



ESCOLA DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica - CPDEE

**ESTUDO DE DESCARGAS ELÉTRICAS INDUZIDAS EM
SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO:
soluções para mitigação e monitoramento**

Geraldo Magela Gontijo

**Belo Horizonte
2008**

Geraldo Magela Gontijo

**ESTUDO DE DESCARGAS ELÉTRICAS INDUZIDAS EM
SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO:
soluções para mitigação e monitoramento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Compatibilidade Eletromagnética

Orientador: Prof. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

Dedico esta dissertação aos meus pais, Eugênio e Terezinha, e à Creuseni, Marcela e Gabriel, fontes de inspiração e incentivo de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me proporcionado esta oportunidade e me agraciado com a vontade de superar as dificuldades.

À Creuseni, minha esposa, que me soube compreender, incentivar e confortar com amor e carinho.

Aos meus filhos Marcela e Gabriel que representaram fontes de estímulos e confiança na vitória.

Ao Professor Wallace do Couto que me fez entender o legítimo significado das palavras superação, orientação, cooperação e amizade.

Ao Professor José Osvaldo pelo incentivo e alento e por me fazer compreender que cada tijolinho é importante na construção do conhecimento.

Ao Professor Ivan José por aceitar compor a banca examinadora e pelas sugestões e comentários a esta dissertação.

À Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG que tornou possível a realização desta Dissertação de Mestrado.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

*“É melhor tentar e falhar,
Que preocupar-se e ver a vida passar.
È melhor tentar ainda em vão,
Que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
Que em dias tristes em casa me esconder,
Prefiro ser feliz, embora louco
Que em conformidade viver”*

Martin Luther King

RESUMO

Os campos elétricos elevados são intrínsecos às subestações de extra-alta tensão, onde seus efeitos são particularmente pronunciados. O trabalho em áreas desenergizadas, mas nas proximidades de barramentos energizados de subestações de alta tensão, provoca desconforto nos trabalhadores devido às descargas eletrostáticas entre pessoas e objetos metálicos. Estes choques são bastante desagradáveis e, além disso, há o risco de queda da estrutura quando da reação impulsiva involuntária ao choque. Neste contexto, tais situações requerem estudos teóricos e experimentais que possam levar ao desenvolvimento de dispositivos, que permitam ao trabalhador executar suas atividades sem desconforto e numa condição segura. Diante do exposto, a proposta desta dissertação é consolidar uma fundamentação teórica dos efeitos dos campos elétricos no corpo humano a partir de revisão da literatura, levantamento de dados em campo, ensaios em laboratórios e subestações, visando contribuir para o desenvolvimento e implantação na CEMIG de dispositivos de mitigação de descargas eletrostáticas para trabalho em subestações de alta tensão; elaboração de uma metodologia que venha de encontro a uma necessidade, atual e já identificada, de avaliação dos níveis de exposição ao campo elétrico, preliminarmente à realização de atividades de manutenção, como instrumento de investigação e pesquisa ocupacionais e se antecipando a alguns aspectos normativos prescritos na norma brasileira NR-10 e, por fim, a inserção dos novos modelos de medidores de campo e pacotes computacionais disponíveis para modelagem e simulação de campos elétricos ao material teórico acadêmico disponível para estudos e pesquisas.

Palavras-chave: Campo elétrico. Descargas Eletrostáticas. Subestações.

ABSTRACT

High intensity electric fields are intrinsic to extra-high voltage substations, where the effects are particularly pronounced. The work at non-energized areas, but in the vicinity of energized high-voltage bus bars, may lead to discomfort in the workers due to the spark discharges between people and metallic objects. The resulting electric shocks are very annoying and present risks of fall from the structure, due to the involuntary impulsive reaction to the shock. In this context, the question involving the discomfort and the risk of fall from the structure requires theoretical and experimental studies aiming the development of devices to allow the workers to execute their tasks without discomfort and in a safe condition. As explained above, the proposal of this dissertation is to consolidate a theoretical base concerning the effects of the electric fields in the human body from literature review, field surveys and tests in laboratories and substations, aiming to present contributions for the development and implementation in CEMIG of the devices for mitigation of sparks discharges during work in high voltage substations; improvement of a methodology of evaluation of undisturbed electric field, from studies regarding the correlation between leakage current through the worker's body and electric field. This methodology satisfies a present need for the evaluation of levels of exposition to the electric field prior to the work in energized substations, as an instrument for occupational health investigation, looking ahead to some prescribed normative aspects in Brazilian standard NR-10; and, finally a knowledge base updates regarding the work under high intensity electric fields exposure, through the literature review and its adequacy to the new available electric field probes and software for modeling and simulation of electric fields.

Key words: Electric field. Spark discharges. High voltage substations

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Acoplamentos do corpo sob exposição ao campo elétrico.....	27
Figura 2.2	Campo elétrico uniforme E_0	29
Figura 2.3a	Campo elétrico perturbado por objeto condutor no solo.....	30
Figura 2.3b	Campo elétrico perturbado por objeto condutor flutuando...	30
Figura 2.4	Elipse de campo elétrico próxima a linha de transmissão...	31
Figura 2.5	Representação vetorial de campo elíptico.....	32
Figura 2.6	Circuito equivalente de objeto exposto ao campo elétrico...	35
Figura 2.7	Condição limite de interrupção e descargas a cada semi-ciclo.....	35
Figura 2.8	Condição de interrupção e série de descargas num ciclo.....	36
Figura 2.9	Condição sem interrupção com contato rápido.....	36
Figura 2.10	Esfera acima do solo e aterrada.....	39
Figura 2.11	Forma de onda normalizada para descarga eletrostática....	42
Figura 2.12	Capacitância pessoa-terra em função da altura da sola do sapato.....	43
Figura 2.13	Sonda em forma de cubo de medidor de espaço livre.....	51
Figura 3.1	Trabalhos de manutenção em subestações.....	55
Figura 3.2	“Compressão” de equipotenciais.....	56
Figura 3.3	Posições típicas de trabalho – nível do solo e em escada.....	58
Figura 3.4	Situação típica de trabalho – manutenção em plataforma elevada.....	59
Figura 3.5	Gráfico de energia e corrente, simuladas com e sem indutâncias.....	60
Figura 3.6	Forma de onda para corrente definida pela CENELEC.....	61
Figura 3.7	Exemplos de descargas para diferentes velocidades de aproximação.....	62
Figura 3.8	Acidentes fatais de concessionárias.....	64
Figura 4.1	Etapas da descarga eletrostática.....	73
Figura 4.2	Modelo de circuito para cálculo da corrente.....	74
Figura 4.3	Circuito para cálculo da corrente, pessoa totalmente isolada.....	74
Figura 4.4	Circuito para o cálculo da corrente transitória (I_{DE})	75
Figura 4.5	Circuito para o cálculo da corrente de regime (I_{RP}).....	76
Figura 4.6	Forma de onda da corrente de descarga nas suas duas fases.....	76

Figura 4.7	Circuito de uma pessoa com pulseira de aterramento.....	78
Figura 4.8	Lei de Paschen – Tensão disruptiva no ar.....	78
Figura 4.9	Contato acidental com partes energizadas do circuito auxiliar.....	81
Figura 4.10	Tensão de passo considerando a pulseira de aterramento	82
Figura 4.11	Tensão de toque considerando a pulseira de aterramento	83
Figura 4.12	Tensões de passo e de toque na pessoa com a pulseira de aterramento.....	84
Figura 4.13	Centro do “grid” da malha, onde ocorre a máxima tensão de toque.....	85
Figura 4.14	Protótipos confeccionados.....	86
Figura 4.15	Diagrama Pulseira com resistor e garra jacaré.....	86
Figura 4.16	Pulseira com resistores e garra jacaré.....	87
Figura 4.17	Pulseira em uso em subestação.....	87
Figura 4.18	Diagrama do Clipe de cintura com resistores e garra jacaré.....	87
Figura 4.19	Detalhe do Clipe de cintura com garra jacaré e pino banana.....	87
Figura 4.20	Clipe de cintura com garra jacaré em uso.....	88
Figura 4.21	Arranjo para medição de campo elétrico.....	88
Figura 4.22	Medição de tensão no manequim suspenso.....	89
Figura 4.23	Arranjo para medição de tensão e corrente.....	89
Figura 4.24	Manequim com uniforme e bota - medição de tensão e corrente.....	91
Figura 4.25	Teste de campo - Medição de campo elétrico na SE Taquaril.....	93
Figura 4.26	Teste de campo - Medição de tensão na plataforma.....	94
Figura 4.27	Implantação do kit anti-indução na SE Montes Claros.....	99
Figura 5.1	Arranjo para medição de tensão e corrente.....	107
Figura 5.2	Arranjo modificado para medição do campo elétrico E_0	107
Figura 5.3	Vista de topo do arranjo - Posicionamento dos pontos de medições.....	108
Figura 5.4	Vista geral do arranjo do LEAT para medições de campo elétrico.....	109
Figura 5.5	Vista em detalhe do painel da unidade de aquisição das medições.....	111
Figura 5.6	Medição do campo elétrico – Sensor de campo sobre tripé a 1m do solo.....	112
Figura 5.7	Medição de corrente, voluntário em pé, braços abertos para os lados.....	113
Figura 5.8	Medição de corrente, voluntário em pé, braços abertos para frente.....	114

Figura 5.9	Medição de corrente, voluntário agachado.....	114
Figura 5.10	Medição de corrente, voluntário em pé, braços ao lado do corpo.....	115
Figura 5.11	Medição de corrente de circulação – Posição do voluntário	116
Figura 5.12	Medição de corrente – Caixa metálica de blindagem e cabos de conexão.....	116
Figura 5.13	Gráfico – Campo elétrico $E_0 \times I_{CC}$ corrente.....	119
Figura 5.14	Gráfico $E_0 \times I_{CC}$ – Campo elétrico em função da corrente – Ajustado.....	119
Figura 5.15	Medição de tensão entre pessoa e a terra sobre placa de fibra de vidro.....	123
Figura 5.16	Circuito para cálculo da tensão de circuito aberto – V_{CA}	123
Figura 5.17	Capacitância da pessoa em função da altura do solado.....	124
Figura 5.18	Tensão V_{CA} em função da corrente de circulação I_{CC}	126
Figura 5.19	Tensão V_{CA} em função da corrente I_{CC} – Ajuste linear das medições.....	126
Figura 6.1	Parâmetros elétricos do corpo sob exposição ao campo elétrico.....	133
Figura 6.2	Modelagem no <i>ATP Draw</i> [®] da fase disruptiva da descarga.....	135
Figura 6.3	Corrente total na fase disruptiva no corpo (circuito da Figura 6.2).....	136
Figura 6.4	Forma de onda de corrente para descarga eletrostática.....	137
Figura 6.5	Detalhe ampliado do pico da corrente e seu tempo de crescimento.....	137
Figura 6.6	Gráfico com formas de ondas de corrente - com e sem indutâncias.....	137
Figura 6.7	Arranjo montado para ensaios no LEAT.....	139
Figura 6.8	Visualização da solução com graduação de E - campo elétrico.....	139
Figura 6.9	Forma de onda normalizada para descarga eletrostática....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Níveis de referência de campos para exposição ocupacional	66
Tabela 3.2	Limiares de corrente para efeitos indiretos.....	69
Tabela 4.1	Valores de resistores para se evitar descargas eletrostáticas	80
Tabela 4.2	Resultados das medições no manequim revestido com alumínio, sem uniforme.....	90
Tabela 4.3	Medições no manequim revestido com alumínio, com uniforme e botas.....	90
Tabela 5.1	Medições do campo elétrico a 1 m do piso do LEAT.....	111
Tabela 5.2	Medições da corrente no voluntário em pé, com bota e tocando o piso.....	112
Tabela 5.3	Medições de corrente iniciais para análise de sensibilidade de h e S.....	113
Tabela 5.4	Medições da tensão sobre no voluntário em pé, com bota e tocando o piso.....	117
Tabela 5.5	Medições de Campo elétrico não perturbado e corrente de circulação.....	118
Tabela 5.6	Linearização das medições de campo elétrico e cálculo de erro.....	121
Tabela 5.7	Comparativo de tensões medidas e calculadas V_{CA} com I_{CC} e E_0	125
Tabela 5.8	Comparativo de correntes I_{CC} medidas e calculadas pela equação 5.4.....	128
Tabela 6.1	Parâmetros do corpo humano adotados nas simulações.....	134
Tabela 6.2	Comparação dos parâmetros da corrente disruptiva – com indutâncias.....	141
Tabela 6.3	Comparação de medições realizadas no LEAT usando manequim.....	143
Tabela 6.4	Comparação de campo elétrico medido x simulado.....	145
Tabela 6.5	Tensões V_{CA} - medidas e simuladas – Manequim flutuando....	145
Tabela 6.6	Tensões V_{CA} - medidas e simuladas – Manequim tocando o chão.....	146
Tabela 6.7	Comparação de medições realizadas no LEAT usando manequim.....	147
Tabela 6.8	Tensões V_{CA} - medidas e simuladas compensadas.....	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP-Draw®	<i>Alternative Transients Program</i>
BEM	<i>Boundary Element Method</i> - Métodos dos Elementos de Contorno
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEMIG-GT	Companhia Energética de Minas Gerais Geração e Transmissão S.A
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i>
CIGRÉ	<i>Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension</i>
CPDEE	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
CSM	<i>Charge Simulation Method</i> - Método de Simulação de Cargas
DFTD	Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
DTC	Divisor de Tensão Capacitivo
ELF	<i>Extreme Low Frequency</i> - campos de frequência extremamente baixa
Eng.	Engenheiro
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FEM	<i>Finite Elements Method</i> – Método dos Elementos Finitos
FUNCOGE	Fundação Comitê de Gestão Empresarial
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i> - Comissão Internacional de Proteção contra Radiações não Ionizantes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LEAT	Laboratório de Extra Alta-tensão da UFMG
LT	Linhas de Transmissão
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
NR	Norma Regulamentadora
OMS	Organização Mundial de Saúde
SBSE	Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
SI	Sistema Internacional
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{B}	Vetor Densidade de fluxo magnético
\vec{D}	Vetor Densidade de fluxo elétrico
\vec{n}	Vetor unitário perpendicular à superfície
H	Intensidade de campo magnético
ρ	Resistividade elétrica
R.C	Constante de tempo de um circuito RC
B_0	Densidade de fluxo de um campo magnético não perturbado
C	Capacitância
ca	Corrente alternada
cc	Corrente contínua
C_E	Capacitância espacial
C_{OT}	Capacitância do objeto para a terra
C_{PT}	Capacitância pessoa-terra
C_S	Fator que leva em conta a resistividade do solo e a espessura da camada de brita
d	Distância
dA	Elemento diferencial de área
E_x	Componente vertical do campo elétrico não perturbado
E	Campo elétrico
E_0	Campo elétrico uniforme não perturbado
E_i	Campo elétrico interno ao objeto
f	Frequência industrial em [Hz]
F/m	Farad/metro
G	Gauss – Unidade de medição de densidade de fluxo magnético
h	Altura
Hz	Unidade de medição de frequência – Hertz
I_{CC}	Corrente de circulação ou corrente de circuito fechado
I_{DE}	Corrente transitória de descarga
I_f	Corrente de fuga medida

I_P	Corrente na pessoa
I_{RP}	Corrente em regime permanente
k	Constante de medidor de campo
kHz	Kilohertz – unidade de medição de frequências altas
V	Volts – Unidade de medição de tensão
V/m	Volts por metro – Unidade de medição de campo elétrico
Ω	Ohms – Unidade de medição de resistência
L	Indutância
L_0	Indutância do objeto aterrado
mA	Miliampéres – Unidade de medição de pequenas correntes
mG	Miligauss – Unidade usual de medição de campo magnético
mm ²	Milímetros quadrados – Unidade de medição de pequenas áreas
s	Segundos – unidade de medição de tempo
n	Número aproximado de reinições (descargas) por ciclo
p	Ponto p genérico localizado em um lugar definido do espaço
pF	picoFarad – Unidade de medição de baixos valores de capacitância
Q_i	carga equivalente inserida
r	Raio
R_A	Resistência do arco
R_B	resistência da pessoa com botas nos pés
R_C	Resistências do corpo da pessoa
r_i	Distância entre a carga Q_i e o ponto p em questão
rms	Valor eficaz de uma grandeza senoidal – Valor médio quadrático
R_P	Resistor da pulseira
R_{PT}	Resistência pessoa-terra
$R_{pulseira}$	Resistência ou resistor da pulseira
S	área coletora de carga equivalente do objeto em m ²
T	Tesla – Unidade de medição de densidade de fluxo magnético
t_c	Tempo de crescimento do pulso da descarga
V/m	Volt por metro
V_0	Tensão de disrupção
V_{CA}	Tensão de circuito aberto

V_{ca}	Tensão de corrente alternada
V_{cc}	Tensão de corrente contínua
V_{cc-M}	Tensão de circuito fechado - Medida
V_{cc-S}	Tensão de circuito fechado - Simulada
V_{cc-SC}	Tensão de circuito fechado - Simulada compensada
V_{esp}	Potencial espacial elétrico
V_{max}	Tensão com valor máximo
V_{OT}	Tensão induzida entre o objeto e a terra
V_P	Tensão entre a pessoa e objeto aterrado
V_{SA}	Tensão de serviço auxiliar
V_{Toque}	Tensão de toque
W	Watts – Unidade de medição de potência
Wb/m ²	Weber por metro quadrado
Z_{OT}	Impedância entre o objeto e a terra
Z_{PT}	Impedância entre pessoa e a terra
α_1	Ângulo alfa 1
α_2	Ângulo alfa 2
ϵ	permissividade ou constante dielétrica do ar igual a 8.854×10^{-12} F/m
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ω	Frequência angular - $2\pi f$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Objetivos.....	21
1.1.1	Objetivo principal.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
1.2	Organização desta dissertação.....	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1	Conceituação básica.....	25
2.2	Terminologia associada a campos elétricos e magnéticos.....	27
2.2.1	Campo elétrico.....	28
2.2.2	Campo magnético.....	28
2.2.3	Componente vertical de um campo elétrico.....	29
2.2.4	Campo elétrico não-perturbado.....	29
2.2.5	Campo (elétrico ou magnético) uniforme.....	30
2.2.6	Campo elétrico perturbado.....	30
2.2.7	Elipse de campo e máximo valor de campo.....	31
2.2.8	Campo elétrico monofásico e trifásico.....	33
2.3	Descargas eletrostáticas.....	34
2.3.1	Corrente e tensão induzidas por descargas eletrostáticas.....	37
2.3.2	Corrente e tensão induzidas em objetos metálicos.....	38
2.3.3	Corrente e tensão induzidas em pessoas.....	40
2.3.3.1	Fase disruptiva da descarga.....	41
2.3.3.2	Fase em regime permanente da descarga.....	42
2.4	Métodos de cálculo de distribuição de campos elétricos.....	44
2.4.1	Método das cargas equivalentes.....	46
2.5	Medições de campos elétricos.....	47
2.5.1	Técnicas de medição no campo elétrico não-perturbado.....	48
2.5.2	Medidores de campo elétrico.....	49
2.5.2.1	<i>Princípio de funcionamento de medidores de espaço livre.....</i>	<i>49</i>
2.5.2.2	<i>Características requeridas para medidores de campo elétrico.....</i>	<i>52</i>

2.6	Síntese do capítulo.....	53
3	CARACTERIZAÇÃO DOS EFEITOS DA INDUÇÃO POR CAMPOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES.....	54
3.1	Escopo e delimitação da pesquisa.....	54
3.2	Caracterização das descargas eletrostáticas em subestações	55
3.2.1	Levantamentos de campo.....	57
3.2.2	O desconforto causado pelas descargas eletrostáticas.....	59
3.2.3	Aspectos de segurança.....	63
3.2.4	Limites de exposição.....	65
3.2.4.1	<i>Limites de exposição a campos elétricos.....</i>	<i>66</i>
3.2.4.2	<i>Limites de exposição às correntes induzidas.....</i>	<i>68</i>
3.3	Síntese do capítulo.....	70
4	DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA MITIGAÇÃO DE DESCARGAS ELETROSTÁTICAS POR INDUÇÃO.....	71
4.1	Desenvolvimento de soluções.....	72
4.1.1	Estudo teórico do fenômeno.....	72
4.1.1.1	<i>Descargas eletrostáticas.....</i>	<i>72</i>
4.1.1.2	<i>Cálculo dos parâmetros para circuitos equivalentes de descarga....</i>	<i>75</i>
4.1.2	Requisitos elétricos mínimos.....	77
4.1.3	Contato com circuito de serviço auxiliar.....	80
4.1.4	Análise das tensões de passo e de toque.....	82
4.2	Protótipos desenvolvidos.....	85
4.2.1	Pulseira.....	86
4.2.2	Clipe de cintura.....	87
4.3	Ensaio em laboratório.....	88
4.3.1	Análise da efetividade dos protótipos.....	91
4.3.2	Definição dos ensaios de tipo.....	92
4.4	Ensaio em campo.....	92
4.4.1	Medições de campo.....	92
4.4.2	Análise da efetividade dos protótipos.....	94

4.4.3	Ensaio funcionais e conforto.....	94
4.5	Especificação técnica e padronização.....	95
4.5.1	Pulseira resistiva.....	95
4.5.2	Clipe de cintura.....	96
4.5.3	Ensaio de rotina.....	97
4.5.3.1	<i>Inspeção visual.....</i>	97
4.5.3.2	<i>Ensaio dimensionais.....</i>	97
4.5.3.3	<i>Ensaio elétricos.....</i>	98
4.5.3.4	<i>Ensaio funcionais.....</i>	98
4.6	Implantação e treinamento de equipes.....	98
4.7	Medidas complementares.....	100
4.8	Adequação normativa.....	101
4.9	Síntese do Capítulo.....	102
5	DISPOSITIVO DE AVALIAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO NÃO- PERTURBADO.....	105
5.1	Dispositivo de avaliação de campo elétrico não perturbado.....	105
5.1.1	Medições em laboratório.....	106
5.1.1.1	<i>Recursos utilizados.....</i>	106
5.1.1.2	<i>Organização das medições.....</i>	108
5.1.1.3	<i>Procedimento para realização das medições.....</i>	110
5.1.2	Análise dos resultados das medições.....	110
5.1.2.1	Medições de campo elétrico não perturbado.....	110
5.1.2.2	<i>Medições de corrente de circulação I_{CC} pela pulseira resistiva.....</i>	112
5.1.2.3	<i>Cuidados e critérios observados na medição da corrente de circulação na pessoa.....</i>	115
5.1.2.4	<i>Medições de tensão com ponta de prova.....</i>	117
5.1.3	Validação da metodologia.....	117
5.2	Estudos de correlação dos dados medidos e resultados obtidos.....	120
5.2.1	Correlação campo elétrico e corrente na pessoa.....	121
5.2.2	Correlação entre tensão pessoa – terra (V_{CA}) e corrente de circulação (I_{CC}).....	122

5.2.3	Correlação entre corrente de circulação (I_{CC}) medida e fórmula empírica.....	127
5.3	Síntese do capítulo	129
6	SIMULAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CAMPOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES.....	131
6.1	Simulação e modelagem das situações típicas de trabalho.....	132
6.2	Modelagem de descargas eletrostáticas por circuito equivalente.....	134
6.2.1	Corrente em regime transitório ou fase disruptiva.....	135
6.3	Simulação gráfica com <i>Quick Field</i>[®] – Cálculo de Campo.....	138
6.4	Comparação de simulações e medições – Análise dos resultados.....	140
6.4.1	Modelagem por circuito equivalente.....	140
6.4.1.1	<i>Regime permanente.....</i>	140
6.4.1.2	<i>Discussão dos resultados das simulações na Fase Disruptiva</i>	141
6.4.2	Medições em laboratório.....	142
6.4.3	Comparação das medições com as simulações gráficas.....	144
6.5	Síntese do capítulo.....	148
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
7.1	Conclusões.....	150
7.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	153
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154

1 INTRODUÇÃO

O ambiente das subestações de alta tensão é um ambiente essencialmente eletromagnético. As atividades de manutenção nas subestações são executadas, na maioria das vezes, bem acima do nível do solo, aumentando o nível de exposição ao campo elétrico alternado de 60 Hz e conseqüentemente os efeitos desta exposição.

Historicamente, os trabalhadores convivem com a “indução”, expressão usual para definir os efeitos das descargas elétricas induzidas, chamadas no âmbito deste estudo de descargas eletrostáticas, problema crônico que gera desconforto, afeta negativamente a produtividade e aumenta os riscos de queda dos trabalhadores devido à reação involuntária ao choque.

Neste sentido fica caracterizada uma das motivações básicas da pesquisa que é eliminar o desconforto causado pelas descargas elétricas induzidas, propiciando uma condição segura para a execução de serviços em subestações com campos elétricos elevados.

É neste contexto que se insere a temática desta dissertação, a qual aborda os estudos teóricos, atividades de ensaios em laboratórios, provendo soluções como desenvolvimento de dispositivos de mitigação de descargas eletrostáticas, monitoramento através de metodologia de avaliação do campo elétrico, conhecimento com a consolidação de métodos de simulação e modelagem computacional dos efeitos de campo elétrico.

É importante ressaltar, que parte da etapa referente ao desenvolvimento dos dispositivos de mitigação, notadamente na proposição de soluções e de protótipos, foi conduzida por meio de um trabalho conjunto entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), conforme detalhado mais adiante.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Desenvolver uma nova metodologia de avaliação do campo elétrico não perturbado e da diferença de potencial entre o trabalhador e o aterramento baseada na medição da corrente circulante entre esta pessoa e o terminal de terra quando submetido a campo elétrico alternado de 60 Hz.

1.1.2 Objetivos secundários

- § realizar pesquisa bibliográfica da literatura disponível para cálculo das correntes e tensões induzidas nas pessoas quando expostas ao campo elétrico;
- § identificar e analisar os parâmetros de interesse da descarga eletrostática nas suas fases disruptiva e em regime permanente;
- § descrever as etapas para o desenvolvimento de dispositivos para mitigação das descargas eletrostáticas: estudos teóricos, criação de protótipo, ensaios de laboratório, testes em subestações com medições de campo elétrico e tensões e correntes induzidas;
- § apresentar ferramentas computacionais de simulação e cálculo da distribuição de campos elétricos e análise de transitórios elétricos para simulações de descargas em regime transitório;
- § discutir os resultados obtidos das simulações e das medições de campo elétrico, tensões e correntes induzidas, consolidando as ferramentas utilizadas e a aplicação da teoria estudada.

1.2 Organização desta dissertação

Inicia-se o estudo com uma breve introdução que contextualiza de forma sucinta o tema, define os objetivos que nortearão o estudo e apresenta a organização do trabalho.

O segundo capítulo, denominado Referencial Teórico, define o escopo do trabalho e apresenta conceitos e terminologias associados aos campos elétricos. Aborda o equacionamento de tensões e correntes induzidas em pessoas e objetos introduzindo a teoria que será objeto de estudo mais aprofundado, incluindo sua aplicação, nos capítulos cinco e seis. São apresentadas as técnicas de medição de campo elétrico, os medidores de campo elétrico e seu princípio de funcionamento.

O capítulo três aborda as descargas eletrostáticas. Nele, faz-se um levantamento de campo e a identificação das situações típicas de trabalho. Caracteriza-se o desconforto causado pelas descargas e discute-se os aspectos de segurança, motivadores da criação de dispositivos de mitigação abordados no capítulo seguinte. Como parâmetro de interesse, os limites de referência de exposição aos campos elétricos e correntes induzidas são extraídos das normas pertinentes e apresentados.

O quarto capítulo apresenta todas as etapas do desenvolvimento dos dispositivos anti-indução, desde estudos teóricos, da análise dos circuitos equivalentes, definição dos requisitos, da criação de protótipos, ensaios realizados em laboratório e em campo, num trabalho conjunto: UFMG e CEMIG. Em seguida, são descritas as etapas de validação dos protótipos e a sua implantação na CEMIG. Inclui-se neste capítulo, a especificação técnica do *kit* anti-indução, conjunto com uma pulseira e um clipe de cintura, aplicável a maioria dos serviços em subestações para mitigação das descargas eletrostáticas.

Dando seqüência ao trabalho, no capítulo cinco identifica-se a necessidade de se medir os campos elétricos. Analisa-se a viabilidade de usar o dispositivo anti-

indução, desenvolvido e apresentado no capítulo anterior, para medição da corrente e obtenção do valor de campo elétrico. O objetivo principal deste capítulo é descrever as atividades realizadas para criação e validação deste dispositivo, que constaram de montagem de uma infra-estrutura no Laboratório de Extra Alta-Tensão (LEAT) da UFMG, para geração de campo elétrico, medição de campo elétrico, corrente e tensão em posições e pontos previamente estudados e definidos para se estabelecer uma correlação entre campo elétrico e corrente, obtendo-se uma equação de correlação linear entre campo elétrico e corrente medida. As possibilidades criadas e a aplicabilidade desta metodologia também são objetos de discussão neste capítulo.

O capítulo seis do estudo aborda a simulação e a modelagem computacionais das situações típicas de trabalho. As descargas eletrostáticas na sua fase disruptiva são modeladas com circuito equivalente do corpo humano, utilizando seus parâmetros típicos e simuladas no *ATP-Draw*TM. A modelagem computacional é explorada com o programa *QuickField*TM, onde o arranjo físico montado no LEAT é desenhado e simulado bidimensionalmente. Os resultados obtidos nas duas ferramentas são comparados com as medições de campo e corrente, permitindo uma avaliação da aplicabilidade destas ferramentas.

Finalizando, no último capítulo são apresentadas as considerações finais com as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A exposição aos campos elétricos e as descargas eletrostáticas decorrentes desta exposição são a temática central desta dissertação. Para compreender melhor estes fenômenos e atuar sobre eles precisa-se antes estudar os conceitos básicos de eletromagnetismo correlacionados, descritos por Hayt [1983].

Para estabelecer uma base de conhecimento, empreenderam-se pesquisas em literatura específica sobre os efeitos e a interação dos campos elétricos com o corpo humano, uma vez que, a teoria e conceituações apresentadas neste capítulo suportam, de maneira geral, todos os demais capítulos.

A proposta deste capítulo visa apresentar a terminologia e definições associadas a campos eletromagnéticos e a caracterização da indução provocada em pessoas e objetos metálicos. Investiga-se o processo de formação de descargas eletrostáticas e as principais grandezas envolvidas, essenciais para modelar as situações típicas de trabalho em subestações. Caracterizada a indução, em seguida é apresentada a metodologia de cálculo das correntes e tensões induzidas.

Considerando uma perspectiva cada vez maior de uso, é feita uma descrição do princípio de funcionamento dos medidores de campo elétrico e os procedimentos recomendados para medição baseados nas normas do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [2008] e NBR 15415 [2006]. Os limites de referência usados para avaliação dos campos são os apresentados no guia da *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) [1998] e na norma IEEE [2002].

2.1 Conceituação básica

Para uniformizar o desenvolvimento desta dissertação, é necessário instituir uma

terminologia e as definições das grandezas de interesse utilizadas ao longo deste trabalho.

O objeto de estudo são os efeitos ocupacionais de campos elétricos alternados de 60 Hz no corpo humano, que são os efeitos nos trabalhadores, quando executando tarefas sob exposição a estes campos, conforme caracterizado pelo guia ICNIRP [1998]. Os campos eletromagnéticos desta ordem de frequências são os chamados campos *Extremely Low Frequency* (ELF) ou em sua tradução: campos de frequência extremamente baixa.

A rigor, campos eletromagnéticos de 60 Hz são campos acoplados, porém, para efeitos do desenvolvimento deste trabalho foram considerados desacoplados o campo elétrico do campo magnético e a análise focada nos efeitos apenas do **campo elétrico** conforme metodologia proposta pelo *Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension* (CIGRÉ) [1980]. O campo elétrico está associado somente com presença de cargas elétricas, enquanto os campos magnéticos são resultados do movimento físico de cargas elétricas (corrente elétrica).

Campos elétricos alternados de 60 Hz, ou de frequência industrial, são considerados quase-estáticos pelo CIGRÉ [1980] e seus efeitos, apesar de não serem estritamente estáticos, para fins de simplificação, são considerados como tal e ratificados por Poljak e Peratta [2006], evidentemente levando-se em conta os efeitos da corrente alternada.

O termo “*spark discharges*” ou centelhamentos numa tradução livre foi definido no âmbito desta dissertação como **descarga eletrostática**, por fazer uma associação mais clara com o fenômeno e passando a ser adotada até o final do documento.

Para ficar mais claro, as “*spark discharges*” ou centelhamentos, são sustentados pelo campo elétrico variante no tempo, provocando os efeitos repetitivos das descargas, conforme teoria apresentada pelo CIGRÉ [1980] e experimentos realizados e descritos por Deno e Zaffanella [1987] e Reilly e Larkin [1987].

O mecanismo de acoplamento entre campo elétrico e o corpo humano foi considerado tipicamente capacitivo segundo os autores acima relacionados, exceto para os casos de toque em objeto carregados por indução, em que o efeito é indireto e o acoplamento é também resistivo.

A figura 2.1, adaptada de Hamnerius [2007], mostra de forma simplificada como uma pessoa exposta a um campo elétrico tem uma diferença de potencial estabelecida pelo acoplamento capacitivo com uma fonte de alta tensão e faz contato, acoplamento resistivo, com partes metálicas flutuantes estabelecendo a circulação de uma corrente.

