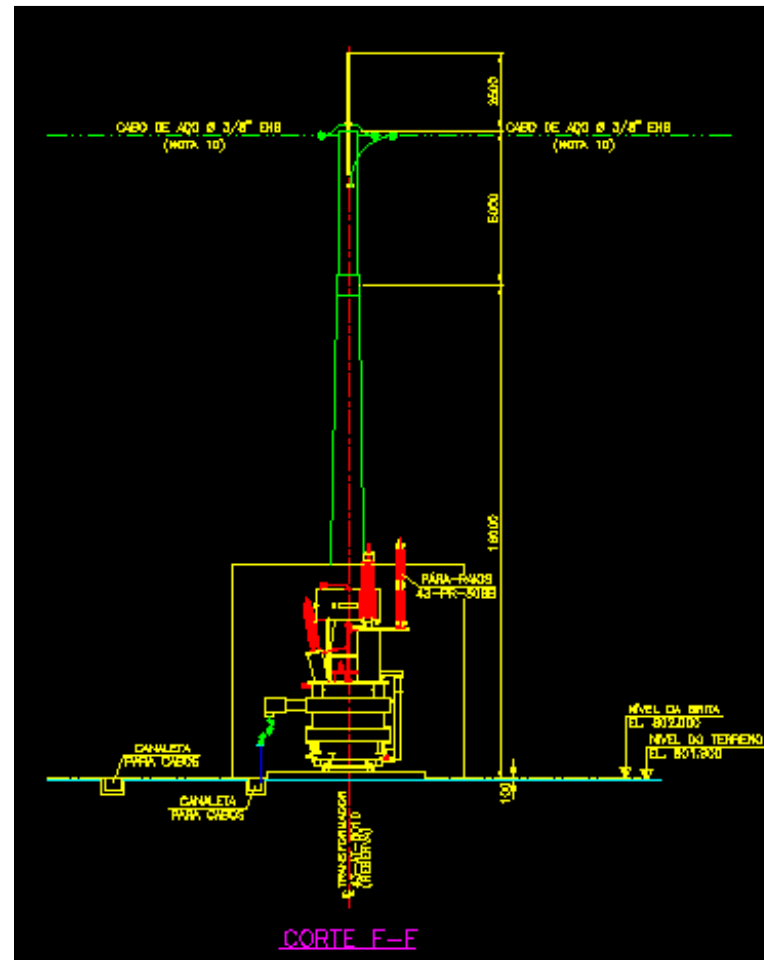


Fig. 5.13 - Corte FF  
Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross



## 5.4 Simulações

O campo elétrico será estimado em três cortes da subestação (barramento trifásico, transformador e disjuntor).

### 5.4.1 Barramento Trifásico

Para o primeiro estudo a ser realizado será considerado o barramento trifásico contido no corte EE (figura 5.12), o qual é mostrado na figura 5.14 a seguir.

A modelagem feita no software FEMM é mostrada nas figuras 5.15 e 5.16. Para analisar o campo elétrico será plotada sua curva à altura de 1.5 m [1]. Esta primeira modelagem considera o valor máximo da tensão passando pela fase A.

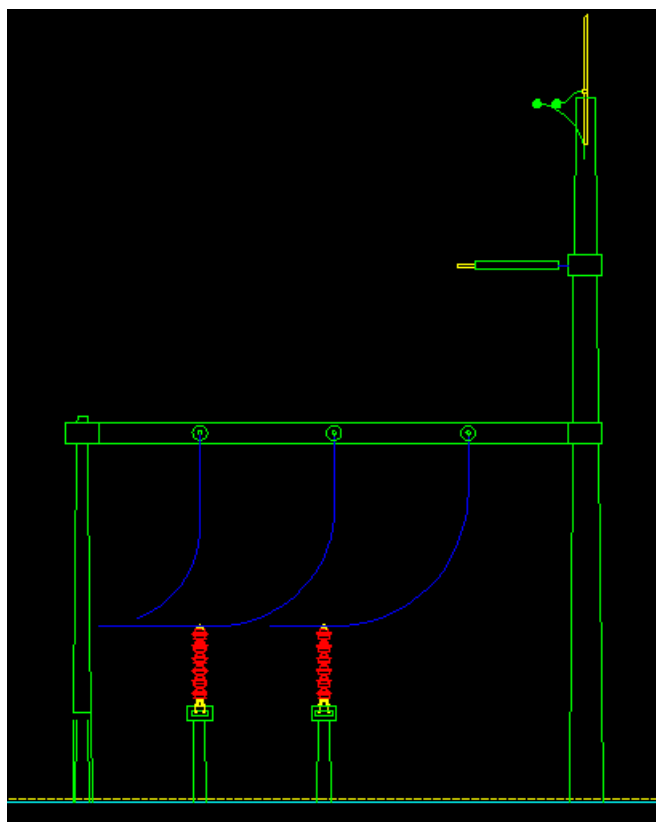


Fig. 5.14 - Barramento em corte  
Fonte: Adaptado das plantas Mineradora Kinross, pela autora





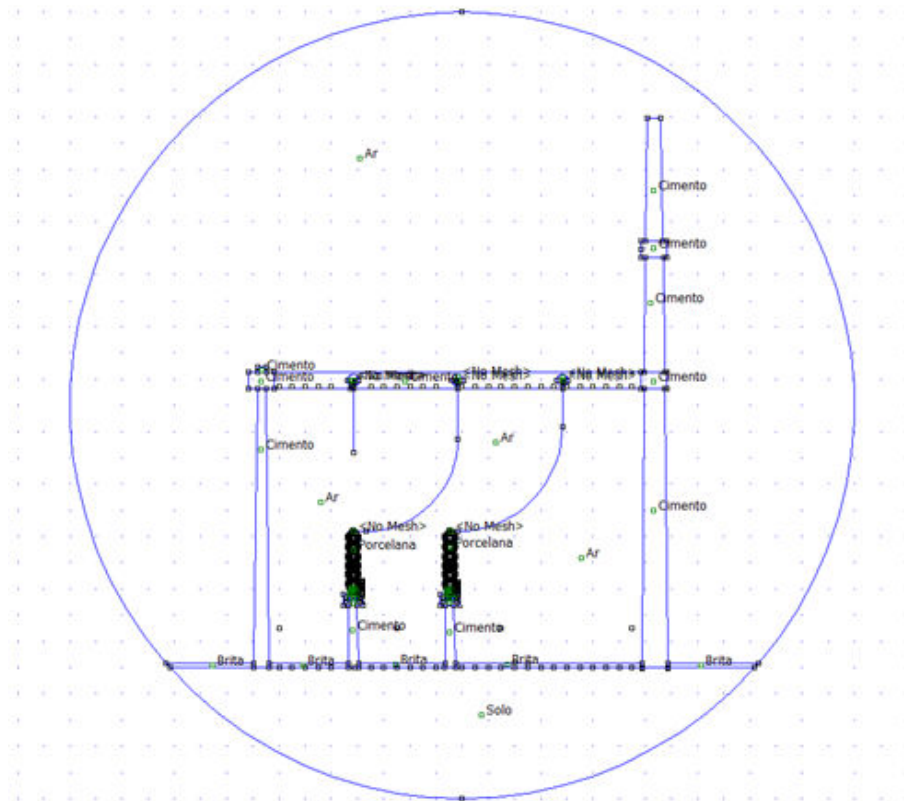


Fig. 5.15 - Modelagem no software FEMM  
Fonte: Acervo da autora

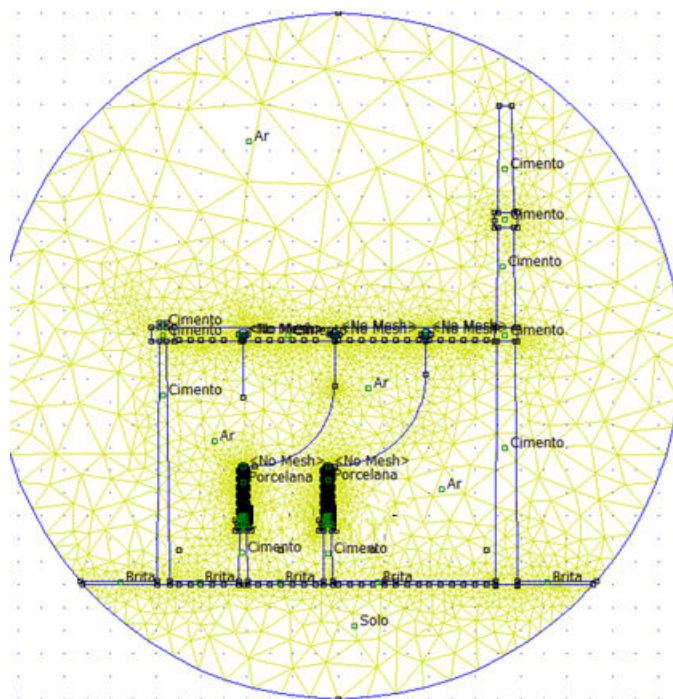


Fig. 5.16 - Modelagem da malha  
Fonte: Acervo da autora



Os valores de permissividade elétrica dos materiais utilizados são mostrados na tabela 5.

Tabela 4 - Permissividade elétrica dos materiais

Material	$\epsilon$ (permissividade elétrica)
Ar	1
Porcelana	5.9
Solo	4.025
Brita	50
Cimento	6.7
PVC	3
Aço galvanizado	2828427.12602

A permissividade do ar utilizada se refere ao ar seco. Este valor foi escolhido, porque o valor para ar úmido é praticamente o mesmo, alterando apenas em partes por milhão, o que não mudaria o resultado da simulação em relação ao ar seco. Portanto, todas as análises feitas, se referem ao ar seco e o resultado pode ser estendido para o caso de ter-se ar úmido [38].

A tensão dos barramentos simulados é 230 kV (linha).

A solução de problemas via elementos finitos em geral se aplica para problemas com região de fronteira delimitada. No entanto, vários problemas não possuem um limite natural bem definido, como o caso deste estudo, onde o ponto de potencial zero não é conhecido, e se localiza distante da fonte, no infinito. Como o método dos elementos finitos requer um domínio finito, são aplicados métodos que obtêm soluções aproximadas denominados de “fronteira aberta”.

Dentre desse contexto para as simulações foi utilizado a condição de contorno assintótica, que é uma condição de fronteira aberta.

Essa é uma fronteira circular de raio  $r_0$  em uma região sem limites. Como  $r \rightarrow \infty$ , o potencial irá para zero. Sobre a superfície do círculo o valor será uma função do ângulo. Para aplicar essa condição de fronteira basta especificar duas constantes no programa de elementos finitos:

$$c_0 = \frac{\epsilon_0 n}{r_0}$$



$$c_1 = 0$$

Onde,

$r_0$  – raio da região de contorno em metros;

$\varepsilon_0$  – permissividade do vácuo;

$n = 1$  se a carga for um dipolo representado de forma axissimétrica ou  $n = 2$  quando a carga está na região de interesse.

