



**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO  
ABERTO E RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO  
EM TRABALHADORES RURAIS**

Alexandre Felipe Rosalba Filho  
Rodrigo da Costa Martinelli

Brasília, julho 2016

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Engenharia Elétrica



Alexandre Felipe Rosalba Filho  
Rodrigo da Costa Martinelli

# **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM TRABALHADORES RURAIS**

Trabalho de Graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo R.A.X Menezes, UnB/ENE

Brasília, julho 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

ROSALBA FILHO, Alexandre Felipe &  
MARTINELLI, Rodrigo da Costa  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM TRABALHADORES RURAIS [Distrito Federal] 2016. vii, 56 p., 210x297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de Graduação - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Indução eletromagnética.

2. Choque elétrico.

I. ENE/FT/UnB.

II. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM TRABALHADORES RURAIS.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROSALBA FILHO, A. F. & MARTINELLI, R. C., (2016). DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM TRABALHADORES RURAIS. Trabalho de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 56 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Alexandre Felipe Rosalba Filho & Rodrigo da Costa Martinelli

TÍTULO: DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM TRABALHADORES RURAIS.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia

**DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO ABERTO  
E RISCOS DE CHOQUE ELÉTRICO EM  
TRABALHADORES RURAIS**

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva,**  
**UnB/ENE**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Leonardo R.A.X Menezes,**  
**UnB/ENE**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. Franklin da Costa Silva,**  
**UnB/ENE**  
Convidado

Brasília, julho 2016



*Este trabalho é dedicado à minha família e namorada.  
Alexandre Felipe Rosalba Filho*

*Dedico este trabalho primeiramente à Deus, à minha família, aos meus amigos e à  
grande família ENE/UnB por terem me apoiado e acreditado em mim.  
Rodrigo da Costa Martinelli*





# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a minha família e minha namorada pela paciência e apoio, principalmente na reta final desse trabalho.

Alexandre Felipe Rosalba Filho

Agradeço à Deus, por ter chegado até aqui. À minha família, pela paciência e pelo suporte. Aos meus amigos, pelo apoio. A todos do curso com quem pude conviver e a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Rodrigo da Costa Martinelli



*"A imaginação é mais importante que a ciência,  
porque a ciência é limitada, ao passo que  
a imaginação abrange o mundo inteiro."*

*Albert Einstein*



# Resumo

As descargas atmosféricas causam um número considerável de mortes todos os anos no mundo inteiro. As pessoas fazendo atividades ao ar livre são as que mais correm risco durante uma tempestade. Este trabalho tem como objetivo o estudo da propagação de campos eletromagnéticos e a transmissão de potenciais pelo ar e pelo solo, advindos de descargas atmosféricas. Ultimamente, no Brasil, houve um crescimento dos acidentes devido a descargas atmosféricas na zona rural. Por isso esse trabalho também visa avaliar a que riscos estão expostos os trabalhadores de zonas rurais. Para essa análise serão utilizados modelos teóricos e simulações computacionais para verificar as situações de risco, que podem ocorrer durante a execução de tarefas relativas ao trabalho rural. A primeira situação é a principal causa de morte por descargas atmosféricas, a tensão de passo; a segunda é o efeito dos campos eletromagnéticos, gerados pela descarga atmosférica, em um ser humano em campo aberto. Com os resultados dessas análises pretende-se obter maneiras de minimizar os acidentes de pessoas exercendo atividades ao ar livre, um dos grupos com o maior percentual de mortes por descargas atmosféricas no Brasil.

**Palavras-chaves:** descarga atmosférica. trabalho rural. risco. campos eletromagnéticos.



# Abstract

The lightning strike cause a considerable number of deaths each year worldwide. People doing outdoor activities are the most at risk, during a storm. This undergraduate thesis aims to study the propagation of electromagnetic fields and potential transmission by air and soil, coming from lightning. Lately, in Brazil, there was an increase in accidents due to lightning in the countryside. Therefore this thesis aims to evaluate the risks that the farm workers are being exposed. In this analysis will be used theoretical models and computer simulations to verify two situations of risk that may occur during the execution of tasks related to farm work. The first is the leading cause of death by lightning, the step voltage; the second, is the effect of electromagnetic fields, generated by lightning strike, into a human being outdoors. With the results of these analyzes is intended to seek ways to minimize the deaths of people carrying out those activities, since this is one of the groups with the highest percentage of deaths by lightning in Brazil.

**Key-words:** lightning strike. farm work. risk. electromagnetic fields.





# Sumário

	<b>Lista de Ilustrações</b>	<b>XI</b>
	<b>Lista de Tabelas</b>	<b>XIII</b>
	<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>XIV</b>
	<b>Lista de Símbolos</b>	<b>XV</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização do tema	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Organização do trabalho	3
<b>2</b>	<b>EQUAÇÕES DE MAXWELL</b>	<b>5</b>
2.1	Lei de Faraday	6
2.2	Lei de Gauss	7
2.2.1	Lei de Gauss para campos elétricos	7
2.2.2	Lei de Gauss para campos magnéticos	7
2.3	Lei de Ampère	7
2.4	Síntese	8
<b>3</b>	<b>DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>9</b>
3.1	Cumulonimbus	9
3.2	Nomenclatura	10
3.3	Formação do canal da descarga atmosférica	10
3.4	Tipos de descargas atmosféricas	10
3.4.1	Origem	11
3.4.2	Multiplicidade	12
3.4.3	Polaridade	12
3.5	Síntese	12
<b>4</b>	<b>TRABALHO NA ZONA RURAL</b>	<b>13</b>
4.1	Riscos na zona rural	13
4.1.1	Risco de choque elétrico devido a descargas atmosférica	13
4.1.1.1	Elevação da tensão no solo	13
4.1.1.2	Flashover	14

4.1.1.3	Tensão de toque . . . . .	14
4.1.1.4	<i>Streamear</i> . . . . .	14
4.1.2	Demais riscos . . . . .	15
<b>4.2</b>	<b>Prevenção de riscos referente a choque elétrico . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>4.3</b>	<b>Síntese . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>A CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>5.1</b>	<b>Efeitos da corrente elétrica no corpo humano . . . . .</b>	<b>17</b>
5.1.1	Corrente elétrica alternada . . . . .	17
5.1.2	Corrente elétrica contínua . . . . .	19
<b>5.2</b>	<b>Síntese . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>MODELAGEM DO CASO PROPOSTO . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>6.1</b>	<b>Caso proposto . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>6.2</b>	<b>Modelagem . . . . .</b>	<b>21</b>
6.2.1	Elevação da tensão no solo . . . . .	24
6.2.1.1	Tensão de passo . . . . .	25
6.2.2	Campos eletromagnéticos . . . . .	27
<b>6.3</b>	<b>Síntese . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>7.1</b>	<b>Tensão de Passo . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>7.2</b>	<b>Campos eletromagnéticos . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>7.3</b>	<b>Síntese . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>8.1</b>	<b>Perspectivas . . . . .</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>55</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1.2.1–Mortes por raios no Brasil.(ELAT) . . . . .	2
Figura 3.0.1–Tipos de nuvens.(INPE/CPTEC, 2016) . . . . .	9
Figura 3.4.1–Descargas atmosféricas.(MONTAL, 2016) . . . . .	11
Figura 3.4.2–Tipos de descargas atmosféricas.(CIBERNAUTICA, 2016) . . . . .	11
Figura 5.1.1–Gráfico com zonas tempo x corrente alternada . . . . .	17
Figura 5.1.2–Gráfico com zonas tempo x corrente contínua . . . . .	19
Figura 6.2.1–Espaço computacional só com a pessoa . . . . .	22
Figura 6.2.2–Espaço computacional só com a pessoa e barra na posição horizontal . . . . .	23
Figura 6.2.3–Espaço computacional com a pessoa e barra no solo a 40 cm da pessoa . . . . .	23
Figura 6.2.4–Espaço computacional só com a pessoa e barra na posição vertical . . . . .	24
Figura 6.2.5–Comportamento da corrente no solo . . . . .	25
Figura 6.2.6–Circuito equivalente das características externas ao corpo . . . . .	27
Figura 6.2.7–Célula de Yee.(NODA; YOKOYAMA, 2002) . . . . .	30
Figura 6.2.8–Correção na permissividade e permeabilidade. . . . .	33
Figura 7.1.1–Corrente descarregada no solo . . . . .	36
Figura 7.1.2–Tensão gerada no solo . . . . .	36
Figura 7.1.3–Tensão de passo e Limite de Tensão . . . . .	37
Figura 7.1.4–Tensão de passo e Limite de Tensão $100\Omega/m$ . . . . .	38
Figura 7.2.1–Campo elétrico horizontal da referência a 100m do canal. . . . .	40
Figura 7.2.2–Campo elétrico horizontal obtido a 100m do canal . . . . .	40
Figura 7.2.3–Campo elétrico vertical da referência a 50m do canal(ROMERO, 2007) . . . . .	41
Figura 7.2.4–Campo elétrico vertical obtido a 50m do canal . . . . .	41
Figura 7.2.5–Densidade de fluxo magnético da referência a 50 m do canal . . . . .	42
Figura 7.2.6–Densidade de fluxo magnético obtido a 50 m do canal . . . . .	42
Figura 7.2.7–Sinal de corrente utilizado . . . . .	43
Figura 7.2.8–Densidade de fluxo magnético no tempo . . . . .	43
Figura 7.2.9–Derivada da densidade de fluxo magnético no tempo . . . . .	44
Figura 7.2.1–Forma do impulso de corrente utilizada. . . . .	45
Figura 7.2.11–Tensão sobre o ombro da pessoa sem barra . . . . .	45
Figura 7.2.12–Tensão barra horizontal . . . . .	46
Figura 7.2.1–Tensão no ponto de contato com o corpo barra vertical . . . . .	46
Figura 7.2.14–Tensão entre a barra no solo e pessoa a 40 cm . . . . .	47
Figura 7.2.15–Tensão induzida na barra horizontal . . . . .	48
Figura 7.2.16–Tensão induzida na barra vertical. . . . .	48
Figura 7.2.17–Densidade espectral de potência . . . . .	49
Figura 7.2.18–Corrente passando pelo corpo barra horizontal. . . . .	49

Figura 7.2.19–Corrente passando pelo corpo barra vertical. . . . . 50

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Demais riscos relacionados ao trabalho rural . . . . .	15
Tabela 2 – Efeitos sobre as pessoas (percurso mão esquerda ao pé) . . . . .	18
Tabela 3 – Efeitos sobre as pessoas(percurso mão esquerda ao pé) . . . . .	20



# Lista de abreviaturas e siglas

FDTD	Finite difference time domain
MoM	Method of moments
ELAT	Grupo de eletricidade atmosférica
INPE	Instituto nacional de pesquisas espaciais
m	Unidade de distância metro
A	Unidade de corrente Amperes
V	Unidade de tensão Volts
s	Unidade de tempo segundos
$\Omega$	Unidade de resistência elétrica Ohm
T	Unidade de densidade de fluxo magnético Tesla





# Lista de símbolos

$\vec{H}$	Vetor Campo magnético
$\vec{E}$	Vetor Campo elétrico
$\vec{B}$	Vetor Densidade de fluxo magnético
$\vec{D}$	Vetor Campo de deslocamento elétrico
$i(t)$	Corrente gerada na descarga atmosférica no tempo
$\rho_v$	Densidade de carga elétrica
$\rho$	Resistividade do solo
$E_z(r, z, t)$	Campo elétrico vertical
$E_r(r, z, t)$	Campo elétrico Horizontal
$B_z(r, z, t)$	Densidade de fluxo magnético
$i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v})$	corrente no canal vista no ponto escolhido considerando o atraso;
$R$	distância entre o ponto escolhido e a corrente em uma certa altura do canal
$H$	altura total do canal da descarga com relação ao solo
$c$	velocidade da luz no vácuo
$v$	velocidade da corrente no canal de descarga
$z'$	posição da corrente no canal de descarga
$z$	altura do ponto de análise
$r$	distância horizontal do ponto de análise até o canal de descarga
$b$	rheobase
$bc$	rheobase do tecido cardíaco com relação a densidade de fluxo magnético
$ch$	chronaxie
$chc$	chronaxie do tecido cardíaco com relação a densidade de fluxo magnético

$\epsilon_0$	Permissividade elétrica do vácuo
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo
$c$	Velocidade da luz
$\sigma$	Condutividade do meio
$S_b$	Valor empírico para cálculo do limite de corrente
$i_{max}$	pico de corrente da descarga atmosférica
$k$	fator de correção para corrente de pico
$\tau'_1$	constante de tempo de subida
$\tau'_2$	constante de tempo de descida
$I_0$	pico de corrente da descarga atmosférica
$I_{01}$	pico de corrente primária da descarga atmosférica
$I_{02}$	pico de corrente secundária da descarga atmosférica
$\eta$	fator de correção da amplitude da corrente
$\tau_1$	a constante do tempo de subida corrente primária
$\tau_2$	a constante do tempo de descida corrente primária
$\tau_3$	a constante do tempo de subida corrente secundária
$\tau_4$	a constante do tempo de descida corrente secundária
$\alpha$	a constante do tempo de subida
$\beta$	a constante de decaimento da onda de corrente
$E_x^n(i, j, k), E_y^n(i, j, k), E_z^n(i, j, k)$	Componentes do campo elétrico nas direções x,y e z no ponto i,j e k no tempo n
$H_x^n(i, j, k), H_y^n(i, j, k), H_z^n(i, j, k)$	Componentes do campo magnético nas direções x,y e z no ponto i,j e k no tempo n
$\Delta t$	incremento de tempo
$\Delta s$	incremento espacial
$R_f$	Resistência fonte de corrente
$E_{passo50Kg}$	limite de tensão para uma pessoa com 50Kg

$E_{passo70Kg}$	limite de tensão para uma pessoa com 70Kg
$t_s$	intervalo de tempo de exposição da pessoa a corrente
$V_t$	tensão de solo no tempo



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do tema

O Brasil é um dos países campeões em incidência de descargas atmosféricas, isso pode ser explicado pelo fato de ser um país tropical com temperaturas elevadas e grandes dimensões continentais. O alto índice de incidência desse fenômeno aumenta a chance de acidentes ocorrerem. Portanto, os estudos sobre as descargas atmosféricas e seus efeitos, além do trabalho de conscientização da população são de extrema importância.

Os acidentes envolvendo atividades agropecuárias e descargas atmosféricas trazem grandes questionamentos sobre o fenômeno e seus efeitos. No campo, os efeitos da descarga atmosférica ficam mais evidentes por serem zonas abertas e com o mínimo de interferência. Logo, os trabalhadores rurais estão mais expostos, pois não têm o hábito de usar equipamentos de segurança e muitas vezes não sabem como se portar frente a uma tempestade com descargas atmosféricas.

As descargas atmosféricas são constituídas de um canal de corrente que gera campos eletromagnéticos de curta duração, porém de grande intensidade. Esses campos são capazes de induzir sobretensões em linhas de transmissão e de distribuição afetando o fornecimento de energia elétrica.

Existem algumas formas de se estudar as descargas elétricas, mas os métodos mais precisos são muito complexos e demandam muitos recursos. A forma mais efetiva seria medir a intensidade da descarga atmosférica e os campos eletromagnéticos. No entanto, essas medições são complicadas sem os equipamentos necessários. Portanto, costuma-se recorrer a simulações computacionais para se analisar os efeitos das descargas atmosféricas. Alguns desses mecanismos, como o method of moments (MoM) e o "finite difference time domain (FDTD)" conseguem simular a propagação dos campos gerados por descargas atmosféricas.

## 1.2 Motivação

O grupo de eletricidade atmosférica, ELAT, do instituto nacional de pesquisas espaciais, INPE, fez um levantamento estatístico de todas as fatalidades envolvendo descargas atmosféricas, entre 2000 e 2014. A figura 1.2.1 mostra o resultado deste estudo.



Figura 1.2.1: Mortes por raios no Brasil.(ELAT)

Uma das informações mais intrigantes que notamos nesse levantamento é a de que entre todas as circunstâncias de fatalidades, 25 por cento correspondem a atividades rurais. Seguida pelas fatalidades dentro de casa com 19 por cento, decorrente principalmente por falha no aterramento ou falta dele.

O aumento dos acidentes no campo e dentro de casa causados por uma descarga atmosférica, trazem ao foco este fenômeno da natureza. As descargas atmosféricas são objeto de estudo há muito tempo com ampla diversidade de abordagem. Na zona rural, poucas pessoas tem o conhecimento dos riscos causados por descargas atmosféricas, o que pode ser um dos motivos do aumento de óbitos. O trabalho na zona rural é comumente realizado ao ar livre, uma atividade que tem uma considerável carga manual, deixando os trabalhadores mais suscetíveis a riscos de toda espécie, inclusive aos efeitos das descargas atmosféricas. Logo, um estudo voltado aos efeitos das descargas atmosféricas e os riscos a que os trabalhadores rurais estão suscetíveis, devido a esse fenômeno, torna-se necessário.

### 1.3 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo relacionar os riscos envolvendo as descargas atmosféricas e o trabalho agropecuário. Para tal fim, serão utilizadas ferramentas computacionais com o objetivo de calcular os efeitos da corrente elétrica do raio no solo e a indução de tensões em ferramentas a partir do campo eletromagnético gerado pela descarga. A busca por prevenção a acidentes envolvendo esses fenômenos compõe também o objetivo dessa pesquisa.

### 1.4 Organização do trabalho

Para que os objetivos sejam alcançados, leis que regem o eletromagnetismo serão contempladas. O capítulo 2, traz uma revisão da teoria de eletromagnetismo com enfoque nas Leis de Maxwell.

O fenômeno deve ser estudado, assim como a sua criação. O capítulo 3, traz uma breve introdução sobre descargas atmosféricas.

Como os trabalhadores rurais são o público alvo neste trabalho é importante que se conheça um pouco sobre suas atividades e os riscos aos quais eles podem ser submetidos. O Capítulo 4 realiza uma abordagem sobre o trabalho rural e os riscos correlacionados.

O choque elétrico no corpo humano é abordado no capítulo 5, onde seus efeitos são analisados de acordo com o tipo e a grandeza da corrente e o tempo de exposição.

Com o conjunto dessas informações, um cenário que envolvesse os diversos riscos advindos da descarga foi modelado no capítulo 6.

Os resultados obtidos foram analisados no capítulo 7, juntamente com as propostas de prevenção.