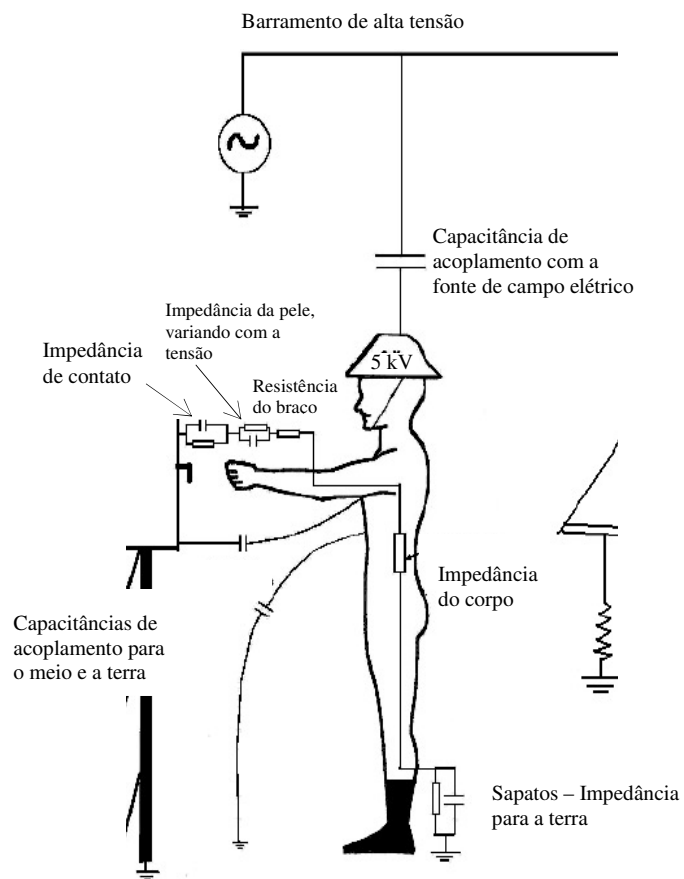


FIGURA 2.1 – Acoplamentos do corpo sob exposição ao campo elétrico
Fonte: adaptado de Hamnerius, Y. [2007]

2.2 Terminologia associada a campos elétricos e magnéticos

2.2.1 Campo elétrico

Campos elétricos são sempre produzidos pela presença de cargas elétricas. O campo elétrico é a expressão destas cargas a uma determinada distância, segundo a Lei de Coulomb apresentada por Hayt [1983]. No caso de instalações de alta-tensão as cargas aparecem na superfície dos condutores quando são energizados com uma tensão.

O campo elétrico em um ponto qualquer do espaço representa a força, em magnitude e direção, que pode ser aplicada à uma carga unitária positiva localizada naquele ponto. Sua unidade é V/m (volt por metro).

2.2.2 Campo magnético

A densidade de fluxo magnético, definida pelo CIGRÉ [1980] e por Deno; Zaffanella [1987] como \vec{B} , tanto quanto a intensidade de campo magnético ($\vec{H} = \vec{B}/\mu$) é usada para descrever o campo magnético gerado pelas correntes nos condutores das linhas de transmissão ou de barramentos de subestações.

Assim, o campo magnético é definido como um vetor de campo da densidade de fluxo magnético (campo \vec{B}). As magnitudes das componentes espaciais são expressas pelos seus valores rms.

No Sistema Internacional (SI) sua unidade é o tesla (T), que é um weber por metro quadrado (Wb/m^2). É comum também o uso da unidade gauss (G). A ordem de grandezas usuais para estes campos, no ambiente de subestações de alta tensão, são o μT e o mG , cuja relação é: $1 \mu\text{T} = 10 \text{mG}$.

2.2.3 Componente vertical de um campo elétrico

A componente vertical de um campo elétrico (sob um barramento de uma subestação, por exemplo) é o valor rms da componente do campo elétrico ao longo da linha vertical que passa através do ponto de medição. Esta medida é freqüentemente usada para caracterizar efeitos de indução em objetos próximos ao nível do solo, conforme Deno; Zaffanella [1987], NBR 15415 [2006], Deno [1975] e CIGRÉ [1980].

2.2.4 Campo elétrico não-perturbado

O campo elétrico nas imediações de um objeto pode ser perturbado pela sua presença. Campo não-perturbado é o campo presente quando o objeto é retirado. Devido ao fato de que o campo elétrico próximo ou na superfície de um objeto (introduzido no campo) é geralmente fortemente perturbado, o valor do campo elétrico não-perturbado é definido nas normas NBR 15415 [2006] e IEEE [2008] e usado para caracterizar a intensidade do campo elétrico das subestações.

A figura 2.2 ilustra a situação de campo elétrico não-perturbado.

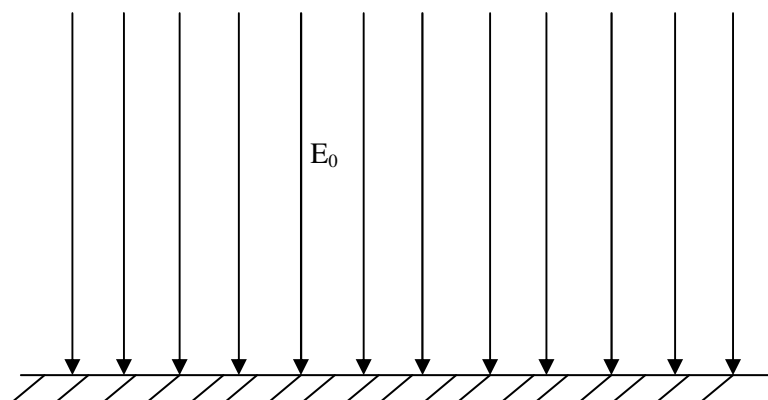


FIGURA 2.2 – Campo elétrico uniforme E_0
Fonte: adaptado de CIGRÉ [1980]

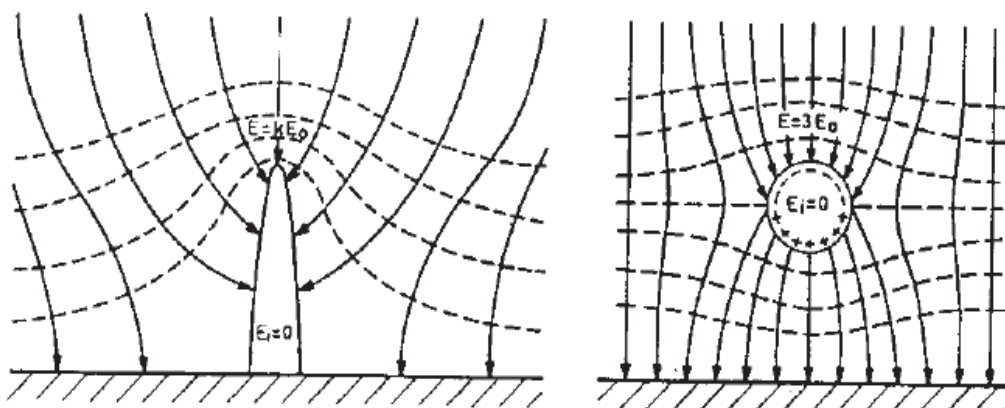
2.2.5 Campo (elétrico ou magnético) uniforme

Uma região tem um campo uniforme se, em todos os pontos dessa região, a magnitude e direção do campo são constantes.

2.2.6 Campo elétrico perturbado

O campo elétrico nas imediações de um objeto pode ser perturbado pela sua presença tornando o campo perturbado. O campo uniforme sofre modificações na sua distribuição acompanhando o raio de curvatura do objeto perturbador [CIGRÉ, 1980].

As figuras 2.3.a e 2.3.b ilustram respectivamente as situações de campo elétrico perturbado com um objeto no solo e perturbado por um objeto metálico flutuando. O campo interno ao objeto E_i é nulo para objetos não isolantes e o campo perturbado E pode ser até três vezes maior do que o campo uniforme E_0 inicialmente estabelecido antes da introdução do “objeto perturbador”.



a) objeto no solo

b) objeto flutuando

FIGURA 2.3a – Campo elétrico perturbado por objeto condutor no solo

FIGURA 2.3b – Campo elétrico perturbado por objeto condutor flutuando

Fonte: CIGRÉ [1980]

2.2.7 Elipse de campo e máximo valor de campo

A elipse de campo representa a variação do campo elétrico gerado por uma fonte trifásica, por exemplo, no meio do vão de uma linha de transmissão trifásica de alta-tensão. A figura 2.4, obtida da norma IEEE [2008], apresenta os valores máximos de um campo elétrico resultante gerado pelas tensões variantes no tempo de uma linha de transmissão trifásica.

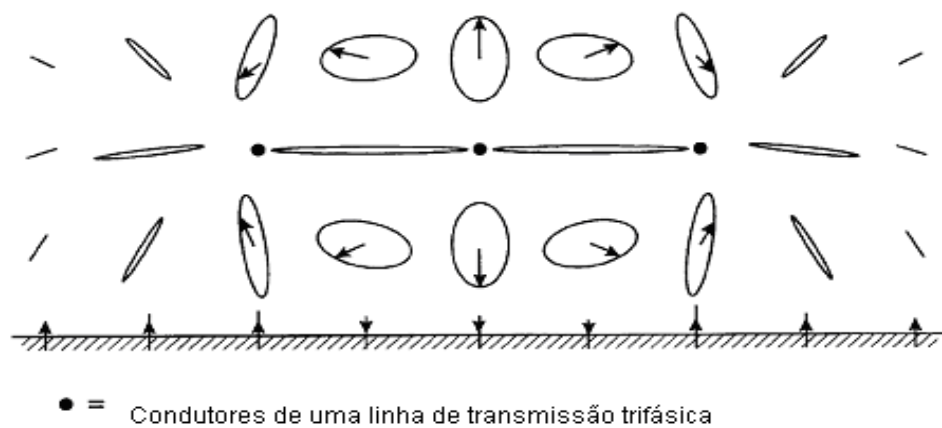


FIGURA 2.4 – Elipse de campo elétrico próxima à linha de transmissão
Fonte: IEEE [2008]

O campo elétrico resultante gerado no meio de vão de uma linha de transmissão (LT), tal como ilustrado na figura 2.4, pode ser decomposto em duas componentes E_x e E_y (vertical e horizontal) e expresso em notação complexa como proposto na brochura técnica do CIGRÉ [1980]:

$$\begin{cases} E_y = a + jb \\ E_x = c + jd \end{cases} \quad (2.1)$$

Se expressa como função do tempo, pode ser escrito como:

$$\begin{cases} E_y = a \cos \omega t + b \sin \omega t \\ E_x = c \cos \omega t + d \sin \omega t \end{cases} \quad (2.2)$$

Pode-se ver imediatamente que se a condição:

$$ad - bc = 0$$

é satisfeita, então o vetor de campo tem uma única e bem definida direção. Se não, o campo é elíptico. Em seguida, os parâmetros da elipse de campo podem ser calculados: módulo e inclinação do maior e menor eixos, de acordo com a figura 2.5.

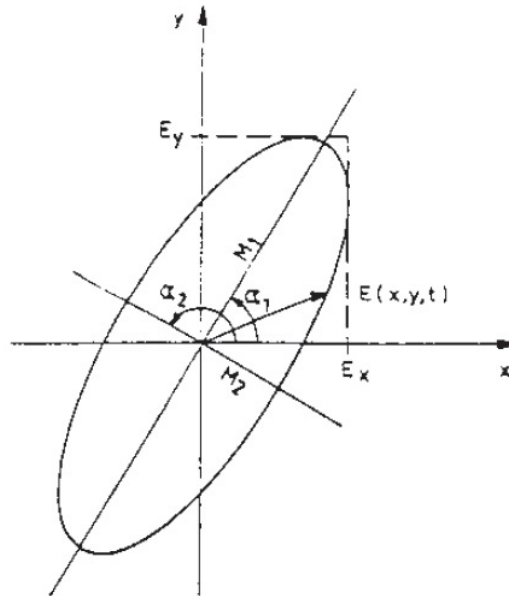


FIGURA 2.5 – Representação vetorial de campo elíptico
 Fonte: CIGRÉ [1980]

O módulo M pode ser calculado das componentes da equação 2.3 e derivado para obter seu valor máximo.

$$M^2 = E_x^2 + E_y^2 \tag{2.3}$$

Desenvolvendo a expressão, obtemos os ângulos α_1 e α_2

$$\tan \alpha_1, \tan \alpha_2 = \frac{a + bp}{c + dp} \tag{2.4}$$

Onde:

$$p = \frac{k \pm \sqrt{k^2 + 4}}{2} \tag{2.5}$$

E

$$k = \frac{(b^2 + d^2) - (a^2 + c^2)}{(ab + cd)} \quad (2.6)$$

Obtendo então os módulos dos eixos maior e menor:

$$M_1, \quad M_2 = \left\{ \frac{1}{1 + p^2} [(a^2 + c^2)p^2 + (b^2 + d^2) + 2(ab + cd)p] \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

Vale observar que o vetor M gira no tempo, passando ora M_1 ora M_2 . A relação entre os ângulos α_1 e α_2 é:

$$\alpha_1 + \frac{\pi}{2} = \alpha_2 \quad (2.8)$$

2.2.8 Campo elétrico monofásico e trifásico

Um campo elétrico monofásico é gerado por uma fonte monofásica de tensão. Todas as componentes do campo estão em fase. O campo elétrico monofásico em qualquer ponto pode ser descrito em termos de sua variação no tempo e é invariável com a sua direção.

Sistemas trifásicos geram campos trifásicos, que não estão em fase. O campo trifásico é descrito pela elipse de campo (figura 2.4), isto é, pela magnitude e pela direção do maior e do menor eixo.

Quando o menor semi-eixo é muito menor que o maior semi-eixo, ou seja, abaixo de 10% deste, o campo elétrico trifásico pode praticamente ser considerado monofásico. Isso ocorre, por exemplo, nas proximidades de regiões de contorno, tais como o solo.

2.3 Descargas eletrostáticas

As descargas eletrostáticas ocorrem quando dois objetos com diferentes potenciais se aproximam o suficiente para que um arco elétrico se estabeleça no espaçamento entre eles.

Conforme o guia do CIGRÉ [1980] a descarga eletrostática provocada pela exposição a campos elétricos quase-estáticos pode ser analisada com as bases da eletrostática convencional, principalmente no caso de interesse que é a fase disruptiva da descarga.

As descargas eletrostáticas induzidas por campos elétricos alternados consistem de duas fases:

1. acúmulo relativamente rápido de cargas nos objetos, que se comportam como capacitância da ordem de centenas de pF (picoFarad) resultando numa diferença de potencial;
2. rápida transferência de cargas, quando os objetos se aproximam o suficiente para ocorrer a ruptura no ar e resultando num pulso de corrente de baixa energia, porém de valor de pico elevado.

A descarga eletrostática é sentida de maneira bem desagradável pelas pessoas devido ao fato de que no ponto onde ocorre a ruptura a densidade de corrente é muito elevada: da ordem de 10 A/mm^2 [CIGRÉ, 1980].

O potencial de um objeto isolado da terra e imerso num campo elétrico, tal qual o da Figura 2.2.b, é expresso por $v = \sqrt{2}V_0 \cos \omega t$ ou $v = \sqrt{2}V_m \cos \omega t$, dependendo das condições da isolação ou da resistência de fuga Z_f . Em ambos os casos designa-se o valor de pico por V_{max} . O circuito equivalente é apresentado na figura 2.6.

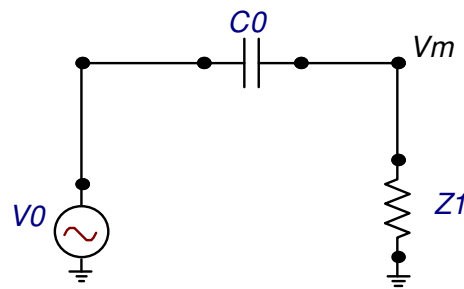
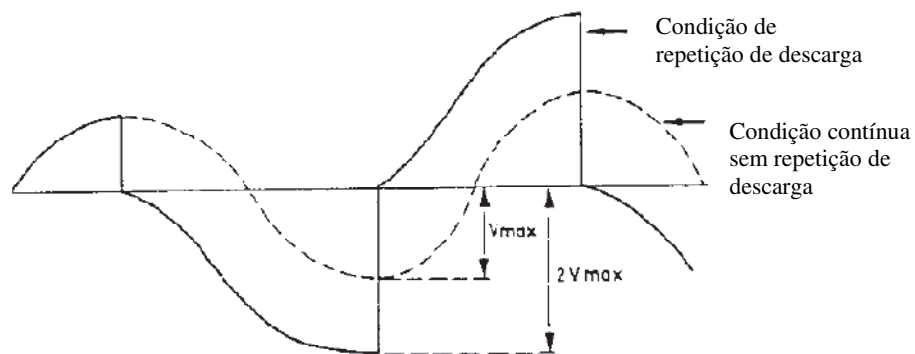


FIGURA 2.6 – Circuito equivalente de objeto exposto ao campo elétrico

Pode-se supor que por uma razão qualquer ocorra um arco para terra no momento da máxima tensão. A capacitância C_0 do objeto descarrega e o potencial cai a zero. Se a rigidez dielétrica do espaço de ar (*gap*) se recompõe imediatamente após a descarga, o potencial pode atingir $2 V_{max}$ no próximo semi-ciclo, como pode ser visto na figura 2.7.

FIGURA 2.7 – Condição limite de disrupção e descargas a cada semi-ciclo
Fonte: CIGRÉ [1980]

Isto é o que ocorre quando o *gap* está no limiar de disrupção: tem-se uma condição de contínua relaxação, na qual a capacitância C_0 carrega-se com até $\pm 2 V_{max}$ e se descarrega a cada semi-ciclo.

Por outro lado, se o espaço de ar é tal que a tensão de disrupção é menor do que V_{max} , uma condição de relaxação rápida pode existir como mostrada na figura 2.8, onde muitas descargas seguidas ocorrem durante cada ciclo.

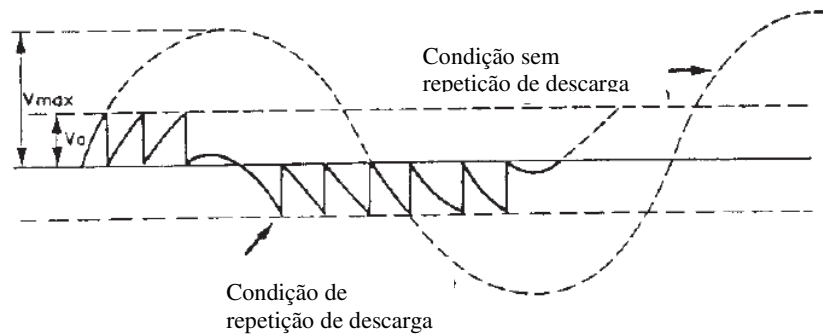


FIGURA 2.8 – Condição de disrupção e série de descargas num ciclo
 Fonte: CIGRÉ [1980]

Se V_0 é a tensão de disrupção, o número aproximado de reignições (descargas) n por ciclo é dado por:

$$n = \frac{4 V_m}{V_0} \quad (2.9)$$

Finalmente, se o potencial do objeto isolado, antes da aproximação e da ocorrência da descarga é muito baixo para causar a disrupção, uma simples descarga transitória será observada, como apresentada na figura 2.9. A intensidade desta descarga dependerá do valor instantâneo do potencial, quando o contato firme e rápido for estabelecido.

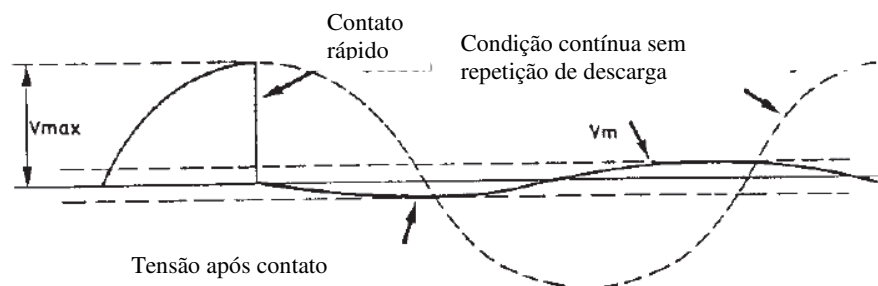


FIGURA 2.9 – Condição sem disrupção com contato rápido
 Fonte: CIGRÉ [1980]

Nesta condição há o estabelecimento de uma corrente em regime permanente de baixo valor, enquanto o contato for mantido e houver exposição ao campo elétrico.

2.3.1 Correntes e tensões induzidas por descargas eletrostáticas

Em subestações ou sob linhas de transmissão, as descargas eletrostáticas (*spark discharges*) ocorrem entre uma pessoa e um objeto metálico isolado ou aterrado. Descargas associadas a campo estático, típicas de quando se anda sobre um carpete e se toca um armário metálico são usualmente **não** repetitivas. Entretanto, em campos elétricos alternados de 60 Hz, tais como os encontrados em subestações de alta-tensão, elas podem ser repetitivas devido ao recarregamento dos corpos. Esta repetição é sustentada enquanto a distância mínima para o arco elétrico for mantida e houver a exposição ao campo elétrico.

Boa parte da formulação hoje disponível na literatura é voltada para linhas de transmissão. Tais modelos não podem ser replicados de forma simples para o ambiente das subestações, pois o arranjo físico destas é bem mais complexo. O cálculo das correntes e tensões induzidas pelo campo elétrico num objeto, seja ele objeto metálico ou uma pessoa, é complicado. O cálculo da corrente induzida em um objeto no solo por efeito de campo elétrico, a rigor envolve a solução de um problema tridimensional de cálculo de campo.

Deno [1975] avalia que estes cálculos podem ser consideravelmente simplificados se:

- § a fonte da indução for representada por um campo induzido não perturbado para objetos próximos do nível do solo;
- § o solo for uniforme e regular podendo ser considerado como um condutor elétrico perfeito, permitindo a utilização do método das imagens;
- § o efeito da presença do objeto exposto ao campo elétrico, quase não deforma a distribuição superficial de cargas no condutor (fonte do campo), podendo ser desprezado¹.

¹ Considera-se que para maior parte dos casos de interesse o comprimento do condutor da linha de transmissão ou barramento de subestação, fonte do campo elétrico, tem um comprimento muito maior do que a maior das dimensões do objeto exposto a este campo. [CIGRÉ, 1980].

Sob estas condições, a indução num objeto metálico passa a depender de sua geometria e do campo onde ele está localizado.

A corrente induzida em objetos próximos ao solo pode ser expressa como:

$$I_{CC} = j \omega \varepsilon ES \quad (2.10)$$

Onde:

I_{CC} : é a corrente em A a que pode fluir num circuito fechado entre o objeto e a terra;

$\omega=2\pi f$: velocidade angular, onde f é a frequência industrial em [Hz];

E : é a componente vertical do campo elétrico não perturbado no nível do solo [kV/m];

S : é a área coletora de carga equivalente do objeto em m^2 ;

ε : permissividade ou constante dielétrica do ar igual 8.854×10^{-12} F/m

Deno e Zaffanella [1987] e Deno [1975] propõem métodos de cálculos para as formas de objetos metálicos mais complexos, que são tratados como composições de forma básicas.

2.3.2 Corrente e tensão induzidas em objetos metálicos

A indução de campo elétrico em objetos próximos a condutores energizados em alta tensão, à frequência industrial, pode ser caracterizada pelos seguintes parâmetros [DENO e ZAFFANELLA, 1987; DENO, 1975]:

- § a corrente de curto circuito, I_{CC} , obtida da equação 2.3, que é o valor rms da corrente induzida em uma conexão de impedância zero para a terra;
- § o valor rms da tensão induzida entre o objeto e a terra, V_{OT} , que depende do isolamento entre o objeto e a terra;
- § a impedância entre o objeto e a terra;

$$Z_{OT} = V_{OT} / I_{CC}. \quad (2.11)$$

§ a capacitância do objeto para a terra, C_{OT} .

A indução em objetos metálicos pode ser estudada no caso básico da esfera isolada do solo, a uma altura muito maior do que o raio da esfera

A figura 2.10 ilustra uma esfera metálica sobre o solo e ligada à terra.

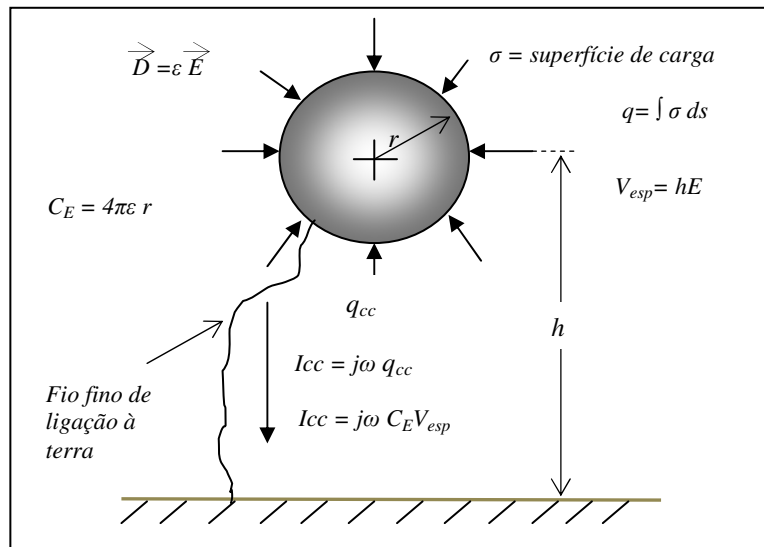


FIGURA 2.10 – Esfera acima do solo e aterrada
 Fonte: adaptada de Deno [1975]

A indução eletrostática é proporcional ao potencial espacial elétrico, V_{esp} , o qual pode ser usualmente aproximado por:

$$V_{esp} \approx h \cdot E \tag{2.12}$$

Se o objeto for aterrado, a corrente de curto circuito pode ser definida como:

$$I_{CC} = j\omega C_E \cdot V_{esp} \tag{2.13}$$

que é a admitância multiplicada pelo potencial espacial V_{esp} .

Para os casos em que $h \gg r$, $S = h4\pi r$.

Assim, substituindo a equação 2.12 na equação 2.13 e rearranjando-as, temos:

$$I_{CC} = j\omega \varepsilon E. (h C_E / \varepsilon) \quad (2.14)$$

O termo entre parêntesis é a superfície coletora de carga S ; e C_E é a capacitância espacial; e assim retornamos à equação de I_{CC} , numa forma já conhecida:

$$I_{CC} = j\omega \varepsilon E S \quad (2.15)$$

A conclusão importante é a simplificação do procedimento de cálculo para área coletora equivalente da esfera. Para objetos de formas complexas, pode ser conveniente usar o raio estimado da esfera equivalente.

2.3.3 Corrente e tensão induzidas em pessoas

As descargas eletrostáticas no ambiente das subestações, tipicamente ocorrem entre pessoa e algum objeto aterrado. Eventualmente podem ocorrer descargas entre pessoas e também entre pessoa e algum objeto metálico não aterrado. Este objeto metálico, por exemplo, um veículo ou partes metálicas de disjuntor, não aterrado (ou isolado), pode ser capaz de estabelecer uma diferença de potencial em relação ao terra e conseqüentemente em relação à pessoa. A situação mais severa é aquela em que a pessoa está em contato com o terra e toca no objeto com potencial flutuante.

O cálculo da tensão e correntes induzidas em objetos metálicos foi descrito no item anterior, agora se torna importante equacionar como a pessoa se carrega, criando uma diferença de potencial em relação ao objeto aterrado.

A descarga eletrostática entre pessoa e objeto aterrado precisa ser analisada em duas fases distintas: a **disruptiva** e a de regime **permanente**. A fase disruptiva é **determinante** no desconforto e a em regime permanente estabelece uma corrente de pequeno valor, abaixo do limiar de percepção conforme as normas IEEE [2002], ICNIRP [1998] e IEEE [2000].

No capítulo seis é apresentado e discutido um estudo teórico mais aprofundado das descargas eletrostáticas na sua fase disruptiva, bem como o seu equacionamento e simulação em termos de circuitos e aplicativos computacionais. No presente capítulo, portanto, somente é feito um estudo qualitativo da etapa disruptiva e uma formulação simplificada da sua fase em regime permanente.

2.3.3.1 Fase disruptiva da descarga

Deno e Zaffanella [1987], Reilly e Larkin [1987], Deno [1975] e CIGRÉ [1980] definem descargas elétricas por efeito de indução de campos elétricos de corrente pelos seguintes parâmetros:

- § valor de pico da corrente;
- § forma de onda da corrente;
- § taxa de crescimento da corrente;
- § taxa de repetição dos transitórios de corrente;
- § taxa de aproximação, ou velocidade de aproximação, entre os objetos.

Estes parâmetros dependem do modo como é estabelecido o contato e do valor da resistência do circuito de descarga. Considerando-se um mesmo modo de contato e um mesmo valor de resistência, o valor do transitório de corrente depende do valor de tensão existente no espaçamento, no momento imediatamente antes do arco, e da capacitância entre corpo e terra que é descarregada por este circuito. O valor instantâneo da tensão no momento exato da descarga é difícil de ser determinado.

Hendrikx [2000] propõe forma de onda normalizada para as descargas eletrostáticas de fenômenos estáticos. De acordo com metodologia do CIGRÉ [1980] a fase inicial da descarga ou disrupção pode ser analisada utilizando os conceitos da eletrostática convencional. A figura 2.11 ilustra uma forma de onda típica e seus principais parâmetros.

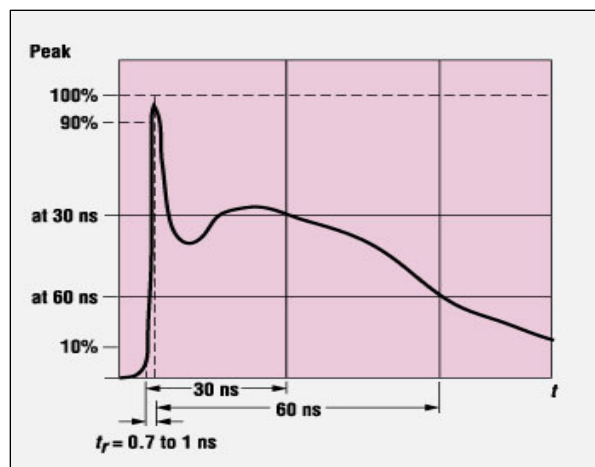


FIGURA 2.11 – Forma de onda normalizada para descarga eletrostática
Fonte: Hendrikx, J. [2000]

O tempo de crescimento do pulso t_c é de 0,7 a 1 ns; tempo necessário para a corrente variar de 0 a 90% do valor de pico. Os valores da corrente de descarga a 30 ns e 60 ns são referenciais para se avaliar a energia do pulso a 40% e 25% do valor de pico respectivamente e que ainda apresentam valores significativos na cauda da onda. A forma de onda do pulso mostra que há um pico de corrente caracterizando a disrupção no ar e em seguida a corrente é amortecida pela impedância típica do corpo humano.

J. Hendrikx [2000] sugere um circuito e parâmetros típicos para modelagem do corpo humano que é explorado em detalhes nas simulações do capítulo seis, usando *ATPDraw*TM. [PRIKLER; HØIDALEN, 2002].

2.3.3.2 Fase em regime permanente da descarga

A tensão da pessoa para a terra ou tensão de circuito aberto, V_{CA} , depende do valor do campo elétrico ao qual está exposta, da posição da pessoa e de sua impedância para a terra.

As medições feitas por Deno [1975] e Deno e Zaffanella [1987] em diferentes pessoas e condições demonstraram que:

- § Para uma pessoa em pé isolada do solo (numa plataforma isolada ou numa área britada seca), $V_{CA}/E_0 = 0,18 \text{ m a } 0,42 \text{ m}$, com um valor médio de 0,27 m. Esta correlação é válida para valores típicos de campo elétrico (2 a 15 kV/m) e tensões entre pessoa e terra (900 a 5000 V) encontrados em subestações de alta tensão;
- § No caso em que a pessoa esteja perfeitamente isolada, a tensão de circuito aberto V_{CA} , é dada por:

$$V_{CA} = I_{CC}/\omega C_{PT} \tag{2.16}$$

onde C_{PT} – Capacitância pessoa-terra é obtida no gráfico da figura 2.4, e I_{CC} é calculada de acordo com a equação 2.12.

Para uma pessoa usando calçados e andando em solo condutivo (solo molhado ou grama), $V_{CA}/E_0 = 0 \text{ a } 0,3 \text{ m}$, dependendo da qualidade de isolamento do calçado.

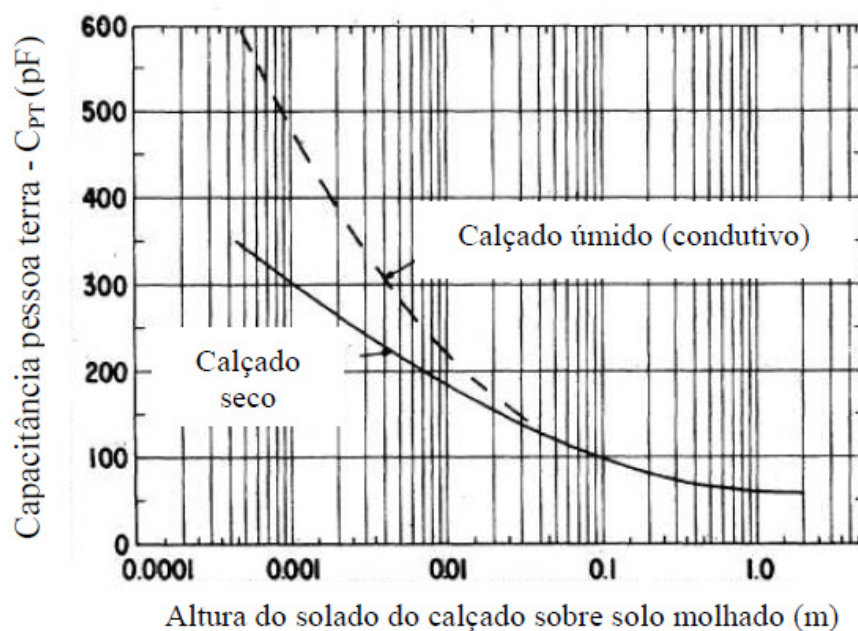


FIGURA 2.12 – Capacitância pessoa-terra em função da altura da sola do sapato
 Fonte: adaptado de Deno [1974]

A corrente de curto circuito pode ser calculada a partir do valor medido do campo elétrico, a um metro do nível do solo, segundo Deno [1975] e Deno e Zaffanella [1987] por:

$$I_{CC} = j\omega\varepsilon E.S \quad (2.17)$$

Onde:

I_{CC} : é a corrente que pode fluir num circuito fechado entre pessoa e a terra;

$\omega=2\pi f$ onde f é a frequência industrial;

E : componente vertical do campo elétrico não perturbado no nível do solo e

S : área coletora de carga equivalente da pessoa.

Deno [1975] e Deno e Zaffanella [1987] propõem que a área coletora de carga da pessoa, S , seja calculada pela área equivalente do modelo da esfera, onde $S= h 4\pi r$, utilizando um raio aproximado de $r = 0,54 m$ para uma pessoa com $h=1,75 m$ (massa de 70 kg).

