

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

IGOR MATHEUS FACCHIN

**ANÁLISE DOS RISCOS DE FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DEVIDO À TENSÃO
INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CERCAS PRÓXIMAS À
LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

PATO BRANCO

2022

IGOR MATHEUS FACCHIN

**ANÁLISE DOS RISCOS DE FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DEVIDO À TENSÃO
INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CERCAS PRÓXIMAS À
LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

**Analysis of the risks of ventricular fibrillation due to voltages induced by
lightning discharges in fences near distribution lines**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica Programa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Ósis Eduardo Leal Silva.

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

IGOR MATHEUS FACCHIN

**ANÁLISE DOS RISCOS DE FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DEVIDO À TENSÃO
INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CERCAS PRÓXIMAS À
LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Ósis Eduardo Silva Leal

Data de aprovação: 29/novembro/2022

Ósis Eduardo Silva Leal
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ricardo Vasques de Oliveira
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Géremi Gilson Dranka
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente os agradecimentos são a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por fazer tudo possível. Agradeço aos professores do curso de graduação de engenharia elétrica por todo o conhecimento passado, em especial, ao meu orientador, Ósis Eduardo Silva Leal, pela paciência, suporte e dedicação.

Agradeço a minha família pois foram essenciais nesta etapa e por fim agradeço aos amigos pelo suporte e todo o auxílio.

RESUMO

Em zonas rurais, cercas são expostas a tensões perigosas quando construídas próximas às linhas transmissão. Para minimizar os riscos critérios de aterramento e seccionamento são estabelecidos em normas da ABNT e/ou companhia. Entretanto, tais normas visam o funcionamento em regime permanente senoidal das linhas de transmissão. Porém, as cercas também estão expostas a fenômenos transitórios como descargas atmosféricas que, além de induzir tensões perigosas nos condutores da cerca, podem ocasionar tensões de passo e toque perigosas tanto para pessoas quanto para animais. Neste trabalho se propõe analisar as tensões de passo e toque em um sistema onde uma cerca, construída nas proximidades de uma linha de transmissão, é exposta a campos eletromagnéticos induzidos por uma descarga atmosférica e pelo acoplamento magnético entre linha e cerca. O objetivo principal é avaliar os riscos de fibrilação ventricular aos quais um indivíduo, localizado nas vizinhanças ou em contato com a cerca pode estar exposto durante a ocorrência do fenômeno. Nas simulações foi analisado a influência da variação da distância entre a cerca e a rede, resistividade do solo e posição na qual se encontra o indivíduo. Através deste estudo, podemos concluir que os fatores preponderantes para sobrevivência do indivíduo são a resistividade do solo e a posição do indivíduo no sistema linha-cerca. Entretanto, a generalidade dos resultados deve ser realizada com cautela, haja vista que foram negligenciados os efeitos da corrente conduzida pelo solo, variação dos parâmetros da descarga atmosférica como valor de pico da corrente e elevação de potencial devido a injeção de corrente no solo pela própria descarga atmosférica.

Palavras-chave: Descarga atmosférica. Tensão de passo, Tensão de toque. Fibrilação do Coração.

ABSTRACT

In rural areas, fences are exposed to dangerous voltages when built close to transmission lines. To minimize risks, grounding and sectioning criteria are established in ABNT and/or company norms. However, such norms aim at the sinusoidal steady state of transmission lines. Nonetheless, fences are also exposed to transient phenomena such as lightning which, in addition to inducing voltages in the conductors of the fence, can cause dangerous step and touch voltages for people and animals. This work proposes to analyze the step and touch voltages in a system where a fence, built near a transmission line, is exposed to electromagnetic fields induced by lightning and by the magnetic coupling between the line and the fence. The main objective is to evaluate the risks of ventricular fibrillation to which an individual, located in the vicinity or in contact with the fence, may be exposed during the occurrence of the phenomenon. In the simulations, the influence of the variation in the distance between the fence and the net, soil resistivity and the position of the individual was analyzed. Through this study, we can conclude that the preponderant factors for the survival of the individual are the resistivity of the soil and the position of the individual in the line-fence system. However, most of the results must be carried out with caution, given that the effects of the current conducted through the ground, variation of the atmospheric discharge parameters such as peak value of the current and potential rise due to the injection of current into the ground by the atmospheric discharge itself were neglected.

Keywords: Lightning strikes; Step Voltage; Touch Voltage; Heart Fibrillation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Procedimento para simulações de toque e passo	16
Figura 2 – Espelhamento o canal de retorno em solo condutor perfeito.....	21
Figura 3 – Fonte linear de corrente entre meios.....	27
Figura 4 – Rede de transmissão com cerca próxima: (a) cerca paralela ao eixo da linha e; (b) cerca transversal ao eixo da linha.....	29
Figura 5 – Tensão de passo.	30
Figura 6 – Tensão de toque.	31
Figura 7 – Representação do corpo humano para fenômenos transitórios.	33
Figura 8 – Configuração do corpo humano para cálculo da tensão de passo. .	34
Figura 9 – Configuração do corpo humano para cálculo da tensão de toque...	34
Figura 10 – Potencial induzido no solo devido a corrente de 1 p.u (a) e; (b) Tensão de passo calculada assumindo que a distância entre os pés do indivíduo seja de 1 metro.	37
Figura 11 – Potencial induzido no solo assumindo corrente típica de descarga atmosférica (a) e; (b) Tensão de passo na superfície do solo.	37
Figura 12 – Disposição dos condutores linha-cerca.....	38
Figura 13 – Aterramento e seccionamento de cerca conforme normas Copel..	39
Figura 14 – Corrente na base do canal.....	40
Figura 15 – Configuração do sistema para cálculo e análise da tensão de passo	40
Figura 16 – Configuração do sistema para cálculo e análise da tensão de toque	41
Figura 17 – Circuito implementado no ATP para (a) da tensão de passo; (b) da tensão de toque.....	42
Figura 18 – Tensão de passo para um indivíduo a 10 metros da linha.	44
Figura 19 – Efeitos da corrente no coração (a) fator de severidade $S_{1.4}$ e; (b) carga elétrica Sc	45
Figura 20 – Tensão de toque para um indivíduo a 10 metros da linha.....	46
Figura 21 – Integral da corrente elevada a 1,4 (a); Carga elétrica (b).	46
Figura 22 – Tensão com diferentes R_d para (a) toque e; (b) passo.....	47
Figura 23 – Fator severidade com diferentes R_d para tensão de (a) toque e; (b) passo.....	47
Figura 24 – Carga elétrica no coração com diferentes R_d para situações de (a) toque e; (b) passo.	48
Figura 25 – Diferentes resistividades de solo para tensões de (a) toque e; (b) passo.....	49
Figura 26 – Corrente integralizada elevada a 1,4 no coração com resistividades de solo variantes para (a) toque e; (b) passo.	50
Figura 27 – Carga elétrica no coração com resistividades de solo variantes para de tensão de (a) toque e; (b) passo.	50
Figura 28 – Distâncias R_t e R_p para tensão de (a) toque e; (b) passo.....	51
Figura 29 – Fator de severidade variando R_t e R_p para tensão de (a) toque e; (b) passo.....	52
Figura 30 – Carga elétrica variando R_t e R_p para tensão de (a) toque e; (b) passo.	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Relevância e motivação	13
1.2 Objetivo	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Metodologia	15
1.4 Estrutura do trabalho	16
2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: FENÔMENO MODELAGEM	18
2.1 Modelo da corrente na base do canal	18
2.2 Modelo do canal de retorno	19
2.3 Modelo dos campos eletromagnéticos	21
2.4 Modelos de linha para o cálculo de tensão induzida	24
3. POTENCIAL INDUZIDO NO SOLO E SEUS EFEITOS	26
3.1 Potencial induzido no solo	27
3.2 Tensão de toque e tensão de passo	30
3.3 Efeito das tensões impulsivas no corpo humano	32
4. ESTUDO DE CASO	35
4.1 Potencial induzido no solo devido a uma corrente injetada por uma haste de aterramento	36
4.2 Tensão de passo e toque no sistema linha-cerca	38
4.2.1 Detalhes das simulações e modelos utilizados	38
4.2.2 Características da tensão de passo e toque.	43
4.2.3 Influência da distância da cerca em relação à linha de transmissão	47
4.2.4 Influência da resistividade do solo.....	48
4.2.5 Influência da posição do indivíduo.	50
5. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO

Para garantir a segurança na operação das redes elétricas são necessários normas e critérios de segurança que estabeleçam condições adequadas de funcionamento dos equipamentos e seus dispositivos de proteção (ANEEL, 2010). Os critérios de segurança não devem visar apenas garantir o funcionamento seguro dos equipamentos elétricos conectados à rede elétrica, mas também, garantir que pessoas ou animais estejam seguros tanto nas vizinhanças, quanto no interior de tais instalações (NBR, 2019). Para garantir a segurança das instalações elétricas a norma regulamentadora 10 (NR 10) estabelece as chamadas zonas de riscos. Essas são classificadas de acordo com a tensão nominal da instalação elétrica, a partir da qual é estabelecido o raio de delimitação entre zona de risco e controlada e entre zona controlada e livre (NBR, 2019). A depender da classificação da zona de risco são estabelecidas regras de acesso. Quanto maior o risco de acidente maior são as restrições de acesso. Para garantir que animais ou pessoas sem treinamento adequado não adentrem em uma zona classificada, é exigido instalação de avisos e anteparos para restringir o acesso (NBR, 2019). Devido às características geográficas, as instalações elétricas, como linhas de transmissão¹ estão mais propícias a falhas como curto-circuito devido a toque de árvores, sobretensões induzidas provocadas por descargas atmosféricas entre outros (LEAL, 2013)

Na zona rural as linhas de transmissão são construídas nas proximidades de cercas utilizadas para delimitar propriedades e/ou garantir que animais não circulem livremente entre áreas e/ou propriedades. Contudo, a proximidade entre as linhas de transmissão e as cercas pode fazer surgir nas cercas tensões perigosas a animais e seres humanos. Neste contexto a ABNT, por meio da NBR 15688/2011 defini que a cerca deve ser construída paralela ou transversal a linha de transmissão. Para cercas transversais todos os condutores das cercas deverão ser seccionados e

¹ É comum classificar as linhas de transmissão quanto ao seu nível de tensão nominal em linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição (GARCIA; DUZZI, 2012). Contudo, para facilitar a leitura neste trabalho, não será usado dessa classificação, ou seja, independentemente do nível de tensão todas as linhas serão denominadas linha de transmissão.

aterrados em cada lado a 30 metros do eixo da linha de distribuição. Para o caso de cercas paralelas a linha de transmissão, construídas a menos de 30 metros em relação a linha, seus condutores deveram ser aterrados ou seccionados a cada 250 metros (NBR, 2011). Ambos os critérios são comumente adotados pelos agentes de distribuição como é o caso da Copel, cujos critérios são descritos na norma técnica 903100 (COPEL, 2011).

Entretanto, essas medidas de proteção são focadas em reduzir os riscos provocados por cargas induzidas nos condutores das cercas localizadas nas proximidades das linhas de transmissão quando operando em regime permanente senoidal. Porém, é importante verificar se tais critérios também oferecem proteção minimamente adequada, no momento do surgimento de transitórios eletromagnéticos como, por exemplo, sobretensões temporárias, curto-circuito e sobretensões provocadas por descargas atmosféricas. Portanto, o foco deste trabalho é estudo dos riscos de fibrilação ventricular em indivíduos próximos à cercas devido a elevação do potencial no solo quando da ocorrência de uma descarga atmosférica. O potencial no solo está fortemente relacionado às correntes injetadas no solo nos pontos de aterramento. No contexto deste trabalho as correntes injetadas são causadas pelas sobretensões induzidas por descargas atmosféricas na cerca e na linha de transmissão, este último em razão do acoplamento magnético entre os condutores da cerca e da linha de transmissão.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

O propósito deste trabalho é analisar as tensões induzidas por descargas atmosféricas em cercas localizadas nas vizinhanças de linhas de distribuição, sobre a ótica dos riscos de fibrilação ventricular em indivíduos próximos.

1.2.2 Objetivos específicos

A partir de tal objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Definir modelo para cálculo de potencial no solo para estudos de sobre tensões impulsivas de passo e toque;
- Definir modelo elétrico do corpo humano para caso de tensão de toque e passo impulsivas.
- Definir estratégia/modelo para avaliação do risco de fibrilação ventricular;
- Selecionar estudo de caso para o cálculo da corrente impulsiva no coração;
- Avaliar resultados obtidos visando identificar os riscos aos quais o indivíduo está exposto.

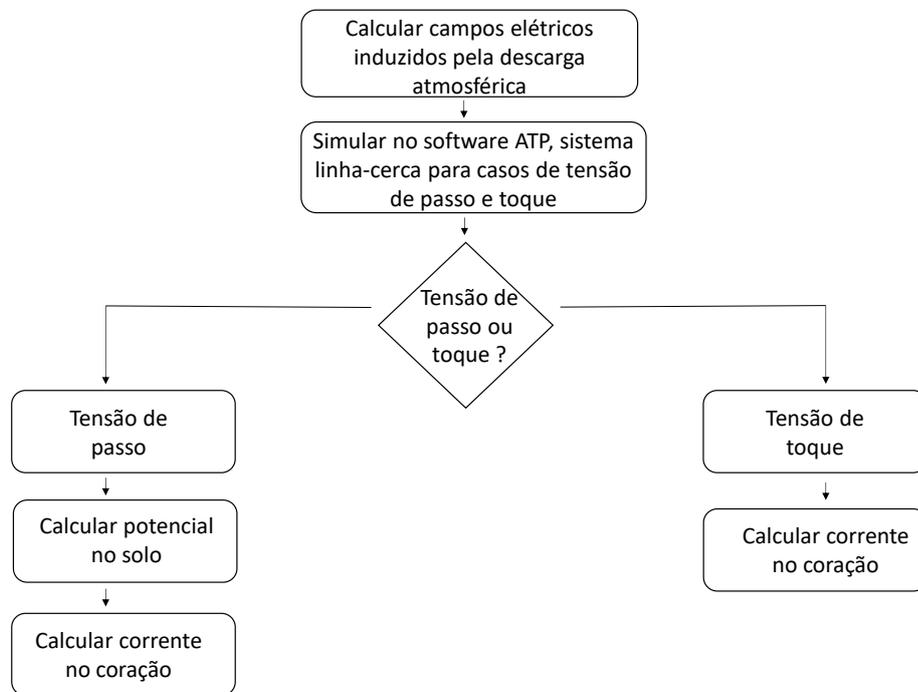
1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, partiu de um estudo bibliográfico buscando caracterizar o fenômeno descargas atmosféricas e seus efeitos em condutores aéreos. A caracterização do fenômeno descarga atmosférica envolve: corrente na base do canal, canal de retorno, cálculo dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas, modelos de acoplamento que incorporam efeitos de campos elétricos externos em linhas. Na sequência buscou-se entender como o ocorre o fenômeno de indução de potencial no solo e, conseqüentemente a caracterização de tensão de toque e de passo. Por fim, quais são os efeitos de tensões impulsivas no corpo humano.