Por fim, o capítulo 8 aponta uma análise dos métodos utilizados na pesquisa e propostas para futuros trabalhos.





## 2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

As descargas atmosféricas em campo aberto provocam vários fenômenos elétricos e magnéticos. Para que o estudo desses fenômenos seja feito é de muita importância que se tenha um conhecimento amplo das equações de Maxwell, um conjunto de leis que regem o eletromagnetismo.

James Clerk Maxwell unificou todo o conhecimento sobre os fenômenos eletromagnéticos como as Leis de Gauss, de Ampère e de Faraday; leis básicas para o eletromagnetismo.

Originalmente, Maxwell conseguiu unificá-las em equações relativamente simples. Com a criação do cálculo vetorial elas foram reduzidas a 4 equações, apresentadas abaixo:

Forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \text{ (Lei de Ampère)} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \text{ (Lei de Faraday)} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v; \text{ (Lei de Gauss para campos elétricos)} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \text{ (Lei de Gauss para campos magnéticos)} \quad (2.4)$$

Forma integral:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}; \text{ (Lei de Ampère)} \quad (2.5)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}; \text{ (Lei de Faraday)} \quad (2.6)$$

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_v dV; \text{ (Lei de Gauss para campos elétricos)} \quad (2.7)$$

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0; \text{ (Lei de Gauss para campos magnéticos)} \quad (2.8)$$

Onde:

E: intensidade de campo elétrico;

B: intensidade de campo magnético;

D: densidade de fluxo elétrico;

H: densidade de fluxo magnético;

J: densidade de corrente elétrica;

$\rho_v$ : densidade de carga elétrica.

## 2.1 Lei de Faraday

Após Oersted, em 1820, demonstrar que uma corrente elétrica origina um campo magnético. Michael Faraday ficou convicto de que um campo magnético seria capaz de originar uma corrente elétrica.

Quase uma década trabalhando nesse problema, em 1831, Faraday obteve êxito. Ele enrolou dois fios separados em torno de um toróide de ferro e colocou um galvanômetro em um circuito e uma bateria no outro. Com isso, ele observou que ao fechar o circuito da bateria houve uma deflexão momentânea no galvanômetro, observada também quando o circuito da bateria foi aberto.

Concluiu-se então que uma variação do fluxo magnético no tempo de um caminho fechado estacionário, um movimento relativo entre um fluxo magnético estacionário e um caminho fechado produz uma tensão induzida (que gera uma corrente elétrica), do mesmo modo é válido para o movimento relativo entre um fluxo magnético variável e um caminho fechado.

A lei de Faraday relaciona uma força eletromotriz (tensão induzida) com a variação do fluxo do campo magnético através de uma superfície, representada nas equações (2.2) e (2.6). Onde o fluxo magnético equivale a integral de superfície da densidade de fluxo magnético ( $\Psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$ ).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.6)$$

O sinal é negativo pois a tensão induzida cria um fluxo de oposição ao fluxo original (Lei de Lenz).

## 2.2 Lei de Gauss

Carl Friedrich Gauss nasceu em 1777 na cidade de Brunsvique, na Alemanha. Foi matemático, astrônomo e físico que contribuiu muito para as mais diversas áreas da ciência. Duas de suas grandes descobertas foram de grande importância para o conhecimento dos campos eletromagnéticos.

### 2.2.1 Lei de Gauss para campos elétricos

A lei de Gauss, a principal contribuição de Gauss para a física e uma das leis fundamentais do eletromagnetismo, estabelece que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície. Por isso, também faz parte das equações de Maxwell e está representada nas equações (2.3) e (2.7).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_v dV \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Lei de Gauss para campos magnéticos

No caso dos campos elétricos, a carga elétrica é a fonte das linhas de fluxo elétrico que se iniciam em cargas positivas e terminam em cargas negativas. Porém, no caso dos campos magnéticos nunca foi descoberto uma fonte para as linhas de fluxo magnético, são linhas fechadas. Desse modo, a lei de Gauss para campos magnéticos é uma das equações de Maxwell e está representada nas equações (2.4) e (2.8).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.8)$$

## 2.3 Lei de Ampère

Mesmo que Oersted tenha descoberto que uma corrente produz um campo magnético, foi André Marie Ampère o responsável pela dedução matemática. A equação deduzida ficou conhecida como a lei de Ampère e por sua importância também é umas equações de Maxwell. Está representada pelas equações (2.1) e (2.5).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (2.5)$$

## 2.4 Síntese

As equações de Maxwell são o pilar mestre do eletromagnetismo, como um dos objetivos desse estudo é a análise dos campos eletromagnéticos, gerados pelas descargas atmosféricas, e a indução eletromagnética que elas podem causar; o conhecimento dessas leis reunidas nas equações de Maxwell tornam-se obrigatórias.

## 3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande intensidade e extensão, Geralmente, formadas nas grandes nuvens de tempestades denominadas cumulonimbus. Como ilustração, a figura 3.0.1 mostra alguns tipos de nuvens.

O fenômeno é consequência do rápido movimento de elétrons de um lugar para outro. Os elétrons se movem tão rápido que fazem o ar ao seu redor iluminar-se, resultando em um clarão, e ao aquecer o ar em volta do canal calsa uma expansão do mesmo o que resulta em um som. Apesar de estarem normalmente associados a tempestades com chuvas e ventos intensos, também podem ocorrer em tempestades de neve, tempestades de areia, durante erupções vulcânicas, ou mesmo em nuvens que não sejam de tempestade, embora nesses casos costuma ter extensões e intensidade bem menores. (INPE/ELAT, 2016)

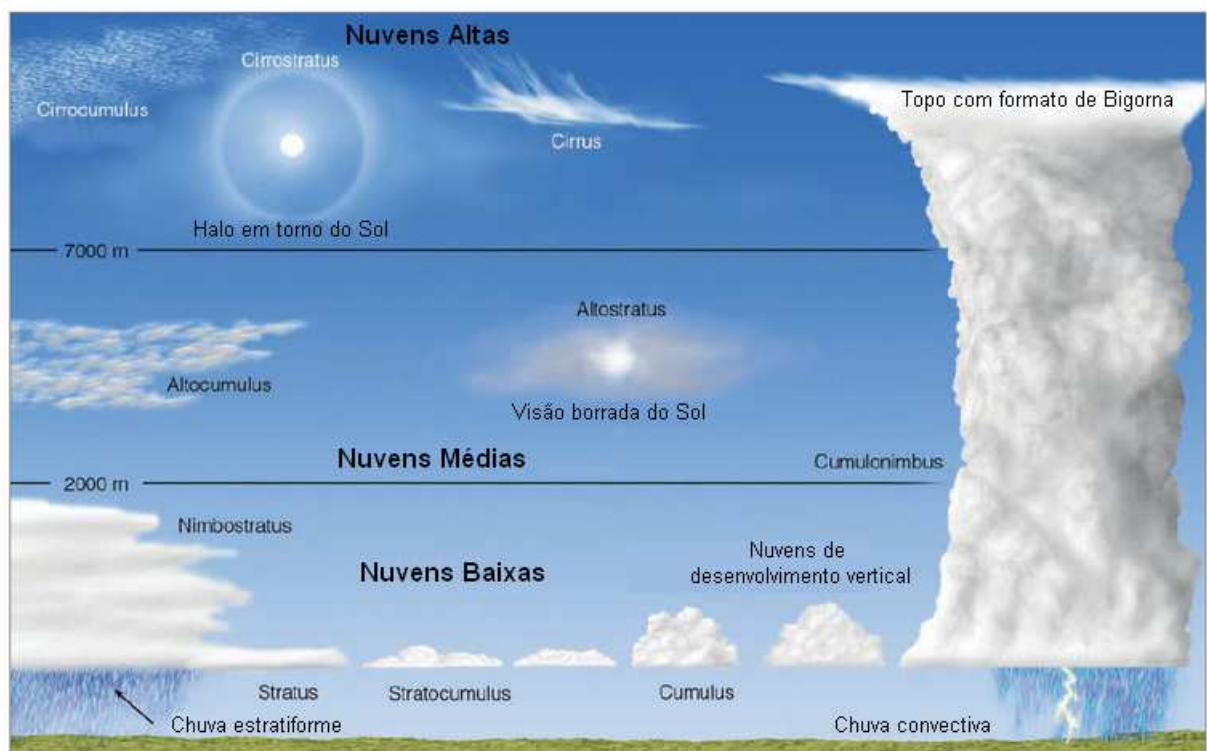


Figura 3.0.1: Tipos de nuvens.(INPE/CPTEC, 2016)

### 3.1 Cumulonimbus

A cumulonimbus é uma nuvem densa de grandes dimensões, vertical (até 18 quilômetros) e horizontal (de 5 a 10 quilômetros). Sua região superior, na maioria das vezes,

achatada e em forma de bigorna pode ser lisa, fibrosa ou estriada. É constituída por gotículas de água em suas partes inferiores, por cristais de gelo nas superiores e pode conter grandes gotas de chuva e granizo. Resultando em intensa precipitação, forte turbulência, presença de rajadas, avanço de linhas de instabilidade e acompanhada por trovões, relâmpagos e fortes pancadas de chuva podendo, às vezes, se tornar em tornado. (USP/IAG, 2016)

## 3.2 Nomenclatura

É importante deixar claro alguns conceitos sobre a nomenclatura (VISACRO, 2005).

- Raio:raio ou descarga atmosférica: conceito amplo correspondente ao fenômeno integral envolvido na evolução e fechamento do canal de descarga, incluindo o fluxo da corrente de retorno e as demais manifestações elétricas, visuais e sonoras;
- Relâmpago: efeito luminoso perceptível visualmente, decorrente do aquecimento do canal de descarga devido ao fluxo da corrente de retorno pelo canal;
- Trovão: efeito sonoro relacionado à descarga atmosférica. É causado pelo brusco deslocamento de ar circunvizinho ao canal de descarga, que se expande em decorrência do aquecimento gerado pelo fluxo da corrente no canal;

## 3.3 Formação do canal da descarga atmosférica

O canal da descarga atmosférica é formado pela descarga de retorno. Está formada quando um líder conectante (movimento de cargas a partir do solo) encontra um líder escalonado (movimento de cargas a partir da nuvem), com o canal formado as cargas armazenadas no líder escalonado movem-se em direção ao solo.

## 3.4 Tipos de descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas podem ser classificadas quanto à sua origem, multiplicidade e a polaridade, (MENDES; DOMINGUES, 2002). Na figura 3.4.1 estão representados alguns tipos de descargas atmosféricas.



Figura 3.4.1: Descargas atmosféricas.(MONTAL, 2016)

### 3.4.1 Origem

A origem de uma descarga atmosférica é definida a partir da sua ocorrência. Podendo ser classificados como: nuvem-solo, solo-nuvem, nuvem-nuvem ou nuvem-ar. Como mostrado nas Figuras 3.4.1 e 3.4.2.

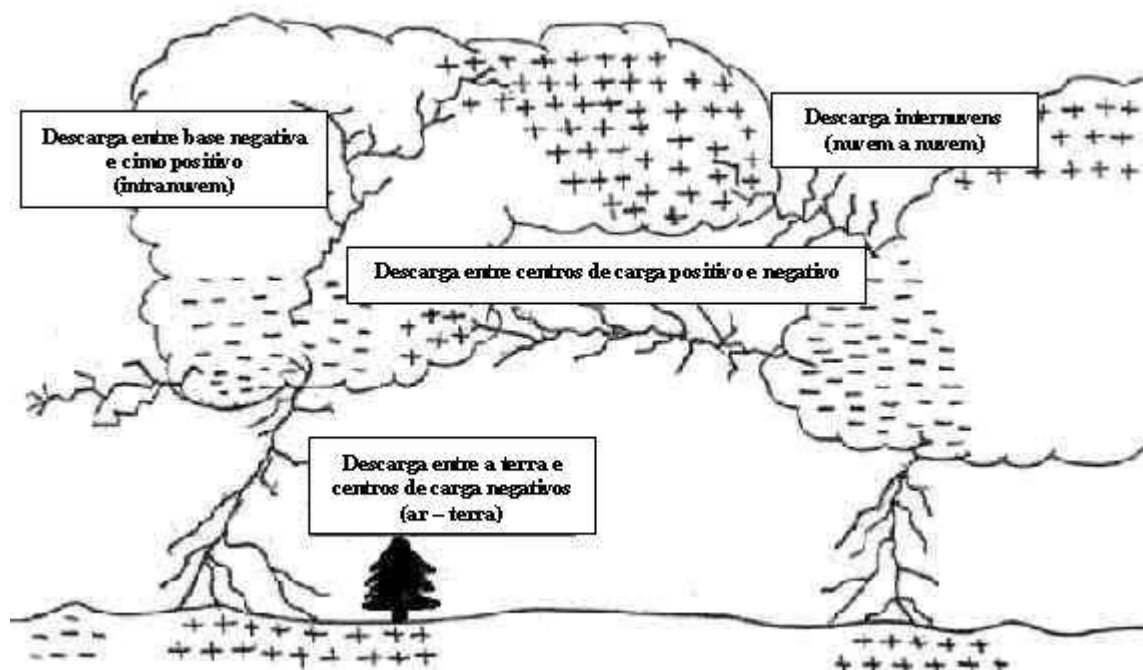


Figura 3.4.2: Tipos de descargas atmosféricas.(CIBERNAUTICA, 2016)

### 3.4.2 Multiplicidade

As descargas atmosféricas podem ser formadas por uma única descarga, denominada descarga de retorno. Ou ser formadas por várias descargas consecutivas também chamadas de descargas múltiplas. Elas se aproveitam do canal estabelecido pela descarga de retorno, porém possuem menor intensidade.

### 3.4.3 Polaridade

As descargas atmosféricas podem ser classificadas de acordo com a polaridade, se positiva ou negativa. Depende do seu sentido e polaridade da nuvem ou do solo.

## 3.5 Síntese

Um dos principais objetos de estudo deste trabalho são as descargas atmosféricas, uma breve explicação sobre o seu processo de surgimento e os elementos presentes foi feito para que esse fenômeno e seus riscos pudessem ser analisados da melhor forma possível.



## 4 TRABALHO NA ZONA RURAL

O trabalho na zona rural foi regulado, em 1973, pela Lei nº5.889/73 e regulamentado, em 1974, pelo Decreto nº73.626/74. Além disso, o artigo 7º da Constituição Federal de 1988 trata dos direitos do trabalhador rural.

Trabalho rural é a atividade econômica de cultura agrícola, pecuária, reflorestamento e corte de madeira; nele se inclui o primeiro tratamento dos produtos agrários in natura sem transformação de sua natureza, tais como o beneficiamento, a primeira modificação e o preparo dos produtos agropecuários e hortifrutigranjeiros e das matérias-primas de origem animal ou vegetal para posterior venda ou industrialização e o aproveitamento dos seus produtos oriundos das operações de preparo e modificação dos produtos in natura acima referidos. (PRETTI, 2013)

### 4.1 Riscos na zona rural

#### 4.1.1 Risco de choque elétrico devido a descargas atmosférica

O choque elétrico é a reação do organismo à passagem da corrente elétrica. Esse fluxo gera os seguintes riscos ao ser humano: eletroplessão (morte acidental provocada pela exposição do corpo a uma corrente elétrica letal), lesão nos nervos, contração muscular e o estremelecimento.

A energia elétrica trouxe grande progresso à zona rural e uma melhora na qualidade de vida. Porém, a eletricidade é perigosa e pode provocar graves acidentes.

Pessoas exercendo atividades rurais constituem o grupo com maior risco de morte por descarga atmosférica no Brasil, segundo dados do ELAT - INPE. Uma das razões é que as atividades são realizadas ao ar livre e longe de abrigos. A falta de instrução sobre como proceder frente à uma tempestade com descargas atmosféricas contribui para essa estatística.

Desta maneira, os principais riscos de choque elétrico na zona rural provenientes de descargas atmosféricas são: elevação da tensão no solo, *flashover*, tensão de toque e o *streamer*.

##### 4.1.1.1 Elevação da tensão no solo

O aumento da tensão elétrica no solo se dá quando este é submetido a uma corrente elétrica. Assim que a corrente elétrica entra no solo ela começa a se dissipar de maneira radial a partir do ponto de inserção. Como o solo por onde a corrente passa possui uma

certa resistividade, pela lei de Ohm, fica claro a existência de uma tensão elétrica entre dois pontos do solo. (VISACRO, 2002) A diferença de potencial elétrico entre dois pontos no solo distantes de 1 m é conhecida como tensão de passo. A principal causa de mortes por descargas atmosféricas ocorre por essa elevação de tensão no solo (NOAA, 2016).

#### 4.1.1.2 Flashover

Outro risco envolvendo descargas atmosféricas é a incidência indireta sobre a pessoa, *flashover* ou descarga indireta que consiste em a descarga incidir sobre um objeto com resistência muito alta ou isolado do solo de tal maneira que a tensão elétrica entre o objeto e a pessoa ultrapasse a rigidez dielétrica do ar e passe a ser conduzida para o solo pela pessoa.

#### 4.1.1.3 Tensão de toque

O risco por condução ou tensão de toque acontece quando a descarga atinge uma cerca ou linha telefônica e a corrente é carregada para longe das descargas.

#### 4.1.1.4 *Streamear*

O *streamer*, ou líder ascendente, ocorre quando as cargas acumuladas se elevam do solo começando a formar o canal da descarga, essa elevação da carga recebe o nome de líder ascendente, isso ocorre em varios pontos e alguns desses lideres não formam o canal, mas carregam uma grande quantidade de corrente que podem levar a obito.