Ainda conforme os mesmo autores citados acima, a corrente de curto pode ser obtida pela seguinte formulação empírica:

$$I_{CC} = 5,4.10^{-9} h^2 E \quad (2.18)$$

A equação 2.18, cujos termos já foram definidos anteriormente, apresenta resultados bem aproximados e que simplifica o processo por ser necessário apenas medir a altura h da pessoa. No capítulo seis faz-se uma comparação de correntes I_{CC} medidas e os resultados obtidos calculados pela equação 2.18.

2.4 Métodos de cálculo de distribuição de campos elétricos

Os cálculos de campo elétrico em arranjos com geometria simples podem usar os métodos convencionais da eletrostática, com resultados satisfatórios. Para arranjos mais complexos tais como os de subestações de alta-tensão são necessários o uso de métodos mais elaborados para o cálculo de potenciais e da intensidade e distribuição de campos elétricos.

Poljak e Peratta [2006] afirmam que os métodos analíticos ou numéricos comumente usados são:

- § Método analítico – Cargas equivalentes;
- § Métodos dos elementos finitos, - (Finite Elements Method) - FEM;
- § Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo – DFTD;
- § Métodos dos Elementos de Contorno (Boundary Element Method) - BEM;
- § Método de Simulação de Cargas (Charge Simulation Method) – CSM.

A escolha do método depende do tipo de problema a ser resolvido. O método analítico é usado naturalmente quando é necessário calcular o gradiente de potencial perto do solo embaixo de linhas de transmissão ou em subestações.

A modelagem computacional encontrada na literatura é feita, na maioria dos casos com aplicativos computacionais restritos, desenvolvidos para estudos específicos. Estes aplicativos são elaborados utilizando-se métodos numéricos.

Yildirim e Kalenderli [2003] propõem um programa baseado no Método de Simulação de Cargas (CSM). Seu modelo humano para simular a exposição a linhas de transmissão utiliza combinação de cilindros e esferas. O modelo tridimensional apresenta bons resultados e permite avaliação da densidade de corrente em diferentes partes do corpo. Ainda conforme os autores referenciados acima, os valores simulados para uma linha de transmissão real foram comparados com os limites de segurança e avaliados como consistentes.

Okoniewska, Stuchly e Okoniewski [2004] apresentam um sofisticado modelo obtido de uma varredura tridimensional do corpo humano por ressonância magnética que é aplicado em um programa usando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (DFTD). Este procedimento analisa as taxas de absorção e foi simulado para análise de descargas eletrostáticas em frequências mais altas, da ordem de MHz a GHz.

Poljak e Peratta [2006] apresentam um modelo de objeto de revolução para representar o corpo humano que é simulado em um programa usando o Método dos

Elementos de Contorno (BEM). É aplicável aos campos elétricos quase-estáticos e de grande validade para analisar, como demonstrado no estudo, as densidades de corrente nas diversas partes do corpo humano na exposição a estes campos.

O *QuickField*TM [HUANG *et al.*, 1997], programa utilizado no desenvolvimento desta dissertação, apesar de oferecer poucos recursos na elaboração de desenhos, apresenta resultados satisfatórios para modelagens eletrostáticas bidimensionais. É descrito com mais detalhes no capítulo seis desta dissertação e é um aplicativo de uso mais difundido e acesso facilitado, inclusive com versão (limitada) gratuita disponível.

2.4.1 Método das cargas equivalentes

Este método, proposto na brochura técnica do CIGRÉ [1980], é baseado na teoria das cargas imagens da eletrostática básica, segundo a qual a superfície de cargas de um contorno fechado de um condutor pode ser substituída pelas cargas internas. Adequadamente dispostas, estas cargas geram um sistema de linhas de força e de linhas equipotenciais que ficam inalteradas fora do contorno.

De acordo com a geometria do problema, podem ser representados não somente pontos, mas também linhas de cargas ou anéis de cargas (toróides ou esferas). Quanto maior o número de cargas equivalentes, maior é a exatidão com que o contorno pode ser representado.

O potencial V em um ponto p do espaço, $V_{(p)}$ pode ser expresso por:

$$V_{(p)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i} \quad (2.19)$$

O campo elétrico E em um ponto p do espaço, $E_{(p)}$, pode ser expresso por:

$$\vec{E}_{(p)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \vec{r}_i}{r_i^3} \quad (2.20)$$

Onde:

Q_i : carga equivalente inserida

r_i : distância entre a carga Q_i e o ponto p em questão.

ϵ_0 : permissividade elétrica do vácuo, $8,854 \times 10^{-12}$ [F/m] Farad/metro

Deno e Zaffanella [1987], Deno [1975] e Deno [1974] apresentam metodologia e exemplos detalhados de cálculo de campos elétricos ao nível do solo para linhas de transmissão, já a brochura técnica do CIGRÉ [1980] apresenta metodologia para cálculo e exemplos de cálculos para arranjos simples de barramentos em subestações de alta-tensão.

2.5 – Medições de campos elétricos

Nos últimos anos a disseminação do uso do telefone celular, dentre outros fatores, vem suscitando muitos questionamentos e despertando uma preocupação crescente com a exposição a campos eletromagnéticos. No âmbito do setor elétrico a preocupação dos trabalhadores com a exposição é ainda maior. Nota-se que a preocupação decorre principalmente do medo e do desconhecimento dos reais efeitos dos campos eletromagnéticos.

A medição de campo elétrico vem sendo utilizada pelas concessionárias para avaliar níveis de exposição pública em linhas de transmissão e também para identificar prováveis causas de campos atipicamente elevados em subestações associados a queixas recorrentes de descargas eletrostáticas por parte dos trabalhadores. A avaliação e divulgação dos valores de campos encontrados e palestras de esclarecimentos sobre campos eletromagnéticos e seus efeitos tem se mostrado uma boa estratégia das concessionárias junto aos trabalhadores e a população.

A maioria das subestações do sistema elétrico foi projetada há mais de 25 anos, na época em que ainda não havia limites claramente estabelecidos de exposição ao

campo elétrico e nem ferramentas computacionais para se avaliar intensidade de campo de determinado arranjo na sua fase de projeto. A medição de campo elétrico nas subestações existentes pode ser uma ferramenta importante para subsidiar soluções otimizadas de arranjos em novos projetos, com foco na redução da exposição ocupacional.

O valor do campo elétrico medido no nível do solo, em subestações, é um parâmetro usual para caracterizar a intensidade de seus efeitos no corpo humano. Os campos elétricos sobre as estruturas de fixação são fortemente não-uniformes. Em geral, todas as estruturas metálicas blindam o campo no mesmo nível do solo, ou seja, o potencial de terra se eleva até a altura das estruturas metálicas, provocando uma compressão das equipotenciais.

2.5.1 Técnicas de medição do campo elétrico não-perturbado

Nas medições de campo elétrico, procura-se obter o valor mais próximo possível do valor do campo não-perturbado, definido como E_0 . Esse campo, quando medido sem a presença do objeto (no estudo em questão, a pessoa), é considerado uniforme.

O procedimento definido pelas normas IEEE - Std1460TM [2008] e IEEE – Std644 [2008] para a medição do campo elétrico consiste em manter o medidor a uma altura de um metro do solo e a uma distância de pelo menos dois metros do operador.

A precisão usual das medições realizadas em ambiente externo é próxima dos 10%, mas, sob condições controladas, essa precisão pode ser menor que 5%. As condições controladas durante a medição são temperatura, umidade relativa do ar e afastamento de objetos e pessoas que possam deformar o campo.

A norma NBR 15415 [2006] é a referência nacional sobre medições de campos eletromagnéticos: estabelece metodologia de medição de campos elétricos de 60 Hz, define terminologia e valores de referência para exposição e descreve o princípio de funcionamento de instrumentos de medição de campos.

2.5.2 Medidores de campo elétrico

O medidor de campo elétrico é ideal para medições do campo elétrico nas subestações, devido a sua portabilidade e a facilidade de operação. Com ele é possível fazer medições em qualquer lugar sobre o plano de terra e a alturas de dois metros usando tripé isolante. Ele mede a intensidade do campo elétrico numa frequência específica ou faixas predefinidas de frequências, como um filtro rejeita-faixa ou passa-faixa. Os medidores amostram o campo nos três planos (XY, YZ e ZX) e calculam o campo elétrico resultante.

Segundo a NBR 15415 [2006] existem três tipos de medidores de campo aplicáveis a medição de campo elétrico alternado:

- § medidor de espaço livre;
- § medidor de referência de terra e;
- § medidor eletro-óptico.

Será tratado apenas dos medidores de espaço livre que são os mais comuns e usuais para medições em campos elétricos (ou magnéticos) alternados.

2.5.2.1 Princípio de funcionamento de medidores de espaço livre

Instrumento que mede a intensidade do campo elétrico em um ponto acima do solo, sem um contato condutivo ligado a terra.

Podem ser de eixo único ou de três eixos, neste caso mede as componentes do campo elétrico nos três eixos ortogonais e indica também o campo resultante, conforme equação abaixo:

$$E_R = \sqrt{(E_X^2) + (E_Y^2) + (E_Z^2)} \quad (2.21)$$

Basicamente todo medidor de campo elétrico possui duas partes: a sonda (ou sensor) que é o elemento sensível ao campo e um detector que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz do campo elétrico através do mostrador.

Os modelos mais novos, tais como o usado nas medições para esta dissertação, possuem como sensor um transdutor que já processa o sinal amostrado e tem como saída um sinal ótico que é injetado no medidor digital via cabo de fibra ótica. O tripé de sustentação do medidor e o cabo de fibra ótica são especialmente projetados para não provocarem deformação no campo elétrico. O tripé é fabricado com madeira tratada, de alta rigidez dielétrica, para minimizar a corrente de fuga, e possui apenas pequenas partes metálicas para não interferir na medição. O cabo de fibra ótica tem baixa permissividade elétrica (ϵ_r) e não deforma as equipotenciais de campo elétrico.

Os sensores são comumente construídos para medir a corrente elétrica induzida entre duas partes isoladas de um corpo condutor. No caso do medidor utilizado nas medições para esta dissertação os sensores são placas paralelas, compondo-se de um cubo que mede o campo na direção de cada um dos três eixos ortogonais. Como a corrente elétrica induzida é proporcional a derivada no tempo da intensidade do campo elétrico, o circuito do detector do medidor contém normalmente um estágio integrador com a finalidade de recuperar a forma de onda original da intensidade do campo elétrico.

Usa-se, por exemplo, um amplificador integrador ou um circuito passivo integrador, ambos combinados com um voltímetro e usado como 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.

Nos medidores de espaço livre o detector, geralmente, é contido dentro ou é parte integrante da sonda. A teoria de funcionamento dos medidores de espaço livre pode ser entendida considerando um corpo condutor descarregado com eletrodos separados, introduzidos em um campo elétrico uniforme. A carga induzida é um dos eletrodos :

$$Q = \int_{S/2} \vec{D} \cdot \vec{n} dA \quad (2.22)$$

onde:

\vec{D} : deslocamento elétrico

\vec{n} : vetor unitário perpendicular à superfície do eletrodo

dA : elemento de área na metade do corpo com superfície total S

A figura 2.13 ilustra sonda de um medidor de espaço livre em forma de cubo, com as placas do eixo X . Em cada par de faces paralelas do cubo são colocadas as placas sensoras do campo naquele eixo.

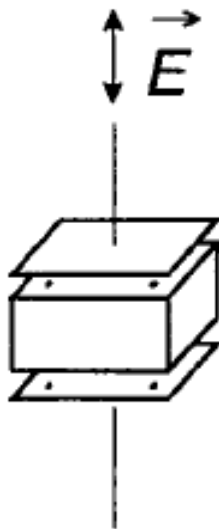


FIGURA 2.13 – Sonda em forma de cubo de medidor de espaço livre
Fonte: IEEE [2008]

Se a intensidade do campo elétrico tem uma dependência senoidal no tempo, por exemplo, $E_0 \text{ sen } \omega t$, onde ω é a frequência angular, a carga induzida oscila entre as duas partes sensoras e a corrente é dada por:

$$I = dQ/dt = k \omega \epsilon E_0 \cos \omega t \quad (2.23)$$

onde: k é uma constante de medidor de campo e é determinada pela calibração.

2.5.2.2 Características requeridas para medidores de campo elétrico

As características requeridas desejáveis propostas pela norma NBR 15415 [2006] e pelo CIGRÉ [1980] para um medidor de campo elétrico são descritas abaixo:

- § **Fonte de alimentação:** é desejável que o instrumento, incluindo o sensor, seja alimentado por baterias ou pilhas, para evitar que as interferências recebidas através dos cabos de alimentação não afetem a medição. É conveniente que os medidores alimentados por baterias tenham autonomia de pelo menos oito horas para medição de exposição em campo e possuam meio de indicação da condição de carga bateria. O nível de carga mínimo deve garantir a medição dentro dos limites de incerteza;
- § **Limites de temperatura e umidade relativa:** o instrumento deve suportar variações de temperatura de pelo menos 0 a 45 °C e de umidade relativa de 5 a 95%, como garantia de que não haverá condensação de umidade em partes isolantes internas do sensor;
- § **Incerteza:** deve indicar o valor eficaz com uma incerteza menor que 10% da leitura ± 2 V/m. Esta incerteza deve valer também para medição em um campo aproximadamente uniforme;
- § **Filtro passa-faixa:** deve ser capaz de fazer medição numa faixa selecionada ou pré-selecionada de frequência, que seja objeto da investigação de forma que não sofra interferência de campos em outras frequências;
- § **Tripé isolante:** deve provocar mínima ou nenhuma deformação no campo e evitar corrente de fuga que possa alterar a correção da medição;
- § **Medição por eixo:** deve ser capaz de efetuar a medição em cada eixo e a resultante dos três eixos amostrados;
- § **Armazenamento de dados:** deve ser capaz de armazenar as medições realizadas. Esta característica possibilita maior produtividade nas medições.

2.6 Síntese do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a terminologia e definições associadas a campos eletromagnéticos e a caracterização e metodologia de cálculo das tensões e correntes induzidas em pessoas e objetos metálicos quando expostos aos campos elétricos. Investigou-se o processo de formação de descargas eletrostáticas e as principais grandezas envolvidas, essenciais para modelar as situações típicas de trabalho em subestações.

Considerando uma perspectiva cada vez maior de uso com a implantação da NR-10 [2004], foi feita uma descrição do princípio de funcionamento dos medidores de campo elétrico, já incluindo a nova geração de medidores e procedimentos recomendados para medição, baseados nas normas pertinentes. Na parte final expôs-se uma revisão da literatura consultada, focada nas soluções e monitoramento relativos à exposição ao campo elétrico, consolidando um embasamento teórico sobre o tema.

No capítulo três as descargas são estudadas no que se refere aos efeitos fisiológicos e a sensibilidade humana ao fenômeno, caracterizando o desconforto eletrostático e apresentando os limites de exposição contextualizados ao ambiente das subestações de alta-tensão

3 CARACTERIZAÇÃO DOS EFEITOS DA INDUÇÃO POR CAMPOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES

Neste capítulo, é definido o escopo básico e a delimitação da pesquisa, focada essencialmente no campo elétrico, parâmetro de interesse sobre o qual são estudados e discutidos os efeitos ocupacionais em subestações. As descargas eletrostáticas são estudadas como um fenômeno elétrico, bem como discutido seu principal efeito que é o desconforto eletrostático.

No que se refere à segurança, é discutida a exposição às descargas e os riscos de acidentes. Dentro deste contexto, são apresentados os limites de exposição a campos eletromagnéticos, e os efeitos da corrente elétrica no corpo humano.

3.1 Escopo e delimitação da pesquisa

O escopo básico deste trabalho é o estudo das descargas eletrostáticas como efeito de campos elétricos de 60 Hz a que ficam submetidos os trabalhadores em subestações de alta tensão. Para validação do trabalho, estão incluídas no estudo análises, modelagens e simulações computacionais, ensaios e pesquisas de laboratório e medições em subestações de alta tensão. As condições de trabalho consideradas para a finalidade desta dissertação foram baseadas nos procedimentos e metodologias de execução de serviço adotadas pelas equipes de manutenção da transmissão da concessionária CEMIG – GT.

Conforme a ICNIRP [1998], em seu guia de referência, estabelece que os efeitos dos campos elétricos como parâmetros de interesse precisam ser analisados nos sintomas e efeitos na saúde **em curto prazo**. Neste sentido, são parâmetros de interesse os limites de campos elétricos e correntes induzidas capazes de provocar **efeitos desagradáveis e dolorosos** no corpo humano.

3.2 Caracterização das descargas eletrostáticas em subestações

O trabalho em subestações de alta tensão normalmente é realizado com os equipamentos desligados. Todavia, devido à permanência de circuitos energizados nas adjacências e acima desse espaço físico delimitado de trabalho, o campo elétrico nas proximidades é relativamente elevado quando comparado com os limites de referência propostos pelo IEEE [2002] e pelo ICNIRP [1998], com valores medidos acima de 15 kV/m, e provoca descargas eletrostáticas por tensões induzidas nos trabalhadores.

Os serviços realizados em subestações de alta tensão envolvem tarefas de risco e exposição a campos elétricos elevados. Tomemos como exemplo serviços de manutenção em um disjuntor de uma subestação com tensão de 500 kV. O posicionamento físico dos trabalhadores realizando a tarefa pode ser observado na Figura 3.1.

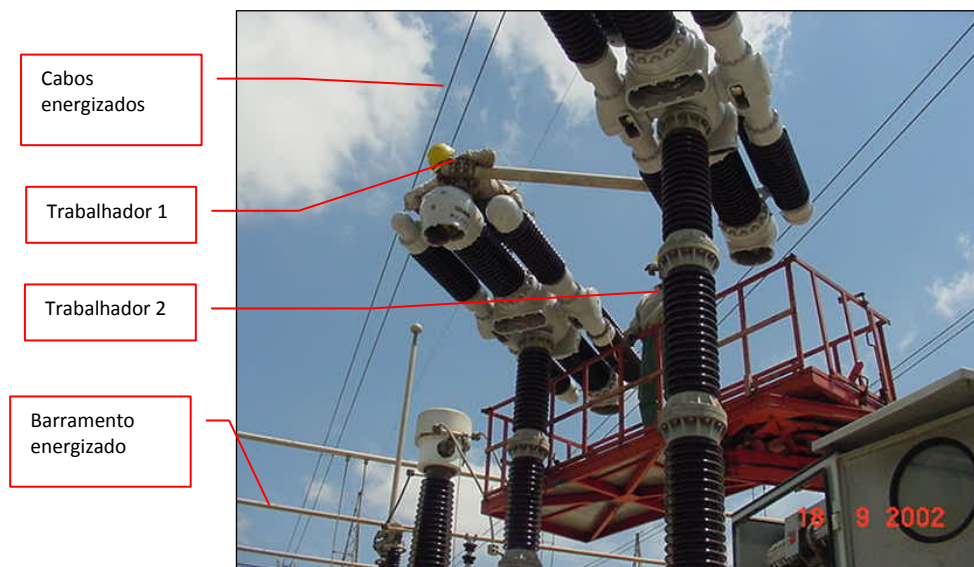


FIGURA 3.1 Trabalhos de manutenção em subestações

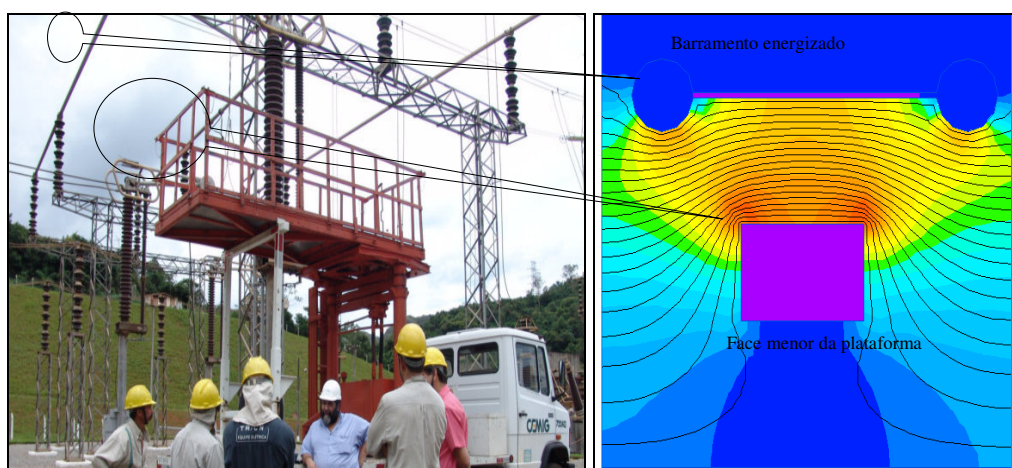
Na figura acima podemos identificar um barramento de 500 kV energizado, canto inferior esquerdo da figura e cabos de chegada interligação no arranjo da subestação, também energizados, cortando a imagem em três regiões distintas, acima das cabeças dos disjuntores. Pode-se observar que, com a utilização de

plataforma elevatória, há uma aproximação significativa, em torno de quatro metros, dos trabalhadores das partes energizadas. A elevação do plano de trabalho, com a utilização de plataforma aterrada, tem um efeito de elevação do plano de terra, provocando um aumento nos níveis de campo elétrico a que os trabalhadores ficam expostos.

A figura 3.2 abaixo mostra a simulação computacional de utilização de plataforma metálica que eleva o potencial de terra e “comprime” as equipotenciais, aumentando o valor de campo elétrico ao longo desta direção da plataforma até o barramento energizado. Nestas condições, a incidência de descargas eletrostáticas aumenta significativamente.

No *software* de simulação computacional bidimensional *QuickField*[®] [TERA, 2008], foi possível obter uma avaliação qualitativa deste efeito no uso de plataforma metálica aterrada, mantendo se uma distância de segurança de 2,80 m da barra energizada com 132 kV (tensão fase-terra rms).

A figura 3.2 – b mostra a simulação da face de menor área posicionada perpendicularmente em relação ao barramento energizado. As simulações são apresentadas e discutidas em detalhes no capítulo seis.



a) situação real

b) simulação computacional

FIGURA 3.2 – “Compressão” de equipotenciais

3.2.1 Levantamentos de campo

Um diagnóstico sobre as condições de trabalho e de ocorrências de choques por efeitos de campos elétricos induzidos foi conduzido junto às equipes de manutenção de equipamentos de subestações. Foi realizada uma reunião inicial numa das subestações da CEMIG-GT com uma equipe que já havia improvisado uma cordoalha para eliminar as descargas elétricas desagradáveis durante execução de tarefas. Foram levantadas pelos trabalhadores várias questões de diferentes naturezas, as quais foram selecionadas para orientar a pesquisa e proposição de solução. Os problemas relacionados de forma livre pelos trabalhadores foram:

- § as descargas eletrostáticas, chamadas por eles de “choque por indução” causavam desconforto e irritação, criada pela ansiedade e expectativa iminente de tomar outra descarga;
- § as repetidas descargas provocavam desconforto e afetavam negativamente o rendimento no trabalho;
- § ao final da jornada, alguns relatavam fadiga e irritabilidade ou algum tipo de agitação ou ansiedade;
- § o fato de receber descargas e a exposição aos campos elétricos levava alguns trabalhadores a especular se esta exposição poderia afetar o desempenho sexual, ou provocar câncer ou algum tipo de doença a médio ou longo prazo;
- § a concepção de que a “indução” poderia ser algum tipo de radiação ionizante, como uma radiação nuclear, ou raios x;
- § a expectativa de que um dispositivo para eliminar de forma efetiva e segura as descargas deveria ser priorizado pelas áreas responsáveis da empresa;
- § associava-se o risco de queda a reação involuntária ao choque por indução. Isto é, admitia-se a possibilidade de queda do trabalhador na eventualidade de uma descarga eletrostática;
- § havia uma prática disseminada entre os trabalhadores de tocar rapidamente e com firmeza em partes metálicas para evitar a descarga ou atenuar seu desconforto;

- § os trabalhadores tinham receio de que uso continuado do dispositivo que viesse a ser criado para minimizar as descargas eletrostáticas poderia provocar a circulação em regime permanente de uma corrente, mesmo que de pequeno valor poderia provocar algum problema à saúde;
- § a percepção da maioria era de que, além da solução do problema, havia necessidade de se explicar os princípios teóricos de formação das descargas;
- § havia uma expectativa de que o dispositivo que viesse a ser criado poderia trazer restrição de movimento ou conflito com o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI);
- § as descargas eram mais intensas quando em trabalho em plataformas elevatórias e também com tensões mais elevadas, como 345 ou 500 kV.

Posteriormente a esta coleta de informações, foram identificadas as posições mais comuns de trabalho e as tarefas com maior ocorrência de choque por indução.

Os serviços nas concessionárias de energia são realizados com auxílio de equipamentos de elevação do plano de trabalho, tais como caminhões com plataformas hidráulicas e caminhões com cesta aérea, também conhecidos como caminhões “munck”. Tais dispositivos são usados em tarefas mais complexas e em trabalhos mais demorados e têm o objetivo de proporcionar maior segurança e conforto ergonômico aos trabalhadores. Trabalhos mais simples podem ser feitos usando-se escadas. As figuras 3.3 e 3.4 ilustram essas situações típicas de trabalho.



FIGURA 3.3 – Posições típicas de trabalho – nível do solo e em escada

Ressalte-se que faz parte do procedimento padrão adotado pelas equipes de manutenção da CEMIG, a colocação de cinto de segurança e dispositivo trava-quedas, além de treinamento adequado para os trabalhadores que realizem serviços em alturas acima de três metros, tanto nas plataformas como nas escadas. Todavia, a colocação do cinto de segurança somente é feita quando do posicionamento definitivo do trabalhador na altura adequada à tarefa. Até esse momento, se houver o choque por indução e uma reação involuntária brusca, pode ocorrer a queda do trabalhador. A queda de uma altura acima de quatro metros, nas situações das tarefas comuns, pode levar a escoriações, fraturas ou até lesões mais graves.



FIGURA 3.4 – Situação típica de trabalho – manutenção em plataforma elevada

Em face do exposto, a mitigação das descargas eletrostáticas provocadas por campos elétricos elevados era uma necessidade premente dos técnicos e eletricitistas e considerada como prioridade para melhorar o conforto e a segurança durante serviços de manutenção.

3.2.2 O desconforto causado pelas descargas eletrostáticas

O desconforto eletrostático está associado à dor localizada de pequena intensidade na região da pele onde ocorre a descarga eletrostática. A intensidade dessa dor pontual depende fundamentalmente do valor de pico do primeiro pulso de corrente.

Por sua vez, o valor de pico de corrente depende da diferença de potencial entre os dois objetos, no caso o corpo humano e um objeto metálico.

A energia do pulso é muito baixa e incapaz de provocar danos a saúde conforme estudos de Deno e Zaffanella [1987] e Patrick Reilly e W. D. Larkin [1987], tais como fibrilação ou parada cardíaca, mas sua repetição provoca dor e irritação (estresse) no trabalhador e, em alguns casos, dependendo da intensidade e da taxa de repetição, pode comprometer ou até levar à interrupção dos trabalhos.

Segundo Reilly e Larkin [1987] a percepção do desconforto depende de uma série de fatores, porém, descargas com maiores energias tendem a causar maior desconforto.

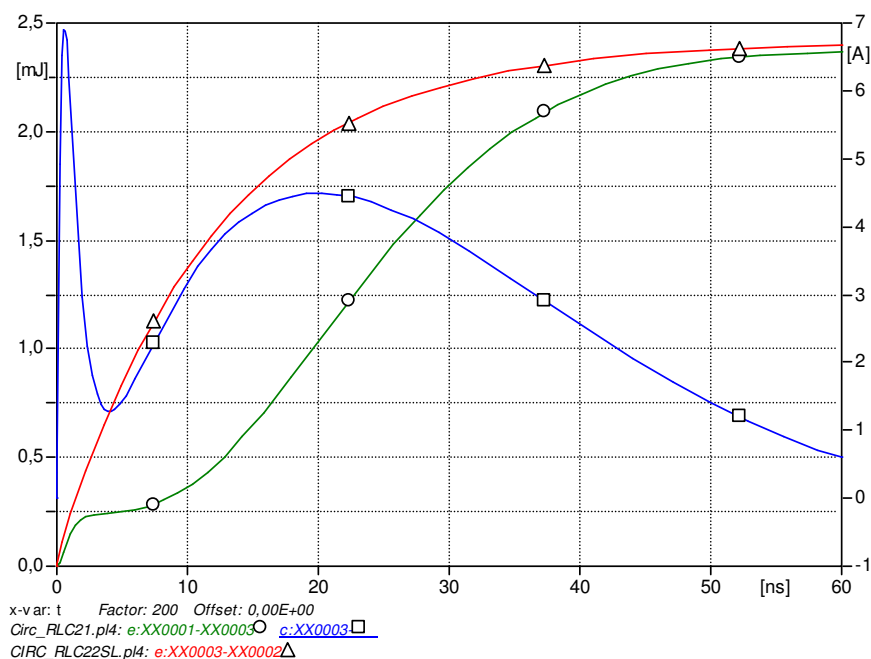


FIGURA 3.5 – Gráfico de energia e corrente, simuladas com e sem indutâncias

O gráfico da figura 3.5 compara as formas de onda da energia dissipada sobre a resistência do corpo. Observamos pela curva com marcadores redondos (○) que corresponde à simulação com indutância, que a energia é atenuada exatamente no seu momento mais crítico, quando está iniciando a disrupção. Vale observar que a energia na simulação com indutâncias apresenta menor energia do que a simulação sem indutâncias, ilustrada no gráfico na curva com marcadores triangulares (Δ)

durante o tempo de aproximadamente 40 ns. A forma de onda com marcadores quadrados (□) é a corrente do pulso da descarga eletrostática.

Portanto, apesar de representar uma parcela pequena da impedância do corpo humano, menor que 0,1%, o valor da indutância não deve ser desconsiderado.

O comportamento típico e normalizado da corrente da descarga eletrostática, proposto por Okoniewska, Stuchly e Okoniewski [2004], é ilustrado na figura 3.6 abaixo. O fenômeno é muito rápido (nano-segundos) e difícil de ser medido.

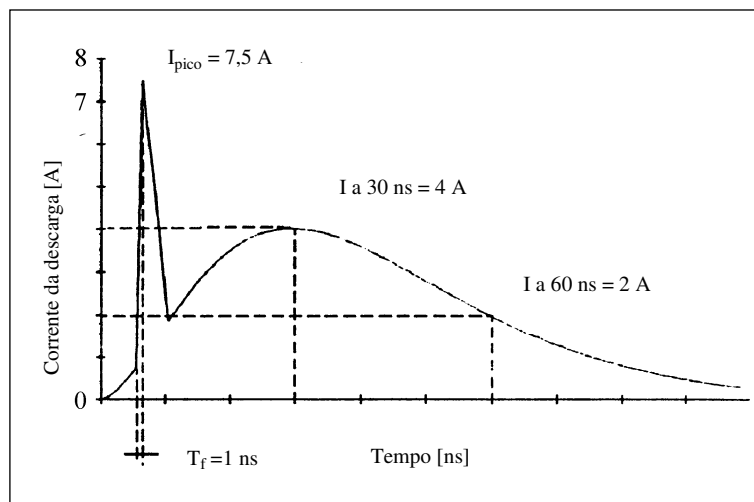


FIGURA 3.6 – Forma de onda para corrente definida pela CENELEC
Fonte: adaptado de Okoniewska, Stuchly e Okoniewski [2004]

A forma de onda ilustrada na figura acima é típica de uma descarga eletrostática, porém pode se repetir com a mesma intensidade ou estabelecer um arco temporário sustentado, enquanto houver a exposição ao campo elétrico, fonte geradora da tensão pelo acoplamento capacitivo.

O comportamento involuntário de recuo à percepção do choque, na primeira descarga, leva a múltiplas reignições em novas aproximações, sempre se repetindo o pico do primeiro pulso cujo valor é da ordem 7A, para tensões induzidas com valor de pico de 7,07 kV. Estas reignições agravam a percepção do desconforto e levam a uma reação de abandonar o local ou à rejeição inconsciente de se submeter novamente à experiência desagradável.

Além disso, a reação involuntária à descarga eletrostática pode fazer o trabalhador recuar bruscamente e eventualmente até levá-lo a quedas, o que veremos no próximo item: Aspectos de segurança. Esta é a situação típica dos trabalhos em subestações de alta-tensão, reinições e sucessivas interrupções, determinantes no nível do desconforto.

Importantes relatos são encontrados na literatura, dentre eles Deno e Zaffanella [1987], Reilly e Larkin [1987] e CIGRÉ [1980] avaliando a influência da velocidade de aproximação na severidade das descargas eletrostáticas.

A figura 3.7 ilustra padrões de descargas para diferentes velocidades de aproximação.

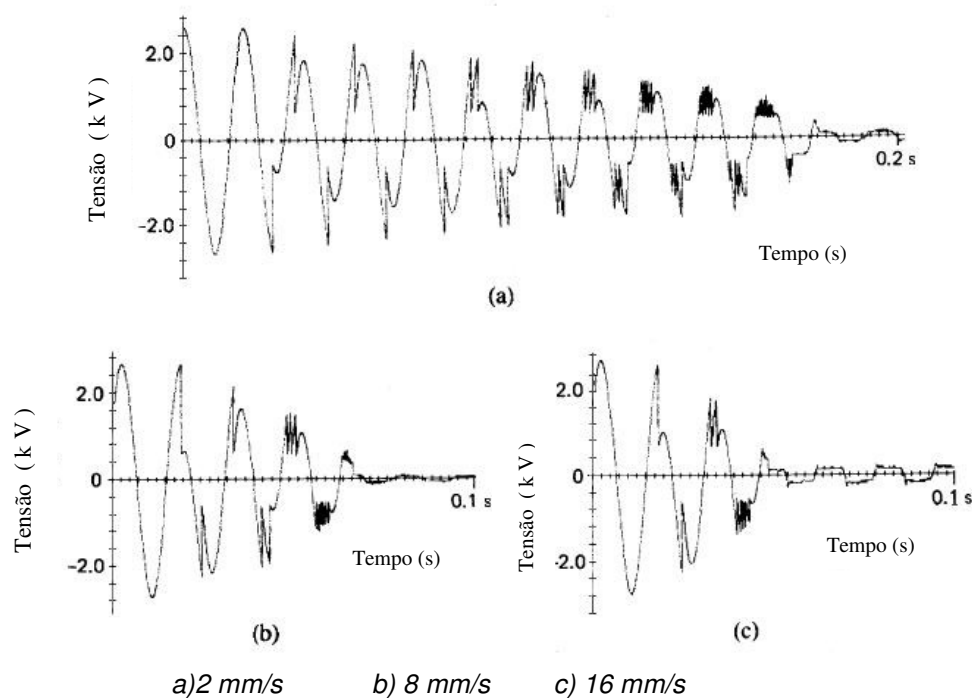


FIGURA 3.7 –Exemplos de descargas para diferentes velocidades de aproximação
Fonte: Reilly; Larkin [1987]

Segundo Reilly e Larkin [1987] a velocidade de aproximação no toque, entre a parte do corpo e o objeto metálico tem forte influência no valor de pico corrente e no nível de desconforto. Maiores velocidades de aproximação e toque implicam em menores valores de pico e redução do desconforto, que pode ser explicada pelo menor comprimento do arco e menor tempo de sustentação do mesmo, conseqüentemente menor energia durante o estabelecimento do contato. Cada ponta aguda nas formas

de ondas corresponde a uma disrupção entre pessoa e objeto. Comparando os gráficos observamos que para velocidade de 2mm/s temos da ordem de doze disrupções contra seis disrupções na velocidade de 16mm/s.