No presente estudo foram utilizados os seguintes valores:

$n = 1$

$r_0 = 15\text{m}$

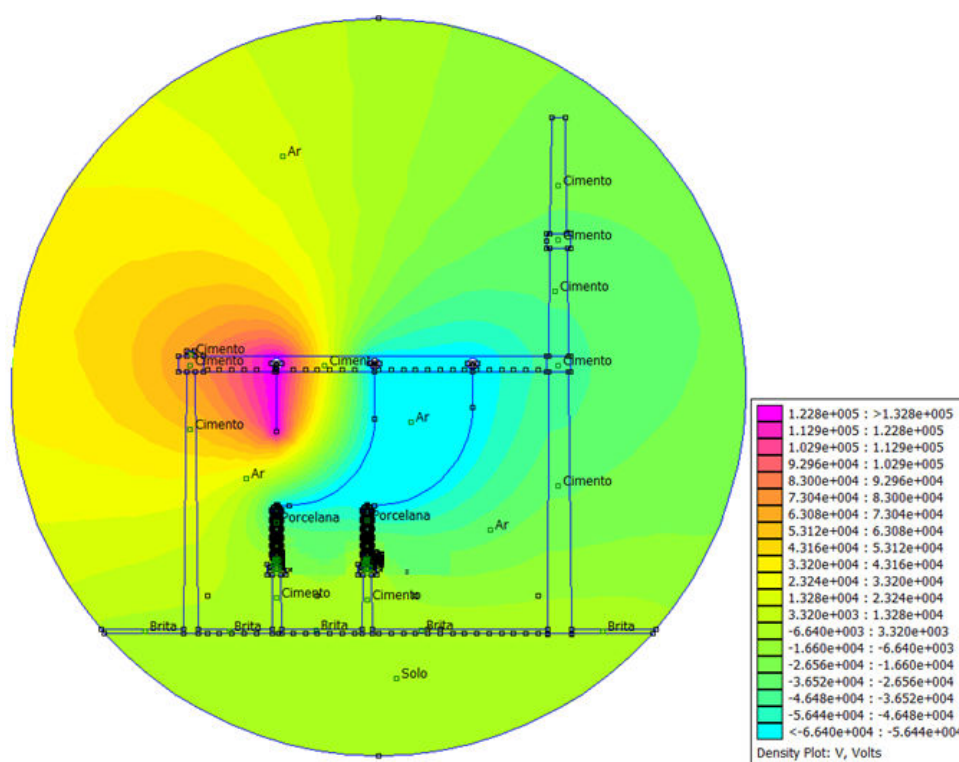


Fig. 5.17 – Densidade do campo elétrico modelado  
Fonte: Acervo da autora

A curva do campo elétrico à 1,5 m do solo é mostrada na figura 5.18.



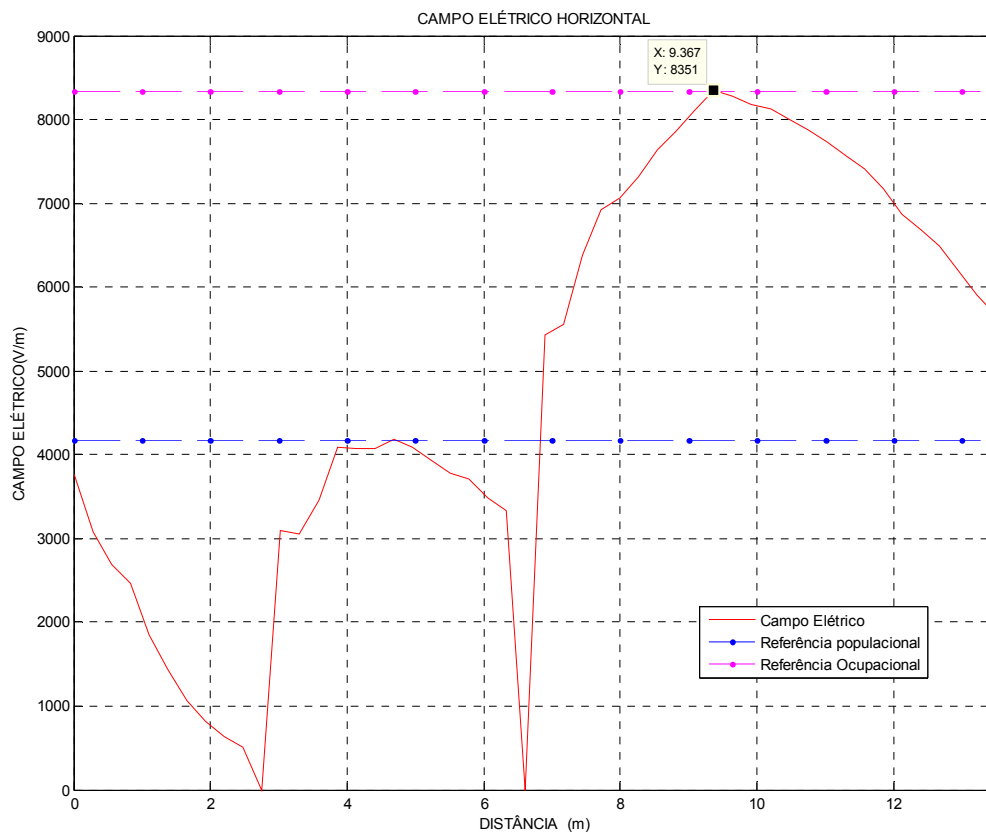


Fig. 5.18 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase A

Fonte: Acervo da autora

Na curva da figura 5.18, o campo elétrico é nulo nos pontos onde estão localizados os isoladores (2,755 m e 6,612 m). O campo é maior que o recomendado pela norma para a população em geral exatamente à direita do isolador da fase C, sendo que o maior valor (8351 V/m) ocorre à distância de 9,367 m (2,755 m deste isolador). Apenas no ponto de maior valor o campo ultrapassa o limite ocupacional, mas em apenas 21 V/m, já que o limite é 8330 V/m e o valor naquele local é como dito 8351 V/m.

Portanto, pode-se dizer que para o ocupacional o campo está dentro dos limites. O limite populacional foi ultrapassado, porém a norma determina que dentro da subestação apenas o limite ocupacional deve ser respeitado, visto que a população não fica exposta à esses campos. Conclui-se com isso que os valores ficaram dentro dos limites da norma.



A curva do campo elétrico para o máximo da tensão passando pela fase B é mostrada na figura 5.19.

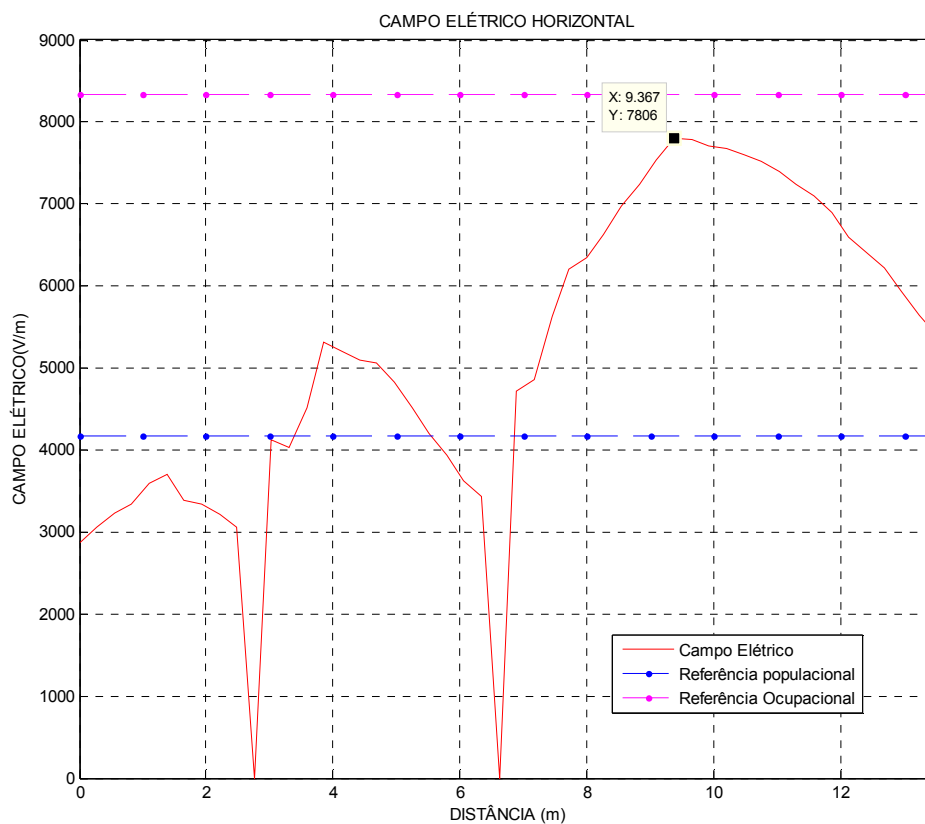


Fig. 5.19 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase B  
Fonte: Acervo da autora

Neste caso, o campo elétrico ficou inadequado para a população na mesma região da simulação anterior, porém o maior valor do campo foi menor, 7806 V/m.

A curva do campo elétrico para o máximo da tensão passando pela fase C é mostrada na figura 5.20.



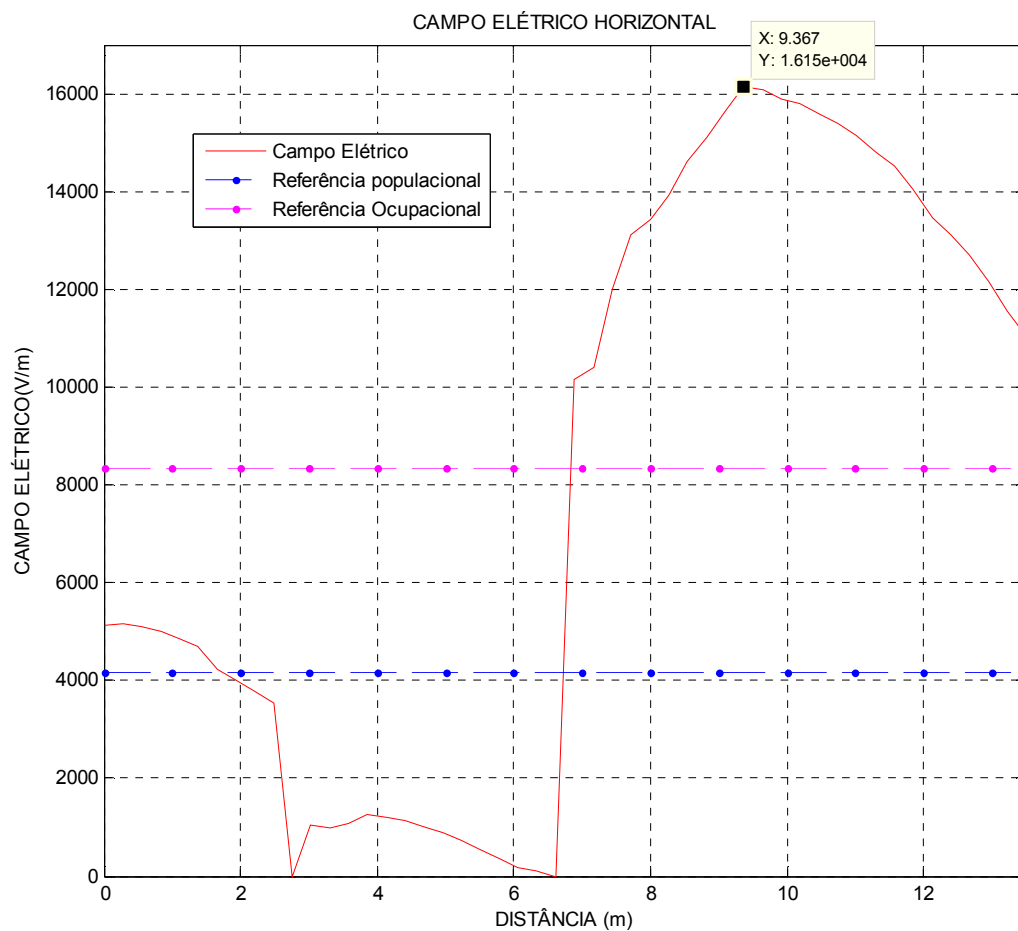


Fig. 5.20 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo Fase C  
Fonte: Acervo da autora

Para o caso da fase C passando por máximo (figura 5.20) tanto o valor populacional quanto o ocupacional foram ultrapassados e com um valor bem acima no ponto máximo, 16,15 kV/m. Neste caso, portanto o valor do campo preciso ser readequado.