O diagrama ilustrado na Figura 1 mostra as etapas realizadas para a realização das simulações. Primeiramente são calculados os campos elétricos devido a descarga atmosférica para cada um dos condutores do sistema linha-cerca, essa etapa é realizada no *software* Matlab. Na sequência, utiliza-se o *software* ATP para resolver o circuito composto pela linha de transmissão, cerca, aterramento e corpo

humano (modelado por meio de circuito elétrico equivalente). O efeito das descargas atmosféricas nos condutores da linha e da cerca é realizado por meio de fontes externas de corrente obtidas como o modelo estendido no domínio das fases, proposto por De Conti e Leal (2013). A tensão de passo e toque, bem como seus efeitos, são calculadas em simulações distintas. Para as análises da tensão de toque o circuito representativo do indivíduo é conectado diretamente aos condutores da cerca. Assim, a corrente que circula pelo corpo do indivíduo é calculada automaticamente pelo ATP. A análise de tensão de passo também é realizada automaticamente pelo ATP, porém a tensão induzida no solo é representada por meio de fontes controladas de tensão.

Figura 1 – Procedimento para simulações de toque e passo



Fonte: Autoria própria

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em 5 capítulos. No Capítulo 1 tem-se a introdução do trabalho bem como objetivos gerais e específicos. No Capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno descargas atmosféricas visando identificar os principais modelos disponíveis na literatura. No Capítulo 3 é realizado

uma revisão bibliográfica a respeito da representação do potencial induzido no solo, os efeitos das tensões de toque e passo impulsivas em um modelo elétrico do corpo humano para descargas atmosféricas. No Capítulo 4 é discorrido sobre as simulações realizadas no ATP para um sistema linha-cerca. Por fim, as conclusões obtidas nos diferentes casos abordados, a relevância do trabalho e sugestões de trabalhos futuros são descritas no Capítulo 5.

2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: FENÔMENO MODELAGEM

Descargas atmosféricas são fenômenos naturais que ocorrem na atmosfera do nosso planeta e podem causar danos aos componentes dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. A interação das descargas atmosféricas com os componentes da rede pode ser de forma direta ou indireta. As descargas diretas são caracterizadas por atingirem diretamente os componentes da rede elétrica. As descargas indiretas, por sua vez, são caracterizadas por atingir um ponto próximo a rede, em razão da maior probabilidade de ocorrer e devido ao nível de isolamento da rede e equipamentos, as descargas indiretas merecem especial atenção nos estudos de desempenho de linhas (LEAL, 2013).

A modelagem do fenômeno de descargas atmosféricas indiretas pode ser realizada dividindo o estudo em quatro partes (COORAY, 2014): i) modelo da corrente na base do canal, cuja representação pode ser realizada por uma soma de duas funções de Heidler (HEIDLER; CVETIĆ; STANIĆ, 1999), ou por uma soma de equações exponenciais (RHODES; GOLDE, 1941); ii) modelo do canal de retorno, cujos modelos mais utilizados para tensão induzida são os definidos como modelo de engenharia (COORAY, 2003), exemplo modelo TL (UMAN; MCLAIN, 1969); iii) modelo dos campos eletromagnéticos incluindo o efeito das perdas no solo (BARBOSA, 2009a); iv) modelo de linha que inclua o efeito dos campos eletromagnéticos que iluminam a linha, comumente denominados de modelos de acoplamento (PAOLONE et al., 2009).

2.1 MODELO DA CORRENTE NA BASE DO CANAL

O fenômeno descarga atmosférica é um deslocamento de cargas elétricas entre nuvens, ou entre uma nuvem e a terra (COORAY, 2003). Nesse contexto um dos parâmetros analisados nesta seção é a corrente na base do canal da descarga, também chamada de corrente de retorno. Para a modelagem da corrente na base do canal ($i(0,t)$), uma expressão analítica muito utilizada é a expressão dupla exponencial, conforme Equação (1) (RHODES; GOLDE, 1941). Esta representação é

muito utilizada na literatura por sua simplicidade de representação da forma da corrente.

$$i(0, t) = I_0 \cdot [e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}], \quad (1)$$

em que $I_0 [k \cdot A]$ representa a amplitude da corrente, t é o tempo a partir do início da descarga atmosférica e $k_1 [s^{-1}]$, $k_2 [s^{-1}]$ representam as constantes de tempo desejadas, $i(0, t)$ é a corrente na base do canal na posição inicial e instante de tempo $t [s]$.

Outra maneira de se representar a corrente na base do canal, proposta por Heidler, é descrito pela Equação (2), tida como uma das melhores formas de representação da corrente de retorno observadas nos fenômenos reais (HEIDLER; CVETIĆ; STANIĆ, 1999).

$$i(0, t) = \sum_{j=1}^2 \frac{I_j}{e^{\eta_j}} \cdot \left(\frac{t}{\tau_{j1}} \right)^{\eta_j} \cdot \frac{e^{\left(\frac{-t}{\tau_{j2}} \right)}}{e^{\frac{-t}{\tau_{j1}}}}, \quad (2)$$

$$\eta_j = - \left(\frac{\tau_{j1}}{\tau_{j2}} \right) \cdot \left(\frac{\tau_{j1}}{\tau_{j2}} \right)^{\frac{1}{\eta_j}}, \quad (3)$$

onde $I_j [k \cdot A]$ é a amplitude da corrente, $\tau_{j1} [s]$ é a constante de tempo de crescimento de frente da onda $\tau_{j2} [s]$ é a constante de tempo de decaimento da onda, η_j o fator de correção da amplitude, todos para a j -ésima função de Heidler.

2.2 MODELO DO CANAL DE RETORNO

Para se representar as descargas atmosféricas, se faz necessário ter um modelo do comportamento espacial e temporal da corrente, injetada na base do canal, que viajam ao longo do canal formado entre a nuvem e o solo, estes modelos são chamados de modelo do canal de retorno. Os modelos existentes na literatura são comumente classificados em modelos físicos, modelos de engenharia, modelos eletromagnéticos e modelos por parâmetros de transmissão (COORAY, 2014). Para o cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas em redes e transmissão, os modelos de engenharia representam de modo satisfatório o fenômeno, pois

reproduzem as principais características de descargas atmosféricas e, como sua matemática não é tão complexa, os modelos de engenharia são amplamente empregados nos estudos de tensão induzida (LEAL, 2013).

Dentre os modelos de engenharia, destacam-se os modelos Transmission Lines (TL) (UMAN; MCLAIN, 1969), *Transmission Line Model with Linear Decay* (MTLL) (RAKOV e DULZON, 1987), *Transmission Line Model with Exponencial Decay* (MTLE) (NUCCI et al., 1988). O comportamento da corrente ao longo do canal para o TL, MTLE e MTLL pode ser descrito pela Equação (4) (RAKOV, 1997).

$$i(z', t) = u \left(t - \frac{z'}{v} \right) \cdot P(z' \cdot t) \cdot i \left(0, t - \frac{z'}{v} \right), \quad (4)$$

onde $P(z' \cdot t)$ representa a taxa de atenuação, $i(z', t)$ [$k \cdot A$] é a corrente injetada na base do canal e $u(t)$ é a função degrau que são dados por v [m/s] que é a velocidade da descarga de retorno e z' [m] é a altura do elemento diferencial em relação ao solo. A taxa de atenuação $P(z' \cdot t)$ para os diferentes modelos pode ser vista na Tabela 1. Na Tabela 1 o termo λ [m^{-1}] representa a constante de atenuação ao longo do canal.

Tabela 1 – Taxa de atenuação dos modelos TL, MTLL e MTLE.

Modelo	$P(z' \cdot t)$
TL	1
MTLL	$1 - \frac{z'}{\lambda}$
MTLE	$e^{-\frac{z'}{\lambda}}$

Fonte: (LEAL, 2013).

Pela função da taxa de atenuação [$P(z' \cdot t)$] descrita na Tabela 1, pode se verificar que o modelo TL considera que a corrente de retorno viaja ao longo do canal sem sofrer atenuação ou distorção. Para o modelo MTLL se considera que a corrente de retorno tem um decaimento linear e o modelo MTLE um decaimento exponencial.

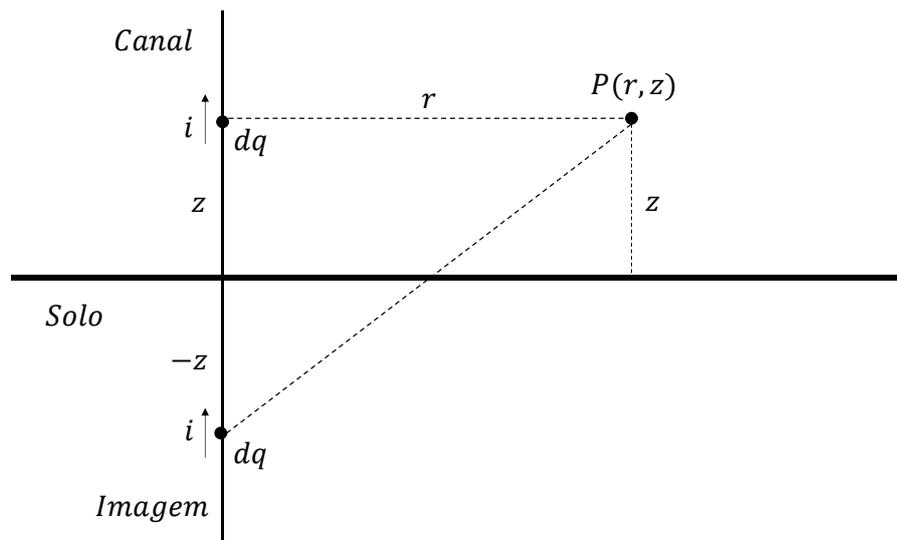
Apesar das diferenças na função de atenuação utilizada em cada um dos modelos, a taxa de variação dos campos eletromagnéticos produzidos por eles são equivalentes (BARBOSA, 2009a). Sabendo-se que a tensão induzida é altamente dependente da taxa de variação do campo eletromagnético é possível afirmar que a forma de onda da tensão induzida calculada com os modelos TL, MTLL e MTLE são muito próximas (BARBOSA, 2009a). Portanto, nos estudos realizados no âmbito deste

trabalho, optou-se por utilizar o modelo TL para cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas devido sua equivalência aos modelos mais utilizados na literatura, pela facilidade de implementação do modelo e pela sua eficiência computacional.

2.3 MODELO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Os cálculos de campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas são abordados de duas maneiras, solo perfeitamente condutor e solo com condutividade finita. Assumir o solo como condutor perfeito permite o uso do teorema das imagens, no qual, consiste em espelhar a distribuição de cargas e correntes do canal de retorno por meio de um canal fictício abaixo dele, ou seja, dentro do solo conforme a Figura 2. Esse procedimento simplifica consideravelmente a solução do problema, além de reduzir o custo computacional. Por outro lado, o cálculo rigoroso dos campos eletromagnéticos considerando diretamente o efeito do solo, realizado via solução das equações de Sommerfeld, somente é possível no domínio da frequência (COORAY, 2003).

Figura 2 – Representação do canal de retorno sob o solo e de sua imagem para solo condutor perfeito.



Fonte: Autoria própria.

As cargas elétricas ao longo do canal representadas por d_q , $P(r, z)$ o ponto de observação em que r [m] é a distância horizontal da carga ao ponto de observação e z [m] a distância vertical.

Na literatura é comum supor solo condutor perfeito para o cálculo do campo elétrico vertical e campo magnético azimutal uma vez que ambos os campos sofrem pouca influência das perdas no solo (COORAY, 2014) e ambos os campos podem ser calculados assumindo solo condutor perfeito, com razoável acurácia, para distância de até 10 km (BARBOSA, 2009). Por outro lado, o campo elétrico radial é altamente dependente da condutividade do solo mesmo quando o observador está a alguns metros (COORAY, 2014). Então, assumindo solo condutor perfeito, modelo de linha TL e canal retilíneo, Barbosa e Paulino (2009) deduzem equações para o cálculo do campo elétrico vertical, Equação (5), e campo magnético azimutal, Equação (6) descritas diretamente no domínio do tempo.

$$E_v = \left(\frac{t - \frac{r}{c}}{T} \right) \cdot E_0 + \frac{Z_E \cdot I_0 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot v_r \cdot T \cdot v} \ln \left[\frac{v \cdot t + \sqrt{(v \cdot t)^2 + \lambda \cdot r^2}}{r^2 \cdot (1 - v_r)} \right], \quad (5)$$

$$H = \frac{H_0 \cdot r}{v_r \cdot t \cdot c} \cdot \left[\left(\lambda + \left(\frac{c \cdot v_r \cdot t}{r} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad (6)$$

onde, $Z_E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120 \cdot \pi$ [Ω], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], $v_r = \frac{v}{c}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m], no qual μ_0 é a permeabilidade, ε_0 é a permissividade, H_0 [A/m] é o campo magnético para uma altura z igual a zero, z [m] é a altura em relação ao solo do ponto de interesse, c [m/s] é a velocidade da luz, v [m/s] é a velocidade de propagação da descarga de retorno no canal, t [s] é o tempo a partir do início da descarga atmosférica, r [m] é a distância da descarga ao ponto de interesse, I_0 [kA] é a amplitude máxima da descarga e T [s] é o tempo máximo para corrente atingir seu valor de pico.

Ao contrário do campo elétrico vertical e do campo magnético, o campo elétrico radial é fortemente afetado pelas perdas no solo (COORAY, 2014). Contudo, equações analíticas para seu cálculo, incluindo o efeito do solo, são demasiadamente complexas, exigem um alto esforço computacional e existem somente no domínio da frequência (SOMMERFELD, 1920). Para contornar o problema, uma prática comum

na literatura, é subdividir o campo elétrico horizontal em duas parcelas. A primeira parcela é calculada assumindo solo condutor perfeito. Por outro lado, a segunda parcela, que pode ser chamada parcela de correção, visa incluir o efeito da condutividade finita do solo no campo elétrico horizontal. Das formulações existentes a mais difundida na literatura é a de Cooray-Rubinstein (COORAY, 1992)(RUBINSTEIN, 1996) desenvolvida no domínio da frequência. Em 2009, surgiu a primeira formulação analítica aproximada para o cálculo do campo elétrico horizontal, incluindo o efeito da condutividade finita do solo, diretamente no domínio do tempo (Barbosa e Paulino, 2009). A formulação proposta por Barbosa e Paulino (2009), descrita pela Equação (7), assume modelo de canal de retorno descrito pelo modelo TL. Um ponto importante a ser observado é que a Equação (7), cuja parcela E_{rq} representa a parcela do campo elétrico horizontal induzida pelas cargas distribuídas ao longo do canal de retorno, dada pela Equação (8), e parcela E_{ri} representa a parte induzida pela corrente no canal de descarga, dada pela Equação (9), é menos restritiva, quanto aos seus limites de validades, quando comparada à formulação proposta por Cooray-Rubinstein (COORAY, 1992)(RUBINSTEIN, 1996). As equações de Cooray-Rubinstein se aproximam da solução exata das integrais de Sommerfeld, porem isso é verdade para casos em que a descarga ocorre a uma distância maior que 100 m do observador e o solo possui condutividade entre 0,01 e 0,001 s/m. Por essa razão, as equações de Barbosa e Paulino serão utilizadas neste trabalho.

$$E_r = E_{rq} + E_{ri}, \quad (7)$$

$$E_{rq} = \frac{Z_E \cdot I_d \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{c} \cdot r^2} \cdot u\left(t - \frac{r}{c}\right) \cdot \left\{ 1 - \frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \left(v \cdot \frac{t}{r}\right)^2\right]^{1,5}} \right\}, \quad (8)$$

$$E_{ri} = -Z_E \cdot H \left\{ \frac{2 \cdot \varepsilon_r + a \cdot \left(t - \frac{r}{c}\right) \cdot [1 + 3 \cdot b \cdot \varepsilon_r + 2 \cdot a \cdot b \cdot \left(t - \frac{r}{c}\right)]}{2 \cdot [1 + a \cdot b \cdot \left(t - \frac{r}{c}\right)]^{\frac{1}{2}} [\varepsilon_r + a \cdot \left(t - \frac{r}{c}\right)]^{\frac{3}{2}}} \right\}, \quad (9)$$

onde $a = \frac{\pi \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0)}$, $b = \frac{1}{(\sigma \cdot Z_E \cdot r)^2}$, σ é a condutividade do solo.