A velocidade de aproximação não foi objeto de investigação nesta dissertação devido às dificuldades operacionais de se realizar medições deste parâmetro, requerendo maior infra-estrutura de laboratório e estudos mais avançados. Além disso, a velocidade é um parâmetro sobre o qual não se pode exercer controle efetivo nos trabalhos em subestações.

Estabelecido o contato pessoa – objeto, a corrente passa ao regime permanente com valores da ordem de 0,25 mA rms, bem abaixo do limiar de percepção de 1,5 mA, citados pelo IEEE [2002] e IEEE [1985].

3.2.3 Aspectos de segurança

Os acidentes com choque elétrico nos sistemas elétricos das concessionárias de energia são os que apresentam maior gravidade. As estatísticas de acidentes do setor elétrico brasileiro são elaboradas pela Fundação Comitê de Gestão Empresarial (FUNCOGE) da Eletrobrás.

No relatório de 2006 da FUNCOGE, os acidentes fatais estão estratificados por causa, conforme demonstrado na Figura 3.8. É importante observar que os acidentes fatais devido à queda correspondem a 16% do total dos acidentes fatais.

No relatório de 2007 da mesma instituição os acidentes fatais com as concessionárias, por ocasião do fechamento desta dissertação não haviam ainda sido estratificados por *causa*, como no relatório de 2006.

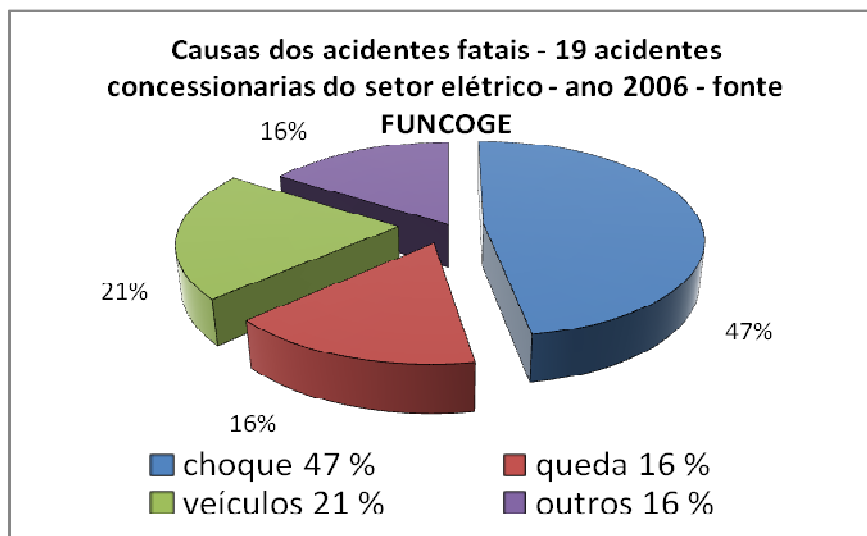


FIGURA 3.8 – Acidentes fatais de concessionárias
Fonte: FUNCOGE [2006]

Segundo dados históricos de 1999 a 2006 da FUNCOGE [2006] as concessionárias do setor elétrico brasileiro, juntas, têm uma média 900 a 1000 acidentes com afastamento por ano; onde 16% deles (160 no caso de 1000 acidentes) são acidentes com queda.

Podemos afirmar que o desenvolvimento de dispositivos de mitigação de descarga eletrostática tem motivação de segurança, pois pode eliminar o desconforto das desagradáveis descargas eletrostáticas e contribuir para redução de riscos indiretos de acidentes do trabalho envolvendo quedas.

Outro aspecto importante de segurança é o risco de contato com tensões de serviço auxiliar, provocando um choque elétrico efetivo e sustentado no trabalhador. Há relatos, no levantamento conduzido junto aos trabalhadores, que eventualmente alguns deles vinham usando cordoalhas de cobre ligando eletricamente seu punho a um ponto qualquer aterrado ou a um objeto metálico com potencial flutuante.

Com isso, eliminavam-se as descargas eletrostáticas, porém introduzia-se o risco de contato direto com tensões de serviço auxiliar de 125 a 250V cc ou ca, presentes nos circuitos de controle nas cabines de disjuntores e nas partes metálicas dos equipamentos de alta tensão, inadvertidamente energizadas com estas tensões.

Uma vez estabelecido o contato elétrico, poderia haver circulação de corrente de intensidade suficiente para provocar graves lesões no trabalhador. Esta prática de uso de cordoalhas ligadas diretamente ao punho foi completamente abolida pelas equipes tão logo se iniciaram os trabalhos de desenvolvimento dos dispositivos de mitigação de descargas eletrostáticas, uma vez que foram esclarecidos os riscos desta prática.

O desenvolvimento de protótipos de dispositivos anti-indução abordados no capítulo quatro considerou os aspectos de segurança acima expostos, além de critérios de funcionalidade, os valores limites de exposição de campo elétrico e de circulação de corrente, abordados no item seguinte.

3.2.4 Limites de exposição

A Comissão Internacional de Proteção contra Radiações não Ionizantes (ICNIRP), ligada a Organização Mundial de Saúde (OMS) é o organismo reconhecido mundialmente como referência para o estabelecimento de limites de exposição a campos eletromagnéticos. A ICNIRP [1998] em seu guia de referência a exposição a campos eletromagnéticos nos esclarece que a interação de campos elétricos variáveis no tempo com o corpo humano, resulta num fluxo de cargas elétricas (corrente elétrica), na polarização de cargas ligadas (formação de dipolos elétricos) e na reorientação dos dipolos elétricos já presentes no tecido.

As amplitudes relativas destes diferentes efeitos dependem das propriedades elétricas do corpo, isto é, da condutividade elétrica (que rege o fluxo da corrente elétrica) e da permissividade (que rege a amplitude dos efeitos de polarização). A condutividade elétrica e a permissividade variam com o tipo do tecido do corpo e também dependem da frequência do campo aplicado. Os campos elétricos externos induzem no corpo uma carga superficial, daí resultando correntes induzidas no corpo, cuja distribuição depende das condições de exposição, do tamanho e forma do corpo e da posição deste no campo.

3.2.4.1 Limites de exposição a campos elétricos

Os limites de exposição a campos eletromagnéticos são estabelecidos basicamente conforme a frequência e o tipo de exposição, com os limites diferenciados para o público em geral e público ocupacional.

A ICNIRP possui respaldo de grupos de estudo e pesquisadores em vários países e, apoiada em dados consistentes, em 1998 estabeleceu diretrizes para limitar a exposição aos campos eletromagnéticos, de forma a proteger o indivíduo contra efeitos reconhecidamente adversos. Os níveis de referência da ICNIRP [1998] são apresentados na tabela 3.1, para exposição ocupacional, foco deste trabalho.

Tabela 3.1

Níveis de referência de campos para exposição ocupacional

Faixa de frequência	Campo elétrico não perturbado (E_0) [V/m - rms]	Densidade de Fluxo Magnético não perturbado (B_0) [μ T]
Até 1 Hz	-	2×10^4
1 a 8 Hz	20.000	$2 \times 10^4/f^2$ (f em Hz)
8 a 25 Hz	20.000	$2,5 \times 10^4/f$ (f em Hz)
0,025 a 0,82 kHz	$500/f$ (f em kHz)	$25/f$ (f em kHz)
0,82 a 65 kHz	610	30,7
0,065 a 1 MHz	610	$2,0/f$ (f em MHz)
60 Hz	8.333	416,7

Fonte: adaptado de ICNIRP [1998, p. 60].

O tempo de exposição não está explícito no citado guia da ICNIRP, porém os níveis de referência ocupacional são adotados na CEMIG - GT para exposição durante uma jornada normal de trabalho. Esta interpretação baseia-se no fato de que o guia referenciado considera os efeitos sintomáticos e de curto prazo e não os efeitos de longo prazo e epidemiológicos, pois, para estes casos a ICNIRP entende que não há evidências conclusivas da relação causa efeito, que justifique o estabelecimento de limites.

O ambiente eletromagnético em subestações consiste basicamente de dois componentes: um campo elétrico e um campo magnético. Em geral, para campos variantes no tempo estes campos são acoplados, entretanto para a frequência industrial (60 Hz), os campos elétricos e magnéticos podem ser considerados desacoplados e independentes, conforme Deno e Zaffanella [1987] e CIGRÉ [2008].

A ICNIRP, em seu guia de 1998, não estabelece limites para exposição a campos elétricos ou magnéticos **estáticos**.

As diretrizes ali propostas são baseadas em efeitos na saúde de caráter imediato, a curto prazo, tais como estimulação de nervos periféricos e músculos, choques e queimaduras por tocar em objetos condutores durante a exposição aos campos eletromagnéticos. No caso de efeitos potenciais de longo prazo, tais como aumento do risco de câncer, a ICNIRP concluiu que os dados disponíveis são insuficientes para prover uma base consistente para fixar restrições à exposição.

Adicionalmente aos limites, é preciso verificar se não é excedida uma restrição básica. As restrições básicas previstas nas normas IEEE [2002] e ICNIRP [1998] são restrições ou limitações à exposição ao campo eletromagnético devido aos efeitos adversos à saúde. As restrições básicas são parâmetros complementares para estabelecer nível seguro de exposição. Conforme a ICNIRP [1998] um limite de referência pode ser ultrapassado desde que uma restrição básica não seja também ultrapassada.

Nas subestações há uma predominância dos efeitos dos campos elétricos, que são relativamente mais intensos que os campos magnéticos. A intensidade do campo magnético está associada diretamente a intensidade da corrente que circula nos barramentos e é fortemente atenuada pela distância dos condutores ao solo.

Esta condição reflete uma característica dos arranjos de subestações de alta tensão onde os condutores energizados estão relativamente muito afastados, tanto entre si como para a terra, para atender as condições de isolamento. Como decorrência desta característica, os campos elétricos apresentam valores próximos dos limites

de referência, enquanto os campos magnéticos apresentam valores consideravelmente baixos comparados aos seus respectivos limites.

Segundo Deno e Zaffanella [1987] os valores de campos magnéticos medidos ao nível do solo, próximos a linhas de transmissão, são da ordem de 10 a 50 μT . Estes valores são menores do que aqueles encontrados em certos ambientes industriais, especialmente próximos a condutores de baixa tensão conduzindo altas correntes.

Ainda segundo os mesmos autores acima referenciados, as densidades de corrente induzidas por campo magnéticos em linhas de transmissão tem amplitude da ordem de grandeza duas vezes menor que aquelas induzidas por campos elétricos.

Analogamente às linhas de transmissão, nas subestações os efeitos dos campos elétricos são significativamente mais relevantes do que os dos campos magnéticos, justificando o foco do objeto de análise deste trabalho nos efeitos dos campos elétricos.

3.2.4.2 Limites de exposição às correntes induzidas

As correntes induzidas são consideradas efeitos indiretos da exposição aos campos elétricos. São estabelecidas quando há uma descarga elétrica ou eletrostática entre uma pessoa e um objeto metálico, na maioria dos casos.

Descargas elétricas podem ocorrer quando um indivíduo chega muito perto de um objeto com potencial elétrico diferente, sem mesmo tocá-lo, conforme Tenforde [1991] e Kaune [1993]. Quando cada componente de um grupo de voluntários, eletricamente isolados do chão, manteve a ponta de um dedo perto de um objeto ligado à terra, o limiar para percepção de descargas elétricas foi da ordem de 0,6 a 1,5 kV/m, em 10% dos casos. O nível limiar de campo elétrico, relatado como causando desconforto sob estas condições de exposição, é de aproximadamente 2,0 a 3,5 kV/m.

Correntes de contato intensas podem provocar contração muscular. Kaune [1993] relatou que 50% dos voluntários masculinos não conseguiram soltar um condutor carregado para correntes de contato maiores que 9 mA a 50/60 Hz, 16 mA a 1 kHz e quase 130 mA a 100 kHz. Os valores de limiar da corrente, para vários efeitos indiretos de campos, na frequência de 60 Hz, estão resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2

Limiares de corrente para efeitos indiretos

Efeito indireto	Corrente de limiar na frequência 60 Hz (mA)
Percepção ao toque	0,2 – 0,4
Dor no dedo em contato	0,9 – 1,8
Choque doloroso / limiar de “soltura” – <i>let-go</i>	8 – 16
Choque grave / dificuldade na respiração	12 – 23

Fontes: Tenforde [1991], ICNIRP [1998]

É importante estabelecer uma distinção entre a corrente transitória ou pulso de corrente e a corrente estabelecida em regime permanente. A corrente transitória, normalmente de natureza estática ou eletrostática, se estabelece como um processo de transferência de cargas entre pessoa e um objeto metálico, de curta duração e sem energia suficiente para provocar efeitos graves à saúde.

Já a corrente em regime permanente, estabelecida por diferença de potencial entre pessoa e objeto metálico energizado, é sustentada enquanto houver diferença de potencial, ou enquanto o objeto metálico estiver energizado. As correntes em regime permanente, quando acima dos valores limites definidos pelas normas ICNIRP [1998] e IEEE [1985] são perigosas e podem causar graves danos à saúde.

Dentro do contexto desta dissertação, vale ressaltar que a exposição a campos elétricos elevados de 60 Hz pode estabelecer diferenças de potenciais suficientes para provocar circulação de correntes elétricas sustentadas entre pessoa e objeto metálico. Dependendo da intensidade do campo elétrico o valor destas correntes pode provocar efeitos prejudiciais à saúde, sendo consideradas como em regime permanente e com os valores limites também definidos pela Tabela 3.2.

3.3 Síntese do capítulo

Neste capítulo, definiu-se o escopo e a delimitação da pesquisa, explicitando o foco do estudo e os parâmetros de interesse nos efeitos da indução por campos elétricos em subestações. Foram discutidos os aspectos de segurança baseados nos dados das concessionárias do setor elétrico e analisados os limites de exposição a campos eletromagnéticos e de correntes induzidas propostos na ICNIRP, contextualizando-os ao ambiente das subestações de alta tensão. Foi conduzido de forma livre, um levantamento com equipes de manutenção em campo que junto com os demais tópicos deste capítulo, foi fundamental para subsidiar o desenvolvimento dos dispositivos de mitigação abordados no capítulo quatro.

4 DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA MITIGAÇÃO DE DESCARGAS ELETROSTÁTICAS POR INDUÇÃO

Os levantamentos de campo descritos no capítulo anterior possibilitaram identificar com clareza “qual o problema a resolver”: eliminar o desconforto causado pelas descargas eletrostáticas propiciando uma condição segura para a execução de serviços em subestações com campos elétricos elevados.

As equipes de manutenção tinham queixas freqüentes e levaram esta reivindicação à área de engenharia de manutenção da CEMIG - GT. Estabeleceu-se então uma parceria entre a CEMIG e a UFMG, cujas equipes foram compostas, respectivamente, pelo engenheiro Geraldo Magela Gontijo e pelos Professores José Osvaldo Saldanha Paulino e Wallace do Couto Boaventura.

Foi então desencadeado todo um trabalho que teve início com estudos teóricos para entender o fenômeno das descargas eletrostáticas em subestações, desenvolvimento de protótipos, ensaios em laboratório e em campo, testes funcionais, validação, treinamento e implantação dos dispositivos anti-indução, que culmina com a presente dissertação.

O propósito deste capítulo é descrever em detalhes todas as etapas do desenvolvimento dos dispositivos, desde a fase de estudo e proposição, conduzida principalmente pela equipe da UFMG, com acompanhamento por parte da equipe da CEMIG, até sua normalização e implantação na CEMIG, levada a cabo pelo autor deste trabalho.

Ainda durante a fase de proposição de soluções para a mitigação do desconforto causado pelas descargas eletrostáticas, em abril de 2008, Gontijo e Boaventura apresentaram artigo no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) evidenciando o trabalho conjunto então em curso.

4.1 Desenvolvimento de soluções

É gratificante ressaltar, como antecipação ao fechamento deste capítulo, que, graças ao trabalho de normalização e implantação realizados, os dispositivos antiindução já estão em uso pelas equipes de manutenção desde 2007, se mostrando eficazes na eliminação das descargas eletrostáticas, agregando conforto e segurança às atividades de manutenção.

4.1.1 Estudo teórico do fenômeno

4.1.1.1 Descargas eletrostáticas

Okoniewska, Stuchly e Okoniewski [2004] afirmam que as descargas eletrostáticas ocorrem quando dois objetos, com diferentes potenciais elétricos, se aproximam o suficiente para que haja um arco elétrico na distância existente entre estes objetos. As descargas eletrostáticas são associadas essencialmente aos campos elétricos estáticos e normalmente são eventos não repetitivos.

Podem ocorrer quando do acúmulo, relativamente lento, de cargas e transferência rápida destas cargas, evento comum, por exemplo, quando se anda sobre um carpete e toca-se num armário metálico. Estas descargas são usualmente **não** repetitivas, porém sob exposição a campos elétricos alternados de 60 Hz, elas podem ser repetitivas, devido ao recarregamento contínuo dos objetos que se carregam e invertem de polaridade 120 vezes por segundo.

Segundo Poljak e Peratta [2006] geralmente para campos alternados de 60 Hz, os campos elétrico e magnético podem ter seus efeitos analisados separadamente. Particularmente no caso de sistemas elétricos, onde as tensões são mais elevadas, o efeito do campo elétrico é predominante.

Em campos elétricos alternados, de baixa frequência (60 Hz), os estudos teóricos acima referenciados definem as descargas eletrostáticas, ou a rigor: descargas elétricas por indução, em termos de corrente de pico, forma de onda e taxa de repetição. A posição do corpo, sua forma e suas propriedades elétricas e mais especificamente sua capacitância para terra determinam a forma de onda da descarga eletrostática.

Pessoas nas proximidades de barramentos de alta tensão podem se carregar e ao tocarem em um objeto aterrado, uma corrente pode circular provocando um pequeno choque. Neste processo as pessoas podem adquirir carga considerável e ficarem submetidas a diferença de potencial suficiente para provocar uma descarga eletrostática dolorida e desagradável.

A figura 4.1 ilustra o fenômeno em suas três etapas.

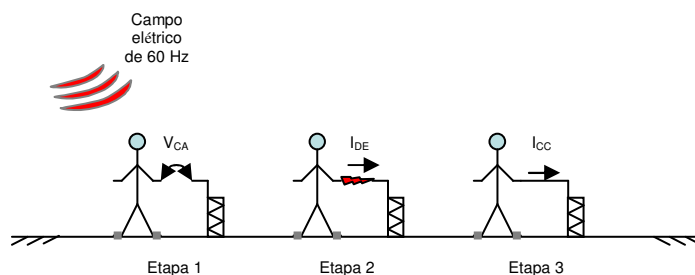


FIGURA 4.1 – Etapas da descarga eletrostática
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

Da análise da figura acima, temos as seguintes etapas:

1. o campo elétrico dos barramentos energizados induz uma tensão (V_{CA}) entre a pessoa (isolada) e o objeto aterrado;
2. se esta tensão for suficiente para ultrapassar o valor da rigidez dielétrica do ar, ocorrerá um centelhamento; uma corrente transitória de descarga (I_{DE}) irá fluir pelo corpo da pessoa e também pelo objeto aterrado;
3. se a pessoa ficar em contato com o objeto aterrado, uma corrente em regime permanente (I_{RP}) irá fluir pelo corpo da pessoa e também pelo objeto aterrado.

Deno e Zaffanella [1987] e Paul [2006] sugerem o modelo, mostrado na Figura 4.2, para o cálculo das correntes de descarga eletrostática.

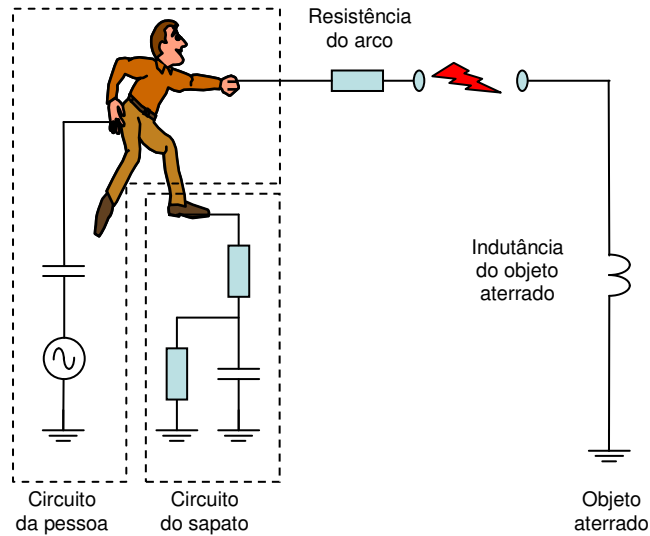


FIGURA 4.2 - Modelo de circuito para cálculo da corrente
Fonte: adaptado de Deno e Zaffanella [1987] e Paul [2006]

As condições dos sapatos das pessoas dependem de uma série de fatores, difíceis de serem avaliados, tais como sujeira e umidade. A pior situação (maior valor de corrente) é quando a pessoa está perfeitamente isolada do chão e o objeto perfeitamente aterrado. Nesta situação, pode-se utilizar o modelo simplificado mostrado na figura 4.3.

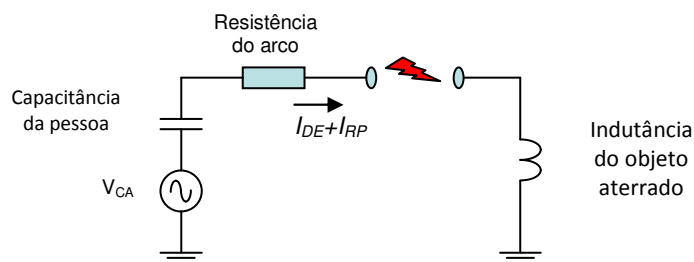


FIGURA 4.3 - Circuito para cálculo da corrente, pessoa totalmente isolada
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

4.1.1.2 Cálculo dos parâmetros para circuitos equivalentes de descargas

Considerando os modelos propostos para os diferentes elementos dos circuitos, podem ser calculados os parâmetros envolvidos. Para Deno e Zaffanella [1987] os valores típicos dos parâmetros do circuito da figura 4.3 são:

- § $V_{CA} = 0,275 \cdot E_0$ em kV;
- § E_0 – Campo elétrico no local onde está a pessoa, medido ou calculado, a 1,0 m de altura, sem a presença da pessoa em kV/m;
- § Capacitância da pessoa: $C_{Pessoa} = 140$ pF;
- § Resistência do arco: $R_A = 1000 \Omega$;
- § Indutância do objeto aterrado: $L_0 = 1 \mu\text{H}$.

Antes da formação da centelha, a pessoa (capacitor) fica carregada com uma tensão, cujo valor máximo é igual ao valor de pico da tensão V_{CA} . No instante da formação do arco a corrente que circula pela pessoa pode ser calculada pelo circuito da Figura 4.4, e seu valor de pico é dado por:

$$I_{DE-pico} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{CA}}{R_A}; \quad (4.1)$$

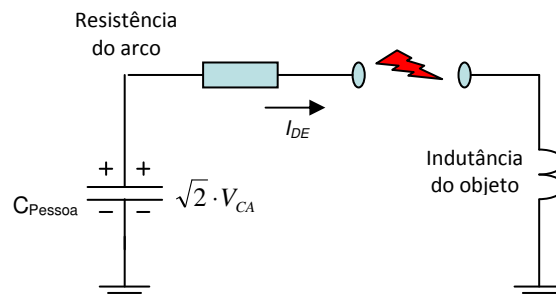


FIGURA 4.4 – Circuito para o cálculo da corrente transitória (I_{DE}).
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

No circuito para cálculo da corrente transitória, figura 4.4, a indutância poderá ser desconsiderada por ser muito menor do que a resistência do arco durante o transitório de descarga, interferindo muito pouco no cálculo da corrente. Como será

visto mais adiante, no capítulo seis, a indutância afeta outros parâmetros da descarga na fase transitória, sendo incluída nos circuitos mais elaborados simulados para esta fase da descarga, no *ATP-Draw*[®] - *Alternative Transients Program*. [IEEE, 2008].

Após a formação do arco a corrente que circula pela pessoa pode ser calculada pelo circuito da figura 4.5 e seu valor eficaz é dado por:

$$I_{RP} = \frac{V_{CA}}{R_A + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{Pessoa}}}; \quad (4.2)$$

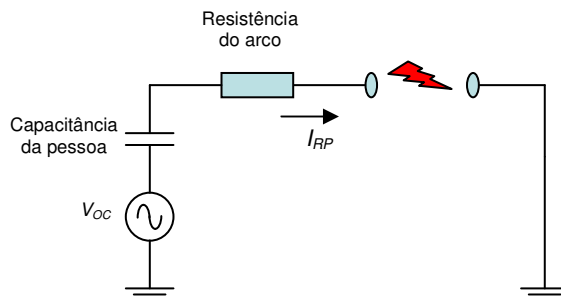


FIGURA 4.5 – Circuito para o cálculo da corrente de regime (I_{RP}).
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

Como resultado do estabelecimento das correntes nos circuitos das figuras 4.4 e 4.5, têm-se a forma de onda da corrente ilustrada na figura 4.6.

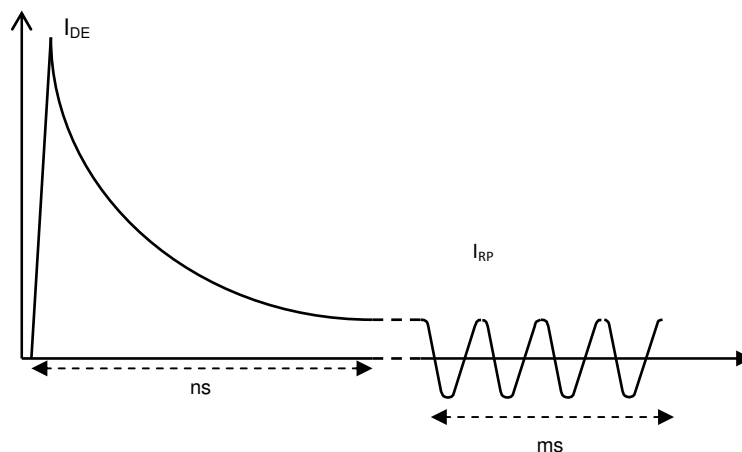


FIGURA 4.6 – Forma de onda da corrente de descarga nas suas duas fases
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

O valor máximo de campo elétrico recomendado pelo IEEE [2002] para trabalhadores em ambientes controlados é de 20 kV/m. O ICNIRP [1998] recomenda

como valor máximo para trabalhadores em geral, exposição permanente, o valor de 8,3 kV/m.

Aplicando-se os valores típicos de capacitância C_{pessoa} de 140 pF e resistência de arco - R_A de 1000 Ω , para $E_0 = 20$ kV/m nas equações 4.2 e 4.1 respectivamente, obtemos:

$$I_{DE} = 7,8 \text{ A} \rightarrow I_{RP} = 0,29 \text{ mA.}$$

É importante ressaltar que a corrente I_{DE} é uma corrente transitória de curtíssima duração (constante de tempo = $5.R.C = 0,7$ ms). Apesar de ter valor elevado, a corrente transitória não oferece perigo devido à sua pequena duração segundo Paul [1990], sendo apenas desagradável. Já a corrente I_{RP} é de valor muito menor, mas, é uma corrente de frequência igual a 60 Hz.

4.1.2 Requisitos elétricos mínimos

O dimensionamento elétrico de um dispositivo para eliminar ou reduzir as descargas eletrostáticas deve ser feito a partir da identificação das grandezas envolvidas na sua formação.

São três os requisitos elétricos para que um dispositivo de eliminação de descargas eletrostáticas usado por um trabalhador seja eficiente e seguro:

1. evitar o estabelecimento da corrente I_{DE} , ou seja, que não haja a formação de arco elétrico entre a pessoa e outro objeto qualquer ou entre a pessoa e a terra;
2. limitar a corrente de regime, I_{RP} , abaixo do valor definido [IEEE, 2002] como limiar de percepção, ou seja, 1 mA.
3. garantir que, no caso de toque acidental com a tensão de serviço auxiliar, a corrente I_{RP} esteja abaixo do valor calculado conforme a fórmula proposta

pelo IEEE [2002], cujos valores suportáveis de corrente dependem do tempo de aplicação.

Uma das formas de se evitar os efeitos desagradáveis do centelhamento é utilizar uma pulseira de aterramento. A figura 4.7 ilustra o circuito em que a pessoa faz uso de uma cordoalha com um resistor em série (“pulseira”) para descarregar a capacitância de acoplamento da pessoa com a fonte de campo e evitar o choque, cujo valor da resistência de aterramento deve ser tal que atenda aos três requisitos acima relacionados.

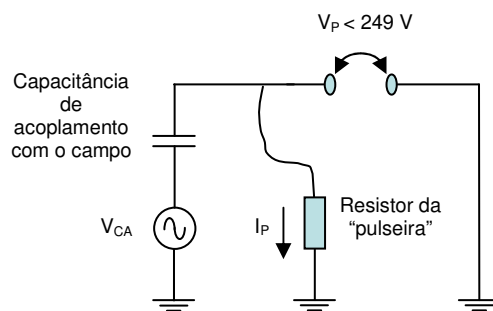


FIGURA 4.7 – Circuito de uma pessoa com pulseira de aterramento
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

O valor mínimo de tensão para formação de arco elétrico no ar, sob tensão contínua, campo elétrico uniforme, em condições normais de pressão, temperatura, umidade e com distâncias entre eletrodos da ordem de milímetros, é dado pela “Lei de Paschen”, apresentada por Kuffel, Zaengl e Kuffel [2000] e ilustrada na figura 4.8. Neste gráfico, pode-se notar que a tensão mínima é igual a 352 V, que corresponde a uma tensão alternada de valor eficaz igual a 249 V.

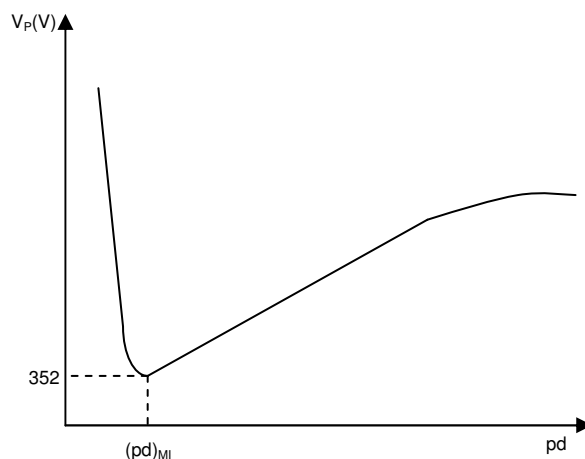


FIGURA 4.8 – Lei de Paschen – Tensão disruptiva no ar
Fonte: Kuffel, Zaengl, Kuffel [2000]

onde :

p é a pressão e

d é a distância entre eletrodos e da ordem de milímetros.

Baseado no circuito da figura 4.7, a corrente na pessoa (I_P) e a tensão entre a pessoa e objeto aterrado (V_P) podem ser calculadas pelas expressões seguintes:

$$I_P = \frac{V_{CA}}{R_{Pulseira} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{Pessoa}}}; \quad (4.3)$$

$$V_P = R_{Pulseira} \cdot I_P. \quad (4.4)$$

Considerando:

$$E_0 = 20 \text{ kV/m};$$

$$V_{CA} = 0,275 \cdot E_0 = 5,5 \text{ kV};$$

$$R_{pulseira} = 860 \text{ k}\Omega;$$

$$C_P = 140 \text{ pF};$$

$$I_P = 0,29 \text{ mA};$$

$$V_P = 249 \text{ V}$$

Deno [1974] apresenta uma curva com a variação do valor da capacitância de uma pessoa em função do tipo de sapato e também em função da proximidade da mesma de objetos aterrados, a qual sugere:

$$C_{Pessoa} : 120 \text{ a } 200 \text{ pF}.$$

O mesmo autor apresenta a faixa de variação da tensão da pessoa (V_{CA}) também em função da proximidade de objetos aterrados e do tipo de calçado:

$$V_{CA} / E_0 : 0,18 \text{ a } 0,42 \text{ m}.$$

Para o cálculo dos valores apresentados, anteriormente, considerou-se:

$$C_{Pessoa} = 140 \text{ pF e } V_{CA} = 0,275 \cdot E_0.$$

Refazendo os cálculos e considerando as faixas de variação de C_{Pessoa} e V_{CA} , os valores mostrados na Tabela 4.1 serão obtidos.

Tabela 4.1
Valores de resistores para se evitar descargas eletrostáticas.

$E_0 = 20 \text{ kV} - V_P = 249 \text{ V}$		
$V_{CA} \text{ (V)}$	$C_{Pessoa} \text{ (pF)}$	$R_{Pulseira} \text{ (k}\Omega\text{)}$
$0,18 \cdot E_0$	120	1529
$0,18 \cdot E_0$	200	917
$0,42 \cdot E_0$	120	655
$0,42 \cdot E_0$	200	393

Fonte: Dados da pesquisa

Analisando os dados da Tabela 4.1 verificamos que para evitar a ocorrência de descargas eletrostáticas é necessária a utilização de um resistor $R_{Pulseira}$ na faixa de 393 k Ω a 1529 k Ω , mantendo-se a tensão V_P em 249 V.