Observando os locais onde o campo elétrico ultrapassa o limite para os três casos estudados acima (três fases passando por máximo), observa-se que ocorrem sempre à direita do isolador desta extremidade. Isso provavelmente ocorre nesta vista pela falta do isolador de uma das fases. Para comprovar essa suposição será simulada uma vista acrescida do terceiro isolador e os dois resultados comparados.



Na vista estudada há apenas dois isoladores, das fases A e B, sendo que o isolador da fase C se encontra em outra profundidade. Será feita agora uma nova simulação propondo a inserção neste plano do 3º isolador e realocação das descidas dos condutores nestes isoladores, como mostra a figura 5.21.

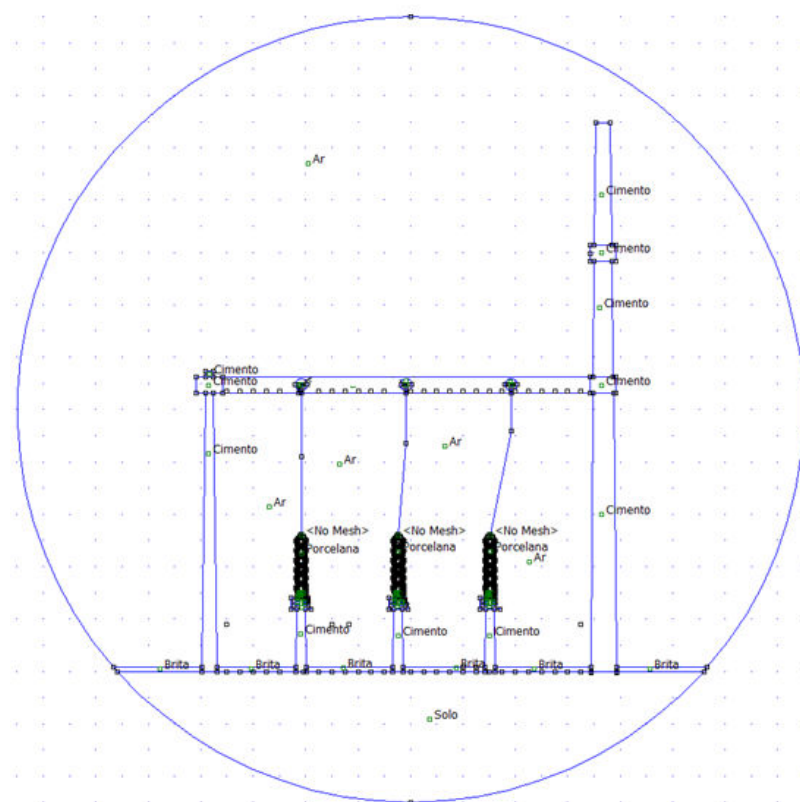


Fig. 5.21 - Barramento trifásico - 3 isoladores  
Fonte: Acervo da autora

Da mesma forma que a simulação anterior, foram feitas três simulações, com o máximo da tensão passando pelas fases A, B e C. Os resultados são mostrados nas figuras de 5.22 a 5.24.



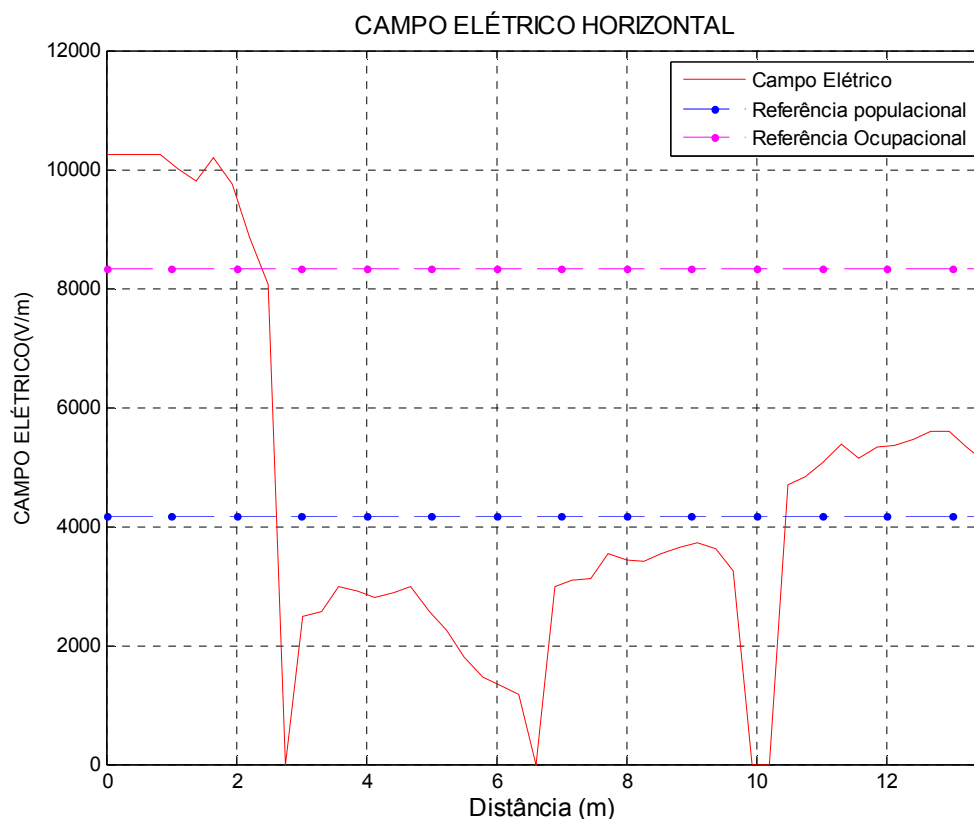


Fig. 5.22 – Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase A  
Fonte: Acervo da autora

Para o caso em que o máximo passa pela fase A o campo superou o limite populacional e ocupacional recomendado à esquerda do isolador da fase A (valor máximo 10250 V/m) e ficou pouco acima do limite populacional (o que como dito, neste caso não é problema) à direita do isolador da fase C (valor máximo 5596 V/m). Comparando este resultado com o de 2 isoladores observa-se que o campo é ultrapassado em uma região menor, porém com valor um pouco superior ao daquele caso.





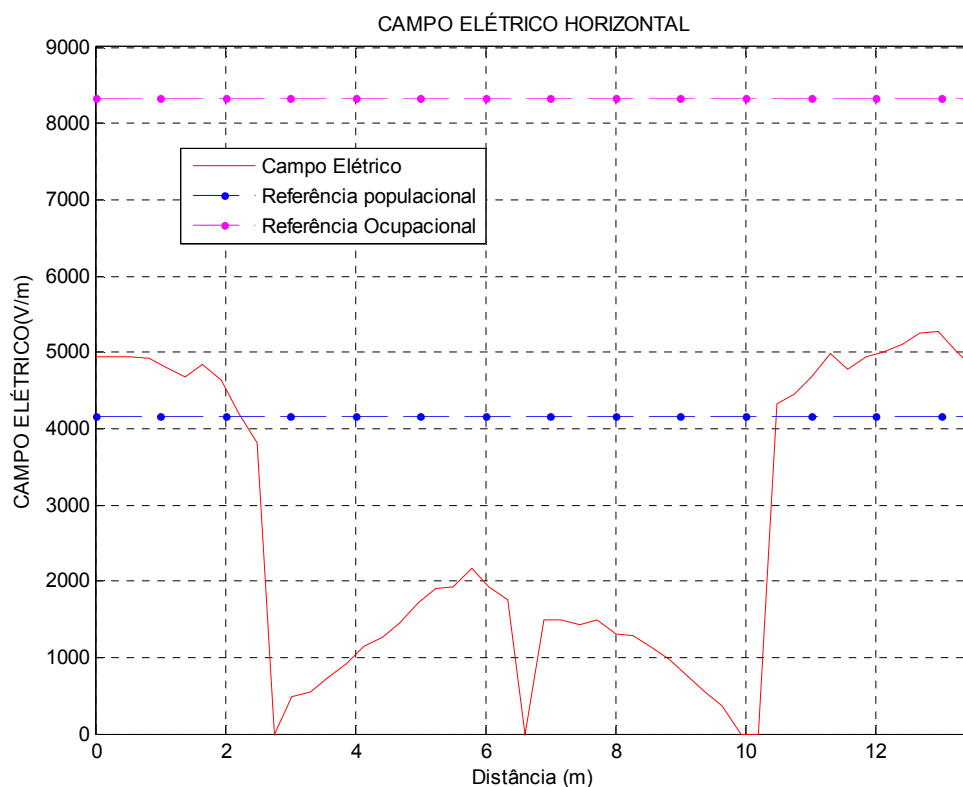


Fig. 5.23 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase B  
Fonte: Acervo da autora

Quando o máximo passa pela fase B somente o limite populacional é ultrapassado e com um valor apenas um pouco acima deste, com máximo 5273 V/m. Comparando com a primeira simulação (2 isoladores) observa-se que o valor do campo neste caso foi bem menor, o que mostra que a inserção do 3º isolador foi positiva.



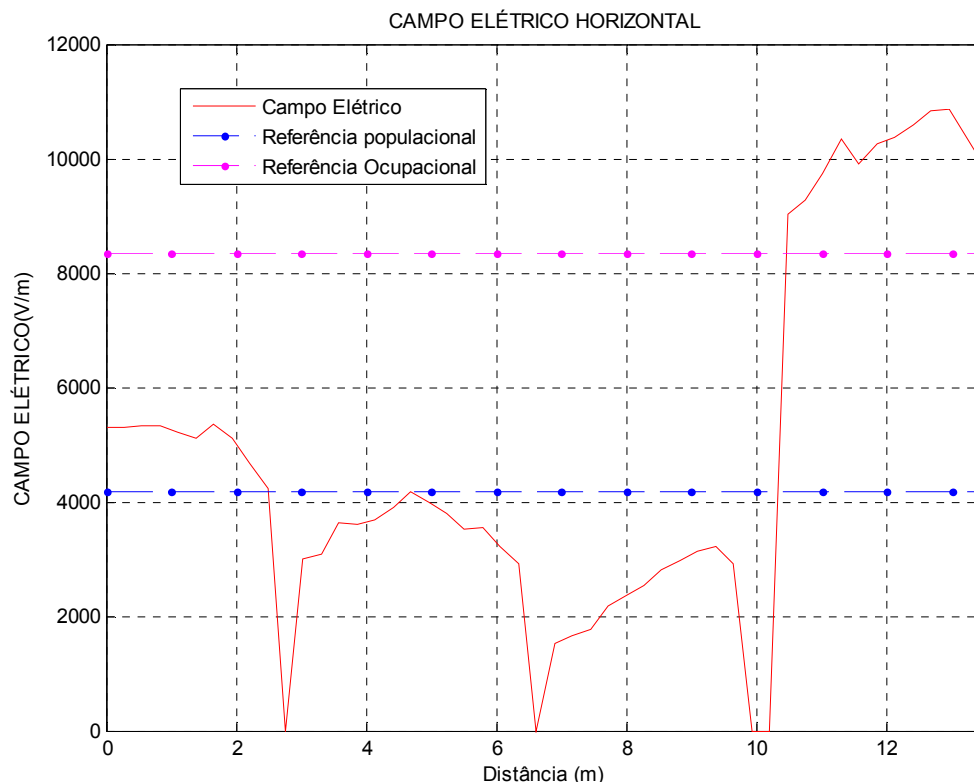


Fig. 5.24 - Campo elétrico 1,5 m do solo - Máximo passando pela fase C  
Fonte: Acervo da autora

Para essa simulação, onde a fase C passa por máximo é onde se obteve a maior diferença para o caso com apenas 2 isoladores. O limite ocupacional neste caso só é ultrapassado à direita do isolador da fase C e o populacional é ultrapassado à esquerda do isolador da fase A. Porém, o valor máximo do campo é menor que para o caso com 2 isoladores cerca de 5280 V/m.