## 4.1.2 Demais riscos

Tabela 1: Demais riscos relacionados ao trabalho rural

Físico	<p>Exposição às radiações solares por longos períodos causa riscos, tais como câibras, síncope, exaustão por calor, envelhecimento precoce e câncer de pele.</p> <p>Perda lenta e progressiva da audição, fadiga, irritabilidade, aumento da pressão arterial, distúrbios do sono, causados pela exposição a ruídos vindos de motores das máquinas presente no campo</p> <p>Já a exposição à vibração ocasiona desconforto geral, dor lombar, degeneração dos discos intervertebrais, a "doença dos dedos brancos" e etc.</p>
Biológico	<p>Acidentes com animais peçonhentos.</p> <p>Doenças respiratórias, com destaque para a asma ocupacional e as pneumonites por hipersensibilização, causados por exposição a agentes infecciosos e parasitários endêmicos que provocam doenças como a esquistossomose, a malária e exposição a partículas de grãos armazenados, ácaros, pólen, detritos de origem animal.</p>
Mecânico	<p>Acidentes com ferramentas manuais, com máquinas e implementos agrícolas ou provocados por animais, ocasionando lesões traumáticas de diferentes graus de intensidade.</p>
Organização do Trabalho	<p>As LER/ DORT - Lesões por Esforços Repetitivos/Doenças Osteomusculares Relacionadas com o Trabalho, causadas pela má distribuição do trabalho bem como a longa jornada de trabalho associada a ausência de pausas</p>
Químico	<p>Exposição a fertilizantes, que podem causar intoxicações graves. As intoxicações registradas têm sido consideradas acidentais, envolvendo produtos do grupo dos fosfatos, sais de potássio e nitratos.</p> <p>A exposição a agrotóxicos, que causam, problemas crônicos determinados que ocorre pelo contato tanto direto como indireto a produtos muitas vezes de toxicidade aguda por tempo prolongado.</p>

## 4.2 Prevenção de riscos referente a choque elétrico

Alem dos riscos envolvendo as instalações elétricas ainda existe os riscos envolvendo descargas atmosféricas, a prevenção de acidentes com esses fenômenos envolve cuidados maiores devido a a intensidade da corrente envolvida e pelo fato de gerar uma série de riscos secundários.

Para evitar acidentes envolvendo descargas atmosféricas existem uma serie de atitudes, como as mencionadas em (NOAA, 2016).

- Se estiver em campo aberto, procurar um abrigo fechado adequado, mantendo distância de locais altos como o topo de colinas.
- Prédios de concreto com fiação elétrica, canalizações de água ou de outro tipo constituem-se em excelente proteção contra as descargas.
- Nunca procure abrigo sob árvores isoladas ou prédios rústicos como aqueles de proteção para animais, existentes em pastagens.
- Se não houver abrigo, abaixar-se com os pés juntos e mãos sobre os joelhos e aguardar passar a tempestade de trovoadas.
- Nunca ficar na praia durante uma tempestade de trovoadas.
- Não permanecer na água durante a tempestade.
- Afastar-se de objetos molhados expostos ao tempo ou metálicos como, por exemplo, postes e cercas.
- Aos primeiros sinais de um temporal, planeje o que fazer no caso de ocorrência das descargas elétricas nas proximidades.
- Se você estiver em locais abertos como campo de futebol, piscina etc, aos primeiros sinais de um temporal abandone imediatamente o local, procurando abrigo em prédios.
- Caso esteja longe de abrigos procure ficar em locais baixos como vales e ravinas.
- Se você estiver em uma estrada ou na rua, a melhor proteção existente é dentro do veículo com os vidros fechados.
- Você pode ser atingido não somente pelo raio diretamente como também por descargas que passam por objetos da proximidade, passando do objeto para a pessoa.

## 4.3 Síntese

A zona rural foi explorada neste capítulo para que fossem apresentados os diversos riscos referentes ao choque elétrico. Os riscos referentes as descarga atmosféricas foram enumerados, assim como, procedimentos a serem tomadas durante uma tempestade com descargas atmosféricas, por fim foram expostos outros riscos referentes ao trabalho rural.

# 5 A CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO

## 5.1 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

As principais consequências do choque elétrico no ser humano decorrem pelo efeito da corrente passando pelo corpo, os efeitos dependem da intensidade dessa corrente e o tempo de exposição, podendo ser percebida pelo corpo até levar ao óbito, as figuras 5.1.1 e 5.1.2 representam graficamente esses limites de corrente alternada, de 15 a 100 Hz, e corrente contínua respectivamente, como mostrado em (IEC, 2005).

### 5.1.1 Corrente elétrica alternada

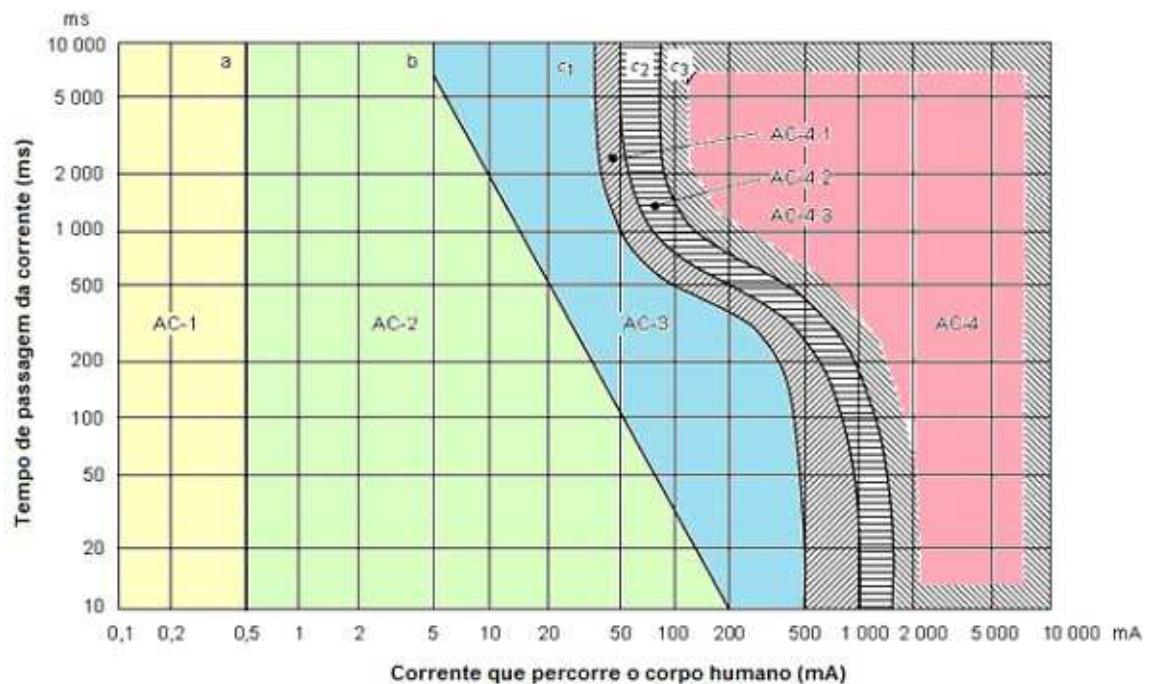


Figura 5.1.1: Gráfico com zonas tempo x corrente alternada

Tabela 2: Efeitos sobre as pessoas (percurso mão esquerda ao pé)

Zonas	Limites	Efeitos Fisiológico
AC-1	<b>Até 2 mA - Curva a</b>	Percepção possível, mas geralmente não causa reação.
AC-2	<b>2 mA até Curva b</b>	Provável percepção e contrações musculares involuntárias, porém sem causar efeitos fisiológicos.
AC-3	<b>A partir da Curva b para cima</b>	Fortes contrações musculares involuntárias, dificuldade respiratória e disfunções cardíacas reversíveis. Podem ocorrer imobilizações e os efeitos aumentam com o crescimento da corrente elétrica, normalmente os efeitos prejudiciais podem ser revertidos.
AC-4	<b>Acima da Curva c1</b>	Efeitos patológicos graves podem ocorrer inclusive paradas cardíacas, paradas respiratórias e queimaduras ou outros danos nas células. A probabilidade de fibrilação ventricular aumenta com a intensidade da corrente e do tempo.
	<b>c1-c2</b>	AC-4.1 Probabilidade de fibrilação ventricular aumentada até aproximadamente 5%
	<b>c2-c3</b>	AC-4.2 Probabilidade de fibrilação ventricular de aproximadamente 50%
	<b>Além da Curva c3</b>	AC-4.3 Probabilidade de fibrilação ventricular acima de 50%

A tabela 2 explica as regiões presentes na figura 5.1.1, expondo os efeitos fisiológicos da corrente que foi delimitada levando em conta sua intensidade e o tempo de exposição. No gráfico é possível verificar que a partir de 5 mA de corrente, o tempo de exposição começa a ganhar importância, tendo em vista que é possível avançar para regiões com consequências mais severas a pessoa com o aumento do mesmo, por isso que é importante remover a fonte da corrente o mais rápido possível. A sub-regiões de AC4 são de grande importância, pois elas marcam o limite para danos irreversíveis ao ser humano e o começo do risco de fibrilação que pode ter como consequência a morte da pessoa.

## 5.1.2 Corrente elétrica contínua

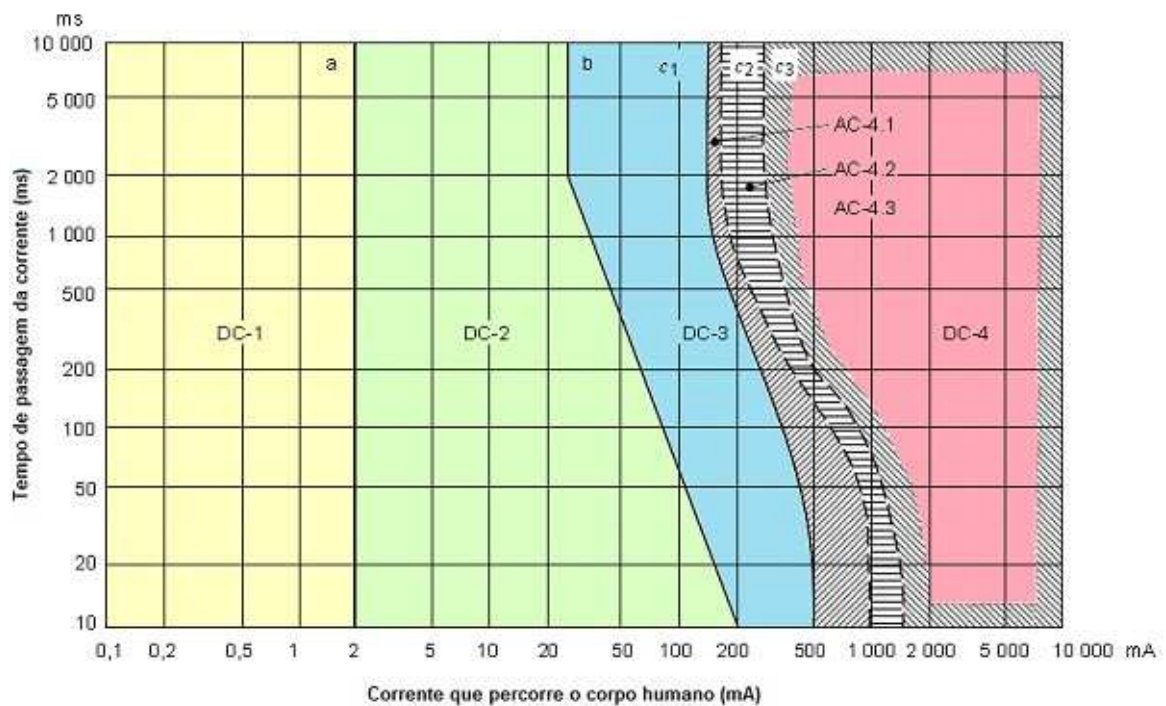


Figura 5.1.2: Gráfico com zonas tempo x corrente contínua

A figura 5.1.2 tem função equivalente a figura 5.1.1, mas tendo como base a corrente como sendo contínua, comparando os dois gráficos é possível verificar que a corrente alternada tem efeitos mais graves para intensidades de corrente semelhantes, isso ocorre pelo estímulo no coração não ocorrer de maneira contínua, tendo variações de acordo com a frequência da fonte, favorecendo a ocorrência de extra-sístoles (IEC, 2005). Por esse motivo que o caminho que a corrente percorre pelo corpo tem muita importância, quanto mais próximo a corrente passar do coração maior o risco para a pessoa. A tabela 3 é semelhante a 2 (IEC, 2005) explicando cada região da figura 5.1.2 verifica-se que os efeitos por região são semelhantes a tabela anterior, assim fica evidente que a corrente alternada possui apenas limiares menores para os mesmos efeitos da corrente contínua.

Tabela 3: Efeitos sobre as pessoas(percurso mão esquerda ao pé)

Zonas	Limites	Efeitos Fisiológico
DC-1	<b>Até 2 mA - Curva a</b>	Percepção possível, mas geralmente não causa reação.
DC-2	<b>2 mA até Curva b</b>	Provável percepção e contrações musculares involuntárias, porém sem causar efeitos fisiológicos.
DC-3	<b>A partir da Curva b para cima</b>	Fortes contrações musculares involuntárias, dificuldade respiratória e disfunções cardíacas reversíveis. Podem ocorrer imobilizações e os efeitos aumentam com o crescimento da corrente elétrica, normalmente os efeitos prejudiciais podem ser revertidos.
DC-4	<b>Acima da Curva c1</b>  <b>c1-c2</b>  <b>c2-c3</b>  <b>Além da Curva c3</b>	Efeitos patológicos graves podem ocorrer inclusive paradas cardíacas, paradas respiratórias e queimaduras ou outros danos nas células. A probabilidade de fibrilação ventricular aumenta com a intensidade da corrente e do tempo.  DC-4.1 Probabilidade de fibrilação ventricular aumentada até aproximadamente 5%  DC-4.2 Probabilidade de fibrilação ventricular de aproximadamente 50%  DC-4.3 Probabilidade de fibrilação ventricular acima de 50%

## 5.2 Síntese

Como o intuito desse trabalho é analisar as descargas atmosféricas e o risco de choque elétrico em trabalhadores rurais. Este capítulo ficou responsável por deixar claro a periculosidade de um choque elétrico no corpo humano. E que o tempo de exposição tem que ser levado em conta, pois pode deixar sequelas graves e até levar a óbito.



## 6 MODELAGEM DO CASO PROPOSTO

O aumento no índice de acidentes envolvendo descargas atmosféricas e seus efeitos despertam algumas questões, que não podem ser facilmente respondidas, que necessitam de um estudo um pouco mais aprofundado. Desta maneira, um caso que englobasse algumas das situações envolvendo as descargas atmosféricas se fez necessário. Do caso proposto foi definida uma modelagem para cada situação. Para que deste o modo, fossem alcançados resultados satisfatórios, que nos permitissem obter explicações sobre cada situação analisada.

### 6.1 Caso proposto

Analisar três situações de risco envolvendo descargas atmosféricas e pessoas em campo aberto. A periculosidade do aumento da tensão no solo que ocorre quando um raio atinge o solo, a verificação da intensidade dos campos eletromagnéticos gerados pelo raio e se eles são capazes de causar algum risco e analisar se esses campos conseguem induzir tensões perigosas em ferramentas metálicas de grande porte, neste caso trados manuais ou alavancas.

### 6.2 Modelagem

Tendo em vista o caso proposto, a ideia é criar, em ambiente computacional, um cenário onde as diversas situações pudessem ser simuladas, de forma que todas as variáveis pudessem ser analisadas.

Desta forma, foi definido um espaço tridimensional em formato de cubo com lado de 16 metros e dentro do espaço foi adicionado os elementos tendo como base as características eletromagnéticas dos mesmos. Após essa etapa foi necessário modelar no espaço computacional todos os elementos presente nele, primeiramente a pessoa foi modelada como um bloco de dimensões 0,40x0,20x1,80 metro e considerada a distância de 10 metros entre ela e a descarga atmosférica. Para a ferramenta foi escolhida uma alavanca de aço de 1,8 metro de comprimento e 2,5 cm de raio. (figuras 6.2.1 a 6.2.4 ), Com base nessas escolhas e as limitações computacionais foi escolhido um incremento espacial de 0,20 metro e, com isso um incremento temporal de 0,3851 ns , porém nesse caso o fator ‘m’ dado pela equação 6.1 acabou ficando menor que um, o que não é permitido assim

considerou-se o raio da alavanca como sendo 5 cm.

$$m \cong \frac{1,471}{\ln\left(\frac{\Delta s}{r}\right)} \quad (6.1)$$

Agora se torna necessário conseguir os os valores de permissividade, condutividade e permeabilidade dos objetos presentes na simulação, para o corpo humano foi usado  $\epsilon_r = 46,2532$ ,  $\sigma = 0,9268 \frac{S}{m}$  e  $\mu_r = 1$  escolhidos a partir da média dos valores para os tecidos em (PSENAKOVA, 2006), para o solo foi escolhida a mesma resistividade que foi usada na seção de tensão de passo  $\epsilon_r = 12$  e  $\mu_r = 1$  obtida em (GONI; KANEKO; AMETANI, 2008), e para alavanca foi considerado  $\sigma = 83 \frac{S}{m}$  encontrado em (LANDGRAF et al., 2002).

Utilizando o código para a simulação em FDTD foram feitas simulações com as seguintes configurações:

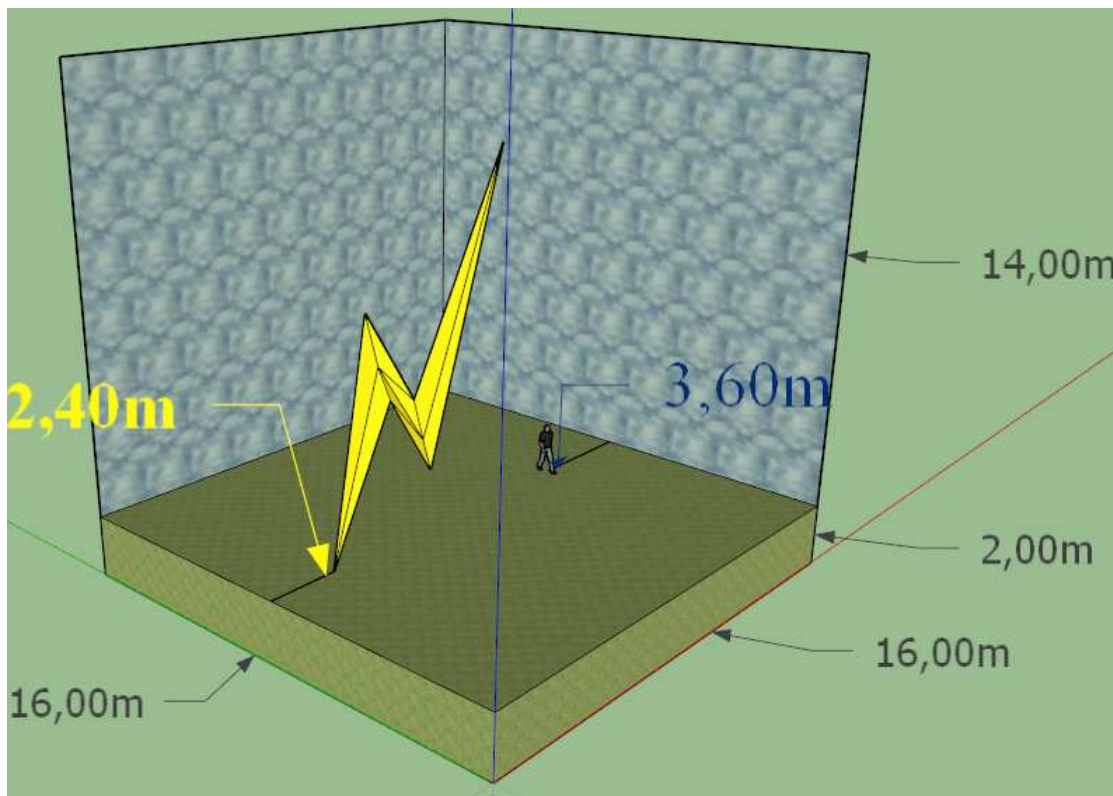


Figura 6.2.1: Espaço computacional só com a pessoa

Com a pessoa a 10 metros da descarga sem a presença da barra essa simulação foi usada como referência para a verificação do efeito dos campos sobre a barra. Entre os problemas enfrentados nessa parte estava o de como modelar o corpo humano, assim foi escolhido como modelo um bloco com as características eletromagnéticas aproximadas do ser humano.