Agora considerando os valores típicos de correlação V_{CA}/E_0 (0,275 m) para um campo de até 19 kV/m, máximo encontrado em medições nas subestações, da capacitância C_{Pessoa} em 140 pF, podemos utilizar um resistor de 840 k Ω , teremos uma tensão V_P de 255 V.

A adoção deste valor de resistência foi para adequar aos valores comerciais de resistores de 2 W e 4 W disponíveis no mercado (2x270 k Ω + 2 x 150 k Ω).

4.1.3 Contato com circuito de serviço auxiliar

A condição necessária para evitar que ocorra a disrupção é manter a tensão entre a pessoa e outro objeto limitada em 249 Vca. Uma vez atendida essa condição, ainda é necessário proteger o trabalhador em caso de contato acidental com o circuito de

serviço auxiliar, normalmente alimentados com tensões de 125 a 250Vcc ou 220Vca. A figura 4.9 ilustra a situação.

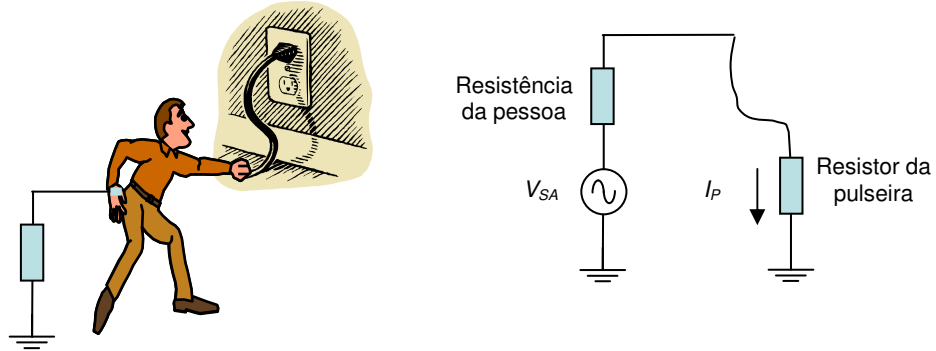


FIGURA 4.9 – Contato acidental com partes energizadas do circuito auxiliar
Fonte: Gontijo; Boaventura [2008]

No caso de contato com partes energizadas do circuito auxiliar, a corrente I_P que circulará pela pessoa será definida por:

$$I_P = \frac{V_{SA}}{R_{Pessoa} + R_{Pulseira}}; \quad (4.5)$$

Considerando os valores dos parâmetros:

$$R_{Pessoa} = 1 \text{ k}\Omega \text{ [5];}$$

$$R_{Pulseira} = 840 \text{ k}\Omega \text{ [5];}$$

$$V_{SA} \text{ (tensão de serviço auxiliar)} = 250 \text{ Vcc;}$$

obtemos $I_P = 0,30 \text{ mA}$.

Os valores da corrente suportável dependem do tempo de circulação t da mesma, conforme a seguinte expressão, proposta pela norma IEEE Std 80 [1985]:

$$I < \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (4.6)$$

para pessoas de 70 kg de massa.

Também, conforme a mesma norma referenciada acima, uma corrente de:

$I_P = 0,30 \text{ mA} \rightarrow$ está abaixo do limiar de percepção (1 mA).

Para tensões de até 840 V, a corrente I_P ficará em 0,95 mA e abaixo do limiar de percepção [IEEE, 2002].

A conclusão é que uma pulseira com um resistor de 840 k Ω garantirá segurança para o trabalhador e evitará as desagradáveis descargas eletrostáticas.

4.1.4 Análise das tensões de passo e de toque

Como o valor do resistor da pulseira (R_P) será da ordem de 840 k Ω , as correntes que circularão pela pessoa devido a tensões de passo e toque não serão alteradas pela pulseira (ver figuras 4.10, 4.11 e 4.12), tendo-se em vista que as resistências da pessoa (R_C) e dos pés (R_B) têm valores muito menores:

$R_C \approx 500 \Omega$;

$R_B \approx 0 \Omega$ (pessoa em cima de plataforma aterrada);

$R_B \approx 9 \text{ k}\Omega$ (pessoa em cima de piso de brita).

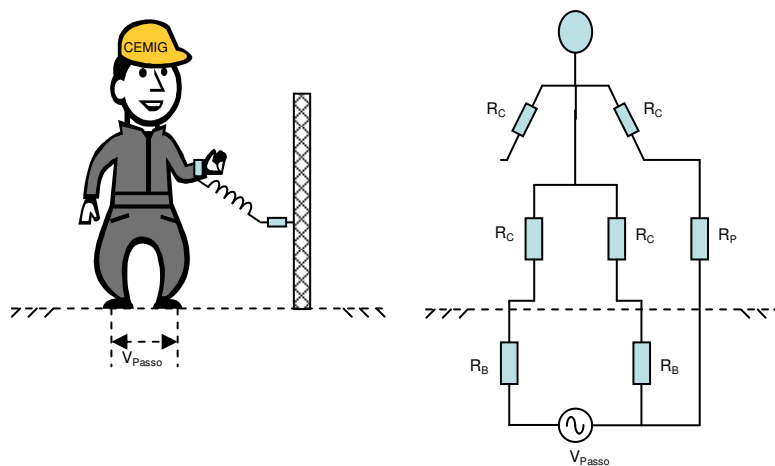


FIGURA 4.10 – Tensão de passo considerando a pulseira de aterramento.

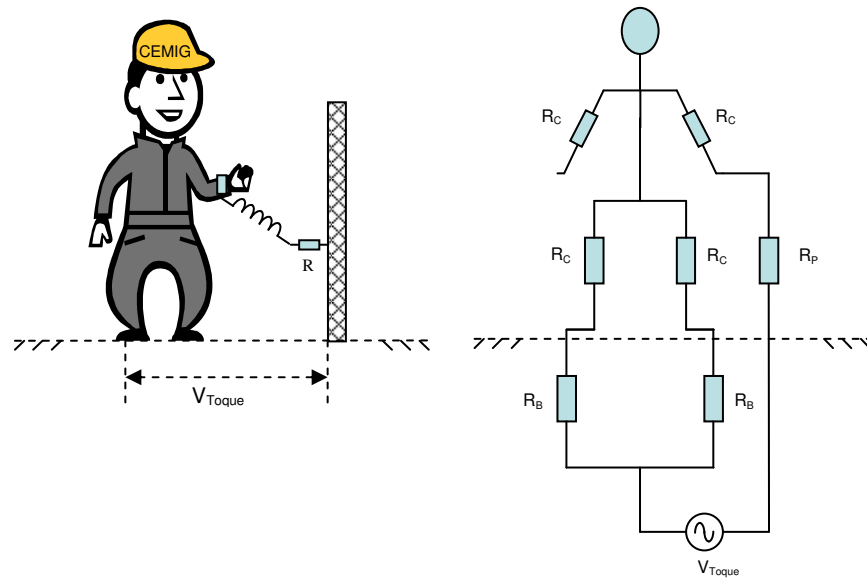


FIGURA 4.11 – Tensão de toque considerando a pulseira de aterramento.

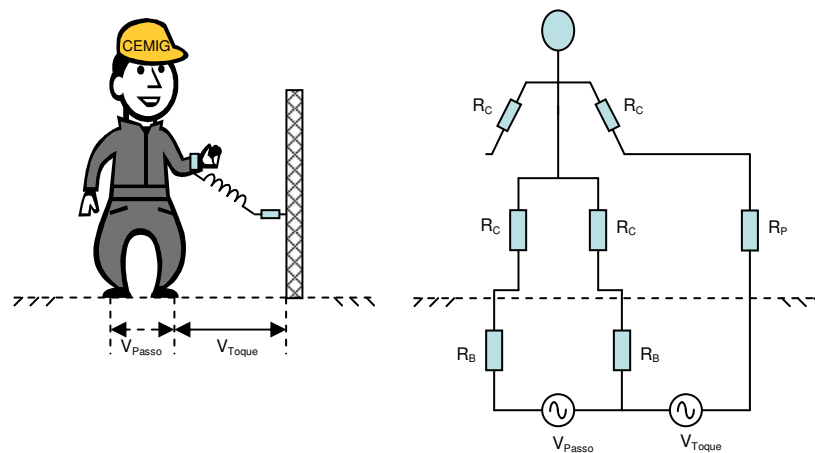


FIGURA 4.12 – Tensões de passo e de toque na pessoa com a pulseira de aterramento.

O valor máximo da tensão de toque V_{Toque} é importante para a determinação do valor da tensão de teste da pulseira, figura 4.12.

Conforme Paul [2006]:

$$V_{Toque} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (4.7)$$

onde:

ρ_s : Resistividade da camada de brita;

C_S : Fator que leva em conta a resistividade do solo e a espessura da camada de brita. No pior caso $C_S = 1$;

t : Tempo de atuação da proteção em segundos.

Segundo informações da engenharia de operação da CEMIG - GT, os tempos típicos de atuação da proteção são da ordem de 100ms, com tempos de retaguarda de 250 a no máximo 500ms. Considerando estes valores típicos, é razoável estimar que o tempo total máximo de atuação da proteção da ordem de 1s, logo a tensão de toque máxima admissível será:

$$V_{Toque} = 864 \text{ V.}$$

Considerando-se o comprimento do cordão da pulseira, a pior situação será a de uma pessoa no meio do “grid” com a pulseira ligada (aterrada) no cabo do “grid”, figura 4.13.

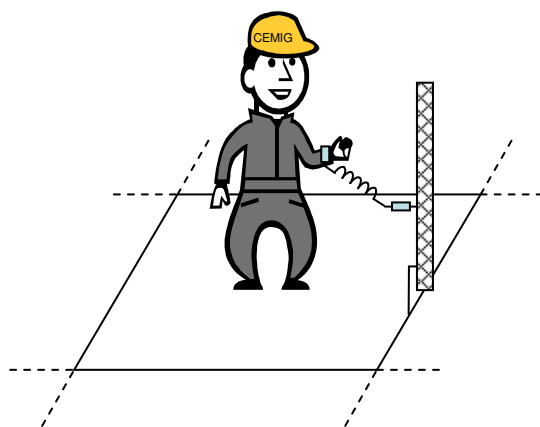


FIGURA 4.13 – Centro do “grid” da malha, onde ocorre a máxima tensão de toque

O valor da tensão de toque ilustrado na figura 4.13 depende de uma série de fatores tais como, projeto da malha, potência de curto-circuito da subestação e tensão nominal de operação da subestação. Conforme informações da CEMIG, em seus projetos esse valor não ultrapassa 3 kV.

Portanto, a tensão máxima que será aplicada no resistor da pulseira será de 3,0 kV, mas durante um pequeno intervalo de tempo, inferior a 1,0s; que é o tempo total de atuação da proteção secundária.

4.2 Protótipos desenvolvidos

Existem no mercado dispositivos para o controle e mitigação de descargas eletrostáticas. Tais produtos normalmente são para aplicação em indústrias especiais e linhas de montagem de equipamentos eletrônicos.

A avaliação feita em alguns destes produtos foi de que não seriam robustos e não teriam os requisitos de isolamento e de funcionalidade adequados para uso em subestações.

Foram desenvolvidos três tipos de protótipos: pulseiras, cintos e esporas de aterramento, conforme figura 4.14, para avaliação inicial de aplicabilidade às tarefas típicas das equipes de manutenção.

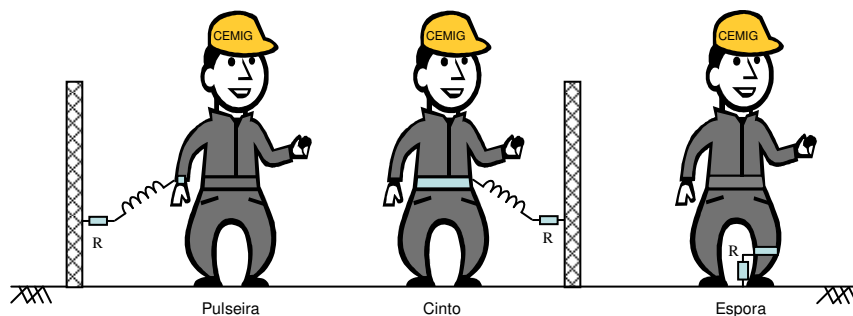


FIGURA 4.14 – Protótipos confeccionados

Após avaliação com pessoal de manutenção, ficaram definidos como mais funcionais os modelos pulseira e cinto, sendo que este último posteriormente evoluiu para o modelo clipe de cintura.

Os modelos escolhidos foram confeccionados em uma versão já aperfeiçoada por um fabricante em um trabalho de parceria com a CEMIG – GT, os quais são detalhados a seguir.

4.2.1 Pulseira

Pulseira elástica com colchete metálico, cabo de cobre de 1,5 mm² espiralado, dois resistores em série ligados no colchete e na garra jacaré. A figura 4.15 mostra o arranjo elétrico e as figuras 4.16 e 4.17 as últimas versões do dispositivo, que atualmente está em uso.

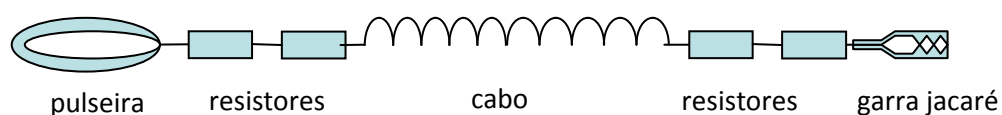


FIGURA 4.15 – Diagrama Pulseira com resistor e garra jacaré

O uso de dois resistores, em cada terminal, se justifica por melhorar a confiabilidade por redundância e por aumentar a suportabilidade dielétrica para tensões mais elevadas, evitando-se a disrupção pela superfície externa dos resistores.



FIGURA 4.16 – Pulseira com resistores e garra jacaré



FIGURA 4.17 – Pulseira em uso em subestação

4.2.2 Clipe de cintura

Clipe de prender na cintura em polietileno, com clipe metálico, cabo de cobre de 2,5 mm² isolado em silicone, dois resistores em série ligados no clipe metálico da e na garra jacaré. A figura 4.18 mostra o arranjo elétrico e as figuras 4.19 e 4.20 as últimas versões do dispositivo, que atualmente estão em uso.

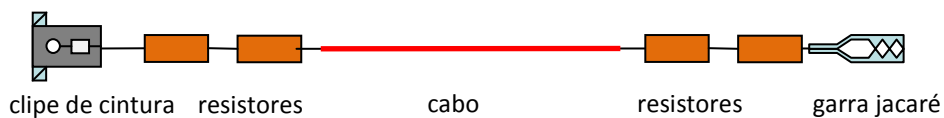


FIGURA 4.18 – Diagrama do Clipe de cintura com resistores e garra jacaré



FIGURA 4.19 – Detalhe do Clipe de cintura com garra jacaré e pino banana



FIGURA 4.20 – Clipe de cintura com garra jacaré em uso

Da mesma forma que na pulseira, o uso de dois resistores, em cada extremidade, se justifica por melhorar a confiabilidade por redundância e por aumentar a suportabilidade dielétrica para tensões mais elevadas, evitando-se a ruptura pela superfície externa dos resistores.

4.3 Ensaio em laboratório

Os protótipos confeccionados precisavam ser avaliados quanto a sua efetividade, antes de serem testados no campo. Para tal foi montado o arranjo da figura 4.21 no Laboratório de Extra-alta Tensão (LEAT) da UFMG.

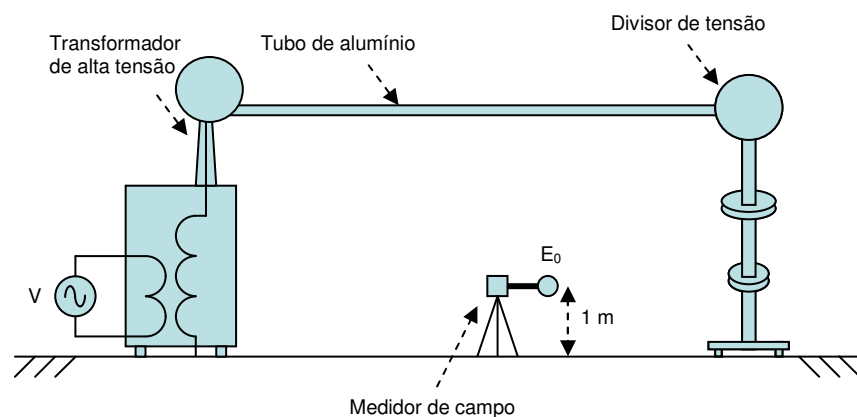


FIGURA 4.21 – Arranjo para medição de campo elétrico

O campo elétrico foi medido com o sensor distante 1,0 m do solo, sem a presença do manequim, que depois foi colocado na mesma posição do medidor, isolado do solo (suspense em uma corda de nylon a 0,15 m do solo), e a tensão entre manequim e solo foi medida. Em seguida, o manequim foi aterrado com a pulseira e a tensão entre manequim e solo e a corrente no resistor de aterramento foram medidas.

O manequim de fibra de vidro foi revestido com papel alumínio para possibilitar a medição de tensão e corrente na pessoa, conforme figura 4.22.



FIGURA 4.22 – Medição de tensão no manequim suspenso

O arranjo para medição de corrente e tensão na pessoa é mostrado na figura 4.23.

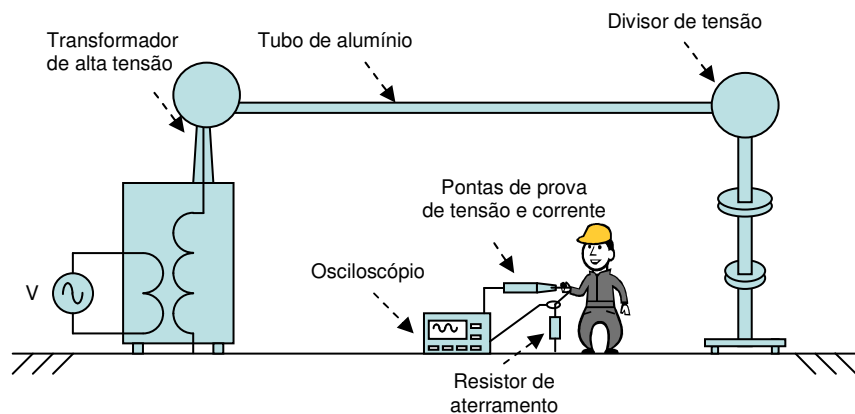


FIGURA 4.23 – Arranjo para medição de tensão e corrente

Os valores de campos elétricos, tensões e correntes medidos podem ser vistos na Tabela 4.2. Os valores de campo medidos foram 5, 10 e 15 kV/m. Foram utilizadas pontas de prova de baixa capacitância e alta impedância (Tektronix P6015A, 3 pF, 1000 MΩ). A variação do campo do elétrico foi efetuada através da variação da tensão na barra na faixa de 25 a 100 kV.

Tabela 4.2
Resultados das medições no manequim revestido alumínio, sem uniforme

Valor de campo elétrico medido sem o manequim (Figura 4.21)	Tensão no manequim isolado (Figura 4.22)	Tensão no manequim aterrado com 1 MΩ (Figura 4.23)	Corrente no resistor de aterramento (Figura 4.23)
3,26	2,18	54	68
6,45	4,29	125	126
9,68	6,30	184	188
12,96	8,43	247	250
16,16	10,53	310	313

Fonte: Dados da pesquisa

Num segundo experimento, o manequim foi vestido com o uniforme da CEMIG, inclusive com as botas, e as tensões entre manequim e solo foram medidas com o manequim suspenso a 5,0 cm do solo e depois com o mesmo apoiado no solo (botas em contato com o solo) conforme demonstrado na figura 4.24. Os valores medidos podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3
Medições no manequim revestido com alumínio, com uniforme e botas

Valor de campo elétrico medido sem o manequim (kV/m)	Tensão do manequim para terra (kV _{rms})	
	Bota em contato com o piso (Figura 4.24)	Manequim "flutuando"
3,26	1,20	1,79
6,45	2,25	3,63
9,68	3,31	5,50
12,96	4,43	7,32
16,16	5,54	9,14

Fonte: Dados da pesquisa



FIGURA 4.24 – Manequim com uniforme e bota - medição de tensão e corrente

Os valores medidos foram coerentes com os valores calculados e simulados no item 4.1.2, isto é, a tensão apresentou uma relação V_{CA}/E_0 com uma média de 0,35 m, dentro da faixa empírica sugerida na literatura por Deno e Zaffanella [1987] de 0,18 a 0,42 m.

4.3.1 Análise da efetividade dos protótipos

Para campos elétricos até 13 kV/m no laboratório, utilizando qualquer um dos protótipos, o valor de tensão ficou limitado aos 247 V, conforme a Lei de Paschen [KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2000], insuficiente para provocar ruptura no ar, não havendo, portanto, descarga eletrostática ou centelhamento. Para nenhum dos valores medidos de campo elétrico, mesmo ultrapassando os 249 V (310 V), não houve descarga eletrostática entre manequim e terra.

Foram realizados, adicionalmente, os seguintes testes nos protótipos:

- § medição do valor da resistência do protótipo;
- § ensaio de tensão aplicada: 1kV- 60Hz durante 60s.

O valor de tensão aplicada foi limitado a 1 kV para que não ultrapassasse a potência de dissipação dos resistores utilizados, dois em série com uma potência de $\frac{1}{2}$ W. Os protótipos foram aprovados no ensaio de tensão aplicada (1 kV durante 60s). Os valores das resistências ôhmicas dos protótipos variaram de 935 k Ω a 1,1 M Ω . Portanto, os protótipos desenvolvidos foram aprovados nos ensaios de laboratório.

4.3.2 Definição dos ensaios de tipo

Os ensaios de tipo foram definidos posteriormente aos ensaios de campo e foram incluídos na especificação técnica abordada no item 4.5 deste capítulo. Foi adotado o valor de 3 kV, baseado no valor máximo de projeto da tensão de toque informado pela CEMIG. Estes ensaios constam basicamente de tensão aplicada – 3 kV, 60 Hz, 1 s e medição de resistência ôhmica total com tolerância de 10%.

4.4 Ensaios em campo

A avaliação de campo foi realizada na Subestação Taquaril, nos dias 05 e 06 de dezembro de 2006, pelos professores José Osvaldo S. Paulino e Wallace do Couto Boaventura da UFMG, pelos engenheiros Geraldo M. Gontijo e Edivaldo M. Franco da área de engenharia de manutenção e por uma equipe de manutenção da CEMIG -GT.

4.4.1 Medições de campo

O primeiro teste do protótipo foi feito no solo, ilustrado na figura 4.25, em ponto de campo elétrico elevado: 19,22 kV/m. Para este valor de campo elétrico e na mesma posição a tensão medida entre a pessoa e a terra foi de:

§ 5000 V rms: sem o dispositivo

§ 240 V rms: com o dispositivo



FIGURA 4.25 – Teste de campo - Medição de campo elétrico na SE Taquaril

O segundo teste do protótipo foi feito em uma plataforma, conforme figura 4.26. A tensão medida entre a pessoa e a plataforma foi de:

§ 1000 V rms: sem o dispositivo;

§ 120 V rms: com o dispositivo.

O uso do dispositivo eliminou por completo o desconforto causado pela descarga entre pessoa e plataforma.



FIGURA 4.26 – Teste de campo - Medição de tensão na plataforma

4.4.2 Análise da efetividade dos protótipos

O uso dos dispositivos eliminou por completo o desconforto causado pela descarga entre pessoa e estrutura aterrada e entre pessoa e plataforma. Os testes de campo confirmaram os resultados obtidos em laboratório.

Os dispositivos usados, modelo pulseira e modelo clipe de cintura, foram efetivos na eliminação das descargas eletrostáticas, mesmo nas situações em que os valores de campo alcançaram intensidade de até 19 kV/m, acima dos medidos nos ensaios de laboratório, que foram de até 13 kV/m.

4.4.3 Ensaios funcionais e conforto

A pulseira e o clipe de cintura apresentaram nível aceitável de conforto, não interferindo na mobilidade do trabalhador e nem na utilização dos demais equipamentos de segurança individual (EPI).

4.5 Especificação técnica e padronização

O *kit* anti-indução, constituído de uma pulseira resistiva e um clipe de cintura, foi desenvolvido e padronizado pela equipe de engenharia de manutenção da CEMIG - GT para suas equipes de manutenção de subestações. Após os testes de protótipos, uma especificação técnica para compra da pulseira resistiva e do clipe de cintura foi elaborada para garantir a aquisição de *kits* de qualidade e assegurar, conseqüentemente, o atendimento aos requisitos técnicos mínimos, sua efetividade e sua utilização segura.

Os resistores utilizados, diferentes dos valores utilizados nos protótipos, foram modificados por resistores de valor comercial e potência padronizada para atender aos requisitos de limitar a tensão na pessoa e dissipar a potência durante o ensaio de tensão aplicada de 3 kV.

Mesmo com esta alteração nos valores dos resistores, os requisitos de máxima tensão pessoa terra (249 V) não foram ultrapassados e também o valor de corrente de circulação em caso de contato com tensão de serviço auxiliar de até 440 V se manteve em 0,45 mA, não ultrapassando o valor de 1,0 mA – limiar de percepção [IEEE, 2002].

4.5.1 Pulseira resistiva

A pulseira tem o circuito equivalente mostrado na figura 4.15 e componentes e materiais com as seguintes características:

- § cabo de cobre flexível de $1,5 \text{ mm}^2$, espiralado com isolamento de para 1000 V, comprimento 1 m;
- § um resistor de 2 W, 150 k Ω , em série com outro resistor de 4 W, 270 k Ω ligados a uma das extremidades do cabo e a garra jacaré isolada. Outros dois resistores de mesmas características e também em série ligam a outra

extremidade do cabo ao colchete receptor da pulseira de tecido elástico que vai presa ao punho do trabalhador, num total de quatro resistores. A ligação dos resistores em série assegura uma maior suportabilidade dielétrica às tensões disruptivas induzidas e uma segurança redundante, caso um deles rompa o isolamento ou entre em curto. Os ensaios durante o desenvolvimento de protótipo demonstraram que tensões elevadas, da ordem de 5 kV podem provocar a queima do filme de carbono destes resistores. A potência de 2 W e 4 W especificada para os resistores, permite que a pulseira suporte a aplicação de tensão de teste de até 3 kV, definidos como ensaios de rotina;

- § garra jacaré que deve ser robusta e isolada para 1000 V com empunhadura adequada para ser aberta com facilidade pela mão do trabalhador;
- § colchete de pressão que deve manter-se preso firmemente durante os esforços normais previstos para a execução dos trabalhos, mas deve se desprender da pulseira de tecido em caso de esforços bruscos. Esta funcionalidade adicional de segurança, evita a queda indesejada do trabalhador com a pulseira presa ao punho e ao cabo de cobre;
- § pulseira elástica que deve assegurar conforto e ao mesmo tempo bom contato elétrico da parte metálica do colchete com a pele do trabalhador. Deve possuir regulagem ao punho permitindo um nível de conforto adequado a diferentes seções de punho.

4.5.2 Clipe de cintura

O clipe de cintura deve ter o circuito idêntico ao da pulseira mostrado na figura 4.18.

Componentes e materiais com as seguintes características:

- § cabo flexível de cobre de 2,5 mm² com camada isolante de silicone e proteção mecânica, com isolação para 5 kV e comprimento de 3 m;
- § um resistor de 2 W, 150 kΩ, em série com outro resistor de 4 W, 270 kΩ ligados a uma das extremidades do cabo e a garra jacaré isolada. Outros dois resistores de mesmas características e também em série ligam a outra

extremidade do cabo ao clipe de cintura. Assim como no caso da pulseira a ligação dos resistores em série assegura uma maior suportabilidade dielétrica as tensões disruptivas induzidas e uma segurança redundante caso um deles rompa o isolamento ou entre em curto. Da mesma forma a potência de 2 W e 4 W para os resistores permite que o clipe suporte a aplicação de tensão de teste de até 3 kV, definido como ensaio de rotina;

- § garra jacaré que deve ser robusta e isolada para 1000 V e com empunhadura adequada para ser aberta com facilidade pela mão do trabalhador.
- § clipe de cintura que deve ser de material plástico isolante com boa rigidez dielétrica e mecânica, tal como *nylon* ou teflon. Preso a ele vai uma chapa de aço, o clipe propriamente dito, que se prende a calça e estabelece um bom contato elétrico com a pele da cintura do trabalhador. Assim como no caso da pulseira, se houver um sobre esforço, o pino que liga o cabo ao clipe de cintura se solta evitando uma queda descontrolada do trabalhador com o clipe preso à sua cintura.

4.5.3 Ensaios de rotina

4.5.3.1 Inspeção visual

Confirmação da montagem do dispositivo como um todo, verificação da qualidade das conexões, identificação visual das características dos dois resistores de 270 k Ω - 4W e dos dois resistores de 150 k Ω 2 W, verificar que as partes metálicas não apresentam rebarbas. Verificação da qualidade do acabamento.

4.5.3.2 Ensaios dimensionais

Confirmação das bitolas e comprimentos de cabos.

4.5.3.3 Ensaio elétrico

Medição da resistência ôhmica do conjunto, cujo valor nominal é de 840 k Ω , com tolerância de $\pm 10\%$.

Tensão aplicada: os dispositivos devem suportar a aplicação de uma tensão de 3 kV, 60 Hz, entre cada extremidade e o terra, durante 1 s. Não pode haver interrupção em nenhuma das aplicações e nem danos físicos aos resistores ou aos cabos ao final destas aplicações.

4.5.3.4 Ensaio funcional

Fixar ao punho, no modelo de pulseira e cintura, no modelo de clipe e proceder aos seguintes verificações e testes:

- § avaliar conforto no uso;
- § assegurar que as partes metálicas façam bom contato com a pele;
- § verificar o encaixe firme do pino, fixação dos cabos, boa empunhadura das garras jacaré;
- § executar teste de sobre esforço, efetuando um “puxão brusco” em seus cabos verificando que tanto o colchete quanto o pino se soltam.

4.6 Implantação e treinamento de equipes

O projeto do *kit* anti-indução, chamado inicialmente na CEMIG de “pulseira condutiva”, previa que assim que os protótipos desenvolvidos apresentassem um nível aceitável de efetividade e conforto, fosse empreendida uma etapa de implantação dos dispositivos.

Para essa implantação foram preparados: uma apresentação com os fundamentos teóricos sobre o fenômeno da indução e um treinamento prático no pátio das subestações, constando de medição de intensidade de campo elétrico e tensões induzidas em trabalhadores com e sem os dispositivos, para analisar sua efetividade.

A apresentação e o treinamento foram realizados com as cinco equipes regionais de manutenção de subestações. As regionais da transmissão da CEMIG - GT estão localizadas nas cidades de Uberaba, Montes Claros, Barbacena, Ipatinga e Belo Horizonte.

As palestras ocorreram num período de seis meses. Nas palestras cada equipe recebeu um *kit* anti-indução para utilização experimental por trinta dias. Foram treinados aproximadamente 50 trabalhadores e o retorno deles recebido foi muito positivo e possibilitou melhorias gradativas tanto no dispositivo quanto na metodologia e nos cuidados na utilização. Na figura 4.27, foto de treinamento realizado.



FIGURA 4.27 – Implantação do *kit* anti-indução na SE Montes Claros

Ao final dessa fase, constatou-se que a palestra teórica com o modelo elétrico do trabalhador exposto ao campo elétrico e a medição de campo elétrico nas subestações foram os tópicos que despertaram maior interesse. As equipes

consideraram o *kit* efetivo na eliminação das tensões induzidas e aceitáveis o nível de conforto e a funcionalidade.

4.7 Medidas complementares

As primeiras palestras e atividades de treinamento e divulgação do *kit* anti-indução deram um importante subsídio para melhorias nos dispositivos e em sua metodologia de utilização. Por exemplo, durante as práticas de utilização do *kit* foi identificada a necessidade de adoção de medidas complementares de segurança, relacionadas abaixo:

1. aterrar os equipamentos desenergizados utilizando os conjuntos de aterramento temporário já padronizados e em uso na empresa;
2. usar os equipamentos de proteção individual (EPI) e equipamentos de proteção coletiva (EPC), recomendados para a tarefa em execução, que basicamente são: capacete, óculos de segurança e botas com solado de borracha;
3. utilizar cabos flexíveis, com garras jacaré isoladas, para fazer o aterramento (equalização dos potenciais) das estruturas metálicas flutuantes. Todo objeto metálico, tais como cabeças de disjuntores, terminais de TP e TC devem ser ligados ao terra, mesmo que estejam desenergizados;
4. medir a resistência ôhmica do *kit* (pulseira, clipe e respectivos cabos) para certificar-se do seu correto funcionamento. O valor da resistência ôhmica do dispositivo deve ser de: $840 \text{ k}\Omega \pm 10\%$. Esta medição não deve ser feita sob efeito de indução de campo elétrico intenso, pois em tais condições o multímetro pode apresentar erro devido às tensões induzidas nos cabos.

Além das medidas complementares de segurança, foram ressaltadas as **limitações** e as **restrições** de uso para o *kit*.

- § todo trabalho com o *kit* somente deve ser realizado na área britada e sobre a malha de aterramento da subestação, mesmo que se utilize caminhão-plataforma. A área britada recobre a malha de aterramento, pois tem a função de manter a umidade e os valores adequados de resistividade do solo;
- § o *kit* não deve ser utilizado em cubículos com tensões superiores a 440 V, que é menos da metade da máxima tensão de circuito auxiliar suportável calculada de 840 V. A tensão nominal máxima de circuitos de serviços auxiliares encontrada nas instalações de alta tensão da transmissão não ultrapassa 440 V. Portanto, um critério bem conservativo garantindo que em caso de contato acidental do trabalhador com o circuito de serviço auxiliar energizado, não provoque uma circulação de corrente superior ao limite do limiar de percepção – 1 mA [IEEE, 2002];
- § o uso de EPI **não** é conflitante com o uso do *kit*;
- § é importante assegurar que os trabalhadores conheçam os fundamentos de equalização de potenciais, de forma a garantir que todas as medidas necessárias para eliminar o choque sejam tomadas. Se não houver a equipotencialização das partes metálicas flutuantes, poderá ocorrer que o *kit* **não** elimine todas as descargas eletrostáticas nos trabalhadores;
- § é proibido usar *kit* com defeito. Por exemplo, uma pulseira ou clipe de cintura com resistor em curto-circuito ou com circuito aberto, ou com um resistor ou cabo rompido;
- § o *kit* **não** deve ser utilizado em serviços de Linha Viva ou ao Potencial. Em serviços de Linha Viva, ou ao potencial há necessariamente diferenças de potenciais, o que poderá levar o trabalhador a tomar choques fatais.