Pelos resultados observados para as três simulações (fase A, B e C passando por máximo) para 3 isoladores, pode-se concluir que a inserção do 3º isolador melhora os valores do campo elétrico no que tange aos limites recomendados, sendo que para os pontos onde o limite ainda é superado medidas adicionais devem ser adotadas.



### 5.4.2 Transformador

Agora será realizado o estudo do campo elétrico em torno dos transformadores monofásicos (230/138 kV). Os detalhes do transformador são mostrados na figura 5.25.

Serão simuladas duas vistas, a da figura 5.25, que contém um transformador monofásico e uma que contém três transformadores monofásicos (fases A, B e C). Para a segunda vista foram feitas três simulações, em cada uma o valor máximo da tensão passa por uma das fases.

➤ Primeira vista (um transformador monofásico):

A modelagem feita no software FEMM é mostrada nas figuras 5.26 e 5.27. Os valores utilizados para a região de fronteira foram:

$$n = 1$$

$$r0 = 12,5\text{m}$$

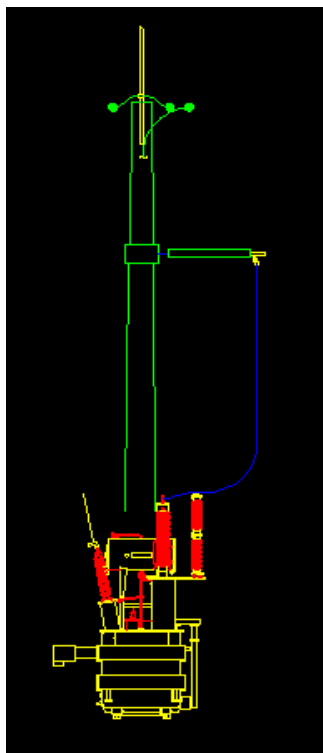


Fig. 5.25 - Detalhes do transformador monofásico  
Fonte: Adaptado de Plantas da Mineradora Kinross



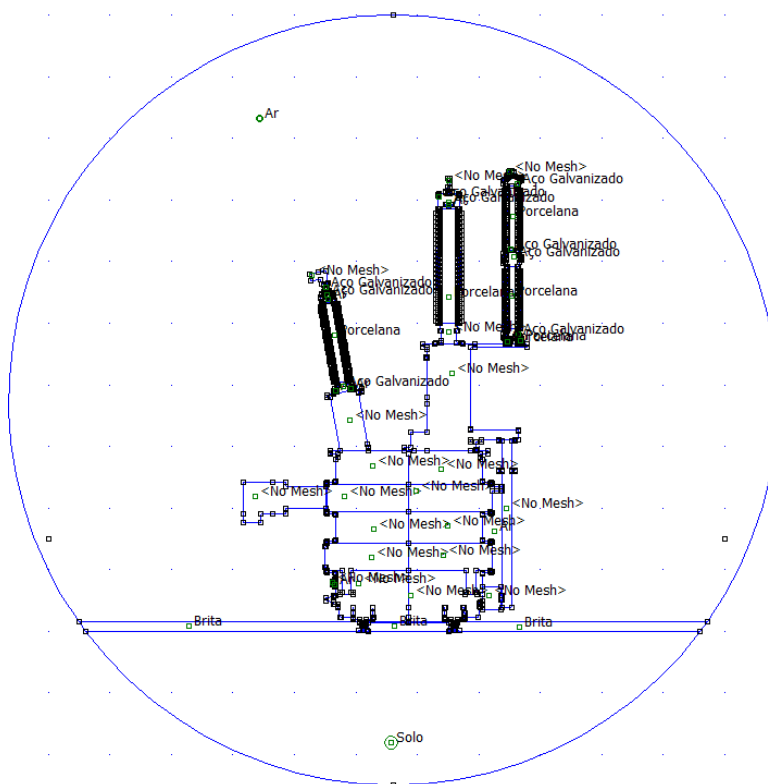


Fig. 5.26 – Modelagem no software FEMM  
Fonte: Acervo da autora

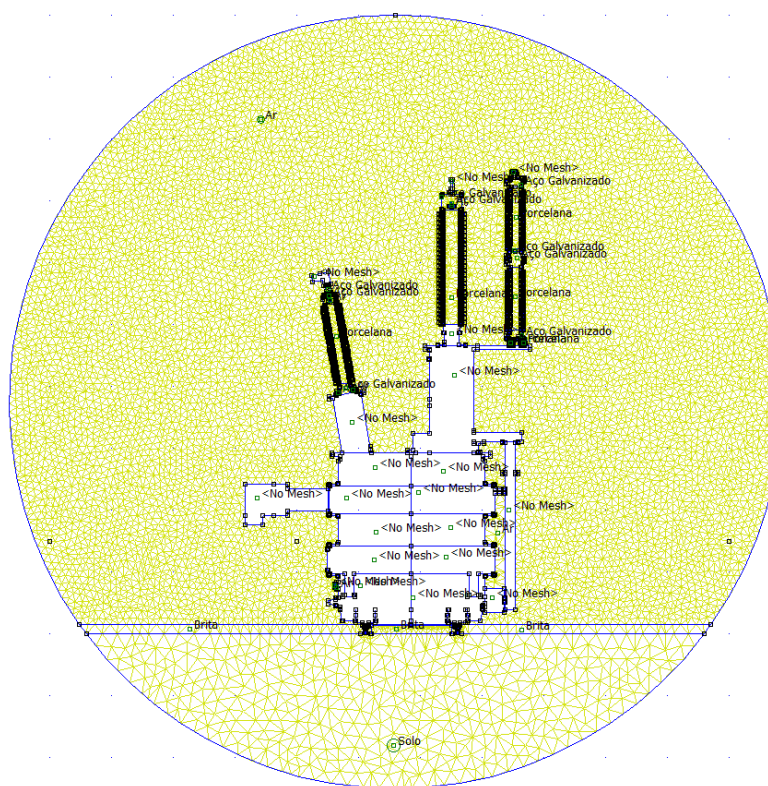


Fig. 5.27 - Modelagem da malha  
Fonte: Acervo da autora



A figura 5.28 mostra o resultado do campo elétrico obtido no FEMM e a figura 5.29 mostra o gráfico do campo elétrico à 1.5 m do solo.

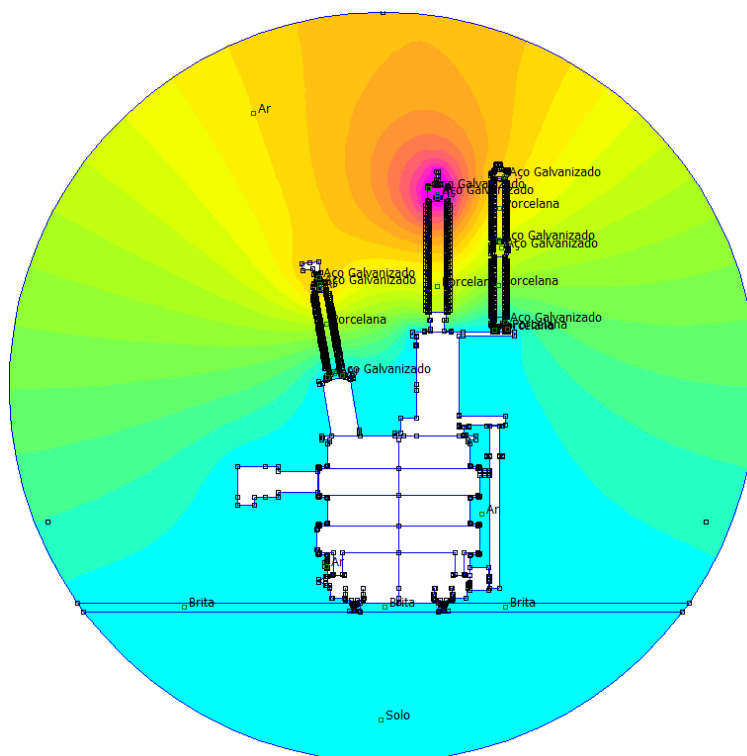


Fig. 5.28 – Densidade de campo elétrico  
Fonte: Acervo da autora

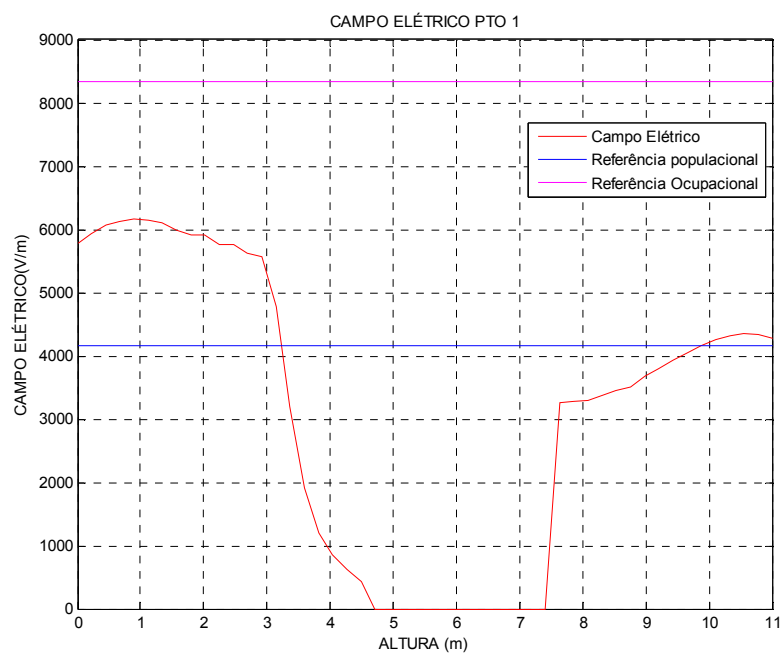


Fig. 5.29 - Campo elétrico transformador monofásico 1.5 m do solo  
Fonte: Acervo da autora



Como pode ser observado na figura 5.29 o campo elétrico só ultrapassa o limite populacional. Como essa simulação foi feita dentro da subestação, apenas o limite ocupacional deve ser respeitado. Portanto, conclui-se que o campo elétrico está dentro dos limites recomendados.

➤ Segunda vista (três transformadores monofásicos):

A vista superior dos transformadores que foram simulados é mostrada na figura 5.30.

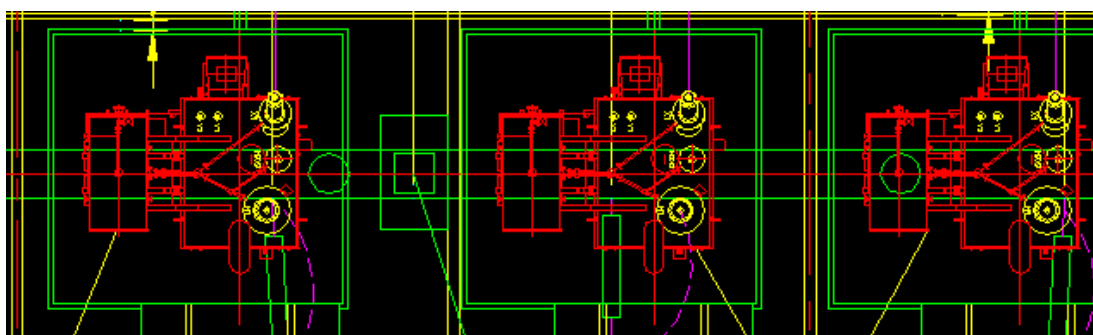


Fig. 5.30 – Vista superior transformadores monofásicos  
Fonte: Gentileza da Mineradora Kinross

Foram feitas três simulações no lado da baixa e três no lado da alta tensão (uma para cada fase passando por máximo) e os campos elétricos foram somados, pontualmente.