2.4 MODELOS DE LINHA PARA O CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA

Para o cálculo das tensões induzidas geradas por campos eletromagnéticos externos em linhas de transmissão, é necessário o uso de um modelo de acoplamento. Tais modelos são responsáveis por incorporar a influência dos campos eletromagnéticos externos nas tradicionais equações do telegrafista. Nas Equações (10) e (11) é descrito as tradicionais equações de linha cuja formulação não inclui o efeito de campos eletromagnéticos externos.

$$\frac{d\mathbf{V}(x, s)}{dx} + \mathbf{Z}(s) \cdot \mathbf{I}(x, s) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{I}(x, s)}{dx} + \mathbf{Y}(s) \cdot \mathbf{V}(x, s) = 0, \quad (11)$$

no qual $\mathbf{Z}(s)^2$ [Ω/m] é a matriz de impedância longitudinal, $\mathbf{Y}(s)$ [S/m] é a matriz de admitâncias transversais e $\mathbf{V}(x, s)$ [V] vetor de tensão e $\mathbf{I}(x, s)$ [A] vetor de corrente da linha. Todas as matrizes possuem ordem $N_f \times N_f$ e os vetores $N_f \times 1$, onde N_f corresponde ao número de condutores da linha.

Resolvendo as Equações (10) e (11) pelo método das características no domínio das fases, omitindo a dependência da frequência para aliviar a notação, obtém-se:

$$\mathbf{V}(l) - \mathbf{Z}_c \mathbf{I}(l) = e^{-\Gamma_v l} \cdot [\mathbf{V}(0) + \mathbf{Z}_c \mathbf{I}(0)] \quad (12)$$

$$\mathbf{V}(0) - \mathbf{Z}_c \mathbf{I}(0) = e^{-\Gamma_v l} \cdot [\mathbf{V}(l) + \mathbf{Z}_c \mathbf{I}(l)] \quad (13)$$

$\mathbf{Z}_c = \mathbf{Y}^{-1} \sqrt{\mathbf{Y}\mathbf{Z}}$ [Ω] é a matriz impedâncias de características, $\Gamma_v = \sqrt{\mathbf{Z}\mathbf{Y}}$ [Ω] que representa a matriz de constante de propagação, 0 representa o termina da linha localizando em $x = 0$ e l [m] o comprimento total da linha (ou $x = l$). As equações (12) e (13) são as bases para a formulação do modelo ULM (*Universal Line Model*) (ATEF MORCHED, BJERN GUSTAVSEN, 1999), desenvolvido diretamente no domínio das fases e do modelo FD-Line (*Frequency-Dependent Line Model*) (MARTI, 1982), desenvolvido no domínio modal assumindo matriz de transformação real, constante e independente da frequência.

² Neste texto, os termos em negrito representam vetores ou matrizes. Variáveis em maiúsculo representam a grandeza no domínio da frequência e minúsculas no domínio do tempo.

Para isso existem modelos que levam em consideração as perdas, como o modelo de Agrawal (AGRAWAL; PRICE; GURBAXANI, 1980) das equações (15) e (16).

$$\frac{dV(x, s)}{dx} + Z(s) \cdot I(x, s) = s \cdot \int_0^h B_y(x, z, s) dz \quad (15)$$

$$\frac{dI(x, s)}{dx} + Y(s) \cdot V(x, s) = -Y(s) \cdot \int_0^h E_z(x, z, s) dz \quad (16)$$

em que vetor $B_y(x, z, s)$ [T] é a densidade de fluxo magnético incidente na linha e $E_z(x, z, s)$ [V/m] é o vetor de campo elétrico vertical, ambos vetores calculados sem a presença da linha. Novamente utilizando o método das características se obtém as equações (17) e (18).

$$V(l) - Z_c I(l) = e^{-\Gamma_v l} \cdot [V(0) + Z_c I(0)] + \int_0^l e^{-\Gamma_v(l-x)} E_x(x) dx + e^{-\Gamma_v l} h E_z(0) - h E_z(l) \quad (17)$$

$$V(0) - Z_c I(0) = e^{-\Gamma_v l} \cdot [V(l) + Z_c I(l)] + \int_0^l e^{-\Gamma_v(x)} E_x(x) dx + h E_z(0) - e^{-\Gamma_v l} h E_z(l) \quad (18)$$

onde E_x [V/m] é um vetor de ordem $n \times 1$ contendo os valores do campo elétrico horizontal, E_z [V/m] é um vetor de ordem $n \times 1$ contendo os valores do campo elétrico vertical e h [m] é uma matriz diagonal de ordem $n \times n$ contendo a altura de cada condutor. A grande dificuldade para a proposição de modelos baseados no método das características que incluem a influência dos campos externos, Equações (17) e (18) é a representação das perdas das linhas de transmissão juntamente com o efeito distribuído dos campos incidentes. Para fins de simulação não há um modelo de linha dedicado implementado no *software* ATP, para contornar o problema Leal (2013) propôs um método, denominado de Modelo Estendido no Domínio das Fases (EPD do inglês *Extended Phase Domain Model*) em que são incorporadas fontes de corrente, conectadas nos terminais externos do modelo de linha, para representar os campos eletromagnéticos externos. As fontes de corrente são dadas pelas equações (19) e (20) para fontes de corrente.

$$j_0 = Y_c \cdot [U_l - e^{-\Gamma_v l} \cdot U_0] \quad (19)$$

$$j_l = Y_c \cdot [U_0 - e^{-\Gamma_v l} \cdot U_l] \quad (20)$$

$$U_0 = U_0 - e^{-\Gamma_v l} \cdot U_l \quad (21)$$

$$U_l = U_l - e^{-\Gamma_v l} \cdot U_0 \quad (22)$$

onde

$$U_l = \int_0^l e^{-\Gamma_v(l-x)} \cdot \mathbf{E}_x(x) \cdot dx + e^{-\Gamma_v l} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}_z(0) - \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}_z(l) \quad (23)$$

$$U_0 = \int_0^l e^{-\Gamma_v(x)} \cdot \mathbf{E}_x(x) \cdot dx + \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}_z(0) - e^{-\Gamma_v l} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{E}_z(l) \quad (24)$$

3. POTENCIAL INDUZIDO NO SOLO E SEUS EFEITOS

No caso específico de eventos relacionados a descargas atmosféricas, as tensões e correntes induzidas possuem característica impulsiva. Ou seja, tensões e correntes de impulso são os valores máximos de corrente e tensão, dados em seus valores instantâneos e que variam conforme a ocorrência do fenômeno (MAMEDE, 2017). Quando correntes impulsivas são injetadas no solo, seja por um sistema de aterramento, seja por um condutor energizado em contato com o solo, surge nas proximidades do ponto de injeção potenciais induzidos no solo. Os potenciais induzidos oferecem riscos a indivíduos e animais que circundam a região. Os riscos estão associados principalmente ao potencial de passo e potencial de toque. Entretanto, a norma brasileira NBR 5410 (2004), que trata dos riscos associados aos potenciais de toque e de passo em instalações elétricas e suas vizinhanças, é aplicada somente a fenômenos com característica lenta, conteúdo harmônico próximo da fundamental (inclusive a fundamental), cujo tempo de duração é relativamente longa quando comparada com tensões induzidas por descargas atmosféricas. Um dos fenômenos de característica lenta mais conhecido é o curto-circuito. Além disso, poucos trabalhos na literatura abordam o efeito de tensões impulsivas no corpo humano e os riscos envolvidos. Neste capítulo, será abordado a teoria básica para estudos envolvendo os potenciais induzidos no solo, o modelo de impedâncias do corpo humano e os efeitos das tensões impulsivas no corpo.

3.1 POTENCIAL INDUZIDO NO SOLO

Assumindo um meio homogêneo e isotrópico de resistividade ρ [$\Omega \cdot m$], o potencial induzido em um ponto “ p ” do espaço, cujo referencial é infinitamente distante, devido a uma fonte pontual de corrente I (CAMPOS, 1991) é dado por

$$V_p = \rho \cdot \frac{I}{4 \cdot \pi \cdot r_o}, \quad (25)$$

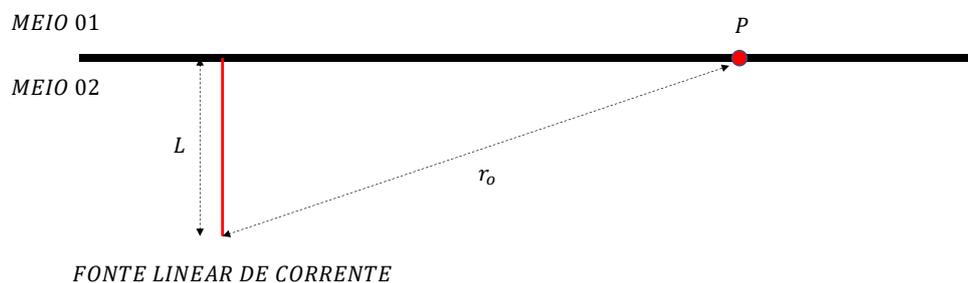
em que r_o [m] é a distância entre a fonte de corrente e o ponto “ p ”. Por outro lado, assumindo uma fonte linear de corrente de comprimento L [m], a equação torna-se (CAMPOS, 1991):

$$V_p = \int_L \rho \cdot \frac{I}{4 \cdot \pi \cdot r} dL, \quad (26)$$

Tomando a fonte linear de corrente imersa em um meio semi-infinito, como apresentado na Figura 3, o potencial em um ponto “ p ” localizado entre os dois meios, obtido aplicando a teoria das imagens, será dado por (CAMPOS, 1991),

$$V_p = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L} \left[\ln \left(\frac{L + \sqrt{(r_o)^2 + L^2}}{r_o} \right) \right]. \quad (27)$$

Figura 3 – Fonte linear de corrente entre meios.



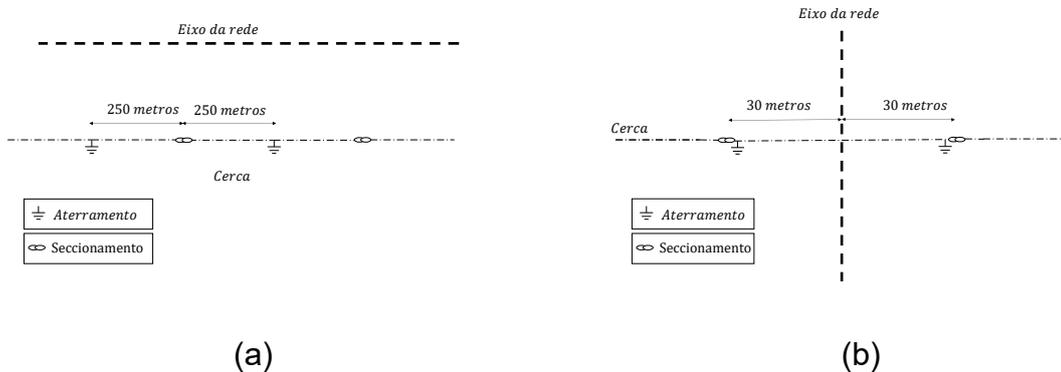
Fonte: Autoria própria.

Supondo que o solo e o ar possam ser considerados como meios semi-infinitos, homogêneos e isotrópicos, a Equação (27) pode ser utilizada para descrever o potencial induzido em um ponto “ p ”, localizado na superfície do solo, por um eletrodo vertical imerso neste. É importante destacar, que no caso específico de tensões

impulsivas, cujo conteúdo harmônico é de alguns hertz ou DC a algumas dezenas de megahertz, a Equação (27) pode não caracterizar adequadamente todo o fenômeno. Nestas condições, é necessário obter equações que inclui a variação dos parâmetros do solo com a frequência e o efeito das correntes de deslocamento no solo, tais equações geralmente são desenvolvidas no domínio da frequência e não possuem solução trivial (SILVA, 2013). Recentemente (SILVA, 2013) propôs uma equação aproximada que inclui o efeito das correntes de condução diretamente no domínio do tempo. Contudo, em razão do tempo para elaboração deste trabalho de conclusão de curso, o uso de equações mais rigorosas se caracteriza como proposta de continuidade.

Para evitar o surgimento de potenciais perigoso em cercas utilizadas para delimitação de propriedades, principalmente propriedades rurais, localizadas nas vizinhanças de redes de distribuição a ABNT, por meio da (NBR, 2011), e Companhias de energia elétrica, por meio de normas próprias [exemplo norma técnica 814903 (COPEL, 1992)], recomenda que os condutores das cercas sejam aterrados e seccionados. A NBR 15688 (2009) recomenda que os aterramentos e seccionamentos sejam intercalados em intervalos de 250 metros para cercas paralelas às linhas de distribuição, conforme a Figura 4(a). Para cercas transversais recomenda-se que a cerca seja aterrada e seccionada a 30 metros do eixo em ambos os lados da linha, conforme a Figura 4(b). A Copel adota os mesmos parâmetros para aterramento e seccionamento de cercas por meio da norma técnica 814903. Além disso, a COPEL (vide norma técnica 812094) estabelece que o aterramento das cercas deva ser realizado por uma haste zincada de 1,20 metros de comprimento (COPEL, 2013), interligada aos fios da cerca por arame de aço zincado respeitando a norma técnica 814903 (COPEL, 1992). Em todos os casos, como mostrados na Figura 4, os aterramentos são constituídos por um único eletrodo cravado no solo. Portanto, o potencial induzido em um ponto “ p ” na superfície do solo, devido a circulação de corrente no aterramento da cerca, pode ser obtido utilizando a Equação (27).

Figura 4 – Rede de transmissão com cerca próxima: (a) cerca paralela ao eixo da linha e; (b) cerca transversal ao eixo da linha.



Fonte: Baseado em NBR 15688.

Por fim, resta determinar a corrente I que será injetada no solo pelo eletrodo de aterramento. Para tal, é comum representar aterramentos elétricos simplesmente por uma resistência, geralmente denominada de resistência de aterramento. Contudo, essa simplificação é razoável em si tratando de sinais com energia predominantemente na frequência de 60 Hz (ou regime permanente). Tratando-se especificamente de tensões induzidas por descargas atmosféricas, cujo espectro harmônico possui energia em uma ampla faixa de frequência, de 0 Hz a algumas dezenas de MHz (COORAY, 2014), representar o aterramento por uma simples resistência pode não ser a melhor estratégia (DE CONTI, 2006).

Em De Conti (2006), é proposto um modelo simplificado para representar a impedância de aterramento constituído de três hastes ou uma única haste, com comportamento semelhante a resposta de um filtro passa-baixa. Seu modelo para aterramentos constituídos de três hastes é válido para frequências de até 5 MHz e, por outro lado, para aterramentos de uma única haste é válido até $2,5\text{ MHz}$. O modelo proposto por De Conti (2006) é constituído de um circuito RC paralelo. Os valores de R , C variam de acordo com a resistividade do solo, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de R e C para diferentes resistividades de solo.