4.8 Adequação normativa

Os serviços executados em equipamentos elétricos vêm passando por uma reformulação de procedimentos em face da revisão da norma NR 10 [2004]. A revisão da norma foi motivada principalmente pelo crescente número de acidentes com trabalhadores de empreiteiras e concessionárias de energia elétrica. A norma NR 10, elaborada pelo Ministério do Trabalho em 2004, obriga todas as empresas a treinarem, numa primeira fase, seus trabalhadores de área de risco, até o final de 2007. A segunda fase do treinamento exigida pela NR 10, também obrigatória, deve ser concluída até o final de 2008. É importante ressaltar que, para habilitar os trabalhadores a executarem serviços nas instalações elétricas, é condição indispensável que sejam aprovados no treinamento previsto na NR 10.

A norma referenciada tem requisitos rigorosos para permitir a realização de serviços em áreas de risco. Analisando a utilização do *kit* anti-indução à luz da NR 10 podem-se identificar os itens mais importantes que devem ser atendidos:

Item 10.2.4, letra “e”:

resultados dos testes de isolamento elétrica dos equipamentos de proteção individual e coletiva;

Item 10.2.5, letra “b”:

certificações dos equipamentos de proteção individual e coletiva;

Item 10.2.9.1:

Nos trabalhos em instalações elétricas, quando as medidas de proteção coletiva forem tecnicamente inviáveis ou insuficientes para controlar os riscos, devem ser adotados equipamentos de proteção individual específicos e adequados às atividades desenvolvidas, em atendimento ao disposto na NR10;

Item 10.4.5:

Para atividades em instalações elétricas deve ser garantida ao trabalhador iluminação adequada e uma posição de trabalho segura, de acordo com a NR 17 – Ergonomia, de forma a permitir que ele disponha dos membros superiores livres para a realização das tarefas. [BRASIL, 2004, grifo nosso].

No projeto, construção e testes do *kit* anti-indução, os itens acima relacionados foram considerados.

4.9 Síntese do capítulo

No início deste capítulo descreveu-se o estudo teórico e os requisitos necessários ao dimensionamento dos protótipos de dispositivos para mitigação das descargas.

As informações do levantamento de campo e os aspectos de segurança discutidos no capítulo três também foram considerados na definição das características dos protótipos. Mais de quatro modelos diferentes de protótipos foram construídos para serem ensaiados e validados em laboratório antes dos testes de campo em situação real típica de exposição.

Para testar e validar os protótipos, foi montado arranjo com barra energizada como fonte do campo elétrico e disponibilizados instrumentos para as medições de campo elétrico, tensão e corrente. Esta infra-estrutura, montada no LEAT, utilizando-se um manequim articulável para simular o corpo humano em diferentes posições de trabalho, possibilitou uma avaliação preliminar confiável dos protótipos, além de uma investigação mais aprofundada dos parâmetros de interesse dos efeitos de exposição ao campo elétrico descritas nos próximos capítulos.

Os primeiros protótipos foram testados nas subestações nas situações mais críticas de exposição e se mostraram funcionais e efetivos na eliminação das descargas eletrostáticas. Após os ensaios de campo nos protótipos, foram fabricados comercialmente os dispositivos que foram novamente ensaiados.

De posse dos dispositivos agora em forma de um *kit* anti-indução, composto de pulseira e clipe de cintura, foi realizada a etapa de implantação para as equipes de manutenção da CEMIG, constando de treinamento teórico e prático sempre realizado numa subestação onde se mediu campo elétrico e tensão pessoa-terra, com e sem o uso de dispositivo. A parte prática do treinamento foi determinante na conscientização dos trabalhadores quanto à efetividade e importância do uso dos *kits*.

Ao final do processo de implantação, elaborou-se uma especificação técnica para subsidiar a aquisição de forma padronizada e garantir a qualidade dos *kits*. Elaborou-se, em conjunto com as equipes, uma instrução com os procedimentos de utilização, bem como medidas complementares, limitações e restrições de uso.

Com os dispositivos anti-indução incorporados à metodologia de trabalho, verificou-se a possibilidade de utilização da pulseira para se avaliar o valor do campo elétrico

a partir da medição da corrente de fuga. O dispositivo desenvolvido e validado para tal é descrito no capítulo cinco.

5 DISPOSITIVO DE AVALIAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO NÃO-PERTURBADO

Os *kits* anti-indução, apresentados no capítulo quatro, foram bem aceitos pelas equipes de manutenção, pois se mostraram efetivos na eliminação das descargas eletrostáticas. Durante o período de implantação, surgiram muitos questionamentos sobre os limites recomendados de exposição de campo elétrico e sua regulamentação em face da implantação da NR 10 [2004] e dos eventuais riscos associados ao uso contínuo do *kit* em jornadas de trabalho.

Atualmente a ICNIRP, recomenda [1998] os limites de exposição ocupacional e público em geral. No Brasil, para o setor elétrico, temos a NBR 15415 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 e 60 Hz que está em vigor desde 30 de novembro de 2006. A norma NR-10 não estabelece limites quanto aos níveis de referência para exposição ocupacional, porém, resguarda-se quanto a estes limites no seu item 10.1.2: “[...] observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis”. [BRASIL, 2004].

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, identificou-se que seria oportuno criar um dispositivo, usando o próprio *kit* anti-indução, para avaliação do campo elétrico não perturbado, durante serviços em subestações de alta-tensão, tema central e descrito em detalhes neste capítulo.

5.1 Dispositivo de avaliação de campo elétrico não perturbado

As medições de campo elétrico não perturbado requerem medidores de custo elevado, estimado em US\$ 50.000.00, o que inviabiliza o uso destes medidores para análise e avaliação de condições adequadas e seguras de exposição a campos elétricos, **como rotina**, para realização dos trabalhos.

A teoria apresentada no capítulo dois e a experiência adquirida nos ensaios de protótipos em laboratório nos permitiram especular sobre uma provável correlação de campo elétrico não perturbado – E_0 e a corrente I_{CC} que circula através da pulseira utilizada pelo trabalhador, considerando-a como um dispositivo já incorporado à rotina do trabalhador. Se obtida esta correlação, vislumbrava-se um dispositivo de medição simples e de baixo custo para avaliação do campo elétrico não perturbado.

Para viabilizar esta investigação, a idéia foi realizar um conjunto de medições de campo elétrico não perturbado em laboratório e mantida esta mesma configuração de arranjo, repetir para os mesmos pontos do conjunto medição de corrente de circulação I_{CC} num trabalhador com um micro amperímetro em série com a pulseira. As medições são detalhadas no item 5.2.1 deste capítulo.

5.1.1 Medições em laboratório

Na busca de subsídios para criação de dispositivo para avaliação de campo elétrico não perturbado foram efetuadas medições no LEAT da UFMG, utilizando a infraestrutura criada na etapa de desenvolvimento de protótipos do *kit* anti-indução.

Foram efetuadas medições de campo elétrico, tensão e corrente circulação I_{CC} num voluntário humano, em diferentes posições, e em diferentes níveis de tensão aplicada. Os resultados das medições serviram de base para estabelecer uma correlação entre a corrente, o campo elétrico e a tensão do corpo humano para a terra. O estabelecimento de um valor empírico, ou uma faixa de valores, permitirá calcular o valor do campo elétrico que o trabalhador estará submetido a partir da medição da corrente circulando pela pulseira que estiver usando.

5.1.1.1 Recursos utilizados

- § ponta de prova de alta impedância;
- § uma pulseira resistiva (idêntica a do *kit* anti-indução);
- § micro amperímetro com caixa de blindagem metálica;
- § multímetro digital;
- § medidor de campo elétrico e
- § osciloscópio.

Além dos recursos materiais, foi necessário um voluntário humano para usar a pulseira resistiva e possibilitar a medição de corrente e tensão. O arranjo utilizado para medição de tensão e corrente de circulação I_{CC} é ilustrado na figura 5.1.

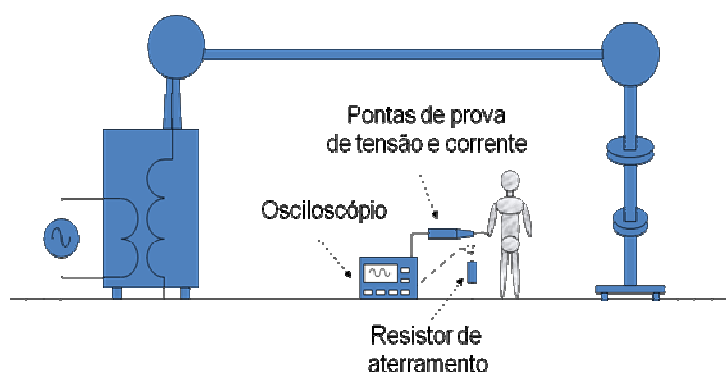


FIGURA 5.1 – Arranjo para medição de tensão e corrente.

De acordo com o guia IEEE [2008], as medições de campo elétrico não perturbado devem ser feitas a um metro do solo e o campo deve ser o mais uniforme possível. A figura 5.2 ilustra o arranjo modificado para medição do campo elétrico.

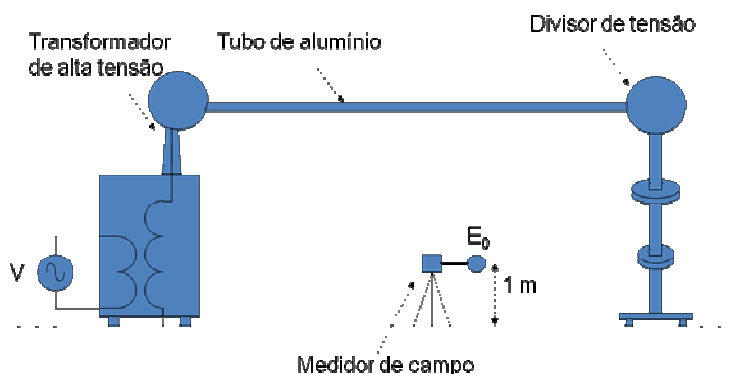


FIGURA 5.2 – Arranjo modificado para medição do campo elétrico E_0 .

5.1.1.2 Organização das medições

Uma matriz de posições foi demarcada no piso do LEAT, para assegurar que as medições de campo elétrico e corrente de circulação I_{CC} fossem feitas o mais aproximado possível nas mesmas posições. A figura 5.3 ilustra a matriz de posições.

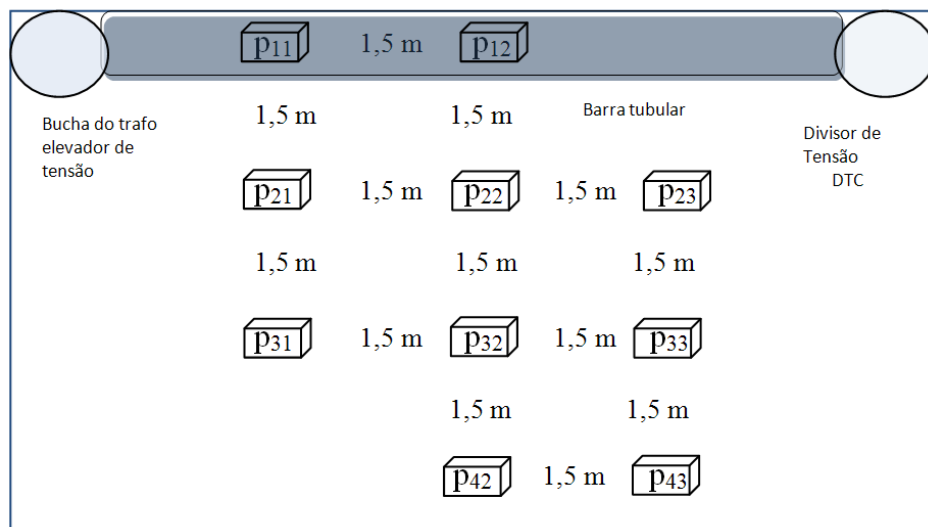


FIGURA 5.3 – Vista de topo do arranjo - Posicionamento dos pontos de medições

Algumas considerações sobre a estratégia e a organização das medições se fazem necessárias. São elas:

- § as esferas de equalização da bucha do transformador elevador e do divisor de tensão capacitivo (DTC), de acordo com o diagrama da figura 5.3 para melhor identificação durante as medições;
- § o eixo de simetria das medições está alinhado com o barramento entre esferas de equalização da bucha do transformador elevador e do DTC. A linha um da matriz está alinhada com o barramento e o ponto p12 está no centro do barramento;
- § não foram efetuadas medições no que seria o ponto p13 pela avaliação de que estava muito próximo do anel corona intermediário do DTC, o que aumentaria riscos durante a medição devido à proximidade com partes energizadas;

- § para otimização do trabalho de medições, assumiu-se uma simetria entre o lado direito do barramento e o lado esquerdo do barramento, parte inferior da figura 5.3, onde foram locados os pontos de medição. Isto é, entende-se que as medições poderiam ser rebatidas para o lado direito que os valores seriam similares. Algumas medições por amostragem foram realizadas para aferição, e confirmaram esta simetria;
- § avaliou-se inicialmente que a distribuição dos pontos da matriz daria uma amostragem significativa da distribuição do campo elétrico;
- § as dimensões do corpo do voluntário são representativas do padrão típico do trabalhador da CEMIG GT – massa de 75 Kg, altura de 1,75m, o que facilitará, em trabalhos futuros, se necessário a introdução de um fator de correção da altura e da área da maior seção transversal do corpo do trabalhador para avaliação do campo elétrico para dimensões diferentes do padrão típico;
- § foi utilizado um micro amperímetro em série com a pulseira resistiva.



FIGURA 5.4 – Vista geral do arranjo do LEAT para medições de campo elétrico

A figura 5.4 mostra uma vista geral do LEAT, nos preparativos para as medições. Observam-se as esferas de equalização do transformador elevador e do DTC, no

alto à esquerda e direita respectivamente. Devido ao fato do DTC possuir anéis equalizadores de potencial ao longo de seu corpo, não foram efetuadas medições próximas a ele, em função do risco de contato com partes energizadas durante a medição.

5.1.1.3 Procedimento para realização das medições

Na primeira etapa foram efetuadas medições de campo elétrico com frequência definida em 60 Hz.

Na etapa seguinte, foram realizadas as medições de corrente de circulação na pessoa e tensão.

5.1.2 Análise dos resultados das medições

5.1.2.1 Medições de campo elétrico não perturbado

As medições foram realizadas seguindo orientações e diretrizes das normas IEEE [2008] e guia da ICNIRP [1998]. Devido à variação linear do campo elétrico com a tensão, foram aplicadas tensões de 50 kV e 75 kV na barra. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1. A aplicação destes dois níveis de tensão na barra agregou maior consistência e maior confiabilidade à massa de dados.

Pelo que foi analisado das medições nos pontos p21 e p31, foi avaliada como já bem caracterizada as medições nesta região e desnecessária a medição em p41.

Tabela 5.1
Medições do campo elétrico a 1 m do piso do LEAT

Tensão na Barra (kV)	Campo elétrico (kV/m)								
	50	75	50	75	50	75			
Posição do Medidor de Campo	P11	5,22	7,92	P12	5,37	8,11	P13	NA	NA
	P21	5,07	7,61	P22	4,98	7,55	P23	5,93	8,98
	P31	4,02	6,14	P32	3,90	5,90	P33	4,04	6,05
	P41	NA	NA	P42	2,80	4,18	P43	2,67	3,96

Pij = Posição conforme diagrama da Figura 5.3

NA: Não aplicável: Posição onde a medição não foi efetuada

A linearidade entre campo elétrico e potencial da barra já havia sido verificada nos ensaios de laboratórios realizados na etapa de desenvolvimento de protótipos. A figura 5.5 mostra o medidor de campo elétrico utilizado, detalhando seu painel durante medição.



FIGURA 5.5 – Vista em detalhe do painel da unidade de aquisição das medições

A figura 5.6 mostra o sensor montado no tripé e posicionado sobre o piso do LEAT para medição de campo elétrico não perturbado.



FIGURA 5.6 – Medição do campo elétrico – Sensor de campo sobre tripé a 1 m do solo

5.1.2.2 Medições de corrente de circulação I_{CC} pela pulseira resistiva

As medições foram realizadas com o voluntário de pé, braços ao lado do corpo em todas elas, mesma posição da figura 5.10. Os resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2
Medições da corrente no voluntário em pé, com bota e tocando o piso

Tensão na Barra (kV)	Corrente I_{CC} (μA)								
	50	75	50	75	50	75			
Posição do Voluntário	P11	77	117	P12	80	121	P13	NA	NA
	P21	76	115	P22	75	112	P23	88	131
	P31	61	92	P32	59	88	P33	60	90
	P41	NA	NA	P42	43	64	P43	40	60

Pij = Posição conforme diagrama da Figura 5.3

NA: Não aplicável; posição onde a medição não foi efetuada

Para avaliação da influência da altura h e da área da seção transversal do corpo da pessoa S , foram realizadas medições de corrente de circulação I_{CC} , com 50 kV na

barra, com a pessoa em pé com os braços abertos para frente e para os lados e na posição agachado, ilustradas nas figuras 5.7 a 5.10 respectivamente. As medições relacionadas com as posições são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3
Medições de corrente iniciais para análise de sensibilidade de h e S

Posição p12 da matriz de medições, sob o centro da barra	Número da Figura	Corrente de circulação I_{CC} [μA]	Campo elétrico não perturbado E_0 medido no ponto p12, sem pessoa, com tensão de 50 kV na barra [kV/m]
Em pé, braços abertos para os lados	5.7	106	5,37
Em pé, braços abertos para frente	5.8	100	5,37
Agachado, braços recolhidos ao lado do corpo	5.9	39	5,37
Em pé, braços ao lado do corpo	5.10	78	5,37

Estas medições iniciais nos permitiram verificar uma forte influência da altura (h) e da área da seção transversal do corpo da pessoa (S) no valor da corrente e conseqüentemente na avaliação do campo elétrico.



FIGURA 5.7 – Medição de corrente, voluntário em pé, braços abertos para os lados

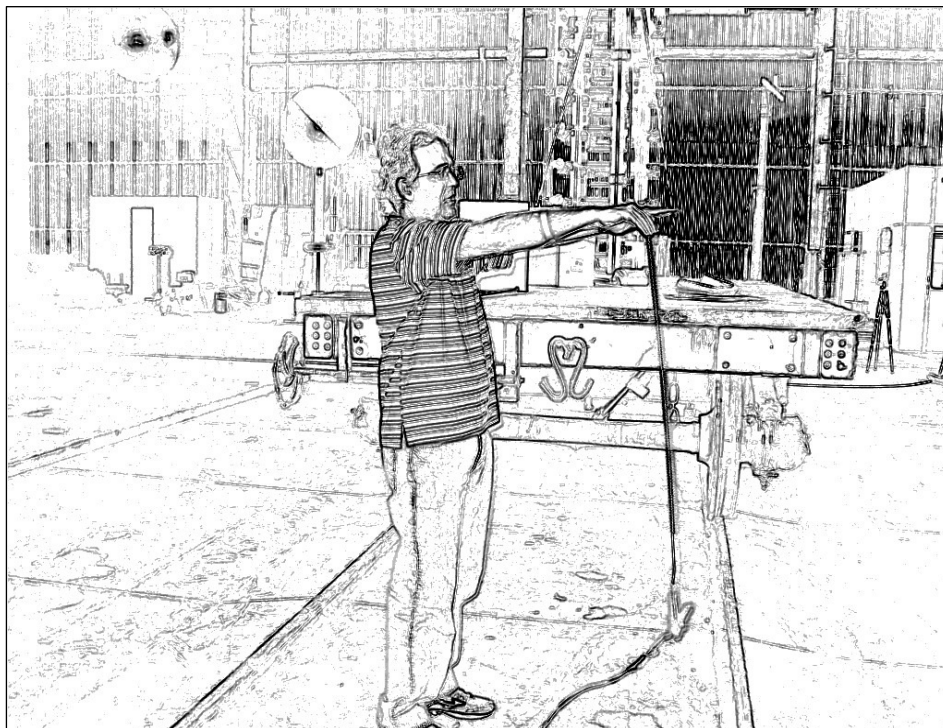


FIGURA 5.8 – Medição de corrente, voluntário em pé, braços abertos para frente



FIGURA 5.9 – Medição de corrente, voluntário agachado



FIGURA 5.10 – Medição de corrente, voluntário em pé, braços ao lado do corpo

Observou-se que a posição com o voluntário de pé, braços ao lado do corpo (figura 5.10) indicou ser mais adequada como posição padrão por ser uma posição natural de equilíbrio e mais fácil de ser reproduzida com vistas à introdução e padronização da metodologia nos trabalhos em subestações. Esta posição de medição é proposta como padrão de calibração de medição de campo elétrico por Deno e Silva [1984].

5.1.2.3 Cuidados e critérios observados na medição da corrente de circulação na pessoa

O micro amperímetro digital foi ligado em série com uma pulseira resistiva. Para evitar indução de correntes e tensões indesejáveis, o micro amperímetro foi adaptado em uma caixa metálica de alumínio, vide figura 5.12, com abertura para

visualizar o *display* e orifício para saída apenas dos cabos blindados de conexão a pulseira e a terra no piso do LEAT. A figura 5.11 ilustra a medição de corrente e posicionamento do voluntário.



FIGURA 5.11 – Medição de corrente de circulação – Posição do voluntário

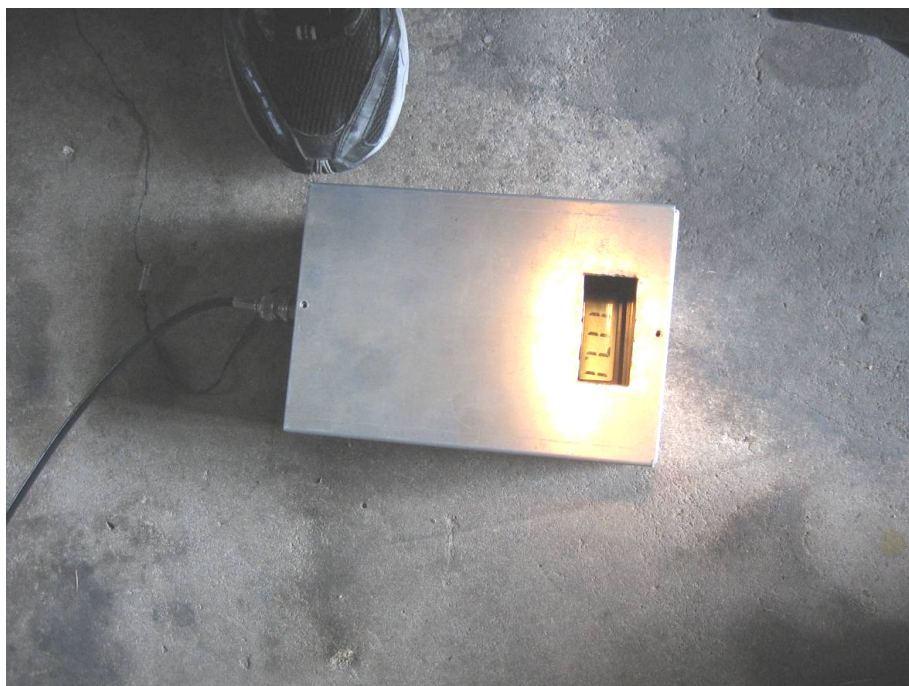


FIGURA 5.12 – Medição de corrente – Caixa metálica de blindagem e cabos de conexão.

5.1.2.4 Medições de tensão com ponta de prova

As medições foram realizadas com ponta de prova de alta impedância e multímetro digital. Da mesma forma que nas medições anteriores, a barra foi energizada com 50 e 75 kV.

Em todas as medições efetuadas, o voluntário estava de pé com os braços ao lado do corpo, conforme figura 5.11. Os resultados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4
Medições da tensão sobre no voluntario em pé, com bota e tocando o piso

Tensão na Barra (kV)	Tensão (kV)								
	50	100	50	100	50	100			
Posição do voluntário	P11	1,65	2,45	P12	1,77	2,62	P13	NA	NA
	P21	1,80	2,46	P22	1,80	2,69	P23	2,27	3,11
	P31	1,33	1,60	P32	1,40	1,95	P33	1,37	1,96
	P41	NA	NA	P42	0,93	1,39	P43	0,87	1,26

Pij = Posição conforme diagrama da Figura 5.3

NA: Não aplicável; posição onde a medição não foi efetuada

5.1.3 Validação da metodologia

Os valores medidos apresentaram boa consistência e coerência com a variação da distância do medidor a eixo de simetria da barra, isto é, medidor a um metro do solo se deslocando perpendicularmente a barra.

Na montagem da matriz de medição, a principal preocupação foi com o campo elétrico. Havia necessidade de que as medições fossem preferencialmente feitas em regiões do arranjo físico com o campo elétrico aproximadamente uniforme e não perturbado.

Os dados das medições de campo elétrico e corrente associados aos pontos da matriz, conforme pode ser visto na Tabela 5.5 – a e b, classificadas respectivamente, em ordem crescente pela posição P_{ij} e em ordem decrescente pelo valor do campo elétrico E_0 .

Tabela 5.5
Medições de campo elétrico não perturbado e corrente de circulação

a) Classificada por posição			b) Classificada por campo elétrico		
Posição	E_0 [kV/m]	I_{CC} [μ A]	Posição	E_0 [kV/m]	I_{CC} [μ A]
p11	5,22	77	p43	2,67	40
p11	7,92	117	p42	2,8	43
p12	5,37	80	p32	3,9	59
p12	8,11	121	p43	3,96	60
p21	5,07	76	p31	4,02	61
p21	7,61	115	p33	4,04	60
p22	4,98	75	p42	4,18	64
p22	7,55	112	p22	4,98	75
p23	5,93	88	p21	5,07	76
p23	8,98	131	p12	5,22	77
p31	4,02	61	p11	5,37	80
p31	6,14	92	p32	5,9	88
p32	3,9	59	p23	5,93	88
p32	5,9	88	p33	6,05	90
p33	4,04	60	p31	6,14	92
p33	6,05	90	p22	7,55	112
p42	2,8	43	p21	7,61	115
p42	4,18	64	p11	7,92	117
p43	2,67	40	p12	8,11	121
p43	3,96	60	p23	8,98	131

Observa-se que há uma proporcionalidade entre o campo elétrico e corrente. Se considerarmos o campo E_0 como função da corrente I_{CC} , temos uma correlação forte e linear, melhor visualizada nos gráficos das figuras 5.13 e 5.14.

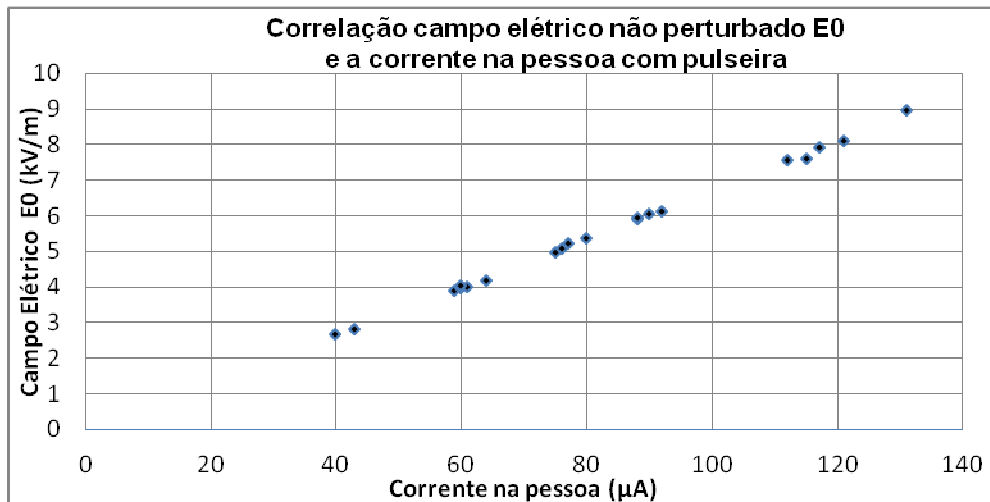


FIGURA 5.13 – Gráfico – Campo elétrico E_0 x I_{CC} corrente

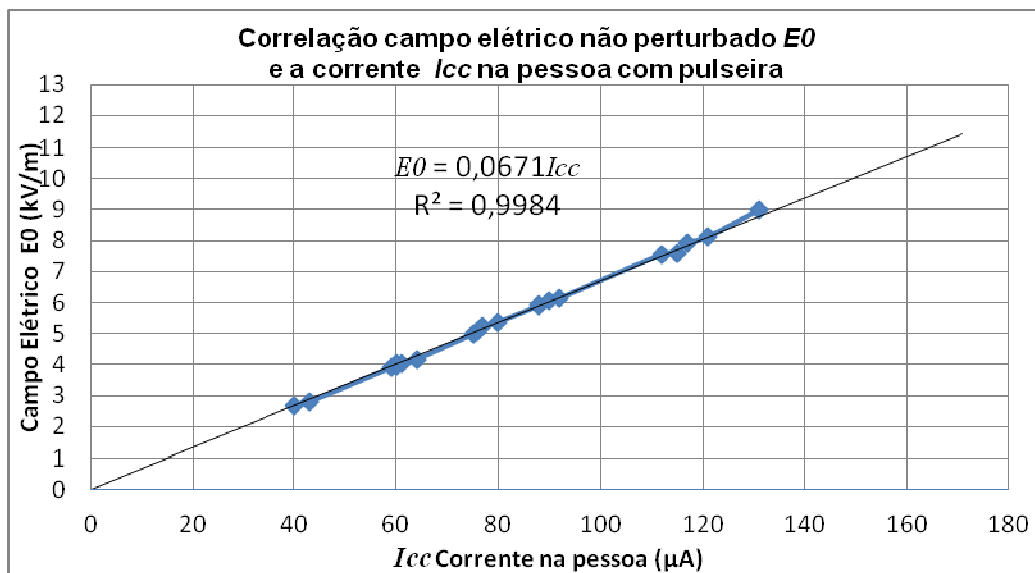


FIGURA 5.14 – Gráfico E_0 x I_{CC} – Campo elétrico em função da corrente - Ajustado

Os dados lançados na figura 5.13 são de valores medidos de E_0 e I_{CC} . No gráfico da figura 5.14 os pontos são os dados medidos e a reta é uma regressão linear dos pares de dados. A equação obtida através das ferramentas do *software* Excel[®] é:

$$E_0 = 0,0671 I_{CC} \quad (5.1)$$

A teoria que relaciona a corrente de circulação na pessoa e o campo elétrico foi objeto de revisão bibliográfica no capítulo dois. De acordo com Deno e Zaffanella [1987] e Deno [1974] podemos afirmar que a corrente de circulação depende da

área da maior seção transversal do corpo que é cortada pelas linhas de campo e da altura da pessoa.

A metodologia permite uma avaliação pontual e instantânea do campo elétrico não perturbado através do seguinte roteiro:

1. posicionar-se no local com exposição ao campo elétrico a ser medido;
2. instalar um micro amperímetro em sua caixa metálica blindada;
3. ligar o micro amperímetro em série com uma pulseira resistiva padronizada do *kit* anti-indução;
4. instalar a pulseira no pulso e fazer sua ligação ao micro amperímetro e deste a terra;
5. efetuar a medição da corrente de circulação na pessoa I_{CC} ;
6. aplicar I_{CC} na equação 5.1 e obter o campo elétrico não perturbado E_0 .

Os valores esperados de corrente de circulação são da ordem de 10 a 300 μ A e os valores esperados de campo elétrico são da ordem de 1 a 20 kV/m, encontrados a um metro do nível da brita para os ambientes típicos de subestações de transmissão da CEMIG. Atipicamente, dependendo da geometria do arranjo, campos elétricos superiores a 20 kV/m foram medidos.

5.2 Estudos de correlação dos dados medidos e resultados obtidos

Neste ponto, é importante fazer uma análise dos dados obtidos e uma discussão crítica da sua aplicabilidade.

5.2.1 Correlação campo elétrico e corrente na pessoa

Os valores medidos de campo elétrico não perturbado e a corrente na pessoa através da pulseira apresentaram um forte grau de dependência e uma correlação linear.

A equação 5.1 estabelece uma correlação linear que permite obter, para um padrão típico do trabalhador (1,75 m e 75 Kg), em subestações, uma avaliação do campo elétrico não perturbado.

Com a equação 5.1 foi possível obter, além do gráfico da figura 5.14, uma projeção e o cálculo de erro entre os valores ajustados pela equação e as medições. Estes dados são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6
Linearização das medições de campo elétrico e cálculo de erro

Posição	E_0 [kV/m]	I_{cc} [μ A]	E_0 ajustado [kV/m]	Erro % E_0 Ajustado x Medido
p43	2,67	40	2,68	0,5 %
p42	2,80	43	2,89	3,0 %
p32	3,90	59	3,96	1,5 %
p43	3,96	60	4,03	1,7 %
p31	4,02	61	4,09	1,8 %
p33	4,04	60	4,03	-0,3 %
p42	4,18	64	4,29	2,2 %
p22	4,98	75	5,03	1,1 %
p21	5,07	76	5,10	0,6 %
p11	5,22	77	5,17	-1,0 %
p12	5,37	80	5,37	0,0 %
p32	5,90	88	5,90	0,0 %
p23	5,93	88	5,90	-0,4 %
p33	6,05	90	6,04	-0,2 %
p31	6,14	92	6,17	0,5 %
p22	7,55	112	7,52	-0,5 %
p21	7,61	115	7,72	1,4 %
p11	7,92	117	7,85	-0,9 %
p12	8,11	121	8,12	0,1 %
p23	8,98	131	8,79	-2,1 %

E_0 ajustado conforme equação 5.1.

Esta relação linear, expressa na equação 5.1, é válida desde que observadas as seguintes condições:

- § a corrente de circulação seja medida num trabalhador com características físicas parecidas com as do voluntário, ou seja, altura de 1,75 m e massa 75 kg;
- § que a posição do trabalhador seja igual àquela em que foram feitas as medições de corrente: pessoa em pé, pés ligeiramente distanciados, braços ao lado e próximos ao corpo;
- § que um micro amperímetro blindado seja utilizado para evitar tensões induzidas e correntes de fuga indesejáveis no circuito de medição.