➤ 1º Simulação: tensão do transformador da esquerda passando por máximo (fase C):

A figura 5.31 mostra a malha obtida no FEMM e as figuras 5.32 e 5.33 mostram o resultado obtido no programa e o campo elétrico à 1.5 m do solo, respectivamente.



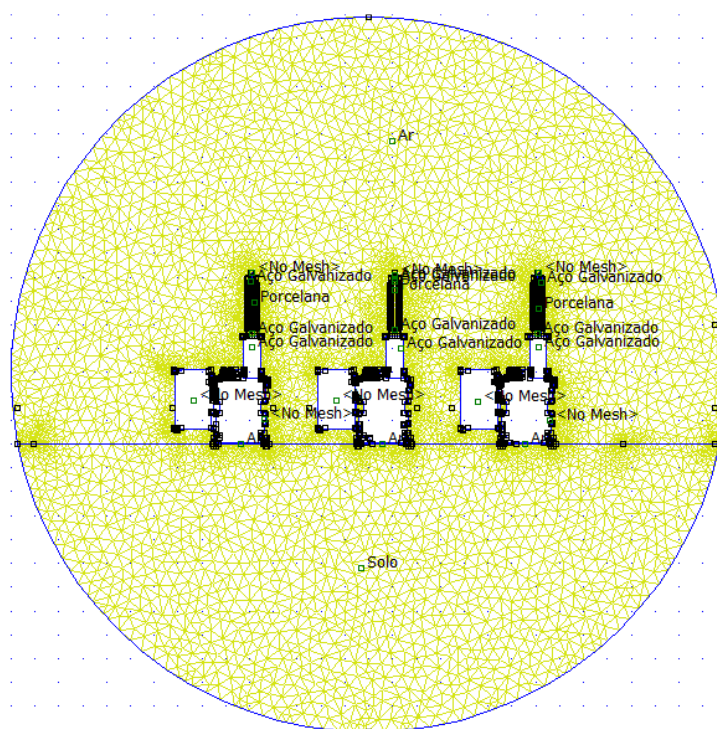


Fig. 5.31 - Malha - Máximo passando pela fase C (alta tensão)

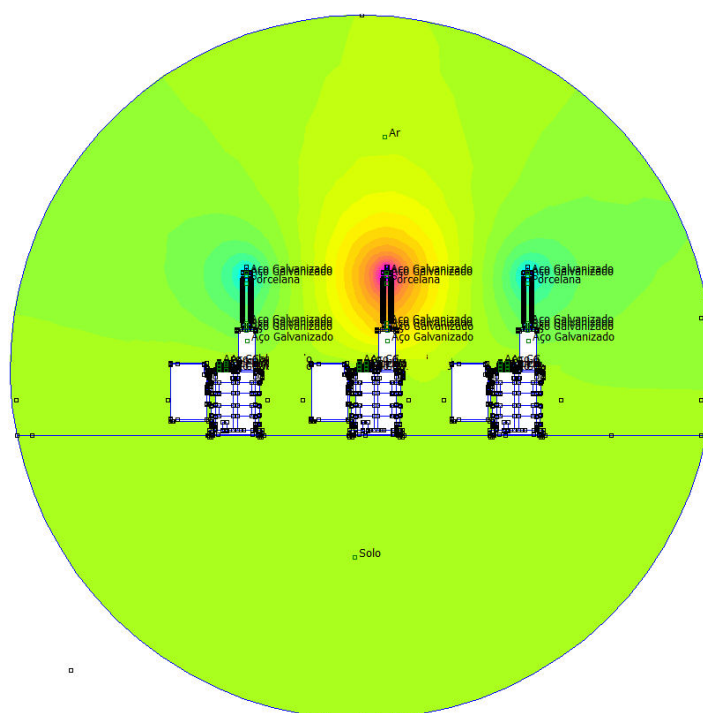


Fig. 5.32- Resultado FEMM - Máximo passando pela fase C (alta tensão)



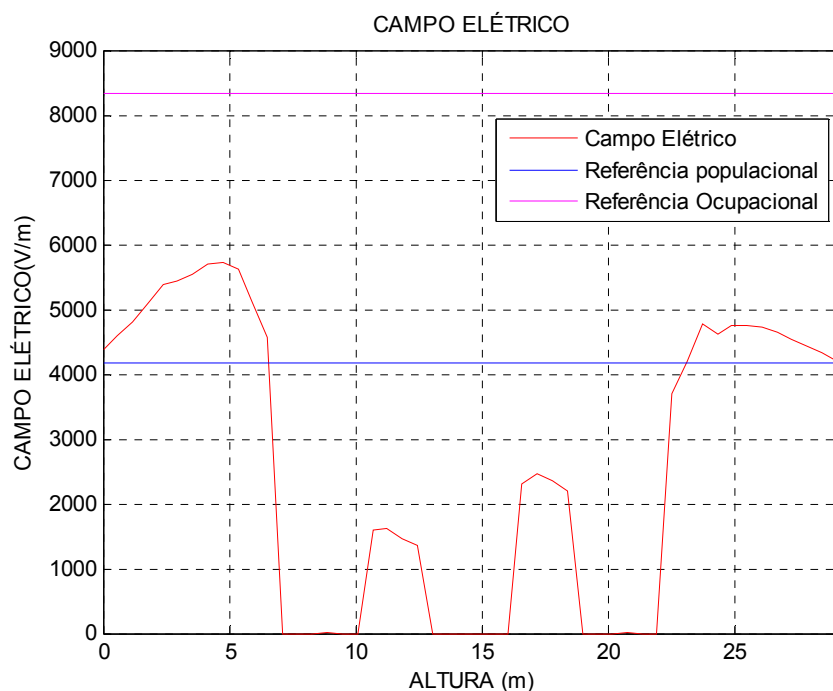


Fig. 5.33 - Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase C

Como pode ser observado na figura 5.33, para o máximo passando pela fase C o limite ocupacional não foi ultrapassado. Como dentro da subestação só este limite deve ser respeitado, conclui-se que o campo está dentro dos limites.

Já as figuras 5.34 e 5.35 mostram o campo elétrico à 1.5 m do solo para o máximo passando pelas fases B e A, respectivamente.





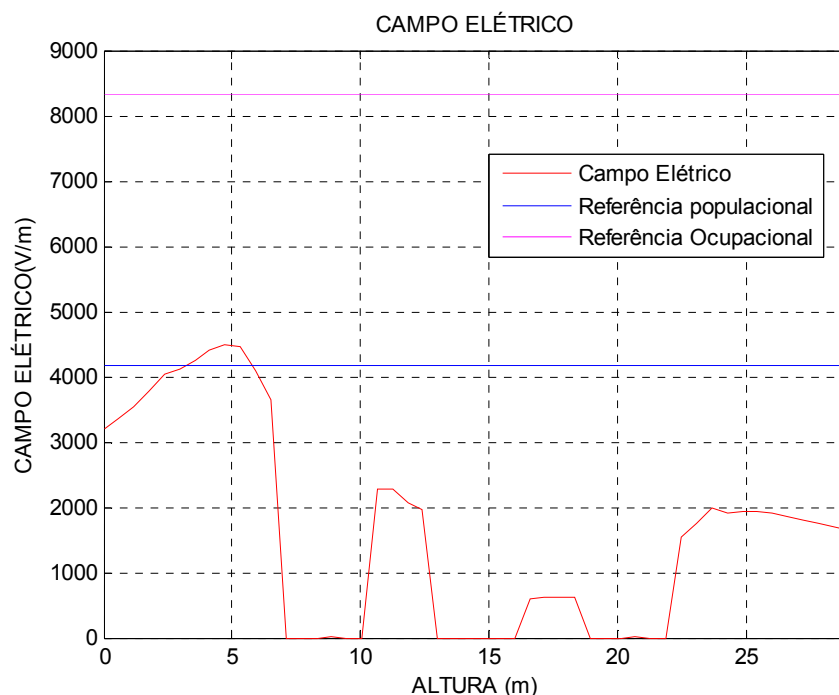


Fig. 5.34 - Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase B

De acordo com a figura 5.34, para o máximo passando pela fase B o campo elétrico é ainda menor, e não ultrapassa o limite ocupacional estando, portanto de acordo com a norma.

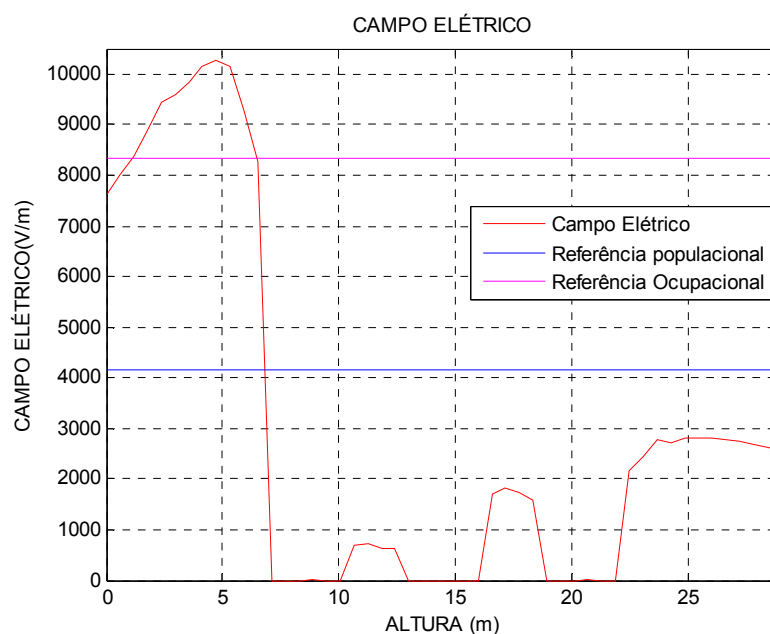


Fig. 5.35 – Campo elétrico 1.5 m do solo – Máximo passando pela fase A



Já para o caso do máximo passando pela fase A, apenas no primeiro trecho (cerca de 7 m) o campo elétrico ultrapassa o limite ocupacional, ficando dentro da norma no restante.

### 5.4.3 Disjuntor

A vista do disjuntor que foi simulado é mostrada na figura 5.36.