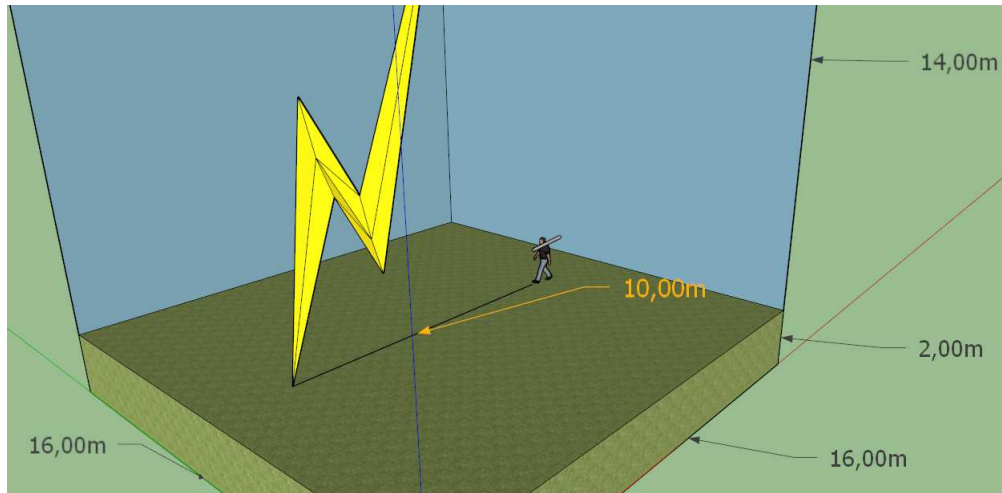


Figura 6.2.2: Espaço computacional só com a pessoa e barra na posição horizontal

Com a pessoa também a 10 metros da descarga foi adicionada a barra repousando sobre o ombro em uma posição que seria carregada com menor esforço, simulando a pessoa se deslocando para procurar abrigo. O principal problema dessa parte foi como referenciar a barra já que é um objeto com o raio com dimensões bem menor que o tamanho das células do FDTD, então foi encontrado em (NODA; YOKOYAMA, 2002) um modelo para essa representação, que será apresentado ao longo do capítulo.

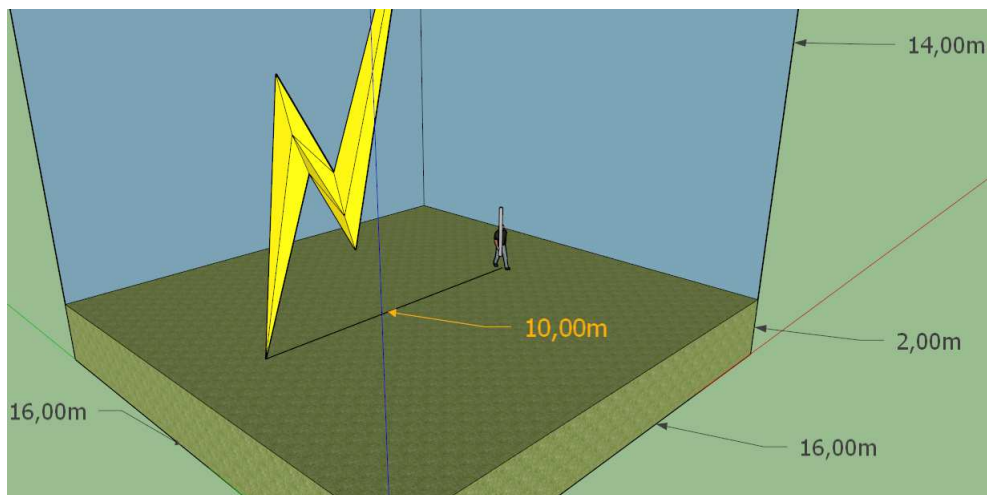


Figura 6.2.3: Espaço computacional com a pessoa e barra no solo a 40 cm da pessoa

Essa simulação foi feita para comparar a influência do posicionamento da barra na tensão induzida na mesma, então foi considerada a barra na posição vertical como se a pessoa ainda estivesse utilizando a ferramenta quando ocorreu a descarga, o ponto de cálculo tensão foi considerada tendo como base a altura dos ombros da pessoa.

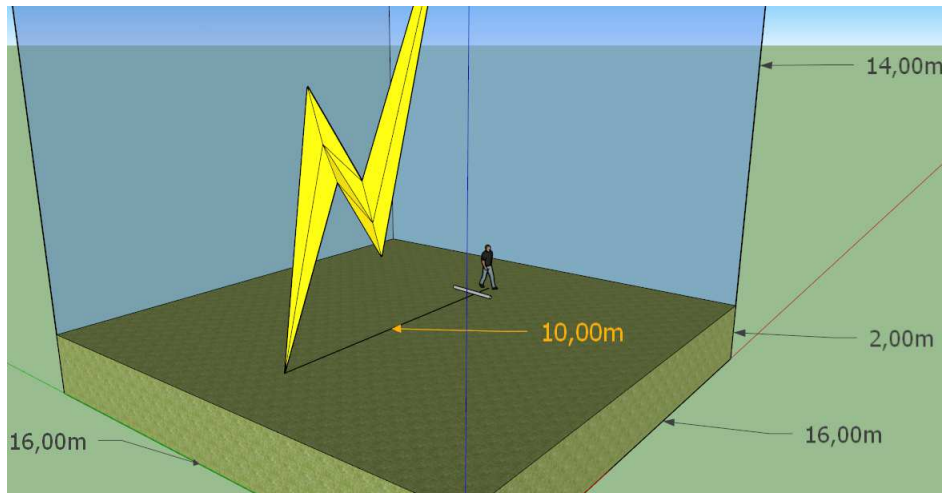


Figura 6.2.4: Espaço computacional só com a pessoa e barra na posição vertical

Nessa ultima situação foi considerada a barra no solo a 40 cm da pessoa, tentando simular o caso em que o trabalhador segue as recomendações sobre como proceder em caso de tempestades elétricas e abandonou a ferramenta metálica, a partir disso espera-se verificar se existe risco de se ter objetos metálicos por perto durante a descarga.

Na simulação da elevação da tensão e em FDTD, foi suposto o solo como sendo uniforme, com resistividade finita, e que o raio atinge diretamente o solo. Ou seja, sem atingir nenhum objeto.

A simulação dos campos pode ser feita a partir das equações propostas nos estudos de Master e Uman, em (RACHIDI et al., 1996) e (ROMERO, 2007). Com o solo sendo um condutor ideal, que apesar de gerar pequenas divergências, com os casos reais, essa escolha apresenta as maiores intensidades de campo.

Na situação da indução das ferramentas, utilizar o cenário, criado em ambiente computacional, para tentar simular a indução.

### 6.2.1 Elevação da tensão no solo

A injeção de corrente elétrica no solo pode ocorrer por vários motivos, como por exemplo o curto circuito envolvendo o solo. Porém, essa tensão começa a ser perigosa somente quando a corrente no solo é muito elevada, como no caso da corrente gerada por descargas atmosféricas que podem ser superiores a 200 kA e demorar mais que 2 ms para se extinguir. Mesmo que o ponto esteja a vários metros de distância da descarga ainda há o risco de choque elétrico.

A resistividade do solo tem um papel fundamental na tensão de passo, pois quando há corrente elétrica fluindo o solo se comporta como uma impedância. Ou seja, a medida que a distância aumenta a queda de tensão aumenta, por causa da resistividade do solo.

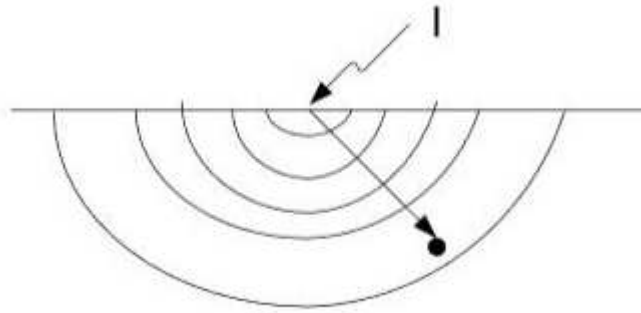


Figura 6.2.5: Comportamento da corrente no solo

Para que o limiar da tensão de passo não seja alcançado o ideal é que o solo possua uma resistividade baixa, pois a diferença de potencial diminui para distâncias pequenas e assim diminua o risco para os seres humanos. (IEEE, 2000)

É possível estimar o comportamento da tensão no solo tendo como informação a corrente inserida nele e a sua resistividade. (VISACRO, 2002)

$$V_t = \frac{\rho}{2\pi r} I \quad (6.2)$$

Onde:

$V_t$ : tensão de solo;

$\rho$ : resistividade do solo;

$r$ : distância do ponto de entrada da corrente;

$I$ : corrente descarregada no solo.

#### 6.2.1.1 Tensão de passo

A tensão de passo é o termo técnico que refere a diferença de potencial elétrico em uma pessoa com os pés a uma distância de 1m um do outro sem estar em contato com nenhum objeto.

Para verificar se essa tensão gera riscos de morte é necessário verificar alguns parâmetros como o nível de tensão e o tempo de exposição.

O limite de tensão entre os dois pés de uma pessoa, de 50 kg ou 70 kg, pode ser calculado em um determinado intervalo de tempo pelas equações: (IEEE, 2000)

$$E_{passo50kg} = (1000 + 6\rho) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (6.3)$$

$$E_{passo70kg} = (1000 + 6\rho) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6.4)$$

Onde:

$E_{passo50kg}$ : limite de tensão para uma pessoa com 50Kg;

$E_{passo70kg}$ : limite de tensão para uma pessoa com 70Kg;

$\rho$ : resistividade do solo;

$t_s$ : intervalo de tempo de exposição da pessoa sob a tensão.

Essas equações foram concebidas graças a quantização da máxima corrente permitida a passar entre as pernas de uma pessoa. Essa corrente foi quantizada a partir dos estudos de Dalziel, (DALZIEL, 1946), que estipula a corrente limite de 50 ou 60 Hz pela seguinte equação:

$$I_{limite} = \sqrt{\frac{S_b}{t_s}} \quad (6.5)$$

Onde:

$I$ : limite tolerável de corrente;

$S_b$ : constante empírica relacionada a energia de choque elétrico tolerada pela porcentagem de uma certa população;

$t_s$ : intervalo de tempo de exposição da pessoa sob a tensão.

Em seu estudo, Dalziel define  $S_b = 0,0135$ , para pessoas de aproximadamente 50 kg, e  $S_b = 0,0246$ , para pessoas de aproximadamente 70 kg, como sendo o valor que mata 99,5% das pessoas. Porém é necessário verificar a tensão gerada por essa corrente no corpo humano, então foi considerado que a resistência elétrica do corpo humano entre as duas pernas sendo de  $1000\Omega$ . No entanto, ainda é necessário considerar os fatores externos ao corpo, como a resistividade do solo ou de estruturas por onde a corrente da descarga passar até alcançar o indivíduo. Para isso foi considerado que os pés da pessoa são os terminais de um circuito equivalente de Thévenin, como representado na Figura 6.2.6, de (IEEE, 2000).

Foi a partir desse método que pode ser obtido, de maneira numérica, o valor de  $6\rho$ , presente nas figuras 6.3 e 6.4, como sendo a resistência equivalente de Thévenin.

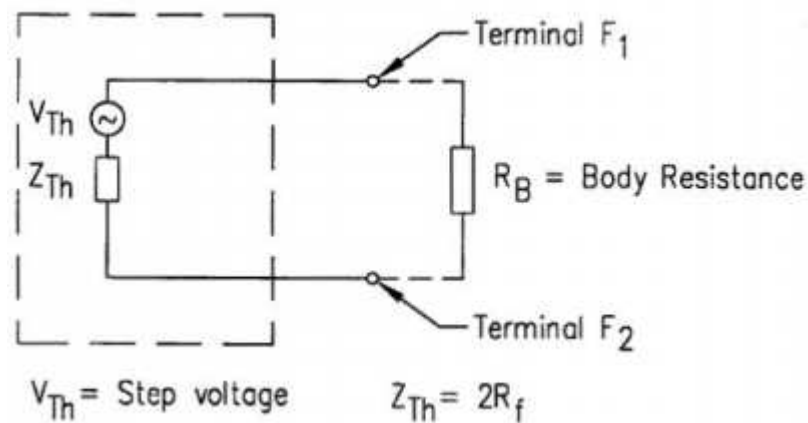


Figura 6.2.6: Circuito equivalente das características externas ao corpo

### 6.2.2 Campos eletromagnéticos

Para analisar os riscos provenientes dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas em pessoas em campo aberto, é necessário primeiro verificar se os campos eletromagnéticos gerados por raios são capazes de causar algum risco apenas por estar exposto à ele. O limite de um estímulo eletromagnético pode ser contabilizado a partir da curva de intensidade por duração do estímulo, nessa análise existem dois dados importantes o rheobase e chronaxie. O rheobase é definido como a intensidade mínima para que ocorra a excitação celular, e a chronaxie é a duração do sinal correspondente ao ponto em que a intensidade necessária de estímulo é o dobro da rheobase. Esses valores são obtidos de maneira experimental para cada tipo de tecido, a curva foi proposta de maneira empírica por Weiss dada pela equação 6.6, essa equação é conhecida como lei de Weiss. (HOLSHEIMER et al., 2000).

$$Ems = b \left( 1 + \frac{ch}{\tau} \right) \quad (6.6)$$

Onde:

$Ems$ : Estimulo eletromagnético;

$b$ : rheobase;

$ch$ : chronaxie;

$\tau$ : duração do estímulo.

Entre os tecidos que merecem atenção estão o relativos ao sistema nervoso, sistema respiratório e o muscular estriado cardíaco, para esse último os valores de rheobase e

chronaxie são fornecidos para a excitação com relação a derivada da densidade de fluxo magnético em (TAMUS et al., 2011), como sendo  $53T/s$  e  $3$  ms respectivamente, e a curva intensidade do pulso pelo tempo de exposição é dada pela equação 6.7.

$$\frac{dB}{dt} = bc \left( 1 + \frac{chc}{\tau} \right) \quad (6.7)$$

Onde:

$\frac{dB}{dt}$ : derivada da densidade de fluxo magnético;

$bc$ : rheobase para o tecido cardíaco;

$chc$ : chronaxie para o tecido cardíaco;

$\tau$ : duração do estímulo.

A excitação do tecido cardíaco é muito perigoso, pois ele pode ocasionar uma arritmia cardíaca que por sua vez pode ocasionar uma morte súbita . Então, é necessário verificar se uma descarga atmosférica consegue gerar um campo capaz de alcançar esses valores. Em (RACHIDI et al., 1996) foi encontrado a formulação matemática para calcular os campos eletromagnéticos gerados por uma descarga atmosférica em um determinado ponto, segundo estudos de Master e Uman. Esses métodos usam o solo como um condutor perfeito, essa consideração só deixa de ser valida para distâncias maiores que alguns quilômetros.

As equações para o cálculo do campo elétrico vertical, campo elétrico horizontal e densidade de fluxo magnético propostos em (ROMERO, 2007) e (RACHIDI et al., 1996):

$$\begin{aligned} E_z(r, z, t) = & \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \int_{-H}^H \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v}) d\tau dz' \right. \\ & + \int_{-H}^H \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v}) dz' \\ & \left. - \int_{-H}^H \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v})}{\partial t} dz' \right] \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} E_r(r, z, t) = & \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \int_{-H}^H \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v}) d\tau dz' \right. \\ & + \int_{-H}^H \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v}) dz' \\ & \left. - \int_{-H}^H \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v})}{\partial t} dz' \right] \end{aligned} \quad (6.9)$$



$$B_z(r, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \int_{-H}^H \frac{r}{R^3} i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v}) dz' - \int_{-H}^H \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v})}{\partial t} dz' \right] \quad (6.10)$$

$$R = \sqrt{r^2 + (z - z')^2} \quad (6.11)$$

Onde:

$E_z(r, z, t)$ : Campo elétrico vertical;

$E_r(r, z, t)$ : Campo elétrico Horizontal;

$B_z(r, z, t)$ : Densidade de fluxo magnético;

$i(z', t - \frac{R}{c} - \frac{z'}{v})$ : corrente no canal;

$R$ : distância entre o ponto escolhido e a corrente em uma certa altura do canal

$H$ : altura total do canal da descarga com relação ao solo;

$c$ : velocidade da luz no vácuo;

$v$ : velocidade da corrente no canal de descarga;

$\epsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo;

$\mu_0$ : permeabilidade magnética do vácuo;

$z'$ : posição da corrente no canal de descarga;

$z$ : altura do ponto de análise;

$r$ : distância horizontal do ponto de análise até o canal de descarga;

$t$ : tempo.