É importante observar que o valor de campo elétrico obtido é o valor do campo não perturbado, isto é, o campo elétrico predominantemente uniforme e que está presente naquele espaço antes da pessoa entrar no campo. O valor se presta a uma avaliação do nível de exposição a que o trabalhador estará submetido enquanto presente naquela região do espaço.

Considerando a implantação da NR-10 e NBR 15415, respectivamente em junho de 2005 e novembro de 2006, tal metodologia pode se mostrar de grande aplicabilidade para uma avaliação qualitativa do nível de exposição ao campo elétrico em trabalhos em subestações. Esta discussão é levada para o capítulo sete, onde são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

5.2.2 Correlação entre tensão pessoa – terra (V_{CA}) e corrente de circulação (I_{CC})

Os valores medidos de tensão pessoa para terra, V_{CA} , apresentaram uma correlação linear com a corrente de circulação. A figura 5.15 mostra a medição de tensão.

Para assegurar que o valor da resistência de fuga R_{PT} (ou impedância pessoa-terra) fosse elevado, além de usar um calçado seco utilizamos uma placa de fibra de vidro entre o piso e o calçado.

Na medição de tensão os cuidados a serem observados, além da utilização de uma placa de fibra de vidro, são a blindagem do multímetro com papel alumínio e a utilização de uma ponta de prova com impedância de pelo menos 1000 MΩ.

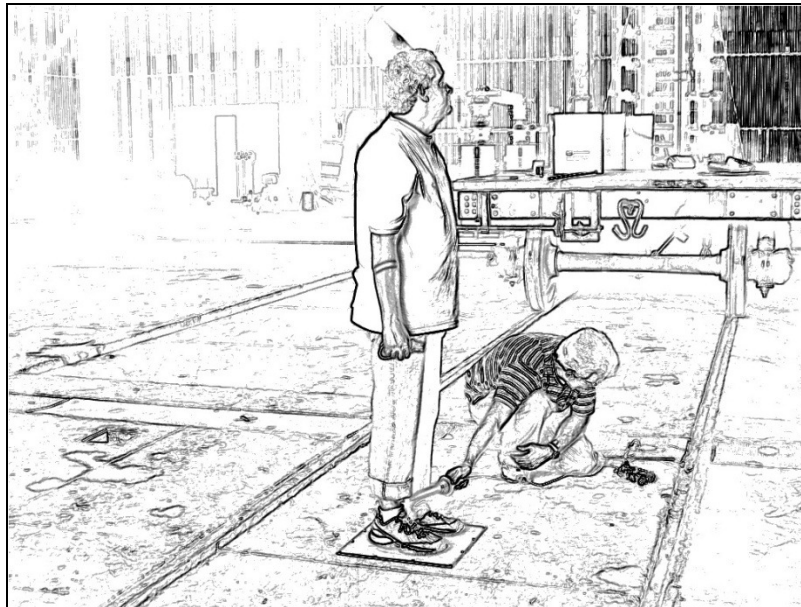


FIGURA 5.15 – Medição de tensão entre pessoa e a terra sobre placa de fibra de vidro

Deno [1974] propõe uma metodologia de cálculo da tensão de V_{CA} a partir da corrente de circulação, tal que:

$$V_{CA} = I_{CC} \cdot Z_{PT} \quad (5.2)$$

A corrente de fuga medida I_f é igual à corrente I_{CC} de circulação, em regime, pois o valor de ambas é determinado pela capacitância da pessoa para terra C_{PT} . A equação 5.2 pode ser melhor compreendida pela análise do circuito da figura 5.16.

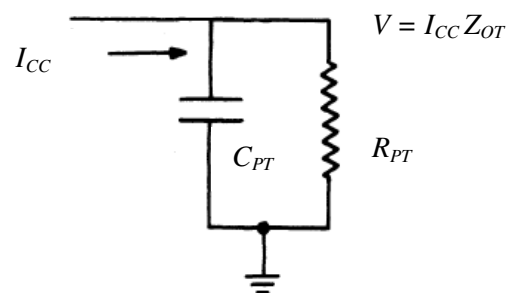


FIGURA 5.16 – Circuito para cálculo da tensão de circuito aberto – V_{CA}
 Fonte: Deno [1974]

O valor típico, segundo Deno [1974], desta capacitância, para uma pessoa com altura de 1,75 m e 75 kg, em função da altura do solado de borracha do calçado é proposto pelo gráfico da figura 5.17.

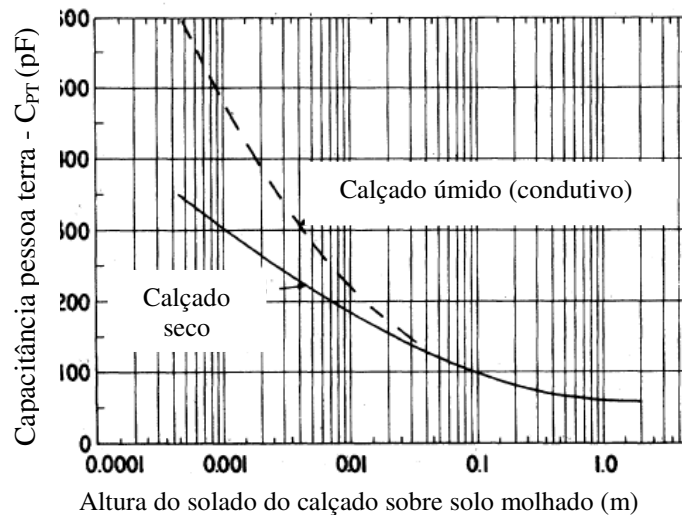


FIGURA 5.17 – Capacitância da pessoa em função da altura do solado
 Fonte: Deno [1974]

Baseado na figura 5.17 e nos valores medidos de V_{CA} e I_{CC} adotamos um valor médio de 115 pF para C_{PT} , levando-se em conta a melhoria no dielétrico obtida com a introdução da placa de fibra, vide figura 5.15.

A Tabela 5.6 correlaciona os valores **medidos** de V_{CA} com valores **calculados** de V_{CA} aplicando a corrente I_{CC} medida e a capacitância C_{PT} de 115 pF ($Z_{PT} = 23 \text{ M}\Omega$).

Os mesmos dados são analisados e exibidos em forma gráfica nas figuras 5.18 e 5.19. Na figura 5.19, é aplicada regressão linear obtendo um valor de correlação $r^2 = 0,954$.

Deno e Zaffanella [1987] propõem um fator de correlação entre a tensão e o campo elétrico, na faixa de 0,275 a 0,450 m. Como resultado das medições, o valor médio obtido para esta correlação obtido da Tabela 5.7, é apresentado na equação 5.3:

$$V_{CA} = 0,335 E_0 \quad (5.3)$$

Tabela 5.7
Comparativo de tensões medidas e calculadas V_{CA} com I_{CC} e E_0

Posição matriz medição	V_{CA} kV medida	E_0 kV/m medido	V_{CA}/E_0 medidos	I_{CC} (uA) medida	V_{CA} (kV) calculado $V_{CA}=I_{CC} \times Z_{PT}$	Erro V_{CA} calc/med %
p43	0,87	2,67	0,326	40	0,92	5 %
p42	0,93	2,8	0,332	43	0,99	6 %
p32	1,4	3,9	0,359	59	1,36	-3 %
p33	1,37	4,04	0,339	60	1,38	1 %
p43	1,26	3,96	0,318	60	1,38	9 %
p31	1,39	4,02	0,346	61	1,40	1 %
p42	1,39	4,18	0,333	64	1,47	6%
p22	1,8	4,98	0,361	75	1,73	-4 %
p21	1,8	5,07	0,355	76	1,75	-3%
p12	1,77	5,37	0,330	77	1,77	0%
p11	1,65	5,22	0,316	80	1,84	10 %
p23	2,07	5,93	0,349	88	2,02	-2 %
p32	1,95	5,9	0,331	88	2,02	4%
p33	1,96	6,05	0,324	90,00	2,07	5 %
p22	2,69	7,55	0,356	112	2,58	-4 %
p21	2,46	7,61	0,323	115	2,65	7%
p11	2,45	7,92	0,309	117	2,69	9%
p12	2,62	8,11	0,323	121	2,78	6 %
p23	3,11	8,98	0,346	131	3,01	-3 %

Verificou-se que os valores de tensão apresentam erro de no máximo 10%, considerados satisfatórios para estas medições.

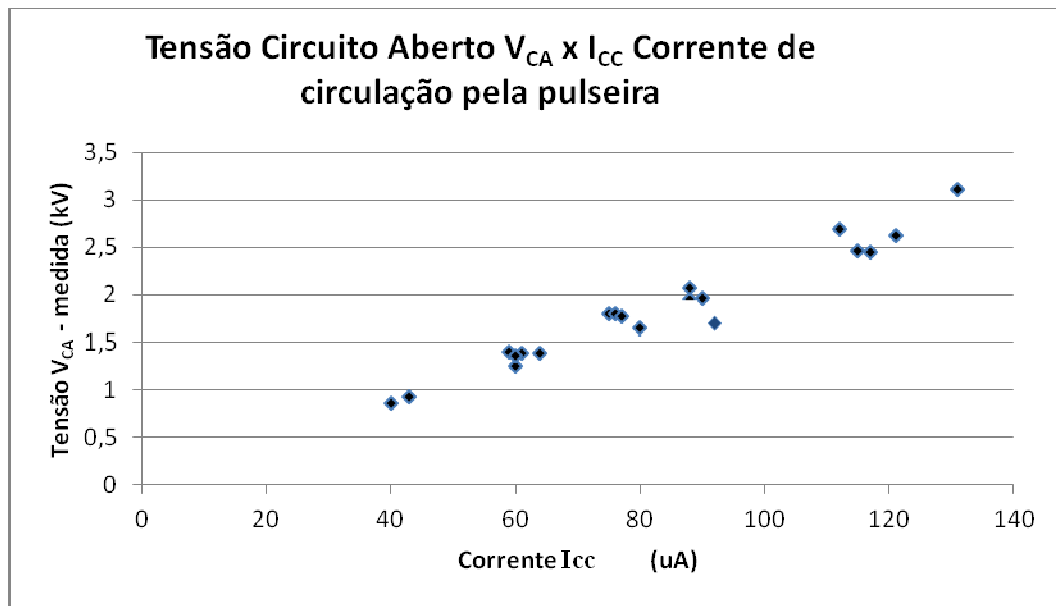


FIGURA 5.18 – Tensão V_{CA} em função da corrente de circulação I_{CC}

Na figura 5.19, é apresentada equação da reta e o fator de correlação, obtidos com o Excel®.

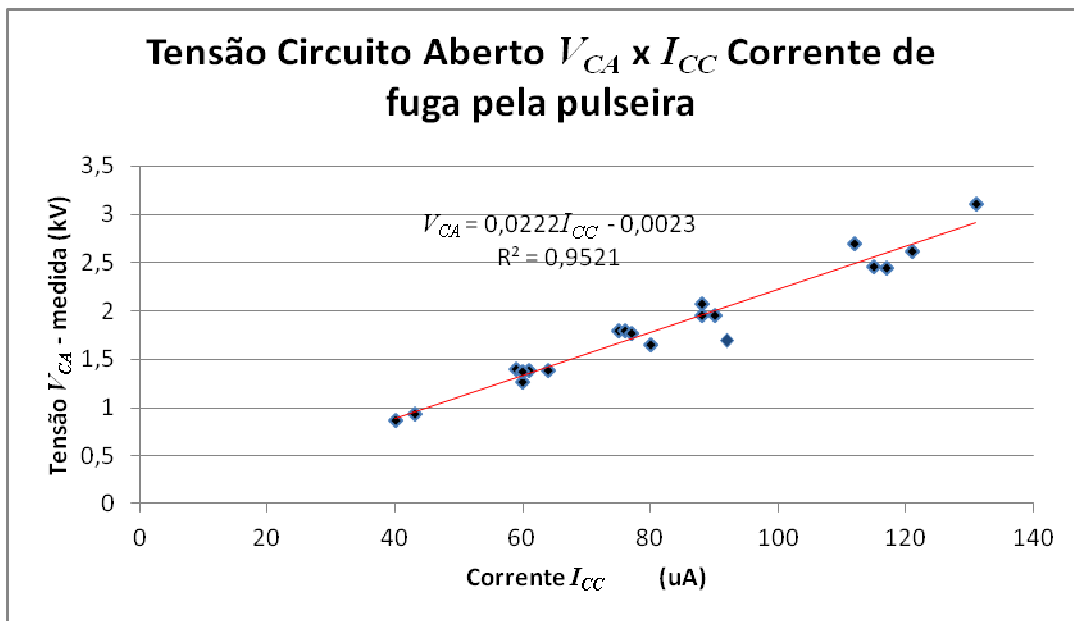


FIGURA 5.19 – Tensão V_{CA} em função da corrente I_{CC} – Ajuste linear das medições

A reta do gráfico da figura 5.19 é o ajuste linear dos pontos.

A medição de tensão apresentou boa consistência, cabendo as seguintes considerações:

- § o multímetro deve ser “blindado” utilizando-se papel alumínio, recurso utilizado para evitar interferências nas medições;
- § a medição de tensão é trabalhosa e mesmo com as medidas de precaução tomadas, é mais susceptível de sofrer interferências do que a medição de corrente;
- § a medição de tensão requer: uma ponta de prova com pelo menos 1000 MΩ de impedância e que o voltímetro e o operador do mesmo devem estar afastados de pelo menos dois metros do ponto de medição, para se evitar interferências.

A medição da corrente de circulação pela pulseira permite obter uma avaliação da tensão entre pessoa e terra com razoável precisão (erros de até 10%).

Em face das dificuldades relatadas sobre a medição de tensão, evidencia-se a medição de corrente como parâmetro de maior interesse no desenvolvimento da metodologia de avaliação do campo elétrico, por ser mais confiável e mais fácil de medir.

5.2.3 Correlação entre corrente de circulação (I_{CC}) medida e fórmula empírica

Deno e Zaffanella [1987] e Deno [1974] propõem uma equação empírica para cálculo da corrente I_{CC} de circulação de uma pessoa para terra, quando em contato com o solo e exposta a um campo elétrico alternado de 60 Hz, apresentada abaixo:

$$I_{CC} = 5,4 \times 10^{-9} \cdot h^2 \cdot E_0 \quad (5.4)$$

Onde:

I_{CC} = corrente de circulação da pessoa para terra (μA)

E_0 = campo elétrico não perturbado medido sem a presença da pessoa (kV/m)

h = altura da pessoa (m)

A equação 5.4 foi obtida empiricamente por Deno e Zaffanella [1987] após experimentos com mais de 115 voluntários, realizados em campo e em laboratório.

Na Tabela 5.8 os valores de corrente I_{CC} medidos no LEAT, são comparados com os valores obtidos através da equação 5.4, usando os resultados das medições de campo elétrico E_0 . O valor de h adotado é de 1,75 m, altura do voluntário.

É importante observar que, para a condição de campo uniforme e não perturbado, é possível obter a corrente de circulação na pessoa somente a partir do valor de campo, **não** há uma dependência direta da área da coletora da carga, equivalente no corpo humano à região da barriga ou do tórax, dependendo da compleição física da pessoa. A vantagem neste caso é que a altura é um parâmetro bem mais fácil de medir do que a seção transversal da pessoa.

Tabela 5.8
Comparativo de correntes I_{CC} medidas e calculadas pela equação 5.4

E_0 [kV/m] medido	I_{CC} medida [μ A]	I calculada $I_{CC} = 5,4 \times 10^{-9} \cdot h^2 \cdot E_0$ [μ A]	Erro % I_{CC} Medida x calculada
2,67	40	44,2	9,4%
2,80	43	46,6	7,7%
3,90	59	64,7	8,8%
3,96	60	65,9	8,9%
4,02	61	67,0	8,9%
4,04	60	65,9	8,9%
4,18	64	70,4	9,1%
4,98	75	82,9	9,5%
5,07	76	84,0	9,5%
5,22	77	85,1	9,6%
5,37	80	88,5	9,7%
5,90	88	97,6	9,9%
5,93	88	97,6	9,9%
6,05	90	99,9	9,9%
6,14	92	102,2	9,9%
7,55	112	124,8	10,3%
7,61	115	128,3	10,3%
7,92	117	130,5	10,4%
8,11	121	135,1	10,4%
8,98	131	146,4	10,5%

A análise dos dados nos permite verificar que os erros ficaram na faixa de 7,7 a 10,5%, o que nos indica uma boa aproximação, considerando o erro intrínseco das medições de corrente e campo elétrico e algum ajuste necessário na equação empírica 5.4.

Como o erro ficou numa faixa estreita, caberia até algum ajuste na constante para reduzirmos o erro a um patamar de 3%.

Uma avaliação mais ampla dos dados da Tabela 5.8 nos permite obter importantes conclusões:

- § as medições de corrente são consistentes, quando comparada às medições de campo elétrico e tensão entre pessoa e a terra. O fator de correlação r^2 encontrado nas regressões está acima de 0,9;
- § demonstra a coerência da equação empírica 5.4, revalidando-a através de medições em laboratórios. Destaque-se que na época em que os estudos foram realizados por Deno e Zaffanella [1987], Deno [1974], Deno [1984] e Deno [1985], nas décadas de 70 e 80, não havia instrumentos comerciais disponíveis para medição de campo elétrico e, no entanto, foram obtidos resultados empíricos muito bons.

5.3 Síntese do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia de avaliação do campo elétrico não perturbado a partir da corrente de circulação na pulseira. Foi possível, também, estabelecer uma boa correlação entre tensão pessoa e terra a partir da medição da corrente de circulação na pulseira. Esta metodologia foi obtida de um amplo conjunto de medições de tensão, corrente e campo elétrico no LEAT. Os dados obtidos e analisados permitiram validar a metodologia como uma ferramenta útil e aplicável para avaliação pontual do campo elétrico. No capítulo seis, este trabalho de avaliação com medições de situações reais é explorado ainda mais, quando é

comparado com os valores obtidos na modelagem computacional bidimensional usando o software *QuickField*[®] [TERA, 2008].

6 SIMULAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CAMPOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES

Os primeiros documentos publicados na década de 70, tais como os de Deno [1974] e Deno [1975] produziram base teórica e formulação empírica para medições e cálculos razoavelmente precisos das correntes e tensões induzidas.

Os estudos mais recentes sobre os efeitos da exposição humana aos campos elétricos abordam a modelagem através de aplicativos computacionais sofisticados que permitem avaliar os principais parâmetros de interesse envolvidos. Usam modelos muito elaborados do corpo humano e recursos de avaliação da densidade de corrente em partes específicas do corpo.

Em suma, o que antes era obtido com experimentos físicos na condição real de exposição, para se chegar a valores, tabelas e formulações empíricas hoje é obtido através de simulação complexa, obtendo valores mais precisos.

O propósito deste capítulo é apresentar algumas das ferramentas existentes para modelagem das situações físicas do trabalho sob campo elétrico em subestações para um do circuito equivalente, cálculos teóricos e empíricos relacionados a esta modelagem e também uma descrição dos principais recursos de simulação gráfica, proporcionando informação necessária sobre a aplicabilidade de cada abordagem, as vantagens e as limitações de cada uma delas.

Ainda, neste capítulo, no sentido de consolidar os estudos realizados, as medições de corrente, tensão e campo elétrico realizadas em laboratório são comparadas com os resultados das simulações e com as formulações empíricas existentes e as equações obtidas.

6.1 Simulação e modelagem das situações típicas de trabalho

As situações e posições mais comuns das tarefas e atividades em subestações foram levantadas em campo e em conjunto com os trabalhadores da CEMIG – GT no trabalho de desenvolvimento dos *kits* anti-indução, abordado no capítulo quatro.

O levantamento destas configurações mais comuns de trabalho possibilitou retratar com maior fidelidade os parâmetros de interesse envolvidos. O campo elétrico sobre as estruturas das subestações é bem distorcido e não uniforme.

Isso ocorre porque as estruturas metálicas de suporte, de diferentes alturas, blindam o campo ao nível da terra. A intensidade do campo a um metro acima do nível do solo é um parâmetro usual e normalizado, conforme ABNT [2006] e IEEE [2008] para caracterizar a intensidade do campo não perturbado.

Segundo Deno e Zaffanella [1987] é importante observar que até mesmo perto do solo o campo pode ser não uniforme. Ainda assim, a corrente induzida numa pessoa é praticamente proporcional ao campo elétrico a 1 m do solo, tanto quanto ao campo medido a outras alturas. Isto pode ser explicado pelo fato de que o campo medido a 1 m é aproximadamente igual à média do campo entre o solo e o topo da cabeça da pessoa, observação que justifica ainda mais a padronização da medição a 1 m do solo.

As correntes e tensões induzidas dependem diretamente da posição espacial em relação à fonte de campo (barramentos energizados) e do valor da tensão estabelecida no barramento. Quando se precisa modelar o corpo humano, a posição mais comum é a pessoa em pé com os dois pés no chão e com botas isolantes. A modelagem mais simples é a transformação de uma situação típica de trabalho, como ilustrado na figura 6.1, para um circuito equivalente de parâmetros concentrados.

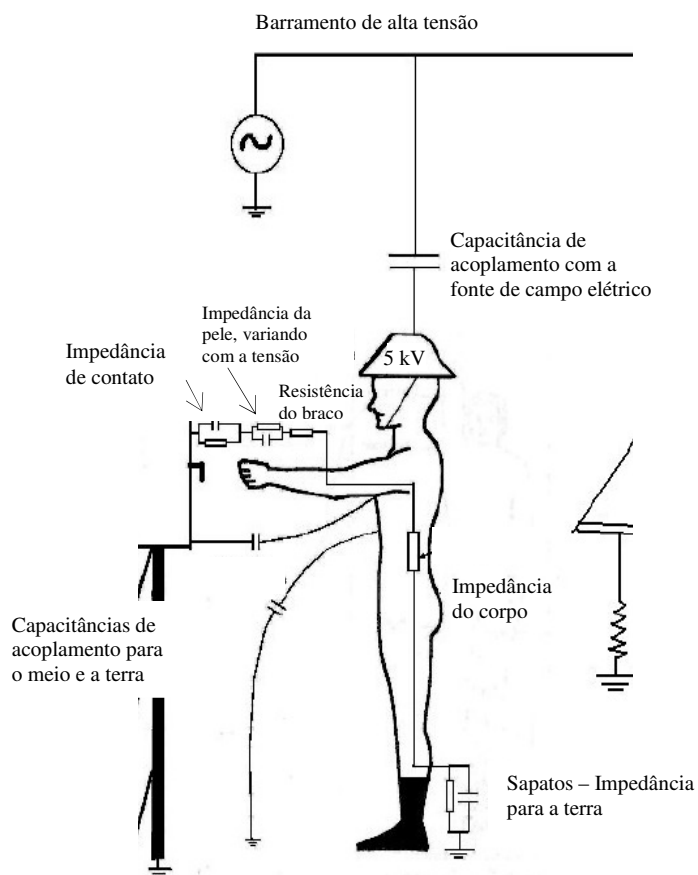


FIGURA 6.1 – Parâmetros elétricos do corpo sob exposição ao campo elétrico
 Fonte: Hamnerius, Y. [2007]

No caso de circuitos, os parâmetros mais significativos são as capacitâncias de acoplamento entre pessoa e a fonte de campo e pessoa e terra. A capacitância entre pessoa e a fonte de campo é determinante no estabelecimento da diferença de potencial entre pessoa e demais objetos no ambiente. A capacitância para terra, considerando o uso do calçado, tem um valor comum proposto pela literatura de 100 a 200 pF, conforme Deno e Zaffanella [1987], Deno [1974] e Jonassen [1998].

Um parâmetro de interesse também é a impedância (resistências e indutâncias dos tecidos) do corpo com valores típicos de 500 a 1000 Ω . A impedância de contato e da pele podem ser entendidas como de mesma natureza, pois são predominantemente resistivas e de baixo valor ôhmico e, dependendo da análise, podem ser desconsideradas. A Tabela 6.1 ilustra os valores típicos dos parâmetros do corpo humano adotados na simulação.

Tabela 6.1
Parâmetros do corpo humano adotados nas simulações

Descrição	Unidade	Faixa	Valor típico adotado
Capacitância do corpo para a terra (pessoa com calçado isolante)	pF	100 a 200	120 pF
Resistência do corpo	Ω	500 a 1000	1000 Ω
Indutância do corpo	μH	0,4 a 2,0	1,0 μH
Capacitância do braço	pF	2 a 10	10 pF
Resistência do braço	Ω	20 a 200	100 Ω
Indutância do braço	μH	0,05 a 0,2	0,1 μH

Fonte: Xiaoying *et al.* [2007]

6.2 Modelagem de descargas eletrostáticas por circuito equivalente

Uma boa estratégia para se realizar uma simulação é identificar claramente qual o parâmetro de interesse e qual grau de simplificação pode ser adotada sem perder de vista a qualidade requerida para a análise.

O procedimento padronizado de utilização dos *kits* anti-indução descrito no capítulo quatro propõe, como recomendação complementar, que todos os objetos metálicos, que possam ser tocados pelos trabalhadores, tenham seus potenciais equalizados, ou seja, aterrados, como condição fundamental para que os dispositivos anti-indução sejam efetivos na eliminação total das descargas eletrostáticas.

Assim, considerando uma rotina padronizada de trabalho de equipes de manutenção, em que os objetos metálicos estão equalizados e não há neles potencial elétrico flutuante, o nosso objetivo pode se concentrar em usar a modelagem por circuito equivalente para calcular as correntes induzidas na pessoa na fase disruptiva da descarga.

6.2.1 Corrente em regime transitório ou fase disruptiva

Quando se estuda o fenômeno de descarga eletrostática originada por campos elétricos de 60 Hz, é necessário analisá-lo em duas etapas distintas: a corrente no momento da disrupção do arco através do ar entre a ponta do dedo e a ferragem da estrutura, por exemplo, e a corrente subsequente em regime permanente.

A corrente de disrupção ou de descarga, pode ser modelada como um circuito relativamente simples com R, C e L usando o programa de análise de transitórios *ATP Draw*[®] [PRIKLER; HØIDALEN, 2002]. Na modelagem usa-se um capacitor com **carga inicial**, capacitor C_{corpo} da figura 6.4 e com valor de tensão calculado pela relação empírica entre E_0 e V_{CA} , na qual V_{CA} está numa faixa de $0,18.E_0$ a $0,45.E_0$, obtida por Deno e Zaffanella [1987] a partir de sucessivos experimentos.

A descarga eletrostática, na fase disruptiva é um fenômeno complexo que envolve disrupção em gases. A norma IEC 61000-4-2 [2001] estabelece parâmetros bem definidos para o circuito e os critérios normalizados os quais foram utilizados para avaliação do valor de pico da corrente, sua forma de onda e a energia envolvida. O circuito para modelagem do corpo humano utilizando os valores típicos da Tabela 6.1 e propostos por Hendrikx [2000] é ilustrado na figura 6.2.

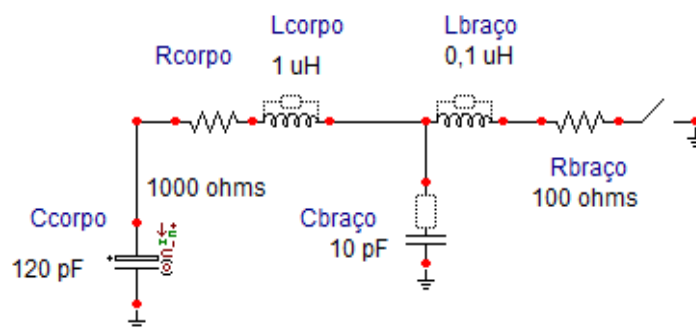


FIGURA 6.2 – Modelagem no *ATP Draw*[®] da fase disruptiva da descarga

O circuito contempla o corpo humano e um de seus braços tocando com o dedo em um objeto metálico aterrado. A disrupção foi modelada considerando condições

normais de temperatura, umidade e pressão atmosférica e os valores típicos dos parâmetros do corpo humano, conforme Tabela 6.1.

A disrupção ocorre pelo ar através da digital do indicador da pessoa. A tensão foi calculada a partir de um campo de 20 kV/m, conforme DENO e ZAFFANELLA [1987] obtendo-se um valor de 7071 V – crista.

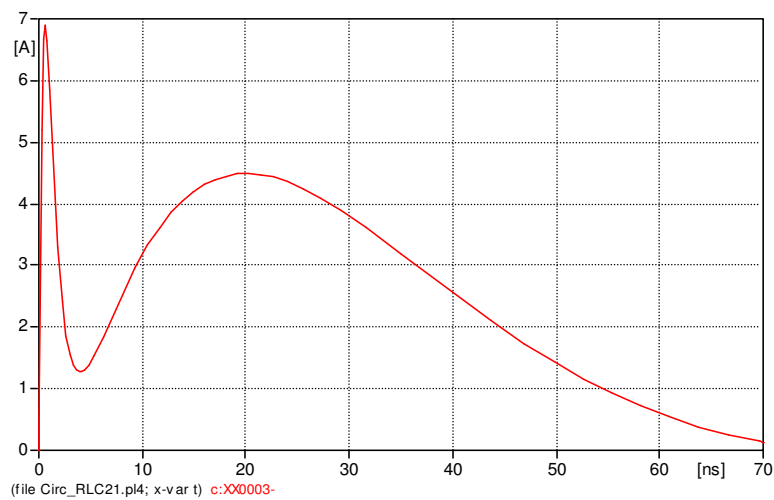


FIGURA 6.3 – Corrente total na fase disruptiva no corpo (circuito da Figura 6.2)

A figura 6.3 ilustra a corrente total no corpo e pelo dedo, após ser atenuada pela indutância e resistência do corpo. O valor de pico da corrente depende do valor de pico da tensão e é atenuada pela indutância do corpo.

A modelagem apresentou um tempo de frente de 0,6 ns e valor de pico de corrente de 6,8 A, coerentes com valores encontrados na literatura de Hendrikx [2000]. As formas de ondas obtidas, figuras 6.3 e 6.5, apresentam se coerentes com as formas típicas e padronizadas apresentadas por Hendrikx [2000] e Xiaoying *et al.* [2007].

A forma de onda normalizada, já apresentada no capítulo 3 é repetida na figura 6.4, para facilitar a comparação com a figura 6.3 e permitir uma qualificação da simulação obtida.

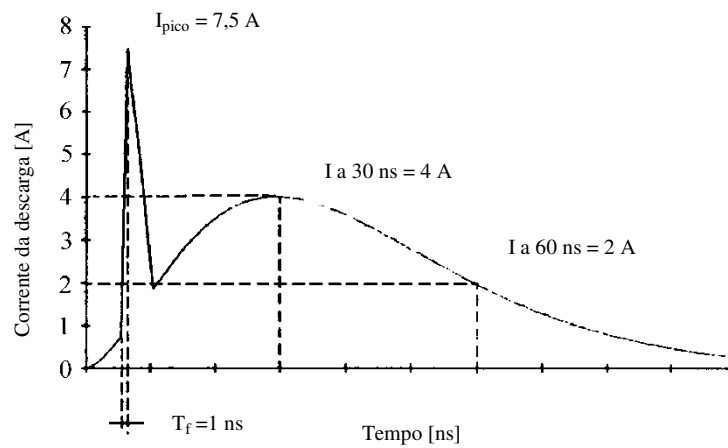


FIGURA 6.4 – Forma de onda de corrente para descarga eletrostática – Fonte: adaptada de Okoniewska; Stuchly; Okoniewski [2004]

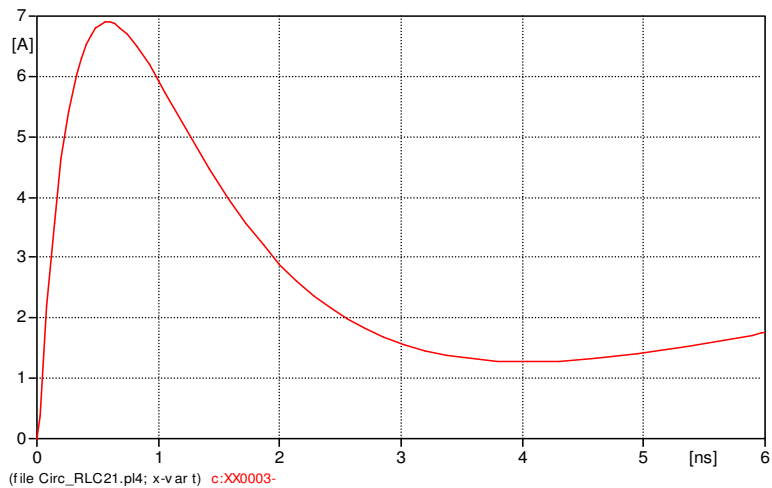


FIGURA 6.5 – Detalhe ampliado do pico da corrente e seu tempo de crescimento

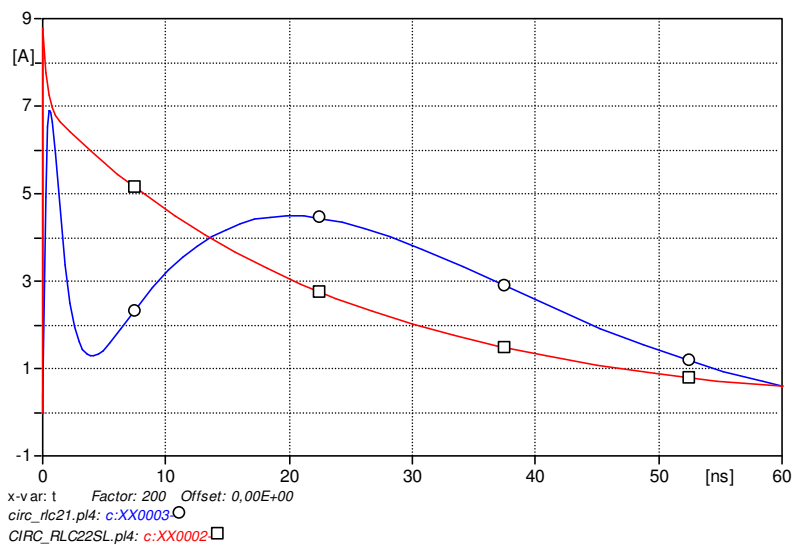


FIGURA 6.6 – Gráfico com formas de ondas de corrente - com e sem indutâncias

A inserção das indutâncias no circuito provoca uma diminuição na taxa de crescimento da corrente e também uma redução no seu valor de pico, conforme Huang; Liu, Li [1997]. A figura 6.6 compara as formas de ondas da corrente de pico nas duas situações com e sem indutância.