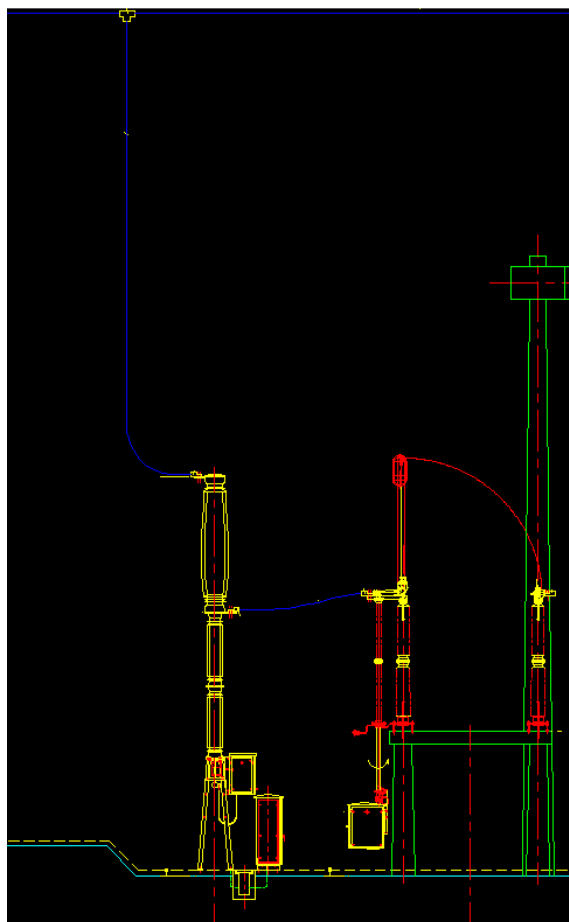


Fig. 5.36 – Disjuntor alta tensão  
Fonte: Adaptado de Plantas da Mineradora Kinross

Serão feitas duas análises, uma para o disjuntor fechado e outra para o disjuntor aberto. A modelagem feita no FEMM é mostrada na figura 5.37 e os resultados nas figuras 5.38 a 5.41.



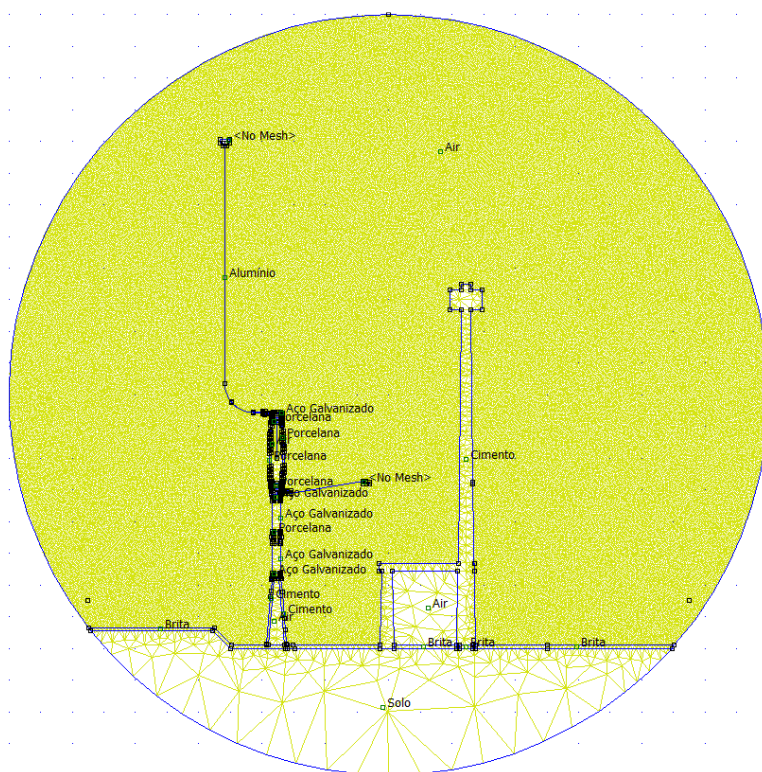


Fig. 5.37 - Modelagem Disjuntor FEMM  
Fonte: Acervo da autora

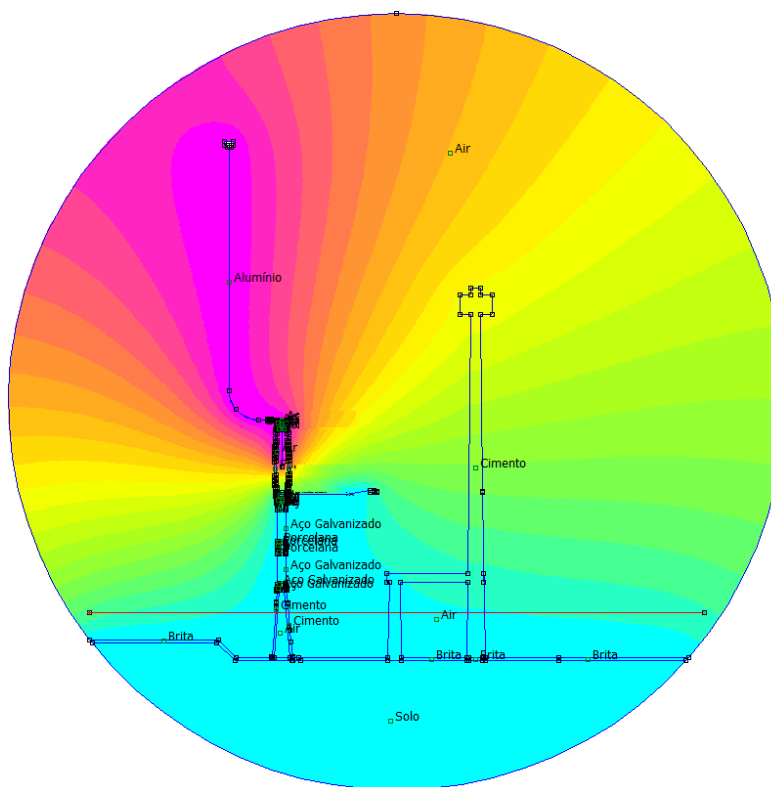


Fig. 5.38 - Resultado FEMM (disjuntor aberto)  
Fonte: Acervo da autora



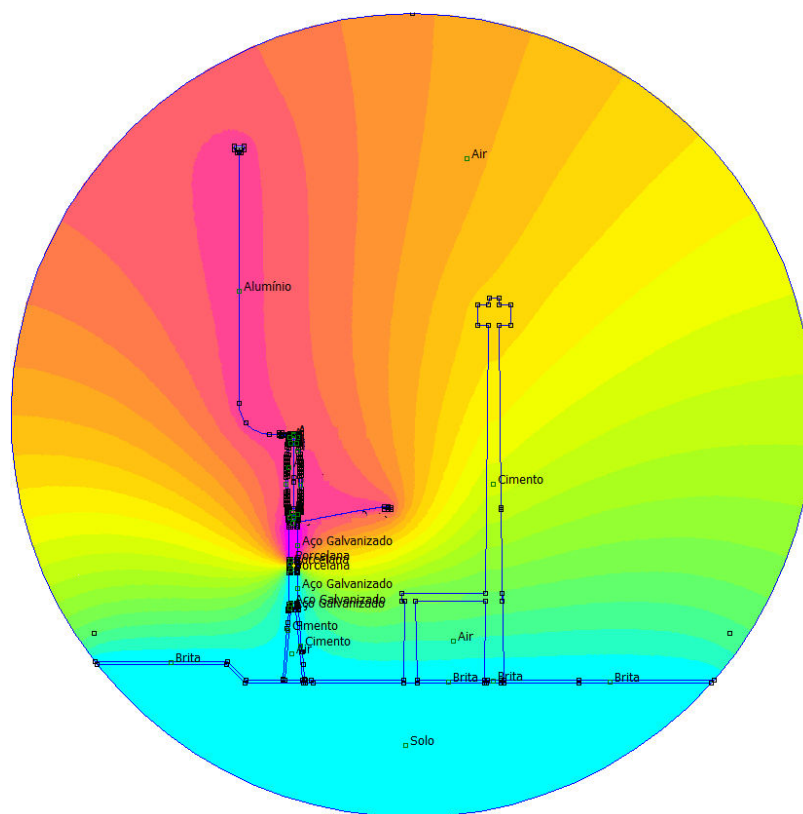


Fig. 5.39 - Resultado FEMM (disjuntor fechado)  
Fonte: Acervo da autora

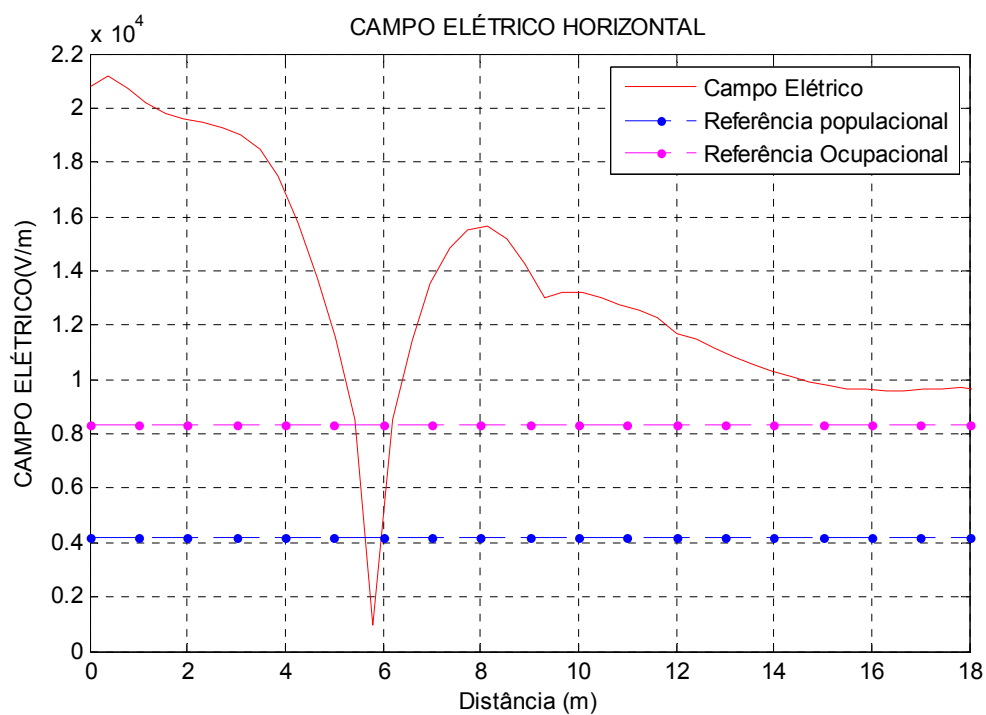


Fig. 5.40 – Campo elétrico 1.5 m do solo – disjuntor fechado  
Fonte: Acervo da autora



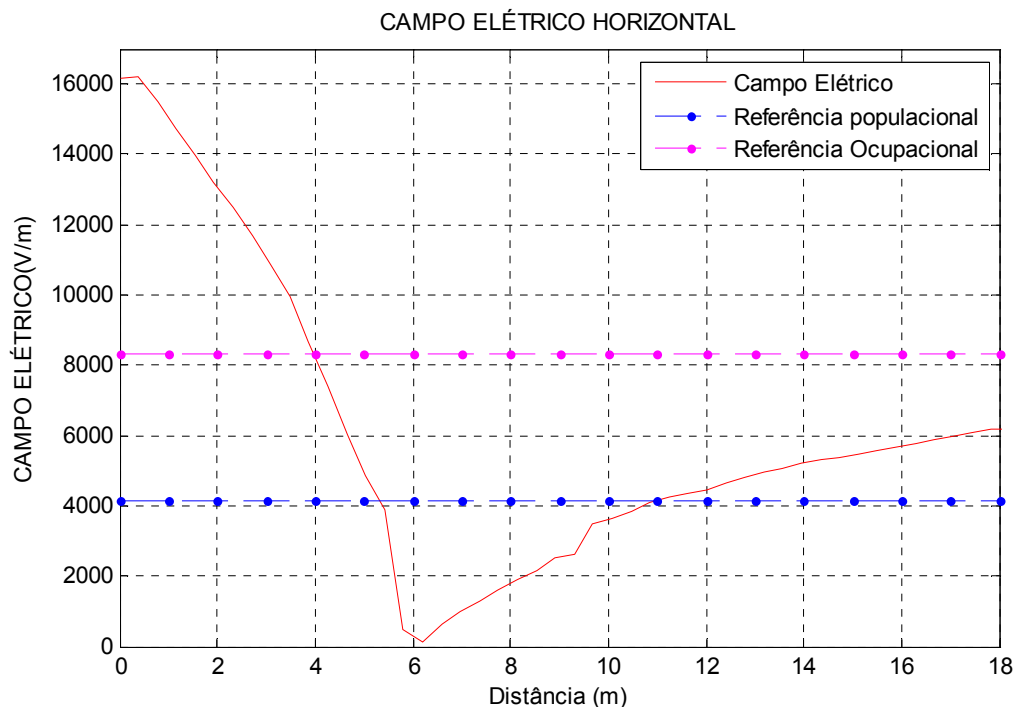


Fig. 5.41 - Campo elétrico 1.5 m do solo – disjuntor aberto  
Fonte: Acervo da autora

Observando as figuras 5.40 e 5.41 percebe-se que para o caso em que o disjuntor estava fechado, o campo elétrico foi ultrapassado na maior parte dos pontos. Já para o caso aberto, só antes do disjuntor é que o campo estará acima do valor máximo. Nos pontos onde o limite ocupacional é superado medidas devem ser adotadas para adequar o campo elétrico.