Para verificação se a variação temporal da densidade de fluxo magnético é perigosa, a densidade será calculada pela equação 6.10 e então será verificado na equação 6.7 se o limite é suficiente para gerar riscos a pessoa. Ainda pensando nos riscos evoluindo o campo eletromagnético gerado pela descarga foi proposto a seguinte situação, uma pessoa próxima ao raio segurando uma ferramenta metálica de grande porte como, por exemplo, uma alavanca ou um trado manual, essa ferramenta sofreria indução suficiente para gerar riscos a integridade física dessa pessoa. Porém para essa análise os programas desenvolvidos para o problema anterior apresentam limitações, já que não é possível computar os

campos em mais de um meio por vez, então foram analisados outros métodos computacionais. Entre as técnicas analisadas foi escolhido o modelo FDTD (Finite Difference Time Domain), porém também existem os métodos TLM (SILVA, 2014) e MoM. O FDTD constitui um método numérico que permite várias formulações diferentes para analisar a propagação de campos a partir das leis de Maxwell, no caso estudado será utilizado modelo de coordenadas Cartesianas, no qual as equações de Maxwell são dadas pelas equações 6.12 a 6.15. Para essa análise o espaço computacional em um elemento conhecido como célula clássica de Yee, na Figura 6.2.7, essa célula apresentada como cubos cujo os lados possuem uma pequena dimensão chamada de  $\Delta s$ , a vantagem da célula de Yee foi a criação de uma relação geométrica para a amostragem das componentes vetoriais dos campos elétrico e magnético que representam de maneira consistente as equações de Maxwell. (COMPART, 2006)

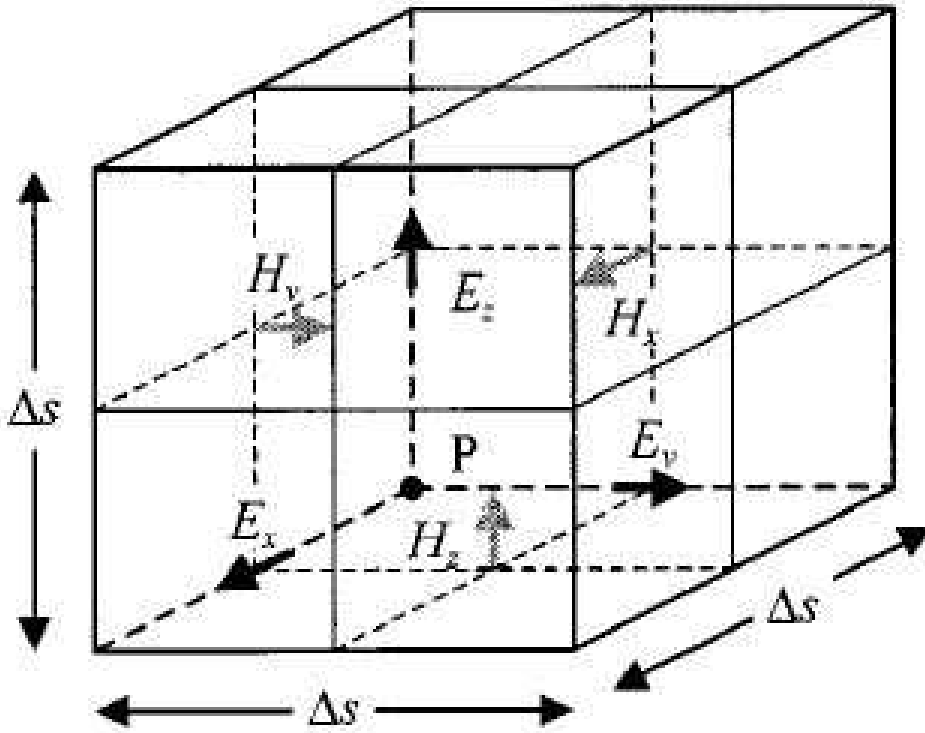


Figura 6.2.7: Célula de Yee. (NODA; YOKOYAMA, 2002)

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (6.12)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (6.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho\nu}{\varepsilon} \quad (6.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (6.15)$$

Para calcular os campos nas celulas utiliza-se as 6.16 e 6.17 para aproximar as derivadas nas direções x,y e z e no tempo, a partir dessa aproximação se obtém as 6.19 a 6.24 que serão utilizadas para calcular os campos elétricos e magnéticos em cada uma das direções x,y e z. Como essas equações são consideradas integrais numéricas é necessário que a condição de Courant seja obedecida(6.18 )(NODA; YOKOYAMA, 2002) , para que a integração ocorra de maneira estável. Como geralmente o incremento de distância é escolhido considerando as dimensões do espaço em análise, o incremento de tempo geralmente é escolhido de tal maneira que a condição de Courant seja obedecida.

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \cong \frac{f(x + \frac{\Delta x}{2}) - f(x - \frac{\Delta x}{2})}{\Delta s} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} \cong \frac{f(t + \frac{\Delta t}{2}) - f(t - \frac{\Delta t}{2})}{\Delta t} \quad (6.17)$$

$$\frac{\Delta t}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{3}} \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) &= \frac{1 - \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_x^{n-1}(i + \frac{1}{2}, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} \\ &\quad \cdot \{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k) \\ &\quad - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) + H_y^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2})\} \end{aligned} \quad (6.19)$$

$$\begin{aligned} E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) &= \frac{1 - \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_y^{n-1}(i, j + \frac{1}{2}, k) \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} \\ &\quad \cdot \{H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}) \\ &\quad - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) + H_z^{n-\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k)\} \end{aligned} \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned}
E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) &= \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_z^{n-1} \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \\
&\cdot \left\{ H_y^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) \right. \\
&\left. - H_x^{n-\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) + H_x^{n-\frac{1}{2}} \left( i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{6.21}$$

$$\begin{aligned}
H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) &= H_x^{n-\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta t}{\mu \Delta s} \\
&+ \left\{ -E_z^n \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) + E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right. \\
&\left. + E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right\}
\end{aligned} \tag{6.22}$$

$$\begin{aligned}
H_y^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) &= H_y^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta t}{\mu \Delta s} \\
&+ \left\{ -E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k + 1 \right) + E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right. \\
&\left. + E_z^n \left( i + 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{6.23}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) &= H_z^{n-\frac{1}{2}} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \frac{\Delta t}{\mu \Delta s} \\
&+ \left\{ -E_y^n \left( i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right) + E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right. \\
&\left. + E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right\}
\end{aligned} \tag{6.24}$$

Como o caso possui um ambiente computacional grande devido as condições de análise das descarga atmosférica e um elemento de diâmetro pequeno, no caso a ferramenta utilizada pelo trabalhador. Usar um incremento espacial suficientemente pequeno para analisar de maneira precisa os campos sobre a ferramenta se torna inviável computacionalmente. Tendo em vista isso em (NODA; YOKOYAMA, 2002) é sugerido um ajuste que torna possível fazer a simulação com um bom nível de precisão, esse método é conhecido como *Thin Wire Representation*.

Um condutor fino em FDTD pode ser representado corrigindo a permissibilidade elétrica e a permeabilidade magnética das células adjacentes ao condutor. Permitindo calcular a influência dos campos eletromagnéticos sobre o condutor, como pode ser visto na figura 6.2.8. Desse modo, considera-se qual o raio  $\rho$  de um determinado condutor, que as células com tamanho escolhido conseguiriam representar sem erros, e calcula-se um fator de correção ‘m’ que faz com que os campos em volta desse condutor de raio  $\rho$  seja equivalente ao condutor escolhido. O raio  $\rho$  é conhecido como raio intrínseco.

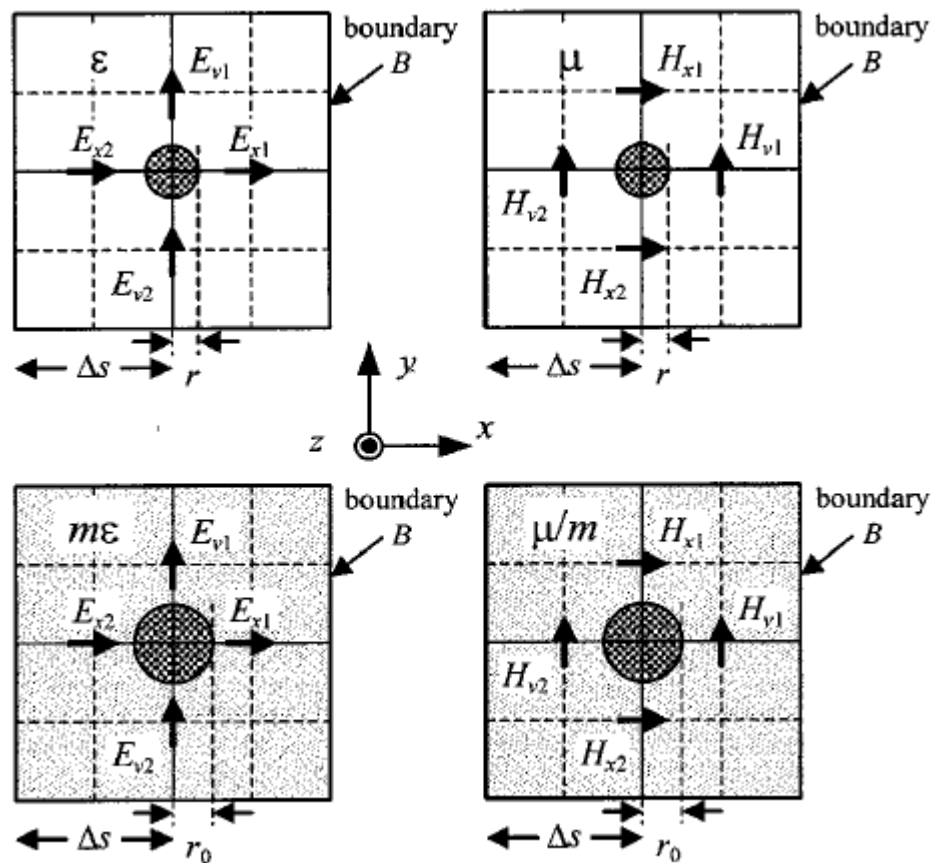


Figura 6.2.8: Correção na permissividade e permeabilidade. (NODA; YOKOYAMA, 2002)

Em (NODA; YOKOYAMA, 2002)  $r_0$  é calculado de maneira numérica considerando a condutância em volta do condutor como sendo 0, com isso se encontra que  $\rho = 0,2289\Delta s$ , assim o fator  $m$  pode ser calculado pela equação 6.1. Assim para representar um elemento condutor pequeno basta multiplicar o valor da permissividade e dividir do valor da permeabilidade em volta do condutor pelo fator ‘ $m$ ’. Como o canal de descarga possui uma dimensão muito grande fazendo com que sua implementação se torne computacionalmente impossível com isso foi buscado outras maneiras de simular essa descarga e em (GONI; KANEKO; AMETANI, 2008) é apresentado que a simulação pode ser feita considerando um gerador de pulso a mesma altura do objeto que se esta analisando. Esse gerador de pulso foi considerado como uma fonte de corrente e modelado de acordo com a equação 6.25 obtida em (ANDRÉS, 2014)

$$\begin{aligned}
E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) &= \frac{1 - \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon} - \frac{\Delta t\Delta z}{Rf\Delta x\Delta y}}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon} + \frac{\Delta t\Delta z}{Rf\Delta x\Delta y}} E_z^{n-1}(i, j, k + \frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon} + \frac{\Delta t\Delta z}{Rf\Delta x\Delta y}} \\
&\quad \cdot \{H_y^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}) \\
&\quad - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})\} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta s^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon} + \frac{\Delta t\Delta z}{Rf\Delta x\Delta y}} I_s^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{6.25}$$

### 6.3 Síntese

Esse capítulo serve como base teórica para que seja possível gerar os resultados que serão analisados no próximo capítulo, é apresentada e explicada toda a formulação presente nas análises numéricas, assim como funcionamento do método FDTD. Também foram apresentadas as adaptações necessárias no espaço computacional de forma que a simulação se adequasse aos casos estudados.

# 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 7.1 Tensão de Passo

A tensão de passo (elevação da tensão no solo que ultrapassa o limiar mortal) é uma das principais causas de morte por descarga atmosférica.

Com as equações 6.3 e 6.4 é possível calcular a tensão no solo e o limite de tensão de passo no tempo. Entretanto, para verificar os efeitos de uma descarga atmosférica, que atinge diretamente o solo, ainda é necessário obter a corrente inserida no solo pela descarga.

Existem vários modelos matemáticos que descrevem a corrente de uma descarga atmosférica. Nesse caso, a escolhida foi a modelagem utilizada em (HEIDLER et al., 2008), pelo fato de ter uma subida mais suave, de fácil controle do tempo de subida e do tempo de descida:

$$i(t) = \frac{i_{max}}{k} \cdot \frac{\frac{t}{\tau_1}^{10}}{1 + \frac{t}{\tau_1}^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (7.1)$$

Onde:

$i(t)$ : corrente no tempo;

$i_{max}$ : pico de corrente da descarga atmosférica;

$k$ : o fator de correção para a corrente de pico;

$\tau_1$ : a constante do tempo de subida;

$\tau_2$ : a constante do tempo de descida.

Essa modelagem só simula a primeira corrente de retorno. Porém é comum ocorrerem descargas secundárias no canal da primeira descarga, que aumentam a duração e a intensidade da corrente no tempo. O modelo encontrado foi considerado satisfatório para essa simulação, mas para alcançar valores relevantes foram consideradas correntes de descargas muito elevadas que não atingiriam direto no solo. Então, para fins de análise quantitativa foram considerados dessa maneira.

Utilizando a equação 7.1 e os parâmetros  $i_{max} = 100kA$ ,  $k = 0,93$ ,  $\tau_1 = 19\mu s$ ,  $\tau_2 = 485\mu s$ , retirados de (HEIDLER et al., 2008).

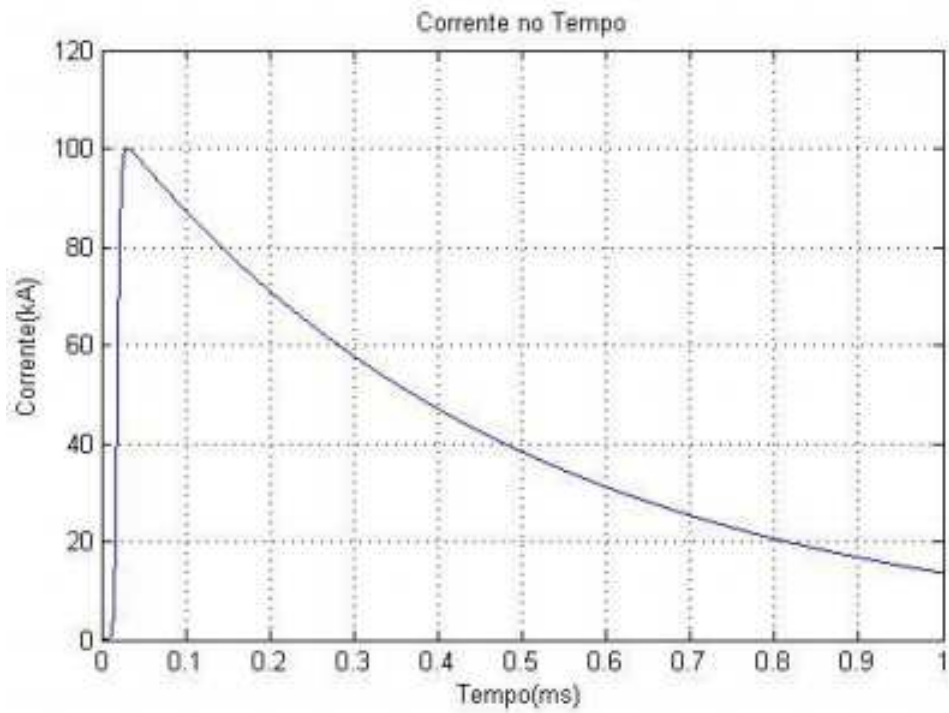


Figura 7.1.1: Corrente descarregada no solo

Tendo essa corrente como base e sabendo que  $\rho = 2771 \frac{\Omega}{m}$ , de (NASCIMENTO et al., 2008), chegamos a seguinte curva de tensão no solo:

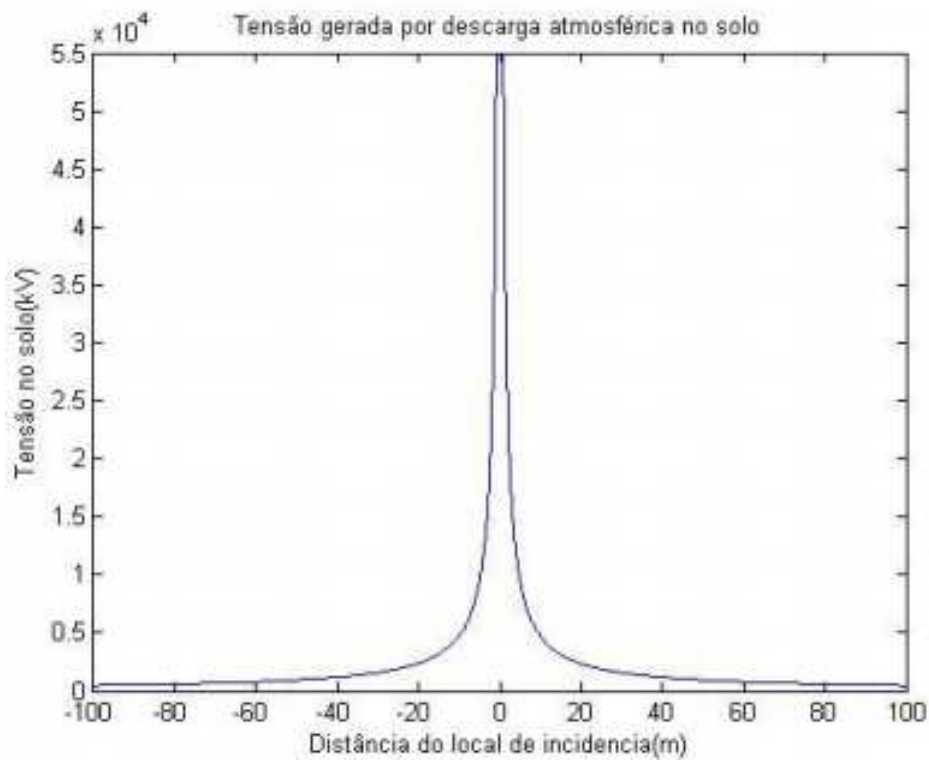


Figura 7.1.2: Tensão gerada no solo



Como era de se esperar a curva apresenta um decaimento conforme a distância da canal de descarga aumenta, além de possuir o comportamento de função inversa.