Observamos na curva com marcador quadrado (\square), circuito da figura 6.2 sem indutâncias, que o valor de pico e a taxa de crescimento são mais elevados. A curva com marcador redondo (\circ) refere-se ao circuito da figura 6.2 completo, ou seja, com todas as indutâncias consideradas.

6.3 Simulação gráfica com *Quick Field*[®] – cálculo de campo

A simulação computacional tem o diferencial de permitir uma rápida avaliação de sensibilidade de forma gráfica mas, nem sempre apresenta a melhor relação trabalho/benefício.

As simulações realizadas utilizando o software de simulação computacional bidimensional *QuickField*[®] [TERA 2008], possibilitam uma avaliação crítica de quando uma simulação computacional de fato é necessária ou se uma abordagem convencional, com modelagem de circuitos e cálculos com fórmulas empíricas pode levar a resultados satisfatórios com os ganhos da simplificação.

Nas simulações realizadas nesta dissertação, foi utilizada uma versão profissional do *QuickField*[®]. O caso foi modelado na ferramenta de análise eletrostática. O arranjo da figura 6.7, utilizado nos ensaios com protótipos realizados no LEAT foi modelado no *QuickField*[®].

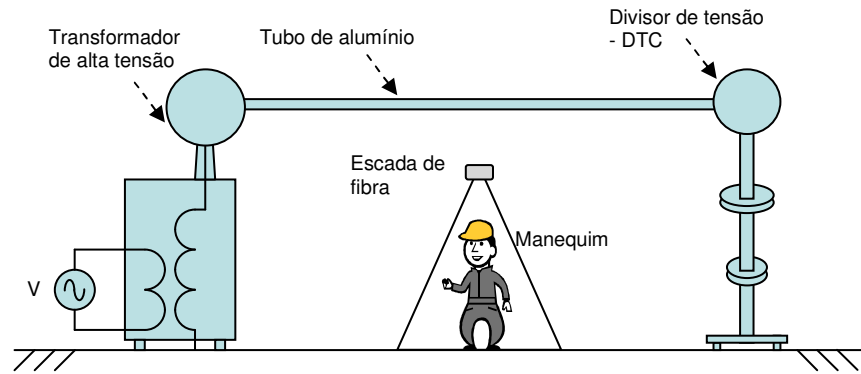


FIGURA 6.7 – Arranjo montado para ensaios no LEAT

A figura 6.8 ilustra o caso resolvido com as linhas equipotenciais e distribuição do campo elétrico ao longo da altura do plano. Observando a escala graduada, verificamos que junto à cabeça do manequim, e sob a bota, os campos são acentuadamente mais elevados.

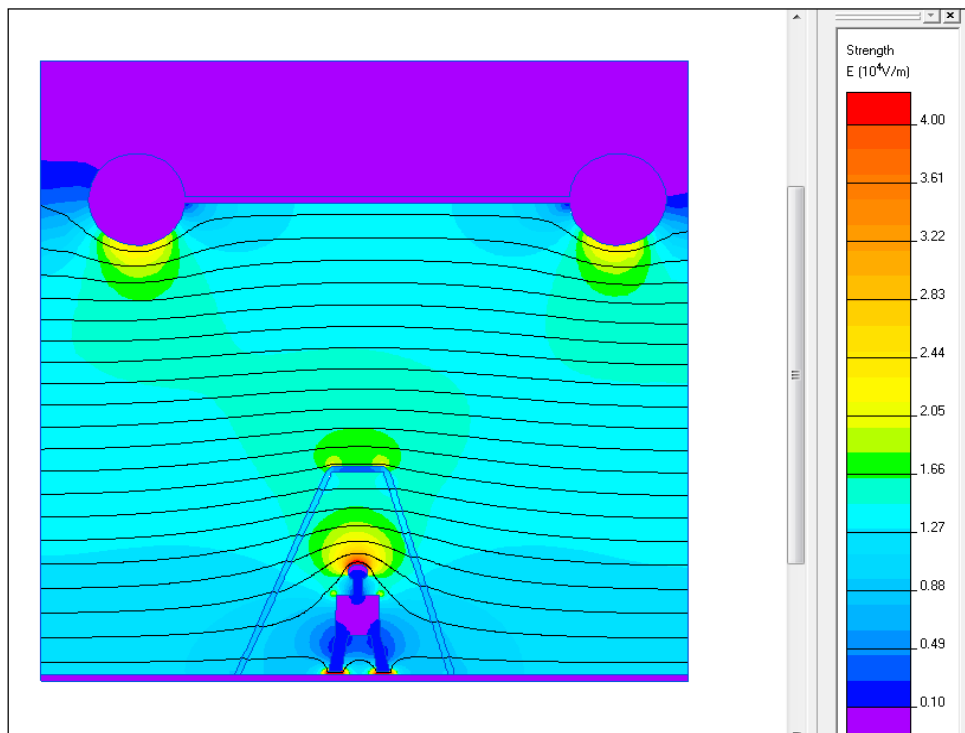


FIGURA 6.8 – Visualização da solução com graduação de **E** - campo elétrico

6.4 Comparação de simulações e medições – análise dos resultados

Com o objetivo de disponibilizar a informação necessária sobre a aplicabilidade das ferramentas apresentadas é importante agora uma discussão sobre os resultados obtidos e comparação das vantagens e limitações destas ferramentas.

6.4.1 Modelagem por circuito equivalente

A modelagem convencional pode ser entendida, neste contexto, como o modelamento de uma situação física de exposição, tal como uma posição de trabalho ilustrada na figura 6.2, para um circuito equivalente.

O estudo do fenômeno de descarga eletrostática foi efetuado em duas etapas distintas: a corrente no momento da disrupção do arco através do ar entre a ponta do dedo e a ferragem da estrutura, por exemplo; e a corrente subsequente em regime permanente. Definidas estas etapas da descarga eletrostática em suas fases **disruptiva** e fase de **regime permanente** pode se analisar a fase disruptiva em mais detalhes.

6.4.1.1 Regime permanente

Em regime permanente, a simulação foi aplicada para se conhecer previamente a ordem de grandeza dos parâmetros envolvidos, confirmação dos cálculos teóricos e preparar a infra-estrutura e o arranjo do laboratório, especialmente na fase de desenvolvimento de protótipos de *kits* anti-indução, abordada no capítulo 4.

Os valores **medidos** de campo elétrico e corrente apresentaram valores muito próximos dos **calculados** via modelagem por circuitos, validando a metodologia proposta na literatura de Deno e Zaffanella [1987].

6.4.1.2 Discussão dos resultados das simulações na fase disruptiva

A corrente de ruptura ou de descarga, foi modelada por um circuito relativamente simples, usando o aplicativo computacional de simulação e análise de transitórios *ATPDraw*[®] [PRIKLER; HØIDALEN, 2002] com elementos básicos como resistências, capacitores e indutores. Na simulação da fonte, usou-se um capacitor com uma carga inicial equivalente a tensão V_{CA} calculada a partir do valor do campo uniforme E_0 .

Os resultados obtidos se mostraram muito coerentes com os propostos pela literatura, conforme Deno e Zaffanella [1987], Deno e Silva [1984] e Deno [1975]. A Tabela 6.2 permite uma comparação entre os valores típicos segundo Henrikx [2000] e os resultados obtidos, simulados no *ATPDraw*[®].

Tabela 6.2
Comparação dos parâmetros da corrente disruptiva – **com indutâncias**

Parâmetro	Simulado	Típico	Comentários
Tempo de crescimento da corrente de pico t_c	0,8 a 1,0 ns	0,7 a 1,1 ns	As indutâncias inseridas provocaram redução do tempo de crescimento e também a redução na corrente injetada no corpo.
Valor de pico com V_{CA} de 7,0 kV	6,8 A	7,5 A ou a faixa de 90 a 100 % da corrente calculada	A incorporação no circuito de um ramo equivalente ao braço humano tornou a simulação mais próxima do fenômeno físico real.

Como avaliado na Tabela 6.2 a introdução de indutâncias torna o fenômeno mais aproximado de sua realidade, onde os efeitos de fatos são menos severos do que os simulados.

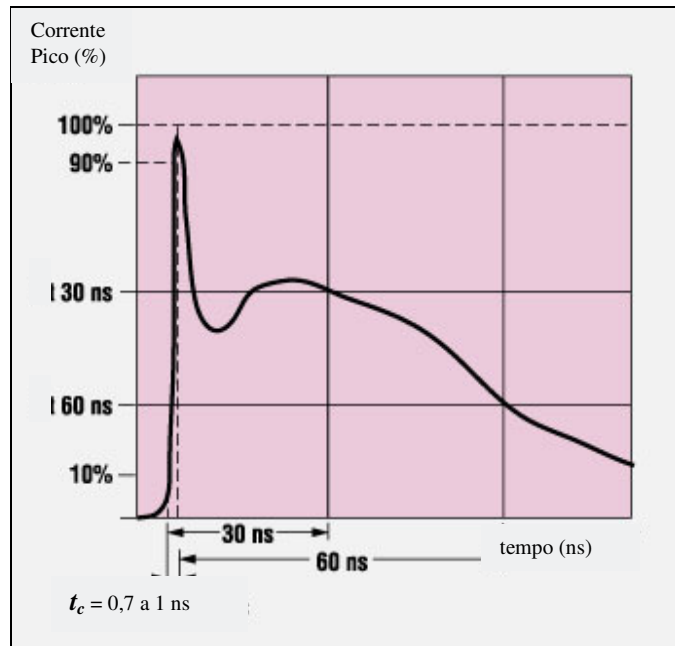


FIGURA 6.9 – Forma de onda normalizada para descarga eletrostática
Fonte: Hendrikx [2000]

A adoção de parâmetros típicos, conforme Hendrikx [2000], ilustrados na figura 6.9, permite uma avaliação mais conservadora do problema, tornando a solução mais confiável e mais segura, o que em muitos casos é mais adequado, justificando esta abordagem.

Na análise da simulação do ATP, na fase disruptiva é possível a obtenção do parâmetro energia, o que pode ser útil como referencial do potencial de desconforto para diferentes níveis de campo elétrico.

6.4.2 Medições em laboratório

Os ensaios realizados no laboratório – LEAT constaram de medição de campos elétricos, tensões e correntes induzidas e se mostraram úteis para validar os cálculos efetuados, avaliar os protótipos permitindo maior segurança na realização dos testes de dispositivos nas subestações.

O campo elétrico foi estabelecido pela energização da barra de alta tensão. A variação da tensão permitia a variação do campo elétrico, medido a 1 m do piso do LEAT, usando medidor de campo.

A Tabela 6.3 apresenta resultado das medições de tensão e campo elétrico utilizando manequim recoberto com papel alumínio. É importante observar que as medições “*TOCANDO O CHÃO*” referem-se ao manequim revestido de papel alumínio, com uniforme e bota isolante de segurança, apoiado como as duas botas tocando o piso do LEAT. Nas medições “*flutuando*” o manequim está suspenso a 15 cm do piso.

Tabela 6.3
Comparação de medições realizadas no LEAT usando manequim

Tensão na barra do LEAT (kV)	Campo Elétrico (E0) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Tensão MEDIDA Manequim flutuando SEM uniforme (kV)	Tensão MEDIDA manequim flutuando COM uniforme (kV)	Tensão MEDIDA manequim com bota TOCANDO O CHÃO (kV)	Relação $V_{CA}/E0$ (MEDIDOS) manequim flutuando COM uniforme (m)
25	3,26	2,18	1,79	1,20	0,37
50	6,45	4,29	3,63	2,25	0,35
75	9,68	6,30	5,50	3,31	0,34
100	12,96	8,43	7,32	4,43	0,34
125	16,16	10,53	9,14	5,54	0,34

A relação entre os valores de tensão aplicada na barra e os valores medidos de campo elétrico é linear, desta constatação podemos concluir não ser necessária a aplicação de diferentes níveis de tensão na barra. Isto reduz o número de medições e o tempo de ensaios em mais de 75%.

Os valores de tensão medidos no manequim, **flutuando acima do solo, com e sem uniforme** apresentaram diferenças acentuadas de até -18%, ainda sem uma explicação coerente com a teoria. Numa avaliação preliminar, a suspeita é de que o acoplamento capacitivo do manequim com o campo elétrico tenha sido muito alterado pela introdução de um dielétrico diferente do ar. Cabe esclarecer que o manequim foi revestido integralmente com papel alumínio (versão **sem** uniforme), e o uniforme foi vestido sobre o papel alumínio (versão **com** uniforme).

Novas diferenças nas tensões medidas surgiram quando o manequim com uniforme foi calçado **com botas e apoiado no chão**. Houve nova redução dos valores de tensão da ordem de -39% em relação às medições com uniforme. Aqui podemos ter uma explicação mais consistente baseada no fato de que introduzimos um acoplamento resistivo. Nesta nova configuração passamos a ter medição não mais do potencial espacial elétrico, e sim da queda de tensão sobre a resistência de isolamento da bota. A rigor, temos uma impedância equivalente do circuito da bota (RC paralelo), como podemos observar na figura 6.1 do início do capítulo.

Segundo Deno e Zaffanella [1987], a relação empírica (V_{CA}/E_0) entre a tensão V_{CA} e o campo elétrico não perturbado E_0 , situa-se na faixa entre 0,18m a 0,45m, o que pode ser comprovado nas medições. Como pode ser visto na Tabela 6.3, observamos que esta relação, para o caso das medições com manequim “*flutuando*”, ficou numa média de 0,35m, coerente com esta literatura.

As medições realizadas no laboratório LEAT, sob condições controladas da uniformidade do campo, associadas às simulações por diferentes metodologias, nos permitiu constatar que a modelagem por circuitos se mostrou consistente, aferiu valores empíricos e normalizados sugeridos na literatura.

Assim, a metodologia de modelagem por circuitos e medição de campo elétrico apresenta resultados com razoável precisão, menores que 10%, mostrando-se como uma metodologia viável para trabalhos de investigação e pesquisa.

6.4.3 Comparação das medições com as simulações gráficas

Os dados obtidos na modelagem computacional usando o software de simulação *QuickField*[®], são comparados com os resultados medidos e apresentados nas Tabelas 6.4 a 6.9 e nos permitem obter constatações e indicações importantes.

Tabela 6.4
 Comparação de campo elétrico medido x simulado

Tensão na Barra (kV)	Campo Elétrico (E_{0M}) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Campo Elétrico (E_{0S}) SIMULADO no QField (kV/m)	Erro E_{0S}/E_{0M} %
25,00	3,26	3,32	1,8
50,00	6,45	6,46	0,2
75,00	9,68	9,69	0,1
100,00	12,96	12,92	-0,3
125,00	16,16	16,16	0
150,00	19,48	19,39	-0,5

Observamos pela Tabela 6.4 que os valores simulados de campo elétrico ficaram muito próximos aos valores medidos, apresentando forte correlação.

Na Tabela 6.5 temos a comparação dos valores de tensão V_{CA} simulados comparados com os valores medidos no manequim com uniforme e bota, sem tocar o piso, flutuando a 15 cm do piso.

Tabela 6.5
 Tensões V_{CA} - medidas e simuladas – Manequim flutuando

Campo Elétrico (E_{0-M}) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Tensão MEDIDA boneco com uniforme e bota flutuando 15 cm V_{CA-M} (kV)	Tensão SIMULADA boneco com bota Flutuando 15 cm V_{CA-S} (kV)	Erro V_{CA-S} / V_{CA-M} %	Relação V_{CA-S}/E_{0-M} (m)
3,26	1,790	1,6727	-6,6%	0,51
6,45	3,630	3,3094	-8,8%	0,51
9,68	5,500	4,9667	-9,7%	0,51
12,96	7,320	6,6496	-9,1%	0,51
16,16	9,140	8,2915	9,3%	0,51

Pela inspeção da Tabela 6.5 verificamos que os valores simulados não **diferem** muito dos valores medidos, com erros inferiores a 10%. Os valores **simulados** de tensão apresentam uma correlação com os valores do campo elétrico medido E_{0-M} , acima da faixa empírica proposta por Deno e Zaffanella [1987]. Portanto, a simulação de valores de tensão no *QuickField*[®] apresenta resultados satisfatórios

para a simulação de tensão, quando manequim está flutuando e não toca o solo. Na utilização do *QuickField*[®] observou-se que variações na forma do manequim não interferiram significativamente nos valores de tensão simulada.

A constatação é de que o *QuickField*[®] usado com a ferramenta eletrostática apresenta bom desempenho, justificando o trabalho inicial na tela de desenhos.

Apesar do *QuickField*[®] não oferecer muitos recursos na criação de objetos, permite a importação bidimensional de objetos criados no *SolidWorks*[®], programa de desenho de objetos de aplicação industrial. Vale observar que esta análise de bom desempenho do *QuickField*[®] é válida (foi testada) para arranjos mais simples com poucos objetos, e em que a abordagem do problema seja essencialmente eletrostática.

Na Tabela 6.6 temos a comparação dos valores de tensão V_{CA} simulados comparados com os valores medidos no manequim com uniforme e bota, tocando o piso.

Tabela 6.6
Tensões V_{CA} - medidas e simuladas – Manequim tocando o chão

Campo Elétrico (E_0) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Tensão MEDIDA Manequim com uniforme e bota tocando o chão – V_{cc-M} (kV)	Tensão SIMULADA Manequim com uniforme e bota tocando o chão – V_{cc-S} (kV)	Erro V_{cc-M} / V_{cc-S} %
3,26	1,20	0,433	-64
6,45	2,25	0,861	-62
9,68	3,31	1,305	-60
12,96	4,43	1,754	-61
16,16	5,54	2,156	-60

Pela inspeção da Tabela 6.6 verificamos que os valores simulados **diferem** muito dos valores medidos, da ordem de 62%.

Para se avançar mais na investigação desta diferença sistemática foram efetuadas simulações com mudanças na geometria do manequim e na constante dielétrica do

material do solado da bota. O material do solado da bota é de poliuretano, cujo valor de permissividade ϵ_r , conforme Hayt [1983] varia de 2 a 3,5. Após as simulações observou-se que variações na forma do manequim e na constante dielétrica da bota, **não** interferiram significativamente nos valores de tensão simulada.

Verificou-se que quando o manequim toca o solo a análise deixa de ser puramente eletrostática, passando a se comportar como uma isolação com corrente de fuga ou seja, há um acoplamento resistivo em questão, pois a bota é representada por um circuito RC paralelo, conforme figura 6.1.

Como forma de complementar as simulações obtidas com o *QuickField*[®] foi calculada uma constante de compensação para incluir o efeito do acoplamento resistivo quando o manequim toca o solo com a bota. Como podemos observar na Tabela 6.7, nas **medições** de tensão com o manequim flutuando e tocando o solo observamos que há uma redução média de 37,9% quando o manequim toca o solo.

Tabela 6.7
Comparação de medições realizadas no LEAT usando manequim

Tensão na barra do LEAT (kV)	Campo Elétrico (E0) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Tensão MEDIDA manequim FLUTUANDO com uniforme (kV)	Tensão MEDIDA manequim com bota TOCANDO O CHÃO (kV)	Redução Tensão MEDIDA TOCANDO x FLUTUANDO manequim (%)	Relação entre tensões MEDIDAS (FLUTUANDO/TOCANDO)
25	3,26	1,79	1,20	33,0	0,670
50	6,45	3,63	2,25	38,0	0,620
75	9,68	5,50	3,31	39,8	0,602
100	12,96	7,32	4,43	39,5	0,605
125	16,16	9,14	5,54	39,4	0,606
MÉDIA				37,9	0,621

A constante de compensação é a média da relação entre as tensões MEDIDAS com o manequim FLUTUANDO e TOCANDO. Multiplicando-se os valores de tensão simuladas no *QuickField*[®] pela constante 0,621, calculado na Tabela 6.7 obtemos os novos valores apresentados na Tabela 6.8, com o manequim TOCANDO O CHÃO.

Tabela 6.8
Tensões V_{CA} - medidas e simuladas compensadas

Campo Elétrico (E_0) MEDIDO no LEAT (kV/m)	Tensão MEDIDA Manequim c/bota tocando o chão – V_{cc-M} (kV)	Tensão SIMULADA boneco com bota Flutuando 15 cm V_{cc-S} (kV)	Tensão SIMULADA COMPENSADA Manequim c/ bota $V_{cc-SC} = V_{cc-S} \times 0,621$ (kV)	Erro V_{cc-M} / V_{cc-SC} %
3,26	1,20	1,6727	1,038	-13,5
6,45	2,25	3,3094	2,054	-8,7
9,68	3,31	4,9667	3,082	-6,8
12,96	4,43	6,6496	4,123	-6,8
16,16	5,54	8,2915	5,146	-7,1

A inclusão da constante de compensação baseada no efeito observados nas medições nos permite obter uma compensação do efeito resistivo quando o manequim toca o solo e possibilita explorar a simulação realizada com o *QuickField*[®] na modelagem de problema eletrostático.

Em resumo o procedimento proposto é efetuar a simulação no *QuickField*[®] com o manequim sem tocar o solo, obter o valor de tensão simulada (V_{cc-S}) graficamente e multiplicar este valor pela constante de compensação, de tal forma que se obtenha a tensão simulada compensada (V_{cc-SC}), expressa na equação 6.1:

$$V_{cc-SC} = V_{cc-S} \cdot 0,621 \quad (6.1)$$

6.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo, as situações típicas de trabalhos em subestações foram modeladas como circuitos equivalentes nas suas fases disruptivas e em regime permanente; também simuladas em duas dimensões como problemas eletrostáticos no *QuickField*[®], posteriormente comparadas com os ensaios realizados no LEAT. As ferramentas utilizadas são avaliadas quanto à sua aplicabilidade. Os resultados de cada uma destas metodologias foram analisados e comparados entre si.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões de todo o processo de pesquisa levado a cabo nesta dissertação, bem como propostas de continuidade e trabalhos futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

Neste trabalho realizou-se uma ampla pesquisa da literatura existente sobre as descargas eletrostáticas, enquanto principal efeito ocupacional do campo elétrico em subestações de alta-tensão. Estudou-se seus fundamentos teóricos diferenciando as fases disruptiva e em regime permanente.

Qualificou-se o nível de desconforto das descargas e os aspectos de segurança envolvidos. Para qualificar o desconforto avaliaram-se os fatores determinantes na sensibilidade à descarga na sua fase disruptiva que são o valor da corrente de pico, sua taxa de crescimento e a velocidade de aproximação ao toque. No aspecto de segurança constatou-se risco de queda por reação involuntária e foram analisados índices estatísticos de acidentes por queda do setor elétrico.

Ainda na ótica da segurança foram discutidos os limites das correntes induzidas analisando as situações em que ocorrem choques elétricos, quando dos trabalhos em subestações. O caso de maior interesse é evitar o choque por contato acidental do corpo com tensões de serviço auxiliar quando fazendo uso de dispositivo de mitigação de descargas.

Dentro do escopo desta dissertação, realizou-se um levantamento de campo junto às equipes de manutenção, a partir do qual foi identificada a necessidade de solução do problema do desconforto causado pelas descargas eletrostáticas induzidas pelo campo elétrico

Todo o desenvolvimento dos dispositivos de anti-indução foi resultado de um trabalho conjunto CEMIG e UFMG, através do qual se realizou estudos teóricos e definiram-se os requisitos necessários ao dimensionamento dos protótipos de dispositivos para mitigação das descargas. As informações do levantamento de campo e os aspectos de segurança discutidos no capítulo 3 também foram

considerados na definição das características dos protótipos. Mais de quatro modelos diferentes de protótipos foram construídos para serem ensaiados e validados no LEAT – Laboratório de Extra Alta Tensão, antes dos testes de campo e em situação real típica de exposição. Para testar e validar os protótipos foi montado no LEAT, arranjo com barra energizada como fonte do campo elétrico e disponibilizados instrumentos para as medições de campo elétrico, tensão e corrente.

Os primeiros protótipos de dispositivos anti-indução foram testados pelas equipes de manutenção nas situações mais críticas de exposição nas subestações e se mostraram funcionais e efetivos na eliminação das descargas eletrostáticas. Após os ensaios de campo nos protótipos, os dispositivos, foram fabricados em sua versão comercial e novamente ensaiados.

De posse dos dispositivos, agora em forma de um *kit* anti-indução, composto de pulseira e clipe de cintura, foi realizada a etapa de implantação para as equipes de manutenção da CEMIG, constando de treinamento teórico e prático, sempre realizado numa subestação, onde se mediu campo elétrico e tensão pessoa-terra, com e sem o uso de dispositivo. A parte prática do treinamento foi determinante na conscientização dos trabalhadores quanto à efetividade e importância do uso dos *kits*.

Ao final do processo de implantação, elaborou-se uma especificação técnica para subsidiar a aquisição de forma padronizada e garantir a qualidade dos *kits*. Elaborou-se em conjunto com as equipes uma instrução com os procedimentos de utilização, bem como medidas complementares, limitações e restrições de uso.

Após prover a solução para eliminar o desconforto das descargas, identificou-se a necessidade de monitorar o campo elétrico nas subestações.

Para atender esta necessidade foi desenvolvida uma metodologia simples para avaliação do campo elétrico não perturbado em subestações, estimando previamente o nível de exposição no local onde os trabalhos serão executados. Esta metodologia usa pulseira resistiva já incorporada como dispositivo de uso individual

dos trabalhadores para mitigação das descargas eletrostáticas, com a qual se mede a corrente de fuga pela pulseira e obtém-se o valor do campo elétrico correspondente aplicando o valor a uma equação.

O desenvolvimento desta metodologia, simples na sua formulação e na aplicação, demandou um grande número de medições de campo elétrico, corrente e tensão no LEAT. Esta etapa somente foi possível graças à utilização da infra-estrutura montada no LEAT utilizando-se um manequim articulável para simular o corpo humano em diferentes posições de trabalho, possibilitando uma investigação mais aprofundada dos parâmetros de interesse dos efeitos de exposição ao campo elétrico: corrente de circulação, tensão e o próprio campo elétrico.

Esta metodologia de avaliação de campo elétrico, de fácil uso e baixo custo, se mostra especialmente interessante para **monitorar** os valores de campos elétricos e qualificação das áreas de risco para atender demandas já identificadas da NR 10, NBR 15415 e também das concessionárias, bem como avaliação do atendimento aos níveis de referência de exposição aos campos elétricos.

Na investigação dos efeitos dos campos elétricos, as situações e posições típicas de execução de atividades de manutenção foram transformadas em circuitos equivalentes de parâmetros concentrados ou em modelagem computacional. Neste sentido, a pesquisa motivou o aprendizado do uso de novas ferramentas computacionais, como *QuickField*[®] e *ATP-Draw*[®] para facilitar o estudo e evitar os cálculos complexos de campos elétricos e correntes induzidas.

O progresso no uso do aplicativo computacional *QuickField*[®], permitiu identificar o potencial (e as limitações) desta ferramenta na investigação de problemas que envolvem simulação em eletrostática. Da mesma forma com o *ATP-Draw*[®], foi obtido refinamento das modelagens da pessoa nas situações típicas de trabalho, permitindo avaliar a severidade das descargas na sua fase disruptiva.

Um resultado final igualmente importante desta dissertação foi a consolidação de uma base de conhecimento, obtida através de revisão da literatura, análise e discussão dos resultados dos ensaios e medições de campo elétrico, além dos

casos simulados nos aplicativos computacionais. A apresentação e discussão destas ferramentas e a disponibilização do conhecimento consolidado é mais uma contribuição para outros estudos na área de interação dos efeitos dos campos elétricos com o corpo humano.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros

Apresentam-se, a seguir, algumas proposições para desenvolvimentos a serem realizados:

- § desenvolvimento e especificação técnica de dispositivo de medição de campo elétrico, baseado na metodologia de avaliação de campo elétrico proposta nesta dissertação;
- § mapeamento de campo elétrico e magnético nas subestações de alta tensão do sistema elétrico, com foco na saúde ocupacional, propondo, onde necessário, medidas de controle e adequação aos valores de referencia da ICNIRP ou do IEEE;
- § estudos mais avançados no aplicativo de simulação computacional *QuickField*[®] ou similares com objetivo de aprimorar as simulações de situações típicas de exposição aos campos elétrico e magnético;
- § prospecção de novos aplicativos de simulação em versões tridimensionais.

Criação de modelos humanos usando ferramentas computacionais para simulação e avaliação da distribuição das densidades de corrente pelas diferentes seções e órgão do corpo humano quando expostos aos campos eletromagnéticos alternados de 60 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15415 – Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz**. Rio de Janeiro, 2006. 41 p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma regulamentadora nº 10: segurança em instalações e serviços em eletricidade. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília: DF, 08 dez. 2004. Seção 1. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras>. Acesso em 26 mai. 2008.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR 17 – Estabelece parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília: DF, 26 jun. 2007. Seção 1. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras>. Acesso em 26 mai. 2008.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR 6 – Equipamento de Proteção Individual. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília: DF, 22 dez. 2006. Seção 1. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras>. Acesso em 26 mai 2008.

CIGRÉ. **Technical brochure 21** – Electrical and Magnetic Field produced by Transmission Systems – Description of Phenomena – Practical Guide for Calculation. 1980.

DENO, D.W. **Calculating electrostatic effects of overhead transmission lines**. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 93, pp. 1458-1471, 1974.

DENO, D. W. **Electrostatic effect induction formulae**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, nº 5, September/October, 1975.

DENO, D. W., SILVA, M. **Method for evaluating human exposure to 60 Hz electric fields**. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984.

DENO, D. W., ZAFFANELLA, L.E. **Field effects of overhead transmission lines and stations**. *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*. Electric Power Research Institute, Palo Alto , Ca, 1987.

EPRI – Electric Power Research Institute. **Transmission line reference book 345 kV and above**. EPRI. Palo Alto, USA, 1975.

FUNCOGE – **Eletrobrás, estatísticas de acidentes no setor elétrico brasileiro – Relatório 2006** – Rio de Janeiro – Brasil, Junho de 2008 - Disponível no site: <<http://www.funcoge.org.br/csst/relat2006>>. Acesso em: 29 jun. 2008.

FUNCOGE – **Eletrobrás, estatísticas de acidentes no setor elétrico brasileiro – Síntese do Relatório 2007**, Rio de Janeiro – Brasil, Junho de 2008 – Disponível no site: <<http://www.funcoge.org.br/csst/relat2007>>. Acesso em: 29 jun. 2008.

GONTIJO, G. M.; PAULINO, J. O.; BOAVENTURA, W. C. Desenvolvimento de dispositivo para controle de choques e descargas eletrostáticas causadas por acoplamento capacitivo em Subestações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2008, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: UFMG / CHESF /SBA, 2008. P. 2-6.

HAMNERIUS, Y. **Uncertainties in assessment of worker exposure of low frequency electric and magnetic fields**. Workshop in Current in Health and Safety Risk Assessment of Work Related Exposure to EMFs. Milan, Italy: february 2007.

HAYT, William H.. **Eletromagnetismo**. 3.ed. RIO DE JANEIRO: LTC, 1983.

HENDRIKX, I. J. Using an ESD-Pulse Validation System for Equipment Evaluation. **Compliance engineering**, vol. 17 no. 3, pp. 196-199, 2000 Annual Reference Guide.

HUANG, J. S.; LIU, S. H.; LI C. P. **The influence of inductance on the ESD current by numerical computation**. III International Conference on Applied Electrostatics, Sanghai 1997.

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields**. Health Physics vol. 74, p. 494-522, April 1998.

INTERNATIONAL ELECTROTECNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-2. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – electrostatic discharge immunity test.** Edition 1.2, Geneva: 2001.

IEEE C95.1-1991 (Approved by ANSI in 1992). **IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz.**, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017. 2002.

IEEE Std1460-2008. **IEEE Guide for the measurement of quasi-static magnetic and electric fields.** The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017. 2008.

IEEE Std644-2008. **IEEE Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines.** The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017. 2008.

IEEE Std80-(1985) 2000. **IEEE Guide for safety in AC substation grounding.** The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017. 2000.

JONASSEN, N. **Human body capacitance: static or dynamic concept?** Proc. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, 1998, pp. 111-117, Reno, NV, USA, June, 1998.

KAUNE, W.T. Introduction to power-frequency electric and magnetic fields. **Environ health perspect.** 1993 Dec;101(Suppl 4):73–81.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High-voltage engineering: fundamentals.** 2nd ed., Oxford, Newnes, 2000.

OKONIEWSKA, E.; STUCHLY, M. A.; OKONIEWSKI, M. **Interactions of electrostatic discharge with the human body.** IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 52, nº 8, August, 2004.

POLJAK, D.; GONZALES, C; PERATTA, A. **Assesment of human exposure to extremely low frequency electric fields using different body models and the boundary element analysis.** Proceedings SoftCOM2006, Split, 2006.

PAUL, Clayton R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, c2006.

PRIKLER, L. HØIDALEN, H. K. **ATPDraw** user's manual. SEfAS TR A4790, ISBN 82-594-1358-2, Aug. 2002. Trondheim, Norway, 2002.

REILLY, J. P.; LARKIN, W. D. **Human sensitivity to electric shock induced by power-frequency electric fields**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-29, nº 3, august, 1987.

TENFORDE, T.S. **Interaction of extremely-low-frequency electromagnetic fields with living systems**. IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong. 1991.

TENFORDE, T.S; KAUNE, W.T. **Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans**. Environmental Health Perspectives Supplements, Volume 101, Supplement 4, December 1993.

TERA Analysis Ltd. QuickField – Finite Element Analysis System; Version 5.1; User's Guide, 2003, Svendborg – Denmark. Disponível: <<http://www.quickfield.com>>. Acesso em 28 jun. 2008.

UNITED Nations Environment Programme / World Health Organization / International Radiation Protection Association. **Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)**. Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 137. 1993.

XIAOYING, Xu; QIONGLI, Li; QINGRONG, Li; WANG, Dinghu. **Study on the Relation of Electrostatic Discharge Parameters**. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'An, China, Aug. 16-18, 2007, pp. 1-721-1-724.

YILDIRIM, H.; KALENDERLI, N. **Computation of electric field induced currents on human body standing under a high voltage transmission line by using charge simulation method**. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.