Parâmetros	$\rho = 100\ \Omega \cdot \text{m}$	$\rho = 500\ \Omega \cdot \text{m}$	$\rho = 1000\ \Omega \cdot \text{m}$
$R(\Omega)$	31,5	158,4	316,8
$C(\text{nF})$	1,11	1,00	0,8373

Fonte: (DE CONTI, 2006).

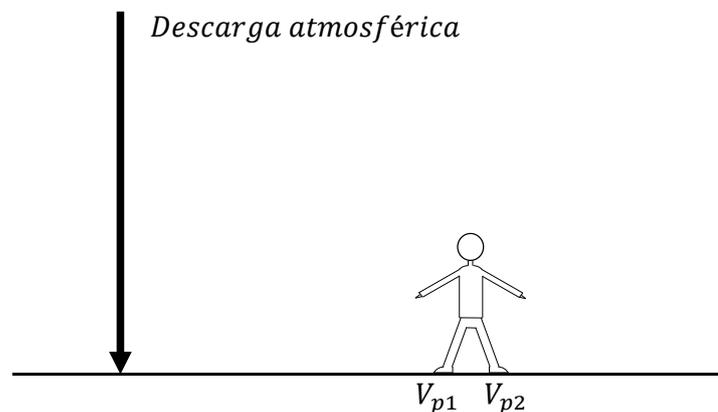
Portanto, diante da simplicidade do modelo e da sua validade dentro dos limites de frequência excitados pelas tensões induzidas por descargas atmosféricas,

para calcular a corrente a ser injetada no solo em cada ponto de aterramento, o circuito RC proposto por De Conti (2006) é acoplado aos condutores da cerca nas simulações a serem realizadas.

3.2 TENSÃO DE TOQUE E TENSÃO DE PASSO

Segundo a NBR 15751 (2009) a tensão de passo é a diferença de potencial que surge entre os pés de uma pessoa, assumindo que a distância entre os pés seja de 1,0 m. Na Figura 5 ilustra a tensão de passo dada pela diferença de tensão entre V_{p1} [V] e V_{p2} [V]. No contexto deste trabalho as tensões V_{p1} e V_{p2} descrevem o comportamento da tensão induzida na superfície do solo devido a injeção de corrente nos pontos de aterramento da cerca. No caso específico de descargas atmosféricas indiretas, os potenciais V_{p1} e V_{p2} também são função da corrente injetada no solo devido a própria descarga atmosférica, contudo o efeito do potencial de passo induzido pela descarga atmosférica não será representado e sim o efeito do potencial gerado pela corrente injetada na haste de aterramento da cerca.

Figura 5 – Representação da tensão de passo.



FONTE: Autoria própria.

Por outro lado, a tensão de toque, segundo a NBR 15751 (2009), é a diferença de potencial entre um objeto metálico em contato com uma parte do corpo e a superfície do solo, sendo esta distância horizontal igual a 1,0 m. A Figura 6 ilustra a tensão de toque que surge quando o indivíduo toca em um objeto cujo potencial é diferente daquele observado em seus pés.

Figura 6 – Representação da tensão de toque.



FONTE: Autoria própria.

A tensão de toque e passo máximas permitidas são baseadas na corrente máxima de não fibrilação do coração, tal valor de corrente é baseado no tempo de exposição a corrente. Segundo a NBR 15751 (2009) correntes de curta duração ocorrem de 0,3 a 3 segundos e correntes de longa duração são maiores a 3 segundos. Contudo, correntes provenientes de fenômenos transitórios, como descargas atmosféricas, ocorrem em um tempo menor do que as correntes de curta duração, na ordem de microsegundos. O que inviabiliza a aplicação da NBR 15751 na análise das tensões de passo e toque devido a tensões induzidas por descargas atmosféricas. Diante da falta de referências e normas para análise dos riscos ao corpo humano relacionados a tensões de passo e toque devido a fenômenos impulsivo optou-se por utilizar as equações propostas por Portela (1997). Segundo Portela, a corrente de desfibrilação está relacionada ao parâmetro de severidade $S_{1,4}$ e dado pela Equação (28).

$$S_{1,4} = \int |i_c(t)|^{1,4} \cdot dt = 1,52 m \cdot A^{1,4} \cdot s \quad (28)$$

onde $i_c(t)$ é a corrente que passa pelo indivíduo e o fator de severidade é a quantidade de energia em que o indivíduo estará exposto. Segundo Portela (1997) um adulto saudável tem probabilidades ínfimas de não sofrer fibrilação no coração quando o fator de severidade for maior que $1,52 m \cdot A^{1,4} \cdot s$. Para uma probabilidade de 5% de não acontecer a fibrilação, este número sobe para $2,96 m \cdot A^{1,4} \cdot s$ (PORTELA, 1997).

Para os limites de percepção da corrente elétrica o parâmetro de severidade considerada é a carga total (S_c) que circula ou circulou no corpo humano da Equação (29).

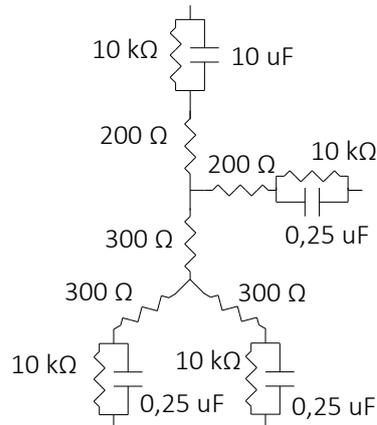
$$S_c = \int |i_c| \cdot dt \quad (29)$$

Sendo que para S_c entre $0,36$ a $0,9 \mu \cdot C$ há somente a percepção do choque elétrico pelo indivíduo e para $S_c \geq 7,6 \mu \cdot C$ tem-se a percepção de dor.

3.3 EFEITO DAS TENSÕES IMPULSIVAS NO CORPO HUMANO

Como visto na seção 3.2, o efeito da corrente elétrica no corpo humano depende da magnitude da corrente e do tempo de duração (DALZIEL, 2009). A magnitude da corrente, conforme a lei de ohm, depende da impedância e da tensão aplicada. Para o cálculo da corrente elétrica que percorre o corpo humano quando submetido a uma diferença de potencial, a norma IEC60479-1 recomenda que o circuito elétrico apresentado na Figura 7 seja utilizado. No circuito, o braço é representado por uma resistência de 200Ω em série com um circuito RC paralelo cuja resistência e capacitância são de $10 k \cdot \Omega$ e $0,25 \mu \cdot F$, respectivamente. As pernas representadas por uma resistência de 300Ω em série com um circuito RC paralelo com os mesmos valores de capacitância e resistência do braço. A cabeça representada por um circuito RC paralelo cuja resistência é de $10 k \cdot \Omega$ e a capacitância de $10 \mu \cdot F$. Por fim, o tronco é representado por uma resistência de 200Ω em série com outra resistência de 300Ω . Neste circuito, a corrente que circula no coração pode ser estimada pelo cálculo da corrente na resistência de 200Ω localizada no tronco.

Figura 7 – Representação do corpo humano para fenômenos transitórios.



FONTE: Adaptado de (COORAY, 2014).

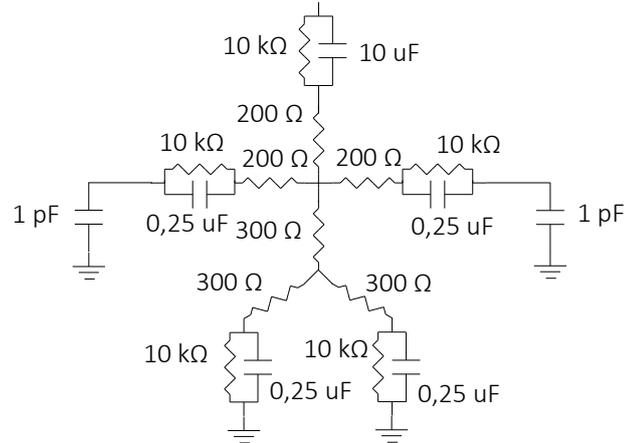
No caso da tensão de passo, para se ter a corrente que percorre o coração, é necessário considerar a interação entre as mãos e o solo, neste caso uma capacitância de $1 \text{ p} \cdot \text{F}$ é utilizada para representar o acoplamento eletromagnético das mãos com o solo (GAZZANA et al., 2014), caso o acoplamento eletromagnético entre as mãos e o solo não fossem consideradas não haveria uma corrente passando no coração do indivíduo devido a corrente elétrica buscar o menor caminho para a terra.

O valor C de $1 \text{ p} \cdot \text{F}$ foi obtido ao considerar a distância d entre as mãos abertas da pessoa como $0,85 \text{ m}$, a área A de contato entre a superfície do solo e a palma da mão sendo de $0,1 \text{ m}^2$ e ϵ_0 é a permissividade do ar na Equação 30.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (30)$$

A Figura 8 ilustra o circuito completo utilizado para análise da tensão de passo considerando a interação entre o solo e as mãos.

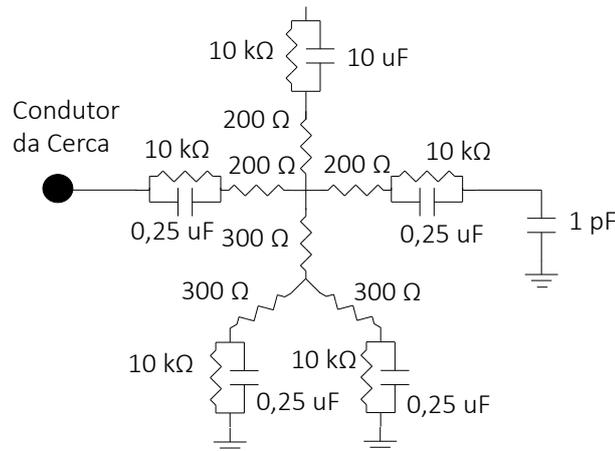
Figura 8 – Circuito elétrico corpo humano para cálculo da tensão de passo.



Fonte: Adaptado de (GAZZANA et al., 2014).

Por outro lado, a tensão de toque, a corrente que percorre o coração é função da diferença de potência entre o ponto de contato e os pés. Nestas condições, o circuito utilizado é descrito na Figura 9.

Figura 9 – Circuito elétrico do corpo humano para cálculo da tensão de toque.



Fonte: Adaptado de (GAZZANA et al., 2014).

4. ESTUDO DE CASO

Conforme descrito nos capítulos anteriores, poucos trabalhos na literatura abordam os efeitos de tensões e correntes impulsivas no corpo humano. Além disso, as normas brasileiras negligenciam seus efeitos quando das exigências de segurança a ser obedecida nos projetos de instalações elétricas ou infraestruturas próximas. Diante disto, neste capítulo são realizados estudos para investigar os efeitos das tensões induzidas por descargas atmosféricas em cercas próximas à redes de distribuição em indivíduos. As investigações visam identificar os riscos aos quais indivíduos, localizados nas circunvizinhanças das cercas, possam estar expostos quando da ocorrência de uma descarga atmosférica. Para esse fim, foi utilizado o referencial teórico dos capítulos anteriores, no qual foi abordado o fenômeno descarga atmosférica, modelos de acoplamento, modelo para haste de aterramento, equação para cálculo de potencial induzido no solo e modelo elétrico do corpo humano.

Desta forma, será apresentado o sistema geral a ser simulado (caso base), onde foi evidenciado uma cena em que um indivíduo fica exposto a tensões induzidas por uma descarga atmosférica. Para o entendimento do fenômeno, análises de sensibilidades são realizadas, nas quais são analisados os efeitos da distância entre a cerca e a linha, da resistividade do solo e da posição do indivíduo em relação ao ponto de aterramento.

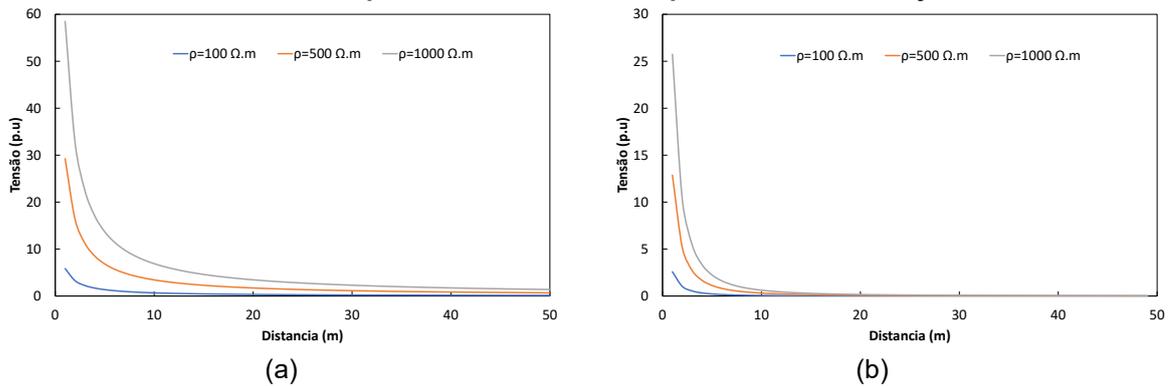
Na seção 4.1 é estudado o comportamento do potencial induzido no solo devido a uma injeção de corrente unitária em uma haste de aterramento, o que permite entender o comportamento do potencial na circunvizinhança do ponto de aterramento. Na seção 4.2 o sistema linha de transmissão, cerca e indivíduo é utilizado, em diferentes cenários, para analisar a influência dos diversos parâmetros envolvidos no cálculo e efeito das tensões de passo e toque. Sempre buscando evidenciar os riscos aos quais o indivíduo está exposto. Para cada situação simulada será analisado o comportamento das tensões de passo, tensão de toque, a corrente e carga elétrica que passa pelo coração da pessoa. A análise da corrente e da carga permitiu identificar se a pessoa sentirá os efeitos da corrente elétrica e qual o risco de desfibrilação ventricular.

4.1 POTENCIAL INDUZIDO NO SOLO DEVIDO A UMA CORRENTE INJETADA POR UMA HASTE DE ATERRAMENTO

Neste estudo considerou-se uma haste de 1,2 metros, para ilustrar o comportamento do potencial induzido no solo e nas proximidades, calculado pela Equação (27). Além disso, a influência da resistividade do solo também será analisada. Para tal, três diferentes valores de resistividades foram considerados a saber $\rho = 100 \Omega \cdot m$, $\rho = 500 \Omega \cdot m$ e $\rho = 1000 \Omega \cdot m$. Uma corrente constante de $1 p \cdot u.$ é injetada no solo via haste de aterramento, assim, o comportamento da tensão é função apenas dos parâmetros do solo e da distância do ponto de observação em relação a haste.

A Figura 10(a) ilustra o comportamento da tensão para os diferentes solos simulados para distâncias entre o ponto de observação e o eletrodo de 1 a 50 metros. Os resultados mostram que o potencial induzido aumenta com o aumento da resistividade do solo. Isso já era esperado, haja vista que pela Equação (27) o potencial é proporcional a resistividade do solo. Observa-se que em todos os solos o potencial induzido decresce exponencialmente com a distância. A elevada taxa de decaimento da tensão nas proximidades do condutor conduz a elevado potencial de passo nesta região (vide Figura 10(b)). Por outro lado, para distâncias superiores a 10 metros a taxa de variação da tensão induzida no solo é desprezível, vide Figura 10(b). Isso indica que indivíduos localizados a uma distância superior a 10 metros em relação ao ponto de aterramento, muito provavelmente não estarão expostos a tensão de passo perigosa, independente da resistividade do solo. Entretanto, solos de alta resistividade conduzem a tensões de passos mais elevadas nas proximidades do eletrodo, aumentando o risco de acidentes elétricos fatais.