Com os resultados, foi feita a modelagem da curva do limite da tensão para um indivíduo de 70 kg variando o tempo em até 1 ms. E comparamos com a diferença de potencial entre 9 e 10 metros do ponto de incidência da descarga:

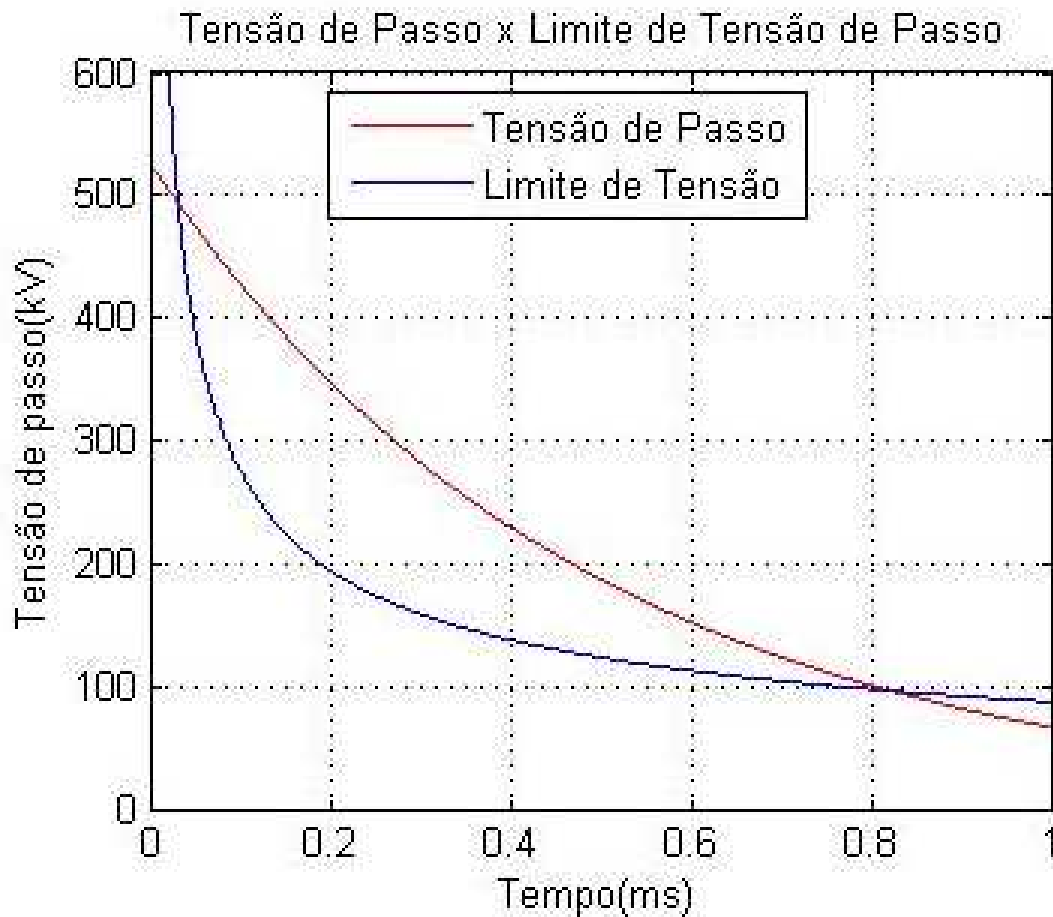


Figura 7.1.3: Tensão de passo e Limite de Tensão

A partir do gráfico, é possível verificar que somente a primeira corrente de retorno, com pico de 100 kA, já é capaz de matar um indivíduo de 70 kg a 10 m de distância do ponto de descarga. Tendo em vista, que a curva vermelha, que representa a tensão de passo modelada, fica acima da curva azul em quase todo o gráfico.

Para a análise anterior foi considerado a resistividade do solo com um valor intermediário entre os valores apresentados em (NASCIMENTO et al., 2008). No entanto, esses valores se referem ao solo do cerrado, que apresenta uma alta resistividade.

Quanto maior a resistividade, maior a queda de tensão. Logo, uma resistividade de solo mais baixa, diminui o risco de morte. É o que pode ser visto na figura 7.1.4, onde a resistividade foi alterada para  $100 \frac{\Omega}{m}$ . Com isso a tensão de passo (curva vermelha), mesmo sendo modelada com uma descarga atmosférica com intensidade de corrente muito

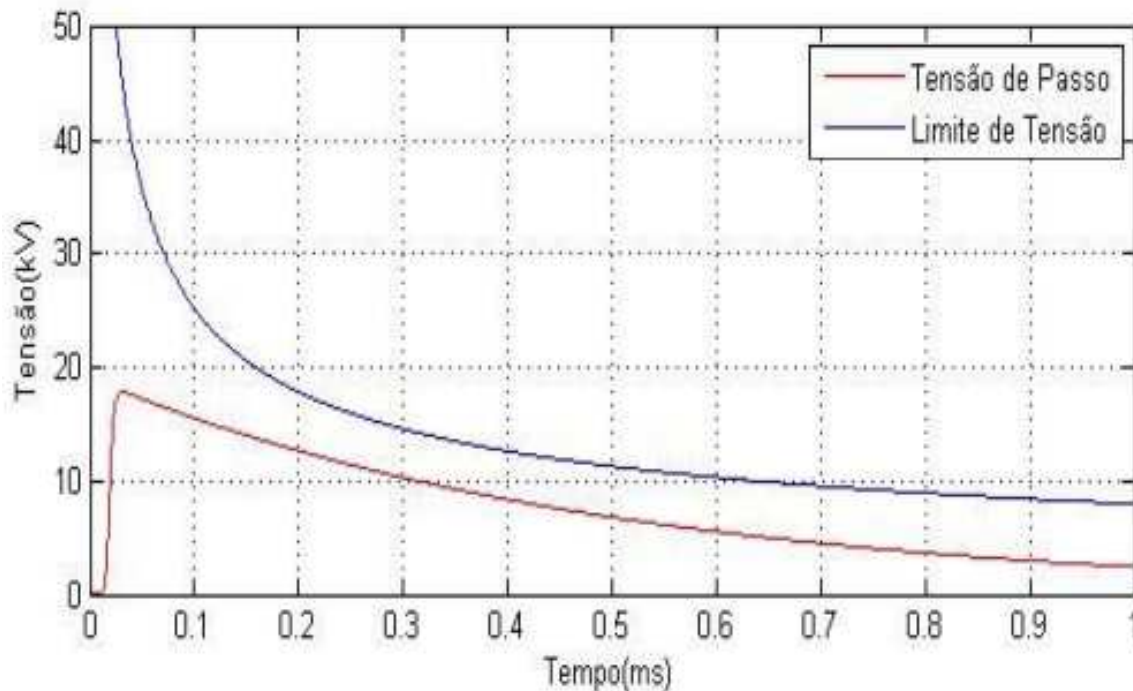


Figura 7.1.4: Tensão de passo e Limite de Tensão  $100\Omega/m$

alta e uma grande duração, fica bem abaixo do limite de tensão (curva azul). Além dessa condição de menor resistividade do solo, o uso de calçado apropriado eleva a impedância do corpo humano a um valor da ordem de  $10^6$  (SANTIS et al., 2011) diminuindo e muito a chance de um acidente.

Feita essa análise, fica evidente o risco da elevação de tensão no solo. Geralmente, os acidentes envolvendo esse fenômeno não ocorrem em campo aberto, mas sim quando as pessoas buscam abrigo perto objetos sem aterramento adequado como por exemplo uma árvore ou construções rústicas e a descarga incide sobre esse objeto, o caso das construções rústicas geralmente é muito problemático, pois as pessoas acreditam que só por estarem no interior de uma construção estão seguras, o que muitas vezes não é verdade.

## 7.2 Campos eletromagnéticos

Utilizando as equações 6.8, 6.9 e 6.10 foram modelados, utilizando a ferramenta computacional MatLab®, três programas para o cálculo desses campos no tempo. Para modelar esse programa foi feita uma abordagem tendo como base (ROMERO, 2007), dividindo a integral na altura como a soma infinitesimal dos outros fatores na altura.

Assim foram criadas duas matrizes para a corrente, tendo como base a altura real começando em 0 e indo até H, e uma matriz da corrente tendo como base a altura de imagem que começa no 0 e vai até -H.

A partir disso foram calculadas as integrais no tempo com o comando `cumtrapz` para fazer as integrais dessas matrizes e as derivadas com o comando `circshift` para fazer a diferença de termos vizinhos nas matrizes e depois dividir essa diferença pelo valor de incremento de tempo.

Para verificar se os valores simulados, com os códigos desenvolvidos, eram condizentes com a realidade foi feita uma validação comparando com os valores apresentados em (ROMERO, 2007). De acordo com essa referência, o campo elétrico vertical e a densidade de fluxo magnético foram modelados com a equação 7.2, de modelo de corrente, e calculados em um ponto a altura do solo para distâncias de 50 metros da descarga. Já o campo elétrico horizontal foi modelado com a equação 7.3, de modelo de corrente, e em um ponto a 6m de altura do solo distante de 100 e 200 metros do canal de descarga.

$$i(t) = \frac{I_{01}}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^2}{(t/\tau_1)^2 + 1} \cdot e^{-t/\tau_2} + I_{02} \cdot (e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (7.2)$$

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7.3)$$

Onde:

$i(t)$ : corrente no tempo;

$I_0$ : pico de corrente da descarga atmosférica;

$I_{01}$ : pico de corrente primária da descarga atmosférica;

$I_{02}$ : pico de corrente secundária da descarga atmosférica;

$\eta$ : fator de correção da amplitude da corrente;

$\tau_1$ : a constante do tempo de subida corrente primária;

$\tau_2$ : a constante do tempo de descida corrente primária.

$\tau_3$ : a constante do tempo de subida corrente secundária;

$\tau_4$ : a constante do tempo de descida corrente secundária.

$\alpha$ : a constante do tempo de subida;

$\beta$ : a constante de decaimento da onda de corrente.

As figuras 7.2 a 7.2 mostram a comparação entre os campos elétricos vertical e horizontal obtidos pelos códigos desenvolvidos e a referência (ROMERO, 2007):

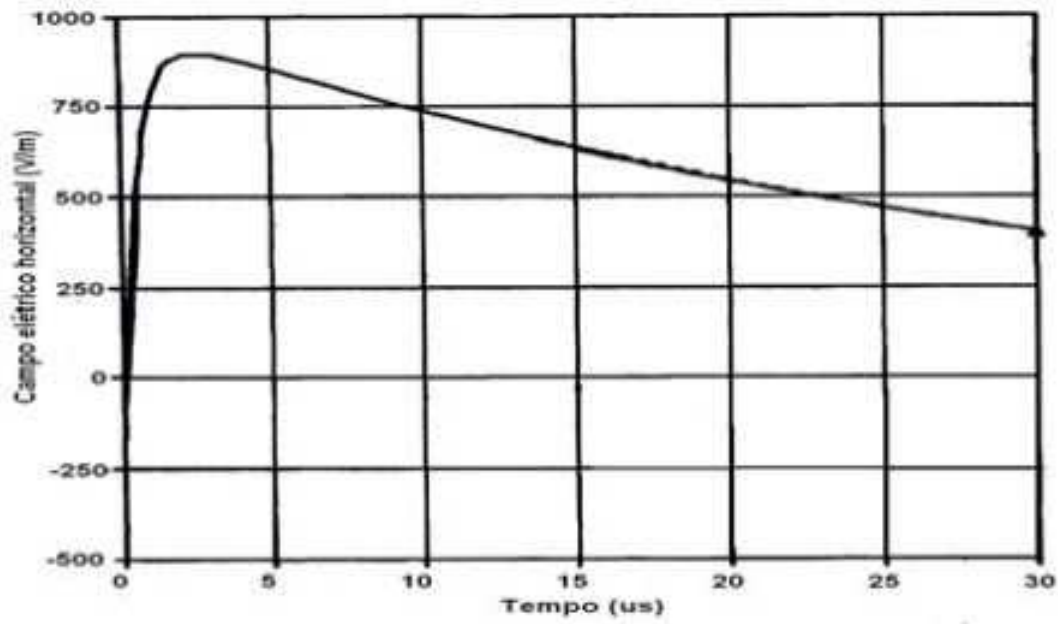


Figura 7.2.1: Campo elétrico horizontal da referência a 100m do canal (ROMERO, 2007)

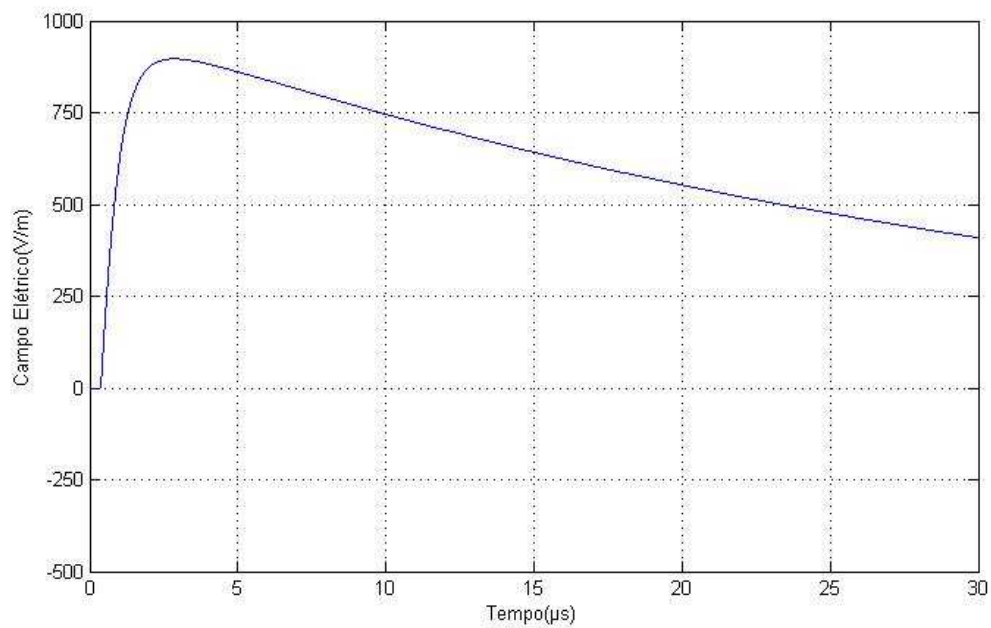


Figura 7.2.2: Campo elétrico horizontal obtido a 100m do canal

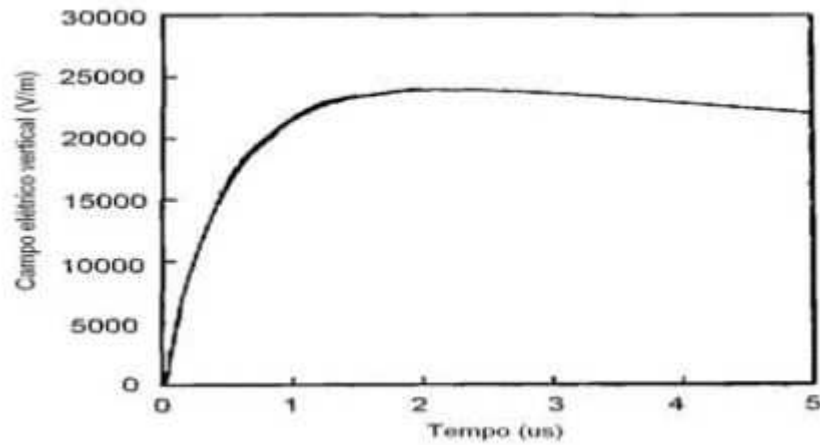


Figura 7.2.3: Campo elétrico vertical da referência a 50m do canal(ROMERO, 2007)

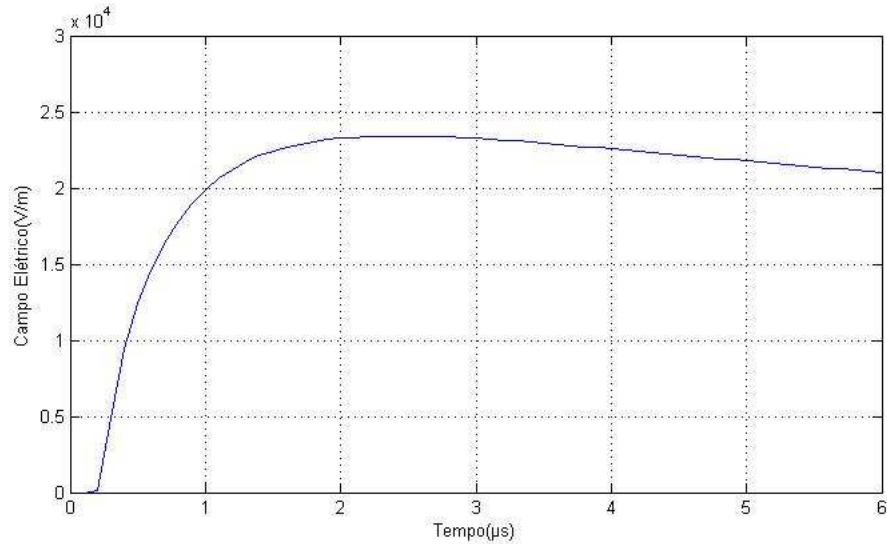


Figura 7.2.4: Campo elétrico vertical obtido a 50m do canal

As figuras a foram feitas de maneira a verificar se as equações de Uman (ROMERO, 2007) foram modeladas de maneira correta, comparando as figuras é possível verificar que o código computacional gera resultados satisfatórios e podem ser utilizados para fazer as análises presentes nesse trabalho.