## 5.5 Perturbação do campo elétrico durante medição

De acordo com as normas [1] o campo elétrico que deve ser medido é o não perturbado. No entanto, a presença do aparelho que realizará a medição, e/ou da pessoa que o opera, perturba e altera o campo elétrico.

Na tentativa de minimizar as alterações, utilizam-se muitas vezes medidores que se comunicam com o painel através de fibra ótica, e podem desta forma ficar localizados remotamente. Mas mesmo neste caso, ainda haverá a



interferência da placa de medição, sendo minimizada apenas a interferência do operador, que se localizará junto ao painel, ou seja, remotamente.

Este fato será mostrado nas simulações feitas a seguir no FEMM.

A primeira simulação (figuras 5.42 e 5.43) mostra o campo elétrico na região dos barramentos do corte EE (figura 5.12) sem nenhuma interferência.

Já a segunda simulação (figuras 5.44 e 5.45) mostra o campo elétrico na mesma região, porém com a inserção de um objeto que representa o medidor metálico.

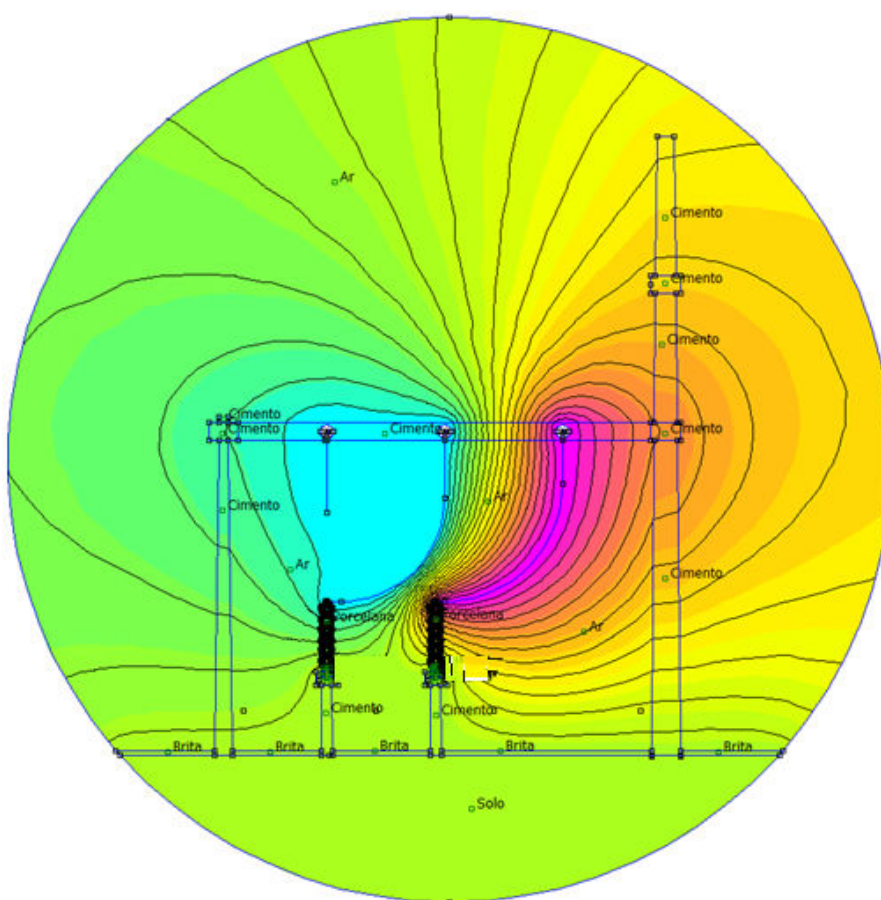


Fig. 5.42 - Campo elétrico não perturbado - superfícies equipotenciais  
Fonte: Acervo da autora



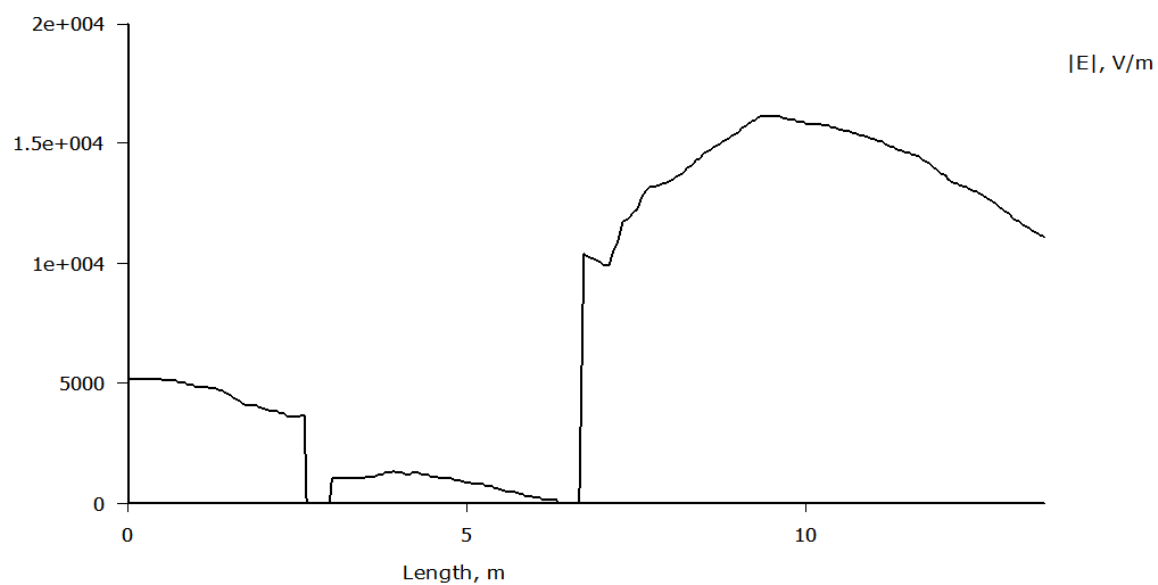


Fig. 5.43 - Campo elétrico não perturbado a 1,5 m do solo  
Fonte: Acervo da autora

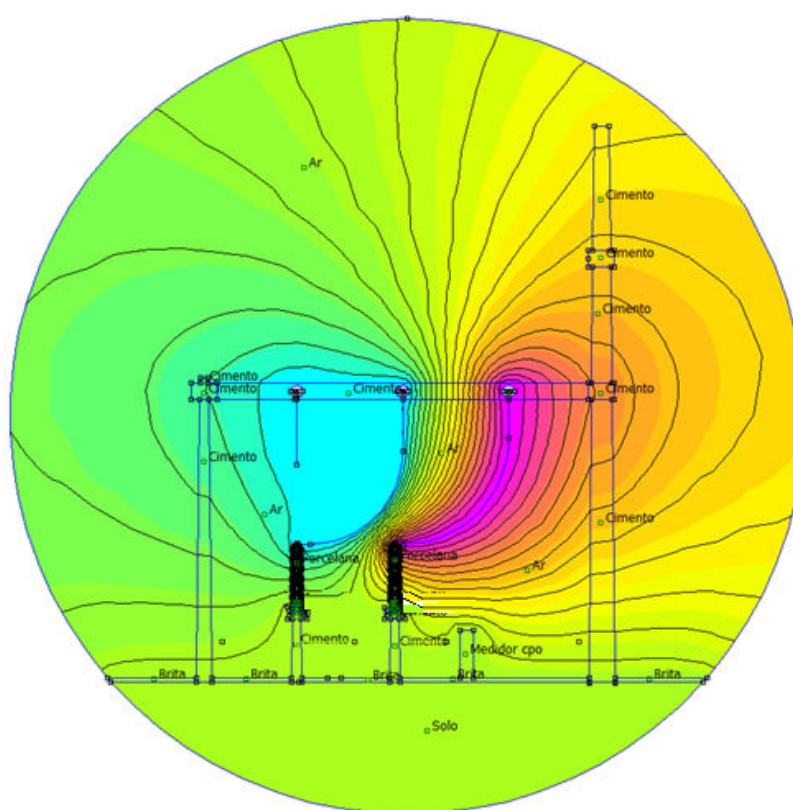


Fig. 5.44 - Campo elétrico perturbado - superfícies equipotenciais  
Fonte: Acervo da autora





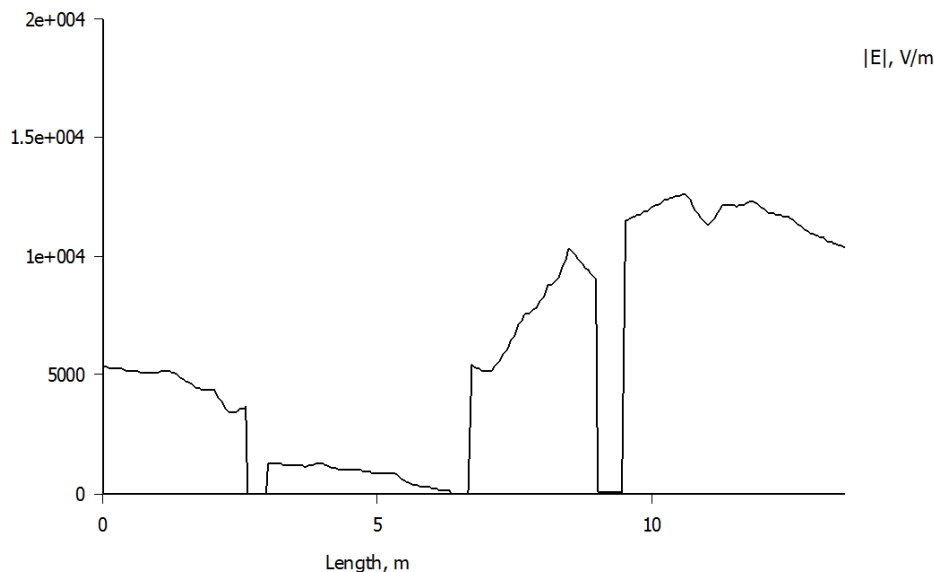


Fig. 5.45 - Campo elétrico perturbado a 1,5 m do solo  
Fonte: Acervo da autora

Observando-se as figuras obtidas a partir das duas simulações observa-se que quando o medidor é inserido próximo ao barramento, as superfícies equipotenciais se distorcem. Mais ainda, quando se compara as figuras 5.43 e 5.45, que mostram o campo elétrico à 1.5 do solo, para os casos não perturbado e perturbado, respectivamente, observa-se que a diferença nos valores obtidos será considerável.

Quando o campo elétrico é estimado através do FEMM esse problema não ocorrerá, visto que não é necessário inserção de nenhum equipamento no sistema.