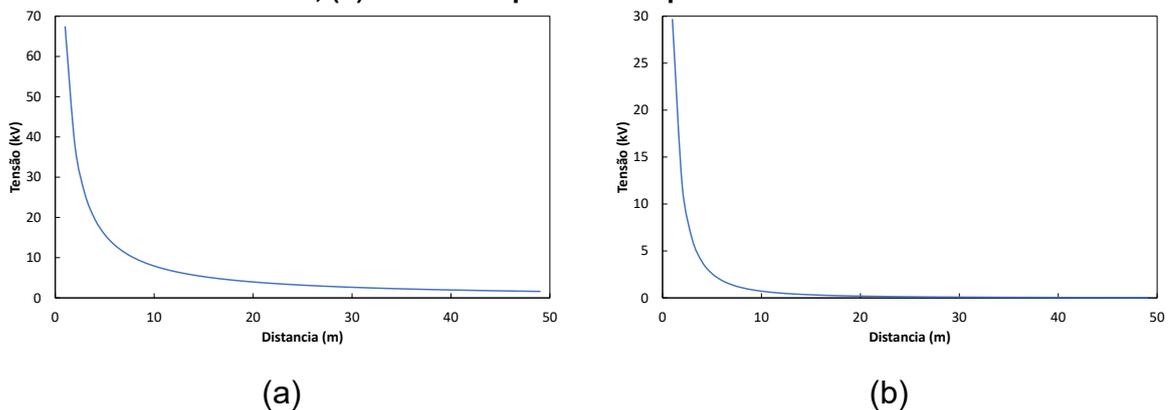
Figura 10 – Potencial induzido no solo devido a corrente de 1 p.u (a) e; (b) Tensão de passo calculada assumindo que a distância entre os pés do indivíduo seja de 1 metro.



FONTE: Autoria própria.

Para ilustrar o comportamento da tensão induzida quando da ocorrência de uma descarga atmosférica, as simulações são refeitas assumindo solo de $500 \Omega \cdot m$ e que a corrente na haste seja dada pela soma de duas funções de Heidler, cujos parâmetros são: $I_1 = 15,4 \text{ kA}$, $I_2 = 7,2 \text{ kA}$, $n_1 = 3,4$, $n_2 = 2$, $n_1 = 3,4$, $K_1 = 100 (\mu s)^{-1}$, $K_2 = 100 (\mu s)^{-1}$, $\tau_{11} = 0,6 \mu s$, $\tau_{12} = 4 \mu s$, $\tau_{21} = 4 \mu s$, $\tau_{22} = 120 \mu s$. Novamente as distâncias simuladas encontra-se em um intervalo de 1 a 50 metros. A Figura 11(a) descreve as tensões máximas calculadas em cada ponto de observação e a Figura 11(b) descreve a variação da tensão a cada 1 m ao longo da superfície do solo.

Figura 11 – Potencial induzido no solo assumindo corrente típica de descarga atmosférica (a) e; (b) Tensão de passo na superfície do solo.



FONTE: Autoria própria.

Pela Figura 11 é possível notar que o comportamento do valor máximo de tensão e a taxa de variação de tensão na superfície do solo (tensão de passo) é semelhante às curvas mostradas na Figura 10. Isso mostra que a taxa de variação da tensão com a distância é fortemente dependente dos parâmetros do solo. Mais uma vez, os resultados indicam que indivíduos localizados a mais de 10 metros do ponto de aterramento não serão expostos a tensão de passo perigosa. Contudo, a

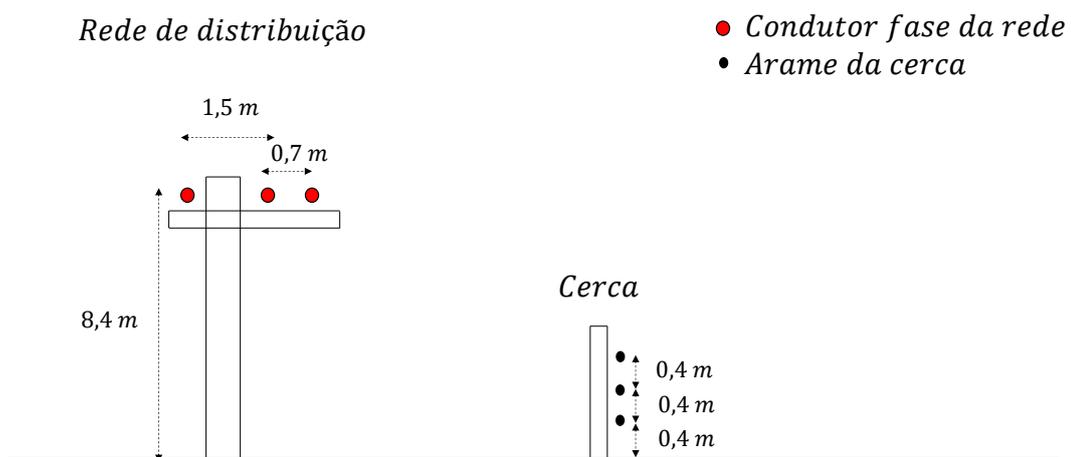
generalização dessa afirmação deve ser vista com cautela, haja vista que valores elevados de corrente ou de resistividade do solo podem aumentar a diferença de potencial em distâncias superiores a 10 metros.

4.2 TENSÃO DE PASSO E TOQUE NO SISTEMA LINHA-CERCA

4.2.1 Detalhes das simulações e modelos utilizados

Para análise das tensões de toque e passo o sistema simulado é constituído de uma linha de transmissão trifásica, tipicamente utilizada nos sistemas de distribuição no Brasil, em paralelo com uma cerca constituída de três arames. As distâncias entre condutores e respectivas disposições são apresentadas na Figura 12. No estudo de caso a distância entre a cerca e a linha de distribuição é definida por R_d . Os condutores da linha estão a $8,4\text{ m}$ em relação ao solo, possuem $4,1\text{ mm}$ de diâmetro, resistência DC de $0,11872\ \Omega\text{m}$ e não são providos de cobertura isolante. Os condutores da cerca possuem $1,2\text{ mm}$ de diâmetro e resistência DC de $0,11872\ \Omega\text{m}$. Tanto a linha quanto a cerca possuem 1 km de comprimento.

Figura 12 – Disposição dos condutores linha-cerca.

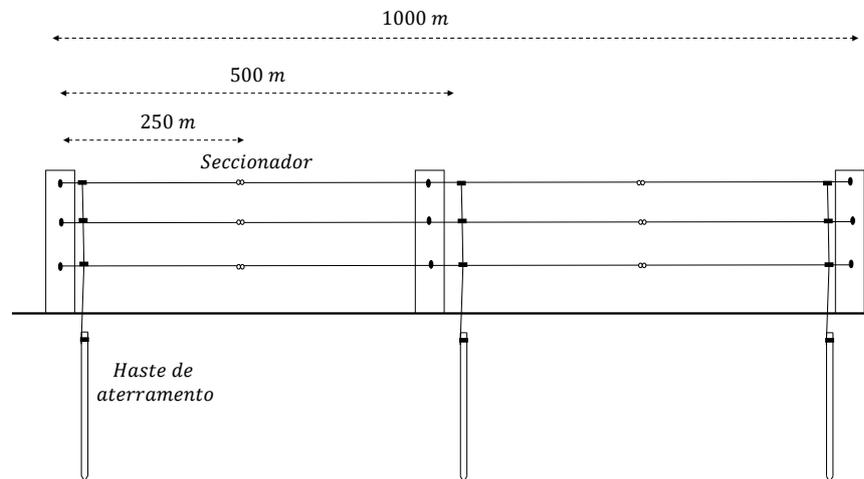


Fonte: Autoria própria.

Conforme a norma da Copel 814903 (2015) a cerca deve ser aterrada por uma haste de aterramento e seccionada a cada 500 m (intercalando aterramento e seccionamento). Então a cerca simulada será aterrada em suas terminações e no

ponto central. Além disto, a cerca é seccionada em dois pontos ambos distantes de 250 m das terminações. Para facilitar o entendimento o esquema de aterramento e seccionamento da cerca é ilustrado na Figura 13.

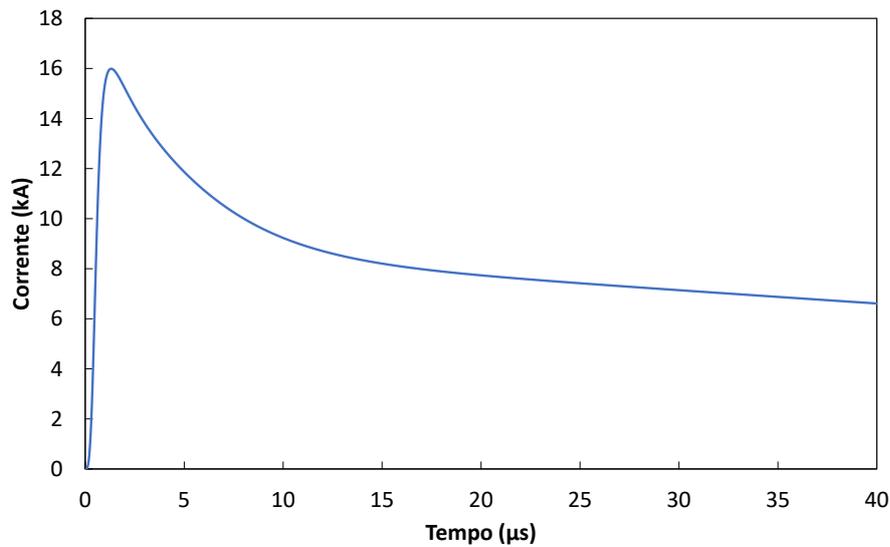
Figura 13 – Representação dos aterramentos e seccionamentos de cerca.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo das tensões induzidas nos condutores e no solo foi simulado uma descarga atmosférica incidente a 50 m do centro da linha, assumindo uma corrente injetada na base do canal dada por uma soma de duas funções de Heidler (Equação 2 e 3) cujos parâmetros são os mesmos citados na seção 4.1 – Figura 11. A forma de onda da corrente injetada na base do canal é mostrada na Figura 14, esta corrente na base do canal foi utilizada pois é de uma descarga atmosférica típica, existem descargas atmosféricas com correntes de retorno com amplitudes próximas a $200 k \cdot A$, porém sua probabilidade de ocorrer são baixas (ANDERSON; ERIKSSON, 198). Os campos eletromagnéticos são dados pelas Equações de (5), (6), (7), (8) e (9) (BARBOSA, 2009b) assumido que o canal de retorno possa ser representado pelo modelo TL (UMAN; MCLAIN, 1969).

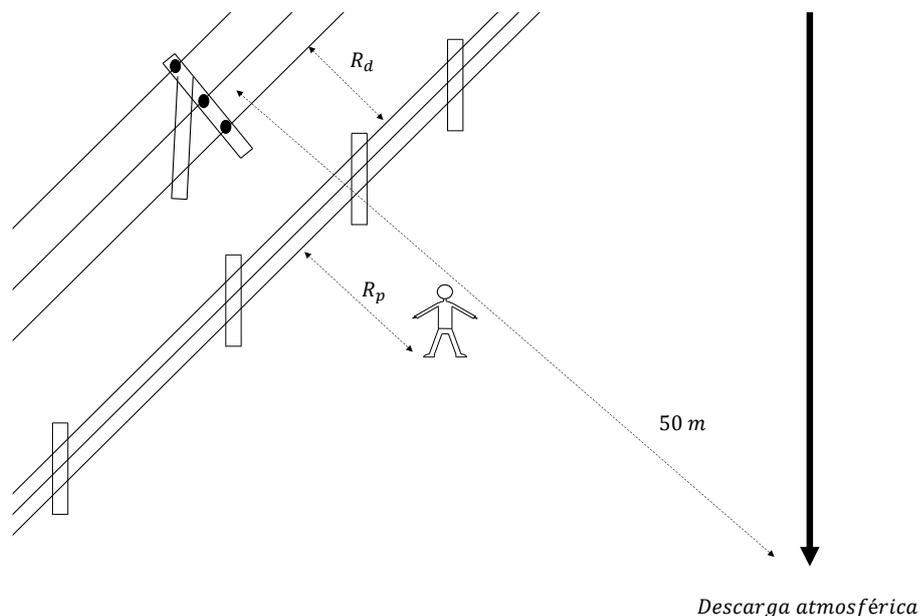
Figura 14 – Corrente injetada na base do canal.



Fonte: Autoria própria.

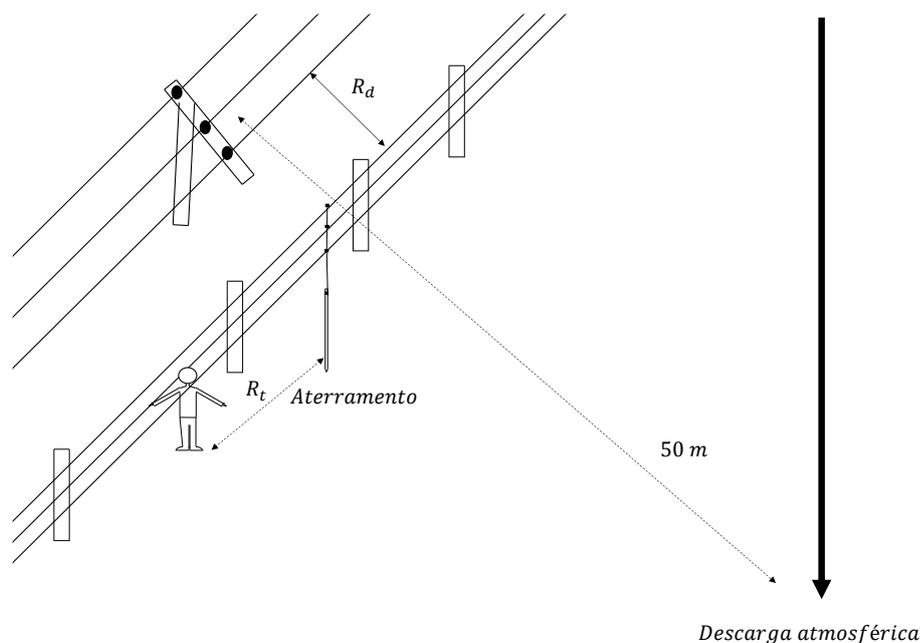
Na Figura 15 e 16 são ilustrados os sistemas simulados para o cálculo e análise das tensões de passo e toque respectivamente. Para a tensão de passo assume-se que o indivíduo se encontra a uma distância de R_p da cerca [vide Figura 15]. Por outro lado, para o cálculo da tensão de toque assume-se que o indivíduo toca o condutor da cerca a uma distância R_t em relação ao centro da cerca [vide Figura 16]. Para minimizar o efeito das reflexões devido a descontinuidade nas terminações da linha, um segmento de linha não iluminado foi conectado em cada terminação da linha de distribuição.