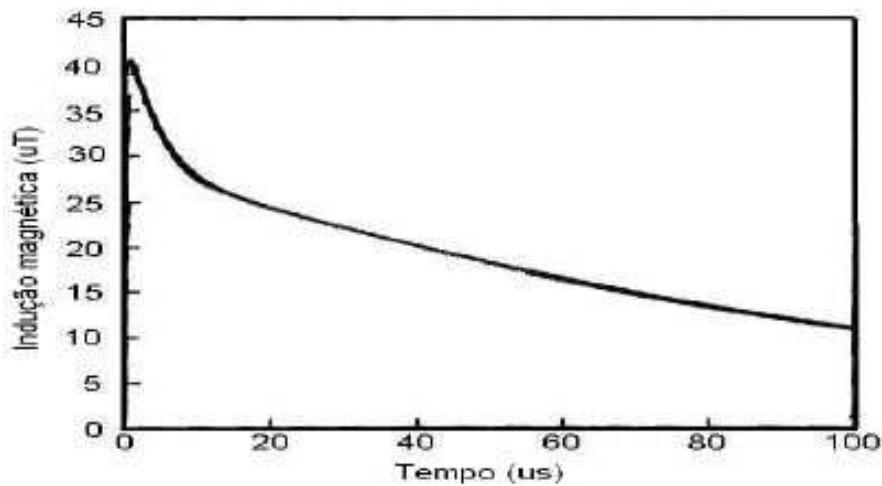


Figura 7.2.5: Densidade de fluxo magnético da referência a 50 m do canal (ROMERO, 2007)

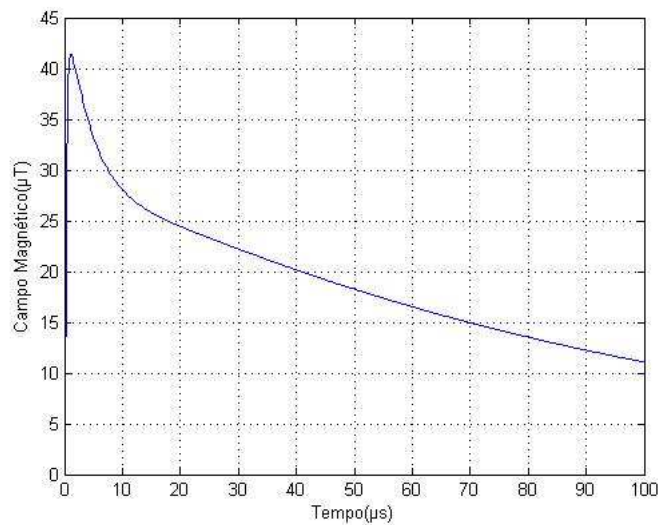


Figura 7.2.6: Densidade de fluxo magnético obtido a 50 m do canal

As figuras presentes tem grande importância para esse trabalho, pois a partir da densidade de fluxo magnético será utilizado para verificar se os campos gerados pela descarga atmosférica são capazes de gerar riscos fisiológicos em um ser humano, apenas por incidir na pessoa, assim como as no caso do campo elétrico os resultados gerados no código foram considerados satisfatórios.

Os gráficos demonstram que os programas desenvolvidos geram resultados iguais ao da referência, exceto pelo atraso do deslocamento dos campos considerado no programa desenvolvido, porém não foi computado na referência. Então foi utilizado o programa que calcula a densidade de fluxo magnético, com uma implementação para calcular a

variação desse fluxo no tempo, com o modelo de corrente mais crítico parametrizado em (HEIDLER et al., 2008) representado na figura 7.2.7, a partir dessa corrente foi calculado a densidade de fluxo magnético e sua variação no tempo uma distância de 10 m do canal da descarga a uma altura de 1,80 m do solo figuras 7.2.8 e 7.2.9.

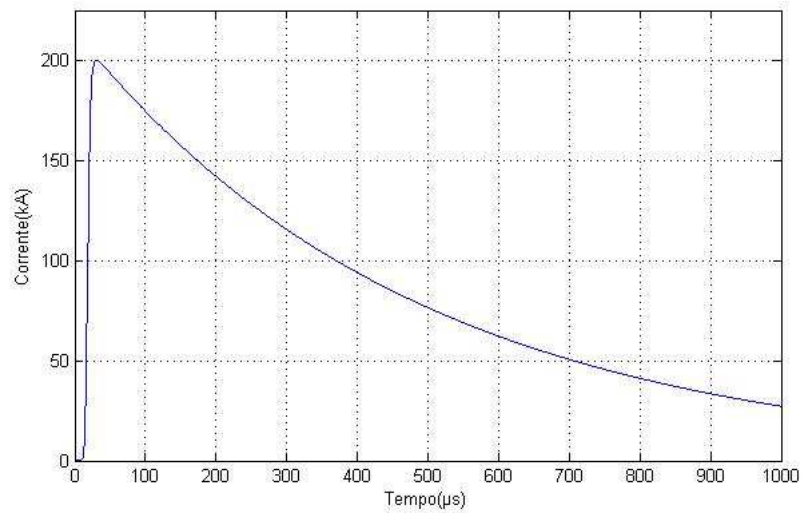


Figura 7.2.7: Sinal de corrente utilizado

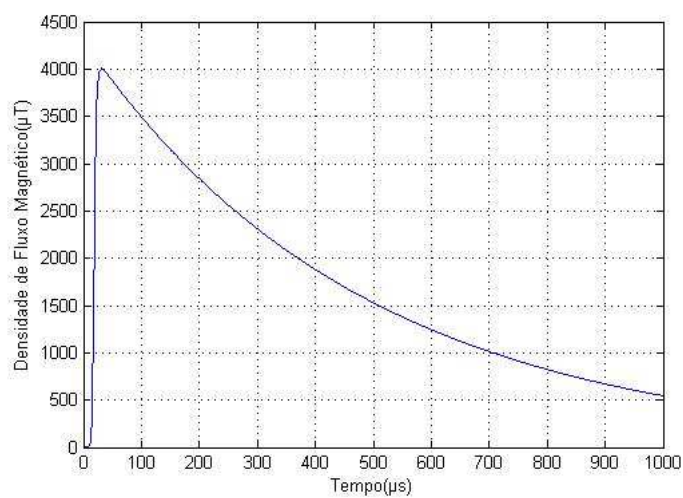


Figura 7.2.8: Densidade de fluxo magnético no tempo

A partir da Figura 7.2.8 é possível verificar que a densidade de fluxo acompanha o valor da corrente no canal, após esse gráfico ser gerado foi calculada a derivada no tempo desse fluxo magnético, essa derivada é exposta em 7.2.9.

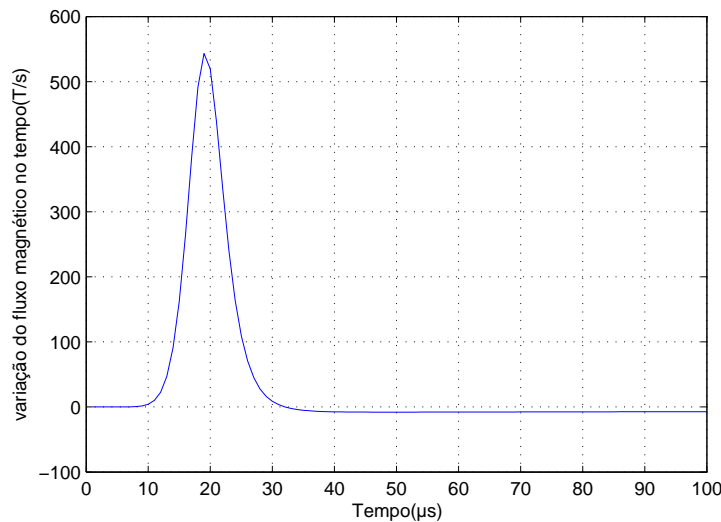


Figura 7.2.9: Derivada da densidade de fluxo magnético no tempo

A partir da figura 7.2.9 é possível verificar que o valor máximo da derivada da densidade de fluxo magnético de  $550 \frac{T}{s}$ , aplicando esse valor na equação 6.7, gera um tempo máximo de exposição de 1.915 ms, que é maior que tempo de duração do impulso simulado então fica evidente que o campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica dificilmente consegue leva uma pessoa ao óbito somente por incidir nela.

Após varias tentativas sem sucesso de desenvolvimento de programa para tentar modelar o problema, foi encontrado um código já pronto de FDTD3D com condições de contorno absorventes de Mur em (MATHWORKS, 2016). Esse código foi usado como base para a análise do problema proposto utilizando como fonte o impulso simulando uma descarga atmosférica representado na figura 7.2.10 .

Nas simulações foi calculada a Tensão induzida fazendo a soma dos campos elétricos entre o ponto de contato da barra com a pessoa e o solo logo abaixo da pessoa e esse valor foi multiplicando pelo incremento de distância, com a barra no solo foi utilizada a menor distância entre a barra e a pessoa.

Com todos os parâmetros escolhidos, foi simulado o programa nas três configurações e foram obtidos as figuras 7.2.12 a 7.2.14 referentes a tensão sobre a pessoa. As simulações duraram em média 6 horas e 42 minutos para serem compiladas em um computador pessoal da marca ASUS com processador Intel Core I5 de 1,6GHz e 4GB de RAM.



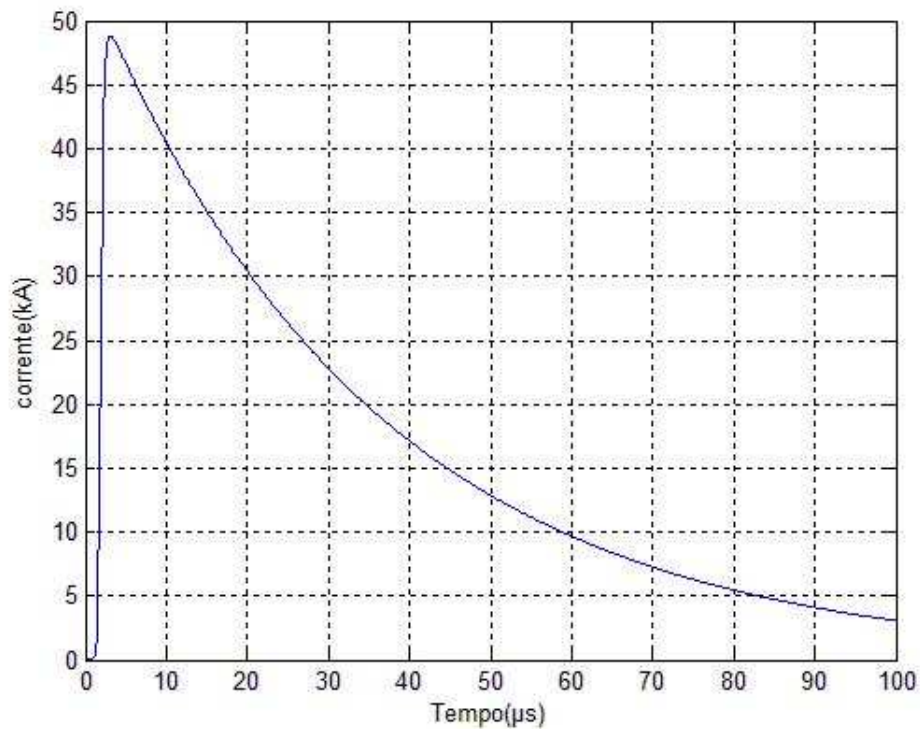


Figura 7.2.10: Forma do impulso de corrente utilizada

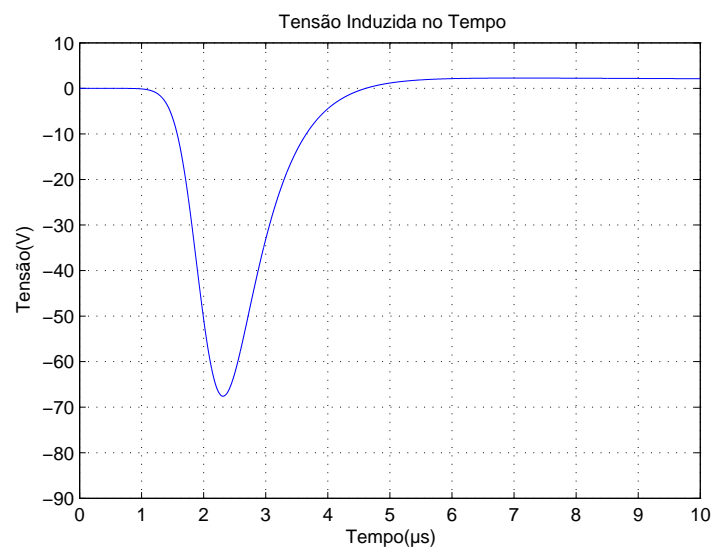


Figura 7.2.11: Tensão sobre o ombro da pessoa sem barra

A figura 7.2.11 representa simulação conforme o demonstrado na figura 6.2.1, ela é importante, pois serve como referência para o efeito da barra sobre o sistema, é possível verificar que com a configuração magnética escolhida para o corpo humano, já ocorre uma tensão induzida de valor considerável sobre a pessoa. Agora serão feitas as simulações adicionando a barra em três posições ao sistema.

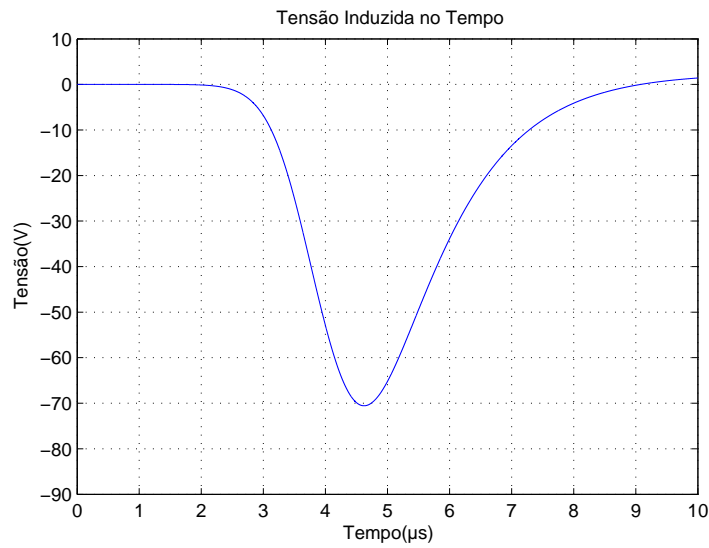


Figura 7.2.12: Tensão barra horizontal

A primeira simulação do sistema com a barra foi feita com a barra na posição horizontal repousando sobre o ombro do trabalhador com a mesma apontando em direção a descarga atmosférica, como pode ser visto na figura 6.2.2. Ao comparar a figura 7.2.12 com a figura 7.2.11 vemos que a diferença entre os dois gráficos foi mínima, isso talvez indique que a indução de tensão que ocorreu na barra foi muito baixa, porem será necessário uma análise sem a pessoa para essa verificação.

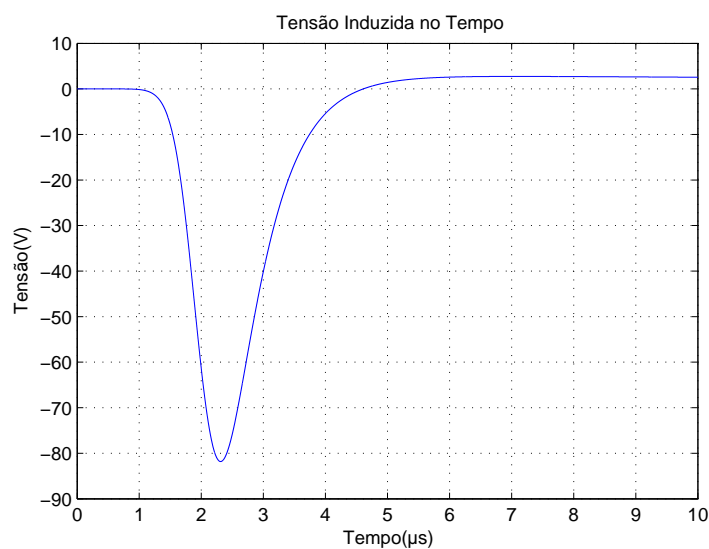


Figura 7.2.13: Tensão no ponto de contato com o corpo barra vertical

Assim como para a barra na configuração horizontal, a barra na configuração vertical é mantida a frente da pessoa de maneira a ficar perpendicular ao solo. Conforme a representação na figura 7.2.13, também houve pouca influência sobre a tensão induzida sobre a pessoa, contudo ainda um pouco maior que do que ocorreu na outra configuração. Deste modo, para verificar de maneira precisa a indução sobre a barra foi feita duas novas simulações dessa vez removendo a pessoa do espaço computacional.

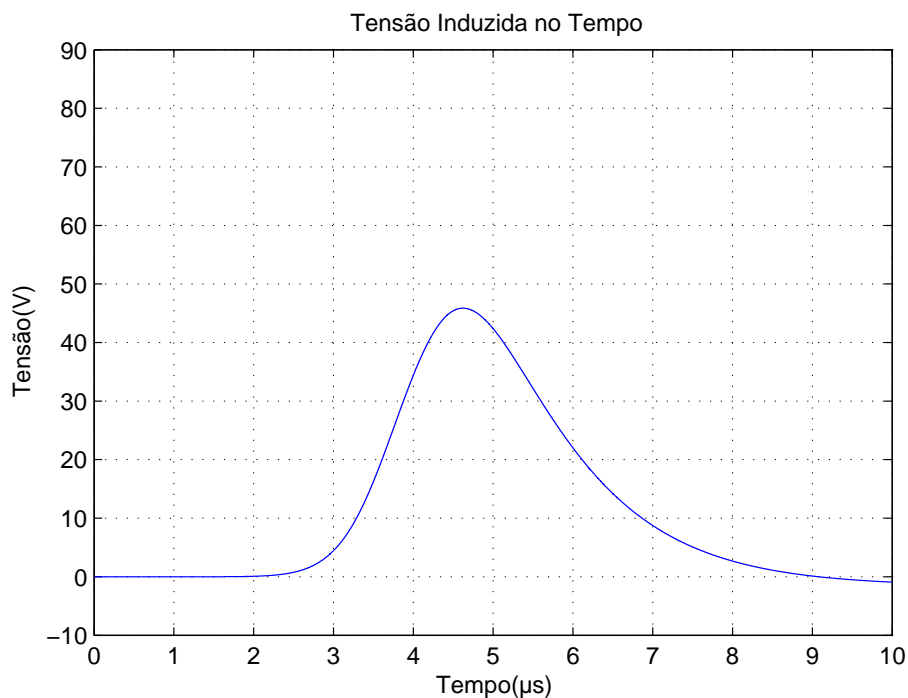


Figura 7.2.14: Tensão entre a barra no solo e pessoa a 40 cm

A figura 7.2.14 foi obtida simulando a barra no solo próxima a pessoa com a barra na posição perpendicular a linha imaginária que liga a pessoa a descarga atmosférica, como visto na figura 6.2.4. Essa simulação foi feita com o intuito de verificar se a indução na barra é capaz de gerar riscos mesmo sem estar em contato com a pessoa. Porém como visto nas simulações anteriores a barra sofre uma indução muito fraca e a tensão mostrada na figura 7.2.14 provavelmente decorre das diferenças de campo elétrico no solo.