Esta é uma vantagem adicional do método proposto neste trabalho, visto que a partir do FEMM, será estimado o campo elétrico não perturbado, o que não é possível através de medição.

## 5.6 Considerações finais

Foi demonstrado no presente capítulo através de comparação com o resultado de uma medição e aplicação de outro método (MSC) que o método





dos elementos finitos pode ser utilizado para simular campo elétrico apresentando erro pequeno.

Dentro deste contexto apresentou-se a simulação do campo elétrico para três cortes de uma subestação de 230/138/13,8 kV e comparou-se o resultado com a norma vigente no país [1], a fim de verificar se a subestação atendia ao limite estabelecido.

Foi possível concluir que em alguns pontos o valor foi superior ao limite estabelecido e que através da simulação via elementos finitos, alternativas podem ser propostas a fim de adequar os valores. Como por exemplo, no caso do barramento trifásico onde se propôs a inserção de um terceiro isolador na vista simulada, o que melhorou o valor do campo elétrico.

Seria possível ainda propor o aumento da altura dos isoladores, a fim de verificar se dessa forma os valores ficariam adequados em todos os pontos. Isso mostra que a ferramenta pode ser útil se utilizada na fase de projetos de subestações, já que neste caso a medição não é possível.

O método apresenta ainda, a vantagem adicional de estimar o campo elétrico não perturbado, que é o exigido pela norma. Esse feito não é possível se o método utilizado for o de medição.



# Capítulo 6

## CONCLUSÕES



Com o crescimento previsto para o país nos próximos anos, a rede elétrica necessitará ser ampliada. Essa ampliação passa pela construção de novas instalações, geradoras de campos eletromagnéticos.

Como a população e os operários de tais instalações ficam expostos a esses campos existem normas nacionais [1] e internacionais [2] que limitam seus valores.

No Brasil a norma em vigor é a Lei nº 11.934 de 05 de maio de 2009 que regulamenta os limites da exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica [1].

A determinação dos valores dos campos eletromagnéticos, para fim de comparação e adequação à norma, deve ser feita pelos agentes de geração, transmissão e distribuição em suas instalações. Para tal segundo a resolução normativa [1] estes devem realizar cálculos empregando metodologia consagrada ou medição.

A proposta do trabalho consistiu em empregar um método alternativo, baseado em elementos finitos, com utilização do software FEMM, para a estimativa dos valores de campo elétrico. A metodologia utilizada pode ser empregada para qualquer subestação, inclusive na fase de projeto da mesma, desde que se tenham os cortes. A grande vantagem de se fazer uma simulação na fase de projeto é a facilidade de poder alterar o mesmo para adequação aos valores determinados.

Embora existam normas limitadoras dos campos eletromagnéticos, ainda não se conseguiu determinar através dos estudos realizados até então, os efeitos biológicos da exposição à estes. Nenhum estudo conseguiu demonstrar e/ou comprovar que os campos representam risco à saúde humana, ou seja, não se chegou a nenhuma evidência conclusiva e consistente que mostra que a exposição provoque câncer, efeitos neurocomportamentais adversos ou efeitos sobre a reprodução e desenvolvimento.

Para a determinação do campo caso o método de medição seja escolhido, a norma NBR 15415 deve ser utilizada e o procedimento escolhido



adequadamente. Existem três tipos de medidores, de espaço livre, de referência de terra e eletro-óptico.

No entanto se a medição for utilizada, os aparelhos interferem no campo e como a norma determina que o campo a ser determinado seja o não perturbado, ela acaba se tornando uma fonte de erros.

No capítulo VI (estudo de caso) foi feita uma simulação no software FEMM que mostra a distorção das superfícies equipotenciais do campo e a diferença dos valores para o não perturbado e com a inserção de um aparelho de medição. O agravante é que a diferença é considerável.

Se o método escolhido para estimar o campo elétrico for o de elementos finitos essa interferência não existirá. Essa é a principal vantagem do método em relação à medição.

Além disso, foi demonstrado no capítulo VI através de comparação com o resultado de uma medição e aplicação de outro método (MSC) [37] que o método dos elementos finitos pode ser utilizado para simular campo elétrico apresentando erro pequeno, com valor máximo de -3,85%.

Foram feitas no trabalho três simulações, sendo o campo elétrico estimado em três cortes da subestação (barramento trifásico, transformador e disjuntor), todos na alta tensão (230 kV).

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com a norma vigente [1], para verificar se o valor atendia ao limite.

Foi possível concluir que em alguns pontos o valor foi superior ao limite estabelecido e que através da simulação via elementos finitos, alternativas podem ser propostas a fim de adequar os valores. Como por exemplo, no caso do barramento trifásico onde se propôs a inserção de um terceiro isolador na vista simulada, o que melhorou o valor do campo elétrico.

Seria possível ainda propor o aumento da altura dos isoladores, a fim de verificar se dessa forma os valores ficariam adequados em todos os pontos. Isso mostra que a ferramenta pode ser útil se utilizada na fase de projetos de subestações, já que neste caso a medição não é possível.



## 6.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma metodologia de determinação do campo elétrico em uma subestação.

A metodologia aqui empregada pode ser utilizada para a determinação do campo elétrico em outras instalações elétricas, como linhas de transmissão.

Além disso, o método pode ser utilizado para a determinação da faixa de servidão de linhas de transmissão.

Outro ponto que pode ser enfocado, utilizando o mesmo método (elementos finitos) e até o mesmo programa (FEMM) é a determinação do campo magnético, parâmetro que analogamente ao campo elétrico, também é limitado pela norma 11.934 [1].

Além disso, as simulações aqui feitas em 2d, podem ser feitas em 3d e os dois resultados comparados.



- [1] Limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Lei nº 11.934, 5 de Maio, 2009.
- [2] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. Health Physics vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [3] NBR 15415 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz, ABNT, 2006.
- [4] IEEE Std 644-1994, "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines", IEEE Standards Board, December, 1994.
- [5] Abricem – Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética. Limites à Exposição Humana a campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos. Lei nº 2.576, 2000.
- [6] Bren, Stephan P. Albert. *Historical introduction to EMF Health Effects*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, July, 1996.
- [7] FCC, Office of Engineering & Technology. *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields*, OET Bulletin 65, 1997
- [8] Official Journal of the European Communities, L 199/59 *COUNCIL RECOMMENDATION of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*. July, 1999.
- [9] Anatel, Resolução Nº 303, de 2 de Julho de 2002, *Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Frequências entre 9 kHz e 300 GHz*. Brasília 2002.
- [10] Anatel, *Diretriz para limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis no tempo (até 300 GHz)*. Brasília, 1999.
- [11] Polk, C., Postow, E. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, CRC Press. 1986.
- [12] Osepchuk, J. M. *Biological Effects of Electromagnetic Radiation*, IEEE Press, 1983.
- [13] Mano, Reinaldo; *O ciclo cardíaco normal*. Disponível em: <http://www.manuaisdecardiologia.med.br/Semiologia/ciclo1.htm>. Acesso em 16/09/2010, 15:53.



- [14] Muller, Morton W.; *Extremely Low Frequency Electrical Fields: Experimental Work on Biological Effects*. In: Eleanor, R.; Polk, Charles; Postow, Elliot; CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields. Boca Raton, FL: CRC Press, 1986.
- [15] Armed Forces Radiobiology Research Institute (AFRRI), Military Medical Operations Office, *Medical Management of Radiological Casualties - Handbook*, Bethesda, Maryland, 1999.
- [16] International Agency for Research on Cancer. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Complete List of Agents Evaluated and Their Classification*. Disponível em: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>. Acesso em: 28/09/2010, 11:02.
- [17] National Radiological Protection Board. : Report of an Advisory Group on Non-ionizing Radiation. *Documents of the NRPB, Vol. 12, No. 1. National Radiological Protection Board, Oxon, UK, 2001*. Disponível em: <http://www.hpa.org.uk/Publications/Radiation/NPRBArchive/DocumentsOfTheNRPB/Absd1201>. Acesso em: 29/09/2010, 15:10.
- [18] GUIMARÃES, German E. Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV. 2005. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.
- [19] “Measurement of Electric and Magnetic Fields from Alternating Current Power Lines ”, A report prepared by the Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, n°4, pp. 1104-1114, july/aug, 1978.
- [20] “Seminário Transdutor óptico de tensão”. Universidade Federal do Paraná, Departamento de engenharia elétrica. 2008.
- [21] Efeito Pockels. Wikipédia – Enciclopédia. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_Pockels](http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Pockels) >. Acesso em: 19 agosto 2010.
- [22] IEC 61786:1998, “Measurement of Low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements.”
- [23] Narda Safety Test Solutions, EFA-200/300 Analisador de Campo Eletromagnético, “Manual de Operação”.



- [24] DENO, D.W., Currents induced in the human body by high-voltage transmission line electric field-measurement and calculation of distribution and dose, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-96, pp. 1517-1527 (1977).
- [25] IEEE Std 644-1994 (Revision of IEEE std 644-1987), IEEE standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines (1994).
- [26] GOCKENBACH, E., GANZMANN, P., e BROGLI, E., *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*, Paper 40.06, sixth International symposium on High-Voltage engineering, New Orleans, LA, (1989).
- [27] KIRKHAM, H., JOHNSTON, A., JACKSON, S. e SHEU, K., *AC and DC electric field meters Developed for the U.S. Department of Energy*, Jet propulsion laboratory report prepared for U.S. Department of Energy, JPL Publication 87-20 (February, 1987).
- [28] HAMASACKI, H., GOTOH, H., KATOH, M. e TAKEUCHI, s., *OPSEF: an Optical Sensor for Measurement of High Electric Field Intensity*, Electronics Letters 16, pp. 406-407 (1980).
- [29] IEC 60833, *Measurement of power frequency electric fields* (1997).
- [30] DENO, D.W., *Electrostatic Effect Induction Formulae*, IEEE trans. Power Appar. Systems PAS-94, pp. 1524-1536 (1975).
- [31] CAOLA, JR., R.J., DENO, D.W., e DYMEK, V.S.W., Measurement of electric and magnetic fields in anda round homes near a 500 kV transmission line, IEEE Trans. Power Appar, Systems PAS-102, pp. 3338-3347 (1983).
- [32] CENELEC, European Prestandard ENV 50166-1, *Human exposure to electromagnetic fields, low frequencies (0 Hz to 10 Hz)*, (1995).
- [33] ICNIRP Guidelines, *Guidelines for Limiting Exposure to Time – Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (UP to 300 GHz)*(1990).
- [34] DENO, D.W. e SILVA, M., *Method for evaluating human exposure to 60 Hz electric fields*, IEEE trans. Power Appar. Systems PAS-103, pp. 1699-1706 (1984).
- [35] Maruvada, P.S.; Goulet, D.L., “Study of Population Exposure to Magnetic Fields due to Secondary Utilization of Transmission Line Corridors” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, n° 3, pp. 1541-1548, July, 1995.
- [36] Prof. Dr. Samuel da Silva, Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2009.





[37] Pereira, Mário L. Simulação tridimensional do campo eletromagnético de linhas de transmissão de alta tensão. 2005. Tese de Doutorado. Escola politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

[38] Amin, Shahrooz M. Advanced Faraday Cage Measurements of Charge, Short Circuit Current, and Open Circuit Voltage. 2004. Dissertação de Mestrado, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.



---

## ANEXO A

---

### Mapeamento dos potenciais elétricos de uma subestação através da técnica de elementos finitos

IX CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica  
Cuiabá - MT  
2011



## ANEXO B

---

### UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

XXI SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Florianópolis – SC

2011