Figura 15 – Configuração do sistema para cálculo e análise da tensão de passo



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Configuração do sistema para cálculo e análise da tensão de toque

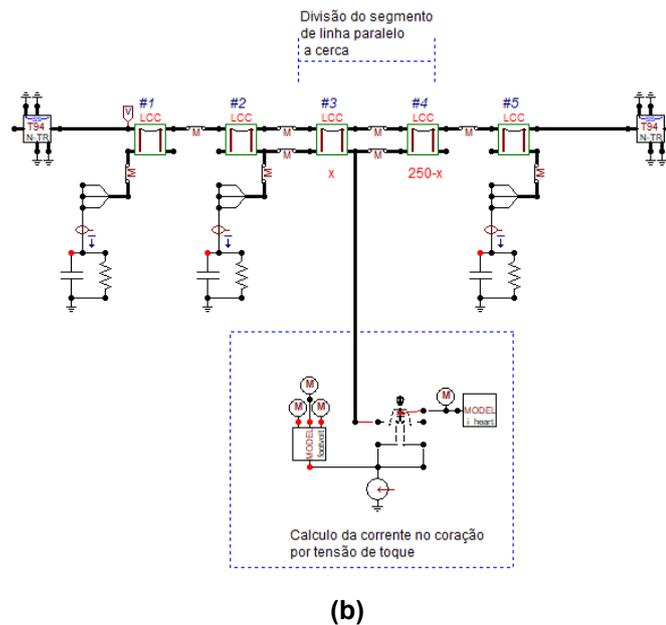
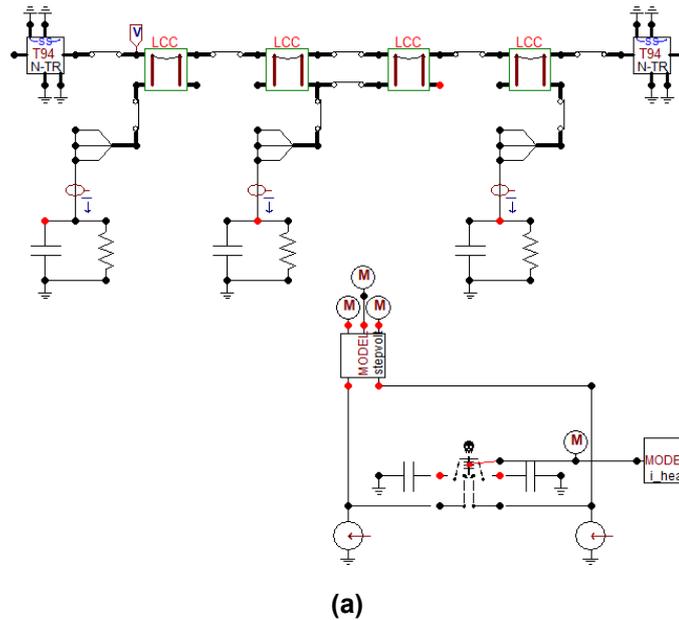


Fonte: Autoria própria.

Todas as simulações foram realizadas no software ATP onde o modelo ULM, proposto em (ATEF MORCHED, BJERN GUSTAVSEN, 1999) e implementado por Zanon, De Conti e Leal no ATP (ZANON, 2019), foi utilizado para modelagem da linha. O modelo EPD, proposto por De Conti e Leal (LEAL, 2013), cujas equações (19), (20), (21) e (22) são a base do modelo, foi utilizado para incluir o efeito dos campos eletromagnéticos externo ao modelo de linha. Em cada ponto de aterramento o circuito elétrico proposto por De Conti (DE CONTI, 2006) é utilizado para descrever o comportamento do aterramento. Além disto, os circuitos elétricos do corpo humano

mostrado nas Figuras 8 e 9 também foram implementados na plataforma ATP. Quando necessário, os potenciais induzidos no solo, dados pela Equação 27, foi calculada diretamente no ATP via código em linguagem MODELS³. Os circuitos completos, implementados no ATP, para o cálculo da tensão de passo e toque são mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Circuito implementado no ATP para (a) da tensão de passo; (b) da tensão de toque.



Fonte: Autoria própria.

³ A linguagem MODELS é uma linguagem própria do ATP que pode ser utilizada para implementar modelos não presentes no simulador ((PRIKLER; HØIDALEN, 1998)).

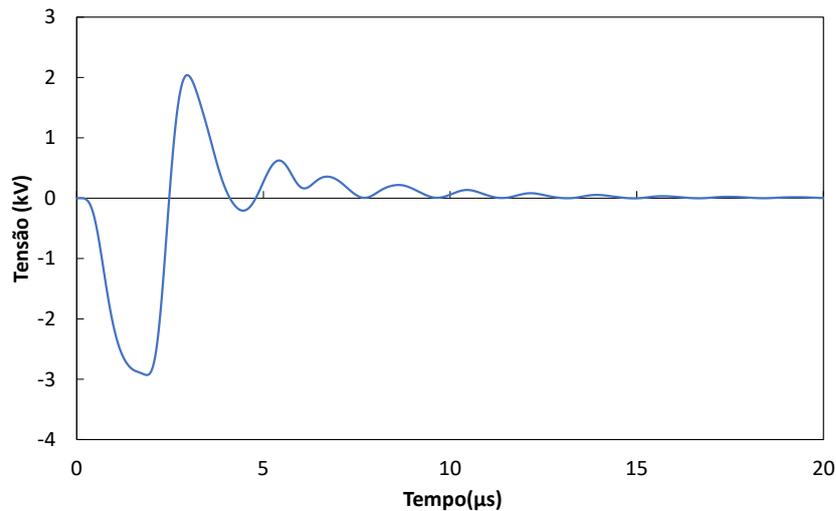
Cabe destacar em todos os trabalhos encontrados sobre o comportamento da corrente no coração devido a tensão de toque em linhas de transmissão (GAZZANA et al., 2014)(AMIRI; SADEGHI; MOINI, 2012)(PANTOJA et al., 2017)(JAFFA, 1981) modelam o transitório na linha de maneira independente da presença do indivíduo para, na sequência, calcular o comportamento da corrente no corpo do indivíduo. Dessa forma, a descontinuidade no circuito da linha (cerca), no ponto em que o indivíduo toca um de seus condutores é negligenciada. Na estratégia utilizada neste trabalho, para o cálculo da tensão de toque, a iteração entre o corpo humano e os condutores da linha é automaticamente incorporada. Isso porque, o modelo de linha é simulado juntamente com o circuito do corpo humano, caracterizando uma representação mais rigorosa do fenômeno.

Por fim, as integrais descritas nas Equações (28) e (29) (PORTELA, 1997), foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros que definem a possibilidade de fibrilação ventricular e/ou percepção de dor devido a circulação de corrente impulsiva no corpo humano. Ambas as equações também foram implementadas diretamente no ATP em linguagem MODELS. Por fim, para investigar a influência dos parâmetros do solo três resistividades de solo foram consideradas 100, 500 e 1000 Ωm .

4.2.2 Características da tensão de passo e toque.

O primeiro estudo de caso busca identificar a características das formas de onda de tensão de passo e tensão de toque. Para tal, foram assumidos que $R_d = 2 m$, $R_p = 10 m$ para o caso de tensão de passo e $R_t = 250 m$ para o caso de tensão de toque. A resistividade do solo analisado foi de $\rho = 1000 \Omega m$. Nas Figuras 18 e 20 são ilustradas as formas de onda da tensão de passo e da tensão de toque respectivamente.

Figura 18 – Tensão de passo para um indivíduo a 10 metros da linha.



Fonte: Autoria própria.

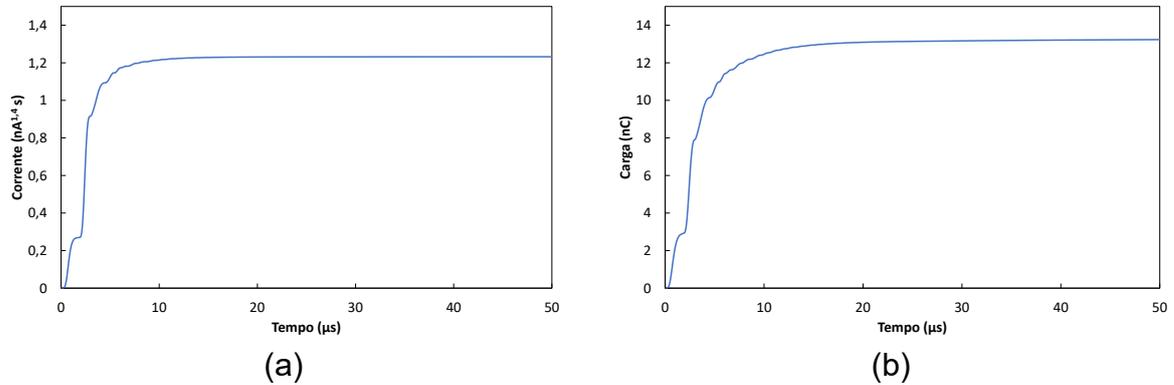
Pela Figura 18 é possível observar que a tensão de passo possui curta duração, com tempo de duração inferior a 15 μs . Resultado já esperado por se tratar de um transitório gerado por tensão induzida por descarga atmosférica. Além disso, sua forma de onda possui característica oscilatória. A forma oscilatória está associada às múltiplas reflexões que ocorrem em cada ponto das discontinuidades existentes ao longo dos condutores da cerca e/ou da linha de transmissão.

Ao se analisar a severidade $S_{1,4}$ e S_c é integralizado o módulo da corrente que passa no coração do indivíduo portanto a magnitude e o sinal das ondas não são o mais importante e sim a energia.

Em se tratando do risco para o indivíduo a Figura 19(a) mostra a evolução do fator de severidade $S_{1,4}$ e a Figura 19(b) mostra a carga total S_c ambos em relação ao coração. Pode-se notar que tanto $S_{1,4}$ quanto S_c crescem nos primeiros 10 μs , após este tempo a variação é praticamente nula, isso significa que há uma elevada taxa de variação de ambos os parâmetros somente nos primeiros instantes do fenômeno. É possível notar que o fator $S_{1,4}$ encontra-se abaixo do limiar de risco para causar a desfibrilação do coração, estando na ordem de nano amperes que seriam valores desprezíveis para o limiar de $1,52 mA^{1,4}s$. Além disto, como S_c é muito menor que $0,36 \mu C$, limiar definido para que o indivíduo possa sentir a circulação da corrente elétrica, neste caso a pessoa também não sentiria o efeito da corrente elétrica. Tais resultados confirmam que indivíduos localizados em uma distância superior a 10 metros do ponto de injeção de corrente não estão expostos a riscos de fibrilação e nem choques elétricos. Contudo, a generalidade dos resultados deve ser realizada

com cautela, haja vista que foram negligenciados dois efeitos: i) corrente conduzida pelo solo e ii) elevação de potencial devido a injeção de corrente no solo pela própria descarga atmosférica.

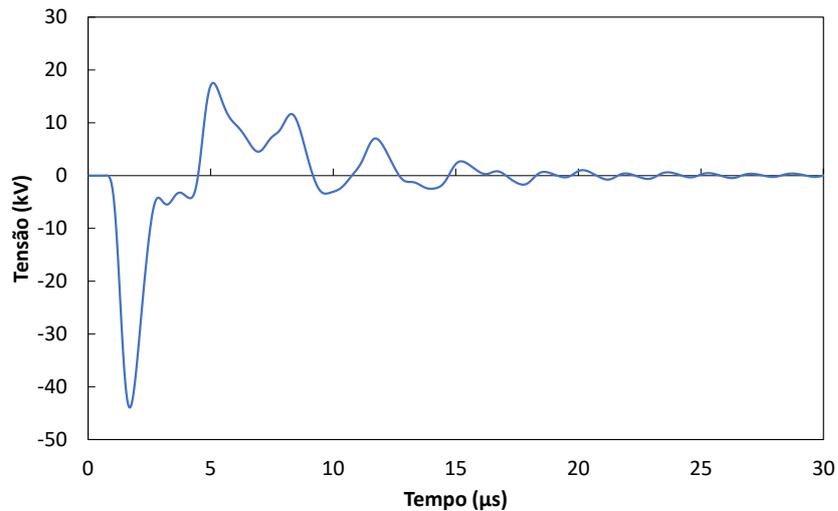
Figura 19 – Efeitos da corrente no coração (a) fator de severidade $S_{1.4}$ e; (b) carga elétrica S_c .



Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 ilustra a tensão de toque para um indivíduo tocando nos arames da cerca a uma distância $R_t = 250\text{ m}$ em relação ao centro da linha. Podemos observar que a tensão de toque também se trata de um fenômeno de curta duração (cujo tempo de duração é inferior a $20\ \mu\text{s}$), e, também, possuindo característica oscilatória com um primeiro pico cerca de duas vezes maior que o próximo pico. Porém, os valores observados são significativamente maiores que os valores de tensão de passo. Isso pode ser associado ao fato de que no caso de indivíduo distante do ponto de injeção de corrente (tensão de passo) a tensão sofre atenuação ao viajar pelo solo reduzindo significativamente os valores máximos observados. Além disso, a forma de onda da tensão de toque é ligeiramente diferente da tensão de passo (Figura 18). Isso pode estar associado a nova descontinuidade introduzida na cerca quando o indivíduo toca seu condutor. Essa nova descontinuidade faz surgir novas reflexões ao longo da linha, alterando a forma de onda da tensão observada.

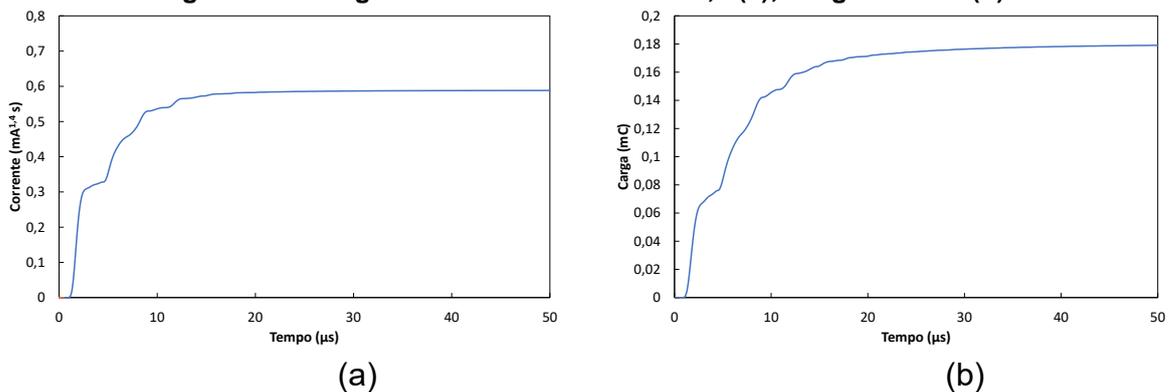
Figura 20 – Tensão de toque para um indivíduo a 10 metros da linha.



Fonte: Autoria própria.