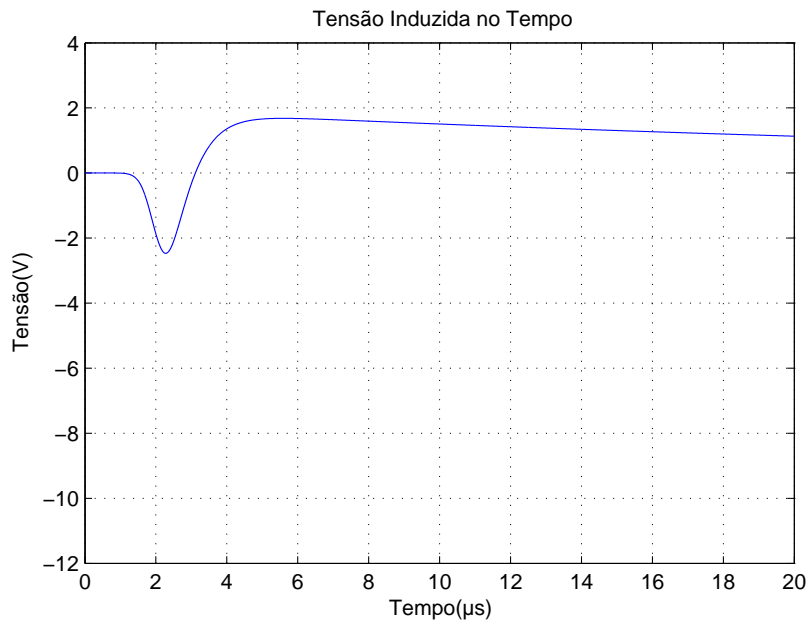


Figura 7.2.15: Tensão induzida na barra horizontal

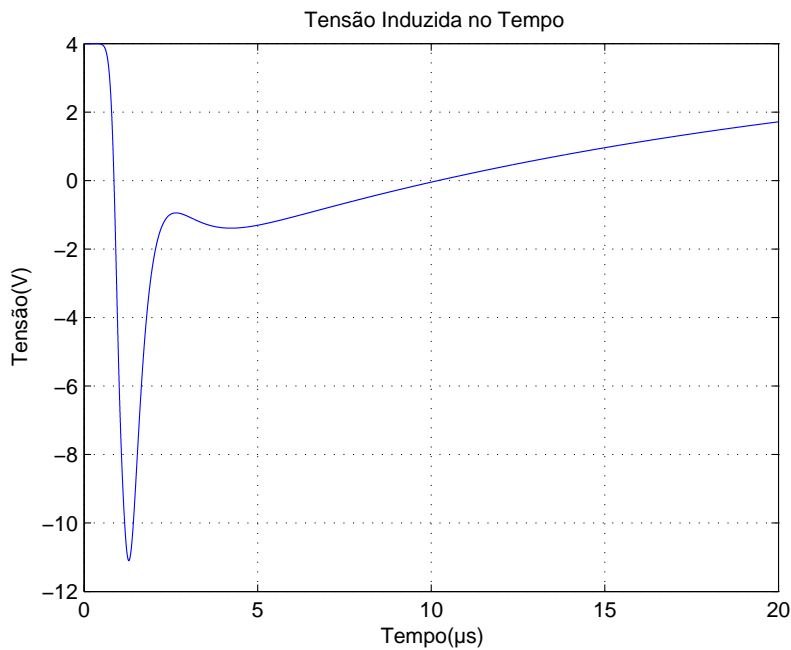


Figura 7.2.16: Tensão induzida na barra vertical

As figuras 7.2.15 e 7.2.16 mostram as induções sem a pessoa no campo computacional, a partir delas é possível inferir que a tensão induzida sobre a barra encontrada é muito pequena, isso pode ter ocorrido pelo fato de representação sugerido por (NODA; YOKOYAMA, 2002) talvez não ser satisfatória para a nossa situação, mas essa tensão realmente pode ter um valor baixo devido as pequenas dimensões da barra.

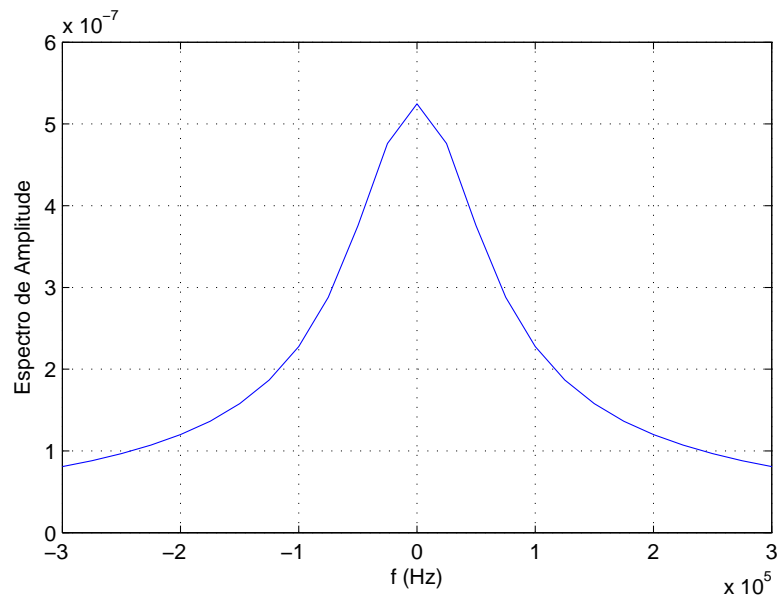


Figura 7.2.17: Densidade espectral de potência

Tendo a tensão que passa pelo corpo era preciso fazer uma verificação de qual as frequências principais dessa tensão para escolher a impedância do corpo humano a ser utilizada, assim foi realizada uma transformada rápida de Fourier(FFT) para analisar o espectro de potência da tensão induzida. Como podemos verificar na figura 7.2.17 a maior parte da potência se encontra na região de corrente contínua (próximo de 0 Hz). Com isso foi escolhido o valor de impedância mais crítico dado em (IEC, 2005), que foi de  $1250\Omega$  para essa tensão. A partir desse valor foram obtidas os gráficos de módulo da corrente passando pela pessoa 7.2.18 e 7.2.19.

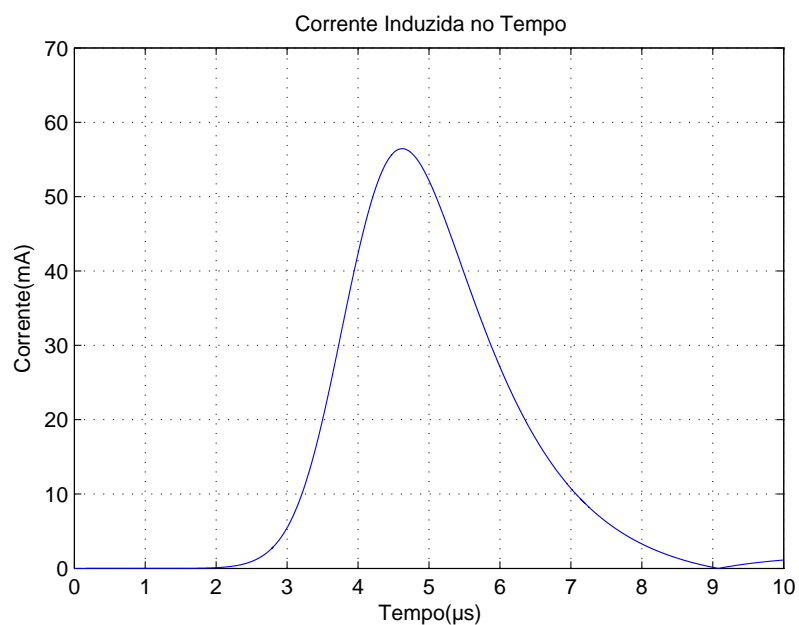


Figura 7.2.18: Corrente passando pelo corpo barra horizontal

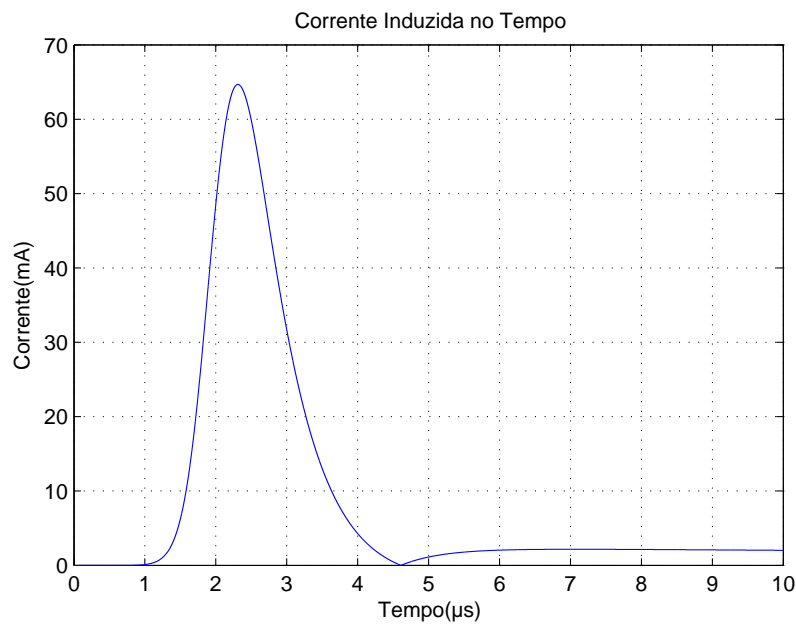


Figura 7.2.19: Corrente passando pelo corpo barra vertical

As correntes tem um valor de pico alto, porém duração muito curta. Desse modo, as correntes RMS para  $10\mu\text{s}$  são 23,28 mA e 13,50 mA, valores que possivelmente não trazem grande perigo, pelo fato verificado na equação 6.5. Não foram encontrados estudos sobre correntes para um período de tempo tão curto, as figuras 5.1.1 e 5.1.2 começam a análise no tempo de 10 ms. No entanto, se considerarmos que essas correntes possam causar alguma contração muscular que resulte na queda da pessoa há uma chance considerável de um acidente mais grave envolvendo a tensão no solo. O uso de um calçado apropriado já diminuiria muito a chance do acidente, pois a impedância considerada é para o pé descalço no solo úmido.

### 7.3 Síntese

Nesse capítulo foram feitas duas análises numéricas e uma simulação com quatro configurações diferentes. A sessão relativa a tensão de passo foi obtido os resultados já esperados por ser um dos principais causadores de acidentes envolvendo correntes elevadas para o solo nas proximidades de pessoas. Na primeira parte da sessão de campos foi feita uma análise tendo como base as equações de Uman e Master e esse resultado foi considerado como o estímulo da lei de Weiss e com isso ficou evidente que os campos gerados pela descarga oferecem pouco risco em uma situação normal. Já a a simulação feita na segunda parte da sessão chegou-se a conclusão que os campos gerados na descarga não são capazes de gerar tensões perigosas em um objeto da dimensões de uma ferramenta manual grandes, mas ainda é recomendado descartá-las em caso de uma tempestade com descargas

atmosféricas, pois dependendo de como estão sendo manipulados podem propiciar uma descarga direta na pessoa.





## 8 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi possível analisar 3 situações distintas, envolvendo descargas atmosféricas e pessoas em campo aberto, e verificar a realidade dos efeitos das descargas próximas a pessoas. Partindo da principal causa de mortes relativas a descargas atmosféricas e depois verificando duas situações relativas ao campo gerado por esse fenômeno. Deste modo, pode-se entender o motivo do grande número de acidentes envolvendo raios e os trabalhadores rurais.

Além dessa análise foram relacionados os riscos inerentes ao trabalho rural com relação a descargas atmosféricas. Com uma verificação detalhada sobre o aumento da tensão do solo, gerada pela corrente injetada pelo raio, incluindo cálculos da tensão de passo e dos limites no tempo dessa tensão. Os resultados obtidos evidenciaram o quão perigoso é esse fenômeno.

Já com relação a indução na ferramenta, foram encontrados valores baixos para tensão induzida o que pode ser ocasionado pelas pequenas dimensões da barra ou talvez por um erro no ajuste do programa, pois o incremento espacial da célula de Yee era maior que o diâmetro da barra. Mas foi encontrado um pico de corrente considerável passando pelo corpo que poderia ocasionar em acidentes.

Espera-se que com os resultados obtidos seja possível esclarecer algumas situações de risco e ajudar na conscientização, pois a maioria das mortes por descargas atmosféricas são possíveis de se evitar com o devido conhecimento, apresentado na lista do capítulo 3. Já é uma recomendação comum, em listas de como proceder caso uma tempestade com descargas elétricas esteja próxima, abandonar objetos metálicos grandes (como vara de pescar e taco de golfe), porém esses protocolos não são muito divulgados.

Um grande agravante é que a maioria das casas e construções na zona rural não possuem um sistema de aterramento adequado e o chão é de terra batida.

Além das situações estudadas nesse trabalho existem várias outras que podem ser analisadas com relação a descargas atmosféricas em campo aberto.

### 8.1 Perspectivas

- Verificar os efeitos de descargas direta e efeitos dos campos gerados por descargas em cercas metálicas não aterradas;
- Análise dos efeitos do fenômeno como descarga indireta advindo de objetos próximos a pessoas como arvores e ou veículos;

- Desenvolvimento de um programa computacional que faça a análise de incidência das ondas eletromagnéticas geradas pelos raios em objetos pequenos de maneira eficiente e rápida;
- Análise sobre as construções no meio rural e seus problemas relativos descargas atmosféricas.

# Referências

- ANDRÉS, E. *Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat terrains*. Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Colômbia, 2014. Citado na página 33.
- CIBERNAUTICA. *Pararaios*. 2016. [Http://www.cibernautica.com.ar/portugues/pararaios/pararaios.htm](http://www.cibernautica.com.ar/portugues/pararaios/pararaios.htm). Citado 2 vezes nas páginas XVII e 11.
- COMPART, J. Estudo da técnica de condição de contorno demur para problemas de alta-frequência em 3d. *MOMAG 2006 - 12º SBMO E 7º CBMAG*, MOMAG, 2006. Citado na página 30.
- DALZIEL, C. F. Dangerous electric currents. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 65, n. 8, 1946. Citado na página 26.
- GONI, M. O.; KANEKO, E.; AMETANI, A. Characteristics of the induced currents in horizontal conductors due to a nearby lightning strike. In: IEEE. *Electrical and Computer Engineering, 2008. ICECE 2008. International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 32–37. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 33.
- HEIDLER, F. et al. Parameters of lightning current given in iec 62305-background, experience and outlook. In: *Proceedings of 29th Int. Conference on Lightning Protection*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 6. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 43.
- HOLSHEIMER, J. et al. Chronaxie calculated from current–duration and voltage–duration data. *Journal of neuroscience methods*, Elsevier, v. 97, n. 1, p. 45–50, 2000. Citado na página 27.
- IEC, T. *60479-1 Effects of current on human beings and livestock*. [S.l.]: Part, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 49.
- IEEE. *IEEE guide for safety in AC substation grounding*. [S.l.]: IEEE, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- INPE/CPTEC. *Glossário*. 2016. [Http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#12](http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#12). Citado 2 vezes nas páginas XVII e 9.
- INPE/ELAT. *Definição de relâmpago*. 2016. [Http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/definicao.php](http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/definicao.php). Citado na página 9.
- LANDGRAF, F. J. G. et al. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. *Aços: perspectivas para os próximos*, v. 10, p. 109–128, 2002. Citado na página 22.
- MATHWORKS. *3D FDTD - First order MUR boundary condition*. 2016. [Http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/54557-3d-finite-different-time-domain-first-order-mur-boundary-condition](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/54557-3d-finite-different-time-domain-first-order-mur-boundary-condition). Citado na página 44.

- MENDES, O. J.; DOMINGUES, M. O. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 24, n. 1, 2002. Citado na página 10.
- MONTAL. *Conceito de raio*. 2016. [Http://montal.com.br/ultimas-noticias/item/130-nova-norma-para-spda-sai-em-2015.html](http://montal.com.br/ultimas-noticias/item/130-nova-norma-para-spda-sai-em-2015.html). Citado 2 vezes nas páginas XVII e 11.
- NASCIMENTO, C. T. C. d. et al. Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no distrito federal. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 26, n. 1, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- NOAA. *LIGHTNING RISK MANAGEMENT*. 2016. [Http://www.lightningsafety.noaa.gov/outdoors.shtml](http://www.lightningsafety.noaa.gov/outdoors.shtml). Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- NODA, T.; YOKOYAMA, S. Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 840–847, 2002. Citado 7 vezes nas páginas XVII, 23, 30, 31, 32, 33 e 48.
- PRETTI, G. *Auditoria trabalhista*. [S.l.]: Clube de Autores, 2013. Citado na página 13.
- PSENAKOVA, Z. Numerical modeling of electromagnetic field effects on the human body. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science VSB-Technical University of Ostrava, v. 5, n. 1-2, p. 319, 2006. Citado na página 22.
- RACHIDI, F. et al. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 38, n. 3, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.
- ROMERO, F. *Avaliação do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas nuvem-terra*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado 8 vezes nas páginas XVII, 24, 28, 38, 39, 40, 41 e 42.
- SANTIS, V. D. et al. Assessment of human body impedance for safety requirements against contact currents for frequencies up to 110 mhz. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, IEEE, v. 58, n. 2, p. 390–396, 2011. Citado na página 38.
- SILVA, A. L. d. *Influência de ondas eletromagnéticas oriundas de descargas atmosféricas em pessoas portadoras de prótese*. 2014. Citado na página 30.
- TAMUS, Z. Á. et al. Health effects of electromagnetic field generated by lightning current pulses near down conductors. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2011. v. 301, n. 1. Citado na página 28.
- USP/IAG. *Tipos de nuvens e sua relação com o quadro sinótico*. 2016. [Http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula05/](http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula05/). Citado na página 10.
- VISACRO, S. F. *Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*. [S.l.]: Artliber, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 25.
- VISACRO, S. F. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. [S.l.]: Artliber, 2005. Citado na página 10.