Assim como realizado para a tensão de passo, o fator de severidade $S_{1.4}$ [Figura 21(a)] e a carga elétrica S_C [Figura 21(b)] é novamente calculada. A forma de onda do fator de severidade é mostrada na Figura 21(a). É possível observar que os valores são inferiores ao limiar de $1,52 \text{ mA}^{1.4}\text{s}$. O valor máximo observado é de $0,58 \text{ mA}^{1.4}\text{s}$, é em torno de 38,16 % do valor limiar de risco, o que indica um baixo risco de fibrilação no coração do indivíduo exposto. Entretanto, a carga elétrica que circula no coração, descrita na Figura 21(b), indica que em aproximadamente $0,3 \mu\text{s}$ o indivíduo começará a sentir o efeito da corrente elétrica, instante em que a carga ultrapassa o limite mínimo estabelecido para sentir a corrente, $0,36 \mu\text{C}$. Ademais, o valor máximo da carga chegará rapidamente a 23 vezes o limite mínimo, $7,6 \mu\text{C}$, para a percepção de dor (PORTELA, 1997). Portanto, o indivíduo exposto corre baixo risco de sofrer fibrilação ventricular, mas sentirá dores devido a passagem de corrente elétrica em seu corpo.

Figura 21 – Integral da corrente elevada a 1,4 (a); Carga elétrica (b).

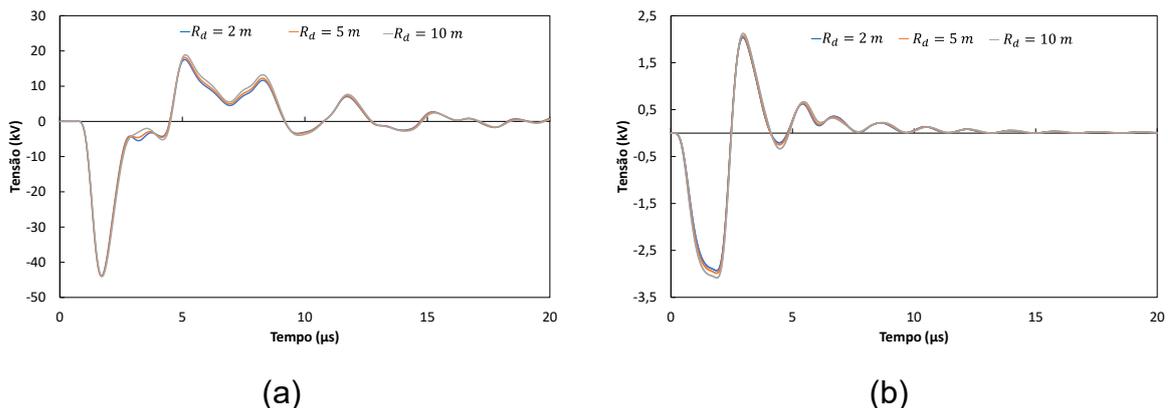


Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Influência da distância da cerca em relação à linha de transmissão

Neste estudo demonstra-se a influência da distância entre a cerca e a linha de transmissão nos valores de tensão de toque e passo aos quais o indivíduo estará exposto. Para isso, assume-se que $R_t = 250\text{ m}$, para análise de tensão de toque e $R_p = 10\text{ m}$ para análise de tensão de passo. Em ambos três diferentes valores de R_d foram considerados sendo 2, 5 e 10 metros. As formas de onda de tensão de passo e toque calculadas com os diferentes valores de R_d é apresentado na Figura 22. Pela Figura 22 não se observa variações significativas nas formas de onda tanto da tensão de passo quanto da tensão de toque. Ou seja, as formas de onda de ambas as tensões sofrem pouca influência da distância entre a linha e a cerca, R_d .

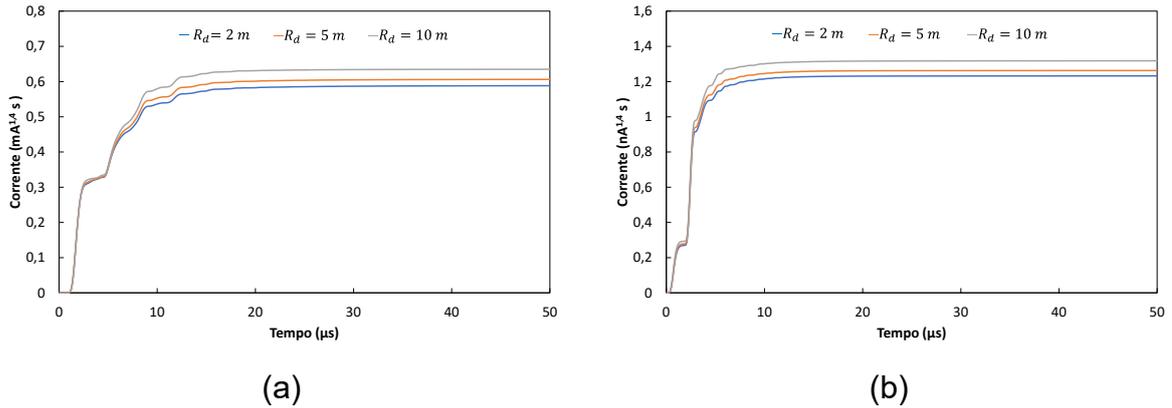
Figura 22 – Tensão com diferentes R_d para (a) toque e; (b) passo.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 23 é exibido o fator de severidade $S_{1,4}$ calculado com a tensão de passo e com a tensão de toque. Os resultados confirmam que a distância R_d não é um fator preponderante para alterar significativamente $S_{1,4}$ e que em nenhum caso o limiar de fibrilação foi superado. O leve aumento dos valores calculados para $S_{1,4}$ é causado pelo aumento da proximidade da cerca ao ponto de incidência de descarga que é mantido constante e igual a 50 m em relação a linha.

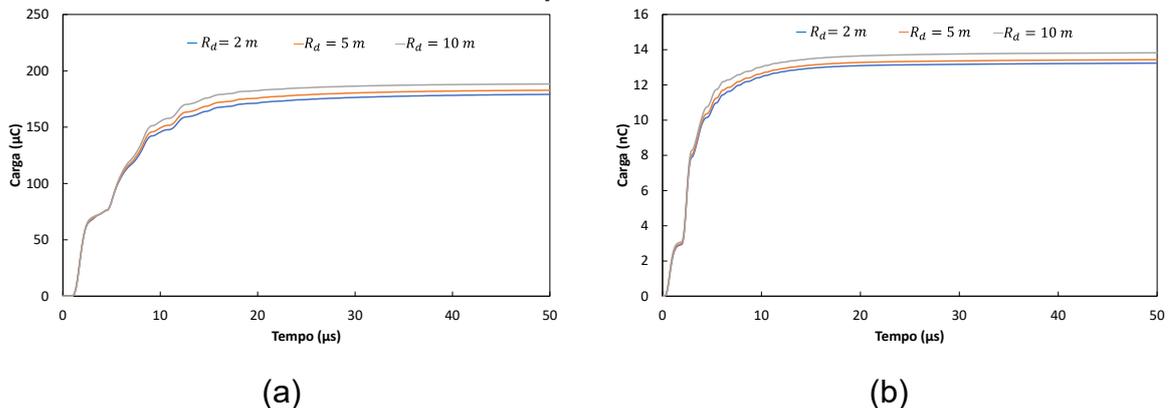
Figura 23 – Fator severidade com diferentes R_d para tensão de (a) toque e; (b) passo.



Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a carga elétrica no coração, para verificar o nível de percepção de choque elétrico, tanto para tensão de toque Figura 24(a), quanto para tensão de passo Figura 24(b) observa-se que o indivíduo não sentiria o efeito do choque elétrico quando distante da cerca, pois os valores de carga elétrica encontrados são abaixo da faixa de percepção de choque elétrico $0,36$ a $0,9\ \mu\text{C}$, entretanto, já nos instantes iniciais o indivíduo sentiria os efeitos do choque elétrico na forma de dor quando em contato direto com a cerca, haja vista que os valores calculados são cerca de 20 vezes maiores que o limiar de dor, $7,6\ \mu\text{C}$.

Figura 24 – Carga elétrica no coração com diferentes R_d para situações de (a) toque e; (b) passo.



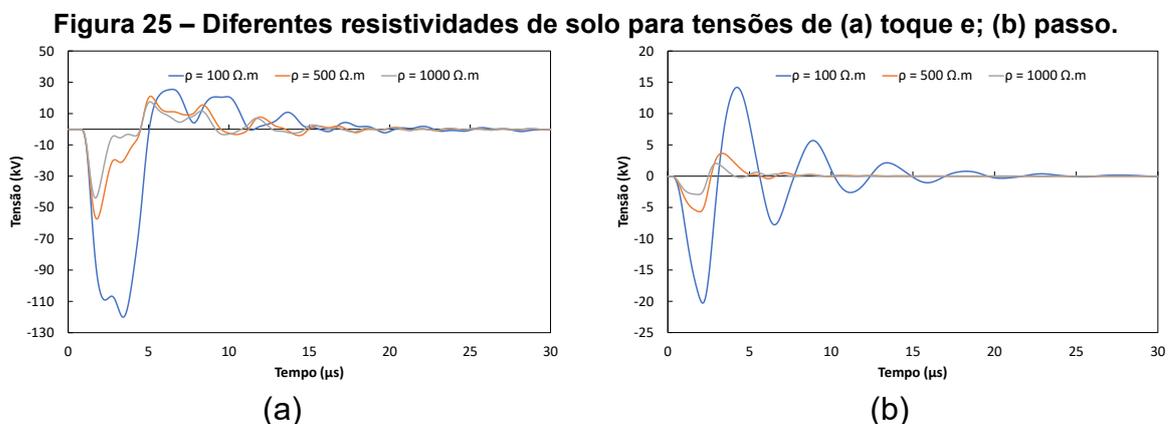
Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Influência da resistividade do solo

Neste estudo é analisado a influência do solo nos valores de tensão de toque e passo aos quais o indivíduo estará exposto. Para isso serão analisadas três resistividades de solo: $\rho = 100\ \Omega\text{m}$, $\rho = 500\ \Omega\text{m}$ e $\rho = 1000\ \Omega\text{m}$. Assim sendo, também deve-se mudar os valores de resistência e capacitância do modelo da haste

de aterramento no cartão do ATP de acordo com a resistividade do solo, já mostrado na Tabela 2. Uma vez mais, os parâmetros definidos na seção 4.2.1 são considerados assumindo $R_d = 2 m$, $R_t = 250 m$ (estudos de tensão de toque) e $R_p = 10$ (estudos de tensão de passo).

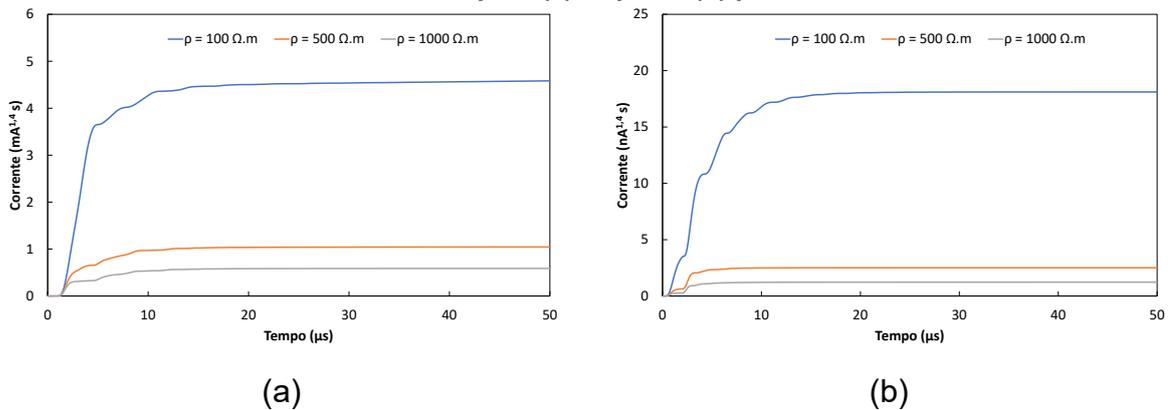
Ao analisar as Figuras 25(a) e (b) pode-se observar que a resistividade do solo é um fator que influencia diretamente nas amplitudes e na forma de onda das tensões de passo e toque. Sendo que há um aumento nos picos de tensão de passo e toque com a redução da resistividade do solo. Isso está intimamente ligado ao fenômeno de distorção e atenuação que as ondas eletromagnéticas sofrem ao longo dos condutores da linha de transmissão, da cerca e no solo. Com a redução da resistividade do solo tanto as distorções quanto as atenuações são reduzidas, condição inversa ao observado nos resultados apresentados na Figura 9. Isso indica que as distorções e atenuações dos campos eletromagnéticos, produzidos pela descarga atmosférica, que iluminam a linha são mais acentuadas que a elevação de potencial devido a resistividade do solo.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a severidade $S_{1,4}$ calculada para as tensões de toque Figura 26(a) e tensão de passo 26(b) se confirma que a resistividade do solo é um fator preponderante e que altera significativamente a severidade, pois, em ambos os casos com solos de resistividade $\rho = 100 \Omega.m$ os valores de $S_{1,4}$ são maiores do que nas resistividades de solo $\rho = 500 \Omega.m$ e $\rho = 1000 \Omega.m$. Contudo ainda assim nos casos da Figura 26(b) o indivíduo não corre risco de vida, para a Figura 26(a) o solo de $\rho = 100 \Omega \cdot m$ causaria a fibrilação do coração visto que em torno do tempo de $3 \mu s$ o limiar de $1,52 mA^{1,4}s$ foi superado chegando a três vezes este valor.

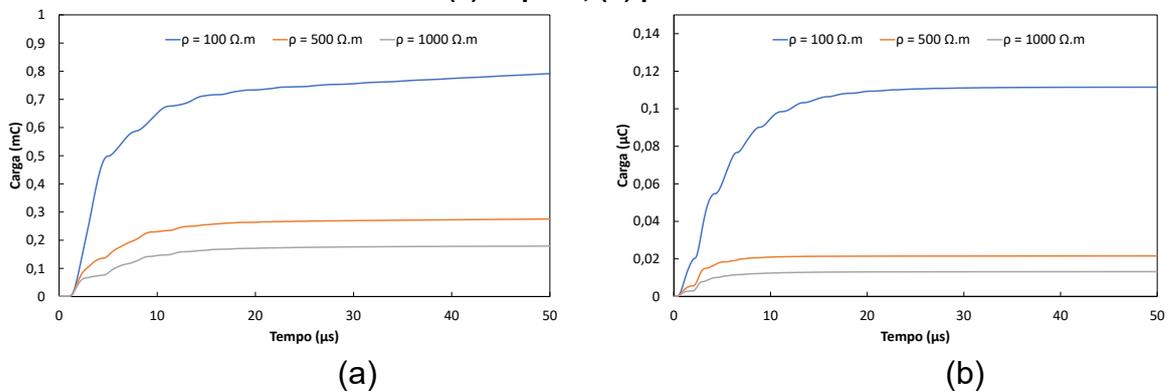
Figura 26 – Corrente integralizada elevada a 1,4 no coração com resistividades de solo variantes para (a) toque e; (b) passo.



Fonte: Autoria própria.

Observando a carga elétrica no coração quando o indivíduo está em contato direto com a cerca Figura 27(a), o valor do limiar de dor $7,6 \mu C$, é superado nos primeiros instantes de tempo. Entretanto quando distante da cerca Figura 27(b), os valores de carga elétrica encontrados são abaixo da faixa de percepção de choque elétrico $0,36$ a $0,9 \mu C$.

Figura 27 – Carga elétrica no coração com resistividades de solo variantes para de tensão de (a) toque e; (b) passo.

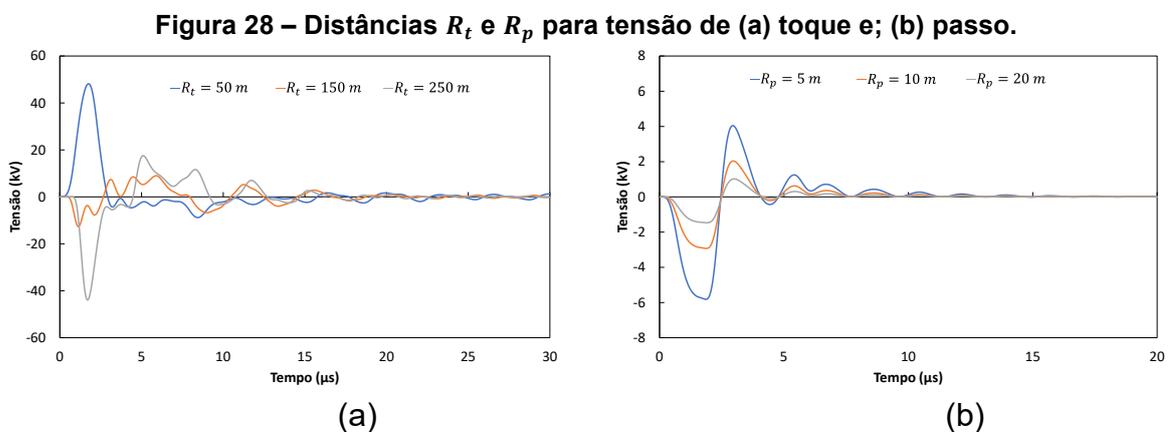


Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Influência da posição do indivíduo.

Este estudo objetiva analisar a influência da posição do indivíduo nas formas de onda da tensão de toque e tensão de passo. No caso da tensão de passo é assumido que o indivíduo esteja a uma distância R_p de 5, 10 e 20 metros. Por outro lado, para a tensão de toque a distância assumida é que R_t seja de 50, 150 e 250 metros. A distância entre a cerca e a linha R_d é de 2 m metros e a resistividade do solo é $\rho = 1000 \Omega.m$. Os demais parâmetros utilizados são descritos na seção 4.2.1.

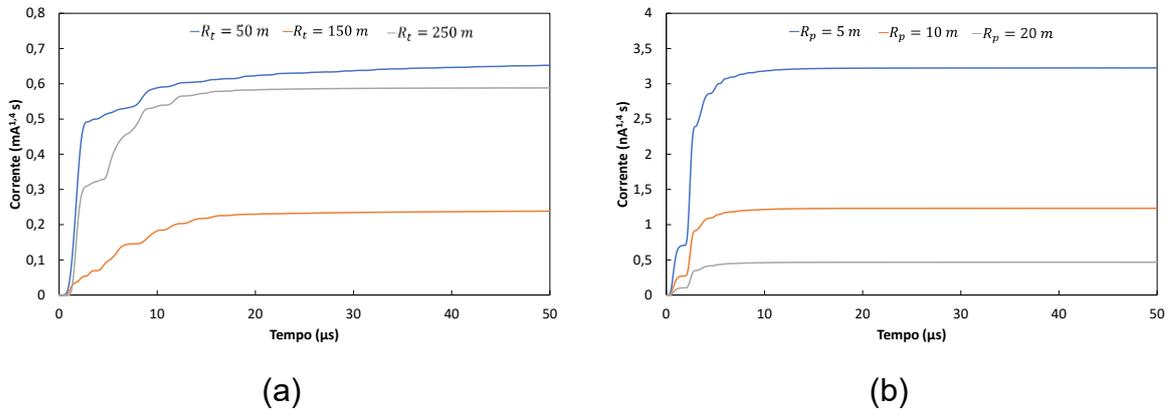
Conforme a Figura 28(b) é possível observar que ao se aumentar a distância R_p de 5 metros para 10 metros e posteriormente para 20 metros a tensão de passo diminui, como esperado, pois, conforme a Equação (27) potencial no solo é inversamente proporcional a distância. Para o caso da tensão de toque, Figura 28(a), a onda de tensão de $R_t = 50 m$ é a de maior amplitude. Isso porque quanto mais próximo do ponto de incidência da descarga atmosférica (localizado a 50 metros do centro da linha) maiores são os valores de tensão induzida nos condutores. É interessante notar que, exceto para o ponto em que $R_t = 50 m$, os primeiros picos de tensão de toque observados são negativos. Isso está associada a reflexão que ocorre no ponto de seccionamento da linha localizado a 250 metros do centro da linha. Com o seccionamento total dos condutores o coeficiente de reflexão é negativo alterando a polaridade da onda incidente nos pontos próximos. Na distância de $R_t = 150 m$ metros se observa que a tensão é mais baixa do que nos pontos de $R_t = 50 m$ e $R_t = 250 m$ pois ela é resultante de uma superposição das ondas de tensões viajantes nos condutores da cerca.



Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar o risco de fibrilação do coração na Figura 29 em nenhum caso o limiar de fibrilação foi superado. Indicando que o risco de fibrilação ventricular para indivíduos localizados nas proximidades da cerca é menor que tocando a cerca, haja vista em todos os casos simulados os valores encontrados para o fator de severidade $S_{1,4}$ são muito abaixo do limiar de fibrilação do coração. Para o caso de contato com a cerca a distância R_t é preponderante pois os valores encontrados nos casos de $R_t = 50 m$ e $R_t = 250 m$ são próximos do limiar de fibrilação do coração e no caso de $R_t = 150 m$ ficar mais distante do limiar, indicando que as regiões mais distantes de pontos de aterramento e seccionamento serem mais seguras.

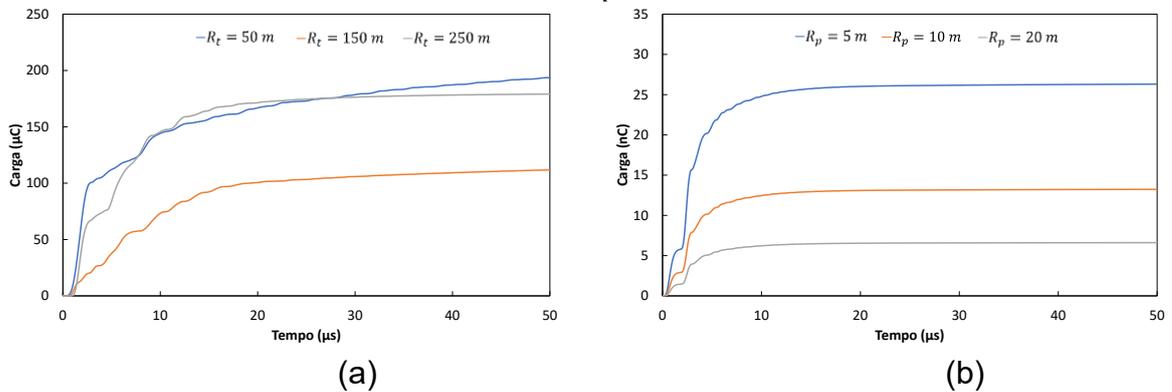
Figura 29 – Fator de severidade variando R_t e R_p para tensão de (a) toque e; (b) passo.



Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a carga elétrica no coração, para verificar o nível de percepção de choque elétrico, tanto para tensão de toque, Figura 30(a), quanto para tensão de passo Figura 30(b), observa-se que o indivíduo não sentiria o efeito do choque elétrico quando distante da cerca, confirmando que a distância R_p não é preponderante para a segurança, entretanto, já nos instantes iniciais o indivíduo sentiria os efeitos do choque elétrico na forma de dor quando em contato direto com a cerca, confirmando assim a importância da distância R_t .

Figura 30 – Carga elétrica variando R_t e R_p para tensão de (a) toque e; (b) passo.



Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÃO

Normas e regulamentações são indispensáveis para garantir a operação do sistema elétrico de forma segura, não devem visar apenas garantir o funcionamento seguro dos equipamentos elétricos conectados à rede elétrica, mas também, garantir que pessoas ou animais estejam seguros tanto nas vizinhanças, quanto no interior de tais instalações (NBR, 2019).

Entretanto, essas medidas de proteção são focadas em reduzir os riscos provocados por cargas induzidas em cercas próximas às linhas de transmissão quando operando em regime permanente senoidal. Porém, é importante verificar se tais critérios também oferecem proteção minimamente adequada, no momento do surgimento de transitórios eletromagnéticos como, por exemplo, sobretensões temporárias, curto-circuito e sobretensões provocadas por descargas atmosféricas.

O presente trabalho abordou o tema de tensões induzidas por descargas atmosféricas sobre cercas próximas à rede, analisando o risco para o ser humano em diferentes situações como: variações das distâncias da cerca e a rede, diferentes resistividades de solo e posição do indivíduo no sistema linha-cerca.

Foi apresentado uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno descargas atmosféricas e discutido os principais modelos de canal de retorno, cálculo dos campos eletromagnéticos, corrente de descarga, modelos de linha de transmissão e modelos de acoplamento. Além disso, uma revisão bibliográfica sobre os modelos do corpo humano e formulações para análise de risco ao quais o indivíduo está exposto, também é apresentada.

Através das análises das tensões de toque, passo e o cálculo do fator severidade $S_{1.4}$ foi possível tirar conclusões sobre o quanto as distâncias entre poste e cerca R_d , indivíduo e cerca R_p , indivíduo e ponto de aterramento central da cerca R_t e resistividade do solo ρ influenciam nos efeitos de tensões e correntes impulsivas no corpo humano.

Analisando a distância entre poste e cerca se chegou à conclusão que R_d não é um fator preponderante para a segurança do indivíduo para os valores de corrente na base do canal e demais distâncias do sistema linha-cerca apresentados, visto que as tensões de toque e passo sofreram pouca influência em suas amplitudes conforme se aumentava a distância R_d .

Para resistividade do solo, foi observado que ρ é um fator preponderante na segurança pois há um aumento nos picos de tensão de passo e toque com a redução da resistividade do solo. Isso está intimamente ligado ao fenômeno de distorção e atenuação que as ondas eletromagnéticas sofrem ao longo dos condutores da linha de transmissão, da cerca e no solo.

Observando os efeitos da posição do indivíduo R_p , os resultados indicam que o risco de fibrilação ventricular quando o indivíduo está exposto a tensão de passo é menor quando comparados a tensão de toque, visto que os valores de $S_{1.4}$ encontrados eram muito abaixo do limiar de fibrilação do coração e muito menor que os valores obtidos para tensão de toque. Entretanto, o ponto em que o indivíduo toca os condutores da cerca, distância R_t , indica que as regiões mais distantes de pontos de aterramento e seccionamento são mais seguras.

Contudo, a generalidade dos resultados deve ser realizada com cautela, haja vista que foram negligenciados os efeitos da: i) corrente conduzida pelo solo e ii) elevação de potencial devido a injeção de corrente no solo pela própria descarga atmosférica. Além disto, é necessário analisar diferentes pontos de incidência de descarga e diferentes correntes de retorno. Nesta direção, uma análise estatística é o mais indicado.

Por fim, para sugestão de trabalhos futuros, acredita-se ser interessante considerar o campo eletromagnético induzido pela descarga atmosférica no solo no cálculo dos potenciais no solo, com isso os valores de tensão de passo e toque estariam mais próximos da realidade. Além disso, utilizar equações mais rigorosas para caracteriza o comportamento das tensões na superfície do solo.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. H. Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-22, n. 2, p. 119–129, 1980.

AMIRI, E.; SADEGHI, S. H. H.; MOINI, R. A probabilistic approach for human safety evaluation of grounding grids in the transient regime. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 945–952, 2012.

ATEF MORCHED, BJERN GUSTAVSEN, M. T. A UNIVERSAL MODEL FOR ACCURATE CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS ON OVERHEAD LINES AND UNDERGROUND CABLES Atef Morched (SM) Bjmn Gustavsen* (M) Manoocher Tartibi. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 3, p. 1032–1038, 1999.

BARBOSA, F. Campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas: Uma abordagem analítica no domínio do tempo. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, 2009a.

BARBOSA, F. descargas atmosféricas : 2009b.

CAMPOS, M. A. DE. **MODELAGEM COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS**. [s.l.] UFMG, 1991.

COORAY, V. strokes z through where c is the speed of light in free space . This. **Earth**, v. 27, p. 529–537, 1992.

COORAY, V. **The Lightning Flash**. First edit ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2003.

COORAY, V. **The lightning flash: 2nd edition**. 2nd Editio ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2014.

COPEL. **Norma Técnica Copel: NTC 814903 - Arame de aço zincado para aterramento de cerca**. Curitiba, Pr, 1992.

COPEL. **Norma Técnica Copel: NTC 812094 - Haste de aterramento zincada para cerca**. Curitiba, Pr, 2013.

DALZIEL, C. F. Electric shock hazard. **IEEE Spectrum**, v. 9, n. 2, p. 41–50, 2009.

DE CONTI, A. R. Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas. **Universidade Federal de Minas Gerais**, p. 1–269, 2006.

GARCIA, D.; DUZZI, F. O setor elétrico. **Distribuição de energia**, p. 52, 2012.

GAZZANA, D. S. et al. A study of human safety against lightning considering the grounding system and the evaluation of the associated parameters. **Electric Power Systems Research**, v. 113, p. 88–94, 2014.

HEIDLER, F.; CVETIĆ, J. M.; STANIĆ, B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 399–404, 1999.

JAFFA, P. C. MAGNETIC FIELD INDUCTION FROM OVERHEAD TRANSMISSION AND DISTRIBUTION POWER LINES ON PARALLEL FENCES. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 4, p. 1624–1636, 1981.

LEAL, Ó. E. S. **Modelos no domínio do tempo para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG, 2013.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9ª Edição ed. São Paulo: Grupo Editorial Nacional, 2017.

MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, n. 1, p. 147–157, 1982.

NBR, A. B. D. N. T. **Norma Brasileira: ABNT NBR 15688 - Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. Brasília, DF, 2011.

PANTOJA, J. J. et al. Lightning grounding system of a tall-mast for human safety. **Electric Power Systems Research**, v. 153, p. 119–127, 2017.

PAOLONE, M. et al. Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, numerical simulations, and experimental validation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3 PART 1, p. 532–547, 2009.

PORTELA, C. Frequency and transient behavior of grounding systems. II. Practical application examples. **COPPE/UFIU, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil**, p. 385–390, 1997.

PRIKLER, L.; HØIDALEN, H. K. ATPDraw for windows 3.1x/95/NT, User 's Manual. n. 1, p. 189, 1998.

RAKOV, V. A. Lightning Electromagnetic Fields: Modeling and Measurements. **12th International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, p. 59–64, 1997.

RHODES, C. E.; GOLDE, R. H. Institution of electrical engineers: Awards. **Nature**, v. 147, n. 3733, p. 606, 1941.

RUBINSTEIN, M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 38, n. 3, p. 531–535, 1996.

SILVA, B. P. NOVO MODELO ELETROMAGNÉTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA CÁLCULO DA RESPOSTA DE SISTEMAS ELÉTRICOS FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. **Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**, p. 1–2, 2013.

SOMMERFELD, A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. **Annalen der Physik**, v. 367, n. 9, p. 95–96, 1920.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K. Magnetic Field of Lightning Return Stroke MARTIN. **Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, Pennsylvania 15235 The**, n. 28, 1969.

ZANON, F. DE O. S. Implementação do modelo ULM na plataforma ATP para o estudo de transitórios em linhas de transmissão aéreas com configuração assimétrica. 2019.